

Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur geologischen Standortbewertung, zur Analyse des regionalen Potentials und als Planungshilfsmittel für die thermische Nutzung des flachen Untergrundes bis 200m Tiefe als Wärmequelle und Wärmespeicher in Unterfranken/Bayern

**Dissertation zur Erlangung des
naturwissenschaftlichen Doktorgrades
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

vorgelegt
von

Roland Barthel

aus
Memmingen

Würzburg 2000

Eingereicht am:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

der Dissertation

1. Prüfer:

2. Prüfer:

der mündlichen Prüfung

Tag der mündlichen Prüfung:

Doktorurkunde ausgehändigt am:

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die dazu beigetragen haben, daß diese Arbeit entstehen konnte: Herrn Prof. Dr. P. Udluft, dem wissenschaftlichen Betreuer dieser Arbeit, Herrn Dr. G. Heinrichs, der als unermüdlicher „Ideenschmied“ auch für diese Arbeit den entscheidenden Anstoß gab, meinen langjährigen Zimmerkollegen Wolfgang und Eleni für die nicht immer nur arbeitsreichen Stunden in 007 und nicht zuletzt allen anderen Studenten, Diplomanden, Doktoranden und Mitarbeitern des Fachbereichs Hydrogeologie und des gesamten geologischen Instituts der Universität Würzburg für die ausgetauschten Erfahrungen oder einfach nur für die schöne Zeit im Pleicherwall 1.

Herrn Dr. B. Sanner vom Institut für Angewandte Geowissenschaften der Universität Gießen sei dafür gedankt, daß er mich in der Anfangsphase dieser Arbeit mit entscheidenden Literaturhinweisen versorgte und mir dabei half, die Schwerpunkte der Untersuchung richtig zu setzen. Er war es auch, der für mich die entscheidenden Weichen für einen durch ein Auslandsstipendium des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) geförderten Forschungsaufenthalt an der Dalhousie University in Halifax Nova Scotia, Canada stellte.

Meinen Kollegen Günter Kus und Christoph Külls danke ich für den fortwährenden Erfahrungsaustausch, der für mich die Grundlage für eine intensive Befassung mit dem Thema „Geoinformationssysteme“ und aller ihrer Tücken darstellte.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin Herrn Dr. H.-P. Ebert vom Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) Bayern, Abteilung 4, Würzburg für die jahrelange fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen von verschiedenen Projekten und nicht zuletzt auch für die kritische Durchsicht der Kapitel zu den physikalischen und technischen Grundlagen dieser Arbeit. In gleicher Weise hat sich Herr Dr. Jens Wrabel mit hilfreichen Korrekturen der geologisch und hydrogeologisch orientierten Themengebiete verdient gemacht.

Besondere Hochachtung gebührt meinem Bruder Erich, der sich tatsächlich die Mühe machte, sich mit dem Rotstift in der Hand durch das komplette Werk zu kämpfen. Dank auch allen anderen, die Teile der Arbeit in gleicher Weise bearbeiteten: Astrid, John und Martina.

Zu guter Letzt soll nicht unerwähnt bleiben, daß diese Arbeit durch ein Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde. Für die finanzielle Unterstützung, die angenehme Betreuung und die Möglichkeit zur Teilnahme an äußerst interessanten und unterhaltsamen Veranstaltungen auch dorthin vielen Dank.

Inhaltsverzeichnis

Summary	13
Zusammenfassung	15
1 Einleitung	17
1.1 Thermische Nutzung des flachen Untergrundes	17
1.2 Regenerative Energien - aktuelle Situation und Entwicklungen	17
1.3 Stellung der oberflächennahen thermischen Nutzung des Untergrundes	19
1.4 Problemstellung der Untersuchung	20
1.5 Untersuchungsgebiet	23
1.6 Stand der Erkenntnisse im Bereich GIS-gestützter Potentialstudien für die thermische Nutzung des Untergrundes	23
1.7 Informationsquellen zur thermischen Nutzung des Untergrundes	24
1.7.1 Verbände und Institutionen	24
1.7.2 Literatur	24
1.7.3 Tagungen	25
1.8 Vorbemerkungen	26
2 Technische, physikalische und hydrogeologische Grundlagen	27
2.1 Physikalische und energietechnische Grundbegriffe	27
2.2 Technische Hilfsmittel	28
2.2.1 Wärmepumpen	28
2.2.1.1 Funktionsweise	28
2.2.1.2 Wirkungsgrad	29
2.2.1.3 Wärmequellen	30
2.2.1.4 Wärmepumpen als Systemkomponente	31
2.2.1.5 Umweltaspekte	31
2.2.1.6 Literatur	33
2.2.2 Erdsonden	33
2.3 Physikalische und hydrogeologische Grundlagen der thermischen Nutzung des Untergrundes	35
2.3.1 Hydro- und bodenphysikalische Parameter und Prozesse	35
2.3.1.1 Wasser im Untergrund	35
2.3.1.2 Sedimentpetrographische und hydrophysikalische Größen	35
2.3.1.3 Wasser in der gesättigten Zone	37
2.3.1.3.1 Grundwasserbewegung	38
2.3.1.3.2 Charakterisierung von Aquiferen und Brunnen	40
2.3.1.4 Wasser in der ungesättigten Zone	41
2.3.1.4.1 Sättigungsgrad	42
2.3.1.4.2 Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone	42
2.3.2 Thermische Parameter und Prozesse im Untergrund	44
2.3.2.1 Wärmetransportvorgänge	44
2.3.2.1.1 Wärmeleitung	44
2.3.2.1.2 Konvektiver Wärmetransport	45
2.3.2.2 Bestimmung thermischer Kenngrößen	47
2.3.2.2.1 Berechnung der volumetrischen Wärmekapazität ρc	50
2.3.2.2.2 Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_e	50
2.3.2.2.3 Zusammenhänge zwischen thermischen und anderen Gesteinseigenschaften	53
2.3.2.3 Thermische Prozesse in der ungesättigten Zone	56
2.3.2.3.1 Bedeutung für die thermische Nutzung	56
2.3.2.3.2 Experimentelle Untersuchungen zu Austrocknungsphänomenen	57
2.3.2.3.3 Schätzverfahren zur Beurteilung des Austrocknungsrisikos	58
2.3.2.4 Temperaturverteilung im Untergrund	59
2.3.2.4.1 Saisonale Temperaturschwankungen im flachen Untergrund	59

2.3.2.4.2	Temperaturen im tieferen Untergrund	61
2.3.2.4.3	Bedeutung für die thermische Nutzung des Untergrundes	61
3	Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrunds	62
3.1	Speicherung thermischer Energie (Wärme und Kälte)	62
3.1.1	Bautypen von Untergrundspeichern	62
3.1.1.1	Tanks	63
3.1.1.2	Beckenspeicher (pit storage)	63
3.1.1.3	Kavernen	64
3.1.1.4	Aquiferspeicher	64
3.1.1.4.1	Speichertypen und -konzepte	64
3.1.1.4.2	Geologische Voraussetzungen	65
3.1.1.4.3	Hydrochemische und biologische Aspekte	67
3.1.1.4.4	Genehmigungsrechtliche Aspekte	67
3.1.1.5	Speicherung mit vertikalen Erdreichwärmetauschern	68
3.1.1.5.1	Bohrlochspeicherung	69
3.1.1.5.2	Erdsondenspeicherung	70
3.1.1.5.2.1	Speicheraufbau	70
3.1.1.5.2.2	Geologische Voraussetzungen	70
3.1.2	Kenngößen von Untergrundwärmespeichern	72
3.1.3	Speicherverluste und Speicherwirkungsgrad	73
3.1.3.1	Speicherverluste durch Konvektion	75
3.1.3.2	Speicherverluste durch Wärmeleitung	75
3.1.4	Einfluß von Systemparametern auf das Verhalten von Erdsondenwärmespeichern	77
3.1.4.1	Grundlegende Überlegungen	77
3.1.4.2	Untergrundparameter	78
3.1.4.2.1	Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität	78
3.1.4.2.2	Untergrundtemperatur	80
3.1.4.2.3	Hydrogeologische Parameter	80
3.1.4.3	Systemparameter	80
3.1.4.3.1	Speichertemperatur (T_{\max} und T_{\min})	80
3.1.4.3.2	Speichergröße und -geometrie	81
3.1.4.3.3	Sondenanzahl, -länge und -abstand	82
3.1.4.3.4	Sondentyp, Bohrlochradius, Verfüllmaterial	82
3.1.4.4	Zusammenfassung	82
3.1.5	Kosten von Untergrundspeichern	82
3.1.6	Aktuelle Entwicklung der Untergrundspeicherung	83
3.1.6.1	Realisierte Projekte	83
3.1.6.2	Entwicklungen	84
3.2	Verfahren zur Wärmeengewinnung	85
3.2.1	Grundwassergekoppelte Wärmepumpen	85
3.2.1.1	Anlagenaufbau, Technik	85
3.2.1.2	Anforderungen an den Untergrund	86
3.2.1.2.1	Grundwassertemperatur	86
3.2.1.2.2	Thermische Eigenschaften	86
3.2.1.2.3	Hydrogeologische Verhältnisse	86
3.2.2	Gewinnung von Wärme und Kälte mit Erdsonden	88
3.2.2.1	Anforderungen an den Untergrund	89
3.2.2.1.1	Untergrundtemperaturen	89
3.2.2.1.2	Thermische Eigenschaften	89
3.2.2.1.3	Hydrogeologische Eigenschaften	90
3.2.2.1.4	Einfluß anderer Untergrundeigenschaften	91
3.2.2.2	Dimensionierung von Erdsondenanlagen	91
3.2.2.3	Energiepfähle	94
3.2.3	Vergleich der Entzugsverfahren	94
3.3	Kombinierte Nutzungen	94
3.4	Direkte Kühlung	95

3.5	Umweltrisiken durch thermische Nutzung des Untergrundes	96
3.5.1	Auswirkungen auf das Grundwasser	96
3.5.2	Auswirkungen auf die Vegetation	97
3.6	Rechtliche Aspekte der thermischen Nutzung des Untergrundes	97
3.6.1	Bergrecht	97
3.6.2	Wasserrechtliche Zulassungsverfahren	97
4	Geologie und Hydrogeologie im Untersuchungsgebiet	99
4.1	Erläuterungen zur geologischen Beschreibung	99
4.1.1	Verwendete und weiterführende Literatur	99
4.1.2	Betrachtungsmaßstab	99
4.1.3	Besonderheiten und Schwerpunkte	100
4.2	Geologisch-geomorphologische Übersicht	100
4.2.1	Oberflächenform	100
4.2.2	Gesteine	101
4.2.3	Historisch-geologischer Überblick	102
4.2.4	Stratigraphischer Überblick	103
4.3	Geologisch-hydrogeologische Beschreibung der Schichtenfolge in Unterfranken	104
4.3.1	Kristallines Grundgebirge	104
4.3.1.1	Geologie	104
4.3.1.2	Hydrogeologische Verhältnisse	105
4.3.1.3	Petrographie und thermische Parameter	105
4.3.2	Paläozoikum	106
4.3.2.1	Rotliegend (<i>r</i>)	106
4.3.2.2	Zechstein (<i>z</i>)	106
4.3.2.3	Bröckelschiefer (<i>suB*</i>)	107
4.3.3	Buntsandstein (<i>s</i>)	107
4.3.3.1	Verbreitung, Bedeutung und Gliederung	107
4.3.3.2	Unterer und Mittlerer Buntsandstein (<i>su-sm</i>)	109
4.3.3.2.1	Geologie	109
4.3.3.2.2	Hydrogeologie	110
4.3.3.2.3	Sedimentpetrographische und thermische Eigenschaften	112
4.3.3.3	Oberer Buntsandstein (<i>so</i>)	114
4.3.4	Muschelkalk (<i>m</i>)	115
4.3.4.1	Verbreitung, Bedeutung und Gliederung	115
4.3.4.2	Geologie	115
4.3.4.2.1	Unterer Muschelkalk (<i>mu</i>)	116
4.3.4.2.2	Mittlerer Muschelkalk (<i>mm</i>)	116
4.3.4.2.3	Oberer Muschelkalk (<i>mo</i>)	118
4.3.4.3	Hydrogeologie	118
4.3.4.3.1	Unterer Muschelkalk	118
4.3.4.3.2	Mittlerer Muschelkalk	119
4.3.4.3.3	Oberer Muschelkalk	120
4.3.4.3.4	Verkarstung im Muschelkalk	120
4.3.4.3.5	Hydrochemische Verhältnisse	121
4.3.4.4	Sedimentpetrographische und thermische Eigenschaften	122
4.3.4.4.1	Karbonatgehalte	122
4.3.4.4.2	Porenvolumen, Wassergehalt und Sättigungszustand	122
4.3.4.4.3	Thermische Parameter	123
4.3.5	Keuper (<i>k</i>)	124
4.3.5.1	Verbreitung, Bedeutung und Gliederung	124
4.3.5.2	Geologie	124
4.3.5.2.1	Unterer Keuper (<i>ku</i>)	124
4.3.5.2.2	Mittlerer Keuper (<i>km</i>)	125
4.3.5.2.3	Oberer Keuper (<i>ko</i> , Rhät)	126
4.3.5.3	Hydrogeologie	126
4.3.5.4	Hydrochemische Verhältnisse	127

4.3.5.5	Mineralogische und thermische Eigenschaften	127
4.3.6	Jura (j)	127
4.3.7	Tertiär (T)	128
4.3.7.1	Vulkanite und Pyroklastika	128
4.3.7.2	Tertiäre Sedimente	129
4.3.7.2.1	Rhön	129
4.3.7.2.2	Aschaffener Raum (Untermaingebiet)	129
4.3.8	Quartär – Mainquartär (Q)	130
4.3.8.1	Verbreitung und Bedeutung	130
4.3.8.2	Literatur und Datenquellen	130
4.3.8.3	Geomorphologie	130
4.3.8.4	Geologischer Aufbau	132
4.3.8.5	Hydrogeologie	132
4.3.8.5.1	Charakterisierung des Aquifers	132
4.3.8.5.2	Hydraulischer Zusammenhang mit der Festgesteinsbasis	134
4.3.8.5.3	Grundwasserdynamik	134
4.3.8.5.4	Grundwasserneubildung - Grundwassererschließung	134
4.3.8.5.5	Hydrochemische Verhältnisse	135
4.3.8.5.6	Grundwassertemperaturen	135
4.3.8.6	Sedimentpetrographie - Thermische Parameter	136
4.3.8.7	Besonderheiten der morphologisch-geologischen Maintalabschnitte	137
4.3.8.7.1	Aschaffener Becken	137
4.3.8.7.2	Das Buntsandsteingebiet (Sulzbach bis Karlstadt)	140
4.3.8.7.3	Muschelkalkgebiet (Karlstadt bis Wipfeld)	141
4.3.8.7.4	Schweinfurter Becken	143
4.3.8.7.5	Muschelkalk und Unterer Keuper östlich des Schweinfurter Beckens	143
4.3.8.7.6	Unterer Keuper östlich von Haßfurt	144
4.3.8.8	Andere quartäre Bildungen	144
4.4	Geologisch-hydrogeologische Gesamtübersicht	144
4.4.1	Strukturgeologischer Überblick	144
4.4.2	Karsterscheinungen	146
4.4.3	Grundwasserstockwerke in Unterfranken	146
4.4.4	Regionale Verteilung von Wasserwegsamkeiten	147
4.4.5	Grundwasserdynamik	148
4.4.6	Untergrundtemperaturen	148
4.4.7	Bohrbarkeit der Gesteine	149
5	Möglichkeiten der thermischen Nutzung des Untergrunds in Unterfranken	151
5.1	Geologisch-hydrogeologische Aspekte von Übersichtsbewertungen	151
5.1.1	Grundwassersituation	151
5.1.2	Mächtigkeit und Lage von Einheiten im Schichtenverband	152
5.2	Anwendbarkeit der Speicherverfahren in Unterfranken	153
5.2.1	Allgemeine Limitierungen für Speicherverfahren	153
5.2.2	Aquiferspeicherung	153
5.2.2.1	Kluft- und Karstaquifere in Unterfranken	153
5.2.2.2	Lockergesteinsaquifere - Porengrundwasserleiter	153
5.2.2.3	Trinkwasserschutz – rechtliche Aspekte	154
5.2.2.4	Aquiferspeicher in Unterfranken - Fazit	154
5.2.3	Erdsondenwärmespeicherung	154
5.2.3.1	Festlegung prinzipiell geeigneter Einheiten und Bereiche	154
5.2.3.2	Festlegung eines Eignungsgrades nach lithologischen Kriterien	156
5.2.3.2.1	Tonsiltsteine	157
5.2.3.2.2	Kalk- und Kalkmergelsteine	157
5.2.3.2.3	Mergelige bis tonige Gesteine	158
5.2.3.2.4	Sandsteine	158
5.2.3.2.5	Wechselfolgen – heterogen aufgebaute Abfolgen	159
5.2.3.2.6	Kristallingebiete	159
5.2.3.2.7	Andere Gesteine - Mainquartär	159

5.2.3.3	Grundwassersituation und Gesteinseinheiten – Kombinierte Bewertung	160
5.2.3.4	Erstellung einer Karte der für die ESWSp geeigneten Gebiete in Unterfranken	160
5.2.3.5	Erdsondenwärmespeicherung in Unterfranken - Fazit	163
5.2.4	Andere Speicherverfahren	163
5.3	Anwendbarkeit der Wärmeentzugsverfahren in Unterfranken	164
5.3.1	Vertikale Erdsonden	164
5.3.1.1	Festlegung eines Eignungsgrades nach lithologischen Kriterien	164
5.3.1.2	Einfluß von Grundwasser auf die Eignung	164
5.3.1.3	Bewertung der lithologischen Einheiten	165
5.3.1.4	Erstellung einer Karte der für die EWS geeigneten Gebiete	165
5.3.1.5	Erdwärmesonden in Unterfranken - Fazit	166
5.3.2	Grundwassergekoppelte Wärmepumpen (GWWP)	166
5.3.2.1	Kluft- und Karstaquifere der Trias)	167
5.3.2.2	Mainquartär	167
5.3.2.2.1	Abschätzung möglicher Grundwasserentnahmemengen aus dem Mainquartär	169
5.3.2.2.2	Nicht-geologische Einflußfaktoren	171
5.3.2.3	Grundwassergekoppelte Wärmepumpen in Unterfranken - Fazit	172
5.4	Eignung der Verfahren der thermischen Nutzung in Unterfranken - Zusammenfassung	172
6	Geoinformationssysteme (GIS)	175
6.1	Grundlagen	175
6.1.1	Begriffsdefinition, Einsatzgebiete und Entwicklungen	175
6.1.2	Konzepte, Strukturen und Methoden	176
6.1.2.1	Daten und Objekte	176
6.1.2.2	Räumliches Bezugssystem - Koordinatensysteme und Projektionen	176
6.1.2.3	Raster- und Vektor- Objektmodell	177
6.1.2.4	Datenbanken und Datenverwaltung	179
6.1.2.5	Methoden und Analyseverfahren	179
6.1.2.6	Automatisierung und Anwendungsprogrammierung	179
6.1.2.7	Modelle in GIS	179
6.1.2.8	Organisation, Konzeption und Ablauf von GIS-Projekten	180
6.2	GIS-Einsatz im Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes	182
6.2.1	Abgrenzung des GIS-Begriffs	182
6.2.1.1	Mögliche Zielsetzungen	182
6.2.1.2	Betrachtungsmaßstab	184
6.2.1.3	Ausdehnung von GIS-Projekten	184
6.2.1.4	Ausgabe-, Darstellungs- und Nutzungsmöglichkeiten von GIS	185
6.2.1.5	Definition des GIS-Begriffs in der vorliegenden Untersuchung	186
6.2.2	GIS-Anwendungen und Potentialkartierungen anderer Autoren	186
6.2.3	Praktische Möglichkeiten des GIS-Einsatzes	188
6.2.3.1	GIS zur Erstellung von Kartenwerken	188
6.2.3.1.1	Potentialkarten	188
6.2.3.1.2	Planungskarten	190
6.2.3.1.3	Karten zur Darstellungen rechtlicher Gegebenheiten	191
6.2.3.2	GIS als Planungsinstrument	191
6.2.3.3	Kombination von Kartierungen und Planungsinstrumenten	192
6.3	GIS - Daten	194
6.3.1	Bedeutung von Daten im GIS	194
6.3.2	Datentypen, -quellen und -dimensionen	194
6.3.3	Datenqualität	195
6.3.4	Datenverfügbarkeit	196
6.3.5	Datenbeschaffung	197
6.3.6	Daten in der vorliegenden Untersuchung	198
6.3.6.1	Ermittlung der notwendigen Daten	198
6.3.6.2	Charakterisierung der verwendeten Datenquellen	198
6.3.6.3	Datenaufbereitung	199
6.3.6.4	Beschreibung der verwendeten Datensätze und Datenquellen	201

6.3.6.4.1	Untergrunddaten - Geologie	201
6.3.6.4.2	Oberflächendaten – Topographie, Klima, Infrastruktur	204
6.4	GIS - Bewertungsanalysen	206
6.4.1	GIS als Bewertungsinstrument und Entscheidungshilfe	206
6.4.1.1	Einfache Bewertungsmodelle	206
6.4.1.2	Fuzzy Logic Ansätze	208
6.4.1.3	Expertensysteme	208
6.4.2	Zielsetzung und Anwendungsbereich von Bewertungen	209
6.4.2.1	Bewertungsmaßstäbe, Ziel- und Kontrollgrößen	209
6.4.2.2	„Grenzen“ und Anwendungsbereiche der Bewertung	210
6.4.2.2.1	Einbeziehung projektspezifischer Größen in die Standortbewertung	211
6.4.2.2.2	Einbeziehung von infrastrukturellen Kriterien in die Standortbewertung	214
6.4.3	Bildung und Festlegung der Bewertungskriterien	216
6.4.3.1	Herleitung von Kriterien Erfahrungen mit bestehenden Projekten	216
6.4.3.2	Charakterisierung der Bewertungskriterien	217
6.4.3.3	Bewertungskriterien für die Standortbewertung	218
6.4.3.3.1	Geologische Kriterien	218
6.4.3.3.2	Kriterien an der Oberfläche	219
6.4.3.3.3	Rechtliche Kriterien	220
6.4.3.3.4	Gewichtung der Bewertungskriterien	220
6.4.4	Bildung von Kategorien	220
6.4.5	Bewertungsanalysen Zusammenfassung	221
7	Erstellung der Datengrundlagen für das Bewertungsmodell	222
7.1	Digitale geologische Karte	222
7.2	Dreidimensionales Untergrundmodell	224
7.2.1	Problemstellung	224
7.2.2	Untergrundmodelle - Einführung	226
7.2.2.1	Qualität, Erstellungsaufwand und Nutzen von Untergrundmodellen	226
7.2.2.2	Untergrundmodelltypen	227
7.2.2.2.1	„Echte“ 3D-Modelle	228
7.2.2.2.2	Quasi-dreidimensionale Schichtenmodelle	229
7.2.2.2.3	Vergleich der Modelltypen	231
7.2.3	Erstellung des Untergrundmodells für den Beispielausschnitt	231
7.2.3.1	Digitales Strukturmodell (DSM)	232
7.2.3.1.1	Datengrundlage	232
7.2.3.1.2	Vorgehensweise	233
7.2.3.1.3	Methoden zur Erzeugung von digitalen Strukturmodellen aus analogen Vorlagen	234
7.2.3.1.3.1	Problematische Bereiche	234
7.2.3.1.3.2	Definition diskreter Höhenpolygone	235
7.2.3.1.3.3	„Einfache“ Interpolation	236
7.2.3.1.3.4	Einbeziehung von Verwerfungen in die Interpolation	236
7.2.3.1.3.5	Erstellen von digitalen Strukturplänen ohne analoge Vorlage	237
7.2.3.1.3.6	Qualitätskontrolle von digitalen Strukturmodellen	239
7.2.3.1.3.7	Diskussion	240
7.2.3.1.3.8	Einbeziehung von regionalen Mächtigkeitsverteilungen in das DSM	242
7.2.3.1.4	Strukturplan für Gesamt-Unterfranken	243
7.2.3.2	Grundwasser im Untergrundmodell	245
7.2.3.2.1	Konzeptioneller Rahmen für das hydrogeologische Modell	246
7.2.3.2.2	Erstellung des Grundwassergleichenplans	247
7.2.3.3	Definition der Modelleinheiten	253
7.2.3.4	Qualitätsprüfung und Bewertung des Untergrundmodells	255
8	Bewertungsmodell zur automatisierten Standort- und Flächenbewertung	259
8.1	Einführung in die Methoden der Bewertungsberechnung	259
8.1.1	Berechnungen mit Rasterdarstellungen in GIS	259
8.1.1.1	Einfache Rechenoperationen	259

8.1.1.2	Berechnungen im dreidimensionalem Raum	260
8.1.1.3	Berechnungsbeispiel - Zusammenfassung	267
8.1.2	Programmierung in einer GIS-Umgebung	267
8.2	Vorstellung des Bewertungsprogramms	268
8.2.1	Problemstellung und Konzeption	268
8.2.2	Eingabeparameter	269
8.2.2.1	Geometrische Eigenschaften des Schichtenmodells	269
8.2.2.2	Qualitative Eigenschaften des Schichtenmodells	270
8.2.3	Bewertungsfaktoren	272
8.2.3.1	Formationsfaktor FW	273
8.2.3.2	Aquiferfaktor AW	273
8.2.3.3	Bohrbarkeitsfaktor BW	275
8.2.4	Berechnungen im Programm	275
8.2.4.1	Berechnung der Schichtanteile	275
8.2.4.2	Berechnung der Bewertungszahl	280
8.2.4.3	Einbeziehung rechtlicher Fragestellungen	281
8.2.4.4	Berechnung von Bewertungskarten	284
8.2.4.5	Berechnung abgeleiteter Parameter	286
8.2.4.6	Bewertungsberechnungen für Erdwärmesonden zum Wärmeentzug	286
8.2.4.7	Bewertungsberechnungen für andere Verfahren	287
8.2.5	Diskussion des Bewertungskonzepts	287
8.2.5.1	Allgemeine Gesichtspunkte	287
8.2.5.2	Diskussionsbeispiele	288
8.2.5.3	Zusammenfassung der Diskussionsergebnisse	292
8.2.6	Expertensystem	294
8.2.6.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Realisierung von Expertensystemen	294
8.2.6.2	Beschreibung der realisierten Anwendung	295
9	Schlußfolgerungen	298
9.1	Möglichkeiten und Zielsetzungen von GIS-Projekten	298
9.2	Konzepte	299
9.2.1	„Kartenwerke“	299
9.2.1.1	Übersichtskarten	300
9.2.1.1.1	Übersichtskarten zu Informations- und „Marketing“-Zwecken	300
9.2.1.1.2	Übersichtskarten als Planungsgrundlage	300
9.2.1.1.3	Übersichtskarten - Gesamtbeurteilung	300
9.2.1.2	Potentialkarten	301
9.2.1.3	Detaillierte Planungskarten	301
9.2.1.4	Karten der genehmigungsrechtlichen Bedingungen	302
9.2.2	GIS als Planungsumgebung – Expertensysteme	303
9.3	Aufwand und Nutzen von GIS-Projekten	304
9.4	Probleme	304
9.4.1	Datenverfügbarkeit	304
9.4.2	Kriteriendefinition	305
9.5	Schlußwort - Ausblick	306
10	Literaturverzeichnis	307
11	Verzeichnis der verwendeten Datenquellen und Karten	322
Anhang: Avenue-Programme		324

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen:

Abbildung 1-1	18	Abbildung 4-3	103
Abbildung 1-2	18	Abbildung 4-4	105
Abbildung 1-3	19	Abbildung 4-5	107
Abbildung 1-4	19	Abbildung 4-6	109
Abbildung 1-5	21	Abbildung 4-7	111
Abbildung 1-6	22	Abbildung 4-8	116
Abbildung 1-7	23	Abbildung 4-9	117
Abbildung 2-1	28	Abbildung 4-10	120
Abbildung 2-2	29	Abbildung 4-11	120
Abbildung 2-3	29	Abbildung 4-12	123
Abbildung 2-4	30	Abbildung 4-13	123
Abbildung 2-5	31	Abbildung 4-14	124
Abbildung 2-6	32	Abbildung 4-15	125
Abbildung 2-7	33	Abbildung 4-16	127
Abbildung 2-8	35	Abbildung 4-17	128
Abbildung 2-9	37	Abbildung 4-18	131
Abbildung 2-10	37	Abbildung 4-19	136
Abbildung 2-11	38	Abbildung 4-20	138
Abbildung 2-12	39	Abbildung 4-21	139
Abbildung 2-13	39	Abbildung 4-22	140
Abbildung 2-14	41	Abbildung 4-23	141
Abbildung 2-15	43	Abbildung 4-24	142
Abbildung 2-16	46	Abbildung 4-25	142
Abbildung 2-17	47	Abbildung 4-26	143
Abbildung 2-18	48	Abbildung 4-27	144
Abbildung 2-19	48	Abbildung 4-28	145
Abbildung 2-20	49	Abbildung 4-29	145
Abbildung 2-21	49	Abbildung 4-30	146
Abbildung 2-22a,b,c	51	Abbildung 4-31	148
Abbildung 2-23a,b	52	Abbildung 4-32	149
Abbildung 2-24	54	Abbildung 5-1	152
Abbildung 2-25	55	Abbildung 5-2	155
Abbildung 2-26	56	Abbildung 5-3	162
Abbildung 2-27	56	Abbildung 5-4	166
Abbildung 2-28	58	Abbildung 5-5	169
Abbildung 2-29	60	Abbildung 6-1	176
Abbildung 3-1	63	Abbildung 6-2a,b,c	177
Abbildung 3-2	65	Abbildung 6-3	183
Abbildung 3-3	65	Abbildung 6-4	189
Abbildung 3-4	68	Abbildung 6-5a,b	190
Abbildung 3-5	69	Abbildung 6-6	193
Abbildung 3-6	73	Abbildung 6-7	196
Abbildung 3-7	76	Abbildung 6-8	203
Abbildung 3-8	77	Abbildung 6-9	208
Abbildung 3-9	77	Abbildung 6-10	210
Abbildung 3-10	77	Abbildung 6-11	213
Abbildung 3-11	79	Abbildung 6-12	215
Abbildung 3-12	81	Abbildung 7-1	223
Abbildung 3-13	83	Abbildung 7-2	224
Abbildung 3-14	83	Abbildung 7-3	225
Abbildung 3-15	84	Abbildung 7-4	228
Abbildung 3-16	86	Abbildung 7-5	229
Abbildung 3-17	88	Abbildung 7-6	231
Abbildung 3-18	90	Abbildung 7-7	233
Abbildung 3-19	93	Abbildung 7-8	234
Abbildung 4-1	99	Abbildung 7-9	235
Abbildung 4-2	101	Abbildung 7-10	236
		Abbildung 7-11	237
		Abbildung 7-12	238

Abbildung 7-13a bis f	238	Tabelle 4-2	106
Abbildung 7-14	239	Tabelle 4-3	108
Abbildung 7-15	240	Tabelle 4-4	110
Abbildung 7-16	241	Tabelle 4-5	112
Abbildung 7-17	243	Tabelle 4-6	113
Abbildung 7-18	244	Tabelle 4-7	113
Abbildung 7-19	246	Tabelle 4-8	115
Abbildung 7-20	247	Tabelle 4-9	123
Abbildung 7-21	248	Tabelle 4-10	131
Abbildung 7-22	249	Tabelle 4-11	132
Abbildung 7-23	250	Tabelle 4-12	133
Abbildung 7-24	250	Tabelle 4-13	137
Abbildung 7-25	252	Tabelle 4-14	137
Abbildung 7-26	252	Tabelle 4-15	147
Abbildung 7-27	254	Tabelle 4-16	150
Abbildung 7-28	256	Tabelle 5-1	156
Abbildung 7-29	257	Tabelle 5-2	157
Abbildung 7-30	257	Tabelle 5-3	161
Abbildung 7-31	258	Tabelle 5-4	171
Abbildung 8-1	260	Tabelle 5-5	172
Abbildung 8-2	262	Tabelle 5-6	173
Abbildung 8-3	262	Tabelle 6-1	178
Abbildung 8-4	264	Tabelle 6-2	181
Abbildung 8-5	266	Tabelle 6-3	183
Abbildung 8-6	269	Tabelle 6-4	187
Abbildung 8-7	276	Tabelle 6-5	188
Abbildung 8-8	282	Tabelle 6-6	191
Abbildung 8-9	282	Tabelle 6-7	195
Abbildung 8-10	283	Tabelle 6-8	199
Abbildung 8-11a,b	285	Tabelle 6-9	201
Abbildung 8-12	286	Tabelle 6-10	202
Abbildung 8-13	289	Tabelle 6-11	207
Abbildung 9-1	304	Tabelle 6-12	212
Abbildung A-1	325	Tabelle 6-13	213
Abbildung A-2	325	Tabelle 6-14	215
Abbildung A-3	326	Tabelle 6-15	218
Abbildung A-4	327	Tabelle 7-1	234
		Tabelle 7-2	244
		Tabelle 7-3	253
		Tabelle 7-4	255
		Tabelle 8-1	261
		Tabelle 8-2	261
		Tabelle 8-3	263
		Tabelle 8-4	265
		Tabelle 8-5	270
		Tabelle 8-6	271
		Tabelle 8-7	272
		Tabelle 8-8	274
		Tabelle 8-9	277
		Tabelle 8-10	281
		Tabelle 8-11	282
		Tabelle 8-12	287
		Tabelle 8-13	289
		Tabelle 8-14	293
		Tabelle 8-15	296
		Tabelle 8-16	297
		Tabelle A-1	324
Tabellen:			
Tabelle 1-1	25		
Tabelle 1-2	25		
Tabelle 2-1	36		
Tabelle 2-2	37		
Tabelle 2-3	50		
Tabelle 2-4	59		
Tabelle 3-1	62		
Tabelle 3-2	66		
Tabelle 3-3	68		
Tabelle 3-4	72		
Tabelle 3-5	80		
Tabelle 3-6	85		
Tabelle 3-7	91		
Tabelle 3-8	93		
Tabelle 3-9	94		
Tabelle 3-10	95		
Tabelle 3-11	98		
Tabelle 4-1	101		

Verzeichnis häufig verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung / Formelzeichen	Bedeutung / Erklärung
ρc	volumetrische Wärmekapazität ρc [J/(m ³ K)]
α	thermischer Diffusionskoeffizient [m ² /s]
λ, λ_e	Wärmeleitfähigkeit bzw. effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
ATKIS, ATKIS25, ATKIS500	Amtliches Topographisches Karteninformationssystem auf Basis der TK25, TK500
BayGLA	Bayerisches Geologisches Landesamt
BayLfW	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
CAD	Computer Aided Design
DHM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DTES	Duct Thermal Energy Storage (Erdsondenwärmespeicherung)
DSM	Digitales Strukturmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECES IA	Energy Conservation through Energy Storage Implementing Agreement
EED	Earth Energy Designer (Auslegungssoftware für EWS)
ESWSp	Erdsondenwärmespeicher
EWS	Erdwärmesonde; steht hier für erdgekoppelte Wärmepumpen mit geschlossenen vertikalen Erdreichwärmetauschern
FIZ	Fachinformationszentrum Karlsruhe
GK, GK1000, GK500, GK25	Geologische Karte; GK1000: Geologische Übersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000 (BGR); GK25: Amtliche Geologische Karten im Maßstab 1:25.000 (BayGLA); GK500: Geologische Übersichtskarte von Bayern 1:500.000 (BayGLA)
GOK	Geländeoberkante
GSA	Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft, Kanton Bern
GTV	Geothermische Vereinigung (Deutschland)
GÜK200	Geologische Übersichtskarte von Deutschland im Maßstab 1:200.000 (BGR)
GW	Grundwasser
GWGL	Grundwassergleichenplan
GWL	Grundwasserleiter (Aquifer)
GWWP	Grundwassergekoppelte Wärmepumpe
IEA	International Energy Agency

Abkürzung / Formelzeichen	Bedeutung / Erklärung
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart
IWP	Initiativkreis Wärmepumpe
IZW	Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
M_{\min}	erforderliche Mindestmächtigkeit
n ; n_e	Gesamtporosität; nutzbare (effektive) Porosität
R^3	dreidimensionaler Raum
SIA	Schweizerischer Ingenieur und Architektenverband
SQL	Structured Query Language
SVG	Schweizerische Geothermische Vereinigung
TIN	Triangulated Irregular Network
TK, TK25, TK200	Topographische Karte; TK25, TK200: topographische Karten im Maßstab 1:25.000 und 1:200.000
TOP50, TOP200	Digitale Topographische Karten im Rasterformat auf Basis der TK50 und TK200 mit Datenbankanbindung in Programmumgebung mit graphischer Benutzeroberfläche
UTES	Underground Thermal Energy Storage
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WEA	Wasser- und Energiewirtschaftsamt (kantonal, Schweiz)
WSG	Wasserschutzgebiet: WSG5 Digitalisierte Wasserschutzgebiet aus dem →GISWaWi auf Basis der Flurkarte 1:5.000; WSG50: Digitalisierte Wasserschutzgebiet aus dem →GISWaWi auf Basis der TK50
WWA	Wasserwirtschaftsamt; WWAWrz: Wasserwirtschaftsamt Würzburg
ZAE	Zentrum für Angewandte Energieforschung

Using geographic information systems (GIS) for site assessment and the analysis of the regional potential for heat extraction and heat storage in shallow underground up to depths of 200m in Lower Franconia, Northern Bavaria, Germany.

Summary

The objective of this thesis is to show how GIS can be used to assess single sites or larger areas with respect to their suitability for different geothermal applications that can be applied in low depths of up to 200m. The study area of about 8500km² is located in the north-western region of Bavaria, Germany. The corresponding study included: the collection, input and organization of the relevant data, the definition of the criteria necessary for the suitability analysis and finally the development of several assessment concepts. A variety of approaches have been examined and applied to the study area. The different concepts were evaluated and analyzed regarding the relation between effort and use. The two most promising concepts were developed and studied in greater detail. The first of these concepts is a method to produce simple medium scale overview maps. The second is based on the concept of expert-systems. It provides a means for an interactive, site- and project-specific analysis of the geo- and hydrogeological situation at a location. A GIS application representing a small expert system was developed within ArcView GIS in Avenue. The most important part of this assessment concept is a three-dimensional geological underground model. This model is used to store and analyze the relevant three-dimensional distributed lithological thermal and hydrogeological properties of the subsoil. The thesis gives a brief description of the relevant geothermal techniques, a detailed explanation of the relevant geological, hydrogeological and thermophysical processes involved, a geological overview of Lower Franconia and an introduction to the GIS methods used.

There are two ways of using the shallow underground up to a depth of 200m with geothermal techniques: The extraction of heat from rock or groundwater with Ground Source Heat Pumps (GSHP) and the seasonal storage of solar or waste heat in Underground Thermal Energy Storages (UTES). Both techniques can be used for cooling purposes as well. Despite the fact that these techniques have been investigated and applied for several decades now, their use in Germany compared to other countries like Sweden, Switzerland or the US is low. Many experts believe, that studies showing the regional potential and suitability could increase the exposure and use of such techniques.

The suitability of a site for thermal use is influenced by a set of different parameters. First there are the criteria of the "natural" domain which include the geological and physical properties of the ground, as well as the geomorphologic and climatic conditions at the earth's surface. Secondly there are criteria of the "cultural" (or man made) domain, such as infrastructural and legal aspects. Due to dependencies and interactions, the resulting system, consisting of a set of many different criteria, turns out to be very complex. Since most of the parameters that influence the suitability and potential are spatially distributed, the idea of analyzing and processing them within a Geo information system is obvious and fitting.

A GIS that is capable of analyzing the system described above should, in the first place, contain all the relevant data that affect the thermal use of the underground. Secondly it has to supply specific tools that facilitate the analysis of this data. These tools should be based on meaningful criteria that are defined on the basis of known facts and experiences. Data, tools and criteria are the three components of a GIS that are necessary for a site specific suitability analysis. To make the GIS usable for the public, the three components can be made accessible through customized user applications.

The main objective of this thesis is to evaluate the benefit of GIS usage for the site assessment and analysis of the regional potential of the geothermal applications described above. It can be shown, that the application of GIS in producing maps of medium scale ($\approx 1:100,000$) is helpful. Such overview maps can be used to inform people who are involved in planning and designing energy systems, as well as clients or authorities that are concerned with approval and sponsorship. The term "map" used in the context of GIS includes digital maps that can be displayed and explored on screen. Therefore a distribution in digital form and an

interactive user friendly application is possible. Printed maps are usually of limited use. GIS's, that are designed to produce overview maps are of little assistance in the planning of individual projects and are not equipped to reliably show legal restrictions.

GIS's that can be used to support the planning and designing of individual geothermal applications require a much more detailed database and a more specialized assessment concept. Since the planning of individual projects involves knowledge from different fields, so-called expert systems are the obvious GIS concept. In an expert system, the suitability of a site can be analyzed and assessed individually, based on specific user requirements. Such interactive concepts are far more flexible than the map concept, because maps cannot be updated and adjusted to specific problems as often as might be necessary. Expert systems can include or be connected to specialized design applications. Such applications can be used to determine design parameters based on user input and information retrieved from the GIS.

The most important requirement for a meaningful analysis of the geological and hydrogeological situation at a site is a database, that provides information on the relevant three dimensional (3D) distributed properties of the underground. Therefore a 3D underground model was created. The model, which has a horizontal resolution of 50m, covers an area of nine topographical maps (1200km²) in the vicinity of Würzburg. The vertical resolution depends on the individual thickness of the layers that form the model units.

The realization of a full scale, "ready to use" expert system was not possible within the framework of this thesis. Instead a smaller application, that includes all the fundamental elements of an expert system, was programmed in ArcView GIS (Avenue). The program facilitates the assessment of single sites as well as the calculation of suitability distribution maps for larger areas. The user can choose between different geothermal applications (GSHP and duct TES) and determine the depth the assessment should be valid for. In addition he can choose whether legal aspects, ground water flow and other aspects should be included in the assessment procedure. The program also explores the GIS database and gathers all information that can be used in the planning process.

It can be shown, that even a very basic expert system application can provide useful aid in planning shallow earth geothermal systems. However, the effort to build the database is very high. Data collection and input make up the biggest part of the work. The question, whether the development of ready to use, large scale expert systems makes sense, depends on the future prospects of the geothermal techniques mentioned. To date, the demand for systems like this is still too low.

In addition to the theoretical examination of the use of GIS, the potential of geothermal applications in Lower Franconia was investigated. The investigation revealed, that the storage of heat in the underground using vertical heat exchangers (DTES) is viable in most areas of Lower Franconia with medium to good prospects. On the other hand the potential is limited by legal and infrastructural aspects. Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) is not possible in the whole area of Lower Franconia because of the unfavorable hydrogeological conditions. The same applies to groundwater heat pumps, which can only be used in the pleistocene aquifer of the Main River valley. The Main River valley has high user potential because of its high population density. But, the aquifer is used for drinking water supply in most parts. The overall potential is therefor limited by legal restrictions. Extraction of heat with vertical heat exchangers is the most promising technique in Lower Franconia. There are only a few geological settings where they cannot be used. Again, legal aspects can prohibit the approval of projects in a considerable part of the region.

The results of this study are at first valid for the conditions in Lower Franconia. They can also be applied to similar geological settings, that is: sedimentary environments with flat-lying fractured sandstones, siltstones, limestones and marls in areas with considerable regional groundwater flow. The use of the GIS concepts that were developed is not limited to geothermal applications though. They can be applied to a wide range of questions that require three dimensional analysis of geological features.

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit den Einsatzmöglichkeiten von Geoinformationssystemen (GIS) bei der Bewertung von Einzelstandorten oder größeren zusammenhängenden Gebieten im Hinblick auf die Eignung zur thermischen Nutzung des flachen Untergrundes bis 200m Tiefe. Untersuchungsregion ist der Regierungsbezirk Unterfranken in Nordbayern (8500km²). Die durchgeführten Arbeiten beinhalten die Ermittlung, Sammlung und Organisation der für die Bewertung notwendigen Basisdaten, die Festlegung geeigneter Bewertungskriterien für die verschiedenen Verfahren der thermischen Nutzung und die Erarbeitung von Bewertungskonzeptionen. Unterschiedliche Bewertungsansätze wurden auf die Untersuchungsregion bzw. auf Ausschnitte angewendet und die Ergebnisse in Form einer qualitativen Aufwand-Nutzen-Analyse verglichen. Besonders eingehend wurden Möglichkeiten zur Erstellung von Übersichtsdarstellungen mittleren Maßstabs sowie ein „Expertensystemansatz“ betrachtet, der eine interaktive, individuelle Standortanalyse ermöglicht. Für den Expertensystemansatz wurde eine entsprechende Anwendung in einer GIS-Umgebung (Avenue, ArcView GIS 3.2) programmiert. Wesentlicher Bestandteil beider Konzeptionen ist ein quasi-dreidimensionales geologisch-hydrogeologisches Untergrundmodell, das die Berücksichtigung der dreidimensionalen Verteilung der relevanten Untergrundparameter bei der Standortbewertung erlaubt. Die Arbeit beinhaltet eine Erläuterung der maßgeblichen Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes unter besonderer Berücksichtigung der geologischen Anforderungen, eine Beschreibung der beteiligten geologischen, hydrogeologischen und physikalischen Parameter und Prozesse, eine Übersichtsdarstellung der geologischen Verhältnisse in Unterfranken sowie eine Einführung in die angewendeten GIS-Konzepte und Methoden.

Zur thermischen Nutzung des flachen Untergrundes bis etwa 200m Tiefe bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten: die Gewinnung von Niedrigtemperaturwärme aus Boden und Grundwasser mit Hilfe von Wärmepumpen sowie die saisonale Speicherung von Solar- oder Überschußwärme in Erdwärmespeichern. Beide Verfahren sind auch zu Kühlzwecken einsetzbar. Obwohl entsprechende Techniken seit mehreren Jahrzehnten untersucht werden, sind thermische Nutzungen des flachen Untergrundes in Deutschland, verglichen mit anderen Ländern wie der Schweiz, Schweden oder den USA, bislang wenig verbreitet. Grund hierfür ist auch das Fehlen regionalspezifischer Untersuchungen, die den potentiellen Nutzern schon im Vorfeld ihrer Planungen die Möglichkeiten und Einschränkungen an ihrem Standort aufzeigen.

Die Eignung eines Standorts wird durch naturräumliche Faktoren (geologisch-physikalische, klimatische und geomorphologische Bedingungen), infrastrukturelle Faktoren (Besiedlungsstruktur, Erschließung) und durch rechtliche Faktoren (Genehmigungsfragen, Nutzungsbedingungen) bestimmt. Insgesamt ergibt sich aus der Vielzahl von Einflußfaktoren ein komplexes System, das, da es vorrangig durch raumbezogene Parameter bestimmt ist, am sinnvollsten in einem GIS beschrieben und analysiert werden kann. Ein solches GIS muß zum einen die erforderlichen Basisdaten, zum anderen spezielle Analyseverfahren zur Verfügung stellen. Weiterhin müssen Kriterien vorhanden sein, die auf die in der Untersuchungsregion vorliegenden Verhältnisse anwendbar sind und eine aussagekräftige Beurteilung erlauben. Mit diesen drei Komponenten erhält der Benutzer des GIS die Möglichkeit, Bewertungen für eine vom ihm gewünschte Anlagenkonzeption an einem bestimmten Standort zu erstellen. Die Aufstellung angemessener Bewertungskriterien stellt dabei eine der wesentlichen Schwierigkeiten dar. Zusätzlich ist es bereichsweise schwierig oder gar unmöglich, die für die Analyse notwendigen Basisdaten bereitzustellen. Vergleichsweise unproblematisch ist dagegen die Festlegung angemessener Analyseverfahren.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Beantwortung der Frage, inwieweit sich GIS sinnvoll bei der Standortbewertung für die thermische Nutzung des Untergrundes in Unterfranken einsetzen lassen. Dabei konnte festgestellt werden, daß der Einsatz von GIS für die Erstellung von Übersichtskarten mittleren Maßstabs des Potentials bis etwa 1:100.000 möglich und mit nicht allzu hohem Aufwand durchzuführen ist. Die Erstellung solcher Karten erscheint sinnvoll für die Information von Bürgern, planenden Firmen und Genehmigungsbehörden sowie zur Ermittlung des Potentials im Rahmen von überregionalen Planungen. Entsprechende Karten können gedruckt oder in digitalem Format verbreitet werden. Im Fall der digitalen Verbreitung ist eine interaktive Benutzerführung realisierbar. Solche Übersichtskarten bieten aber weder eine echte Hilfestellung für die Planung konkreter Projekte noch kann von ihnen eine rechtliche Sicherheit im Bezug auf Genehmigungsfragen erwartet werden.

Ein deutlich höherer Arbeitsaufwand ist zur Erstellung von GIS-Anwendungen erforderlich, die konkret zur Anlagenplanung bei bereits festgelegtem oder noch zu ermittelndem Standort eingesetzt werden sollen. Da hier individuelle lage- und projektspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen und Informationen aus unterschiedlichen Fachgebieten zu verarbeiten sind, bietet es sich an, solche „Planungsinstrumente“ in Form sogenannter „Expertensysteme“ zu konzipieren. In einem solchen System wird die Eignung eines Standortes entsprechend einer vom Nutzer vorgegebenen Anlagenkonzeption individuell bestimmt. Der Vorteil eines solchen interaktiven Konzepts liegt darin, daß es weitaus flexibler ist als ein Kartenwerk, das im Allgemeinen nicht beliebig oft aktualisiert und an geänderte Anforderungen angepaßt werden kann. In das Expertensystem können Berechnungs- und Auslegungsprogramme, die Daten aus dem GIS beziehen, einbezogen werden. Grundvoraussetzung für eine aussagekräftige Beurteilung der geologisch-hydrogeologischen Situation innerhalb eines solchen Expertensystems ist ein dreidimensionales Untergrundmodell, das es ermöglicht, tiefenabhängige Informationen über relevante Parameter am betrachteten Standort abzurufen und diese mit Hilfe von angepaßten Bewertungsalgorithmen zu verarbeiten. Die Detailtreue des Modells ist dabei gleichermaßen bestimmend für die Signifikanz der Bewertungsergebnisse, wie die angemessene Definition der Bewertungskriterien. In der vorliegenden Untersuchung wurde für einen neun Blätter der TK25 umfassenden Ausschnitt im südlichen Unterfranken ein entsprechendes Untergrundmodell erstellt.

Die Erstellung eines anwendungstauglichen Expertensystems war im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Es wurde allerdings eine GIS-Anwendung erstellt, die die grundlegenden Elemente eines Expertensystems beinhaltet. Dieses Programm ermöglicht es, Standortbewertungen für Einzelpunkte oder größere zusammenhängende Flächen zu berechnen und zusätzlich alle relevanten Informationen, die in der Datenbasis enthalten sind, abzurufen. Die Ergebnisse können kartenmäßig dargestellt oder in Form eines Ergebnisprotokolls ausgegeben werden. Der Schwerpunkt des Bewertungskonzepts wurde auf die Bewertung von Erdsondenwärmespeichern gelegt, es können aber auch Standortbewertungen für erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen mit Erdsonden erstellt werden. Der Benutzer hat neben der Auswahl des zu bewertenden Verfahrens die Möglichkeit, die Tiefe, für die die Bewertung gültig sein soll, festzulegen. Darüberhinaus kann festgelegt werden, ob die Bewertung beispielsweise unter Einbeziehung rechtlicher Fragestellungen erfolgen soll. Es zeigt sich, daß von einem solchen System ein hoher Nutzen zu erwarten ist. Gleichzeitig ist der Aufwand zur Erstellung sehr hoch. Die Datenerhebung und –aufbereitung stellt dabei den weitaus größten Arbeitsaufwand dar. Ob es lohnend ist, entsprechende Expertensysteme für größere Gebiete zu erstellen, hängt von der zukünftigen Entwicklung der oberflächennahen thermischen Nutzung des Untergrundes ab. Derzeit scheint die Nachfrage, in Anbetracht der zu erwartenden Kosten, noch gering.

Neben der grundsätzlichen Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten von GIS, wurde das geologische Potential für thermische Nutzungen des flachen Untergrundes in Unterfranken untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß für die Speicherung thermischer Energie im Untergrund mit vertikalen Erdsonden mäßig gute bis gute Voraussetzungen bestehen. Das Potential wird allerdings durch infrastrukturelle und vor allem rechtliche Einschränkungen gemindert. Dagegen sind die geologischen Verhältnisse für die Aquiferspeicherung ungeeignet. Die Gewinnung von Wärmeenergie aus dem Untergrund mit Hilfe von Wärmepumpen ist in Unterfranken aus geologischer Sicht in sehr vielen Bereichen möglich. Besonders geeignet sind vertikale Erdreichwärmetauscher (Erdsonden), die in fast allen Gebieten eingesetzt werden können. Viele Gebiete weisen sogar ausgesprochen günstige Voraussetzungen auf. Die Einsatzmöglichkeiten von grundwassergekoppelten Wärmepumpen beschränken sich dagegen auf die pleistozänen Aquifere der Flußtäler, die zwar aufgrund der hohen Besiedlungsdichte ein gesteigertes Nachfragepotential aufweisen, andererseits aber bereits intensiv für die Vorrang genießende Trinkwasserversorgung genutzt werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung gelten vorwiegend für den Raum Unterfranken. Sie sind aber weitgehend auch auf das Süddeutsche Schichtstufenland und andere, von mesozoischen Gesteinen geprägte Bereiche übertragbar. Deutliche Unterschiede bezüglich der geologisch-hydrogeologischen Situation bestehen dagegen z.B. im süddeutschen Molassebecken oder im gesamten Bereich der norddeutschen Tiefebene. Die entwickelten Bewertungskonzeptionen können letztlich an vielfältige geologische Verhältnisse angepaßt werden. Ihre Anwendung beschränkt sich dabei nicht auf die Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes, sondern ist prinzipiell in allen Bereichen möglich, in denen eine geologisch-hydrogeologische Beurteilung des Untergrundes erforderlich ist.

1 Einleitung

1.1 Thermische Nutzung des flachen Untergrundes

Der im Titel dieser Arbeit genannte Begriff „Thermische Nutzung des Untergrundes“ entstammt der soeben teilweise erschienenen VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 1998; SANNER, HAHNE & KONSTANTINIDOU, 1997). Nach dieser Richtlinie kann der Untergrund in dreierlei Hinsicht „thermisch“ genutzt werden: als Wärmequelle zur Gewinnung von Heizenergie, als Wärmesenke für Kühlzwecke und zur Speicherung von Wärme und Kälte. Durch die Einschränkung „flach“ werden diese Nutzungsarten in der vorliegenden Untersuchung auf etwa 200m Tiefe limitiert (VDI 4640: 400m). Damit können sie von den tieferen Verfahren der Geothermie, insbesondere der hydrothermalen Geothermie und den HDR-Verfahren abgegrenzt werden, die in Deutschland in Tiefen von deutlich mehr als 1000m angesiedelt sind.

Der flache Untergrund kann hinsichtlich der Temperaturverhältnisse in drei verschiedene Zonen gegliedert werden: in der obersten Bodenschicht, die nur wenige Dezimeter umfaßt, machen sich die täglichen Temperaturschwankungen bemerkbar. Saisonale Temperaturvariationen sind bis in eine Tiefe von maximal 10-20m nachweisbar, deutlichen Einfluß haben sie aber allenfalls bis in 5m Tiefe. Unterhalb von 10-20m herrscht eine über lange Zeiträume gleichbleibende Temperatur, die in 10m Tiefe etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur entspricht und mit der Tiefe in Deutschland im Mittel um ca. 3°C pro 100m zunimmt. Die in diesen tieferen Bereichen enthaltene thermische Energie entstammt zu einem nach der Tiefe hin ansteigenden Anteil dem Wärmefluß aus dem Erdinneren. Aufgrund der relativ geringen mittleren Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen und dem geringen Temperaturgradienten, ist die Energiemenge, die aus dem terrestrischen Wärmefluß nachgeliefert wird, vergleichsweise gering. Deutlich größeren Anteil hat in den oberflächennahen Bereichen des Untergrundes der Einfluß der Sonnen- oder Umgebungsenergie (KALTSCHMITT ET AL., 1999).

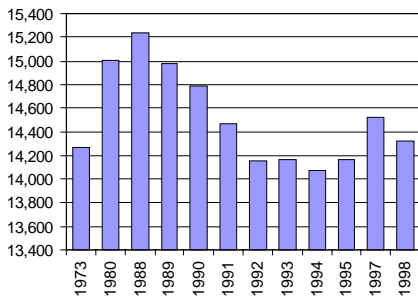
In der vorliegenden Untersuchung wird von den drei beschriebenen Bereichen vor allem der unterste, also der Bereich, der nicht den täglichen und saisonalen Temperaturschwankungen unterliegt, betrachtet. Verfahren zur thermischen Nutzung mit horizontalen Erdreichwärmetauschern, die in oberflächennahen Bereichen bis 2m Tiefe angesiedelt sind, werden hier nicht berücksichtigt. Mit entsprechenden Verfahren und ihren Einsatzmöglichkeiten im Raum Unterfranken befaßt sich eine Untersuchung von WITTEK (1998). Das Potential thermischer Nutzungen in größeren Tiefen im nordbayerischen Raum wurde von BAUER (2000) untersucht.

1.2 Regenerative Energien - aktuelle Situation und Entwicklungen

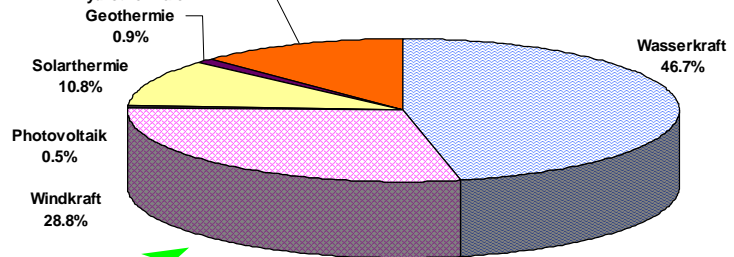
Die Verfahren zur Gewinnung von Energie aus dem Untergrund werden zu den sogenannten „regenerativen“ Energiequellen gerechnet. Unter regenerativen Energieträgern versteht man nach KALTSCHMITT & WIESE (1997) solche, die „in menschlichen Dimensionen als unerschöpflich gelten können“. Die Einschränkung „in menschlichen Dimensionen“ wird hierbei nicht zuletzt auch deswegen gemacht, weil es durchaus zu diskutieren ist, ob die Erdwärme eine regenerativen Energiequelle darstellt. Wie oben beschrieben, stellt die oberflächennahe Erdwärme vorrangig „fossile“ Sonnenenergie dar. Es läßt sich zeigen, daß diesem Bereich entnommene Energie kurz- und mittelfristig weder aus der Atmosphäre, noch aus dem Erdinneren vollständig nachgeliefert werden kann. Entscheidend ist aber die Tatsache, daß die gesamte gespeicherte Wärmemenge wegen des enormen Volumens eine Dimension erreicht, die von Menschen nicht annähernd verbraucht werden kann.

Die Bedeutung regenerativer Energiequellen für die derzeitige Energieversorgung in Deutschland ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß trotz gewisser Anstrengungen zur Förderung von regenerativer Energie, mit Ausnahme der schon immer stark genutzten Wasserkraft und der in den letzten Jahren deutlich gestiegenen Windenergienutzung, diese Verfahren praktisch bedeutungslos sind.

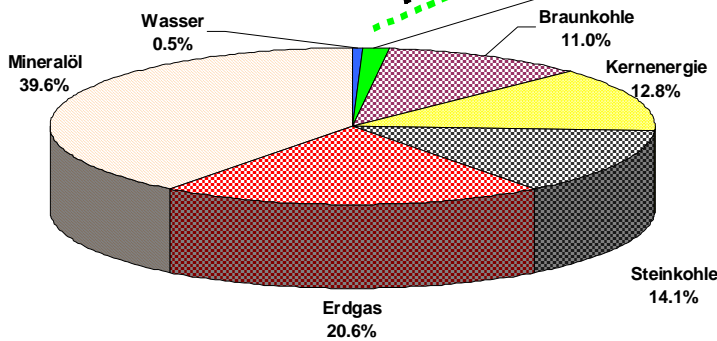
Primärenergieverbrauch in Deutschland in PJ



Verteilung der 1997 aus regenerativen Energiequellen erzeugten Energie auf die einzelnen Energieträger



Primärenergieverbrauch in 1997 nach Energieträgern



In den "Sonstigen" sind zusätzlich zu den oben aufgeführten regenerativen Energieträgern noch die Verbrennung von Müll, Biomasse und Kärchlamm mit einem Anteil von ca. 1% am Primärenergieverbrauch enthalten.

Anteile der regenerativen Energieträger an der Energieerzeugung in Deutschland

Abbildung 1-1: Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs und Bedeutung der regenerativen Energieträger an der Energieerzeugung in Deutschland. Daten aus BMWi (1999), BMWi (1996), FIZ (1998) und KALTSCHMITT & WIESE (1997).

Nachdem regenerative Energiequellen nach den Energiekrisen von 1974 und 1979/80 in Anbetracht der drohenden Verknappung fossiler Brennstoffe einen ersten Aufschwung erlebten, stieg das Interesse an „sauberen“ Energieträgern in den 90ern spätestens nach der Entdeckung des Ozonlochs deutlich an (Abbildung 1-2).

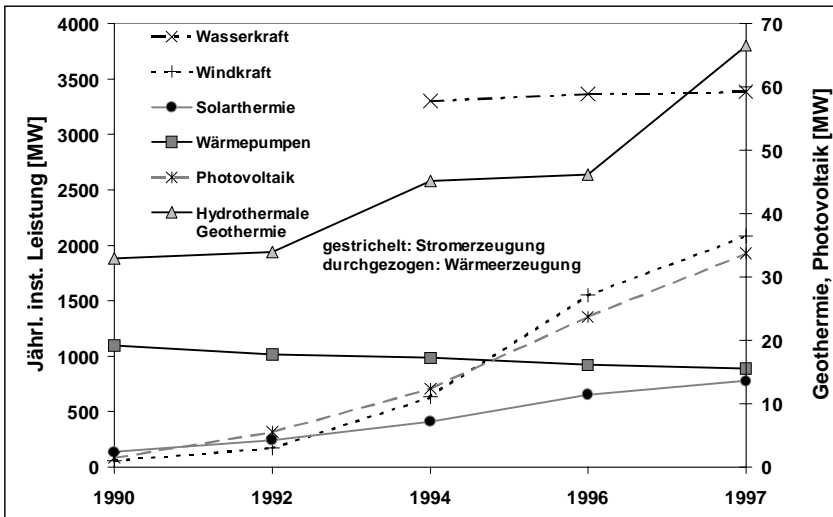


Abbildung 1-2: Entwicklung der jährlich installierten Leistung regenerativer Energieträger. Aus FIZ (1998).

Besonders hohen Stellenwert haben seither alle Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Wie aus Abbildung 1-3 zu entnehmen ist, wird ein hoher Prozentsatz der in Deutschland erzeugten Endenergie für die Gewinnung von Wärme aufgewendet. Allein die zur Erzeugung von Raumwärme aufgewendete Energie beträgt demnach ca. ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs. Von diesen entfallen nach KALTSCHMITT & WIESE (1997) ca. 2/3 auf den häuslichen Sektor. Dort wiederum werden nach KRUSE & HEIDELCK (1997) 77% des Endenergieverbrauchs für Heizung und 12% für Warmwassergewinnung verwendet. Da Wärmeenergie

derzeit noch vorwiegend durch die Verbrennung von fossilen Rohstoffen erzeugt wird, ist es offensichtlich, daß regenerativen Wärmequellen eine große Bedeutung bei der Senkung der CO₂-Emissionen zukommt.

Anteile der verschiedenen Verwendungszwecke am Endenergieverbrauch in Deutschland 1992

Daten für 1996: Raumwärme 32,4%, Prozesswärme 27%

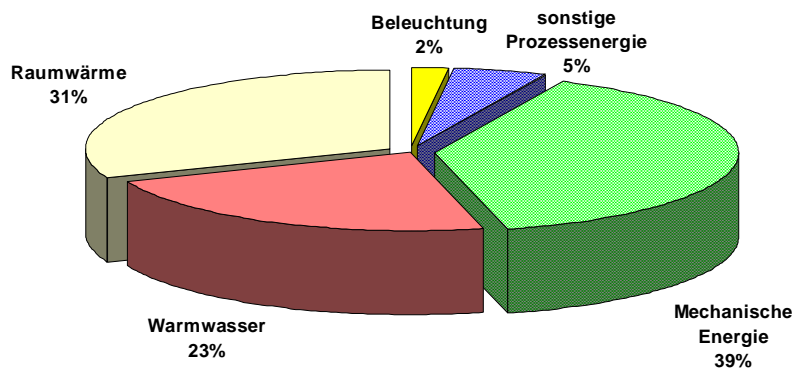


Abbildung 1-3: Energieverbrauch in Deutschland (1992), aufgeschlüsselt nach dem Verwendungszweck. Quelle: FZE (1994) und KALTSCHMITT & WIESE (1997).

1.3 Stellung der oberflächennahen thermischen Nutzung des Untergrundes

Solarthermische Energie und geothermische Energie stellen bedeutende und nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Wärmequellen dar. So übersteigt die auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland eingestrahelte Sonnenenergie bei weitem den Gesamtwärmebedarf aller deutschen Haushalte. Gleiches gilt für die aus Erdwärme gewinnbare Energie. Selbst wenn man dieses natürlich nur theoretisch verfügbare Angebot auf das technisch gewinnbare reduziert, stellen diese beiden Wärmequellen noch bedeutende Ressourcen dar. So würde nach KALTSCHMITT ET AL. (1999) allein das **technische Erzeugungspotential** an oberflächennaher Erdwärme das **technische Nachfragepotential**¹ an niedrigthermaler Wärmeenergie zu etwa 75% decken.

Trotz dieser scheinbar enorm hohen Verfügbarkeit stellen Solarthermie und Erdwärme nur einen verschwindend kleinen Anteil an der Gesamtenergieproduktion. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Ausschlag gibt bei der Erdwärmenutzung jedoch die aufwendige Erschließung. So stellen Planung und Errichtung einer Erdwärmanlage deutlich höhere Anforderungen an das technische Know-how als die Erstellung einer herkömmlichen Heizungsanlage. „Fachfremdes“ geologisches Wissen ist erforderlich. Die in Abbildung 1-1 und 1-2 dargestellten Zahlenwerte veranschaulichen drastisch die geringe Bedeutung.

Im Bereich der Solarenergie stellt die ungünstige zeitliche Verteilung von Angebot und Nachfrage ein besonderes Problem dar. Wie in Abbildung 1-4 gezeigt, ist das Angebot eingestrahelter Sonnenenergie gerade dann am höchsten, wenn die Nachfrage am geringsten ist. Eine wirklich effektive Nutzung solarthermischer Energie ist demnach nur dann möglich, wenn es gelingt, das sommerliche Solarenergieangebot langfristig (saisonal) zu speichern. Aus diesem Grund wird schon seit Jahrzehnten versucht, effektive und kostengünstige Möglichkeiten

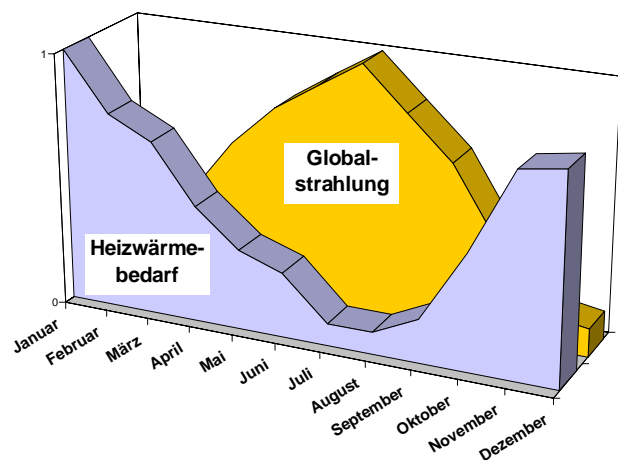


Abbildung 1-4: Typische jahreszeitliche Verteilung von Solarenergieangebot und Raumwärmebedarf (nach RWE, 1995).

¹ Zur Erläuterung der Potentialbegriffe siehe Kap. 6.2.3.1.1.

zur **saisonalen Wärmespeicherung** zu erschließen. Als besonders geeignet für die Speicherung von großen Wärmemengen auf niedrigem Temperaturniveau haben sich dabei die Verfahren der Speicherung von Wärme im Untergrund erwiesen. Sie eignen sich nicht nur für die Speicherung von thermischer Solarenergie, sondern auch für die effizientere Nutzung von Überschusswärme aus technischen Prozessen, beispielsweise für sommerlichen Wärmeüberschuß von Kraftwärmekopplungsanlagen (BHKWs). Große Bedeutung kommt auch der Kältespeicherung zu, bei der im Untergrund ein künstliches Kältereservoir geschaffen wird, das im Sommer zu Kühlzwecken herangezogen werden kann (vgl. z.B. KNOBLICH ET AL., 1993). Nachdem die technischen Schwierigkeiten überwunden wurden, haben die Verfahren der thermischen Energiespeicherung im Untergrund (UTES²) mit ähnlichen Akzeptanzproblemen zu kämpfen wie die Erdwärmenutzung. Im Jahr 1999 waren in Deutschland nur etwa 15 Anlagen zur Untergrundspeicherung von Wärme und Kälte in Betrieb oder im Bau.

Gewinnung und Speicherung von thermischer Energie aus dem bzw. im Untergrund stellen Methoden zur Gewinnung regenerativer Energie, bzw. Möglichkeiten der rationellen Nutzung herkömmlicher oder regenerativer Energiequellen dar. In beiden Fällen ist zu prüfen, ob ein entsprechendes Energieversorgungssystem in der Bilanz tatsächlich Einsparungen von Energie und Umweltbelastungen (CO₂) ermöglicht. Dabei sind auch Energiebedarf und Schadstoffausstoß der eingesetzten technischen Hilfsmittel zu betrachten, im Fall der Speicherung auch der Wärmeerzeugungsprozess. Besondere Bedeutung kommt den technischen Hilfsmitteln zu, da Erdwärme im flachen Untergrund ein sehr niedriges Temperaturniveau aufweist, das ohne solche Hilfsmittel (Wärmepumpe, Kap. 2.2.1) nicht genutzt werden kann. Da Wärmepumpen in den meisten Fällen mit elektrischem Strom betrieben werden, muß der Prozeß der Stromerzeugung in die Betrachtung der Umweltbilanz mit aufgenommen werden (vgl. Kap. 2.2.1.5). Zusätzlich sind auch negative Umwelteinflüsse, die von den Verfahren selbst ausgehen können, zu berücksichtigen (Kap. 3.5). Aus diesen Gründen kommt der sorgfältigen Planung und Ausführung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes eine hohe Bedeutung zu. Es konnte inzwischen allerdings mit zahlreichen erfolgreichen Projekten belegt werden, daß Erdwärmegewinnungs- und Untergrundspeicheranlagen einen positiven Beitrag zur Minderung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen leisten können.

1.4 Problemstellung der Untersuchung

Ausgangspunkt für die vorliegende Untersuchung war die Erkenntnis, daß Techniken zur thermischen Nutzung des Untergrundes seit längerem relativ gut bekannt und beschrieben sind, sich das Wissen darüber aber auf einen kleinen Kreis weniger Fachleute und einiger engagierter Laien beschränkt.

Nachdem im Zuge der ersten Energiekrise 1974 die Nutzung von „Erdwärme“ auch im geothermisch gesehen vergleichsweise „kalten“ Deutschland einen gewissen Bekanntheitsgrad erlangte, ging die Begeisterung in den darauffolgenden Jahren aufgrund der gleichbleibend niedrigen Preise fossiler Rohstoffe wieder zurück. Erdwärme (und damit alle verwandten Techniken) gelangte in den Ruf einer exotischen und hierzulande nicht ökonomisch verwertbaren Energieform, der ihr nach wie vor anhaftet (vgl. GTV, 1999). Spätestens seit Beginn der 90er (Entdeckung des „Ozonlochs“) setzt sich aber mehr und mehr die Erkenntnis durch, daß ökonomische Gesichtspunkte nicht allein maßgeblich bei der Wahl der Energieerzeugung sein dürfen. Damit werden auch (derzeit noch) unökonomische Ressourcen wieder interessant.

Die Entwicklung der thermischen Nutzung des flachen Untergrundes kann anhand der Wärmepumpenverkaufszahlen nachvollzogen werden³. Diese sind in Abbildung 1-5 für Deutschland und die Schweiz dargestellt. Deutlich zu erkennen ist in Deutschland das schlagartig einsetzende Interesse an der Wärmepumpentechnologie nach 1975 und der nahezu vollständige Rückgang bis zu Beginn der 90er Jahre. Ab 1990 ist ei-

² **UTES:** *Underground Thermal Energy Storage.*

³ *Nur ca. 35-45% aller WP-Anlagen nutzen Erdwärme als Wärmequelle. Ihr Anteil nimmt allerdings in den letzten Jahren deutlich zu; vgl. Abbildung 2-4 und 2-5 und Kap. 2.2.1.3. Entwicklungen im Bereich der Untergrundwärmespeicherung können aufgrund der geringen Anlagenzahl zahlenmäßig nicht sinnvoll erfaßt werden (vgl. Kap. 3.1.6).*

ne deutliche Trendwende in den Verkaufszahlen festzustellen. Interessant ist hier allerdings ein Vergleich mit der in Abbildung 1-2 dargestellten jährlich neu installierten Wärmepumpenleistung. Diese zeigt eine leicht **fallende** Tendenz. Dieser scheinbare Widerspruch kann nach KÖPKE (1999) darauf zurückgeführt werden, daß Wärmepumpen eine Betriebsdauer von etwa 20 Jahren haben, nach diesem Zeitraum also ausgetauscht werden müssen. Demnach drücken die jüngsten Zuwächse in den Verkaufszahlen möglicherweise gar kein gesteigertes Interesse an der Wärmepumpe aus. Noch nicht berücksichtigt wurden hier allerdings Veränderungen, die sich aufgrund der zahlreichen Fördermaßnahmen der letzten 2-3 Jahre ergeben haben.

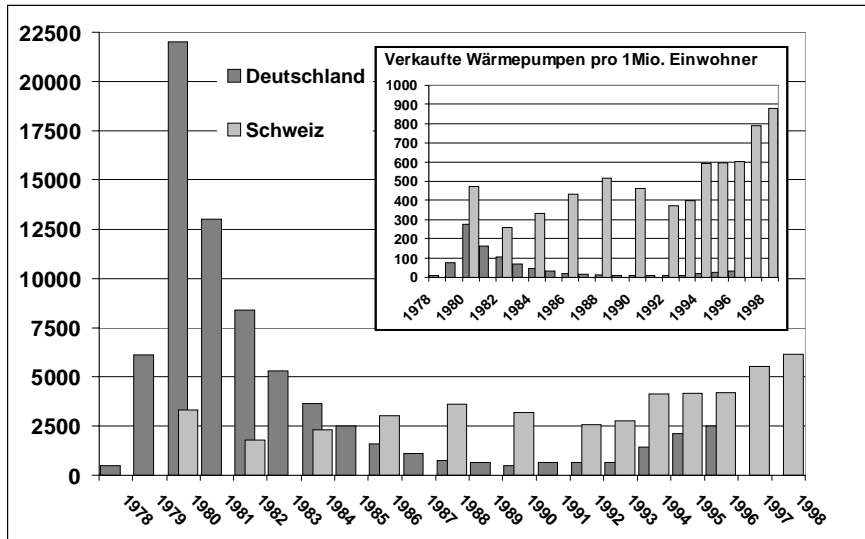


Abbildung 1-5: Entwicklung der Verkaufszahlen von Wärmepumpen in Deutschland und in der Schweiz. Nach KALTSCHMITT ET AL. (1999). Der Anteil der erd- und grundwassergekoppelten Wärmepumpen beträgt in der Schweiz nach BRUNNER & GORHAN (1999) insgesamt etwa 55%. In Deutschland beträgt der Anteil der Wärmepumpen, die Untergrundenergie nutzen, bei den neuinstallierten Wärmepumpenanlagen etwa 85% (nach FREHN, 1997). Zahlen für Deutschland aus den Jahren 1997-1999 sind Abbildung 2-5 zu entnehmen.

Sehr deutlich wird aus Abbildung 1-5 aber auch, daß sich die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, zumindest in Deutschland, auch in jüngster Zeit nicht in dem Maße entwickelt hat, wie es ihre ökologische Bedeutung erwarten ließe. Dafür lassen sich verschiedene Gründe angeben. Diese bestehen zum z.T. in den zu hohen Erwartungen, die anfangs an die erdgekoppelte Wärmepumpentechnologie gestellt wurden (KALTSCHMITT ET AL., 1999). Falsche Dimensionierung der Anlagen führte entweder zum Versagen (Unterdimensionierung) oder, was nach SHONDER & HUGHES (1998) häufiger der Fall ist, zu unangemessenen hohen Kosten (Überdimensionierung) der Anlagen.

Daß dies nicht der einzige Grund sein kann, zeigt ein Vergleich mit der Situation in der Schweiz. Dort ist, wie Abbildung 1-5 zeigt, die Zahl der Wärmepumpenverkäufe pro Kopf derzeit um den Faktor 10 höher als in Deutschland. Die unterschiedliche Entwicklung in der Schweiz kann weder auf die klimatischen noch auf die geologischen Verhältnisse zurückgeführt werden, da diese sich nicht gravierend von denen in (Süd-)Deutschland unterscheiden. Die Gründe sind vielmehr in einer konsequenteren Forschungs- und Förderungspolitik zu sehen, die in der Schweiz zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Technologie und des technischen Know-hows von Planungsbüros und Installationsfirmen führte (vgl. z.B. RYBACH & EUGSTER, 1998). So wurden in der Schweiz von einem einzigen Bohrunternehmern bis Mitte 1997 7900 Erdwärmesonden mit einer Gesamtlänge von 695 km eingebaut (SANNER, BOISSAVY ET AL., 1999), während in z.B. Bayern bis Mitte 1998 von insgesamt 71 Erdsondenanlagen mit etwa 440 Einzelsonden ausgegangen wird (WENDEL, 2000).

Die Entwicklungen in der Schweiz beginnen nur langsam auf den deutschen Markt überzugreifen (SANNER, BOISSAVY ET AL., 1999). Insgesamt bewegen sich Akzeptanz und Bekanntheitsgrad der oberflächennahen Geothermie hierzulande sowohl bei den Endverbrauchern als auch auf Seiten der Genehmigungsbehörden auf sehr niedrigem Niveau. Technisches und geologisches Fachwissen ist bei planenden und ausführenden Firmen nicht flächendeckend verfügbar.

Aus diesem Grund bleibt die thermische Nutzung des Untergrundes im Vergleich zu Sonnen-, Wind und Wasserenergie, die aufgrund ihrer auch für den Laien sofort ersichtlichen und erfahrbaren „Nutzbarkeit“ star-

ke Förderung und Zuspruch finden (siehe Abbildung 1-2), wenig beachtet. Zu der prinzipiell vorhandenen Scheu, ein Energieversorgungssystem auf etwas Unbekanntes und Unzugängliches wie den Untergrund zu stützen, kommt hinzu, daß der Planungsaufwand für Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes höher ist als bei anderen regenerativen Energieformen. Für die Planung sind Kenntnisse aus wenig verwandten Fachdisziplinen, im Wesentlichen aus der Geologie, den Ingenieurwissenschaften und der Physik erforderlich. Solche Kenntnisse sind derzeit nur selten in einer Person oder einem Unternehmen vereint. Insgesamt ergibt sich damit für einen Interessenten (Bauherr, Architekt) das Problem, daß es im Allgemeinen keinen Ansprechpartner gibt, der in der ersten Planungsphase umfassend beantworten kann, ob am geplanten Standort eine solche Anwendung realisierbar ist. Es existieren auch keine aussagekräftigen Kartenwerke, wie sie z.B. im Bereich Sonnen- und Windenergie⁴ bereits vorhanden sind.

Um die Nutzung der Erdwärmennutzung zu steigern sind demnach vorrangig zwei Aufgaben zu erfüllen:

1. Erhöhung von Bekanntheitsgrad und Akzeptanz der Technologien.
2. Schaffung verlässlicher Informationsquellen für die regionale und lokale Anwendbarkeit der verschiedenen Verfahren.

In der vorliegenden Untersuchung wird ermittelt, inwieweit sich Geoinformationssysteme (GIS) zur Bewältigung dieser beiden Aufgaben einsetzen lassen. Ein solches GIS soll die notwendigen Daten über den Untergrund soweit zusammenfassen, daß ein Interessent, ohne einen Fachmann einschalten zu müssen, konkrete Vorstellungen über die Realisierbarkeit entsprechender Techniken an seinem Standort entwickeln kann. Im Vordergrund steht dabei die Frage, wie man mit vertretbarem Aufwand ein Maximum an Information zur Verfügung stellen kann, mit dem Ziel, den Planungsaufwand zu verringern und den Verbreitungsgrad von thermischen Nutzungen des Untergrundes zu erhöhen.

Zentraler Gegenstand des GIS ist die Beurteilung von Standorten hinsichtlich ihrer Eignung für die thermische Nutzung des Untergrundes. Abbildung 1-6 zeigt den prinzipiellen Ablauf eines solchen Bewertungsvorgangs im Informationssystem.

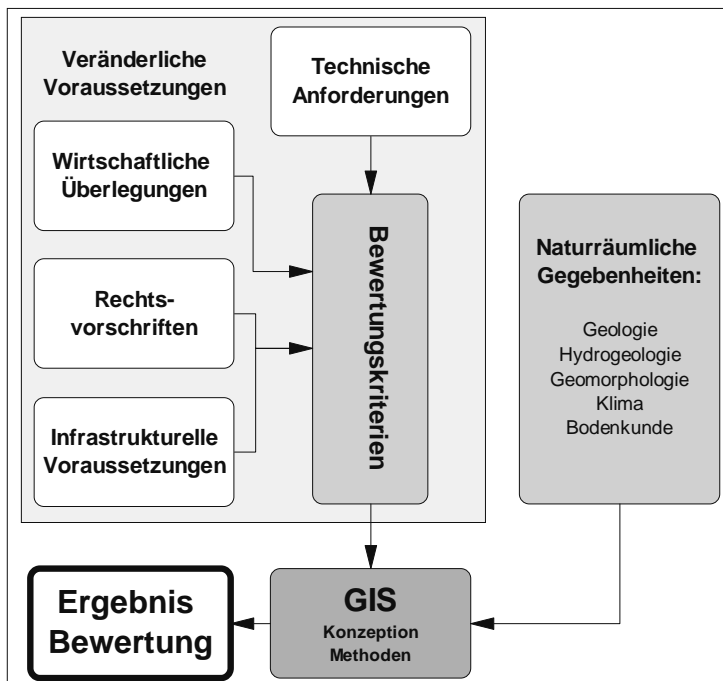


Abbildung 1-6: Schema einer Standortbewertung im GIS: Aus den technisch-geologischen Anforderungen eines Verfahrens sowie den wirtschaftlichen, rechtlichen und infrastrukturellen Voraussetzungen werden Bewertungskriterien abgeleitet. Im GIS werden diese Kriterien auf die Verhältnisse im Untersuchungsraum angewendet. Ergebnis ist eine Karte aller geeigneten Standorte oder die individuelle Bewertung eines Einzelpunktes.

⁴ Bayerischer Solar- und Windenergieatlas (BayWiMin, 1997).

1.5 Untersuchungsgebiet

Wie aus dem Titel dieser Arbeit zu schließen ist, umfaßt das Untersuchungsgebiet schwerpunktmäßig den Regierungsbezirk Unterfranken. Dabei handelt es sich allerdings nur um eine relativ lockere Abgrenzung, schon weil es im Rahmen einer geowissenschaftlichen Untersuchung wenig sinnvoll erscheint, politische Grenzen als absoluten Maßstab zu wählen. Da es aus Gründen der Datenverfügbarkeit und vor dem Hintergrund der sehr zeit- und arbeitsaufwendigen Datenerhebung und Dateneingabe nicht möglich war, den gesamten Regierungsbezirk Unterfranken flächendeckend im Detail zu bearbeiten, wurde ein neun Blätter der TK25 umfassendes Teilgebiet für eingehendere Untersuchungen ausgewählt. Dieses wird als „Beispielausschnitt“ bezeichnet (vgl. Abbildung 1-7).

Für Gesamt-Unterfranken (ca. 8500km²) wurde eine Übersichtskartierung des Potentials für thermische Nutzungen durchgeführt. Diese berücksichtigt nur teilweise die dreidimensionale Verteilung der Untergrundfaktoren. Der Beispielausschnitt umfaßt eine Fläche von etwa 1200km². Zentrales Kartenblatt ist Blatt 6125 Würzburg Nord. Für diesen Ausschnitt wurde eine detaillierte Analyse der geologisch-hydrogeologischen Voraussetzungen für die Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes durchgeführt. Sie erfaßt sowohl den dreidimensionalen Aufbau des Untergrundes als auch rechtliche Fragestellungen.

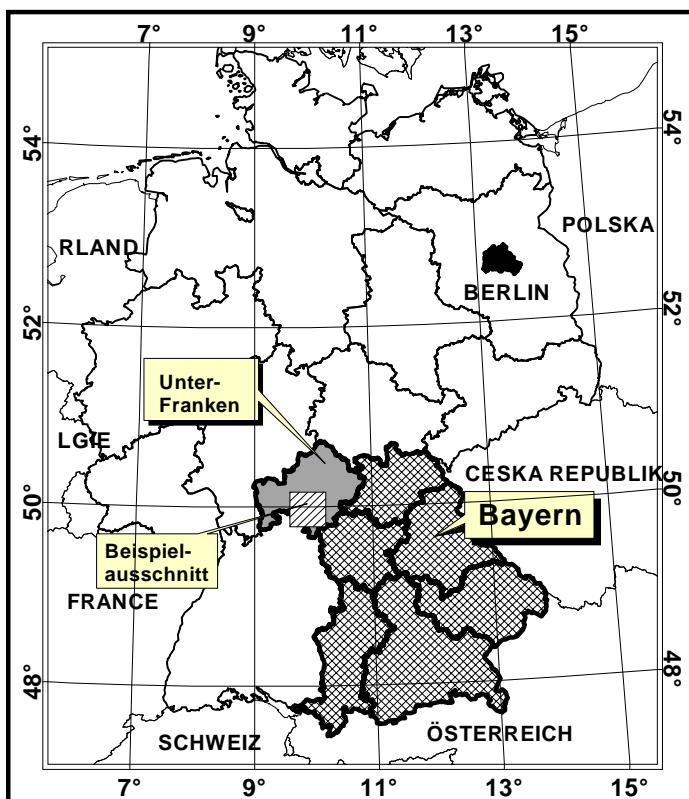
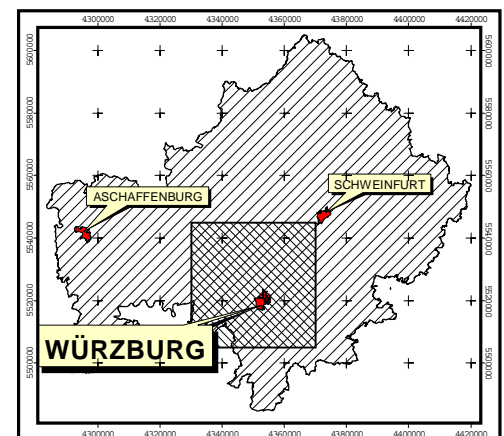


Abbildung 1-7: Lage der Untersuchungsgebiete. Grau hervorgehoben der Regierungsbezirk Unterfranken (8500km²) im Nordwesten Bayerns (schraffiert).



Die quadratische Fläche mit der Regierungsbezirkshauptstadt Würzburg im Zentrum zeigt den „Beispielausschnitt“, für den eine detaillierte GIS-Analyse durchgeführt wurde.

1.6 Stand der Erkenntnisse im Bereich GIS-gestützter Potentialstudien für die thermische Nutzung des Untergrundes

Die Idee, die für die thermische Nutzung des Untergrundes geeigneten Gebiete kartenmäßig darzustellen, ist sicher so alt wie diese Verfahren selbst, da es offensichtlich ist, daß thermische Nutzungen nicht überall in gleichem Maße möglich sind. Dementsprechend finden sich in zahlreichen früheren Veröffentlichungen Kartendarstellungen, die in meist sehr kleinem Maßstab die Eignung verschiedener Gebiete zeigen (z.B. SANNER, 1992). Solche kleinmaßstäbigen Darstellungen sind allerdings nur begrenzt hilfreich, da sie nicht die notwendige Detailinformation für eine angemessene Standortbeurteilung bieten. Deshalb forderten z.B. SANNER & KNOBLICH (1993) die Erstellung von Kartenwerken, in denen die relevanten Parameter für die Beurteilung der geologischen, hydrogeologischen, thermischen und rechtlichen Verhältnisse dargestellt werden

sollen. Als ausreichend für die Belange von Planern und Baupraktikern wurden von diesen Autoren Maßstäbe von 1:100.000 bis 1:200.000 angegeben. Ein Kartenwerk in dieser Genauigkeit, das auch die Untergrundverhältnisse berücksichtigt, existiert bislang nicht. Es wurden allerdings für verschiedene Regionen Karten kleineren Maßstabs erstellt, die das geologische Potential und vor allem genehmigungsrechtliche Aspekte darstellen (vgl. dazu Kap. 6.2.2; Tabelle 6-4). Aufgrund der Verbreitung von Geoinformationssystemen in der Kartographie werden entsprechende Karten auch vermehrt mit Hilfe solcher Systeme erstellt. Ob dabei die Verwendung von GIS-Software allein schon die Berechtigung für die Verwendung von Bezeichnungen wie „GIS-gestützte Analyse“ o.ä. gibt oder erst die Anwendung typischer GIS-Arbeitsmethoden, soll hier nicht beurteilt werden.

1.7 Informationsquellen zur thermischen Nutzung des Untergrundes

1.7.1 Verbände und Institutionen

Weltweit existiert eine große Anzahl internationaler, staatlicher und privatwirtschaftlicher Institutionen, die sich mit der thermischen Nutzung des Untergrundes in den Bereichen Geothermie, Wärmepumpentechnik, regenerativen Energien allgemein u.v.m. befassen. Im deutschsprachigen Raum sind hier vor allem die Geothermische Vereinigung in Deutschland (GTV), die Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG) und das Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW⁵), das am Fachinformationszentrum Karlsruhe angesiedelt ist und sich die Verbreitung von Informationen zum Thema Wärmepumpen zum Ziel gesetzt hat, zu nennen.

Wichtige Forschungs- und gewerbliche Institutionen in Deutschland, die sich seit langem mit entsprechenden Themen befassen, sind u.a. das Institut für Angewandte Geowissenschaften der Universität Gießen, die Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan, das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart und die Firma Geothermie Neubrandenburg (GTN).

Eine besonders große Bedeutung im Bereich der Untergrundspeicherung hat die „International Energy Agency“ (IEA). Die IEA legt insgesamt 14 verschiedene Forschungs- und Demonstrationsprogramme auf, von denen sich eines mit der Energiespeicherung im Untergrund befaßt. An diesem als „Energy Conservation through Energy Storage Implementing Agreement“ (ECES IA) bezeichneten Programm nehmen insgesamt 11 Staaten teil. Seit 1983 wurden 13 Teilprogramme („Annexes“) bearbeitet, weitere sind geplant (Tabelle 1-1). Ein Großteil der bisher weltweit durchgeführten Projekte zur Untergrundspeicherung wurde innerhalb dieses Programms oder in enger Verbindung damit durchgeführt. Erfahrungen werden auf Expertenmeetings ausgetauscht und neuerdings im Internet veröffentlicht (vgl. z.B. NORDELL, 1999).

1.7.2 Literatur

Das deutschsprachige „Standardwerk“ für die Nutzung des flachen Untergrundes mit Wärmepumpen, in dem auch auf Speicherung eingegangen wird, stellt die IZW-Schrift „Erdgekoppelte Wärmepumpen“ von SANNER (1992) dar. Ein weiteres deutschsprachiges Grundlagenwerk sind die „Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme“ des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten Vereins SIA (SIA, 1996). Ebenfalls vom SIA wurde die „Wegleitung zur saisonalen Wärmespeicherung“ (HADORN ET AL., 1989) aufgelegt. Ein wichtiges Übersichtswerk zur Untergrundspeicherung stellt „Underground thermal Energy storage state of the art 1994“ dar (BAKEMA ET AL., 1995). Eine ausführliche Betrachtung aller geothermischen Verfahren unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, politischen und ökologischen Aspekten stellt das Werk „Geothermische Energie“ von KALTSCHMITT ET AL. (1999) dar.

⁵ Nach dem Ende der Projektlaufzeit wird die Informationsarbeit des IZW seit 1.1.2000 vom Initiativkreis Wärmepumpe (IWP) weitergeführt.

Abgeschlossen:	
Annex 1:	Large Scale Thermal Storage Systems Evaluation. Closed 1983.
Annex 2:	Lake Storage Demonstration Plant in Mannheim. Cancelled.
Annex 3:	Aquifer Storage Demonstration Plant in Lausanne-Dorigny. Closed 1989
Annex 4:	Short-term Water Heat Storage Systems. Closed 1988.
Annex 5:	Full-scale Latent Heat Storage Installations. Closed 1992.
Annex 6:	Environmental and Chemical aspects of Thermal Energy Storage in Aquifers. Closed 1996.
Annex 7:	Innovative and Cost-effective Seasonal Cold Storage Applications. Closed 1996.
Laufend	
Annex 8:	Implementing Underground Energy Systems. 1994-1999
Annex 9:	Electrical Energy Storage Technologies for Utility Network Optimization. 1996-1999.
Annex 10:	PCM and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 1997- 2000.
Annex 12:	High Temperature Thermal Energy Aquifer and Duct Storage. 1997-1999.
Annex 13:	Design, Construction and Maintenance of UTES Wells and Boreholes. 1997-1999.
Geplant	
Annex 14:	Cooling in All Climates with Thermal Energy Storage
Annex 15:	Electrical Energy Storage and the Integration of Renewables

Tabelle 1-1: Teilprogramme (Annexe) des Programms „Energy Conservation through Energy Storage“ (ECES IA) der International Energy Agency (IEA) nach NORDELL (1999).

1.7.3 Tagungen

Von den vielen Tagungen und Treffen, die sich jährlich mit der thermischen Nutzung des flachen Untergrundes befassen, ist vor allem eine Tagungsreihe hervorzuheben, die seit 1981 im 3-Jahreszyklus stattfindet und sich mit allen Formen der thermischen Energiespeicherung befaßt. Seit 1985 werden diese Tagungen mit dem Suffix „-stock“ gekennzeichnet (Tabelle 1-2).

Tagung	Kurzbezeichnung	Ort	Jahr	Proceedings (Hrsg.)
International Conference on Seasonal Thermal Energy Storage And Compressed Air Storage		Seattle, USA	1981	
International Conference on Subsurface Heat Storage In Theory And Practice		Stockholm, Schweden	1983	BOYSEN (1983)
Third International Conference on Energy Storage For Building Heating And Cooling	“ENERSTOCK”	Toronto, Canada	1985	MOROFISKY (1985)
4 th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling	“JIGASTOCK”	Versailles, Frankreich	1988	JIGASTOCK (1988)
5 th International Conference on Thermal Energy Storage	“THERMASTOCK”	Scheveningen Niederlande	1991	VAN MOURIK (1991)
6 th International Conference on Thermal Energy Storage	“CALORSTOCK”	Espoo, Finland	1994	KANGAS & LUND (1994)
7 th International Conference on Thermal Energy Storage	“MEGASTOCK”	Sapporo, Japan	1997	OCHIFUJI & NAGANO (1997)
8 th International Conference on Thermal Energy Storage	“TERRASTOCK”	Stuttgart	2000	(September 2000)

Tabelle 1-2: Die wichtigsten Tagungen im Bereich Untergrundspeicherung thermischer Energie seit 1981.

1.8 Vorbemerkungen

Die Region Unterfranken erweist sich nicht als das günstigste Gebiet für die Durchführung einer Untersuchung, die sich mit den Einsatzmöglichkeiten von Geoinformationssystemen (GIS) im Rahmen von Standortbewertungen für die thermische Nutzung des Untergrundes befaßt. Dies liegt zum einen an der beschränkten Verfügbarkeit der erforderlichen Daten⁶, zum anderen an der nicht immer günstigen, für manche Verfahren sogar gänzlich ungeeigneten geologischen Situation. Andererseits ist es aber auch interessant, eine solche Studie an einem etwas „ungünstigerem“ Gebiet durchzuführen, um die hier besprochenen GIS-Verfahren zu erproben. Ergebnisse, die anhand eines „Idealgebiets“ gewonnen werden, sind kaum auf Regionen mit schlechten Voraussetzungen zu übertragen. Hingegen ist es leichter, Ergebnisse von „schwierigen“ Gebieten auf einfachere Verhältnisse zu übertragen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein sehr weitgefächertes Spektrum unterschiedlicher Themengebiete vorgestellt und bearbeitet. Zunächst werden die physikalischen und geologisch-hydrogeologischen Parameter und Prozesse, die bei einer Standortbewertung berücksichtigt werden müssen, erläutert. Es folgt eine vorwiegend technisch-physikalisch orientierte Beschreibung der unterschiedlichen Techniken der Wärmegewinnung und -speicherung. Im Weiteren werden die relevanten geologisch-hydrogeologischen Voraussetzungen im Untersuchungsgebiet Unterfranken vorgestellt. Soweit notwendig, werden kultur- und wirtschaftsgeographische Gesichtspunkte und die rechtlichen Gegebenheiten erläutert. All diese Aspekte werden durch ihre gemeinsame Verarbeitung und Analyse in einem Geoinformationssystem zusammengefaßt. Die wesentlichen Grundlagen von GIS und die speziell im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten Methoden werden deshalb in der erforderlichen Breite vorgestellt. Es war im Rahmen dieser Untersuchung nicht annähernd möglich, alle thematischen Teilgebiete erschöpfend darzustellen. Den Schwerpunkt bilden geologische Aspekte. Experten anderer Fachdisziplinen werden sicherlich Defizite feststellen.

⁶ Beispielsweise liegen nur für etwa 30% der Fläche amtliche geologische Karten im Maßstab 1:25.000 vor, davon keine digital.

2 Technische, physikalische und hydrogeologische Grundlagen

2.1 Physikalische und energietechnische Grundbegriffe

In dieser kurzen Übersicht werden einige wichtige physikalische Grundlagen erläutert und einige begriffliche Klärungen vorgenommen. Eine ausführliche Beschäftigung mit den physikalischen Vorgängen im Untergrund findet in Kap. 2.3.2 statt.

Wärmeenergie oder thermische Energie wird als Energieinhalt eines abgeschlossenen thermodynamischen Systems definiert. Eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung dieser Energie ist allerdings erst ab einem bestimmten Temperaturniveau möglich. Deshalb werden auch die Begriffe „**Exergie**“ und „**Anergie**“ verwendet, wobei unter Exergie der prinzipiell nutzbare Anteil einer Energieform verstanden wird, der direkt in Arbeit umgewandelt werden kann (FRICKE & BORST, 1984, vgl. auch Kap. 3.1.3).

Der Untergrund kann sowohl als Wärmequelle, als auch als Wärmesenke zu Kühlzwecken eingesetzt werden. Neben dem großen Kühlbedarf, der bei den verschiedensten technischen Prozessen entsteht, kommt auch der Kühlung zur Klimatisierung von Wohn- und Arbeitsräumen eine immer höhere Bedeutung zu. Die Begriffe „**Kältespeicherung**“ und „**Kältegewinnung**“ werden hier analog zu den Begriffen „**Wärmespeicherung**“ und „**Wärmegegewinnung**“ (auch „Wärme-Entzug“) verwendet. Ungeachtet der großen Bedeutung, die die Kühlprozesse bei der thermischen Nutzung des Untergrundes haben, wird in dieser Arbeit immer nur von „Wärme-“ Speicherung und Gewinnung gesprochen, wenn in diesem Zusammenhang sowohl Wärme als auch Kälte gespeichert oder gewonnen werden kann. Nur in Fällen, in denen eine Unterscheidung unbedingt notwendig ist, wird auf die Aspekte der „Kälte-“ Speicherung und -Gewinnung speziell eingegangen.

Wärmetransport erfolgt auf drei verschiedene Arten: durch **Wärmestrahlung**, durch **Wärmeleitung** und durch **konvektiven Wärmetransport** in flüssigen und gasförmigen Phasen. Wärmestrahlung ist bei Vorgängen im Untergrund unbedeutend. Eine bedeutende Größe beim Wärmetransport ist die **Wärmeleitfähigkeit** λ [W/(mK)]. Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist eine im Allgemeinen temperaturabhängige Materialgröße, die angibt, welche Wärmemenge die Einheitsfläche eines Körper bei einem konstanten Temperaturgradienten von 1K auf einem Meter Entfernung in einer Sekunde durchfließt. Typische Werte für einige wichtige Materialien zeigt Abbildung 2-1.

Eine weitere wichtige materialspezifische Größe für die Wärmespeicherung ist die **spezifische Wärmekapazität** c [J/(kg·K)]. Sie gibt an, welche Wärmemenge man einem Kilogramm eines Stoffes zuführen muß, um seine Temperatur um ein Grad Kelvin zu erhöhen. Es ist offensichtlich, daß dieser Größe bei der Wärmespeicherung eine entscheidende Bedeutung zukommt, da sie die Stoffmenge festlegt, die für die Speicherung einer bestimmten Wärmemenge erforderlich ist. Da bei der Wärmespeicherung häufig weniger die Masse, als das Volumen des Speichers von Interesse ist, wird häufiger die **volumetrische Wärmekapazität** ρc [J/(m³K)] angegeben, wobei ρ [g/cm³] die Dichte Stoffes ist. Wie Abbildung 2-1 zeigt, hat Wasser mit großem Abstand die größte spezifische Wärmekapazität. Auch die volumetrischen Wärmekapazität, ist trotz der vergleichsweise geringen Dichte, noch sehr hoch. Damit wird klar, daß Wasser eine bedeutende Rolle als Wärmespeicher- und Wärmetransportmedium zukommt.

Wärmeträger und -transportmedien sind Stoffe, mit denen die Wärme in den Untergrund hinein und wieder hinaus gelangt. Ihnen kommt sowohl beim Wärmeentzug, als auch bei der Speicherung von thermischer Energie eine hohe Bedeutung zu. Wasser ist wegen seiner hohen spezifischen Wärmekapazität, der hohen Verfügbarkeit, der einfachen Transportmöglichkeiten und der geringen Kosten ein ideales Wärmetransportmittel. Der Gefrierpunkt kann gegebenenfalls durch Zusätze herabgesetzt werden.

Wärmespeicherung: Wärmeenergie kann immer nur als Enthalpie, d.h. gekoppelt an einen Stoff, gespeichert werden (FISCH & KÜBLER, 1991). Voraussetzung dafür ist im Allgemeinen ein Behälter oder eine Begrenzung des Stoffvolumens, in dem die Wärme gespeichert wird. Es bestehen prinzipiell drei verschiedene Verfahren der Wärmespeicherung: von **Speicherung sensibler Wärme** wird gesprochen, wenn der Stoff, der die Wärme speichert, „fühlbar“ wärmer als seine Umgebung ist. Bei der **Speicherung latenter Wärme** macht man sich den Umstand zu Nutze, daß sich beim Phasenübergang die Enthalpie eines Mediums bei

gleichbleibender Temperatur ändert. Die **chemische Wärmespeicherung** nutzt die Energie, die frei wird, wenn zwei Stoffe miteinander reagieren. Abgesehen von dem Umstand, daß es beim Wärmeentzug aus dem Untergrund zur Eisbildung kommen kann (→ latente Wärme), handelt es sich bei der Wärmespeicherung im Untergrund immer um Speicherung von sensibler Wärme.

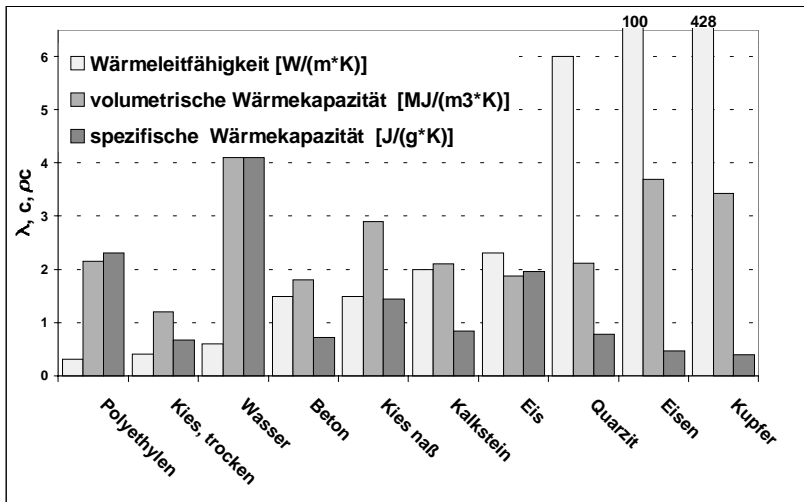


Abbildung 2-1: Thermische Kenngrößen verschiedener Materialien. Werte aus SCHÖN (1983), FISCH & KÜBLER (1991), SANNER (1992).

2.2 Technische Hilfsmittel

Zum Betrieb von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes sind im Allgemeinen zahlreiche technische Einrichtungen und Geräte notwendig. Darunter fallen alle Einrichtungen, die zum Transport, zur Umwandlung, Übertragung und Zwischenspeicherung von Wärmespeicher- und -transportmedien erforderlich sind. Bei Verfahren mit Grundwasserentnahme sind vor allem Brunnen und Fördereinrichtungen, aber auch Reinigungs- und Aufbereitungsvorrichtungen zu nennen. Einen vollständigen Überblick geben z.B. HADORN ET AL. (1989), SANNER (1992) und SIA (1996).

2.2.1 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe entzieht einer Wärmequelle bestimmter Temperatur Wärmeenergie und hebt diese unter dem Einsatz von mechanischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau an. Da die Temperaturen im Untergrund bis 200m Tiefe im mitteleuropäischen Raum 20°C selten überschreiten, kommt einem solchen Gerät bei thermischen Nutzungen eine entscheidende Bedeutung zu. Wärmepumpen kommen auch bei Anlagen zur saisonalen Speicherung von thermischer Energie zum Einsatz, sei es um bei Niedertemperaturspeichern die zur Nutzung erforderlichen Temperaturen erzielen zu können oder bei Hochtemperaturspeichern die Temperatur anzuheben, wenn sie nach einer gewissen Entladezeit die erforderlichen Temperaturen unterschreiten.

2.2.1.1 Funktionsweise

Der Begriff Wärme-„Pumpe“ kann darauf zurückgeführt werden, daß Wärmeenergie nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht von sich aus von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen kann, sie muß also wie eine Flüssigkeit auf ein höheres Niveau „gepumpt“ werden (KRUSE & HEIDELCK, 1997). Das Prinzip einer **Kompressionswärmepumpe** ist in Abbildung 2-2 dargestellt. In einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert ein niedrig siedendes Kältemittel, das durch die von der Wärmequelle angelieferte Wärme im Verdampfer zum Sieden gebracht wird. Im Verdichter wird der Dampf komprimiert, wodurch seine Temperatur ansteigt. Am Verflüssiger wird dem Kreislauf über einen Wärmetauscher Wärme entzogen und zum Heizsystem abgeführt. Das Kühlmittel unterschreitet dabei den Siedepunkt. Anschließend wird über ein

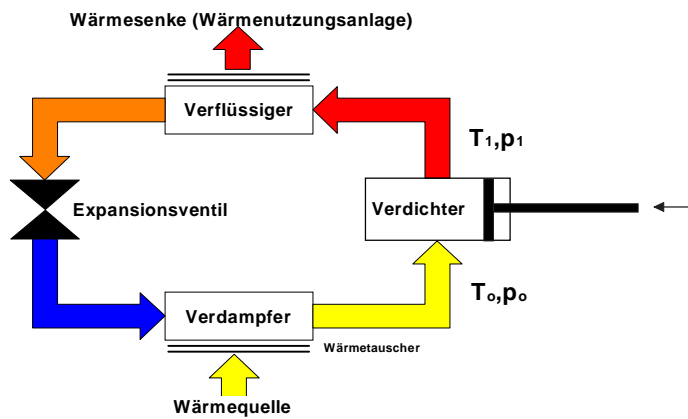


Abbildung 2-2: Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe.

Das Prinzip der **Absorptionswärmepumpe** ist mit dem der in Abbildung 2-2 gezeigten Kompressionswärmepumpe bis auf den Verdichter identisch. Hier wird statt einem mechanischen ein „thermischer Verdichter“ eingesetzt (weiteres z.B. in KALTSCHMITT ET AL., 1999).

2.2.1.2 Wirkungsgrad

Um die energetische Effizienz bzw. Wirtschaftlichkeit und letztlich auch den ökologischen Nutzen einer Wärmepumpenanlage beurteilen zu können, vergleicht man die beim Wärmeerzeugungsprozeß aufgewendete Antriebsenergie (mechanischer Verdichter) mit der abgegebenen Nutzenergie. Hierzu werden verschiedene Kenngrößen angegeben, mit denen die Wärmepumpe bzw. die Wärmepumpenanlage charakterisiert und mit anderen verglichen werden kann. Bei Elektrowärmepumpen gibt die **Leistungszahl** ε das Verhältnis der am Verflüssiger abgegebenen Heizleistung Q_{th} zur Leistungsaufnahme P_{el} zu einem bestimmten Betriebspunkt⁷ an:

$$\varepsilon = \frac{\text{Heizwärmeleistung } Q_{th}}{\text{Leistungsaufnahme } P_{el}}$$

Gleichung 2-1

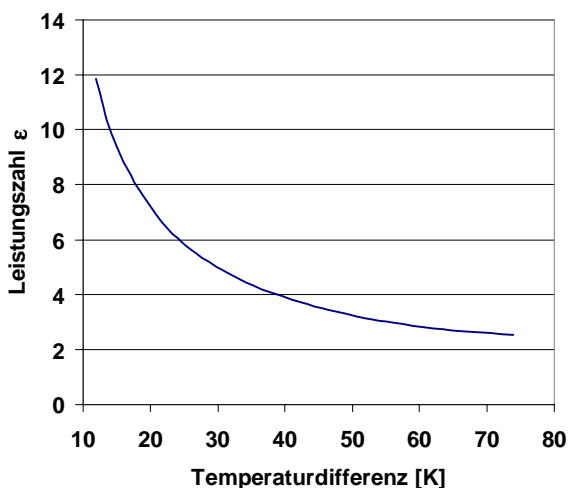


Abbildung 2-3: Die Leistungszahl ε in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Verflüssiger. Nach KRUSE & HEIDELCK (1997).

Regelventil der Druck entspannt. Die Temperatur des Kühlmittels sinkt dadurch unter die Temperatur der Wärmequelle und ist so in der Lage, Wärme von der Wärmequelle aufzunehmen.

Der Druck im Verdichter wird durch elektrische Antriebsenergie oder Verbrennungsmotoren erzeugt. Bei kleineren Heizanlagen bis zu 20kW Leistung werden heute fast ausschließlich **Elektrowärmepumpen** eingesetzt. **Gas- und Dieselmotorwärmepumpen** sind dagegen vorwiegend bei Anlagen ab 150kW Leistung zu finden (KRUSE & HEIDELCK, 1997).

Sinkt, z.B. durch den Entzug von Wärme, die Temperatur der Wärmequelle, muß eine höhere elektrische Leistung aufgewendet werden, um die gleiche Heizwärmeleistung zu erbringen. Ebenso muß eine höhere elektrische Leistung aufgebracht werden, wenn bei gleichbleibender Quellentemperatur eine höhere Heizleistung gefordert wird. Die Leistungszahl ε ist demnach also nicht konstant, sondern abhängig von den Veränderungen auf der Wärmequellen- und der Nutzerseite (Abbildung 2-3). Da im Jahresverlauf sowohl die Temperatur der Wärmequelle (in Abhängigkeit vom Quellentyp) als auch die benötigte Heizleistung starken Änderungen unterworfen sein können, wird für eine Wärmepumpenanlage sinnvollerweise nicht die Leistungszahl, sondern die sogenannte Jahresarbeitszahl β (JAZ) angegeben⁸. Diese bezeichnet das Ver-

⁷ Festgelegte Temperatur am Verdampfer/Verflüssiger, z.B. 0°/35°C.

⁸ Entspricht in etwa dem „COP“ (coefficient of performance).

hältnis der pro Jahr abgegebenen Heizwärme zur aufgewendeten elektrischen Antriebsenergie:

$$\beta = \frac{\text{Heizwärme pro Jahr } Q_{th}}{\text{Antriebsenergie pro Jahr } P_{el}} = \frac{\int_a Q_{th} dt}{\int_a P_{el} dt} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

Die Jahresarbeitszahl charakterisiert das gesamte Heizsystem und nicht die Wärmepumpe als solche. Eine ausführliche Anleitung zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen unter Berücksichtigung zahlreicher Faktoren geben ZWEIFEL & WETTER (1997). In eine energetisch-wirtschaftliche Betrachtung muß darüberhinaus bei vielen Wärmequellen noch die für den Betrieb von Umwälzpumpen aufgewendete Energie miteinbezogen werden.

2.2.1.3 Wärmequellen

Als Wärmequellen für Wärmepumpensysteme eignen sich sowohl natürliche als auch künstliche Wärmequellen. Künstliche Wärmequellen sind beispielsweise Abwasser, Kreislaufwasser aus Fernheiznetzen, Abluft aus Klimaanlage oder Prozeßwärme. An natürlichen Wärmequellen stehen Umgebungsluft, der Untergrund sowie Grund- und Oberflächenwasser zu Verfügung. Besonders geeignet sind Wärmequellen mit möglichst hoher und zeitlich konstanter Temperatur. Außenluft und Oberflächenwasser sind in dieser Hinsicht weniger günstig, da sie gerade dann ihre minimale Temperatur erreichen, wenn der Heizwärmebedarf am höchsten ist. Ähnliches gilt für die Nutzung des oberflächennahen Erdreichs durch horizontale Erdreichwärmetauscher. Der tiefere Untergrund und das Grundwasser zeigen dagegen eine meist sehr regelmäßige saisonale Temperaturentwicklung und sind deshalb als Wärmequelle besonders gut geeignet. Wie Abbildung 2-6 zeigt, werden mit diesen Wärmequellen die höchsten Energie- und CO₂-Einsparungen erreicht.

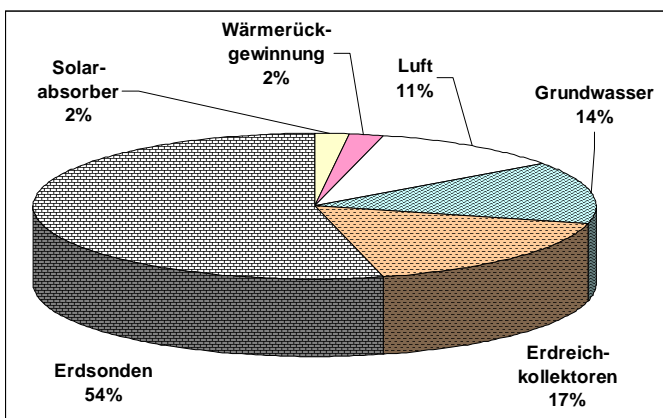


Abbildung 2-4: Anteile der Wärmepumpen-Wärmequellen der 1993 bis 1997 im Verbreitungsgebiet des RWE installierten Wärmepumpen. Aus FREHN (1997).

Von den bis zum Jahr 1996 etwa 48000 installierten Wärmepumpen in Deutschland werden rund 10-15% mit Erdreich und 20-30% mit Grundwasser als Wärmequelle betrieben (KALTSCHMITT ET AL., 1999). Damit beläuft sich die Gesamtzahl der Wärmepumpen zum Entzug von Untergrundwärme auf 14000-22000 mit einer geschätzten Gesamtleistung von 4-6PJ⁹. Durch die seit 1995 laufenden Förderungen des BMWi wurden im Jahr 1997 1106 Wärmepumpenanlagen gefördert, davon 818 erdgekoppelte und 180 grundwassergekoppelte. Von den im Versorgungsgebiet des RWE neuinstallierten Wärmepumpen verwenden 71% Erdreich und 14% Grundwasser als Wärmequelle (FREHN, 1997). Es ist also ein deutlicher Trend zur Nutzung von Untergrundwärme festzustellen, wobei hier vor allem die Erdsonden dominieren (vgl. Abbildung 2-4, 2-5).

⁹ PJ: Peta Joule = 10¹⁵J.

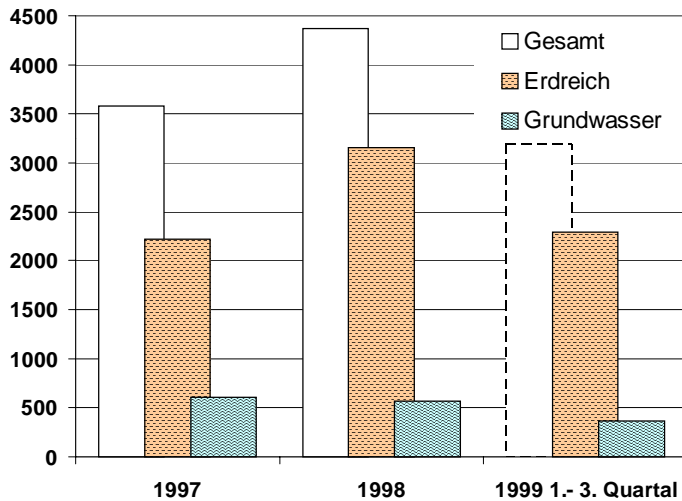


Abbildung 2-5: Aktuelle Wärmepumpenverkaufszahlen von 17 Wärmepumpenherstellern, zusammengestellt durch den Initiativkreis Wärmepumpe (IWP; freundl. mündl. Mittl.). In den letzten Jahren sind deutliche Gesamtzuwächse zu verzeichnen bei einem besonders hohen Anstieg der Erdreichwärmepumpen, von denen der weitaus größere Anteil auf Erdsonden entfallen dürfte (siehe Abbildung 2-4).

2.2.1.4 Wärmepumpen als Systemkomponente

Wärmepumpen sind Teile eines aus einer Vielzahl von Komponenten bestehenden Heizsystems. Neben der Art und Temperatur der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage sind deshalb zahlreiche weitere Aspekte zu berücksichtigen. Zu nennen ist hier beispielsweise der Wärmeenergiebedarf des Gesamtsystems und die Frage, ob die Wärmepumpe allein für die Wärmeerzeugung verantwortlich ist (**monovalenter Betrieb**) oder ob ein zusätzlicher Kessel für den Spitzenbedarf bereitsteht (**bivalenter Betrieb**). Dies ist vor allem auch dann von Bedeutung, wenn die Wärmepumpe nicht nur Heizwärme, sondern auch Warmwasser erzeugt. Werden größere Anlagen (z.B. Nahwärmenetze) betrachtet, sind Netzverluste und unterschiedliche Nutzungsprofile der einzelnen Abnehmer einzubeziehen. Besondere Bedeutung hat auch die Frage, ob die Wärmepumpe bei eventuell anfallendem Kühlbedarf zu Kühlung eingesetzt werden kann. Ebenso werden Systeme realisiert, bei denen die im Winter aus dem Erdreich entzogene Wärmeenergie über Solarkollektoren im Sommer wieder „aufgeladen“ wird (Kap. 3.3). Hinzu kommen zahlreiche Aspekte, die die Wärmepumpe selbst betreffen, beispielsweise die Frage nach der Umweltfreundlichkeit und Leistungsfähigkeit von Kühlmitteln.

2.2.1.5 Umweltaspekte

Wärmepumpen gelten als umweltfreundliche Technologie zur Erzeugung von Heizenergie. Sie nutzen regenerative Energiequellen oder Überschusswärme und erzeugen nur geringfügige Schadstoffemissionen. Deshalb werden Wärmepumpen im Rahmen von Programmen zur Energie- und CO₂-Einsparung gefördert und als umweltfreundlich beworben. Nicht erst in jüngster Zeit wird aber auch Kritik an dieser Sichtweise laut. Die durch Wärmepumpen möglichen Energie- und CO₂-Einsparungen sind stark von der Konfiguration des Gesamtsystems abhängig. Wie Abbildung 2-3 zeigt, sinkt die Leistungszahl von Elektrowärmepumpen bei einer niedrigen Quellen- und hohen Abnehmertemperatur drastisch, so daß immer mehr elektrische Antriebsenergie aufgewendet werden muß, um das System mit Heizenergie zu versorgen. Die Erzeugung des zum Antrieb verwendeten elektrischen Stroms und die dabei anfallenden Umwandlungsverluste und Emissionen müssen deshalb in die Umwelt- und Energiebilanz mit aufgenommen werden.

Berücksichtigt man, daß die zum Antrieb der Wärmepumpe notwendige elektrische Energie heute noch fast ausschließlich in konventionellen Kraftwerken mit geringem Primärenergienutzungsgrad erzeugt wird, so ergibt sich bei einer ungünstigen Anlagenkonstellation der WP-Anlage eine Gesamt-CO₂-Bilanz, die schlechter ist als die einer Anlage mit moderner konventioneller Technik. Bei einem derzeit ansetzbaren mittleren Wirkungsgrad konventioneller Kraftwerke von unter 40%¹⁰, müssen etwa 75% der über das Jahr erzeugten

¹⁰ aktuell 35-55%, modernes Steinkohlekraftwerk 43% nach KRUSE (1997) bzw. KALTSCHMITT & WIESE 1997 „Bundesmix“: 2.99KWh Primärenergieaufwand zur Erzeugung von 1 kWh Strom nach HERTLE ET AL. (1999).

thermischen Energie aus dem Untergrund stammen (Jahresarbeitszahl ≥ 3). Nach einer gerade erschienenen Studie des Umweltbundesamtes (HERTLE ET AL., 1999) wird dieser Faktor mit vielen Wärmequellen in der Praxis nicht erreicht. Am besten schneiden grundwassergekoppelte (Wasser-Wasser) und vertikale Erdreichwärmetauscher (Sole-Wasser) ab. Auch hier werden aber die von den Wärmepumpenherstellern und Stromversorgern genannten Jahresarbeitszahlen von deutlich über 3 häufig nicht erreicht. Gleichzeitig wird aber von den Autoren der genannten Studie darauf verwiesen, daß die gesamte Anlagenkonzeption entscheidend ist, insbesondere also auch die Wärmedämmung des Objekts und eine niedrige Heizungsvorlauf-temperatur (z.B. Fußbodenheizung, 35°C).

HERTLE ET AL. kommen zu dem Schluß, daß die Vergabe des Prädikats „blauer Umweltengel“ an die Wärmepumpe nicht gerechtfertigt ist, da der Nutzen für die Umwelt sehr stark von der Gesamtanlage abhängig ist. Sehr ungünstig schneiden im Vergleich mit Gasbrennwertkesseln, die als Vergleichsstandard verwendet werden, die Luft-Wasser-Wärmepumpen ab, die nach dieser Studie 53% höhere CO₂-Emissionen verursachen als ein Brennwertkessel. Weitere Vergleichszahlen sind Abbildung 2-6 zu entnehmen.

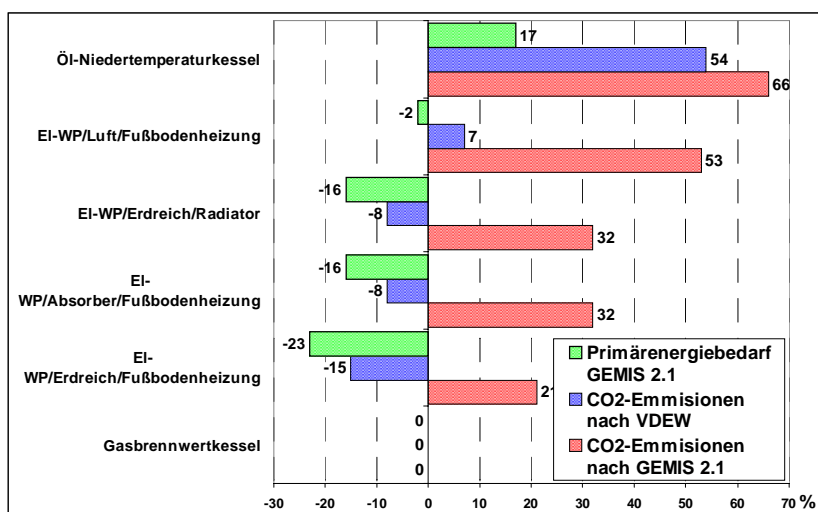


Abbildung 2-6: CO₂- Emissionen und Primärenergiebedarf verschiedener Heizsysteme im Vergleich zum Gasbrennwertkessel. Für den Primärenergiebedarf wird ein Verhältnis von kWh_{PE}/kWh_{EE} = 2.96 angesetzt (PE= Primär-, EE= Endenergie). Angaben entnommen aus HERTLE ET AL. (1999).

EI-WP: Elektrowärmepumpe

GEMIS, VDEW¹¹

Die deutlich unterschiedlichen Ergebnisse bei den CO₂-Emissionen in Abbildung 2-6 kommen durch den von den verschiedenen Quellen zugrundegelegten „Strommix“ zustande. Während GEMIS 2.1 von 70% Steinkohle und 15% Kernenergie ausgeht, setzt VDEW¹¹ 46% Steinkohle und 36% Kernenergie an, was letztlich zu deutlich niedrigeren Gesamt-CO₂-Emissionen führt. Es resultieren also offensichtlich je nach Sichtweise, Datengrundlage oder Berechnungsverfahren sehr unterschiedliche Bewertungen, wenn Energiesysteme miteinander verglichen werden. Den damit verbundenen Fragestellungen, die im Übrigen generell die Beurteilung der Umweltbelastung oder -verträglichkeit von Produkten betreffen, gehen im Hinblick auf die Nutzung regenerativer Energiequellen KALTSCHMITT & WIESE (1997) nach.

Nach HERTLE ET AL. (1999) kann festgehalten werden, daß Wärmepumpenheizanlagen einen deutlichen positiven Umweltbeitrag erbringen können, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Dies sind im einzelnen:

- eine niedrige Vorlauftemperatur im Heizsystem (Fußbodenheizung),
- hohe und gleichmäßige Wärmequellentemperatur und
- Wärmedämmung nach modernen Standards.

¹¹ GEMIS: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme – Okö-Institut Darmstadt; VDEW: Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke.

Beim Vergleich einzelner Wärmequellen schneiden Anlagen mit vertikalen Erdreichwärmetauschern am günstigsten ab. Grundwassergekoppelte Wärmepumpen wurden in der Studie von HERTLE ET AL. nicht betrachtet. Nach SIA (1996) sind von diesen aber ähnlich gute oder noch bessere Ergebnisse zu erwarten.

Umweltaspekte, die mit der Errichtung und dem Betrieb von Wärmeentzugsanlagen im Untergrund im Zusammenhang stehen, insbesondere Risiken für das Grundwasser, werden in Kap. 3.5 behandelt.

2.2.1.6 Literatur

KRUSE & HEIDELCK (1997) geben eine ausführliche Übersicht über die meisten Wärmepumpenanwendungen. KALTSCHMITT ET AL. (1999), SANNER (1992) und SIA (1996) befassen sich vorwiegend mit dem Untergrund als Wärmequelle. HERTLE ET AL. (1999) gehen besonders ausführlich auf die Umweltaspekte ein. Über neuere Entwicklungen berichtet regelmäßig die Informationsschrift „Die Wärmepumpe“, die vom Informationszentrum Wärmepumpen (IZW) bzw. seit 1.1.2000 vom Initiativkreis Wärmepumpe (IWP) herausgegeben wird. Eine Vielzahl von Texten, Daten, Literaturzitate und anderen Informationen ist auf der CD-ROM „Wärmepumpen“ gesammelt, die vom Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe im Rahmen der Reihe „Energie-Informationen“ herausgegeben wird. Zahlreiche Informationen, die von nationalen und internationalen Organisationen angeboten werden, sind auch über das Internet verfügbar (vgl. Kap. 1.7).

2.2.2 Erdsonden

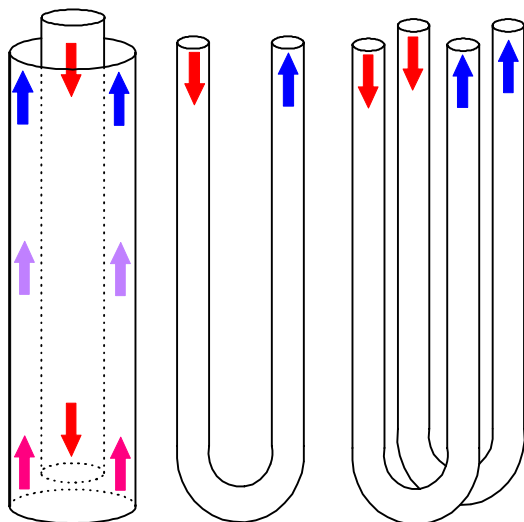


Abbildung 2-7: Unterschiedliche Bautypen von vertikalen Erdreichwärmetauschern. Links: Koaxialsonde, Mitte: Einfach-, rechts: Doppel-U-Sonde.

zentrale Innenrohr wird das Wärmeträgermittel in die Sonde gepumpt, tritt am unteren Ende der Sonde in das äußere Rohr über, steigt im Ringraum auf und gibt die Wärme an die Umgebung ab. Bei der U- und Doppel-U-Sonde werden jeweils ein bzw. zwei Sonden von oben nach unten bzw. von unten nach oben durchströmt. Die Vorteile des Koaxialrohrs liegen nach SANNER (1992) vor allem in der Kompaktheit, die ein leichteres Einbringen ins Bohrloch ermöglicht und in der Tatsache, daß durch eine Isolation des Innenrohrs ein thermischer Kurzschluß zwischen kalter und warmer, auf- bzw. absteigender Flüssigkeit verhindert werden kann. Nach RYBACH ET AL. (1992) lassen sich zwischen den verschiedenen Sondentypen allerdings kaum Unterschiede in der Leistung feststellen. Zum gleichen Ergebnis kommen HAMADA ET AL. (1997), die allerdings Vorteile der Doppel-U-Sonde gegenüber der Einzel-U-Sonde fanden.

Erd(-wärme)sonden (EWS) oder vertikale Erdreichwärmetauscher dienen zur Übertragung bzw. zum Entzug von Wärme auf den oder aus dem Untergrund. Wie Abbildung 2-4 zeigt, werden Erdwärmesonden heute als bevorzugte Wärmetauscher für erdgekoppelte Wärmepumpen eingesetzt.

Eine „Erdsonde“ besteht aus einem Bohrloch, einem im Bohrloch verlegten geschlossenen Rohrleitungssystem und dem Verfüllmaterial, das den Hohlraum zwischen Gestein und Rohrleitung ausfüllt (vgl. Abbildung 3-5)¹². Die Sonde hat die Aufgabe, Wärme vom Wärmeträgermittel auf den umgebenden Untergrund zu übertragen oder diesem zu entziehen.

Die am häufigsten angewendeten **Sondentypen** sind in Abbildung 2-7 dargestellt. Koaxialsonden bestehen aus einem äußeren Rohr mit größerem Durchmesser, in das zentral ein Innenrohr eingebracht wird. Durch dieses

¹² Es existieren prinzipiell auch **offene** vertikale Erdreichwärmetauscher (vgl. Abbildung 3-5).

Als **Sondenmaterial** werden üblicherweise PE oder HDPE eingesetzt. Bei Speicherung auf hohem Temperaturniveau muß geprüft werden, inwieweit das Sondenmaterial bei diesen Temperaturen beständig ist. Überlegungen zu Sondenmaterialien werden bei BÜTTNER ET AL. (1998) vorgestellt.

Dem **Wärmeträgermittel** (Sole), das durch die Sonden gepumpt wird, kommt eine hohe Bedeutung zu. In Deutschland bzw. Bayern dürfen die Sonden nur mit Stoffen der Wassergefährdungsklasse 0 befüllt werden (BayLfW, 1996). Angaben zur Leistungsfähigkeit von Zusatzstoffen und zu möglichen Umweltrisiken, die von ihnen ausgehen, geben SANNER & KNOBLICH (1991), SANNER (1992) und SIA (1996).

In den meisten Fällen wird in den Hohlraum zwischen Bohrlochwand und Sonde ein **Verfüllmaterial** eingebracht, das verschiedene Funktionen hat: das Bohrloch soll stabilisiert und die Sonde vor Beschädigungen geschützt werden, eine gute thermische Anbindung zwischen Sonde und Bohrlochwand muß gewährleistet werden. Unter den gegebenen rechtlichen Bedingungen wird in Deutschland gefordert, daß die Hinterfüllung eine sehr gute hydraulische Abdichtung gegen das umliegende Gestein bewirkt. Einen Überblick über Verfüllmethoden, darunter auch solche, die in Deutschland nicht üblich sind, gibt MCCRAY (1997). Eine kostengünstige, aber weder thermisch noch im Hinblick auf eine gute Abdichtung des Bohrlochs sinnvolle Methode, ist das Wiedereinbringen des Bohrkleins in die Bohrung. Etwas besser ist die Befüllung des Bohrlochs mit quellfähigen Tonkugeln. Die beste Abdichtung erbringen Bentonit-Zementsuspensionen, die von unten her durch ein zentrales Injektionsrohr in die Bohrung gefüllt werden. Die besten Wärmeübertragungswerte erbringt nach einer Untersuchung von (MATHEY ET AL., 1997) das Einbringen von feinem Quarzsand, was aber wegen der fehlenden hydraulischen Abdichtung in Deutschland keine praktikable Lösung darstellt. In Sonderfällen (wenn das ganze Bohrloch im Grundwasser steht) kann theoretisch auf eine Hinterfüllung ganz verzichtet werden. Angaben zu in Deutschland praktikablen Verfüllmaterialien gibt die VDI 4640 (VDI, 1998). Aktuell werden Untersuchungen zur Optimierung von Verfüllmaterialien zur Verwendung in Hochtemperaturspeichern am ZAE Bayern, Abteilung Würzburg durchgeführt (DRACH ET AL., 2000).

Das **Bohrloch** muß bestimmten Anforderungen genügen, damit eine möglichst gute Wärmeübertragungsleistung und, im Hinblick auf Genehmigungsfragen, eine möglichst vollkommene Abdichtung gewährleistet ist. Zu berücksichtigende Gesichtspunkte sind der Bohrlochdurchmesser bzw. das Bohrloch- Volumen (Verfüllmaterialmenge). Anleitungen zur Gestaltung und theoretische Hintergründe der Funktionsweise von vertikalen Erdreichwärmetauschern geben BÜTTNER ET AL. (2000), DRACH ET AL. (2000), EUGSTER (1991), HELLSTRÖM (1991, 1994, 1996), NORDELL (1994), MCCRAY (1997), SANNER (1992) und SIA (1996).

2.3 Physikalische und hydrogeologische Grundlagen der thermischen Nutzung des Untergrundes

Bei thermischen Nutzungen des flachen Untergrundes interessiert vorrangig, wie schnell und in welcher Richtung sich eine künstlich hervorgerufene Temperaturänderung im Untergrund ausbreitet. Es kann auch nach der Größe des von der Temperaturänderung betroffenen Volumens oder der Energiemenge gefragt werden, die pro Zeiteinheit dem Untergrund zugeführt oder entzogen werden kann. Diese Fragestellungen befassen sich mit der Art und Weise, wie sich Wärme im Untergrund ausbreitet. Die Wärmeausbreitung wird durch die thermischen, mineralogischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst. Bei den Verfahren, bei denen Grundwasser gefördert wird (Aquiferspeicherung, grundwassergekoppelte Wärmepumpen), sind dabei naturgemäß die hydrophysikalischen, bei den geschlossenen Systemen (Erdsonden, Erdkollektoren, Erdsondenwärmespeicher), die thermophysikalischen Vorgänge und Parameter stärker beteiligt. Grundsätzlich lassen sich die beiden aber nicht voneinander trennen.

2.3.1 Hydro- und bodenphysikalische Parameter und Prozesse

Die hydrogeologischen Verhältnisse des Untergrundes spielen für die thermische Nutzung des Untergrundes eine herausragende Rolle. Zum einen wirken sie sich in hohem Maße auf die thermischen Eigenschaften des Untergrundes aus, zum anderen entscheiden sie direkt darüber, ob ein Standort für ein bestimmtes Verfahren der thermischen Nutzung geeignet ist. Die wesentlichen Größen und Zusammenhänge werden hier deshalb kurz vorgestellt. Soweit nicht anders angegeben beziehen sich die hier gemachten Angaben auf die Ausführungen von BALKE ET AL. (2000), DOMENICO & SCHWARTZ (1998), HÖLTING (1996) und MATTHESS & UBELL (1983).

2.3.1.1 Wasser im Untergrund

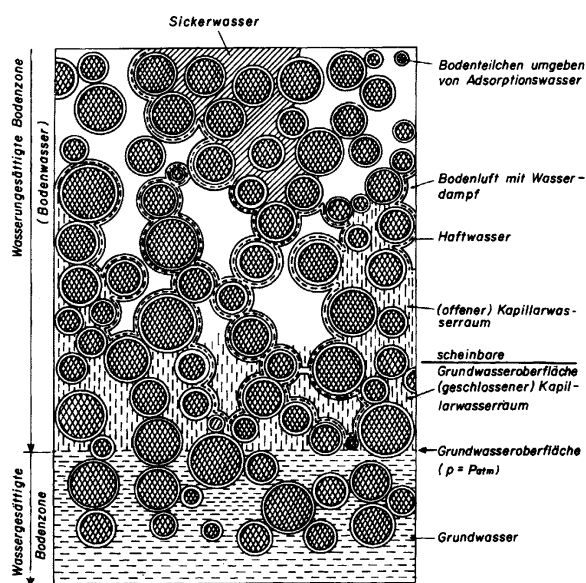


Abbildung 2-8: Zustandsformen von Wasser im Untergrund. Aus HÖLTING (1996).

Wasser im Untergrund kann die in Abbildung 2-8 dargestellten Zustände einnehmen. Dabei ist für die thermische Nutzung des Untergrund vor allem die Menge des vorhandenen Wassers, aber auch die Form seines Auftretens von entscheidender Bedeutung. Es wird unterschieden zwischen der gesättigten und der ungesättigten Zone.

Verschiedene Verfahren sind ausschließlich in der gesättigten Zone anwendbar, andere können sowohl in der gesättigten als auch in der ungesättigten Zonen eingesetzt werden. Der Unterscheidung zwischen diesen beiden Zustandsbereichen und der dazwischenliegenden Übergangsformen kommt deshalb eine große Bedeutung zu.

2.3.1.2 Sedimentpetrographische und hydrophysikalische Größen

Unter der **Porosität** n versteht man denjenigen Anteil V_p des Gesamtvolumens V_g , der von Poren eingenommen wird.

$$n = \frac{\text{Porenvolumen } V_p}{\text{Gesamtvolumen } V_g}$$

Gleichung 2-3

Die Porosität von Lockergesteinen ist vor allem von der Kornform, der Korngrößenverteilung und dem Kompaktionsgrad abhängig. Bei Festgesteinen tritt je nach Typ bzw. Genese zum primären Porenvolumen das sekundäre, durch mechanische Beanspruchung des verfestigten Gesteins hervorgerufene **Kluftvolumen** hinzu. Das Kluftvolumen kann in den meisten Fällen nicht direkt nach Gleichung 2-4 bestimmt werden, sondern wird durch indirekte Verfahren z.B. aus der Abflußcharakteristik ermittelt (z.B. nach UDLUFT, 1972).

$$K = \frac{\text{Kluftvolumen } V_k}{\text{Gesamtvolumen } V_g} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Insbesondere bei siliziklastischen Festgesteinen treten Kluft- und Porenvolumen nebeneinander auf. Die Summe aus V_k und V_p wird hier als Gesamtporenvolumen bezeichnet.

Für Fragen, die die Bewegung von Grundwasser im Untergrund betreffen, ist das Gesamtporenvolumen keine aussagekräftige Größe. Da ein Teil des Porenwassers aufgrund verschiedener Mechanismen nahezu unbeweglich an das Korngerüst des Gesteins gebunden ist (**Haftwasser, V_h**), steht nur ein Teil des gesamten Porenraums V_p für die Grundwasserbewegung zur Verfügung (Abbildung 2-8). Dieser Anteil wird als nutzbarer oder **effektiver Porenraum V_e** bezeichnet. Die **effektive Porosität n_e** ergibt sich zu:

$$n_e = \frac{V_p - V_h}{V_g} = \frac{V_e}{V_g} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

Analog ist der Begriff des **effektiven Kluftvolumens** zu verstehen.

Klüfte und Trennflächen: Bei Festgesteinen ist im Hinblick auf die Permeabilität und Porosität das durch Trennflächen geschaffene Hohlraumvolumen von Interesse. Im Rahmen der Bewertung von Einheiten bezüglich ihrer Eignung für die thermische Nutzung ist in diesem Zusammenhang auch die Bohrbarkeit und Standfestigkeit des Gebirges in Bohrungen zu erwähnen, die ebenfalls durch das Trennflächengefüge beeinflusst wird. Trennflächen im Gestein werden durch Klüfte sowie Schicht- und Schieferungsflächen gebildet. Typen, Genese, Ausbildung und Bedeutung solcher Flächen werden in der ingenieurgeologischen Literatur ausführlich dargestellt (z.B. PRINZ, 1991). Trennflächen zerteilen das Gestein und schaffen Wasserwegsamkeiten. Die maßgeblichen Parameter, die das Trennflächengefüge von Gesteinen charakterisieren, werden in Tabelle 2-1 genannt.

Klüfte sind für die thermische Nutzung des Untergrundes sowohl in der gesättigten als auch in der ungesättigten Zone von hoher Bedeutung. In der gesättigten Zone sorgen sie für erwünschte oder, je nach Verfahren, für unerwünschte Wasserwegsamkeiten. In der ungesättigten Zone können sie die Verfüllung von Bohrlöchern erschweren und Austrocknungserscheinungen begünstigen (Kap. 2.3.2.3.1).

Bei Locker- und schwach verfestigten Gesteinen sind die **Korngrößenverteilung**, die **Lagerungsdichte** und der **Zementationsgrad** von entscheidender Bedeutung für viele hydrogeologische und thermische Prozesse und Eigenschaften. Auf entsprechende Abhängigkeiten wird bei Bedarf hingewiesen.

Trennflächeneigenschaft	Definition / Bedeutung
Schichtmächtigkeit	senkrechter Abstand von Schichtbasis zu Schichttop
Kluftabstand	Abstand von Kluft zu Kluft, senkrecht zur Kluftfläche
Klüftigkeit, Klüftigkeitsziffer	Anzahl der Klüfte pro Meter
Öffnungsweite	senkrechter Abstand der Kluftbegrenzungsflächen
Kluftvolumen	siehe Gleichung 2-4
Durchtrennungsgrad	vollständige Durchtrennung: keine Materialbrücken mehr vorhanden
Kluffüllungen	Verfüllung bzw. Zementation von Klüften durch Fremdmaterial oder Umkristallisation und Ausfällung; Kalzit, Quarz, Erze, Lehm → Verringerung des Kluftvolumens
Lösungserscheinungen	Lösung von Gesteinsmaterial an Kluftflächen → Erhöhung des Kluftvolumens → Verkarstung

Tabelle 2-1: Übersicht über wichtige Eigenschaften von Trennflächen. I.W. nach PRINZ (1991).

2.3.1.3 Wasser in der gesättigten Zone

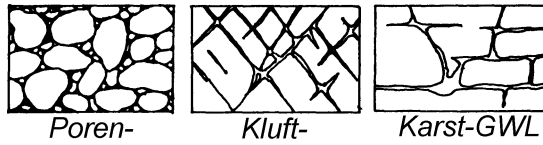


Abbildung 2-9: Unterschiedliche Aquifertypen. Aus HÖLTING (1996).

Grundwasser im Sinne von Abbildung 2-8 kann sich in sogenannten Aquiferen oder Grundwasserleitern bewegen. Dabei können die drei in Abbildung 2-9 dargestellten Typen unterschieden werden. Sowohl zwischen Poren- und Kluft-, als auch zwischen Kluft- und Karstwasserleitern bestehen fließende Übergänge und Mischformen. Unterschieden werden muß weiterhin zwischen Locker- und Festgesteinsaquiferen. Lockergesteinsaquifere sind fast grundsätzlich Porenwasserleiter, Kluft- und Karstwasserleiter kommen nur im Festgestein vor. Auch hier bestehen in Abhängigkeit vom Zementationsgrad fließende Übergänge.

Grundwasser wird als „gespannt“ bezeichnet, wenn der Druckwasserspiegel überhalb der oberen Begrenzung (Deckschicht) des zugehörigen Aquifers liegt. Ungespanntes oder „freies“ Grundwasser sind in diesem Sinne Grundwasservorkommen, bei denen sich der Wasserspiegel innerhalb des Aquifers selbst befindet (Abbildung 2-10). Die Frage, ob ein Aquifer gespannt ist, ist bei den Verfahren der thermische Nutzung des Untergrundes vor allem aus rechtlicher Sicht von Interesse, da eine Nutzung gespannter Aquifer häufig nicht gestattet wird (vgl. Kap. 3.6).

Die Terminologie der Grundwasservorkommen wird in Abbildung 2-10 erklärt:

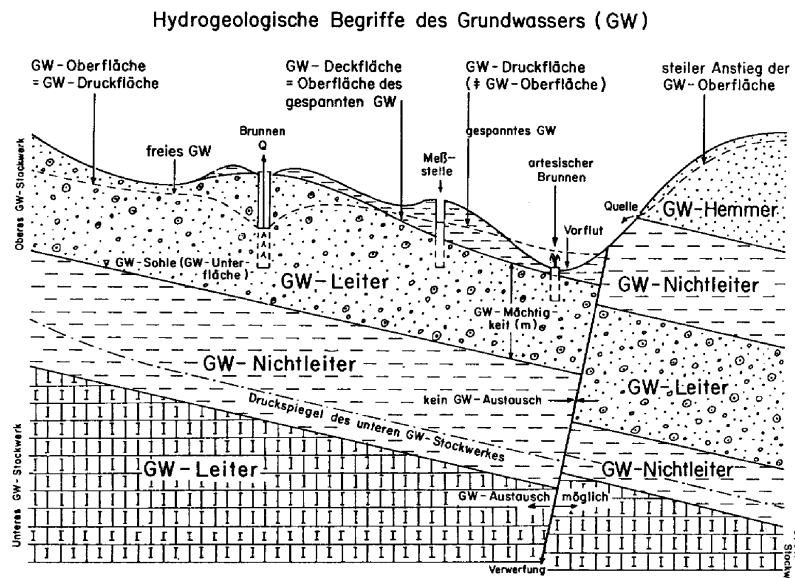


Abbildung 2-10: Wichtige hydrogeologische Grundbegriffe. Synonym verwendete Ausdrücke werden in Tabelle 2-2 erklärt. Aus HÖLTING (1996).

Grundwasserleiter	Aquifer
Grundwassernichtleiter	Aquiclude, Aquifuge (keine Porosität), Grundwasserstauer
Grundwasserhemmer	Aquitard, Grundwassergeringleiter
Grundwasseroberfläche, -Druckfläche	Grundwasserspiegel, Druckwasserspiegel, piezometrische Höhe

Tabelle 2-2: Synonyme Begriffe für die in Abbildung 2-10 angegebenen Bezeichnungen.

Die Begriffe „Grundwasserstauer“, „Grundwassersohlschicht“ oder „stauender Horizont“ werden für Grundwassernichtleiter und –hemmer gleichermaßen verwendet. In Abbildung 2-10 nicht aufgeführt sind die Begriffe „schwebendes“ oder „hängendes Grundwasserstockwerk“, das sind Grundwasservorkommen in Aquiferen, die über dem Druckwasserspiegel des Hauptgrundwasserstockwerkes liegen und meist lokal ausgebildet sind (vgl. Abbildung 7-19). Eine ausführliche Erläuterung der Begriffe gibt die DIN 4049.

2.3.1.3.1 Grundwasserbewegung

Die Wasserbewegung in porösen Materialien wird durch das Gesetz von Darcy beschrieben. Danach ist die Volumenstromdichte q abhängig vom **hydraulischen Potential** $\partial h/\partial l$ [dimensionslos] und dem **Durchlässigkeitsbeiwert** k_f [m/s] (hydraulische Leitfähigkeit). Für die eindimensionale Grundwasserausbreitung gilt:

$$q = \frac{Q_w}{F} = -k_f \frac{\partial h}{\partial l} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

wobei Q_w [m³/s] der Volumenstrom ist, der die (Brutto-)Fläche F [m²] durchströmt. Der Quotient Q_w/F hat die Einheit einer Geschwindigkeit und wird als **Darcy-** oder auch **Filtergeschwindigkeit** v_F [m/s] bezeichnet. Für die Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit aus dem Gesetz von Darcy muß berücksichtigt werden, daß im porösen Medium die durchflußwirksame Fläche durch das nutzbare Porenvolumen bzw. die effektive Porosität (Gleichung 2-5) bestimmt wird. Die **Abstandsgeschwindigkeit** v_a , die die tatsächliche **Grundwasserfließgeschwindigkeit** näherungsweise beschreibt, wird demnach zu:

$$v_a = \frac{Q_w}{F \cdot n_e} = \frac{v_F}{n_e} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Der k_f -Wert berücksichtigt neben den Eigenschaften des Grundwasserleiters auch die der Porenflüssigkeit, insbesondere deren Dichte ρ_w [g/cm³] und die dynamische Viskosität η [Pa*s], die stark temperaturabhängig sind. Nach DOMENICO & SCHWARTZ (1998) gilt:

$$k_f(T) = \frac{N \cdot d^2 \cdot \rho_w(T) \cdot g}{\eta(T)} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

N ist dabei ein dimensionsloser Faktor, der durch Parameter wie Schichtung, Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung und Porosität bestimmt wird. Er beträgt etwa $1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ für Sande und Kiese, d [m] ist der mittlere Korndurchmesser, g [m/s²] die Fallbeschleunigung. Wegen der starken Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität η nimmt der k_f -Wert mit steigender Temperatur zu. Bei 60°C steigt der k_f -Wert bereits etwa auf das dreifache des Wertes für 10°C an (Abbildung 2-11).

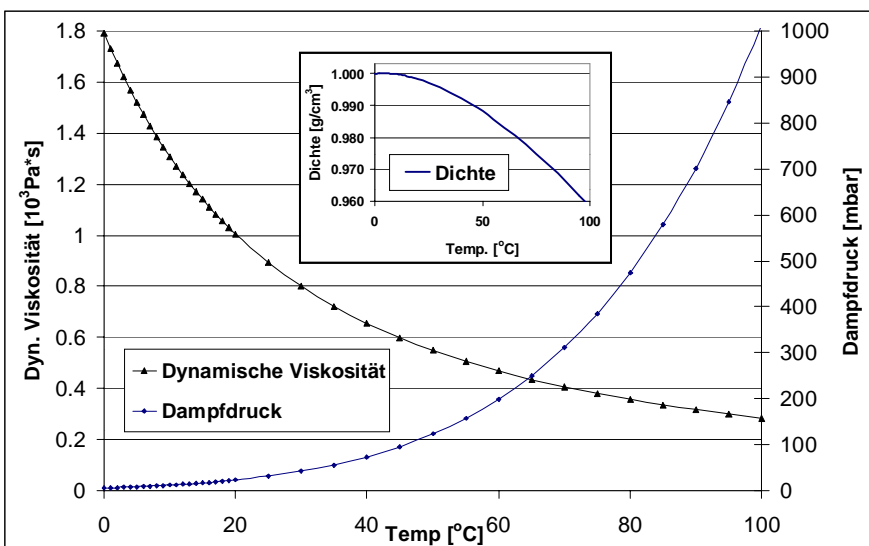


Abbildung 2-11: Temperaturabhängigkeit wesentlicher physikalischer Eigenschaften des reinen Wassers; Werte aus MATTHESS (1990).

Prinzipiell gilt, daß die Durchlässigkeit um so geringer wird, je geringer die mittlere Korngröße des Gesteins ist. Verschiedene Autoren haben zu diesem Zweck Verfahren entwickelt, die es erlauben, aus bestimmten Kenngrößen der Korngrößenverteilung den k_f -Wert zu bestimmen (z.B. HAZEN, 1893, zitiert in HÖLTING, 1996). Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Abhängigkeiten, die sich über die Korngrößenverteilung zu anderen wichtigen hydrophysikalischen Parametern ergeben. So bestehen zwischen dem Durchläs-

sigkeitsbeiwert k_f , der Korngrößenverteilung, dem Gesamtporenvolumen und der effektiven Porosität Zusammenhänge, die in Abbildung 2-12 dargestellt sind:

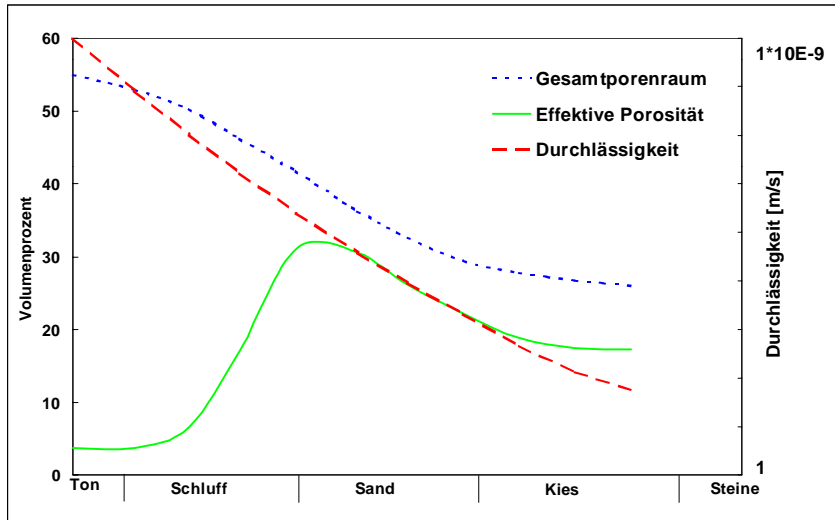


Abbildung 2-12: Zusammenhang zwischen Gesamtporenraum, effektiver Porosität und Durchlässigkeit für Lockergesteine. Eigener Entwurf nach HÖLTING (1996) und BALKE ET AL. (2000). Die durch die Graphen wiedergegebenen Zusammenhänge stellen Trends dar, zu denen im Einzelfall deutliche Abweichungen bestehen können.

In Kluffgrundwasserleitern gilt das Gesetz von Darcy nur dann, wenn aufgrund besonders intensiver, kleinräumiger Klüftung „porenähnliche“ Zustände herrschen und deshalb eine diffusive Wasserbewegung stattfindet. Im üblichen Fall sind die Verhältnisse in Kluffgrundwasserleitern allerdings sehr heterogen, da die Verteilung von Anzahl, Weite und Durchtrennungsgrad der Klüfte lokalen und regionalen Veränderungen unterworfen ist. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird bei Kluffgrundwasserleitern der k_f -Wert im Feldversuch als sogenannte **Gebirgsdurchlässigkeit** bestimmt, wobei über ein großes Gesteinsvolumen integriert wird (Kap. 2.3.1.3.2). Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich bei gemischten Kluff-Poren-Grundwasserleitern aus der Kluffdurchlässigkeit und der Porendurchlässigkeit (häufig auch als Gesteins- oder Matrixdurchlässigkeit bezeichnet) zusammen (vgl. Abbildung 2-13). Diese wird an kleinen Gesteinsvolumen, beispielsweise an Bohrkernen, bestimmt und liegt häufig um mehrere Zehnerpotenzen niedriger als die Gebirgsdurchlässigkeit. Deshalb ist von kurzfristigen Vorgängen (Pumpen über kurze Zeiträume) ausschließlich das Kluffwasser betroffen, längerfristig findet ein Austausch von Grundwasser zwischen den wasserwegsamem Klüften und der geringdurchlässigen Matrix statt. Diese Effekte werden unter dem Begriff Matrixdiffusion zusammengefaßt (LEGE ET AL., 1996).

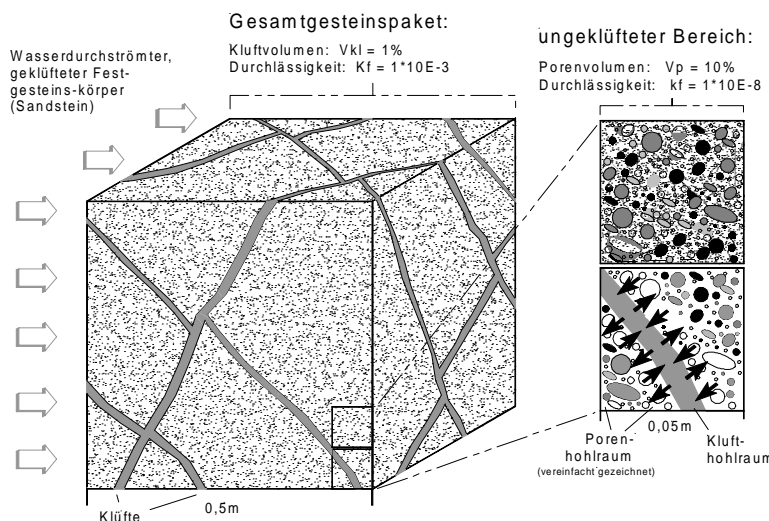


Abbildung 2-13: Zur Verdeutlichung der Begriffe Kluff- und Porenvolumen, bzw. Gebirgs- und Gesteins(-Matrix)-Durchlässigkeit bei klastischen Festgesteinen. Kurzfristige und rasche Grundwasserbewegungen sind auf das Kluffvolumen beschränkt. Am längerfristigen Grundwasseraustausch ist auch das Porenwasser beteiligt. Dies ist insbesondere beim konvektiven Wärmetransport von Bedeutung (vgl. Kap. 2.3.2.1.2).

Während bei der Trinkwassergewinnung vorrangig die förderbare Wassermenge pro Zeiteinheit von Interesse ist und die eigentlichen Fließwege zweitrangig sind¹³, ist die Frage, ob das Wasser sich auf vielen kleinen oder wenigen großen Klüften bewegt, für die Speicherung von Wärme sehr bedeutend, da die Speicherverluste von der effektiven Oberfläche des Speichers abhängig sind (siehe Kap. 3.1.3). Nach LEGE ET AL. (1996) ist die Durchflußmenge Q [m^3/s] pro Einheitsfläche durch eine Kluft proportional zur 3. Potenz der Kluftweite b und dem hydraulischen Gradient $i = \partial h / \partial l$, der entlang der Kluft anliegt (Gleichung 2-10). Die hydraulische Leitfähigkeit einer Kluft kann nach SNOW (1968; zitiert in DOMENICO & SCHWARTZ, 1998), angegeben werden als:

$$k_f = (2b)^2 \cdot \frac{\rho \cdot g}{12 \cdot \eta}; \quad \text{Gleichung 2-9}$$

für den Durchfluß durch die Kluft ergibt sich damit nach dem Gesetz von Darcy (mit $F = b$):

$$Q = (2b)^3 \cdot \frac{\rho \cdot g}{12 \cdot \eta} \cdot i; \quad \text{Gleichung 2-10}$$

wobei ρ [g/cm^3] die Dichte, η [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] die dynamische Viskosität und g [m/s^2] die Fallbeschleunigung sind.

Eine Kluft mit der Öffnungsweite 100mm kann demnach bei gleichem hydraulischem Gradient größenordnungsmäßig 10^6 mal mehr Wasser pro Einheitsfläche transportieren als eine Kluft mit 1mm Weite. Dennoch ist es theoretisch denkbar, daß für ein Gesteinsvolumen, das nur wenige Klüfte von 100mm Kluftweite enthält, der gleiche Gebirgs- k_f -Wert ermittelt wird wie für ein Gesteinsvolumen, das viele kleine Klüfte aufweist. Während sich im zweiten Fall das Wasser (im Fall der Speicherung also auch die Wärmeenergie) quasi homogen über das Volumen verteilt, breitet es sich im ersten Fall über eine große Distanz vorzugsweise entlang weniger Klufflächen aus. Für die Speicherung ergeben sich dadurch sehr ungünstige Voraussetzungen, da das Oberflächen–Volumenverhältnis in diesem Fall groß wird und mit hohen Speicherverlusten zu rechnen ist (Kap. 3.1.3). Zusätzlich sind nach Gleichung 2-10 und 2-7 in einer 100mm weiten Kluft Fließgeschwindigkeiten möglich, die um den Faktor 1000 höher liegen, als die in einer 1mm weiten Kluft (konvektive Wärmeverluste, vgl. Kap. 3.1.3.1).

Diese Überlegungen zeigen, daß bei Kluftgrundwasserleitern die Bewertung eines Standortes anhand des k_f -Wertes allein nicht sinnvoll ist. In der Literatur anzutreffende Angaben, wonach k_f -Werte innerhalb eines bestimmten Wertebereichs die Aquiferspeicherung ermöglichen, sind also nicht unbedingt sinnvoll (vgl. Tabelle 3-2). Leider werden in der Literatur bei Projektbeschreibungen häufig nur der k_f -Wert, nicht aber andere den Aquifer beschreibende Parameter genannt (vgl. Kap. 6.4.3.1).

2.3.1.3.2 Charakterisierung von Aquiferen und Brunnen

In der Literatur werden häufig Angaben zur Leistung und Ergiebigkeit von Brunnen für bestimmte Aquifere oder Schichtpakete gemacht. Diese Angaben geben wichtige Hinweise für die Verfahren, bei denen die Förderung von Grundwasser erforderlich ist (grundwassergekoppelte Wärmepumpen, Aquiferspeicherung, direkte Kühlung). Begriffe, die in der regionalen und vor allem der älteren Literatur in diesem Zusammenhang häufig anzutreffen sind (vgl. auch Kap. 4.3), werden hier kurz erläutert:

Bei der **Leistungs- oder Brunnencharakteristik** wird die im Pumpversuch (stationär) gemessene Absenkung der Förderleistung gegenübergestellt. Dabei ergibt sich bei gespannten Verhältnissen eine Gerade, bei ungespannten Verhältnissen eine gekrümmte Kurve. Häufig wird nur ein Meßpunkt angegeben, der die durchschnittliche Absenkung bei mittlerer Förderleistung unter Betriebsbedingungen darstellt. Dieser Wert wird als **spezifische Ergiebigkeit** [$l/(s \cdot m)$] bezeichnet.

¹³ Abgesehen von der Frage nach Schutzgebieten etc.

Die Darstellung der Leistungscharakteristik bzw. die Angabe der spezifischen Ergiebigkeit, kann nicht direkt zum Vergleich verschiedener Brunnen (oder Aquifere) herangezogen werden, da sie auch vom Brunnendurchmesser und anderen Brunnenausbauparametern abhängt. Besser ist hier die Angabe der **spezifischen Leistung** nach THEIS (1935; zitiert in BALKE ET AL. 2000). In der Literatur zur regionalen Geologie findet sich meist nur die Angabe der spezifischen Ergiebigkeit oder auch nur der absoluten Ergiebigkeit, die einfach die durchschnittlich aus dem betreffenden Brunnen geförderte Wassermenge angibt.

Die **Grundwasserhöflichkeit** bezeichnet die in einem Gebiet pro Fläche und Zeiteinheit gewinnbare Wassermenge $[l/(s \cdot km^2)]$. Sie wird aus der Aquifermächtigkeit, der Durchlässigkeit und Erfahrungswerten ermittelt. Höflichkeitskarten werden häufig in der regionalen und überregionalen Literatur (Erläuterungen zur GK25, oder DOBNER & WEINELT, 1980) wiedergegeben. Diese Angaben sind immer nur als theoretische Anhaltspunkte zu verstehen (HÖLTING, 1996). Sie liefern bei Lockergesteinen relativ gute Hinweise für die Eignung für grundwassergekoppelte Wärmepumpen. Bei Kluff- und Karstwasserleitern haben sie dagegen nur begrenzte oder keine derartige Aussagekraft.

2.3.1.4 Wasser in der ungesättigten Zone

Fließvorgänge in der ungesättigten Zone werden im Wesentlichen durch den Wassergehalt θ bestimmt. Nach DOMENICO & SCHWARTZ (1998) kann das Darcy'sche Gesetz für ungesättigte Bedingungen in der Form:

$$q = -k_f(\theta) \cdot \nabla H \quad \text{Gleichung 2-11}$$

ausgedrückt werden. Der Gradient ∇H setzt sich dabei aus dem Gravitationspotential und dem Matrixpotential zusammen. Matrixpotentiale entstehen durch die Kapillarkräfte, die durch das Vorhandensein feinsten Poren (Kapillaren) auf das sich im Boden befindliche Wasser ausgeübt werden. Wird ein äußeres Potential zur Entwässerung des Bodens angelegt („Saugspannung“), werden im Boden zuerst die größeren Poren entsättigt, da diese die geringsten Kapillarkräfte erzeugen. Um eine weitere Entwässerung hervorzurufen, müssen immer größere Saugspannungen angelegt werden. Die Entwässerbarkeit eines Bodens als Funktion des angelegten Drucks wird als „Saugspannungskurve“ bezeichnet. Diese wird zur Charakterisierung von Böden verwendet. Abbildung 2-14 zeigt typische Kurven für verschiedenen Böden.

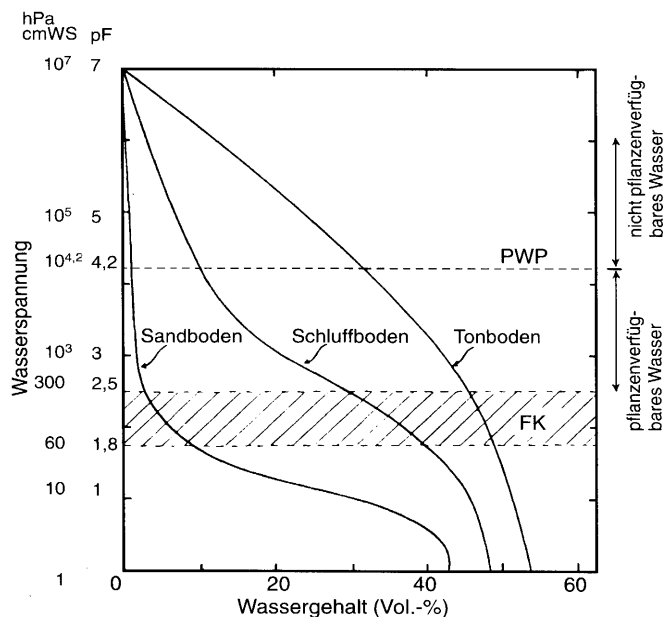


Abbildung 2-14: Beziehung zwischen dem Wassergehalt θ und der zur Entwässerung notwendigen Saugspannung für verschiedene Bodentypen. Aus SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL (1997). Nicht berücksichtigt ist hier der hysteresische Verlauf der Saugspannungskurven. Im Allgemeinen müssen zur Wiederaufsättigung größere Drücke angelegt werden als zur Entwässerung (HARTGE & HORN, 1999). Dies ist insbesondere auch bei temperaturbedingten Austrocknungsvorgängen zu berücksichtigen (Kap. 2.3.2.3).

2.3.1.4.1 Sättigungsgrad

Die Sättigungszahl (-grad) S_r gibt an, wie groß der (wasser-)gesättigte Porenanteil am Gesamtporenraum ist. Für die innerhalb dieser Untersuchung besprochenen Belange ist es ausreichend, Wasser und Luft als Poreninhalt zu betrachten. Die Sättigungszahl S_r wird nach PRINZ (1991) bestimmt als:

$$S_r = \frac{n_w}{n} = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

Hierbei ist n_w der mit Wasser gefüllte Porenanteil, n der gesamte Porenanteil, w der Wassergehalt, ρ_s die Korndichte, e die Porezahl und ρ_w die Dichte von Wasser ($\approx 1 \text{g/cm}^3$). Die Porezahl e wird aus dem Porenanteil n nach:

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

ermittelt.

Der Sättigungsgrad ist vor allem bei ingenieurgeologischen Aufgabenstellungen und in der Geophysik (elektrische Leitfähigkeit, "Archie-Gleichung"; ARCHIE, 1942; zitiert in REYNOLDS, 1997) von Bedeutung. Für die thermische Nutzung ist er wegen seines Einflusses auf die thermischen Eigenschaften in hohem Maße interessant (Kap. 2.3.2.2.3). Da der Sättigungsgrad von **Festgesteinen** in der ungesättigten Zone eine Größe ist, die für hydrogeologische Betrachtungen meist nicht relevant ist, gibt es dazu kaum Angaben in der Literatur. Erschwerend kommt hinzu, daß diese Eigenschaft bei den meisten Bohrverfahren gar nicht ermittelt werden kann, da der Wassergehalt des Bohrguts durch den Bohrvorgang entscheidend verändert wird. Bei (klüftigen) Karbonaten und grobklastischen Gesteinen (Sandsteine) kann in relativ guter Näherung aber davon ausgegangen werden, daß im ungesättigten Bereich der effektive Porenraum V_e weitgehend entwässert ist. Weiterhin wird angenommen, daß der restliche (= nicht effektive) Porenraum $V_{ne} = V_p - V_e$ im sogenannten „bergfeuchten“ Zustand eine fast vollständige Sättigung aufweist. Diese bei ungestörter Untergrundtemperatur wenig bedeutsamen Überlegungen werden dann sehr wichtig, wenn bei erhöhten Speichertemperaturen ($T > 50^\circ\text{C}$) die Gefahr der Austrocknung besteht (vgl. Kap. 2.3.2.3).

2.3.1.4.2 Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone

Durch Kapillarkräfte wird Wasser oberhalb des Grundwasserspiegels in einem sogenannten Kapillarsaum festgehalten, in dem definitionsgemäß eine vollständige Erfüllung der Poren mit Wasser, also Sättigung vorliegt (Abbildung 2-8). Da der Sättigungsgrad eine entscheidende Größe für verschiedene Verfahren der thermischen Nutzung darstellt, ist die Mächtigkeit des Kapillarsaums über dem Grundwasserspiegel u. U. sehr bedeutsam.

Die kapillare Steighöhe H_k kann nach PRINZ (1991) in Sanden 20-150cm, bei Schluffbeimengungen bis 300cm betragen. In reinen Schluffen erreicht die kapillare Steighöhe in Sonderfällen Größenordnungen von bis zu 30m. Für Böden verschiedenen Typs werden in der Literatur Meßwerte bis ca. 3m Steighöhe bei $pF=4$ ¹⁴ angegeben (MATTHESS & UBELL, 1983). Die kapillare Steighöhe läßt sich nicht direkt im ungestörten Boden messen. Sie kann nur indirekt aus der Wasserspannungskurve (Abbildung 2-14) nach der vereinfachten Beziehung

$$d(\Phi) = \frac{30}{\Phi} \quad \text{Gleichung 2-14}$$

ermittelt werden (UDLUFT ET AL., 1995-1999). Dabei ist die Steighöhe H_k gleichzusetzen mit der angelegten Saugspannung Φ , ausgedrückt in cm Wassersäule (cmWS); d ist der Äquivalentporendurchmesser. Poren,

¹⁴ Saugspannung $pF=4 \rightarrow 10^4 \text{cmWS}$.

die einen Durchmesser kleiner d haben, sind in einer Höhe H_k über dem Grundwasserspiegel noch gesättigt. Das bedeutet, daß H_k keine feste Größe ist und nur festgestellt werden kann, welche Porenfraktion in einer Höhe H_k über dem freien Grundwasserspiegel noch gesättigt ist.

Diese Betrachtungen gelten nur für homogene Böden. In der Realität spielen Inhomogenitäten, beispielsweise Grabgänge oder Wurzelröhren und Schichten gröberer Körnung (Kapillarsperre), im Festgestein auch Klüfte, eine bedeutende Rolle. Deshalb ist die reale mittlere Mächtigkeit des Kapillarsaums deutlich kleiner, als aus den Matrixeigenschaften des Gesteins ermittelt werden kann. Abbildung 2-15 zeigt eine zwischen dem k_f -Wert und der kapillare Steighöhe hergestellte Beziehung nach Meßwerten. Hieraus ist zu ersehen, daß diese Größe erst bei geringdurchlässigen Gesteinen eine Rolle spielt.

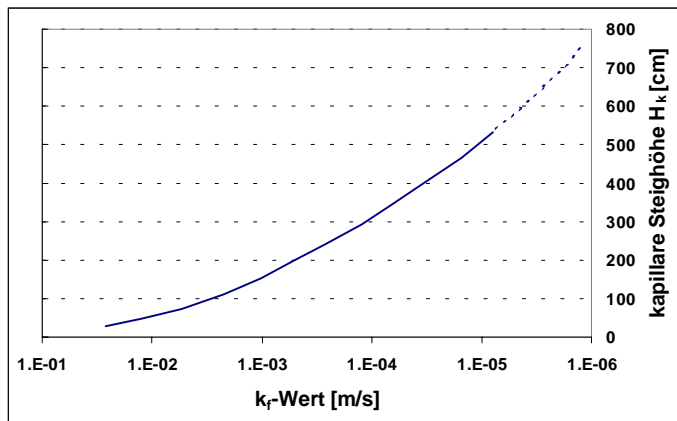


Abbildung 2-15: Abhängigkeit der kapillare Steighöhe vom k_f -Wert. Nach MATTHESS & UBELL (1983)

Die Bedeutung der kapillaren Steighöhe für die thermischen Nutzungen wird klar, wenn man die Bedeutung des Wassersättigungsgrades für die thermischen Parameter betrachtet (Kap. 2.3.2.2.3). Betroffen sind im Prinzip alle Nutzungsformen, die in der ungesättigten Zone eingesetzt werden können, also alle geschlossenen Systeme. Gerade bei den vertikalen Erreichwärmetauschern wird auf die enorme Bedeutung der Anwesenheit von Wasser immer wieder verwiesen (vgl. Kap. 3.2.2.1.3). Dabei ist es letztlich nicht von Bedeutung, ob es sich bei dem Wasser um echtes Grundwasser im Sinne

von Abbildung 2-8 oder um einen geschlossenen Kapillarsaum handelt. Gesteine, die aufgrund ihrer Korngrößenverteilung eine hohe kapillare Steighöhe erwarten lassen, können also auch oberhalb des Druckwasserspiegels voll gesättigt sein und damit entsprechend gute Eigenschaften aufweisen. Bei der Speicherung im hohen Temperaturbereich ($>50^\circ\text{C}$) ist dabei allerdings die Frage nach einer möglichen Austrocknung im Sondennahbereich zu berücksichtigen. Inwieweit sich hier Effekte auswirken, die mit der kapillaren Steighöhe zusammenhängen, läßt sich durch theoretische Betrachtungen nicht erschließen. Der Einfluß der kapillaren Steighöhe wird im Rahmen von Untersuchungen zur thermischen Nutzung der ungesättigten Zone meist nicht für erwähnenswert befunden.

2.3.2 Thermische Parameter und Prozesse im Untergrund

Die Kenntnis der thermischen Eigenschaften und der thermischen Vorgänge im Untergrund ist entscheidend für die Bewertung von Standorten. Wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, werden die thermischen Prozesse maßgeblich auch von den hydrogeologischen Verhältnissen gesteuert. Von verschiedenen Autoren wurden numerische Modelle und analytische Verfahren zur Berechnung von Wärmeausbreitung im Untergrund, sowohl in der gesättigten also auch in der ungesättigten Zone entwickelt. Verfahren, die speziell für die Anwendung der thermischen Nutzung des Untergrundes abgestimmt sind, werden z.B. von BAKEMA & JELLEMA (1997), BREHM (1989), HELLSTRÖM (1991) und PROBERT ET. AL. (1997) vorgestellt. Ausführliche Darstellungen allgemeinerer Art geben z.B. PRUESS & WANG (1987) und KOLDITZ (1997). Die Anwendung solcher komplexer Berechnungsverfahren ist für die Planung größerer Anlagen unerlässlich. Für die in dieser Arbeit angestellten Überlegungen zur Bewertung von Gesteinseinheiten hinsichtlich ihrer Eignung zur Wärmespeicherung sind allerdings überschlägige Verfahren zur Beurteilung der Wärmeausbreitung im Untergrund ausreichend.

2.3.2.1 Wärmetransportvorgänge

Für die Wärmeausbreitung im Untergrund sind im Wesentlichen zwei Vorgänge verantwortlich: Wärmeleitung und konvektiver Wärmetransport. Daneben treten weitere Vorgänge auf, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, da ihr Beitrag im Allgemeinen sehr gering ist (z.B. Wärmestrahlung in ungesättigten Porenräumen u.ä.). Sie werden beispielsweise von FAROUKI (1986) ausführlich behandelt.

2.3.2.1.1 Wärmeleitung

Wärmeleitung vollzieht sich nach dem Gesetz von Fourier, das besagt, daß ein Temperaturgradient $\nabla T = \partial T / \partial x$ in einem homogenen, isotropen Medium einen Wärmestrom mit der Wärmestromdichte q verursacht:

$$q = -\lambda * \nabla T \quad \text{Gleichung 2-15}$$

mit λ = Wärmeleitfähigkeit [W/m·K].

Der Wärmetransport durch Wärmeleitung als Funktion des Ortes und der Zeit bei homogenen Verhältnissen wird durch die Wärmediffusionsgleichung ausgedrückt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Gleichung 2-16}$$

Die Größe α wird als **Wärmediffusionskoeffizient** [m^2s^{-1}] oder Temperaturleitfähigkeit bezeichnet und stellt den Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität dar. Er ist ein Maß für die Zeit, die benötigt wird, um einen Temperatursausgleich zwischen zwei Bereichen unterschiedlicher Temperatur herzustellen und deshalb bei allen Berechnungen und Modellierungen von Bedeutung, bei denen Wärmetransport unter instationären Bedingungen betrachtet wird. Gleichung 2-16 kann auf den dreidimensionalen Fall (t, x, y, z) ausgedehnt und unter der Annahme verschiedener Randbedingungen gelöst werden. Entsprechende Lösungen und ihre Herleitung für spezielle Anwendungen in der Geologie werden von TURCOTTE & SCHUBERT (1982) erläutert.

Wärmetransport, der ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, tritt nur bei Gesteinen auf, die entweder vollständig dicht (Porosität = 0) oder vollständig impermeabel sind auf. Da Gesteine niemals vollständig homogen noch vollständig isotrop sind, wird die Wärmeleitung im Untergrund durch eine sogenannte **effektive Wärmeleitfähigkeit** λ_{eff} bestimmt. Modelle und Verfahren zur Berechnung und Abschätzung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Untergrund werden in Kap. 2.3.2.2.2 beschrieben.

Für einfache Betrachtungen bei allen Verfahren, die mit geschlossenen Systemen operieren (Sonden, vgl. Kap. 3.2.2), genügt es häufig, den Untergrund als Einphasensystem zu betrachten, in dem sich der Wärme-

transport ausschließlich durch Wärmeleitung vollzieht. Realistisch ist diese Annahme insbesondere bei Gesteinen mit geringer effektiver Porosität (kristalline Gesteine, Kalksteine, gut zementierte Sandsteine) und für extrem feinkörnige Tonsteine. Eine ausführliche Anleitung zur Herleitung von Lösungen für spezielle Probleme der Wärmeausbreitung aus dem Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes mit Sonden und Kollektoren geben HART & COUVILLION (1986). Einfache und überschlägige Verfahren zur Berechnung von Wärmeausbreitungsproblemen bei vertikalen Erdreichwärmetauschern werden in Kap. 3.2.2.2 vorgestellt.

2.3.2.1.2 Konvektiver Wärmetransport

Sind Wasserwegsamkeiten vorhanden, können zusätzlich zur Wärmeleitung konvektive Wärmetransportvorgänge auftreten. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Transport in der gasförmigen Phase in der ungesättigten Zone und dem Transport in der flüssigen Phase, der sowohl in der gesättigten als auch in der ungesättigten Zone auftreten kann.

Wasserbewegungen im Untergrund können durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden: durch hydraulische Potentiale (in der gesättigten Zone), gravitative Potentiale (Versickerung), Matrixpotentiale (Wassergehaltsänderung z.B. durch Verdunstung) und, was im Hinblick auf die thermische Nutzung des Untergrundes von Bedeutung ist, aufgrund von Temperaturgradienten. Letztere führen in der gesättigten Zone zu Dichteunterschieden und damit zu Wasserbewegungen (s.u.). In der ungesättigten Zone führen sie zur Feuchtemigration in Folge von Verdampfung und Transport in der Gasphase (vgl. Kap. 2.3.2.3).

In einem thermisch genutzten Grundwasserleiter können zwei verschiedene Konvektionstypen auftreten. Die **erzwungene Konvektion**, die durch einen natürlichen oder künstlich angelegten hydraulischen Potentialgradienten hervorgerufen wird (Infiltration, Extraktion) und die **freie Konvektion**, die auftritt, wenn temperaturbedingte Dichteunterschiede in verschiedenen Bereichen des Aquifers vorliegen. Die freie Konvektion ist vor allem bei der Aquiferspeicherung auf höherem Temperaturniveau von Bedeutung. Nähere Angaben hierzu bei DOMENICO & SCHWARTZ (1998).

Die mathematische und physikalische Behandlung von Wärmetransport im strömenden Grundwasser ist relativ komplex. Eine allgemeine Einführung geben DOMENICO & SCHWARTZ (1998). Eine ausführlichere Betrachtung findet sich bei KOLDITZ (1997). Beispiele für Anwendungen aus dem Bereich thermischer Nutzungen geben z.B. BREHM & KNOBLICH (1989). Die Herleitung von numerischen Lösungsverfahren für die speziellen Belange der Aquiferspeicherung wird in BREHM (1989) und ALLEN (1997) gezeigt. In der vorliegenden Arbeit werden einfache überschlägige Berechnungs- und Abschätzungsverfahren vorgestellt, die auf den Entzug von Wärme aus dem Grundwasser mit Wärmepumpen angewendet werden können.

Der Wärmetransport im Grundwasser setzt sich aus einem konvektiven und einem Wärmeleitungsanteil zusammen (Abbildung 2-16). Wärmeleitung findet in den festen Bestandteilen des Grundwasserleiters, aber auch in der Porenfüllung statt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmefront v_T im bewegten Grundwasser ist meist kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Grundwasser v_a (Gleichung 2-7), da das Grundwasser Wärme an die relativ kältere Gesteinsmatrix und den immobilen Haftwasseranteil abgibt. Die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit ist deshalb wesentlich von der effektiven Porosität abhängig. Durch lokale Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit kommt es zu einer Vermischung des Wassers, die als mechanische Dispersion bezeichnet wird und eine schnellere Wärmeverteilung bewirkt (RAUCH, 1992).

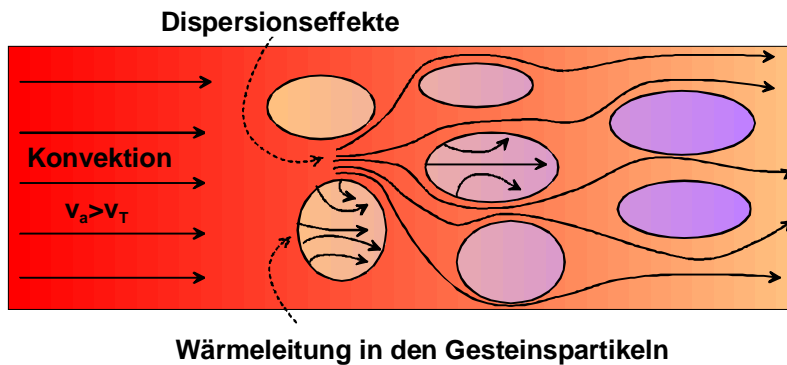


Abbildung 2-16: Wärmetransportvorgänge im bewegten Grundwasser.

Eine Grundwasserfließbewegung mit der Abstandsgeschwindigkeit v_a hat eine Wärmeausbreitung mit der Geschwindigkeit v_T zur Folge. Da Wärme an das kältere Korngerüst abgegeben wird, wo sie nur durch Wärmeleitung transportiert wird, ist v_a grundsätzlich größer als v_T . Dispersionseffekte beschleunigen die Wärmeausbreitung.

Die Gesamtwärmestromdichte im strömenden Grundwasser ergibt sich als Summe aus dem Wärmeleitungsanteil q_{wL} , dem konvektiven Anteil q_K und dem Dispersionsanteil q_D :

$$q = q_{wL} + q_K + q_D = -\lambda_e \nabla T + v_T \rho c_e T - D_w \rho c_e \nabla T \quad \text{Gleichung 2-17}$$

Der Dispersionskoeffizient D_w wird bei RAUCH (1992) näher erläutert. Für die hier angestellten Betrachtungen spielt er keine Rolle.

Die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit v_T kann nach RAUCH (1992) bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit v_a nach Gleichung 2-18 ermittelt werden.

$$v_T = \frac{\rho c_w}{\rho c_e} n_e v_a \quad \text{Gleichung 2-18}$$

mit ρc_w = volumetrische Wärmekapazität des Grundwassers und ρc_e = effektive volumetrische Wärmekapazität des Gesteins.

Nach Erfahrungswerten breitet sich eine Temperaturanomale im Grundwasser maximal mit der halben Fließgeschwindigkeit des Wassers aus. Bei geringer effektiver Porosität ($n_e < 5\%$) ist die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit allerdings deutlich geringer. Gleichung 2-19 zeigt einen empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen Wärmeausbreitung und der Abstandsgeschwindigkeit in einem kiesig-sandigen Porengrundwasserleiter des Maintals nach TRUEB (1975; zitiert in KANZ, 1978). Danach errechnet sich ein Verhältnis von $v_T = v_a / 4,6$ (für Mittelwerte aus dem Mainquartär, vgl. Kap.4.3.8):

$$v_a = v_T \cdot \frac{n \cdot \rho c_w + (1-n) \cdot \rho c_s}{n_e \cdot \rho c_w} \quad \text{Gleichung 2-19}$$

mit:

v_a = mittlere Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

v_T = Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturanomale

n_e = effektive Porosität des Aquifers; n = Gesamtporosität

ρ_w = Dichte des Wassers; ρ_s = Feststoffdichte des Sediments

c_w = spezifische Wärmekapazität von Wasser; c_s = spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix

Wie aus Gleichung 2-19 hervorgeht wird die Wärmeausbreitung im Grundwasserstrom im Wesentlichen durch die effektive Porosität des Aquifers bestimmt. Je größer das Volumen und die Oberfläche der Gesteinsmatrix ist, desto mehr Wärme wird auf die Gesteinsmatrix übertragen, wo sie sich nur durch die wesentlich ineffizientere Wärmeleitung ausbreitet. Ebenso geht Wärme auf die Porenfüllung im nicht nutzbaren Porenraum über.

Abbildung 2-17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis v_a/v_T und der effektiven Porosität des Gesteins nach Gleichung 2-19. Danach wird das Verhältnis bei zunehmender effektiver Porosität kleiner, d.h. je größer der nutzbare Porenraum, desto mehr nähert sich die Temperaturausbreitungsgeschwindigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit an.

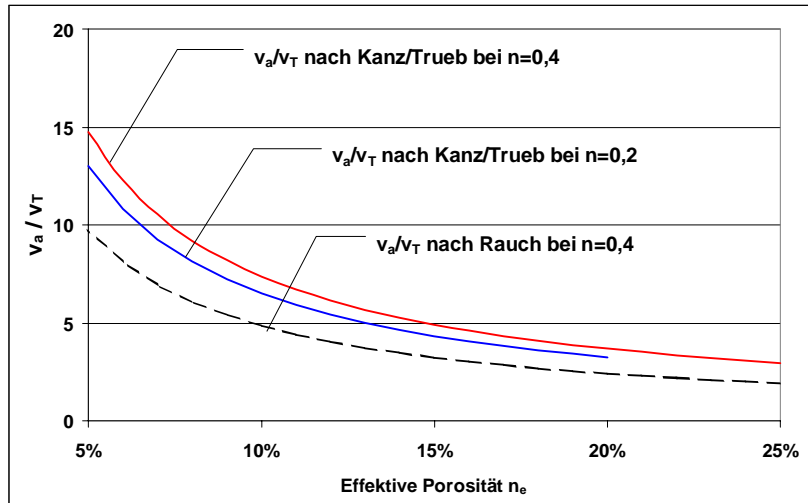


Abbildung 2-17: Zusammenhang zwischen der Grundwasserfließgeschwindigkeit v_a und der Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit v_T in Abhängigkeit von der effektiven Porosität n_e und der Gesamtporosität n .

Berechnet nach Gleichung 2-19 (TRUEB, 1975; zitiert in KANZ, 1978) und Gleichung 2-18 (RAUCH, 1992). In der Berechnung nach RAUCH werden der Wärmeleitungsanteil und Dispersionseffekte nicht berücksichtigt, was die etwas höhere Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit erklärt.

Es ist anzunehmen, daß die in Abbildung 2-17 dargestellten Beziehungen nur für gut durchlässige Porengrundwasserleiter gelten. Für sehr kleine effektive Porositäten ($<<5\%$), insbesondere also auch für Kluftwasserleiter, haben sie wahrscheinlich nur begrenzte Gültigkeit. Man kann aber davon ausgehen, daß bei sehr geringer effektiver Porosität der konvektive Wärmetransport nur noch wenig Einfluß auf die Wärmeausbreitung im Untergrund hat, zumal dann, wie Abbildung 2-12 zeigt, keine hohen Permeabilitäten zu erwarten sind. In Kluftwasserleitern müssen dagegen andere Parameter (z.B. Kluftverteilungsmuster) berücksichtigt werden (vgl. Kap. 2.3.1.2).

Bei Betrachtungen zur Wärmeausbreitung im Grundwasser muß schließlich auch die Temperaturabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes beachtet werden (Gleichung 2-8).

2.3.2.2 Bestimmung thermischer Kenngrößen

Die Kenntnis der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_e und der volumetrischen Wärmekapazität ρc des Untergrunds ist eine wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung eines Standortes. Wenn diese Parameter nicht direkt an Gesteinsproben gemessen werden, was im Allgemeinen eine Probebohrung voraussetzt, können sie aus Erfahrungswerten abgeschätzt, berechnet oder aus der Interpolation bekannter Werte benachbarter Standorte abgeleitet werden.

In der Literatur sind zahlreiche Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität für Gesteine verschiedenster Herkunft, z.T. auch in regionalspezifischen Sammlungen zu finden (z.B. LEU et al., 1999). Allgemein gehaltene Tabellen finden sich z.B. in SANNER (1992) und SCHÖN (1983). Die Werteangaben in der Literatur belegen vor allem aber die große Schwankungsbreite dieser Größen für gängige Gesteinstypen (vgl. Abbildung 2-18 bis 2-21). Berücksichtigt werden sollte auch, daß den Werten unterschiedliche Meßmethoden zugrunde liegen, die zu abweichenden Ergebnissen führen. Zahlreiche Meßmethoden werden von PRIBNOW (1994) vorgestellt. Immer größere Bedeutung erlangen in jüngster Zeit auch in-situ-Meßmethoden, bei denen die Wärmeleitfähigkeit im Bohrloch vor Ort gemessen werden kann. Entsprechende Verfahren werden von GEHLIN & NORDELL (1997 und 1998), HONARMAND & LIMBERG (1998) und SANNER, REUß & MANDS (1999) vorgestellt.

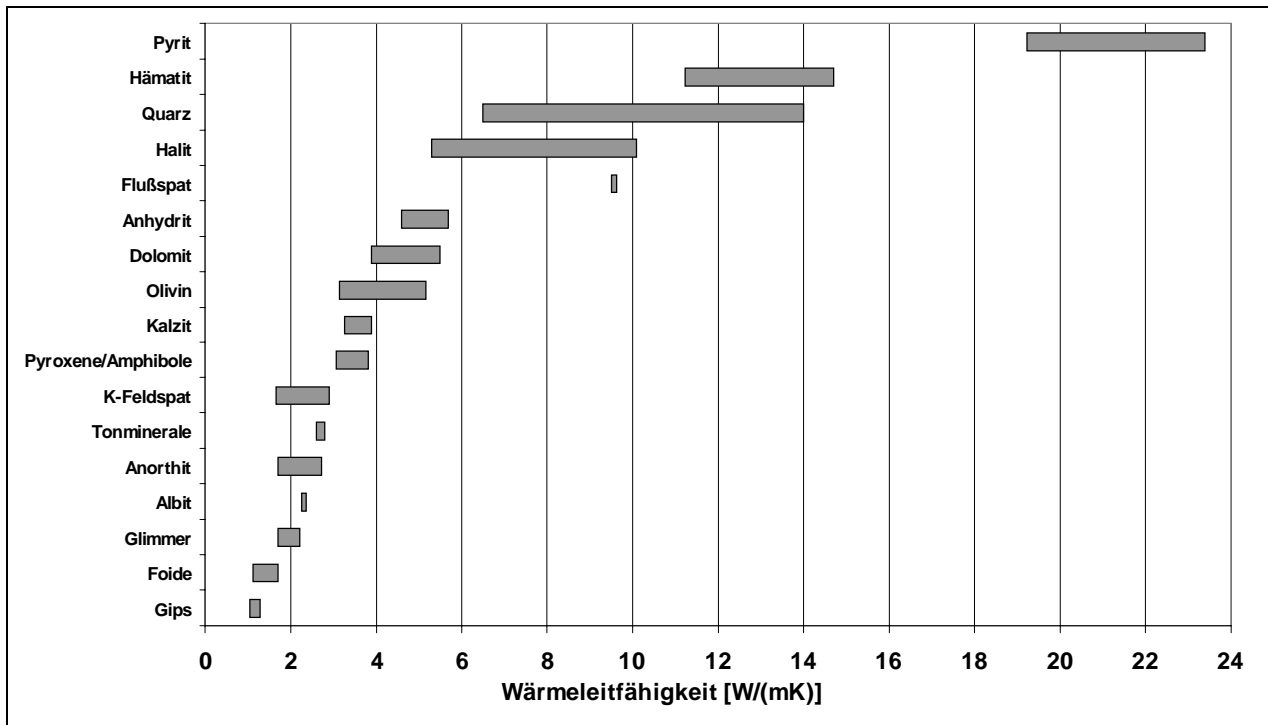


Abbildung 2-18: Wärmeleitfähigkeiten wichtiger gesteinsbildender Minerale. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

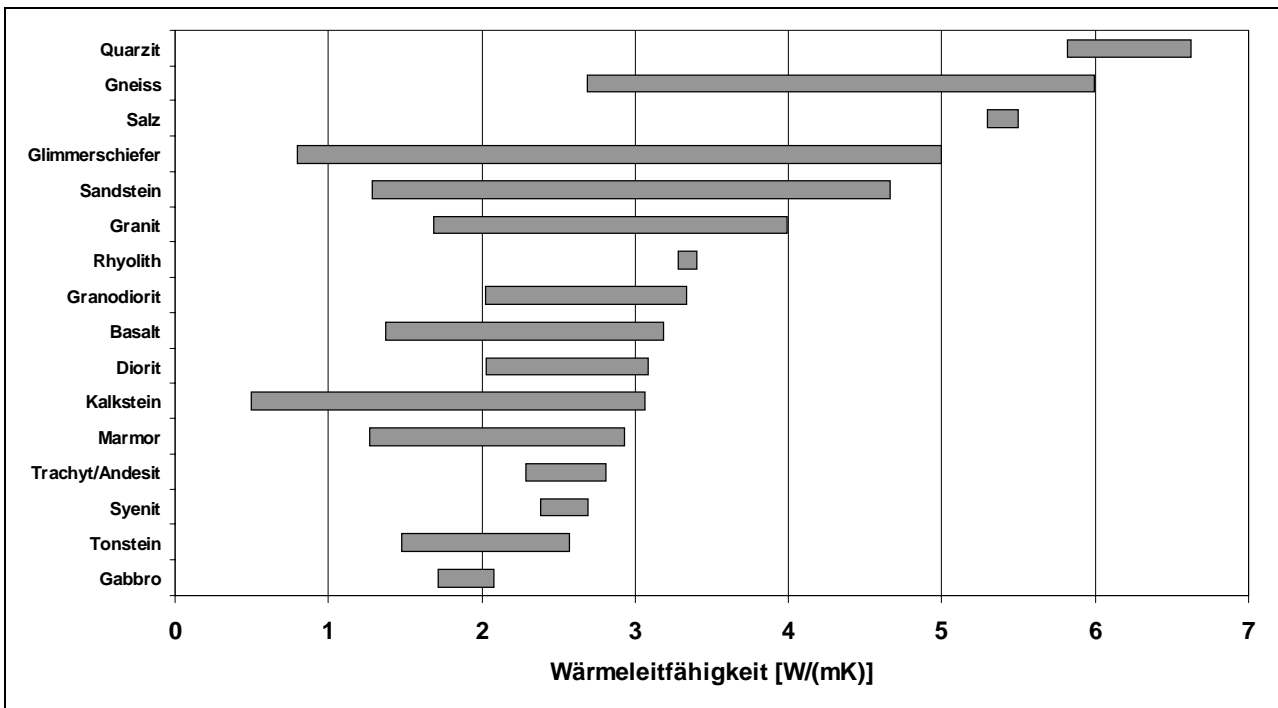


Abbildung 2-19: Wärmeleitfähigkeiten von Festgesteinen. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

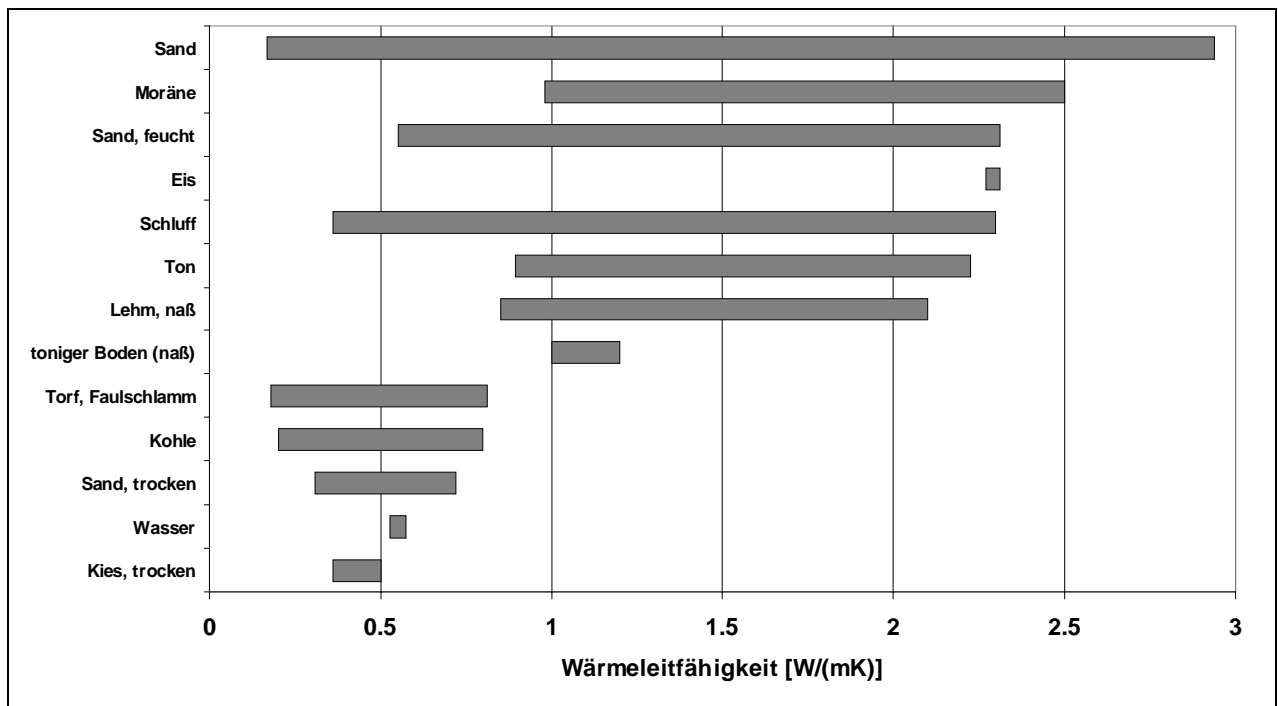


Abbildung 2-20: Wärmeleitfähigkeiten von Lockergesteinen. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

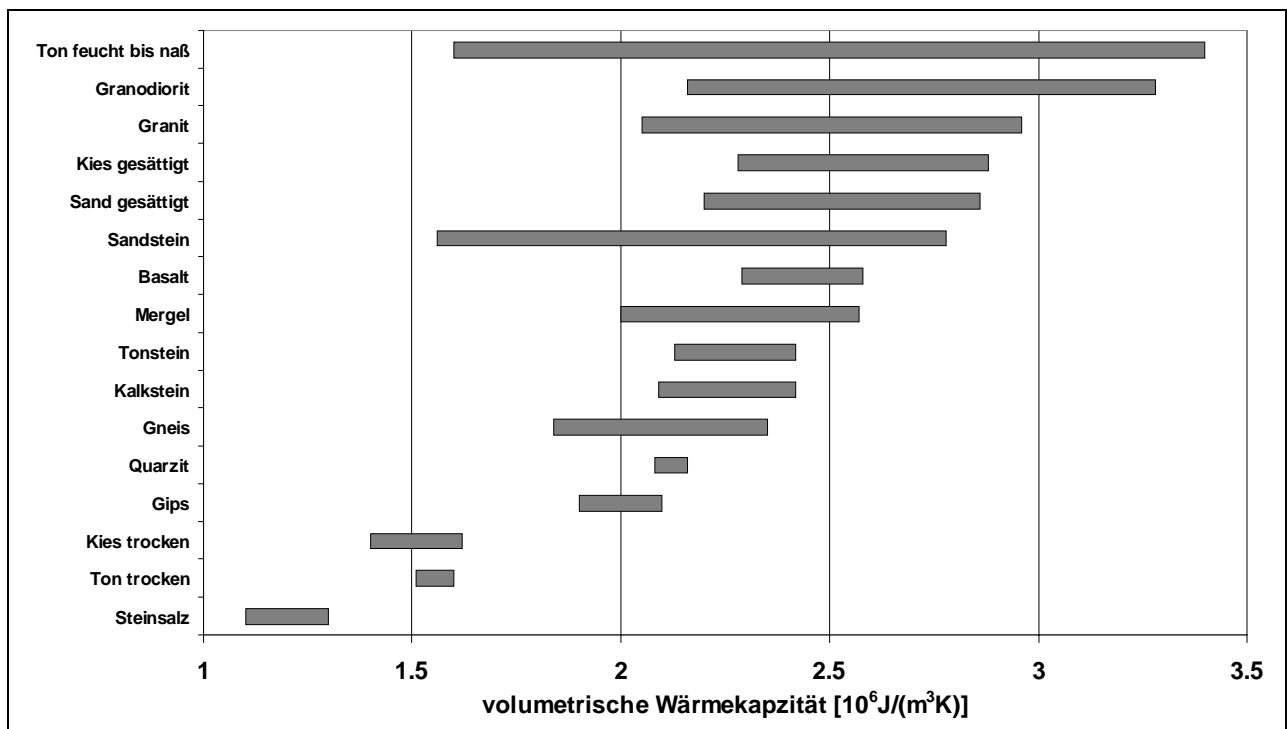


Abbildung 2-21: Spezifische volumetrische Wärmekapazitäten von Gesteinen und gesteinsbildenden Mineralen. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

Den Abbildungen 2-19 bis 2-21 ist zu entnehmen, daß die Schwankungsbreite der thermischen Kenngrößen für viele Gesteinstypen hoch ist. Daher können Vergleichswerte aus der Literatur nicht ohne weiteres herangezogen werden. Für eine vergleichende Bewertung von Gesteinen aus dem Untersuchungsgebiet müssen die Werte deshalb durch Berechnungen gewonnen werden. In die Berechnung von λ und ρc gehen vorwiegend die mineralogische Zusammensetzung und der Wassergehalt, der sich hier aus Gesamtporenvolumen und dem Sättigungsgrad bestimmt, ein. Als Berechnungsgrundlage für alle in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungen wurden die in Tabelle 2-3 wiedergegebenen Werte bzw. Wertebereiche herangezogen:

Parameter	Komponenten	Glimmer	K-Feldspäte	Tonminerale	Quarz	Karbonate	Kalzit	Dolomit	Gips	Anhydrit	Halit	Wasser (20°C)
spez. Wärmekapazität [J/(gK)]		0.76	0.65	0.75	0.75	0.84	0.82	0.87	1.1	0.59	0.82	4.1
Dichte [g/cm ³]		2.9	2.6	2.7	2.7	2.8	2.7	2.9	2.3	3.0	2.2	1.0
vol. Wärmekapazität [MJ/(m ³ K)]		2.2	1.7	2.0	2.0	2.4	2.2	2.5	2.5	1.8	1.8	4.1
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]		2	2.3	2.9	7.1	3.5	3.4	3.5	1.3	4.8	6	0.6

Tabelle 2-3: Werte, die als Berechnungsgrundlage für die in dieser Untersuchung durchgeführten Berechnungen thermischer Parameter verwendet wurden. Gemittelte Werte nach SCHÖN (1983).

2.3.2.2.1 Berechnung der volumetrischen Wärmekapazität ρc

Da die volumetrische Wärmekapazität eines Materials nicht strukturabhängig ist, kann sie für ein aus n Bestandteilen zusammengesetztes Gestein als Summe der Wärmekapazitäten der einzelnen Bestandteile ρc_i , multipliziert mit deren volumenmässigen Anteilen V_i , bestimmt werden (SCHÖN, 1983):

$$\rho c = \sum_{i=1}^n \rho c_i V_i \quad . \quad \text{Gleichung 2-20}$$

Wenn die Volumenanteile der beteiligten Minerale und der Porenfüllungen genau genug bekannt sind, kann die volumetrische Wärmekapazität damit relativ genau bestimmt werden. Daten zu den spezifischen Wärmekapazitäten der gesteinsbildenden Minerale sind Tabellenwerken zu entnehmen (SCHÖN, 1983; ANGENHEISTER, 1982).

Wesentlich ist der Umstand, daß Wasser mit $4,1 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{K})$ eine deutlich höhere volumetrische Wärmekapazität hat, als die festen Gesteinskomponenten, die bei $0,5$ bis $3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{K})$ liegen (Abbildung 2-22). Die volumetrische Wärmekapazität von Luft ist mit $\approx 0,013 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{K})$ (trockene Luft) ist vernachlässigbar gering. Bei porösen Gesteinen, insbesondere bei Lockergesteinen, sind deshalb Porenvolumen und Sättigungsgrad maßgeblich für die Höhe der Wärmekapazität verantwortlich.

2.3.2.2.2 Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_e

Gesteine lassen sich in der wassergesättigten Zone als Zwei-, in der ungesättigten Zone als Dreiphasenmedium betrachten. Gesteinsmatrix, Porenflüssigkeit und Porenluft bilden die unterschiedlichen Phasen. Die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit setzt sich aus den Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Phasen zusammen. Da sie zusätzlich von zahlreichen weiteren Faktoren wie der Korngröße, der Kornform, der Art der Korn-Korn-Kontakte und der Lagerungsdichte der Komponenten abhängig ist, kann ihre Berechnung aus den Volumenanteilen der einzelnen Phasen nur innerhalb relativ großer Unsicherheitsbandbreiten erfolgen. Zu beachten sind weiterhin Anisotropieeffekte, die durch die anisotropen Eigenschaften verschiedener Minerale und die Gefügemerkmale des Gesteins hervorgerufen werden. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Mineralbestand, Porenfüllung und Textureigenschaften existieren die unterschiedlichsten Berechnungsansätze, die von einfachen Überschlagsformeln bis zu komplexeren Modellen reichen. Eine große Zahl solcher Ansätze für Lockergesteine sind bei FAROUKI (1986) zusammengestellt. Eine Sammlung von Berechnungsvorschriften für Festgesteine mit einer vergleichenden Bewertung wurde von PRIBNOW (1994) erstellt. Darüberhinaus existieren zahlreiche weitere, teilweise speziell im Rahmen von Untersuchungen zur thermischen Nutzung des Untergrundes erstellte Berechnungsmethoden (z.B. WAGNER, 1991).

Bei der einfachsten möglichen Berechnungsmethode wird die Summe aus den volumenmässigen Anteilen der einzelnen Mineralphasen V_i , multipliziert mit ihren jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten λ_i , gebildet:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n V_i \lambda_i \quad \text{Gleichung 2-21}$$

Anisotropien werden dabei nicht berücksichtigt. Berechnungen nach diesem Verfahren eignen sich vorrangig für dichte, d.h. porenfreie, isotrope Gesteine. Nach Angaben in SANNER (1992) kann auf gute Ergebnisse z.B. bei granitoiden Gesteinen geschlossen werden. Für dichte Gesteine mit deutlich anisotropen Eigenschaften (z.B. viele Metamorphite) ist die Methode allerdings ungeeignet.

Bei porösen Gesteinen, also im Wesentlichen bei klastischen Sedimenten, muß die Wärmeleitfähigkeit der Porenfüllung berücksichtigt werden. Setzt man die entsprechenden Volumenanteile (V_{Wasser} , V_{Luft}) in Gleichung 2-21 ein, so erhält man allerdings bestenfalls Maximalwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Unter teilgesättigten Verhältnissen führt dies zu viel zu hohen Ergebnissen.

Bei Gesteinen mit besonderen textuellen Eigenschaften müssen die Einregelung der Komponenten und andere anisotrope Eigenschaften berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere auch für poröse Medien. Eine sehr ausführliche Anleitung zur Messung und Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen unter Berücksichtigung ihrer Gefügeeigenschaften und der Anisotropie gibt PRIBNOW (1994). Bei Gesteinen in einem Zweiphasensystem lassen sich die in Abbildung 2-22 dargestellten Situationen modellhaft voneinander abgrenzen:

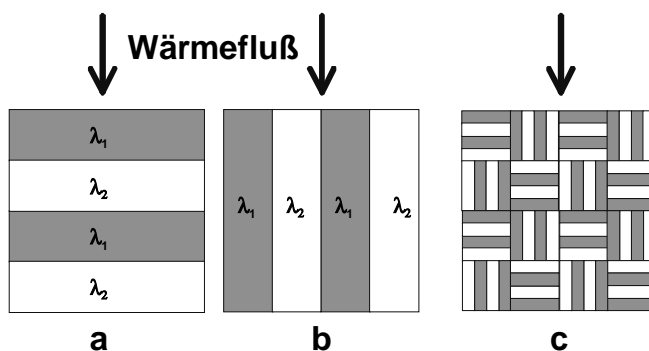


Abbildung 2-22a,b,c: Modellvorstellungen für die Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in anisotropen Mehrphasensystemen.

$\lambda_1 > \lambda_2$ können unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten sowohl von festen als auch von flüssigen Phasen repräsentieren. Die maximale Wärmeleitfähigkeit ergibt sich, wenn alle Komponenten parallel zueinander eingeregelt sind (b). (c) zeigt eine entsprechende Modellvorstellung für komplexer aufgebaute Medien. Nach SCHÖN (1983) und PRIBNOW (1994).

Gemäß der in Abbildung 2-22 gezeigten Modellvorstellungen lassen sich obere und untere Grenzen der effektiven Wärmeleitfähigkeit als harmonisches bzw. arithmetisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Phasen und ihrer Volumenanteile berechnen:

Untergrenze, harmonisches Mittel (Abbildung 2-22a):

$$\lambda_{\min} = \sum_{i=1}^n V_i \lambda_i^{-1} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

Obergrenze, arithmetisches Mittel (Abbildung 2-22b):

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n V_i \lambda_i \quad \text{Gleichung 2-23}$$

die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit wird dann häufig als:

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.5(\lambda_{\max} + \lambda_{\min}) \quad \text{Gleichung 2-24}$$

angegeben, was in der Modellvorstellung etwa Abbildung 2-22c entspricht. Erweiterte Modelle mit Kombinationen serieller und paralleler Anordnungen unterschiedlicher Phasen werden bei verschiedenen Autoren vorgestellt. WOODSIDE & MESSMER (1961; zitiert in PRIBNOW, 1994) kamen nach dem Vergleich verschiedener Methoden zu dem Ergebnis, daß das geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Komponenten die besten Übereinstimmungen mit gemessenen Werten bringt:

$$\lambda_{\text{geo}} = \prod_{i=1}^n \lambda_i^{V_i} \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Bei ungesättigten porösen Gesteinen ist die Fehlerbandbreite bei der rechnerischen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit entsprechenden Modellen wegen des schwer nachzuvollziehenden Zusammenwirkens der verschiedenen Phasen (fest, flüssig, gasförmig) naturgemäß groß. Die Gesamtwärmeleitfähigkeit läßt sich hier mit einfachen effektiven Medien-Modellen abschätzen. Insbesondere für Lockergesteine existieren zahlreiche empirische Berechnungsformeln, die zumeist eingeschränkte Gültigkeitsbereiche haben. Sie gelten jeweils für besondere Dichte-, Porositäts- und Zustandsbereiche des Sediments. Zahlreiche Modelle wurden von SCHÖN (1983), FAROUKI (1986) und SANNER (1992) zusammengetragen.

PRIBNOW (1994) stellt ein Modell nach HASHIN & SHTRIKMAN (1962) vor, das auf den oben vorgestellten Modellen für anisotrope Mehrphasensysteme aufbaut und auf poröse Gesteine angewendet werden kann. Bei diesem sogenannten Dispersionsmodell ergibt sich die maximale Wärmeleitfähigkeit für den in Abbildung 2-23 gezeigten Fall, daß sich die Poren im Gestein nicht berühren, zu:

$$\lambda_{\max} = \lambda_g + \frac{n}{\frac{1}{\lambda_w - \lambda_g} + \frac{1-n}{3\lambda_g}} \quad \text{Gleichung 2-26}$$

Hier sind n der relative Volumenanteil des Wassers, λ_w Wärmeleitfähigkeit des Wassers und λ_g Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile, berechnet nach Gleichung 2-21. Für den Fall, daß die festen Bestandteile des Gesteins die kleinstmögliche Berührungsfläche aufweisen, errechnet man den Minimalwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{\min} = \lambda_w + \frac{n-1}{\frac{1}{\lambda_g - \lambda_w} + \frac{n}{3\lambda_w}} \quad \text{Gleichung 2-27}$$

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt man, wenn man in die Gleichungen 2-22 und 2-23, die für parallele und serielle Anordnungen gelten, für die beiden Phasen Wasser und Gesteinsmatrix einsetzt. Man erhält dann für die „parallele“ Anordnung von Matrix und Poren:

$$\lambda_{\max} = n \cdot \lambda_w + (1-n) \cdot \lambda_g \quad \text{Gleichung 2-28}$$

bzw. für die serielle Anordnung:

$$\lambda_{\min} = \left(\frac{n}{\lambda_w} + \frac{1-n}{\lambda_g} \right)^{-1} \quad \text{Gleichung 2-29}$$

In beiden Fällen, die ja in der Natur selten realisierte Extremwerte darstellen, liegen die tatsächlichen Werte dazwischen. Meist wird der Mittelwert nach Gleichung 2-24 angegeben.

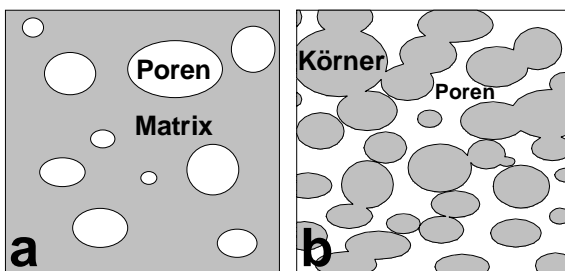


Abbildung 2-23a,b: Extremfälle für die Modellvorstellung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in porösen 2- oder 3-Phasenmedien.

a: Poren haben keine Verbindung zueinander, b: alle Poren stehen in Verbindung. Auf a kann das Modell der parallelen Anordnung der Komponenten aus Abbildung 2-22 angewendet werden, auf b entsprechend das der seriellen Anordnung.

Zwischen den oben betrachteten Grenzfällen liegt auch das Modell von DRURY & JESSOP (1983), bei dem eine gute Übereinstimmung mit gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zu erwarten ist (freundl. mündl. Mitt. Dr. Ebert, ZAE Bayern). Für die effektive Wärmeleitfähigkeit eines Gesteins gilt:

$$\lambda = \frac{\lambda_g \cdot \lambda_w \cdot (1-n)^{2/3}}{\lambda_g (1-n)^{1/2} + \lambda_w n^{1/3}} + \lambda_w \cdot 1 - (1-n)^{2/3}$$

Gleichung 2-30

λ_g kann nach Gleichung 2-21 berechnet werden.

Bei ungesättigten Verhältnissen kann für die Wärmeleitfähigkeit der Porenfüllung statt λ_w für Wasser, die Wärmeleitfähigkeit λ_L von Luft eingesetzt werden. Da diese ungleich niedriger ist als die von Wasser, werden für ungesättigte Verhältnisse durchwegs kleinere Wärmeleitfähigkeitswerte berechnet. Unzutreffend ist allerdings die Annahme, daß im ungesättigten Bereich das gesamte Porenvolumen mit Luft gefüllt ist (Kap. 2.3.1.4.1). Realistischerweise ist von einer Teilsättigung auszugehen, die um so höher ist, je feinkörniger das Gestein ist. Das wiederum erschwert die Berechnung, da gerade bei sehr feinkörnigen Gesteinen das Porenvolumen sehr hoch ist, die Wärmeleitfähigkeit also im hohem Maße von der Art der Porenfüllung abhängt. Da der Wärmetransport in der ungesättigten Zone zusätzlich von sehr vielen unterschiedlichen Faktoren abhängt (Kap. 2.3.2.3), sind die Ergebnisse von Berechnungsverfahren vor allem bei feinkörnigen Gesteinen kritisch zu betrachten. Sie erlauben bestenfalls überschlägige Abschätzungen. Für genauere Berechnungen existieren Modelle, bei denen der Sättigungsgrad und die Lagerungsdichte miteinbezogen werden.

Für die in dieser Untersuchung berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte für Lockergesteine wurde eine Methode angewendet, die von WALSH & DECKER (1966) entwickelt wurde. Hier werden ähnlich wie bei HASHIN UND SHTRIKMAN (1962) ein oberer und ein unterer Grenzwert für die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. λ_{\max} und λ_{\min} werden hierbei nach:

$$\lambda_{\max} = \lambda_g \left(1 - \frac{n \left(1 + 2 \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right) \left(1 - \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right)}{n \left(1 - \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right) + 3 \frac{\lambda_w}{\lambda_g}} \right) \quad \text{und} \quad \lambda_{\min} = \lambda_g \left(1 - \frac{n \left(1 + 2 \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right) \left(1 - \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right)}{n \left(1 - \frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right) + 3 \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_g} \right)} \right) \quad \text{Gleichung 2-31a,b}$$

berechnet.

Deutlich bessere Ergebnisse für Lockergesteine bringen nach WAGNER (1991) die Modelle von DE VRIES (1963) und NEISS (1982), die allerdings einen deutlich höheren Rechenaufwand und die genaue Kenntnis bzw. Bestimmung verschiedener Parameter, z.B. der Lagerungsdichte voraussetzen. Die Methoden werden bei WAGNER (1991) ausführlich beschrieben und verglichen.

2.3.2.2.3 Zusammenhänge zwischen thermischen und anderen Gesteinseigenschaften

Wassergehalt und Sättigungsgrad: Bei nur teilweiser Sättigung des Porenraumes mit Wasser tritt bei unverfestigten Sedimenten nach SCHÖN (1983) häufig eine nichtlineare, im Anfangsbereich stärker ausgeprägte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Wassergehalt bzw. Wassersättigungsgrad auf (Abbildung 2-24). Wärmeleitfähigkeiten für Lockergesteine mit unterschiedlichem Sättigungsgrad können nach JOHANSEN (1974, zitiert in FAROUKI, 1986) bestimmt werden. Berechnungen von SANNER (1992) zeigen, daß nach der Methode von JOHANSEN λ_e ab etwa 30-50% Sättigung annähernd linear mit dem Sättigungsgrad ansteigt. Für geringere Sättigungsgrade liegen Berechnungs- und Meßergebnisse von WAGNER (1991) vor, wonach sich bei groben Sedimenten ein steiler Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Bereich zwischen 0 und 5% Wassergehalt feststellen läßt. Bei Tonen vollzieht sich dieser Anstieg im Bereich 5-15%. Bei Festgesteinen kann schon ab geringen Wassergehalten ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad und Wärmeleitfähigkeit angenommen werden (Abbildung 2-24):

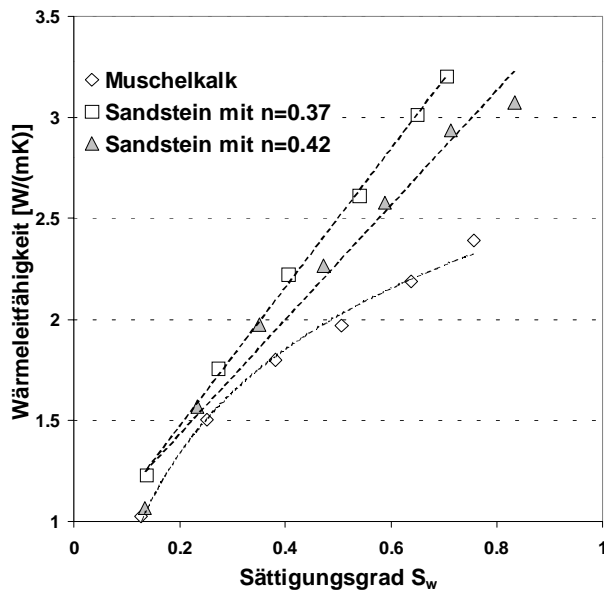


Abbildung 2-24: Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Sättigungsgrades bei porösen Festgesteinen. Nach Werten aus SCHÖN (1983).

Druck: Eine Erhöhung des Drucks bewirkt meist eine leichte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, die sowohl bei Locker- als auch bei Festgesteinen auf die Vergrößerung der Kontaktflächen der festen Bestandteile zurückzuführen sind (SCHÖN, 1983). Für Festgesteine spielt diese Abhängigkeit bei Tiefen bis 200m im Allgemeinen keine Rolle. Für unverfestigte Sedimente kann der Parameter Druck über die Lagerungsdichte in entsprechende Berechnungsmodelle aufgenommen werden. Generell gilt:

$$\lambda_e \sim p^{1/3} \quad \text{Gleichung 2-32}$$

mit p = Druck [N/m^2]

Modelle, die die **Lagerungsdichte** von Sedimenten mit einbeziehen werden bei WAGNER (1991) und SANER (1992) beschrieben. Nach dem oben zitierten Modell von JOHANSEN (1974) steigt nach KNOBLICH ET AL. (1993) bei Lockersedimenten die Wärmeleitfähigkeit λ_e direkt proportional mit der Lagerungsdichte ρ_d an.

$$\text{Grundsätzlich gilt: } \lambda_e \sim \left(\frac{\rho_d}{\rho} \right)^\alpha; \quad \text{Gleichung 2-33}$$

mit ρ = Korndichte [g/cm^3] und $\alpha \approx 1.5$ (für statistisch angeordnetes Material).

Gesteinsanisotropien machen sich bei der Wärmeleitfähigkeit durch die Einregelung der Komponenten selbst (vgl. Abbildung 2-22) sowie durch die Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit gesteinsbildender Minerale bemerkbar. Besonders bedeutsam ist die Anisotropie beim Quarz mit $\lambda \approx 7\text{W/(mK)}$ in [010] und mit $\lambda \approx 11\text{W/(mK)}$ in [001]. PRIBNOW (1994) konnte mit azimutabhängigen Wärmeleitfähigkeits-Messungen an Sandstein- und Kalksteinkernen feststellen, daß die Wärmeleitfähigkeit bei Kalken kaum Anisotropien zeigt, bei Sandsteinen dagegen relativ starke Richtungsabhängigkeit im gesättigten Zustand hat. Im ungesättigten Zustand treten diese Anisotropien am Sandstein nicht auf, woraus geschlossen werden kann, daß sie vor allem auf die Anordnung der Poren und die Einregelung der Komponenten und weniger auf die anisotropen Eigenschaften der Quarzkristalle zurückzuführen ist. Verschiedene Modelle für anisotrope Gesteine werden von TROSCHE & BURKHARDT (1997) vorgestellt.

Zusammenfassend können folgende Abhängigkeiten der thermischen Eigenschaften von den Gesteinseigenschaften festgehalten werden:

Die Wärmeleitfähigkeit zeigt eine Zunahme bei:

- ◆ abnehmender Porosität
- ◆ zunehmendem Wassergehalt und Sättigungsgrad
- ◆ verbesserter Kornbindung bzw. Zementation
- ◆ Erhöhung des Drucks
- ◆ zunehmender Wärmeleitfähigkeit der festen Phase
- ◆ zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Poreninhaltes
- ◆ Erhöhung der Temperatur

Die Wärmekapazität ist dagegen ausschließlich von den Volumenanteilen der beteiligten Phasen abhängig (vgl. Gleichung 2-20). Da die Wärmekapazität von Wasser höher ist als die der festen Komponenten, steigt sie im Gestein grundsätzlich mit dem Wassergehalt an.

Von hoher Bedeutung für viele thermische Nutzungsarten des Untergrundes ist die Feststellung, daß bei porösen Medien die Porosität und der Wassergehalt maßgeblich für die thermischen Eigenschaften sind. Abbildung 2-25 zeigt die Auswirkungen der Änderungen von Wassergehalt und Porosität bei einem sandigem Boden.

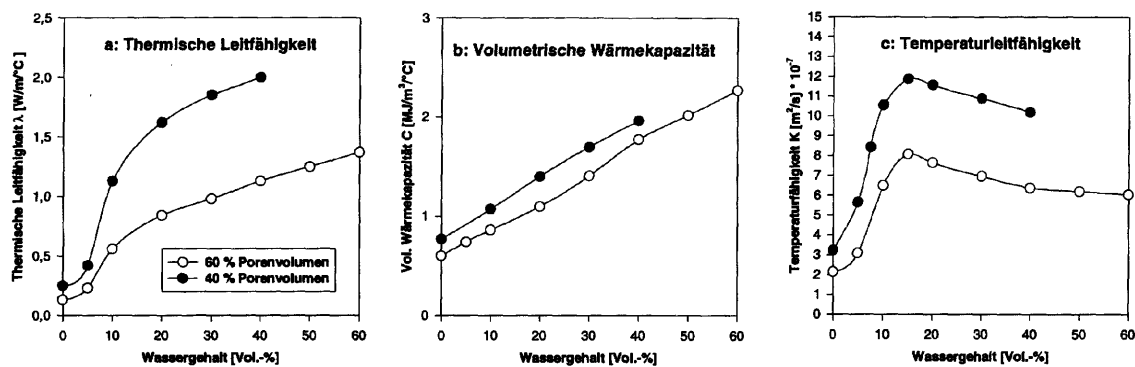


Abbildung 2-25: Änderungen der thermischen Eigenschaften eines sandigen Bodens mit 40 und 60% Porenvolumen in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Aus BLUME ET AL. (1996). Die Temperaturleitfähigkeit oder Diffusivität zeigt als Quotient aus λ und ρc meist ein Maximum bei mittleren Wassergehalten. Bei einer weiteren Erhöhung des Wassergehaltes treten allerdings nur noch geringfügige Änderungen auf.

Alle Berechnungen stellen letztlich nur eine grobe Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit dar, da bei genauerer Betrachtung die tatsächlich vorhandenen Anisotropien in den einzelnen Kristallphasen sowie die Kornmorphologie berücksichtigt werden müßten. Gute Ergebnisse sind nur zu erwarten, wenn ausreichende Erkenntnisse über die mineralogische Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, Dichte, Wassergehalt und Sättigungsgrad vorhanden sind. Im Rahmen einer flächenhaften Bewertung ist es allerdings nicht möglich, diese Faktoren ausreichend zu berücksichtigen, da sie sehr heterogen verteilt sind und meist keine Meßwerte verfügbar sind. Für die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen und Gesteinseinheiten unter bestimmten hydrogeologischen Bedingungen können deshalb nur relativ wege Schätzwerte angenommen werden.

2.3.2.3 Thermische Prozesse in der ungesättigten Zone

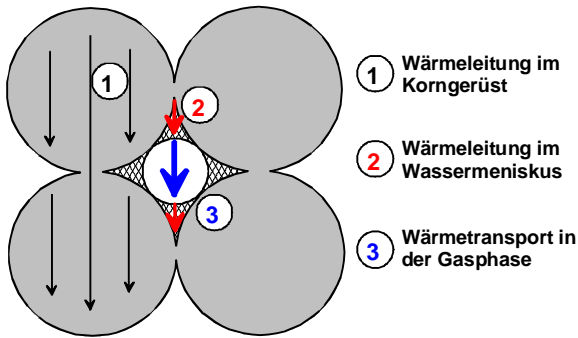


Abbildung 2-26: Die wesentlichen Wärmetransportvorgänge in der ungesättigten Zone. Nach BLUME ET AL. (1996).

Thermische Prozesse in der ungesättigten Zone sind ungleich komplizierter als die im grundwassererfüllten Bereich, da der konvektive Anteil der Wärmeausbreitung sich zusätzlich durch Transportvorgänge in der gasförmigen Phase vollzieht (EVANS & NICHOLSON, 1987; vgl. auch Abbildung 2-26). Temperaturinduzierter Transport von Wasser in der Gasphase erfolgt dabei in Richtung des abnehmenden Temperaturgradienten. Zunächst verdampft Wasser am Ort der höheren Temperatur, breitet sich in der Dampfphase aufgrund der Volumenerhöhung aus und kondensiert am kälteren Ort wieder. Damit finden sowohl auf der „warmen“ als auch auf der „kalten“ Seite des Systems Wassergehaltsänderungen statt. In wärmeren Bereichen kommt es dadurch zu einer Erhöhung der Saugspannung, was dazu führt, daß Wasser in der flüssigen Phase in Richtung der Wärmequelle bewegt wird (Abbildung 2-27). Der Rückfluß ist nach PRUESS & WANG (1987) allerdings nur dann möglich, wenn ausreichende Sättigung und ausreichende Wegsamkeiten vorhanden sind. Nur dann kommt es zur Ausbildung einer Gleichgewichtssituation. In der Summe ist die Nettowasserbewegung jedoch immer von der Wärmequelle weg gerichtet, da der Dampftransport den effektiveren Transportmechanismus darstellt. Es kommt deshalb zur Feuchtigkeitsreduzierung auf der warmen Seite, deren Umfang von der primären Wassersättigung sowie der Durchlässigkeit und Porosität abhängig ist (FAROUKI, 1986).

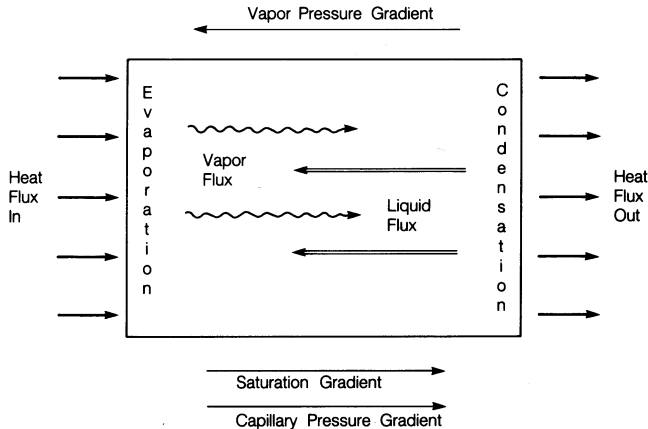


Abbildung 2-27: Entgegengesetzter Transport von flüssiger und gasförmiger Phase durch einseitige Temperatureinwirkung auf ein poröses, ungesättigtes Gestein. Aus PRUESS & WANG (1987).

Änderungen des Wassergehaltes ziehen wiederum Änderungen der thermischen Eigenschaften nach sich, die sich sowohl auf den konduktiven als auch auf den konvektiven Wärmetransport auswirken (FAROUKI, 1986). Weitere Effekte, wie Freisetzung latenter Wärme beim Phasenübergang, tragen entscheidend zum Wärmetransport bei. Verkompliziert werden die Vorgänge durch Heterogenitäten im Untergrund, insbesondere solcher der Porengröße und -geometrie.

2.3.2.3.1 Bedeutung für die thermische Nutzung

Die Prozesse der Feuchtemigration spielen beim Wärmeentzug mit Erdsonden eine untergeordnete Rolle, da hier keine hohen Temperaturgradienten auftreten (max. 10°C). Große Bedeutung haben sie allerdings bei der Speicherung von Wärme mit Erdsonden (Kap. 3.1.1.5.2). Dabei sind die Änderungen der thermischen Eigenschaften im gesamten für die Speicherung genutzten Gesteinsvolumen von geringem Interesse, da die Feuchtegehaltsänderungen sich auf einen begrenzten Bereich um die Wärmequelle (Sonde) beschränken. In der Summe bleibt der Wassergehalt im Speicherbereich unverändert. Von großer Bedeutung sind Ände-

rungen des Wassergehaltes im unmittelbaren Sondenbereich, da sie sich direkt auf das gesamte Speicher- verhalten auswirken (HELLSTRÖM, 1996). Besonders kritisch zu sehen ist die Entstehung von thermischen Kontaktwiderständen aufgrund von Austrocknung, Schrumpfung und Rißbildung (vgl. auch Abbildung 2-25). Sie führen zu drastischen Verringerungen der Be- und Entladeleistungen. Bei der Speicherung auf hohem Temperaturniveau ist also zu klären, inwieweit hier Probleme zu erwarten sind.

Untersuchungen, die von WAGNER (1991) im Labormaßstab und Feld durchgeführt wurden, belegen, daß es bei Temperaturen bis 50°C zu beachtlicher Feuchtemigration und Austrocknung im Sondennahbereich kommen kann. Danach ist die Gefahr der Austrocknung vor allem bei grobklastischen Gesteinen zu befürchten. Tone und Schluffe, die einen flacheren Verlauf der Saugspannungskurve zeigen, können dagegen nicht ohne weiteres entsättigt werden. WAGNER (1991) weist zudem darauf hin, daß aufgrund des hysteretischen Verlaufs der Saugspannungskurve eine Feuchtere-generation nicht vollständig verläuft (Kap. 2.3.1.4, Abbildung 2-14). Nach HELLSTRÖM (1991) kann Feuchtemigration bei hoher Porosität und geringem Wassergehalt in größerem Umfang bereits ab Temperaturen von 25°C stattfinden. Probleme mit Austrocknungserscheinungen bei Hochtemperatur-Sondenspeichern werden von einem Projekt aus Dänemark berichtet. Dort wurden beachtliche und unerwartete Wasserbewegungen festgestellt, die von den Autoren vor allem auf das Auftreten von Klüften zurückgeführt werden (IEA, 1998).

2.3.2.3.2 Experimentelle Untersuchungen zu Austrocknungsphänomenen

Die meisten Untersuchungen zum Wärme- und Feuchtetransport in der ungesättigten Zone befassen sich mit Vorgängen in Böden und Lockergesteinen mit hohen Porositäten und Durchlässigkeiten bei relativ geringen Temperaturen (z.B. WAGNER 1991; FAROUKI 1986). Für Betrachtungen im Untersuchungsraum, wo die Speicherung von Wärme mit Erdsonden fast ausschließlich in Festgesteinen durchgeführt werden kann, ist aber eher von Interesse, wie sich der Wärmetransport in der ungesättigten Zone in geklüfteten Gesteinen mit geringer Matrixdurchlässigkeit vollzieht. Im Rahmen der Speicherung von Wärme in Festgesteinen, insbesondere bei der Hochtemperaturspeicherung (>50 °C) mit vertikalen Erdreichwärmetauschern, wurde der Effekt der temperaturinduzierten Feuchtemigration und das damit verbunden Risiko der Schrumpfung im Sondenbereich bisher wenig untersucht. Sehr viel intensiver wurde ähnlichen Fragestellung im Rahmen von Untersuchungen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen nachgegangen (z.B. YONG ET AL., 1997).

Zu den Konsequenzen der Feuchtemigration durch Temperatureinwirkung in der ungesättigten Zone gibt es im Allgemeinen keine eindeutigen Aussagen. Zweifelsfrei kann nur festgehalten werden, daß das Risiko der Austrocknung bei grobkörnigen Lockergesteinen extrem hoch ist. Ungesättigte, grobkörnige Lockersedimente sind allerdings schon aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit nicht für die Erdsondenwärmespeicherung geeignet. Von größerem Interesse sind die Auswirkungen hoher Temperaturen auf feinkörnige ungesättigte Lockersedimente und Festgesteine. Die Ergebnisse einiger Untersuchungen anderer Autoren, die Rückschlüsse auf diese Problemstellung zulassen werden hier kurz vorgestellt.

Versuche im Labormaßstab auf niedrigem Temperaturniveau führte WAGNER (1991) durch. Hier wurde ein Fein- bis Mittelsand mit einer Lagerungsdichte von 1,42g/cm³ und einem Wassergehalt von 7,5 Gew.% in einem Behälter von 0,6m³ Volumen 24 Tage lang über ein 37,5mm dickes Stahlrohr (Sonde) mit einer Temperatur von 48,5°C beschickt. Dies führte im Sondennahbereich zur kompletten Austrocknung. Diese und weitere Untersuchungen werden auch in TARNAWSKI ET AL. (1990) beschrieben.

Eine in diesem Zusammenhang besonders interessante Arbeit von YONG ET AL. (1997) befaßt sich mit den hydrothermischen Vorgängen in Bentonit-Sand-Suspensionen, also Materialien, wie sie auch als Hinterfüllung von Erdsonden eingesetzt werden (vgl. Kap. 2.2.2). Untersucht wurde die Raum-Zeit-abhängige Veränderung des Wassergehalts an Proben, die in speziellen Meßvorrichtungen eingebracht waren. Dabei zeigte sich, daß bei einer Temperatur von 80°C der Wassergehalt im Nahbereich der Temperaturquelle (0 bis 10mm) bereits nach wenigen Tagen von initial 30% auf 5-10% absinkt (siehe auch Abbildung 2-28). Die Autoren entwickelten in diesem Zusammenhang ein numerisches Modell zur Behandlung des Feuch-

tetransports. Ähnliche Versuche mit vergleichbaren Ergebnissen wurden von NASSAR ET AL. (1996) unter Feldbedingungen durchgeführt.

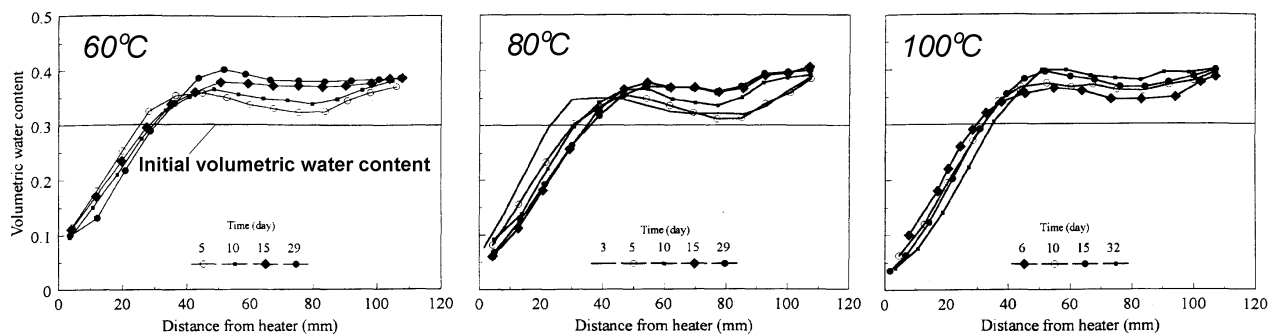


Abbildung 2-28: Änderung des Wassergehaltes in Bentonit-Sand-Proben in Abhängigkeit vom Abstand zur Wärmequelle und der Dauer der Temperatureinwirkung. Geringfügig modifiziert aus YONG ET AL. (1997).

EVANS & NICHOLSON (1987) beschreiben ein Experiment, bei dem in einem Tunnel ein geklüfteter Tuff mit einer Porosität von 7%, einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und einer Kluftdichte von 3 m^{-1} eine 120°C heiße Wärmequelle in ein 5m tiefes Bohrloch eingebracht wurde. In diesem und in einem in 1m Abstand eingebrachten Beobachtungsbohrloch wurden im Verlauf des Experiments Temperatur- und Feuchteentwicklung gemessen. Die Wärmequelle wurde zunächst 3 Tage betrieben, dann 4 Tage ausgeschaltet und nochmals 3 Tage eingeschaltet. Dabei stieg im Beobachtungsbohrloch die Temperatur nach der zweiten Heizperiode um $7,6^\circ\text{C}$ an und sank nach 400 Stunden wieder auf den Ausgangswert. Die Saugspannung erhöhte sich von weniger als 1bar ($pF < 3$) auf mehr als 9bar ($pF \approx 4$). Dennoch kam es zu keiner meßbaren Wassergehaltsänderung, da die Saugspannung offensichtlich nicht ausreichte, um einen nennenswerten Porenanteil zu entleeren. Im Heizbohrloch selbst nahm der Wassergehalt in der Nähe der Heizquelle um ca. 35% ab und war auch 300 Tage nach Beendigung des Experiments noch deutlich niedriger als vor Beginn.

Die oben zitierten Experimente zeigen, daß der Problematik der Austrocknung und Schrumpfung im Sondenbereich bei Temperaturen oberhalb 50°C große Bedeutung beigemessen werden sollte. Es läßt sich ableiten, daß bei Festgesteinen mit geringer Matrixdurchlässigkeit, vor allem der Nahbereich der Sonden kritisch im Hinblick auf Wassergehaltsänderungen ist. Besonders bedeutsam ist der Umstand, daß es schon nach kurzer Heizperiode zu drastischen Wassergehaltsänderungen (Austrocknung) kommt, die auch nach längerer Ruhezeit nicht vollständig reversibel ist (Hysteresis). Damit kann es während der Einspeicherphase zu Problemen bei der Wärmeübertragung kommen, die vor allem dann noch verstärkt werden, wenn es zu Schrumpfungen und damit zur Ablösung der Sondenwand von Verfüllmaterial und Gestein kommt (thermische Kontaktwiderstände). Da diese Effekte materialabhängig sind, unter anderem z.B. vom Anteil verschiedener Tonminerale (Quellfähigkeit, thermische Stabilität) und der Porosität und Permeabilität, sollten in jedem Fall Versuche durchgeführt werden. In Karbonatgesteinen, die ein geringes Gesamthohlraumvolumen aufweisen, sind solche Effekte nicht von Bedeutung. In Tonsiltsteinen ist das durchflußwirksame oder entwässerbare Porenvolumen wegen der geringen Effektiv-Porendurchmesser verschwindend klein. Kritisch sind dagegen Sandsteine mit hoher effektiver Porosität. Entscheidend ist, da sich die Feuchtemigration vor allem im unmittelbaren Sondenbereich bemerkbar macht, allerdings in jedem Fall auch die Qualität des Verfüllmaterials (vgl. auch BÜTTNER ET AL., 2000; DRACH ET AL., 2000).

2.3.2.3.3 Schätzverfahren zur Beurteilung des Austrocknungsrisikos

Zur Beurteilung des Austrocknungsrisikos können einfache Überlegungen und Schätzverfahren herangezogen werden. Zunächst kann man davon ausgehen, daß bei einem Boden, dessen initialer Wassergehalt unterhalb der sogenannten „Schrumpfgrenze“ liegt, durch Temperatureinwirkung keine weitere Schrumpfung mehr zu erwarten ist. Die Schrumpfgrenze wird in der DIN 18122 definiert als der Wassergehalt, unterhalb dessen sich das Volumen einer Probe nicht mehr ändert. In bindigen Lockergesteinen mit geringer Rohdich-

te (1-1,5) kann nach BOSE (1985; zitiert in SANNER, 1992), ein thermischer Stabilitätsindex in Abhängigkeit von Konsistenzgrenzen des Bodens bestimmt werden. Er beschreibt, ob in einem Boden temperaturinduzierte Feuchtemigration wahrscheinlich ist. Dieser Index berücksichtigt allerdings nicht den Temperaturgradienten.

$$TSI = \frac{W_{\min} - W_p}{W_l - W_p} \quad \text{Gleichung 2-34}$$

mit W_{\min} = initialer Mindestwassergehalt, W_p Wassergehalt der Ausrollgrenze, W_l Wassergehalt der Fließgrenze. Die Bedeutung des TSI wird in Tabelle 2-4 erklärt.

TSI	Bedeutung
< 0	Feuchtemigration wahrscheinlich:
0 - 1	unwahrscheinlich
> 1	Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigendem Wassergehalt ab

Tabelle 2-4: Bedeutung des Thermischen Stabilitätsindex (TSI). Nach BOSE (1985; zitiert in SANNER, 1992).

Weitere Schätzverfahren werden von FAROUKI (1986) zitiert. Entsprechende Überschlagsrechnungen sind aber insgesamt nicht sehr verlässlich. Labor- oder Feldversuche bzw. Modellrechnungen für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport (z.B. MÜLLER & REUB, 1997) sind letztlich wohl unerlässlich.

2.3.2.4 Temperaturverteilung im Untergrund

Für die natürliche Temperaturverteilung im flacheren Untergrund sind vor allem zwei Vorgänge maßgeblich: der natürliche Wärmestrom aus dem Erdinneren und die von außen eingestrahlte Sonnenenergie. Der terrestrische Wärmefluss hat in Mitteleuropa nach SCHULZ ET AL. (1992) eine mittlere Dichte von $0,7-0,8 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$. In Deutschland werden Werte zwischen $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$ und $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$ gemessen. Die Wärme stammt vorrangig von Prozessen aus der Entstehungszeit der Erde und radioaktiven Zerfallsprozessen. Die weitaus bedeutendere Energiequelle stellt die Strahlungsenergie der Sonne dar, die auf der Außenseite der Erdatmosphäre eine Wärmestromdichte von 1360 W/m^2 (Solarkonstante) und auf der Erdoberfläche eine mittlere Dichte von 350 W/m^2 hat (KALTSCHMITT & WIESE, 1997). In Deutschland beträgt sie nach FRICKE & BORST (1984) etwa 120 W/m^2 . Die Einstrahlung der Sonnenenergie wirkt sich auf die Temperaturen im Untergrund allerdings nur in den obersten 10-20 Metern aus. Für den in dieser Untersuchung betrachteten Bereich bis in 200m Tiefe muß deshalb unterschieden werden zwischen einem sehr flachen, vorwiegend durch tägliche und saisonale Temperaturschwankungen gekennzeichnetem Bereich und einem tieferen, der vorrangig durch den Wärmefluss aus dem Erdinnern beeinflusst wird.

2.3.2.4.1 Saisonale Temperaturschwankungen im flachen Untergrund

Nach KALTSCHMITT ET AL. (1999) kann der Einfluß der täglichen Temperaturschwankungen bis in eine Tiefe von etwa 1,5m und der der jährlichen Schwankungen bis zu etwa 30m Tiefe nachgewiesen werden. Die Eindringtiefe der Temperaturwelle ist dabei von den thermischen Eigenschaften des Bodens bzw. Gesteins abhängig. Besonderen Einfluß haben das Vorhandensein und die Bewegung von Wasser im Untergrund. In größeren Tiefen herrscht dagegen eine nach menschlichen Zeitmaßstäben \pm konstante Temperatur, die nur in seltenen Fällen durch Konvektion von Fluiden kurzfristig verändert werden kann. Dieser Bereich wird als neutrale Zone bezeichnet.

Die Temperatur in einem homogenen Boden als Funktion der Tiefe z und der Zeit t kann in erster Näherung als Überlagerung zweier Sinusschwingungen der Periodenlänge $P_d=24\text{h}$ und $P_a=365\text{d}$ dargestellt werden (BLUME ET AL., 1996). Der eindimensionale Wärmetransport in einem homogenen, unendlich ausgedehnten Medium in die Tiefe z durch reine Wärmeleitung wird durch:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{Gleichung 2-35}$$

beschrieben. Unter der Annahme verschiedener Randbedingungen erhält man nach TURCOTTE & SCHUBERT (1982) als Lösung für Gleichung 2-35:

$$T(z, t) = T_A + \Delta T \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cdot \sin\left(\omega t - z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \quad \text{Gleichung 2-36}$$

mit T_A = mittlere Jahresbodentemperatur, ΔT = Amplitude der jährlichen (sinusförmigen) Temperaturschwankung, α = thermischer Diffusionskoeffizient [m^2/s]. Nach Gleichung 2-36 erfolgt mit wachsender Tiefe eine starke Dämpfung der Amplitude sowie eine Phasenverschiebung. Die Frequenz der Temperaturschwingung an der Erdoberfläche bleibt erhalten.

Die Phasenverschiebung Δt , d.h. die zeitliche Verzögerung der Temperaturschwankungen in einer Tiefe z , kann nach RAUCH (1992) mit:

$$\Delta t = \frac{z}{2} \sqrt{\frac{P_{d,a}}{\alpha\pi}} \quad \text{Gleichung 2-37}$$

bestimmt werden (für P_d täglich und P_a jährlich). Die maximale Eindringtiefe, das ist die Tiefe, bei der $T_{\max}(z)$ nur noch den e-ten Teil von T_0 erreicht, berechnet sich wie folgt:

$$z = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad \text{Gleichung 2-38}$$

In Abbildung 2-29 ist der theoretische Temperaturgang in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe dargestellt.

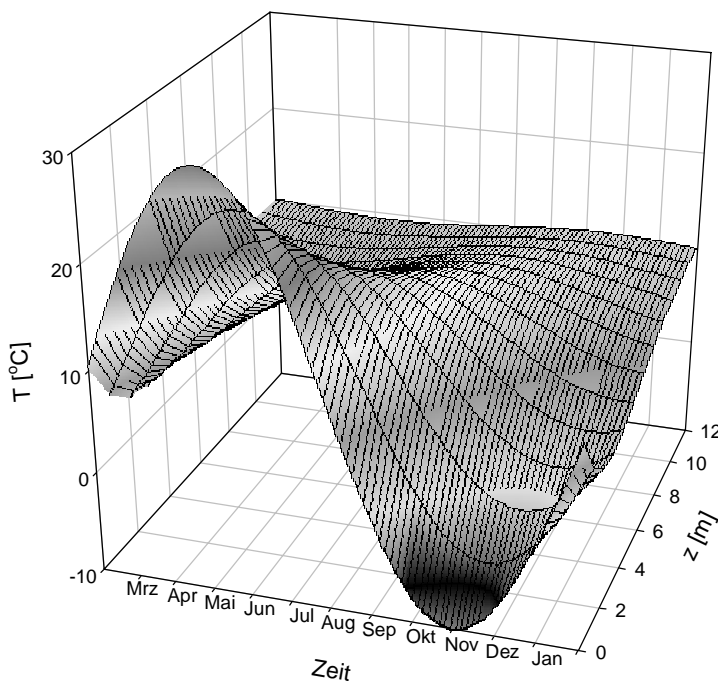


Abbildung 2-29: Theoretischer jährlicher Temperaturgang als Funktion der Zeit t und der Tiefe z berechnet nach Gleichung 2-36 unter der Annahme eines sinusförmigen Verlaufs der Temperaturverteilung der Lufttemperatur, einer konstanten Temperatur von $T_A=10^\circ\text{C}$ und einer Amplitude der mittleren Temperatur von 30°C .

In der Realität ist weder eine bis in unendliche Tiefe homogene isotrope Verteilung der thermischen Eigenschaften, noch ein exakt sinusförmiger Verlauf der Jahrestemperatur gegeben. Zusätzlich finden im oberflächennahen Untergrund bedeutsame konvektive Transportvorgänge durch Versickerung, Verdunstung und Grundwasserfließbewegungen statt. Die Untergrundtemperatur als Funktion der Zeit und der Tiefe folgt deshalb nicht exakt dem in Abbildung 2-29 gezeigten theoretischen Verlauf. Eine genauere Berechnung kann nur nach empirisch ermittelten Beziehungen bzw. mit Hilfe numerischer oder analytischer Verfahren erfolgen (z.B. RAUCH, 1992; HART & COUVILLION, 1986, BLUME ET AL., 1996). Für die Berechnung der zeit- und tiefenabhängigen Temperaturentwicklung unter Einbeziehung von Infiltrationsprozessen existieren Softwarelösungen (HUWE, 1998).

2.3.2.4.2 Temperaturen im tieferen Untergrund

Unterhalb des Bereichs, der durch die oben beschriebenen periodischen Schwankungen beeinflusst wird, nimmt die Temperatur einen gleichbleibenden Wert an, der ungefähr der Jahresmitteltemperatur am betreffenden Ort entspricht (HART & COUVILLION, 1986). Aus diesem Grund weisen Quell- und Grundwasser üblicherweise diese Temperatur auf (MATTHESS, 1990). Wegen des aus dem Erdinnern stammenden Wärmeflusses steigt die Temperatur dann bei weiter zunehmender Tiefe an. Die Zunahme mit der Tiefe wird als geothermischer Gradient bezeichnet. Er beträgt im globalen Mittel etwa $30^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$, ein Wert, der in etwa auch für das Untersuchungsgebiet angesetzt werden kann. Der Temperaturanstieg mit der Tiefe verläuft aufgrund von Heterogenitäten des Untergrundes und vor allem wegen konvektivem Wärmetransport (Aufstieg heißer Tiefenwässer etc.) nicht linear. Eine Darstellung der Temperaturverteilung und ihrer Ursachen für den tieferen Untergrund der Untersuchungsregion gibt BAUER (2000; vgl. auch Kap. 4.4.6).

2.3.2.4.3 Bedeutung für die thermische Nutzung des Untergrundes

Für die Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes ergeben sich aus den oben vorgestellten Überlegungen verschiedene Konsequenzen. Für die Gewinnung von Wärme mit vertikalen Erdreichwärmetauschern, die häufig deutlich tiefer als 10m eingebracht werden, läßt sich ableiten, daß um so günstigere Bedingungen herrschen, je tiefer die Sonden reichen. Hier muß allerdings auch berücksichtigt werden, daß die Vorteile einer geringfügigen Temperaturzunahme durch höhere Energieaufwendungen für Umwälzpumpen und höhere Baukosten wettgemacht werden können. Für Untergrundspeicher folgt, daß ein Speicher entweder im oberflächennahen Bereich künstlich isoliert bzw. der eigentliche Speicherbereich sich soweit unterhalb der Erdoberfläche befinden muß, daß die saisonalen Temperaturschwankungen nicht mehr zum Tragen kommen. Ansonsten spielen die saisonalen Temperaturänderungen vor allem bei den Verfahren mit horizontalen Erdreichwärmetauschern und bei Grundwasserwärmepumpen eine Rolle, die im Untersuchungsgebiet aufgrund der geologischen Gegebenheiten vorrangig in sehr flach liegenden Aquiferen durchgeführt werden können (vgl. Kap. 5.3.2).

3 Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrunds

Grundsätzlich können zwei große Verfahrensgruppen von unterschieden werden: die **Entzugsverfahren**, bei den natürliche Untergrundwärme (oder „-Kälte“; vgl. Kap. 2.1) gewonnen wird, und die **Speicherverfahren**, bei denen man auf künstlichem Weg erzeugte Wärmeenergie in den Untergrund bringt und nach einer gewissen Speicherdauer wieder von dort rückfördert. Es ist nicht immer möglich, diese beiden Gruppen streng voneinander abzugrenzen. So existieren Techniken, die eigentlich den Entzugsverfahren zuzuordnen sind, aber eine gewisse Speicherkomponente aufweisen. Zu nennen wären hier erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, die im Winter zu Heizzwecken und im Sommer zur Kühlung eingesetzt werden. Hier entsteht durch die im Sommer in den Untergrund abgeführte Abwärme ein Wärmereservoir, das auch als Speicher gesehen werden kann. Entsprechende Anlagen sollten nach Ansicht einiger Autoren deshalb auch als Untergrundwärmespeicher bezeichnet werden (z.B. SANNER & STILES, 1997). Daneben existieren auch Methoden, die eine direkte und beabsichtigte Kombination aus Entzug und Speicherung darstellen. In solchen Fällen wird das durch den Entzug geschaffene Wärmedefizit im Untergrund im Sommer **aktiv** z.B. durch Solar Kollektoren „wiederaufgeladen“ (ZOGG, 1998).

Sowohl bei den Entzugs-, als auch bei den Speicherverfahren können weitere Untergliederungen vorgenommen werden. Eine Übersicht über gängige Anwendungen der thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes gibt Tabelle 3-1.

Nutzungstyp	Temperaturniveau		Einsatzgebiet
	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]	
Wärmespeicherung auf niedrigem Temperaturniveau	0-10	10-50	Heizung mit Wärmepumpen, Eisfreihaltung
Wärmespeicherung auf hohem Temperaturniveau	20-50	50-150	Heizung mit und ohne Wärmepumpe, Gewinnung von Prozeßwärme
Kältespeicherung	-10-5	5-20	Prozeßkühlung, Klimatisierung
Kombinierte Wärme- und Kältespeicherung	-10-5	10-50	Heizung und Klimatisierung von Wohn- und Bürogebäuden
Wärmegewinnung aus Boden, Gestein und Grundwasser	0-5	10-20	Heizung mit Wärmepumpen
Kältegewinnung aus Boden, Gestein und Grundwasser	0-5	10-20	Kühlung mit Wärmepumpen
Direkte Kühlung mit Grundwasser	7-10	>10	Prozeßkühlung, Klimatisierung
Direkte Kühlung mit Erdsonden	7-10	>10	Prozeßkühlung, (Klimatisierung)

Tabelle 3-1: Die wesentlichen Verfahren der thermische Nutzung des Untergrundes gegliedert nach Verwendungszweck und Temperaturniveau. T_{min} und T_{max} bezeichnen die minimalen bzw. maximalen im Untergrund auftretenden Temperaturen (vgl. dazu auch Kap. 3.1.2).

3.1 Speicherung thermischer Energie (Wärme und Kälte)

In diesem Kapitel werden die technischen, physikalischen und geologischen Grundlagen derjenigen Verfahren der Untergrundspeicherung, die im Rahmen dieser Untersuchung genauer betrachtet wurden, eingehend beschrieben. Neben diesen bestehen auch andere Verfahren, die im Allgemeinen der Untergrundspeicherung zugerechnet werden, die aber in dieser Arbeit nicht von Interesse waren und deshalb nur kurz erwähnt werden.

3.1.1 Bautypen von Untergrundspeichern

Insgesamt existieren vier Verfahrensgruppen, die der Untergrundspeicherung im engeren Sinn zugerechnet werden können. Sie sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

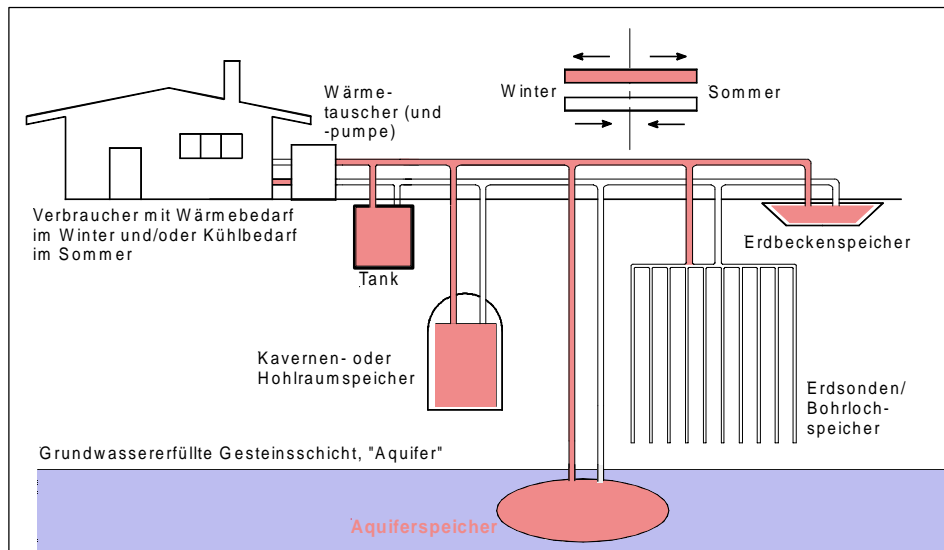


Abbildung 3-1: Verschiedene Verfahren der Untergrundspeicherung. Eigener Entwurf nach BAKEMA ET AL. (1995).

Speichertanks: Stahl- oder Betontanks, ganz oder teilweise im Untergrund versenkt. Speichermedium Wasser.

Erd- und Kiesbeckenspeicher: Künstlich angelegtes Becken, allseitig thermisch und hydraulisch isoliert, mit Wasser oder mit Kies-Wasser-Gemisch befüllt.

Erdsonden- und Bohrlochspeicher: Über ein Wärmeträgermittel, das in zahlreichen Bohrungen zirkuliert, wird ein Gesteinsvolumen aufgeheizt oder abgekühlt. Erdsonden sind geschlossene Systeme, Bohrlöcher offene (= das Wärmeträgermittel hat direkten Gesteinskontakt).

Aquiferspeicher: Ein natürlicher Grundwasserleiter wird partiell durch Injektion von warmem oder kaltem Wasser erwärmt bzw. abgekühlt.

Kavernenspeicher: Künstlich angelegte Hohlräume im Gestein, mit warmem (kaltem) Wasser befüllt. Aus ökonomischen Gründen kommen nur bestehende Hohlräume (z.B. Bergwerksanlagen) in Betracht.

3.1.1.1 Tanks

Aus Gründen der Vollständigkeit wird hier kurz auf die Möglichkeit der Speicherung in thermisch isolierten Stahl- oder Betontanks im Untergrund eingegangen. Solche Bauwerke unterscheiden sich wenig von Speichertanks, die an der Erdoberfläche errichtet werden. Sie sind, abgesehen von ingenieurgeologischen Fragestellungen, als isolierte Bauwerke weitgehend unabhängig von der Geologie des Standortes, weswegen sie im Rahmen dieser Studie keine Beachtung finden. Es wird darauf hingewiesen, daß die Speicherung in isolierten Tanks energetisch sehr effizient und vor allem, verglichen mit den anderen Verfahren der „echten“ Untergrundspeicherung, sehr gut kalkulierbar ist. In Tanks können zudem sehr hohe Speichertemperaturen realisiert werden. Die Nachteile der Methode sind hohe Speicherbaukosten (Abbildung 3-13) und die Beschränkung auf relativ kleine Volumina. Mit unterirdischen Speichertanks befaßt sich beispielsweise eine Arbeit von ISMAIL & CARROCCI (1988).

3.1.1.2 Beckenspeicher (pit storage)

Beckenspeicher sind den oben beschriebenen Tanks in vieler Hinsicht ähnlich, unterscheiden sich aber im Bezug auf die Stabilität der Bauwerke und ihre Befüllung. Gleichwohl werden sie in der Literatur immer zu den Verfahren der Untergrundspeicherung gerechnet, während Tanks dort oft keine Erwähnung finden. Erd- oder Kiesbeckenspeicher sind flache Gruben, die mit einer Folie abgedichtet und mit einem Kies-Wasser-Gemisch befüllt werden, welches als Speichermedium dient. Der Kies stabilisiert das Bauwerk und macht eine anderweitige Nutzung der Fläche über dem Speicher möglich. Wegen der Verwendung dieses Kies-Wasser-Gemisches hat sich auch der Begriff „künstlicher Aquifer“ eingebürgert (z. B. LOTTNER, 1994), der aber eher irreführend scheint. Die Vorteile der Kiesbeckenspeicher liegen, ebenso wie die der Tanks, in ihrer großen Zuverlässigkeit und der Möglichkeit hoher Speichertemperaturen. Die Nachteile sind auch hier in den hohen Baukosten zu sehen (Abbildung 3-13). Ähnlich wie für die Tanks gilt, daß Erdbeckenspeicher weitgehend unabhängig von der Beschaffenheit des Untergrundes sind. Gleichmaßen gilt aber, daß bei der Errichtung ingenieurgeologische Fragestellungen eine gewisse Rolle spielen. Kiesbecken-

speicher wurden vor allem in Deutschland intensiv untersucht. Ein Forschungsspeicher mit etwa 1000m³ Speichervolumen wurde in Stuttgart errichtet (GIEBE, 1989). Weitere befinden sich nach Angaben aus REUß ET AL. (1998) in Rottweil (600m³ Speichervolumen), Hamburg (4500m³) und Friedrichshafen (12500m³).

3.1.1.3 Kavernen

Bei der Kavernen- oder Hohlraumspeicherung werden große Hohlräume im Untergrund zur Speicherung genutzt. Aus ökonomischen Gründen ist es nicht sinnvoll, solche Hohlräume eigens zum Zweck der Speicherung zu schaffen. Aus diesem Grund ist die Kavernenspeicherung praktisch ausschließlich dort sinnvoll, wo solche Hohlräume im Untergrund bereits existieren, z.B. in Bergbauregionen. Im Untersuchungsgebiet Unterfranken bestehen derartige Voraussetzungen nicht. Aus diesem Grund werden Hohlraumspeicher in dieser Studie nicht betrachtet.

Aus geologisch-hydrogeologischer Sicht stellt die Speicherung von warmem Wasser in Kavernen eine sehr anspruchsvolle Technik dar. Kavernenspeicher bestehen vor allem in Schweden und Finnland (z.B. CLAESSON ET AL., 1994; KJELLSSON & HELLSTRÖM, 1994; SIPILA & RITOLA, 1988). In Deutschland wird eine Versuchsanlage im Lehrbergwerk der Universität Freiberg betrieben (SCHARBERG ET AL., 1997). In Abhängigkeit von den Bedingungen, die der bereits vorliegende Hohlraum bietet, liegen die Kosten für eine Speicherung in Kavernen nach BAKEMA ET AL. (1995) bzw. FISCH & KÜBLER (1991) im mittleren Bereich (s. Abbildung 3-13). Nachteilig ist, daß bei dieser Speichertechnik kaum Standardverfahren erarbeitet werden können und sich die Anwendung auf wenige Spezialfälle beschränkt. Geeignete räumliche Konstellationen von Energiequelle, Speicherhohlraum und Energieabnehmer sind wohl eher selten.

3.1.1.4 Aquiferspeicher

Bei der Speicherung im Aquifer (ATES¹⁵) wird warmes (oder kaltes) Wasser direkt in einen Grundwasserleiter eingeleitet und bei Bedarf von dort wieder entnommen. Eine ATES-Anlage besteht aus mindestens einer Bohrung, die als Entnahme und/oder Schluckbrunnen ausgebaut ist sowie einem Pumpensystem, für die Förderung bzw. Einleitung des Grundwassers in den Aquifer. Weitere untertägige Einrichtungen sind im Allgemeinen nicht vorhanden, d.h. es bestehen keinerlei hydraulische Abdichtungen oder thermische Isolations-schichten. Speichermedium bilden also Grundwasser und umgebendes Gestein, weswegen solche Speicher auch als Misch- oder Diffusivspeicher bezeichnet werden (HADORN ET AL., 1989). Ein weit verbreitetes Anlagenschema zeigt Abbildung 3-2, weitere mögliche Konstellationen sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

Da Aquiferspeicher vergleichsweise geringe Baumaßnahmen erfordern, sind sie die billigste Form der Untergrundspeicherung (Abbildung 3-13). Sie setzen aber einen erheblichen Planungsaufwand voraus und sind zudem schwer kalkulierbar. Da bei der Aquiferspeicherung Gestein und Grundwasser selbst Speichermedium und Transportmittel darstellen und ein direkter Austausch zwischen dem Speichervolumen und dem umgebenden Untergrund besteht, stellen solche Speicher die geologisch und vor allem hydrogeologisch anspruchsvollste Form der Untergrundspeicherung dar.

3.1.1.4.1 Speichertypen und -konzepte

Durch unterschiedliche Anzahl und Verteilung der Bohrungen sowie die Zahl und Tiefe der genutzten Aquifer sind bei der Aquiferspeicherung eine Vielzahl unterschiedlicher Konzeptionen und Konstellationen denkbar. Einige häufig erwähnte Anlagenschemata werden in Abbildung 3-3 gezeigt.

¹⁵ ATES: Aquifer Thermal Energy Storage.

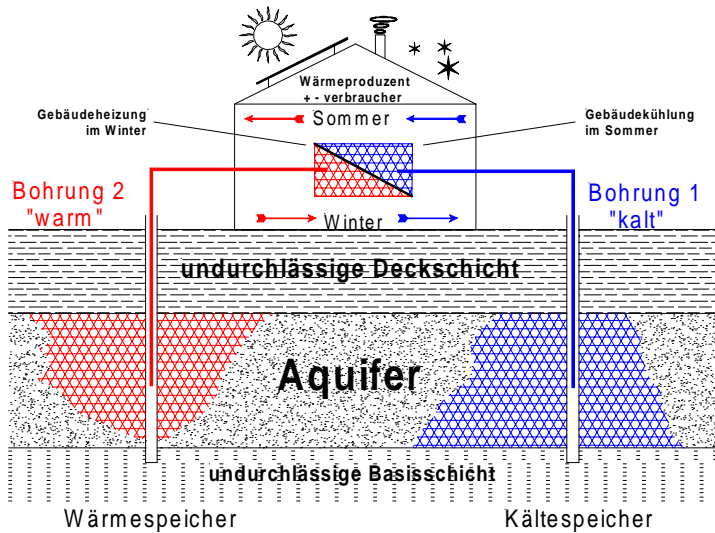


Abbildung 3-2: Weit verbreitete Methode der Aquiferspeicherung. Der Betrieb der Anlagen im „Doublettensystem“ ermöglicht die Nutzung als Wärme- und Kältespeicher. Das hier dargestellte Prinzip soll in das Energieversorgungssystem des Reichstags in Berlin einbezogen werden (KABUS, 1999; SEIBT & KABUS, 1997). Dort werden zwei Aquifere in verschiedener Tiefe als Wärme- und Kältespeicher genutzt (vgl. Abbildung 3-3b).

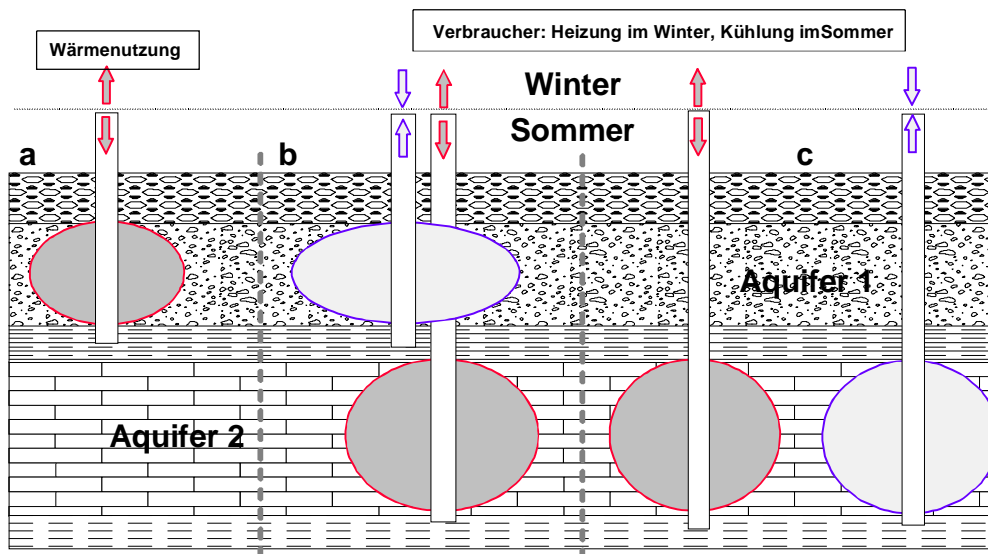


Abbildung 3-3: Drei gängige Konstellationen für Aquiferspeicherungsanlagen.

- a) Eine Bohrung zur Injektion im Sommer, Extraktion im Winter. Nur Heizung oder nur Kühlung.
- b) Doublette bestehend aus „kalter“ und „warmer“ Bohrung, die zwei verschiedene Grundwasserleiter nutzt. Heizung und Kühlung im kombinierten Betrieb möglich. Beispiel: Reichstag Berlin
- c) Wie b), aber beide Bohrungen erschließen einen Aquifer. Am weitesten verbreiteter ATEs-Typ (vgl. Abbildung 3-2).

3.1.1.4.2 Geologische Voraussetzungen

Die Speicherung von thermischer Energie in Aquiferen ist nur unter besonderen geologischen Bedingungen möglich. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein eines Aquifers, der die in Tabelle 3-2 aufgelisteten Eigenschaften erfüllt. Sehr entscheidend ist, daß bei der Aquiferspeicherung keine oder nur sehr geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten auftreten dürfen, da sonst die Wärme unkontrolliert abtransportiert wird. Es wurden zwar Versuche unternommen, durch besondere Konfigurationen von Extraktions- und Injektionsbrunnen auf erhöhte Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu reagieren oder den natürlichen Gradienten durch künstliche Absenkung und Aufhöhung im oberstromigen bzw. unterstromigen Bereich des Speichers zu verringern (z.B. in Saillon, Valois, Schweiz; HADORN & SAUGY, 1994), im Allgemeinen wird dies aber keine befriedigende Lösung sein. VAN LOON (1991) gibt als Grenzwert für die maximal tolerierbare Grundwasserfließgeschwindigkeit 3 bis 11cm pro Tag an, wobei bei größeren Speichern höhere Fließgeschwindigkeiten möglich sein sollen (vgl. auch Kap. 2.3.2.1.2 und 3.1.3).

Die in Tabelle 3-2 gemachten Angaben zu den für die Aquiferspeicherung notwendigen Eigenschaften des Grundwasserleiters stellen ungefähre Richtwerte dar. Sie beruhen auf einfachen Abschätzungen, die sich an Literaturangaben und einfachen hydrogeologischen Überlegungen orientieren.

Eigenschaft	Günstige Werte	Erläuterung	Bedeutung
Aquifergeometrie			
Mächtigkeit: M	M > 10m	Bei kleineren Mächtigkeiten sind ausreichend große Speichervolumina nur noch bei sehr ungünstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnissen zu realisieren (vgl. Kap. 3.1.4.3.2).	hoch
Tiefenlage des Tops unter GOK: T	5m < T < 150m	Bei geringerem Abstand zur Oberfläche wird der Speicher durch saisonale Temperaturschwankungen beeinträchtigt, bei größeren Tiefen wachsen die Bohr- und Brunnenausbaukosten enorm an.	hoch
Laterale Ausdehnung des GWL: L	L > 50m	Nur von Bedeutung, wenn besondere geologische Strukturen (z.B. Rinnen) genutzt werden sollen. Ähnlich zu sehen wie der Parameter Mächtigkeit (s.o.).	hoch
Hydraulische Eigenschaften			
Effektive Porosität / Kluftvolumen: n_e	$n_e > 5\%$	Da Wasser bei der Aquiferspeicherung die entscheidende Komponente mit der höheren Wärmespeicherkapazität und der höheren Mobilität ist, sind die Speichereigenschaften um so günstiger, je mehr Wasser pro Volumeneinheit gespeichert werden kann. Hohe nutzbare Porosität garantiert zudem hohe Permeabilität (s.u.)	sehr hoch
Permeabilität (Gebirgsdurchlässigkeit): k_f	$k_f > 1 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$	Die Permeabilität bestimmt, ob die erforderliche Wasser-(bzw. Energie-)menge mit der gewünschten Geschwindigkeit (Be-/Entladeleistung) in den Aquifer eingeleitet bzw. gefördert werden kann.	sehr hoch
Homogenität, Isotropie	hoch	Eine homogene, in alle Richtungen gleiche Verteilung der Eigenschaften ist günstig, da nur so ein günstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis erreicht werden kann. Im Idealfall sollte sich die Temperaturanomalie mit dem Grundwasser zylinderförmig um das Bohrloch ausbreiten. Ungünstig wäre z.B. eine Konstellation, in der sich große Volumina rasch auf Vorzugsfließpfaden (Klüfte, Horizonte großer Durchlässigkeit) ausbreiten können.	hoch
Hydraulischer Gradient	klein	In Abhängigkeit vom k_f -Wert und der nutzbaren Porosität (vgl. Gleichung 2-7), sollte der hydraulische Gradient so gering sein, daß sich keine Grundwasserfließgeschwindigkeiten größer als ca. 5-15m/a ergeben, da ansonsten die eingebrachte Wärme mit dem natürlichen Grundwasserstrom abtransportiert wird und nicht mehr zurückgewonnen werden kann.	extrem hoch
Hydrochemie / hygienisch biologische Aspekte			
Bakterielle Verunreinigungen / Algenwachstum	gering	Präexistierende Verunreinigungen oder Verhältnisse, die die Vermehrung von biogenem Material bei dem angestrebtem Temperaturbereich fördern, sind aus technischen und hygienischen Gründen ungünstig.	hoch
pH-Wert, Eh, Leitfähigkeit / Gesamtmineralisation	verschieden	Alle qualitativen Eigenschaften des Grundwassers, die bei den zu erwartenden Temperaturänderungen zur Verschiebung von Lösungsgleichgewichten und damit verbundenen Ausfällungen führen können, sind ungünstig.	extrem hoch
Thermische Eigenschaften der Gesteinsmatrix			
Wärmeleitfähigkeit	gering	Prinzipiell ist bei der Aquiferspeicherung nicht erwünscht, daß größere Energiemengen an die Gesteinsmatrix übertragen werden, da sie von dort nicht so effektiv zurückgewonnen werden können. Die Bedeutung ist aber von Fall zu Fall unterschiedlich.	gering
spezifische Wärmekapazität	gering		gering

Tabelle 3-2: Mindestanforderungen an einen für die Aquiferspeicherung geeigneten Grundwasserleiter. Nach Angaben aus ANDERSSON ET AL. (1997), LANDBERG (1988), MOROFSKY & MIRZA (1983), SANNER & KNOBLICH (1993, 1994), SEIBT (1995), VAN LOON (1991) u.v.m.

Um Verluste durch Grundwasserfließbewegungen vorherbestimmen oder ausschließen zu können bzw. um das Verhalten eines Aquiferspeichers überhaupt vorhersagen zu können, ist die Erstellung eines Grundwasserströmungsmodells bei der Planung eines Aquiferspeichers unerlässlich. Ein solches Modell muß in der

Lage sein, Grundwasser- und Wärmeausbreitung unter den verschiedenen möglichen Betriebszuständen 3-dimensional und mit hoher Präzision vorhersagen zu können. Es ist leicht einzusehen, daß es extrem aufwendig ist, ein solches Modell bei komplexen hydraulischen Verhältnissen zu erstellen, zumal der gekoppelte Grundwasser- und Wärmetransport schwieriger zu erfassen ist als die Grundwasserbewegungen selbst. Wie in Kap. 2.3.1.3 beschrieben, ist bei der Aquiferspeicherung nicht nur von Interesse, wieviel Wasser gefördert oder injiziert werden kann, sondern wie und in welchen Bereichen des Aquifers es sich exakt bewegt. Es wird von einigen Autoren besonders darauf hingewiesen, daß Modellierungen des Wärmetransports in Kluftaquiferen, wegen der dort auftretenden Anisotropien, wenig aussagekräftig sind (SØRENSEN & REFFSTRUP, 1994).

3.1.1.4.3 Hydrochemische und biologische Aspekte

Durch Temperaturveränderungen kommt es im Grundwasser zu verschiedenen chemischen und mikrobiologischen Veränderungen, die sich sowohl auf das Verhalten des Aquiferspeichers selbst als auch auf das Grundwasser als schützenswertes Gut negativ auswirken können. Zu nennen sind hier in erster Linie Lösungs- und Fällungserscheinungen, die sich aufgrund der temperaturbedingten Verschiebung von Lösungsgleichgewichten ergeben. Hinzu kommen alle in dieser Hinsicht bekannten Risiken, die auch bei „normalen“ Brunnenanlagen eintreten können (vgl. z.B. BALKE ET AL. 2000). Insbesondere Ausfällungen können zu einer Verringerung von Porosität und Permeabilität im Aquifer, zur Blockierung im verfilterten Bereich und auch zum Zusetzen von Pumpen, Wärmetauschern etc. führen. Neben den chemischen Reaktionen sind bei erhöhten Temperaturen auch biologische Veränderungen zu erwarten, beispielsweise die verstärkte Bildung von Biofilmen. Biologische Prozesse könnten zu einer ernsthaften Beeinträchtigung der hygienischen Wasserqualität führen, allerdings wurden entsprechende Fälle noch nicht bekannt. Eine dahingehende Untersuchung wurde von FANINGER-LUND (1997) vorgestellt. Dort wird insbesondere auf das Risiko einer Kontamination mit Legionellen hingewiesen.

Sowohl chemische als auch biologische Vorgänge haben in der Vergangenheit zu ernsthaften Problemen bis hin zum Stillstand von Anlagen geführt. Eine ausführliche Zusammenfassung von Problemen, die bei bisherigen ATES-Projekten durch chemische und mikrobiologische Prozesse aufgetreten sind, geben MOROFSKY & CRUICKSHANKS (1997). Aufgrund der aufgetretenen Probleme wurden intensive Forschungsanstrengungen im Bereich der chemischen und mikrobiologischen Veränderungen im Aquifer unternommen. Ausführliche Darstellungen der Ergebnisse und weiterführende Hinweise geben die Arbeiten von ADINOLFI ET AL. (1994), SNIJDERS (1991), WAGNER ET AL. (1991) und WINTERS (1992).

3.1.1.4.4 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Die Speicherung von erwärmten Wasser in Grundwasserleitern stellt einen erheblichen Eingriff in das Grundwasser dar, weswegen verständlich ist, daß aus wasserrechtlicher Sicht gewisse Vorbehalte gegenüber Aquiferspeicherung bestehen. Neben der rein physikalischen Veränderung der Wasserqualität durch Änderungen der Temperatur, wird vor allem eine Änderung der chemischen und biologischen Eigenschaften befürchtet (s.o.). Zudem stellt jede entsprechende Bohrung eine Eröffnung der Grundwasseroberfläche und damit die Gefahr einer von außen eingetragenen Verschmutzung dar. Die damit verbundenen Schwierigkeiten hinsichtlich der Genehmigung von Vorhaben zur Aquiferspeicherung können hier nicht in allen Einzelheiten dargestellt werden, da sie sehr stark von regionalen und lokalen Bedingungen abhängig sind, die nicht nur in den geologischen Verhältnissen bestehen. Es ist zu erwarten, daß den rechtlichen Fragen bei der Aquiferspeicherung eine mindestens ebenso hohe Bedeutung zukommt wie den geologischen und technischen. Eine Einschätzung der rechtlichen Situation speziell im Hinblick auf die Aquiferspeicherung in Deutschland gibt MUND (1994). Weitere Ausführungen zum Thema in Kap. 3.6.

3.1.1.5 Speicherung mit vertikalen Erdreichwärmetauschern

Bei der Speicherung mit vertikalen Erdreichwärmetauschern zirkuliert ein Wärmeträgermittel mit einer relativ zur Umgebung höheren Temperatur durch ein System aus mehreren miteinander verbundenen Bohrlöchern und bewirkt so, daß das umgebende Gestein erwärmt wird (Abbildung 3-4). Als Speichermedium dient das Gestein und, soweit vorhanden, das enthaltene Grund- oder Porenwasser. Der Speicher wird entladen, indem relativ kälteres Wärmeträgermittel durch den Sondenkreislauf gepumpt wird. Dieses nimmt die Wärme aus dem umgebenden Gestein auf und transportiert sie zum Verbraucher.

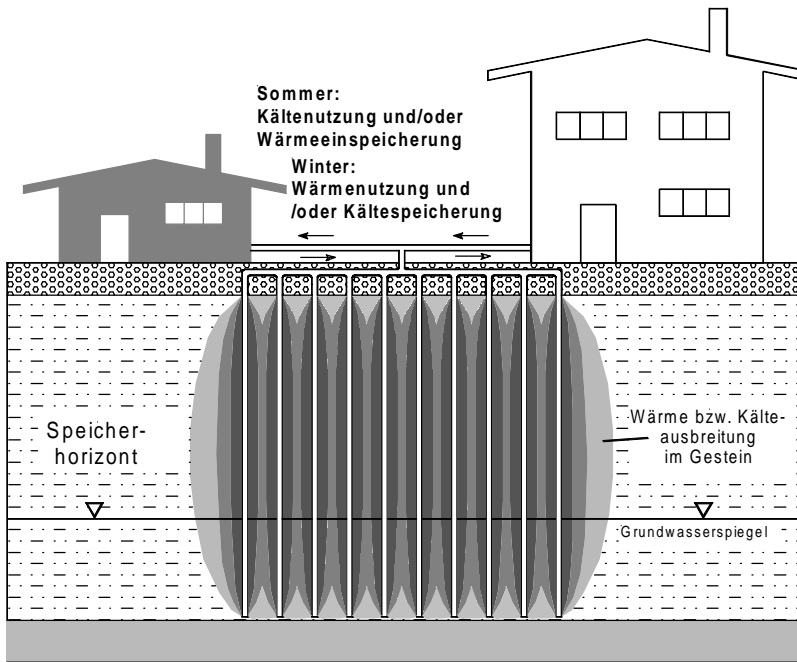


Abbildung 3-4: Wärme- oder Kältespeicherung mit vertikalen Erdreichwärmetauschern. In zahlreichen Bohrlöchern zirkuliert ein Wärmeträgermittel, das die Wärme an das umgebende Gestein abgibt oder sie von dort aufnimmt. Offene Systeme werden als Bohrlochspeicher bezeichnet, bei geschlossenen Rohrleitungssystemen spricht man meist von **Erdsondenspeicherung** (vgl. Tabelle 3-3). Vertikale Erdreichwärmetauscher können sowohl im gesättigten, als auch im ungesättigten Bereich eingesetzt werden.

In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes sind verschiedene Techniken der Speicherung mit vertikalen Erdreichwärmetauschern möglich. Bezüglich der Benennung der einzelnen Techniken existiert eine gewisse begriffliche Verwirrung, die es nicht immer leicht macht aus der Bezeichnung eines Speichertyps abzuleiten, um welche Technik es sich tatsächlich handelt. Aus diesem Grund wird hier eine kurze Übersicht über gängige Bezeichnungen und Definitionen gegeben (Tabelle 3-3).

Bezeichnung	Erklärung
duct storage (DTES) – 1. Bedeutung (1)	[duct=Rohr(-leitung)]: Im Englischen häufig als Oberbegriff für alle Systeme mit vertikalen Erdreichwärmetauschern verwendet. Wird aber auch auf Systeme mit geschlossenem Sondenkreislauf angewendet, die damit von offenen Systemen (siehe borehole storage) abgegrenzt werden.
duct storage (DTES) – 2. Bedeutung (2)	Bezeichnungen für vertikale, geschlossene Sonden, die in unverfestigtes Gestein eingeschlagen oder gespült werden.
borehole storage (BTES)	Häufig werden so offene Systeme bezeichnet, bei denen das Wärmeträgermittel im Bohrloch direkten Kontakt mit der Bohrlochwand hat.
Erdsondenspeicher(ung) (ESWSp)	Die deutsche Bezeichnung Erdsondenspeicher steht i.A. für Speicher, bei denen ein geschlossenes Rohrleitungssystem in eine größere Anzahl Bohrlöcher eingebracht wird. Wird aber teilweise auch als Oberbegriff für alle Systeme mit vertikalen Erdreichwärmetauschern synonym zum englischen Begriff „duct (1)“ verwendet.
Bohrlochspeicher(ung)	Meist werden darunter offene Systeme verstanden, bei denen das Wärmeträgermittel in Bohrlöchern in direktem Kontakt mit der Bohrlochwand zirkuliert. Seltener aber auch für alle Systeme verwendet, bei denen (im Festgestein) gebohrt werden muß.

Tabelle 3-3: Erläuterung der in der englischen und deutschen Fachliteratur verwendeten Bezeichnungen für Speicher mit vertikalen Erdreichwärmetauschern (vgl. auch Abbildung 3-5).

Bei der Benennung der Techniken lassen sich zwei Trends erkennen:

1. Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen Systemen.
2. Unterscheidung zwischen Systemen im Fest- oder Lockergestein, bzw. nach der Technik der Sonden- einbringung (Bohren oder Einpressen /-spülen).

In dieser Arbeit wird eine Benennung nach der gängigeren Variante 1 angewendet. Dabei wird unterschieden zwischen:

Erdsondenwärmespeicherung (ESWSp): Bezeichnung für alle Systeme, bei denen eine vertikale, geschlossene Sonde in den Untergrund eingebracht wird, unabhängig davon, ob dies im Locker- oder Festgestein geschieht und wie die Sonde eingebracht wird.

Bohrlochspeicherung: Bezeichnung für alle offenen Systeme, bei denen das Wärmeträgermittel direkten Kontakt zur Bohrlochwand hat.

Mit Abbildung 3-5 werden die hier genannten Definitionen erläutert.

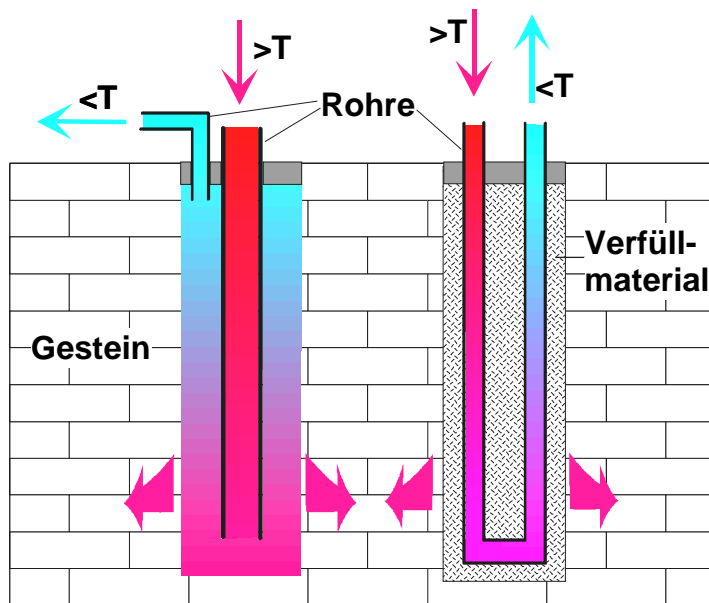


Abbildung 3-5: Vertikale Erdreichwärmetauscher. Links Bohrloch- rechts Erdsonde. Bei der Bohrlochspeicherung steigt das Wärmeträgermittel in direktem Kontakt mit der Bohrlochwand auf. Bei der ESWSp bewegt es sich in einem geschlossenen System.

3.1.1.5.1 Bohrlochspeicherung

Die Bohrlochspeicherung (offen, nach der oben angeführten Definition) hat einige wesentliche Vorteile gegenüber der Speicherung mit Erdsonden (geschlossen). Zunächst ist durch den direkten Kontakt zwischen Bohrlochwand und Wärmeträgermittel eine deutlich bessere Wärmeübertragung gewährleistet. Der Wärmeübertrag kann weiterhin noch verbessert werden, indem das bestehende Kluftnetz durch „hydraulic fracturing“ erweitert wird (NORDELL ET AL., 1986, 1988). Weiterhin sind die Kosten geringer, da auf das Sondenmaterial und die Verlegearbeit für die Sonden verzichtet werden kann. Der direkte Kontakt von Wärmeträgermittel und Gestein kann aber auch Probleme mit sich bringen. Bei offenen Klüften besteht das Risiko, daß Wärmeträgermittel verloren geht, zudem können, ähnlich wie bei der Aquiferspeicherung, hydrochemische Probleme auftreten (vgl. Kap. 3.1.1.4.3). Untersuchungen zur Bohrlochspeicherung liegen vor allem aus Schweden vor. Umfassende Beschreibungen der Technik und der Maßnahmen zur Verbesserung und Vermeidung von Problemen geben z.B. HELLSTRÖM (1991) und NORDELL (1994).

Eine sehr wesentliche Voraussetzung für die Bohrlochspeicherung sind geologische Bedingungen, die es erlauben, dauerhaft standfeste Bohrungen zu erstellen. Dazu geeignet sind vorrangig unverwitterte, wenig- oder nichtgeklüftete kristalline oder schwach metamorphe Gesteine, in Ausnahmefällen auch kompakte Se-

dimentgesteine. Entsprechende Formationen sind beispielsweise in Skandinavien häufig anzutreffen, was erklärt, warum diese Speichertechnik dort häufiger angewendet wird (ANDERSSON, 1994). In Mitteleuropa treten geeignete Gesteine dagegen nur selten auf. In den Kristallingebieten der Mittelgebirge ist das Festgestein meist von einer tiefgründigen Verwitterungszone bedeckt, zudem sind die Gesteine häufig stark zerrüttet. Letzteres trifft auch auf die Gesteine der sedimentären Abfolgen des Süddeutschen Schichtstufenlandes zu. Bei diesen ist zudem aufgrund von häufigen lithologischen Wechseln nicht zu erwarten, daß in einem Bohrloch größerer Tiefe überall gleichbleibend stabile Verhältnisse angetroffen werden. Im Untersuchungsgebiet existieren Gesteine, die sich für die Bohrlochspeicherung eignen würden, kaum. Die Bohrlochspeicherung ist damit in dem in dieser Studie betrachteten Gebiet eine wenig aussichtsreiche Speichertechnik. Hinzu kommt, daß aufgrund der bestehenden rechtlichen Voraussetzungen offene Systeme in Deutschland kaum genehmigungsfähig sind, insbesondere, wenn sie in potentiellen Kluftwasserleitern errichtet werden sollen.

3.1.1.5.2 Erdsondenspeicherung

Die ESWSp ist der Bohrlochspeicherung zwar wegen der geringeren Wärmeübertragungsleistung und der etwas höheren Kosten (Abbildung 3-13) unterlegen, allerdings ist sie aufgrund des geschlossenen Sondenkreislaufs in vielerlei Hinsicht wesentlich unproblematischer und damit universeller einsetzbar. Nach HELLSTRÖM (1996) werden heute fast ausschließlich geschlossene Systeme als vertikale Erdreichwärmetauscher zur Speicherung eingesetzt.

3.1.1.5.2.1 Speicheraufbau

Ein ESWSp besteht aus zahlreichen Bohrungen. Um eine optimale Speicherleistung zu erzielen ist es notwendig, die Sondenkonfiguration so zu wählen, daß die Speicherverluste (Kap. 3.1.3) gering bleiben und gleichzeitig die Be- und Entladeleistungen den Anforderungen des Gesamtsystems genügen. Die Verschaltung bzw. Reihenfolge und Anordnung der einzelnen Sonden ist dabei vorrangig eine technische- bzw. eine Kostenfrage. Der Sondenabstand wird dagegen durch die Beschaffenheit des Untergrundes festgelegt. Prinzipiell kann der Sondenabstand um so größer gewählt werden, je höher die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist. Damit sinkt die Anzahl der Bohrungen, die zur Erschließung des gewünschten Speichervolumens erforderlich ist.

Im Zusammenhang mit dem Speicheraufbau und dem Sondenabstand ist zu beachten, daß die Bohrlöcher für die Sonden niemals absolut senkrecht niedergebracht werden können. Ein Mindestabstand ist also einzuhalten, um eine Beschädigung bereits eingebrachter Sonden zu vermeiden. Dieser Mindestabstand ist von der Bohrtechnik, aber auch von den Gesteinseigenschaften abhängig. Untersuchungen im Zusammenhang mit der vertikalen Abweichung von Erdsondenbohrlöchern wurden beispielsweise von WERNER ET AL. (1996) vorgestellt. Mit allgemeinen Fragen zur Sondenkonfiguration befassen sich z.B. SEIWALD & HAHNE (1994; bzw. SEIWALD ET AL., 1994), NORDELL (1994) und BÜTTNER ET AL. (1998).

3.1.1.5.2.2 Geologische Voraussetzungen

Die Anforderungen, die von Erdsondenwärmespeicher an den Untergrund gestellt werden, sind bei weitem nicht so hoch wie die der Aquiferspeicherung (Kap. 3.1.1.4.2). ESWSp sind deshalb in sehr vielen Gesteinen bzw. unter vielen geologischen Bedingungen prinzipiell realisierbar. Es bestehen allerdings deutliche Abstufungen der Eignung nach wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten. Wesentliche Voraussetzung für die Erdsondenwärmespeicherung sind eine gute Bohrbarkeit des Gesteins und geringe Grundwasserfließbewegungen, damit kein konvektiver Abtransport von Wärme stattfinden kann. Deshalb sind geringdurchlässige, homogene, kompakte und gut verfestigte Gesteinseinheiten besonders geeignet. In gut durchlässigen Gesteinen ist die Speicherung nur bei extrem geringen hydraulischen Gradienten möglich. Die Anwesenheit von Grundwasser (gesättigte Verhältnisse) verbessert die thermischen Eigenschaften, insbeson-

dere durch eine Erhöhung der volumetrischen Wärmekapazität und verringert das Risiko von Austrocknung im Sondenbereich (Kap. 2.3.2.3.1)

Als Beispiele für geologische Einheiten, in denen Speicher mit Erdsonden nicht errichtet werden können, sind Aquifere mit hoher natürlicher Grundwasserfließgeschwindigkeit und hohem Volumendurchsatz, extrem trockene, grobkörnige Lockergesteine mit schlechten thermischen Eigenschaften, schlecht bohrbare Gesteine (geringe Standfestigkeit) und stark verkarstete Gesteine (Hinterfüllung der Sonden, Bohrbarkeit) zu nennen.

Der Einfluß verschiedener Untergrundparameter auf das Verhalten von ESWSp wird in Kap. 3.1.4 diskutiert. Übersichten zu den Untergrundvoraussetzungen für ESWSp geben z.B. ANDERSSON ET AL. (1997), KLUGESCHIED (1997); SANNER & KNOBLICH (1993, 1994) und WERNER (1990). Die wesentlichen geologischen Voraussetzungen sind in Tabelle 3-4 zusammengefaßt. Es ist anzumerken, daß einige der dort genannten Parameter nicht unabhängig von anderen Systemkenngößen betrachtet werden können (vgl. Kap. 3.1.4). Die angegebenen Werte und Wertebereiche sind deshalb als grobe Anhaltspunkte zu verstehen.

Eigenschaft	Günstige Werte	Erläuterung	Bedeutung
Geometrie des Speicherhorizontes			
Der Speicherhorizont kann bei der ESWSp mehrere geologische Einheiten bzw. Bereiche unterschiedlicher geologisch-hydrogeologischer Eigenschaften umfassen. Die Angaben betreffen deshalb nicht einzelne Einheiten, sondern Schichtpakete.			
Mächtigkeit: M	M > 20m	Bei kleineren Mächtigkeiten sind ausreichend große Speichervolumina (vgl. Kap. 3.1.4.3.2) nur noch bei sehr ungünstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen zu realisieren.	hoch
Tiefenlage der Speicheroberkante: T	5m < T < 50m	Bei geringerem Abstand zur Oberfläche wird der Speicher durch saisonale Temperaturschwankungen beeinträchtigt, bei größeren Tiefen wachsen die Bohrkosten enorm an.	hoch
Hydraulische Eigenschaften			
Sättigungsgrad: S _r	hoch	In der ungesättigten Zone ist eine hohe Sättigung wünschenswert, da sie die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit erhöht. Zu beachten ist auch das Austrocknungsrisiko (vgl. Kap. 2.3.2.3).	sehr hoch
Gesamtporosität: n	hoch / verschieden	Hohe Gesamtporositäten erlauben hohe Wassergehalte und damit hohe spezifische Wärmekapazitäten. Einfluß abhängig von der effektiven Porosität.	gering
Effektive Porosität / Kluftvolumen: n _e	klein	Je geringer die effektive Porosität, desto geringer die Permeabilität (siehe dort und Abbildung 2-12). Bei ungesättigten Verhältnissen kommt es bei hoher effektiver Porosität leichter zu Feuchtemigration und Austrocknung.	hoch
Permeabilität (Gebirgsdurchlässigkeit): k _f	k _f < 1 * 10 ⁻⁵ m/s	Permeabilität und hydraulischer Gradient bestimmen bei gesättigten Verhältnissen, ob im Speicherbereich Grundwasserfließbewegungen stattfinden können, durch die es zu Wärmeverlusten kommt. Bei ungesättigten Verhältnissen kommt es bei hoher Permeabilität leichter zu Feuchtemigration und Austrocknung.	sehr hoch
Homogenität, Isotropie	hoch	Eine homogene, in alle Richtungen gleiche Verteilung der Eigenschaften ist günstig, aber nicht grundsätzlich Voraussetzung.	mittel
Hydraulischer Gradient (nur bei gesättigten Verhältnissen relevant)		In Abhängigkeit vom k _f -Wert und der nutzbaren Porosität (siehe dort) sollte der hydraulische Gradient so gering sein, daß sich keine Grundwasserfließgeschwindigkeiten größer als ca. 5-10m/a ergeben, da ansonsten die eingebrachte Wärme mit dem natürlichen Grundwasserstrom abtransportiert wird und nicht mehr zurückgewonnen werden kann.	hoch
Tabelle 3-4: Fortsetzung nächste Seite			

Eigenschaft	Günstige Werte	Erläuterung	Bedeutung
Thermische Eigenschaften der Gesteinsmatrix			
Wärmeleitfähigkeit: λ	$1 > \lambda > 4$ [W/(m/K)]	Die Wärmeleitfähigkeit sollte hoch genug sein, um eine ausreichende Wärmeübertragungsleistung zuzulassen aber nicht zu hoch, um Verluste nach außen gering zu halten. Insgesamt ist dieser Parameter stark von der Konfiguration des Gesamtsystems abhängig und kann deshalb nicht eindeutig bewertet werden (vgl. Kap. 3.1.4.2.1).	mittel bis hoch
volumetrische Wärmekapazität	$\rho c > 2$ [MJ/(m ³ K)]	Für eine hohe Speicherkapazität ist eine möglichst hohe volumetrische Wärmekapazität ausschlaggebend (vgl. z.B. Abbildung 3-11)	hoch
Hydrochemie			
pH-Wert, Eh, Leitfähigkeit / Gesamtmineralisation		Lösungs- und Ausfällungserscheinungen durch die Temperaturänderungen sind im Sondenbereich möglich. Sie werden in den meisten Fällen aber keine, in manchen Fällen sogar günstige (Herabsetzung der Durchlässigkeit, Verbesserung der thermischen Anbindung) Auswirkungen haben.	gering
Geotechnik			
Bohrbarkeit	gut	Kostenfaktor, Einbringen der Sonden.	hoch
Klüftigkeit	gering	Hohe Kluftdichten verringern die Stabilität des Gesteins und erschweren das Einbringen der Sonden. Große Kluftvolumina können das vollständige Verfüllen der Sonde unmöglich machen. Im gesättigten Bereich verstärktes Risiko von konvektiven Wärmeverlusten. Klüftige Bereiche können u.U. durch Verpressen abgedichtet werden (vgl. z.B. EUGSTER ET AL. (1997)).	hoch
Verkarstung	gering	Wie Klüftigkeit, teilweise aber extremere Konsequenzen.	hoch

Tabelle 3-4 (Fortsetzung): Untergrundvoraussetzungen für die Erdsondenwärmespeicherung. Es gilt, wie für die Aquiferwärmespeicherung (vgl. Tabelle 3-2), daß exakte Wertebereiche nicht angegeben werden können.

3.1.2 Kenngrößen von Untergrundwärmespeichern

In Kap. 2.1 wurden die wesentlichen Eigenschaften von Wärmespeichern bereits kurz vorgestellt. Für Untergrundspeicher, wie sie in dieser Untersuchung betrachtet werden, gelten teilweise etwas abweichende Voraussetzungen:

Speicherkapazität: Der Wärmeinhalt Q [J] eines Wärmespeichers mit dem Volumen V [m³] kann vereinfacht angegeben werden als

$$Q = \rho c V (T_{\max} - T_{\min}) \quad \text{Gleichung 3-1}$$

wobei T_{\max} die Temperatur nach dem Beladen, T_{\min} die Temperatur nach dem Entladen ist. Bei Untergrundspeichern im engeren Sinn, also Aquifer- und Erdsondenwärmespeicher, ist eine Bestimmung des Wärmeinhalts nach Gleichung 3-1 nicht ohne weiteres möglich, da das Volumen nicht eindeutig begrenzt ist und die minimalen und maximalen Temperaturen über das ganze Speichervolumen variabel sind. Die Eingangsgrößen von Gleichung 3-1 müssen deshalb für Untergrundspeicher neu definiert werden (s.u.).

Das **Speichervolumen** eines Untergrundspeichers kann nicht exakt bestimmt werden, da eine Begrenzung im eigentlichen Sinn ja nicht vorliegt. Die von einer künstlichen Temperaturänderung (Speicherung) hervorgerufene Temperaturanomale klingt abhängig vom Temperaturgradienten und der Wärmeleitfähigkeit λ nach außen ab (Gleichung 2-15). Zudem wird ein stationärer Zustand nicht erreicht. Für Erdsondenspeicher kann als Begrenzung die Isotherme, die eine Temperatur von $1/e$ der mittleren Speichertemperatur kennzeichnet oder eine Grenzlinie, die etwa den 0,5-fachen Sondenabstand zu den jeweils außen gelegenen Sonden hat, festgesetzt werden. Bei Aquiferspeichern ist die Angabe des Volumens noch schwieriger, da bei der Ausbreitung einer Temperaturanomale im Grundwasser auch Dispersions- und Diffusionseffekte zu beachten sind.

Speichertemperaturen: Zur Charakterisierung von Speichern wird häufig die minimale Speichertemperatur T_{\min} und die maximale Speichertemperatur T_{\max} angegeben. Für verschiedene Betrachtungen ist darüberhinaus die mittlere Speichertemperatur T_m von Interesse. Grundsätzlich kann keine dieser Größen für Unterspeicher genau angegeben werden, da die Temperaturverteilung über den Speicherbereich inhomogen und zudem zeitlich variabel ist, so daß bestenfalls eine mittlere maximale und eine mittlere minimale Temperatur angegeben werden können. Die korrekte Angabe einer mittleren Speichertemperatur ist wiederum problematisch, da sich die Ausdehnung des Speichers nicht exakt ermitteln läßt (s.o.). Aus diesem Grund werden als T_{\max} häufig die maximale **Entnahmetemperatur** zu Beginn des Entladezeitraums und T_{\min} als minimale Entnahmetemperatur am Ende des Entladezeitraums angegeben. Als T_{\max} wird aber teilweise auch die mittlere oder maximale **Einleitungstemperatur** bezeichnet. Insgesamt ist leider festzustellen, daß bei Temperaturangaben in der Fachliteratur oft nicht klar ist, was sie letztlich bedeuten und an welchem Punkt des Systems sie zu welchem Zeitpunkt gemessen wurden.

Eine wichtige Größe ist in diesem Zusammenhang auch die **minimal nutzbare Temperatur**, also diejenige, unterhalb derer dem Speicher keine Energie mehr (wirtschaftlich) entnommen werden kann. Sie ist vor allem zur Bestimmung des Nutzungsgrades des Speichers von Interesse. Nach HADORN ET AL. (1989) wird diese Größe oft willkürlich tief angesetzt, woraus ungerechtfertigt hohe Wirkungsgrade abgeleitet werden. Da bei der Unterspeicherung häufig Wärmepumpen eingesetzt werden, läßt sich das nutzbare Temperaturniveau scheinbar sehr tief drücken. Jedoch sinkt dabei die Leistungszahl der Wärmepumpe zunehmend, der ökologische Nutzen des Systems wird fraglich (vgl. Kap. 2.2.1.5).

Die **Be- und Entladeleistung** bestimmen, wieviel Energie einem Speicher pro Zeiteinheit zugeführt werden kann. Entscheidend sind hierfür die Eigenschaften des Wärmetransportmediums und die Wärmeübertragungsleistung zwischen Transport- und Speichermedium. Eine besondere Bedeutung kommt in dieser Hinsicht dem Füllmaterial bei der ESWSp zu (HELLSTRÖM, 1996; BÜTTNER ET AL. 2000; DRACH ET AL., 2000).

Wichtig zur Charakterisierung eines Speichers ist auch die **Speicherdauer**. Je nach Einsatzzweck sind Speicher zur Kurzzeitspeicherung und Langzeitspeicherung von Wärme und Kälte denkbar. Da im Untergrund nur geringe Be- und Entladeleistungen realisierbar sind, kommen hier eigentlich nur saisonale Langzeitwärmespeicher in Betracht.

3.1.3 Speicherverluste und Speicherwirkungsgrad

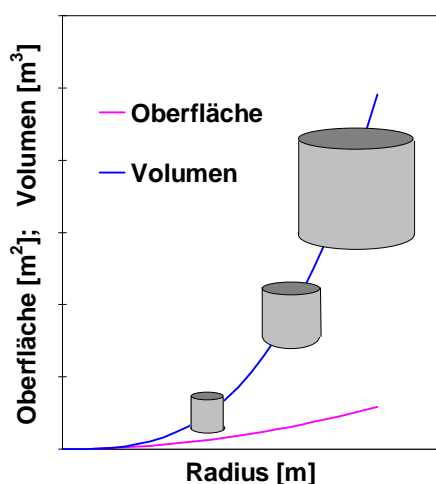


Abbildung 3-6: Oberfläche und Volumen als Funktion des Durchmessers bei einem zylinderförmigen Speicher.

Bei der Speicherung sensibler Wärme entstehen immer Speicherverluste durch den Wärmefluß aus dem Speichervolumen in die relativ kälteren Speicheraußenbereiche. Der Speicherwirkungsgrad kann als Verhältnis der eingespeicherten Energiemenge zur nutzbaren¹⁶ ausgespeicherten Energiemenge angegeben werden. Die Speicherverluste steigen mit der Speicherdauer an. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Verluste ist die Verwendung von Isolationsmaterialien, die den Wärmefluß hemmen. Im Untergrund ist dies allerdings häufig nicht möglich. Grundsätzlich gilt, daß die Speicherverluste bei großen Speichern geringer ausfallen als bei kleinen, da der Wärmefluß proportional zur Speicher Oberfläche ist. Die Oberfläche wächst aber bei einer sinnvollen (vgl. Kap. 3.1.4.3.2) Vergrößerung des Speichers langsamer an als das Volumen (Abbildung 3-6).

Die Höhe der Speicherverluste stellt ein gutes Mittel zu Charakteri-

¹⁶ Der Begriff „nutzbar“ deutet bereits an, daß diese Größe nicht allein von dem Speicher selbst, sondern auch vom Verwendungszweck der gespeicherten Wärme abhängig ist.

sierung und Bewertung von Speichern dar. Von besonderem Interesse im Bezug auf die Bewertung von Standorten sind deshalb diejenigen Einflußfaktoren, die die Höhe der Verluste bestimmen. Speicherverluste, wie sie im Folgenden beschrieben werden, verstehen sich dabei als Verluste im Untergrund. Leitungsverluste im obertägigen Bereich oder Umwandlungsverluste an Wärmetauschern und Wärmepumpen werden hier nicht berücksichtigt.

Die Verluste eines Wärmespeichers E_v [J] lassen sich nach FISCH & KÜBLER (1991) berechnen:

$$E_v = k * F_{sp} (T_{Sp} - T_a) \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Mit: T_{Sp} = mittlere Speichertemperatur [°C]
 T_a = Temperatur außerhalb des Speichers [°C]
 F_{sp} = Speicheroberfläche [m²]
 λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
 s = Dicke der Isolationsschicht [m]
 k = Wärmedurchgangskoeffizient des Isolationsmaterials mit $k = \lambda/s$

Bei den Untergrundspeicherverfahren ist Gleichung 3-2 nur auf Speichertanks und Beckenspeicher anzuwenden, nicht aber auf Erdsonden- und Aquiferspeicher, wo weder eine Isolationsschicht definierter Stärke vorliegt noch die Speicheroberfläche exakt angegeben werden kann. Es ist aber auch hier sofort ersichtlich, daß die Speicherverluste direkt proportional zur Oberfläche des Speichers sind, woraus gefolgert werden kann, daß Speicher mit kleinem Oberflächen/Volumenverhältnis besonders günstig sind. Speicherverluste sind deshalb i.A. bei großen Speichern geringer. Die Größe der Oberfläche wird über die Speichergeometrie und die Ausbildung (Form) der Oberfläche gesteuert. Ungünstig sind Speicher mit extremem Breite/Höhe-Verhältnis oder unregelmäßig geformter Oberfläche (siehe dazu Kap. 3.1.3.1 und 3.1.4.3.2)

Der Speicherwirkungsgrad η kann nach:

$$\eta = \frac{E_{aus}}{E_{ein}} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

angegeben werden, die Speicherverluste nach:

$$E_v = E_{ein} - E_{aus} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

Wobei E_{ein} und E_{aus} [J] die in den Speicher eingebrachten bzw. wiedergewonnene Energiemenge bezeichnen, E_v entsprechend den Energieverlust.

Nach HADORN ET AL. (1989) ist diese Angabe für saisonale Untergrundspeicher allerdings wenig sinnvoll, da die Größe E_{aus} vor allem bei der Verwendung von Wärmepumpen fast beliebig nach oben gedrückt werden kann (s.o.). Eine bessere Beschreibung des Wirkungsgrades eines Speichers gibt deshalb nach KUCHENBROD (1996) der Exergiewirkungsgrad, der wie folgt angegeben werden kann:

$$E_{ex,aus} = E_{aus} \left(1 - \frac{T_0}{T_{aus}} \right) \quad E_{ex,ein} = E_{aus} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ein}} \right) \quad \text{Gleichung 3-5a,b}$$

$$\xi = \frac{E_{ex,aus}}{E_{ex,ein}} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

T_0 bezeichnet die ungestörte Umgebungstemperatur, T_{ein} und T_{aus} die Temperatur mit der in den Speicher eingeleitet bzw. wiedergewonnen wird. Der Exergiewirkungsgrad beinhaltet nur den tatsächlich nutzbaren Anteil der Energie, der in Arbeit umgewandelt werden kann (Kap. 2.1).

3.1.3.1 Speicherverluste durch Konvektion

Speicherverluste durch die natürliche Fließbewegung des Grundwassers sind besonders bei der Aquiferspeicherung zu beachten. Erdsondenwärmespeicher werden vorwiegend in geringdurchlässigen Gesteinen errichtet, wo keine starke Konvektion stattfinden kann. Grundsätzlich gilt aber auch für die ESWSp, daß Grundwasserfließbewegungen im Speicherbereich (auch partiell) zu konvektiven Wärmeverlusten führen. In diesem Fall gelten die hier für die Aquiferspeicherung gemachten Angaben gleichermaßen.

Die maßgeblichen konvektiven Verluste bei der Aquiferspeicherung ergeben sich durch den natürlichen Grundwasserfluß, der die eingespeicherte Wärme abtransportieren kann (vgl. Tabelle 3-2). Dabei ist zu beachten, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturanomale kleiner ist als die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers (Kap. 2.3.2.1.2). Bedeutsam sind auch Grundwasserbewegungen, die durch temperaturbedingte Dichteunterschiede hervorgerufen werden („free convection“, vgl. Kap 2.3.2.1.2). Sie können dazu führen, daß die thermischen Front, also die laterale Begrenzung der Temperaturanomale, zusammenbricht und es zu einer ungewollten starken Vermischung mit kaltem Grundwasser kommt. Dadurch wird die effektive Speicheroberfläche vergrößert und die Verluste wachsen stark an. Arbeiten, die sich mit diesem Themenkreis befassen, wurden von ABERG (1983), ALLEN (1997), HELLSTRÖM ET AL. (1979) und PROBERT ET AL. (1997) vorgestellt. Bei Aquiferspeichern ist zudem zu beachten, daß es bei sehr stark variierenden Durchlässigkeiten in einzelnen Horizonten zu einer unregelmäßigen Ausbildung der thermischen Front und damit zu einer unerwünschten Vergrößerung der Oberfläche kommen kann. Bei Aquiferspeichern, die, wie es bei den meisten Anlagen der Fall ist, im Doublettenbetrieb operieren (vgl. Abbildung 3-2) sind zudem Verluste durch den sogenannten „thermal breakthrough“ zu befürchten, wenn Förder- und Reinjektionsbohrung zu nah beieinander stehen und sich kaltes und warmes Wasser mischen.

Ein einfaches Modell zur Berechnung der Energieverluste bei Aquiferspeichern für bewegtes und unbewegtes Grundwasser stellt HADORN (1994) vor. Danach kann der Verlust E_v [J] nach:

$$E_v = \underbrace{F_{sp} t \lambda_e \nabla T}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{n_e F_{sp} t c_w v_a (T_m - T_0)}_{\text{Konvektion}} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

angegeben werden, wobei F_{sp} die Speicheroberfläche, t die Speicherdauer, F die Speicherquerschnittsfläche senkrecht zur Grundwasserfließrichtung und v_a die Abstandsgeschwindigkeit in einem GW-Leiter mit der effektiven Porosität n_e ist. Die mittlere Speichertemperatur T_m wird als $T_m = (T_{max} - T_{min})/2$ berechnet. Der zeitabhängige Gradient ∇T ($\partial T / \partial t$) wird durch die Näherung:

$$\nabla T = \frac{T_m - T_0}{d} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

ausgedrückt. d ist hier die Distanz zwischen der Speicheroberfläche mit der Temperatur T_m und der ungestörten Temperatur T_0 . Im Konvektionsterm von Gleichung 3-7 ist die Abstandsgeschwindigkeit v_a , die bei Aquiferen in einer Bandbreite von mehreren Größenordnungen variieren kann, die bestimmende Größe. Damit sind die Speicherverluste im bewegten Grundwasser vorrangig von den hydraulischen Parametern abhängig.

In der Praxis wird es zur Bestimmung der Verluste aber notwendig sein, auf deutlich aufwendigere numerische Modelle zurückzugreifen, die den raumzeitlichen Verlauf des Wärme- und Grundwassertransportes exakter beschreiben (z.B. BREHM, 1989).

3.1.3.2 Speicherverluste durch Wärmeleitung

Verluste durch Wärmeleitung sind vor allem bei der ESWSp zu beachten. Gleichung 3-7 macht deutlich, daß die Energieverluste im Wärmeleitungsterm im Wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit des Speichersteins abhängig sind. Für Verhältnisse im Untergrund, wo das Speichermaterial mit dem Material der Spei-

cherumgebung identisch ist, ergibt sich der Wärmestrom $q \cdot A$ [W] durch Wärmeleitung an der Oberfläche einer Kugel nach HELLSTRÖM (1996) zu:

$$qA = \lambda \cdot (T_m - T_0) \cdot \left(4\pi R + \frac{4\pi R^2}{\sqrt{\pi \alpha t}} \right) \tag{Gleichung 3-9}$$

- q = Wärmeflußdichte [W/m^2]
- A = Oberfläche [m^2]
- T_m = mittlere Speichertemperatur [K]
- T_0 = ungestörte Untergrundtemperatur [K]
- R = Radius [m]
- α = Temperaturleitfähigkeit [m^2/s]
- t = Zeit [s]

Für vereinfachte Annahmen können die Energieverluste eines Speichers und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Parametern anhand von Gleichung 3-9 abgeschätzt werden. Die Ergebnisse zeigen die Abbildung 3-7 bis Abbildung 3-9. Die Randbedingungen der Berechnung sind den Abbildungen zu entnehmen.

Zunächst ist offensichtlich, daß die Speicherverluste mit steigendem Speichervolumen abnehmen (Abbildung 3-7); die Verluste sind proportional zu $1/R^2$. Bei einer Variation der thermischen Parameter λ und ρc innerhalb der im Untergrund auftretenden Wertebandbreite zeigt sich, daß eine relativ starke Abhängigkeit der Verluste von der Wärmeleitfähigkeit besteht (Abbildung 3-8). Dabei wird berücksichtigt, daß eine Variation der Wärmeleitfähigkeit im Bereich 1 bis 6 W/(mK) sich aufgrund der in Kap. 2.3.2.2.3 dargestellten Zusammenhänge nicht bei konstanter Wärmekapazität vollziehen kann. Sie wird deshalb entsprechend variiert, wie in Abbildung 3-10 gezeigt. Da sich bei verschiedenen Gesteinen unterschiedliche Abhängigkeiten von ρc und λ ergeben, wird hier von einem Sandstein mit variablem Porenvolumen ausgegangen, der je nach Wassersättigungsgrad unterschiedliche thermische Parameter annehmen kann. Die Variation der volumetrischen Wärmekapazität hat einen vergleichsweise geringeren Einfluß auf die Verluste (Abbildung 3-9).

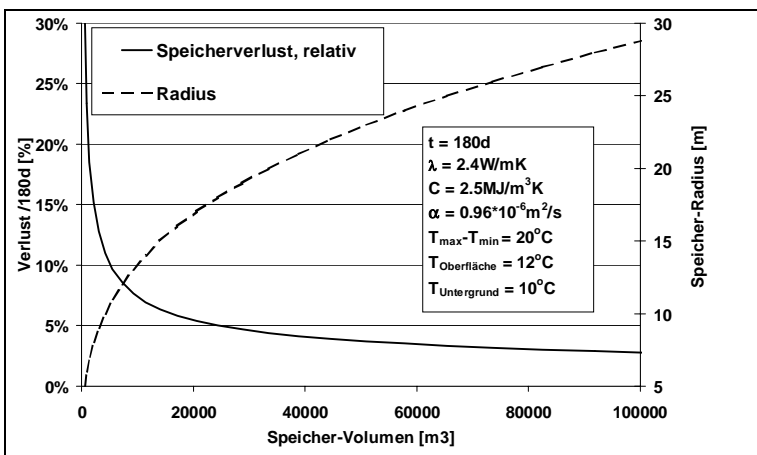


Abbildung 3-7: Relativer Speicherverlust durch Wärmeleitung in Abhängigkeit vom Speichervolumen für einen kugelförmigen Speicher. Berechnet nach Gleichung 3-9 (HELLSTRÖM, 1996) für die angegebenen Randbedingungen.

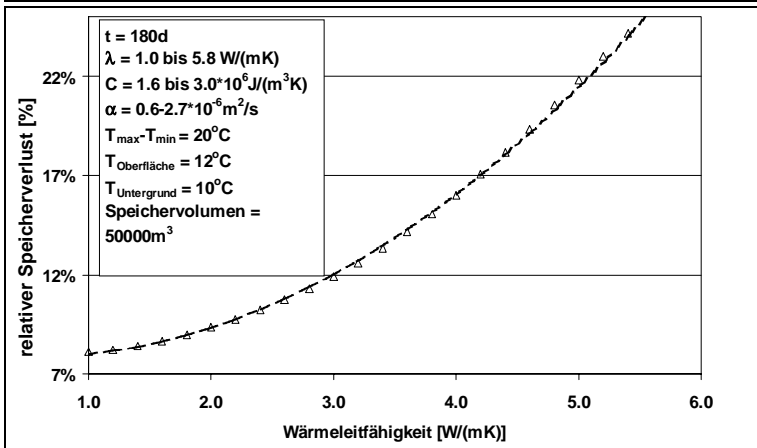


Abbildung 3-8: Relativer Speicherverlust durch Wärmeleitung in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Speichergesteins für einen kugelförmigen Speicher. Berechnet nach Gleichung 3-9 für die angegebenen Randbedingungen.

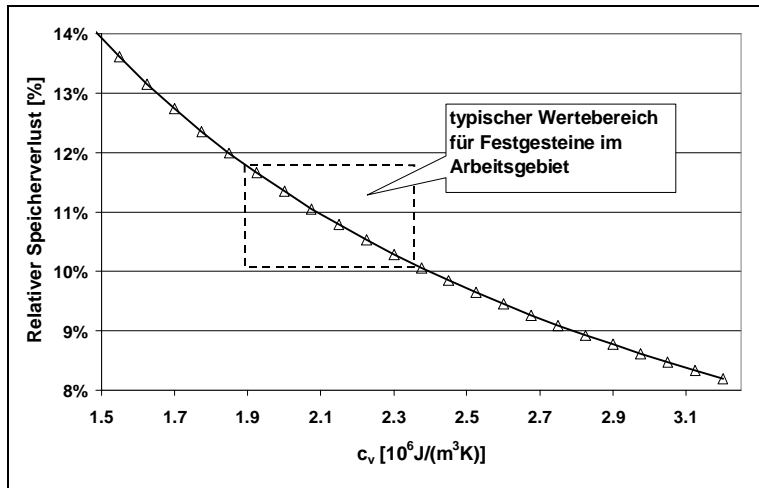


Abbildung 3-9: Relativer Speicherverlust durch Wärmeleitung in Abhängigkeit von der volumetrischen Wärmekapazität des Speichergesteins für einen kugelförmigen Speicher. Berechnet nach Gleichung 3-9 für die angegebenen Randbedingungen.

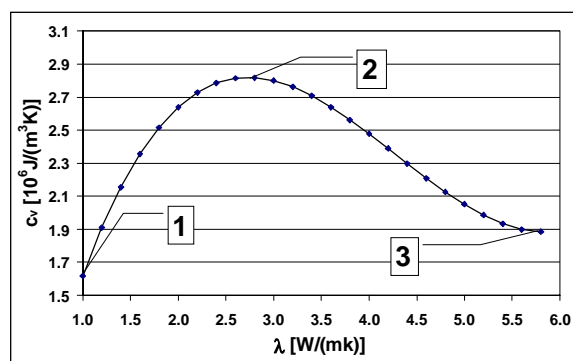


Abbildung 3-10: Für die Berechnung der in Abbildung 3-8 dargestellten Zusammenhänge verwendete Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Porosität n und dem Sättigungsgrad S_r .

- 1: n maximal; $S_r=0$
- 2: n maximal; $S_r=1$
- 3: $n \rightarrow 0$

3.1.4 Einfluß von Systemparametern auf das Verhalten von Erdsondenwärmespeichern

Da das Ziel der vorliegenden Untersuchung vorwiegend darin besteht Standorte bzw. Bereiche festzustellen, die für den Einsatz von Verfahren der thermische Nutzung des Untergrundes geeignet sind, müssen Kriterien aufgestellt werden, anhand derer die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsraum bewertet werden können. Die Definition solcher Kriterien erfordert die genaue Kenntnis aller Einflußfaktoren, die sich auf das Verhalten bzw. auf die Effizienz einer solchen Anlage auswirken. Es muß weiterhin bekannt sein, wie hoch der Einfluß dieser Faktoren ist und wie sie sich gegebenenfalls wechselseitig beeinflussen. Eine ausführliche Diskussion der Bewertungsmechanismen erfolgt in Kap. 6.4.

3.1.4.1 Grundlegende Überlegungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, daß bei der Beurteilung eines Speichers unterschiedliche Faktoren eine Rolle spielen. Dies sind zum einen geometrische Faktoren, die vom Speicherstandort nur indirekt abhängig sind¹⁷, zum anderen reine Untergrundfaktoren (z.B. Wärmeleitfähigkeit). Es wurden einfache Übersichtsverfahren vorgestellt, mit denen der Einfluß unterschiedlicher Parameter auf den Speicherwirkungsgrad ermittelt werden kann (z.B. Gleichung 3-9). Diese Gleichungen sind aber, wie es zunächst scheinen mag, nicht dazu geeignet Bewertungskriterien festzulegen, da sie nur für vereinfachte, meist stationäre Bedingungen gültig sind. Das kurz- und mittelfristige Verhalten des Gesamtsystems bleibt dabei unberücksichtigt. So ist es beispielsweise unzulässig, aus dem Ansteigen der Speicherverluste bei Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Abbildung 3-8 zu schließen, daß eine hohe Wärmeleitfähigkeit generell eine ungünstige Untergrundeigenschaft darstellt. Da eine hohe Wärmeleitfähigkeit gleichzeitig die möglichen Be- und Entladeleistungen (Wärmeübertragung Sonde→ Speicher) verbessert, kann gefolgert werden, daß es zwischen extrem hohen und extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten ein Optimum geben muß.

¹⁷ Z.B. Speichervolumen, vgl. dazu auch Kap. 6.4.2.2.1; Tabelle 6-1 und Abbildung 3-6.

Verlässliche Aussagen zur Lage dieser Optimums könnten aus den Erfahrungen der in der Literatur beschriebenen Anlagen abgeleitet werden, indem man die dort angetroffenen Wärmeleitfähigkeiten (oder andere Parameter) und die Anlagenleistung in Beziehung setzt. Hierbei stellt sich allerdings das Problem, daß es insgesamt zu wenige miteinander vergleichbare Speicherprojekte gibt (vgl. Kap. 6.4.3.1). Als einzige und häufig angewendete Methode zur Ermittlung der optimalen Wertebereiche bleiben deshalb Parameter- oder Sensitivitätsanalysen, bei denen der Einfluß von verschiedenen Systemgrößen auf das Endergebnis anhand von Modellrechnungen bestimmt wird. Ziel- oder Vergleichsgrößen (vgl. Kap. 6.4.2.1) sind dabei der Wiedergewinnungsgrad, der Systemwirkungsgrad oder andere projektspezifische Kenngrößen (z.B. der solare Deckungsgrad bei Anlagen mit Solarkollektoren und saisonaler Speicherung, SEIWALD & HAHNE, 1994; FRANKE & HELLSTRÖM, 1997). Die zugrundeliegenden Modelle können je nach Zielsetzung in einfachen Überschlagsformeln, analytischen und numerischen Verfahren in 2- oder 3D bestehen.

Eine Software, die aussagekräftige Bewertungen verschiedener Systemgrößen eines Speichers zuläßt, stellt beispielsweise das Programmpaket TRNSYS (KLEIN ET AL., 1996) dar, für das auch ein Modul für Erdsondenspeicher (FRANKE & HELLSTRÖM, 1997) existiert. Programme wie TRNSYS sind allerdings ungeeignet, um allgemeingültige Kriterien für die Bewertung des Untergrundes an einem Standort oder einer ganzen Region zu ermitteln, da sie von einer festgelegten Systemkonfiguration ausgehen. Die Ergebnisse solcher Modellrechnungen sind deshalb projektspezifisch und nicht unbedingt zu verallgemeinern. Letztlich muß aus diesem Grund zur Bestimmung von Bewertungskriterien doch auf vereinfachte, standardisierten Berechnungsmethoden oder Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Im Folgenden werden kurz diejenigen Eigenschaften von Untergrundspeichern vorgestellt, die einen wesentlichen Einfluß auf das Systemverhalten besitzen. Die Betrachtungen erfolgen vorwiegend anhand von Erdsondenwärmespeichern.

3.1.4.2 Untergrundparameter

3.1.4.2.1 Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität

Verschiedene Autoren befassen sich in Modellrechnungen mit den Auswirkungen der thermischen Parameter auf das Systemverhalten von Speichern. Einige Ergebnisse werden hier im Vergleich vorgestellt:

Beispiel 1: Nach Berechnungsergebnissen von MAI ET AL. (1994) zeigt sich eine deutliche, nach mehreren Betriebsjahren annähernd lineare Abhängigkeit des Speicherwirkungsgrades von der Wärmeleitfähigkeit des Speichergesteins. Je höher die Wärmeleitfähigkeit, desto höher sind die **Speicherverluste** durch Wärmeleitung. Dies gilt allerdings offensichtlich nur dann, wenn nur der Speicher selbst, ohne die angeschlossenen Systemkomponenten (Verbraucher, Energiequelle) betrachtet wird.

Beispiel 2: SEIWALD & HAHNE (1994) konnten zeigen, daß der Einfluß der Wärmeleitfähigkeit bei der Betrachtung eines Gesamtsystems, bestehend aus Erdsondenspeicher und Solarkollektoren, insgesamt überraschend gering ist. Zwar treten im Untergrund bei höherer Wärmeleitfähigkeit größere Verluste an den Speicheraußenbereich auf, im Gegenzug verbessert sich durch die höheren Übertragungsleistungen von den Sonden in den Gesteinsspeicher das Betriebsverhalten der Gesamtanlage durch einen höheren Nutzungsgrad der Kollektoren. Der **solare Deckungsgrad**¹⁸, der in dieser Parameterstudie als Kontrollgröße verwendet wird, ändert sich bei einer Variation der Wärmeleitfähigkeit kaum, da sich positive und negative Aspekte annähernd aufheben. Die Erhöhung der Wärmekapazität führt nach diesen Autoren zu einer leichten, aber nicht wesentlichen Verbesserung des Systemverhaltens. Anzumerken ist hier, daß der solare Deckungsgrad nicht allein als Zielgröße dienen kann, da z.B. FRANKE & HELLSTRÖM (1997) zeigen können, daß bei einem ähnlichen System ab einem Deckungsgrad von ca. 85% die Kosten enorm steigen.

Beispiel 3: NORDELL (1994) verwendet als Bewertungszielgröße in seinem SMARTstore-Modell die jährlichen Speicherbetriebskosten, teilweise auch die Gesamt-Speicherbaukosten. Dabei stellt er fest, daß die

¹⁸ Anteil der Solarenergie am Gesamtenergieverbrauch einer Wohnanlage.

Speicherkosten bei steigender Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 2 bis $4\text{ W}/(\text{mK})$ stark sinken (um etwa 20%). Die Senkung der **Speicherkosten** ist dabei praktisch ausschließlich auf die verringerte Anzahl notwendiger Bohrungen zurückzuführen. Bei einer Erhöhung der volumetrischen Wärmekapazität von 1.8 auf $2.6\text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ sinken die Kosten linear um etwa 5%.

Beispiel 4: Für den Versuchsstandort Greußenheim bei Würzburg mit Nahwärmenetz, BHKW und ESWSp wurde von BÜTTNER ET AL. (1998) eine Variation der thermischen Parameter im Bereich von $\pm 50\%$ gegenüber den rechnerisch für den Speicherstandort ermittelten Werten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 3-11. Der dort ermittelte **Speichernutzungsgrad** η ist dabei auch stark von der Auslastung des BHKW und den Lastgang der Siedlung abhängig. Es zeigt sich, daß besonders günstige Verhältnisse bei niedriger Wärmeleitfähigkeit und hoher volumetrischer Wärmekapazität, besonders ungünstige bei hoher Wärmeleitfähigkeit und niedriger volumetrischer Wärmekapazität vorliegen. Dabei hat die Variation der Wärmekapazität einen größeren Einfluß, als die der Wärmeleitfähigkeit.

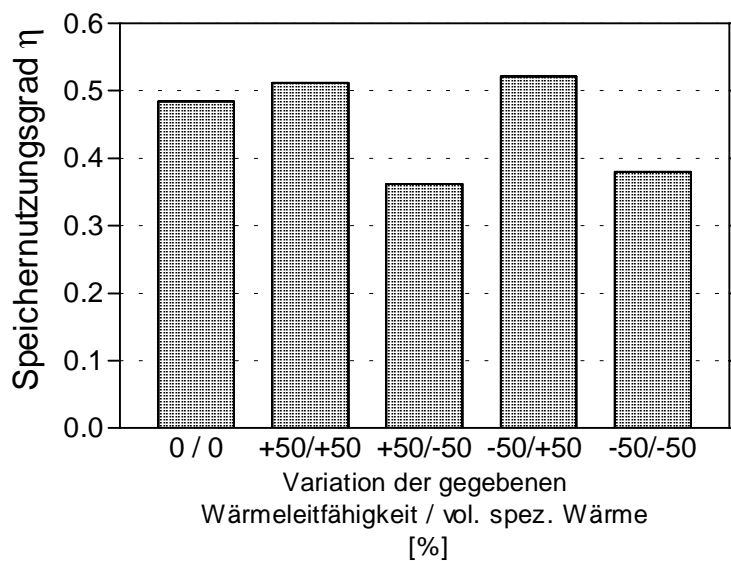


Abbildung 3-11: Einfluß der Variation von Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität auf den Speichernutzungsgrad am Standort Greußenheim. Der erste Balken (0/0) stellt den Speichernutzungsgrad für die für den Speicherstandort festgelegten mittleren thermischen Kenngrößen [(Wärmeleitfähigkeit = $2,4\text{ W}/(\text{mK})$; volumetrische Wärmekapazität = $2,3\text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$] dar. Aus BÜTTNER ET AL. (1998)

Die vier genannten Beispiele zeigen sehr verschiedene Ergebnisse, die auf unterschiedliche Bewertungszielgrößen (energetisch/ökologisch bzw. ökonomisch) und verschiedene Bewertungsgrenzen (Speicher allein bzw. Gesamtsystem) zurückzuführen sind (vgl. Kap. 6.4.2.2). Im Hinblick auf die Definition von Bewertungskriterien für den Untergrund sind die Ergebnisse der Studien unbefriedigend, da sie keine eindeutige Aussage bezüglich der Auswirkungen der thermischen Parameter auf das Gesamtsystem zulassen. Die Eignung eines Standortes zur Untergrundwärmespeicherung kann deshalb nicht ohne weiteres anhand der thermischen Eigenschaften des Untergrundes beurteilt werden. Es lassen sich jedoch einige Trends ableiten, die für die meisten Systeme Gültigkeit besitzen. In Tabelle 3-5 werden diese Trends zusammengefaßt.

Parameter	Vorteile	Nachteile	Auswirkung für den Speicher selbst (η)	Auswirkung auf das Gesamtsystem
hohe Wärmeleitfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Be- und Entladeleistungen möglich • weniger Bohrlöcher nötig (größerer Abstand möglich) 	Höhere Verluste durch Wärmeleitung in den Speicheraußenbereich	ungünstig	<ul style="list-style-type: none"> • annähernde Kompensation positiver und negativer Effekte • Kostensenkung • unterschiedlich, da projektspezifisch
extrem geringe Wärmeleitfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Verluste 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Be- und Entladeleistungen • viele Bohrungen notwendig 	günstig	ungünstig
hohe spezifische volumetrische Wärmekapazität	<ul style="list-style-type: none"> • geringeres Volumen erforderlich • Senkung der Bohrkosten 	keine	günstig	günstig

Tabelle 3-5: Positive und negative Auswirkungen der Parameter Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität auf die Untergrundwärmespeicherung (i.W. nach ANDERSSON ET AL., 1997; BÜTTNER ET AL. 1998; NORDELL, 1994; SANNER & KNOBLICH 1993; 1994 und SEIWALD & HAHNE, 1994). Da nicht alle Autoren in allen Punkten miteinander übereinstimmen, wurden nur Angaben über die Konsens besteht wiedergegeben.

3.1.4.2.2 Untergrundtemperatur

Je geringer der Temperaturgradient vom Speicherinnen- in den Speicheraußenbereich ist, desto kleiner sind nach Gleichung 3-7 die Verluste. Insofern ist bei einem Wärmespeicher eine hohe, bei einem Kältespeicher eine niedrige natürliche Untergrundtemperatur günstig. Da die Temperatur des flachen Untergrundes im Untersuchungsraum sehr stark mit der Jahresmitteltemperatur am Standort korreliert ist (Kap. 4.4.6), sind warme Standorte in tiefgelegenen Gebieten generell besser geeignet. Diese Feststellung verliert allerdings etwas an Bedeutung, wenn das Gesamtsystem unter Berücksichtigung des klimaabhängigen Wärmebedarfs betrachtet wird.

3.1.4.2.3 Hydrogeologische Parameter

Die Auswirkung von anderen als den thermischen Gesteinseigenschaften auf das Speicher- oder Systemverhalten bei ESWSp wurde offensichtlich bislang nur selten anhand von konkreten Modellrechnungen überprüft (vgl. z.B. KLUGESCHIED, 1997). Dies liegt sehr wahrscheinlich daran, daß die meisten bisher realisierten ESWSp in weitgehend undurchlässigen Gesteinen errichtet wurden, wo davon ausgegangen werden kann, daß die maßgeblichen thermischen Prozesse reine Wärmeleitungsvorgänge darstellen. Konvektive Prozesse spielen dort keine Rolle. Porosität und Permeabilität wirken sich allerdings indirekt auf die thermischen Parameter aus (Kap. 2.3.2.2.3). Bei hoch porösen und permeablen Gesteinen kann in der gesättigten Zone zu freier Konvektion (Kap. 2.3.2.1.2) und in der ungesättigten Zone zu Feuchtemigration und Austrocknung kommen (Kap. 2.3.2.3). Es liegen aber keine Daten vor, die belegen könnten, ab welchen Werten solche Phänomene auftreten und welche Konsequenzen sie haben. Demgegenüber können die Einflüsse einer vorhandenen natürlichen Grundwasserfließbewegung relativ einfach abgeschätzt werden (vgl. Kap. 3.1.3.1).

3.1.4.3 Systemparameter

3.1.4.3.1 Speichertemperatur (T_{\max} und T_{\min})

Die Größen „maximale“ und „minimale“ Speichertemperatur wurden in Kap. 3.1.2 vorgestellt und diskutiert. Es sind Größen, die projektspezifisch definiert werden und deshalb nicht standortbezogen „bewertbar“ sind. Es ist aber offensichtlich, daß eine Erhöhung der Speichertemperatur zu relativ höheren Speicherverlusten führen muß (Gleichung 3-2). Weitere mögliche Konsequenzen sind bei Hochtemperatur-Erdsondenwärmespeichern zu erwarten. Der Grund sind die in Kap. 2.3.2.3 diskutierten Feuchtemigrati-

erscheinungen, die zur Austrocknung im Sondennahbereich und zur Verringerung der Übertragungsleistung führen können. Nach SANNER & KNOBLICH (1990) sind bei der Hochtemperaturspeicherung Ausfällungen von Mineralphasen zu erwarten, die zum Schließen von Klüften und damit zu einer Verringerung der Permeabilität führen können, was bei ESWSp im Allgemeinen als Vorteil gelten kann.

Für die Belange der vorliegenden Untersuchung sind die Einflüsse des Systemparameters „Temperatur“ insofern von Bedeutung, als sich unterschiedliche Speichertemperaturen auf die Beurteilung von geologischen Einheiten bezüglich ihrer Eignung von Verfahren auswirken. So kann eine Einheit für die Niedertemperatur- oder Kältespeicherung geeignet, für die Hochtemperaturspeicherung aber ungeeignet sein (z.B. poröse, gut permeable Gesteine im ungesättigten Bereich; vgl. auch Kap. 6.4.2.2.1).

3.1.4.3.2 Speichergroße und -geometrie

Je größer ein Speicher ist, desto geringer sind die Verluste wegen des günstigeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses (vgl. Abbildung 3-6). In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluß der Speicher-geometrie und anderer baulicher Maßnahmen (Isolationsschichten an der Oberfläche) zu betrachten. Bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen (Radius zu Höhe) kann das Oberflächen-Volumenverhältnis unvorteilhafte Werte annehmen. Die geometrischen Eigenschaften von Untergrundspeichern werden häufig durch die Mächtigkeit der am Speicherstandort angetroffenen Schichten limitiert¹⁹. Der Einfluß von Speichergroße und Geometrie wirkt sich gleichermaßen auf Aquifer- und Erdsondenwärmespeicher aus. Modellrechnungen hierzu wurden z.B. von ANDERSSON & ESKILSON (1983) durchgeführt (vgl. Abbildung 3-12).

Die erforderliche Speichergroße wird durch den Energiebedarf bzw. die einzuspeichernde Energiemenge festgelegt. Speichergroße und -geometrie gehören zu den Parametern, die zwar projektspezifisch sind, aber durch die Untergrundbedingungen beeinflusst bzw. limitiert werden (vgl. dazu auch Tabelle 6-13 und Abbildung 8-6). Nach einer Studie von SEIWALD & HAHNE (1994) ist bei Tiefen-Durchmesser-Verhältnissen im Bereich von 0,5 bis 2 keine wesentliche Veränderung im Systemverhalten zu erwarten. Darunter oder darüber verschlechtert sich das Verhalten. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt NORDELL (1994).

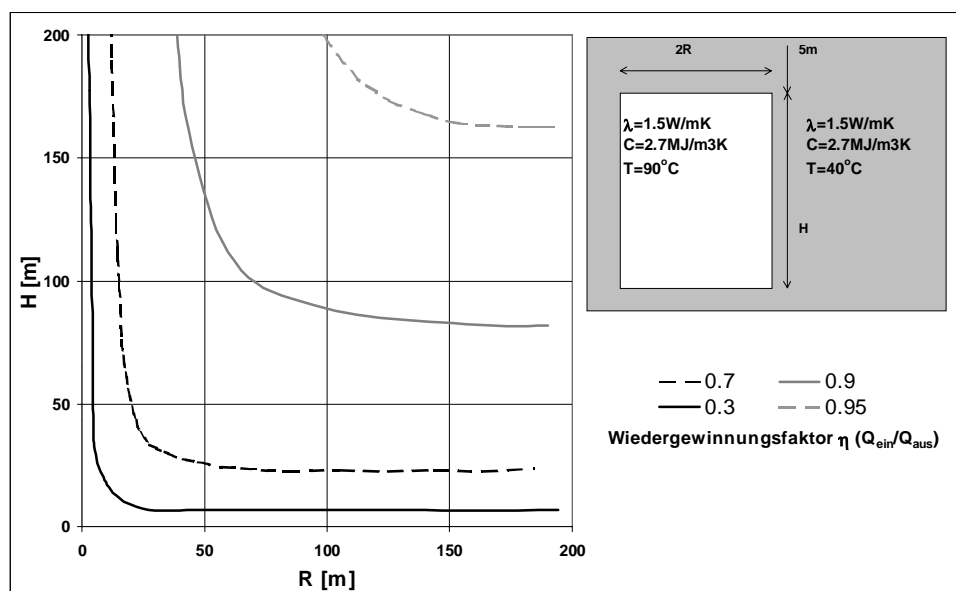


Abbildung 3-12: Wiedergewinnungsfaktor η ($Q_{\text{ein}}/Q_{\text{aus}}$) als Funktion der Speicher-geometrie (Radius, Höhe) und des Speichervolumens für Aquiferspeicher bei den angegebenen Untergrund- und Systemparametern. Umgerechnet und umgezeichnet nach ANDERSSON & ESKILSON (1983).

¹⁹ Vgl. dazu Kap. 6.4.2.2.1 und 8.2.1, Abbildung 6-11 und 8-6.

3.1.4.3.3 Sondenanzahl, -länge und -abstand

Der optimale Abstand der Sonden bei ESWSp ist i.W. abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Ungünstig ist es, wenn die Sonden sehr nah beieinander liegen, da dann die maximale Temperatur im Gestein, ab der eine wirtschaftliche Wärmeübertragung von den Sonden auf die Umgebung nicht mehr möglich ist, zu schnell erreicht ist. Bei zu weit voneinander entfernt liegende Sonden entstehen innerhalb des Speichers Bereiche, die nicht merklich erwärmt werden. Dadurch entstehen quasi Verluste innerhalb des Speichers, die mittlere Speichertemperatur bleibt gering. Besonders stark ist dieser Effekt während des ersten Speicherzyklus, in den folgenden Jahren nimmt er ab. Bei der Wahl des Sondenabstandes muß also auch die geplante Betriebsdauer einbezogen werden. Der Sondenabstand bestimmt gleichzeitig die Anzahl der Sonden, die notwendig ist, um ein bestimmtes Speichervolumen zu erzeugen. Anzahl (und Tiefe) der Sonden bestimmen im Wesentlichen die Baukosten eines ESWPS, so daß sich die wirtschaftlich sinnvollste Lösung nicht unbedingt als die energetisch optimale ergibt.

Um ein bestimmtes Speichervolumen bei einem optimal an die Untergrundverhältnisse angepaßten Sondenabstand zu erschließen, besteht prinzipiell die Wahl zwischen vielen Sonden geringer Tiefe und wenigen großer Tiefe. Dabei ist aus energetischer Sicht wiederum das Tiefen/Durchmesser Verhältnis zu beachten, das das Oberflächen-Volumenverhältnis bestimmt und deshalb nur in bestimmten Grenzen günstig ist (s.o.). Aus wirtschaftlicher Sicht ist hier bezüglich der Bohrkosten eine Abwägung zu treffen, die sich an den geologischen Verhältnissen orientieren muß. Kostenfaktoren sind die Tiefe selbst, aber auch das Umsetzen des Bohrgeräts (vgl. auch BÜTTNER et al., 1998 und NORDELL, 1994).

3.1.4.3.4 Sondentyp, Bohrlochradius, Verfüllmaterial

BÜTTNER ET AL. (2000) können zeigen, daß die Bauweise des vertikalen Erdreichwärmetauschers (Bohrloch, Sonde, Verfüllmaterial) einen deutlichen Einfluß auf das Systemverhalten eines ESWSp hat. Demgegenüber geben SANNER & REUß (2000) an, daß der Einfluß entsprechender Modifikationen an der Erdsonde kleiner als 10% ist. Da diese umfangreiche Themenkomplex nicht in direktem Zusammenhang mit dem Gegenstand dieser Untersuchung steht, wird auf die Untersuchungen von BÜTTNER ET AL. (2000) verwiesen, die neueste Erkenntnisse auf diesem Gebiet vorstellen. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß bei den bislang eingesetzten Verfüllmaterialien für Erdwärmesonden, die auch die hydraulischen und technischen Anforderungen erfüllen, selten Wärmeleitfähigkeiten von mehr als $1\text{W}/(\text{mK})$ erreicht werden. Damit liegt die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials praktisch immer deutlich unter der des umgebenden Gesteins.

3.1.4.4 Zusammenfassung

Als Ergebnis der Betrachtungen zum Einfluß unterschiedlicher Parameter (Untergrund und anlagenspezifisch) auf das Verhalten von Erdsondenwärmespeichern kann festgehalten werden, daß sich Untergrundfaktoren und anlagenspezifische Faktoren nicht getrennt voneinander betrachten lassen. Pauschale Angaben über die Bedeutung von Untergrundeigenschaften, die zur Herleitung von Bewertungskriterien geeignet sind, können nicht gemacht werden. Dieser Umstand hat bedeutende Konsequenzen für die GIS-basierten Bewertungen (vgl. Kap. 6.4).

3.1.5 Kosten von Untergrundspeichern

Über Kosten und Wirtschaftlichkeit von Untergrundspeichervorhaben sind in der Literatur eine Vielzahl von Angaben zu finden. Vergleichende Übersichten geben z.B. FISCH & KÜBLER (1991), SANNER (1992), SEIBT (1995) und SIA (1996). Die wohl umfassendste Darstellung geben BAKEMA ET AL. (1995) (vgl. Abbildung 3-13). Ausführungen zur aktuellen Kostensituation geben REUß ET AL. (1998). Demnach liegen die Baukosten für

ESWSp bei etwa 90-150DM/m³ (Wasseräquivalent²⁰). Es ist anzumerken, daß die Speicherbaukosten sehr stark von den individuellen Gegebenheiten am Standort abhängen. Zudem sind Marktentwicklungen zu berücksichtigen, so z.B. die in den letzten Jahren stark gesunkenen Preise für Erdsondenbohrungen. Ein relativ einheitlich festzustellender Trend besagt, daß die Speicherkosten mit der Speichergröße sinken und sich ab einer gewissen Größe auf einem konstanten Wert einpendeln (nach SIA, 1996 ab etwa 100.000m³).

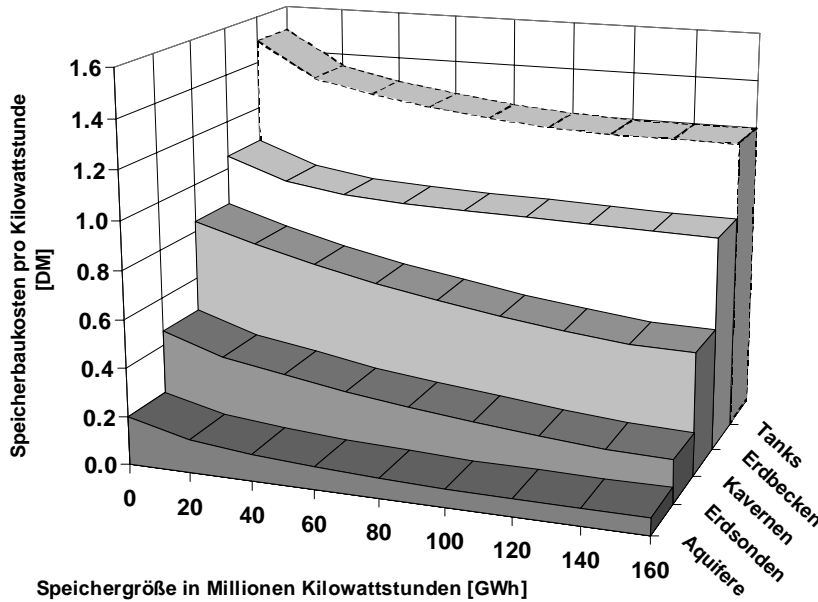


Abbildung 3-13: Kosten verschiedener Speicherverfahren in Abhängigkeit von der Speichergröße im Vergleich. Angaben i. W. nach BAKEMA ET AL. (1995) und FISCH & KÜBLER (1991). Da die Speicherkosten sehr stark von den individuellen Bedingungen am Speicherstandort abhängen, gleichzeitig nur wenige Daten zugrunde liegen, sind diese Angaben nur als grobe Orientierungshilfe zu sehen.

3.1.6 Aktuelle Entwicklung der Untergrundspeicherung

3.1.6.1 Realisierte Projekte

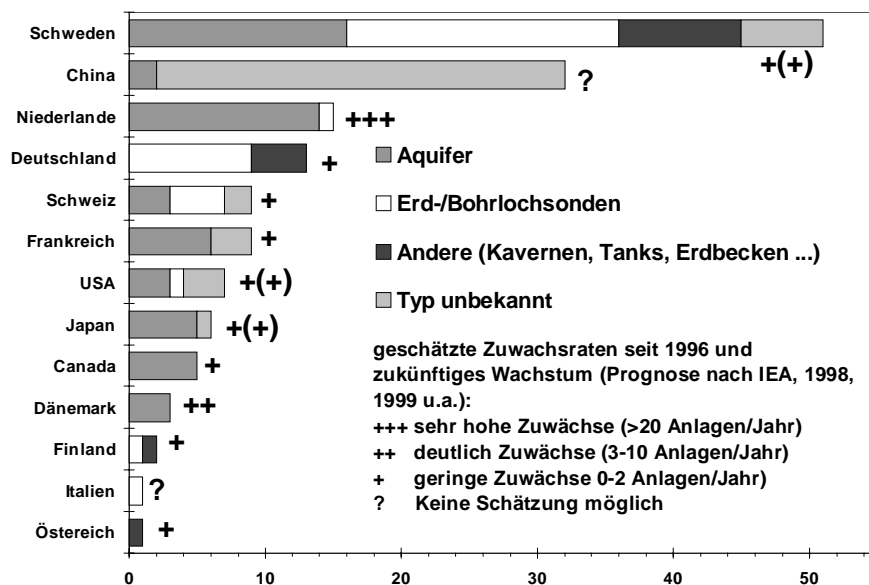


Abbildung 3-14: UTES-Projekte weltweit. Stand 1997. Nach IEA (1998) und NORDELL (1999) ist davon auszugehen, daß insbesondere in den Niederlanden inzwischen eine deutlich höhere Anzahl von Aquifer-Kälte-Speichern (bis zu 50) existiert.

Die + und - Zeichen geben die relativen (geschätzten) Zuwächse seit 1996/97 an.

Derzeit existieren weltweit zwischen 150 und 200 Untergrundspeicheranlagen. Eine exakte Zahl anzugeben ist inzwischen schwierig: da eine exakte Grenzziehung zwischen Wärmeentzugsanlagen und Wärmespeicheranlagen nicht immer möglich ist (SANNER & STILES, 1997; vgl. auch Kap. 3.3), ist auch nicht mehr direkt

²⁰ Normierung auf den äquivalenten Energieinhalt von 1m³ Wasser zur besseren Vergleichbarkeit.

nachvollziehbar, welche Projekte in die Statistik aufgenommen werden können. Der ungefähre Stand von 1996/97 ist in Abbildung 3-14 dargestellt.

Daß die Anzahl der Projekte nicht notwendigerweise die Bedeutung der Untergrundspeicherung in den jeweiligen Ländern wiedergibt, verdeutlicht Abbildung 3-15:

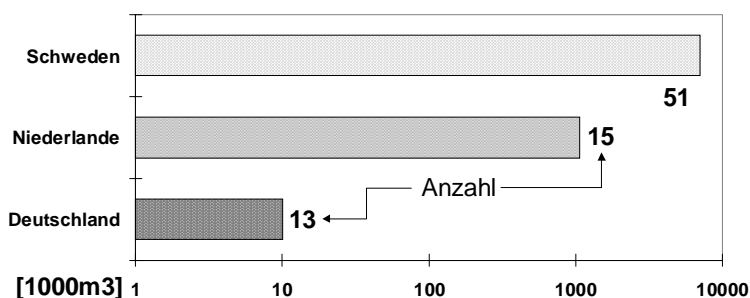


Abbildung 3-15: Vergleich der installierten Speichervolumina und Projektanzahl in verschiedenen Ländern. Diverse Quellen, Stand 1996/97.

Übersichten zu bestehenden Projekten, z.T. auch unter Angabe der Systemparameter und Untergrundeigenschaften, geben z.B. ANDERSSON (1994, 1998), DALENBÄCK (1990), LOTTNER, V. (1994), SANNER (1992, 1994), SANNER & HELLSTRÖM (1998), SANNER & KNOBLICH (1993) und REUß ET AL. (1998).

3.1.6.2 Entwicklungen

Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Untergrundspeicherung thermischer Energie werden von verschiedener Seite unterschiedlich bewertet. Eine vergleichsweise skeptische Haltung nimmt beispielsweise HADORN (1997) ein, während andere Autoren gewissermaßen euphorische Zukunftsprognosen abgeben (IEA, 1998). Die Situation in Deutschland stellt sich aktuell zumindest nicht so dar, daß man von einem besonders ausgeprägten Interesse an der Untergrundspeicherung von Seiten der potentiellen Anwender, der Industrie und der Politik sprechen könnte (vgl. Abbildung 3-14). Große Hoffnungen werden in das Aquiferspeichervorhaben am Reichstag in Berlin (SEIBT & KABUS, 1997; BMWi, 2000) gesetzt, von dem eine Anschubwirkung ausgehen soll²¹. Ein nach wie vor reges Interesse wird aus Schweden gemeldet (ANDERSSON, 1998; vgl. auch Abbildung 3-14). In den Niederlanden werden nach IEA (1998) 20-30 neue ATES-Projekte **jährlich** erwartet²².

Die ungleichen Entwicklungen in den jeweiligen Ländern sind teilweise auf die geologischen Bedingungen zurückzuführen, vor allem aber auf die markt- und forschungspolitische Situation. So ist z.B. die unterschiedliche Entwicklung in Deutschland und den Niederlanden nicht mit geologischen Argumenten zu begründen, da geologischen Verhältnisse in den Niederlanden und in den westlichen Bereichen der norddeutschen Tiefenebene weitgehend identisch sind (vgl. DRACH ET AL., 2000).

Standardlösungen, die ohne umfangreich individuelle Planung realisiert werden können existieren bislang kaum. Am weitesten fortgeschritten sind in dieser Hinsicht die Entwicklungen auf dem Gebiet der Kältespeicherung (vgl. z.B. MOROFSKY, 1997). Die wenigen bestehenden Hochtemperatur-Wärmespeicher ($T_{\max} > 50^{\circ}\text{C}$) stellen dagegen vorwiegend Projekte mit F&E-Charakter da.

²¹ Ob dieses Projekt tatsächlich im geplanten Umfang realisiert wird ist derzeit unklar.

²² Nach REUß in DRACH ET AL. (2000) existieren derzeit 120 ATES-Anlagen in den Niederlanden.

3.2 Verfahren zur Wärmegegewinnung

Tabelle 3-6 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Verfahren zur Gewinnung von Wärme und Kälte aus dem flacheren Untergrund bis ca. 200m Tiefe. In dieser Untersuchung werden vorrangig Entzugsverfahren mit grundwassergekoppelten Wärmepumpen und Erdsonden betrachtet. Verfahren ohne Wärmepumpeneinsatz sind ausschließlich zu Kühlzwecken denkbar und vergleichsweise selten. Horizontale Erdreichwärmetauscher werden hier nicht behandelt, da sie im Hinblick auf die Standortbewertung im GIS einer vollständig anderen Behandlung bedürfen. Während bei den Verfahren mit Sonden und Grundwasser vorrangig dreidimensional verteilte geologische Faktoren bewertet werden müssen, sind es bei den horizontalen Erdreichwärmetauschern eher bodenkundliche Aspekte (vgl. dazu WITTEK, 1998).

Verfahren	Beschreibung	Einsatzzweck	Häufigkeit / Zuwachsraten
mit Wärmepumpe			
Grundwassergekoppelte Wärmepumpen	Brunnenanlage	Heizung, Kühlung, Speicherung	sehr häufig, mittlere Zuwächse
Erdgekoppelte Wärmepumpen			
vertikale Erdreichwärmetauscher (Erdsonden)	geschlossene Sonden in Bohrlöchern bis 200m	Heizung, Kühlung, Speicherung	sehr häufig, hohe Zuwächse
horizontale Erdreichwärmetauscher (Kollektoren, Erdregister)	flachverlegte geschlossene Rohrleitungssysteme	Heizung	häufig, geringe Zuwächse
Energiepfähle	erdberührte Bauteile, die als Wärmetauscher ausgestattet werden	Heizung / Kühlung	noch selten, hohe Zuwächse erwartet
Verfahren mit Direktverdampfung (Erdsonden)	Der Erdreichwärmetauscher ist direkt in den Kühlmittelkreislauf der Wärmepumpe integriert	Heizung	Versuche, in Deutschland Genehmigungsprobleme
ohne Wärmepumpe			
direkte Kühlung mit Grundwasser	Brunnen	Kühlung (Klimatisierung, Prozeßkühlung)	häufig (v.a. in USA)
direkte Kühlung mit Erdsonden	Sonden	Kühlung (von technischen Prozessen)	selten, in Schweden (SANNER, BOISSAVY ET AL., 1999)

Tabelle 3-6: Übersicht über mögliche Verfahren zum Entzug von Wärme und Kälte aus dem flacheren Untergrund bis ca. 200m Tiefe mit und ohne Wärmepumpeneinsatz.

3.2.1 Grundwassergekoppelte Wärmepumpen

3.2.1.1 Anlagenaufbau, Technik

Eine grundwassergekoppelte Wärmepumpenanlage (**GWWP**) besteht aus einem oder mehreren Entnahmebrunnen, der Wärmepumpeneinheit und einem oder mehreren Schluck- oder Reinjektionsbrunnen. Dem aus dem Entnahmebrunnen geförderten Grundwasser wird mit Hilfe der Wärmepumpe Wärmeenergie entzogen und dem Verbraucher zugeführt. Das abgekühlte Grundwasser wird in den Aquifer zurückgeleitet. Technisch ist es auch möglich, das abgekühlte Wasser oberflächlich zu versickern oder in ein Oberflächengewässer einzuleiten, was in Deutschland aber aus rechtlichen Gründen in der Regel nicht zulässig ist (vgl. Kap. 3.6). Unterschiedliche Anlagenkonzeptionen und technische Details zum Ausbau der Brunnen werden in u.a. in SANNER (1992), SIA (1996) und in der VDI 4640 beschrieben. Das Prinzipschema einer GWWP zeigt Abbildung 3-16:

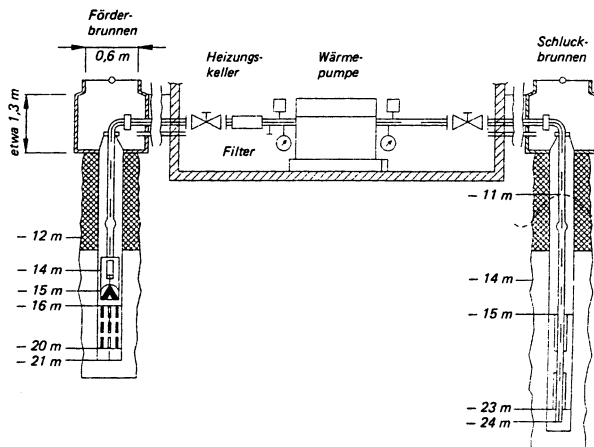


Abbildung 3-16: Aufbau einer grundwassergekoppelten Wärmepumpenanlage (GWWP) mit Förder- und Schluckbrunnen. Aus VDI (1998).

3.2.1.2 Anforderungen an den Untergrund

3.2.1.2.1 Grundwassertemperatur

Da die Temperatur der Wärmequelle entscheidend für die Leistungszahl der Wärmepumpe ist (Kap. 2.2.1.2), ist eine hohe²³ und gleichmäßige Grundwassertemperatur generell günstig für den Betrieb. Die Temperatur des Grundwassers ist im Wesentlichen von der Jahresmitteltemperatur und damit meist auch von der Höhenlage des Anlagenstandortes abhängig. Da im Allgemeinen flachliegende Grundwasserleiter genutzt werden, sind thermische Anomalien, die nicht auf den klimatischen Verhältnissen beruhen, nur von geringer Bedeutung (vgl. Kap. 4.4.6).

3.2.1.2.2 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften der Gesteinsmatrix Grundwasserleiters spielen bei GWWP nur eine sehr geringe Rolle. Sie beeinflussen zwar die Wärmeausbreitung im Untergrund (vgl. Kap. 2.3.2.1.2), da sie aber bei gesättigten Verhältnissen nur in engen Grenzen variieren, ist die Bedeutung der entsprechenden Effekte gering.

3.2.1.2.3 Hydrogeologische Verhältnisse

Grundvoraussetzung für den Betrieb einer grundwassergekoppelten Wärmepumpe ist das Vorhandensein eines Aquifers in nicht zu großer Tiefe, der die Förderung und Wiedereinleitung der erforderlichen Grundwassermenge ermöglicht. Die Tiefenlage des Aquifers ist grundsätzlich eine Kostenfrage, meist aber zusätzlich auch mit genehmigungsrechtlichen Aspekten verbunden (vgl. Kap. 3.6). Die notwendige Förderrate hängt vom Wärmebedarf der Anlage ab, wobei zwischen Grund- und Spitzenbedarf zu unterscheiden ist. Bei einer monovalenten Anlage muß der Spitzenbedarf der Anlage zu allen Zeiten zuverlässig gedeckt sein. Im Gegensatz zu Erdsondenanlagen ist eine kurzfristige Überlastung nicht möglich. Nach VDI (1998) ist für die Bereitstellung von 1KW_{th} , eine Förderleistung von $0,083\text{l/s}$ nötig. SANNER (1992) gibt $0,057\text{l/s}$ an. Geht man von der kleinstmöglichen technisch sinnvollen Anlagenkonzeption aus (Leistung 10KW_{th} bei monovalentem Betrieb), so ist bei einer mittleren angenommenen Grundwassertemperatur von 10°C eine kontinuierlich erzielbare Mindestleistung des Brunnens von etwa $0,5\text{l/s}$ gefordert. Die Ergiebigkeit eines Brunnens ist von den hydraulischen Parametern des Aquifers abhängig. Direkte Beziehungen zwischen diesen Parametern und der möglichen Förderleistung sind eigentlich nur bei Porenwasserleitern anzugeben. Bei diesen gilt nach HÖLTING (1996) in grober Näherung²⁴ für ungespannte Verhältnisse:

²³ Beim Einsatz zu Heizzwecken. Soll die Wärmepumpe zur Kühlung eingesetzt werden, sind entsprechend niedrige Grundwassertemperaturen günstig.

²⁴ Ohne exakte Berücksichtigung des Brunnendurchmessers.

$$Q = k_f \cdot h_m \cdot s \quad \text{Gleichung 3-10}$$

mit Q = Entnahmemenge in $[\text{m}^3/\text{s}]$
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert $[\text{m}/\text{s}]$
 s = Absenkung im Brunnen $[\text{m}]$

$$h_m = h + s/2 \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit h = abgesenkte Wassersäule über Brunnensohle; M = Grundwassermächtigkeit $[\text{m}]$ = $h+s$

Den maximal möglichen Absenkungsbetrag bei gegebener Grundwassermächtigkeit M und gegebenem k_f -Wert erhält man, wenn man Gleichung 3-11 in Gleichung 3-10 einsetzt nach:

$$s = M - \sqrt{M^2 - 2 \cdot \frac{Q}{k_f}} \quad \text{Gleichung 3-12}$$

Bei der Anlage von Entnahme- und Schluckbrunnen sowie bei der Errichtung mehrerer Anlagen in unmittelbarer Nachbarschaft muß darauf geachtet werden, daß sich die einzelnen Brunnen nicht gegenseitig thermisch und hydraulisch beeinflussen. Auf jeden Fall muß vermieden werden, daß im Förderbrunnen bereits abgekühltes Wasser aus dem Abkühlungsbereich des Schluckbrunnens gepumpt wird. Dieser Zustand wird als „thermischer Kurzschluß“ (thermal breakthrough) bezeichnet. Wenn ein natürlicher hydraulischer Gradient vorhanden ist, sollte der Entnahmekosten im oberstromigen Bereich des Schluckbrunnens eingerichtet werden. Ungünstig ist es unter Umständen auch, wenn die Entnahmekosten zu nah an Oberflächengewässern angelegt werden, was im Rahmen dieser Untersuchung insbesondere im Maintal beachtet werden muß. Dort kann durch Uferfiltration kaltes Oberflächenwasser in den Förderbrunnen gelangen. Als grobes Maß für den von den Brunnen beeinflussten Bereich kann der Radius des Absenkungstrichter angenommen werden, der nach HÖLTING (1996) bei einer Absenkung um den Betrag s durch:

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

bestimmt werden kann. Der thermisch merklich beeinflusste Bereich ist dabei wegen Gleichung 2-18 kleiner als der Absenkungstrichter. Die maximale Ausbreitung der thermischen Front bei der Infiltration in einen Brunnen, kann auch nach RAUCH (1992) überschlägig mit:

$$R_t = \sqrt{\frac{Q_{\text{ein}} t_{\text{ein}} \rho c_w}{\pi M \rho c_G}} \quad \text{Gleichung 3-14}$$

angegeben werden, wobei Q_{ein} $[\text{m}^3]$ die injizierte Menge, t_{ein} $[\text{s}]$ die Einleitungsdauer, M die Mächtigkeit des Aquifers, ρc_G die volumetrische Wärmekapazität des Gesteins und ρc_w die des Wassers ist. Genauere Ergebnisse können durch den Einsatz numerischer oder analytischer Modelle erzielt werden (vgl. Kap. 2.3.2).

Auch die **Tiefenlage des Grundwassers** unter GOK (Flurabstand) ist von entscheidender Bedeutung. Liegt der Grundwasserspiegel zu flach, ist mit ungünstigen Einflüssen saisonaler Temperaturschwankungen zu rechnen. Ab etwa 3 bis 5m Tiefe verlieren diese an Bedeutung (Kap. 2.3.2.4). Die maximal mögliche Tiefe des Grundwasserspiegels wird vorwiegend durch wirtschaftliche Gesichtspunkte bestimmt. Dabei ist die Größe der Anlage zu berücksichtigen. Für Einfamilienhäuser werden 20m tiefe Brunnen als maximal vertretbar angegeben (IZW, 1997). Neben den wirtschaftlichen sind bezüglich der Tiefe auch rechtliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen (Kap. 3.6).

Aquifertyp: Sofern die erforderliche Schüttung gewährleistet ist, ist es zunächst unerheblich, ob es sich beim genutzten Aquifer um einen Poren-, Kluft- oder Karstwasserleiter handelt. Es ist allerdings davon auszugehen, daß die Erschließung von Porengrundwasserleitern fast immer einen erheblichen geringeren Planungsaufwand erfordert. Das Risiko von Fehlbohrungen ist dort deutlich geringer. Bei gespannten GW-Leitern kann die Wiedereinleitung Probleme bereiten, da dort der erforderliche Injektionsdruck u.U. nicht

aufgebracht werden kann (SCHENCK, 1981). Diese technische Fragestellung ist allerdings in Deutschland nur begrenzt relevant, da gespannte Aquifere in der Regel von der thermischen Nutzung aus rechtlichen Gründen ausgeschlossen sind. Gleiches gilt für tiefere Grundwasserstockwerke (vgl. Kap. 3.6). Aus diesem und aus Kostengründen, sind flachliegende Lockergesteins-Porengrundwasserleiter die günstigsten und am häufigsten genutzten Aquifere.

Um den störungsfreien und kostengünstigen Betrieb einer grundwassergekoppelten Wärmepumpe zu ermöglichen, sind gewisse Anforderungen an die **Wasserqualität** zu stellen. Hoch mineralisierte, insbesondere harte Wässer, sind dabei wegen möglicher Ausfällungen am Wärmetauscher besonders ungünstig. Ebenso sind Eisen- und Manganausfällungen (Brunnenverockerung) bei entsprechendem Wasserchemismus zu befürchten. Hierzu ein Zitat aus IZW (1997): „... Die Zuverlässigkeit dieser Wärmequelle (Grundwasser) ist jedoch häufig ungenügend, da oft wegen unzureichender Wasserqualität Störungen an der Wärmepumpe und insbesondere an der Brunnenanlage häufig beobachtet wurden.“ Besonders wird dort auf die Anfälligkeit der Schluckbrunnen für Verockerung hingewiesen. Günstige Voraussetzungen sind in jedem Fall gering mineralisierte Wässer. Beim Ausbau der Brunnen sind die üblichen Maßnahmen zu treffen, die auch bei Trinkwasserbrunnen notwendig sind um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten (siehe dazu z.B. BALKE ET AL., 2000).

3.2.2 Gewinnung von Wärme und Kälte mit Erdsonden

Thermische Energie (Wärme/Kälte) kann dem Untergrund (Boden/Gestein/Grundwasser) entzogen werden, indem ein Wärmeträgermittel (Sole) durch ein untertägig verlegtes, geschlossenes Rohrleitungssystem geleitet wird. Das Wärmeträgermittel nimmt aufgrund seiner relativ niedrigeren (oder höheren) Temperatur Wärme aus dem Untergrund auf oder gibt sie an diesen ab. Abbildung 3-17 zeigt die beiden wesentlichen Konzepte.

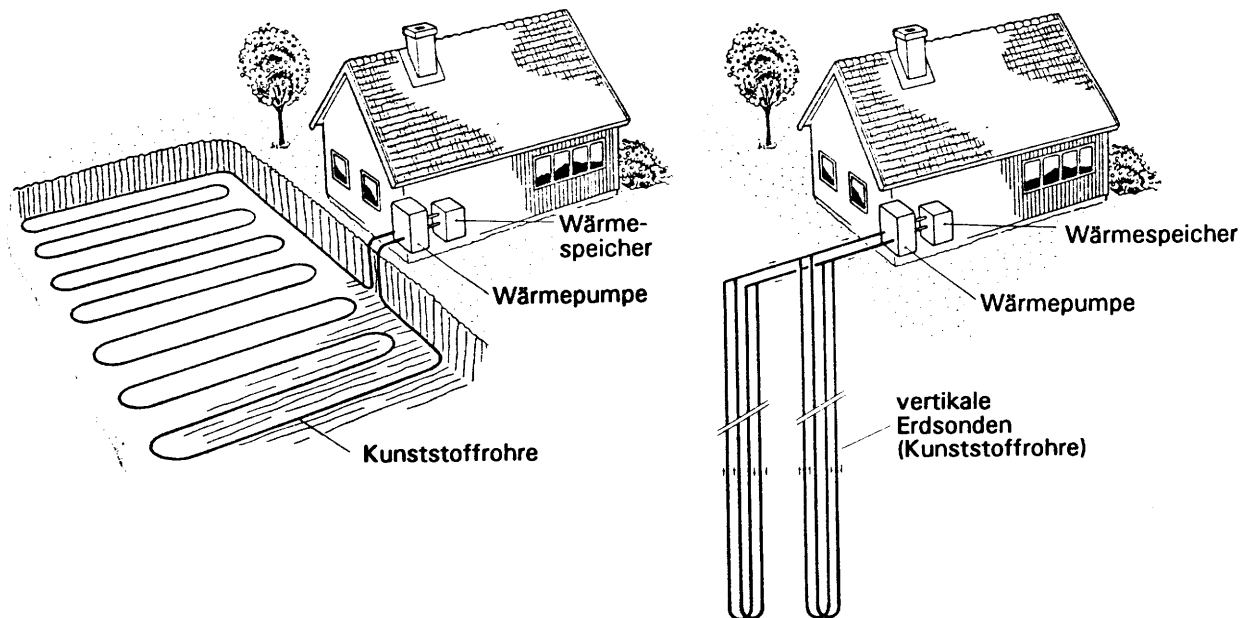


Abbildung 3-17: Gewinnung von Wärme aus dem Untergrund mit Hilfe geschlossener Systeme. Links: flach verlegte, horizontale Erdreichwärmetauscher (= Erdregister, Erdkollectoren). Rechts: vertikale Erdreichwärmetauscher (= Erdsonden, Erdwärmesonden). Aus SIA (1996).

Horizontale Erdreichwärmetauscher werden in dieser Untersuchung nicht betrachtet. Vertikale Erdsonden wurden in Kap. 2.2.2 beschrieben.

3.2.2.1 Anforderungen an den Untergrund

Wird eine Anlage zur Wärmegewinnung mit Erdsonden nach energetischen Gesichtspunkten beurteilt, ist die wichtigste Anforderung an den Untergrund, daß dieser möglichst viel Energie bereitstellen kann und die entzogene Wärme möglichst rasch nachgeliefert wird. Von Bedeutung sind dabei die (momentan) mögliche Entzugsleistung, die meist als **spezifische Entzugsleistung** in [W/m] (pro Meter Sondenlänge) angegeben wird, und die dauerhaft mögliche **spezifische Entzugsarbeit** [kWh/m]. Die spezifische Entzugsarbeit ist für längerfristige Betrachtungen ausschlaggebend. Wird dem Untergrund zuviel Energie entzogen, was bei einem Dauerbetrieb mit der maximalen Entzugsleistung möglich ist, so führt dies zu einer irreversiblen Auskühlung des Untergrundes und damit langfristig zum Versagen der Anlage (vgl. z.B. WERNER ET AL., 1996). Außer den energetischen Gesichtspunkten sind allerdings auch geotechnische Gesichtspunkte (Bohrbarkeit) zu beachten.

3.2.2.1.1 Untergrundtemperaturen

Eine hohe und gleichmäßige Wärmequellentemperatur ist für den Betrieb einer Wärmepumpe grundsätzlich günstig. Die Erhöhung der Wärmequellentemperatur steigert die Jahresarbeitszahl (Tabellenwerte in ZWEIFEL & WETTER, 1997). Höhere Untergrundtemperaturen werden im Allgemeinen bei größeren Bohrtiefen erreicht (Kap. 2.3.2.4). Allerdings werden die positiven Effekte dann unter Umständen durch höhere Energieaufwendungen für die Soleumwälzpumpe und höhere Bohrkosten zunichte gemacht (vgl. auch Kap. 2.3.2.4.3, 3.2.1.2.1 und 4.4.6).

3.2.2.1.2 Thermische Eigenschaften

Der Einfluß der thermischen Untergrundeigenschaften auf die Entzugsleistung kann anhand einer einfachen Berechnungen gezeigt werden. Hierzu wurde ein Berechnungsverfahren nach GUERNSEY ET AL. (1949; zitiert und modifiziert in SANNER, 1992) angewendet (Gleichung 3-15).

$$\Delta T = \frac{0.1832Q}{\lambda_e} \left(\log_{10} \frac{\alpha t}{r^2} + 0.217 \frac{r^2}{\alpha t} + 0.351 \right) \quad \text{Gleichung 3-15}$$

für $\frac{\alpha t}{r^2} \gg 1$

mit ΔT = Temperaturänderung [K]; Q = Wärmefluß pro m Rohrlänge [W/m]; λ_e = effektive Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
 α = Thermische Diffusivität [m^2/s]; r = Entfernung zum Rohrmittelpunkt [m]; t = Zeit [s]

Das von GUERNSEY ET AL. vorgeschlagenen Verfahren stellt bereits eine vereinfachte Methode des sogenannten „Linienquellenverfahrens“ nach INGERSOLL ET AL. (1948) dar, das ausführlich in SIA (1996) erklärt wird. Das Linienquellenverfahren wurde z.B. von RYBACH ET AL. (1992) als Grundlage eines Modellierungsprogramms zur Auslegung von Erdsonden verwendet. Modifizierte Verfahren werden bei HUBER & SCHULER (1997) vorgestellt. Das Linienquellenverfahren geht von einer unendlich ausgedehnten Wärmequelle aus, die in ein homogenes Medium eingebracht wird. Vertikale Wärmeflüsse, wie sie bei Erdsonden auftreten, werden dabei vernachlässigt. Verfahren, mit denen genauere Berechnungen, auch über mehrere Betriebsjahre bei verschiedenen Sondenkonfigurationen möglich sind, wurden z.B. von EUGSTER & RYBACH (1997), HUBER & SCHULER (1997) und HELLSTRÖM ET AL. (1997) entwickelt oder vorgestellt.

Mit Abbildung 3-18 wird gezeigt, wie sich die Variation der thermischen Eigenschaften des Untergrundes prinzipiell auf die mögliche Entzugsleistung von Erdsonden auswirkt. Mögliche konvektive Wärmetransportvorgänge, vertikaler Wärmetransport und andere, in der Realität auftretende Prozesse, sind dabei nicht berücksichtigt. Wie Abbildung 3-18 zeigt, ist die mögliche Entzugsleistung fast ausschließlich von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins abhängig. Die volumetrische Wärmekapazität spielt eine untergeordnete Rolle.

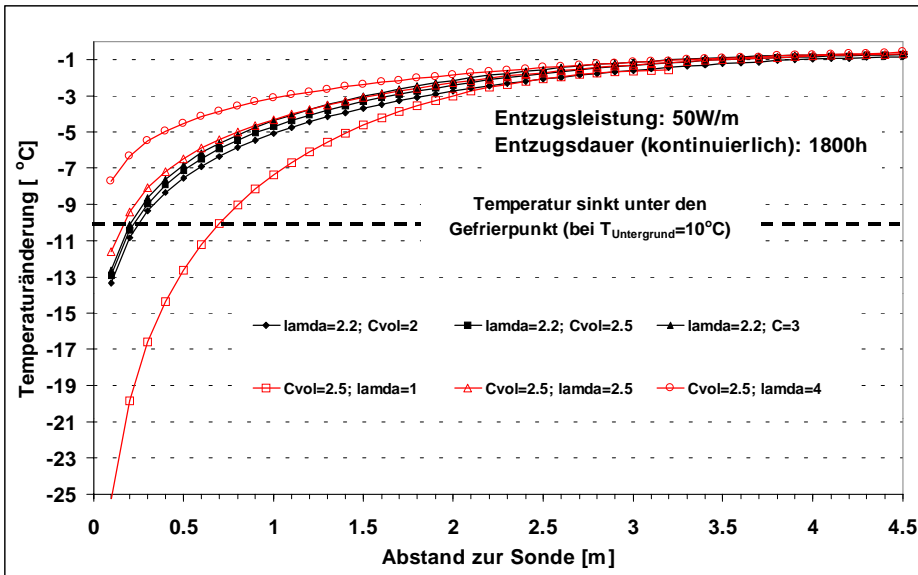


Abbildung 3-18: Temperaturänderungen in Abhängigkeit von der Entfernung zu einer Linienquelle (Sonde) berechnet nach GUERNSEY ET AL. (1949; modifiziert in SANNER, 1992) unter Veränderung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen volumetrischen Wärmekapazität innerhalb von für das Untersuchungsgebiet typischen Wertebereichen. Änderungen der Wärmekapazität führen zu keinen merklichen Änderungen der möglichen Entzugsleistung. λ = Wärmeleitfähigkeit in $W/(mK)$, C_{vol} = Volumetrische Wärmekapazität in $10^6 J/(m^3K)$.

3.2.2.1.3 Hydrogeologische Eigenschaften

Die Anwesenheit und die Form des Auftretens von Grund- bzw. Porenwasser hat einen sehr entscheidenden Einfluß auf die Leistung von Erdsonden (vgl. dazu auch Tabelle 3-8). Dieser besteht zunächst vorrangig darin, daß bei den meisten Gesteinen eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei zunehmender Wassersättigung festzustellen ist. Besonders deutlich wirkt sich dies bei porösen Lockergesteinen aus (vgl. dazu Kap. 2.3.2.2.3, Abbildung 2-25). Weiterhin haben die hydrogeologischen Bedingungen auch insofern Bedeutung, als bei fließendem Grundwasser durch den Grundwasserstrom kontinuierlich Energie nachgeliefert wird, die die entzogene Energie ersetzt. Nach SIA (1996) erhöht sich bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von mehr als einige cm/Tag die gewinnbare Energiemenge bereits beträchtlich. Saisonbedingte Betriebschwankungen verringern sich. Die **spezifische momentane Entzugsleistung** (Kap. 3.2.2.1) ändert sich dabei allerdings nicht. Betroffen ist nur die langfristig mögliche **spezifische Entzugsarbeit**. Sie kann bei Grundwasseranströmung auf bis zu 500kWh/m ansteigen (gegenüber max. 100kWh/m ohne Grundwasserbewegung). Insgesamt ist also bei Sonden im fließenden Grundwasser wegen guter thermischer Eigenschaften (Wassersättigung) von guten Entzugsleistungen auszugehen und zusätzlich von einer langfristig gesicherten thermischen Regenerierung des Untergrundes durch die vom Grundwasser angelieferte Energie.

Bei Verhältnissen, die starke Grundwasserbewegung erlauben, ist allerdings häufig die Errichtung grundwassergekoppelter Systeme die energetisch sinnvollere Lösung. Unter bestimmten Voraussetzungen sind Erdsonden aber auch beim Auftreten von Grundwasser eine geeignete Alternative. Dies kann dort der Fall sein, wo gegen den Einsatz offener Systeme wasserrechtliche Bedenken bestehen.

Die folgende überschlägige Betrachtung erlaubt eine Abschätzung des Beitrags von Grundwasserfließbewegungen zur spezifischen Entzugsarbeit von Erdsonden. Die durch den Grundwasserstrom nachgelieferte Energiemenge wird dabei einfach als Energieinhalt des Wasservolumens bestimmt, das von der Sonde beeinflusste Gesteinsvolumen durchströmt. Das beeinflusste Gesteinsvolumen wird mit Gleichung 3-15 als der von Temperaturänderungen größer als $1^\circ C$ betroffene Bereich festgelegt.

Als Beispiel wird hier eine Sonde in einem Lockergesteins-(Poren-)Grundwasserleiter betrachtet. In einem solchen Gestein sind maximale spezifische Entzugsleistungen von 70-80W/m möglich (s. Tabelle 3-8). Nach Gleichung 3-15 beträgt der Radius des Bereichs mit $\Delta T < 1^\circ C$ bei einer Entzugsleistung von 50W/m über eine Heizperiode ca. 5m (bei ca. 1800h Stunden WP-Laufzeit; zunächst ohne Berücksichtigung des konvektiven Transports). Bezogen auf 1m Grundwassersäule beträgt die Fläche, die von der Sonde beeinflusst und von Grundwasser durchströmt wird, also ca. $10m^2$. Nach dem Darcy'schen Gesetz läßt sich die Grundwasser-

menge Q_w bestimmen, die bei bekanntem k_f -Wert und hydraulischem Gradient diese Fläche pro Jahr bzw. pro Heizperiode durchströmt. Ausgehend von einer mittleren Temperaturabsenkung ΔT_m von 5°C über den gesamten von der Sonde beeinflussten Bereich F [m^2], kann die Energiemenge E_{GW} [kWh] angegeben werden, die pro Sondenmeter durch Grundwasserstrom bereitgestellt wird.

$$E_{GW} = Q_w \cdot \rho c_w \cdot \Delta T_m \cdot t$$

Gleichung 3-16

k_f -Wert [m/s]	h/l [m/m]	t [d]	F [m^2]	Q_w [m^3]	E_{GW} [kWh/m]	$P_{\text{Sonde spez.}}$ [W/m]	$E_{\text{Entzug/1800h}}$ [kWh/m]	Verhältnis $E_{GW} : E_{\text{Entzug}}$
1.E-06	0.002	365	10	0.6	3.6	50	90	1:25
1.E-05	0.002	365	10	6.3	35.9	50	90	1:2.5
1.E-04	0.002	365	10	63.1	359.2	50	90	4:1
1.E-03	0.002	365	10	630.7	3591.6	50	90	40:1

Tabelle 3-7: Überschlägige Berechnung der Energiemenge, die durch den natürlichen Grundwasseranstrom an eine Erdsonde nachgeliefert wird, für verschiedene k_f -Werte bei einem hydraulischen Gradient von 2‰. E_{GW} = Energiemenge, die durch den Grundwasserstrom zugeführt wird. E_{Entzug} : Energiemenge die durch die Sonde entzogen wird.

Tabelle 3-7 zeigt die zugeführten Energiemengen und das Verhältnis zur entzogenen Energie bei verschiedenen k_f -Werten. Bei einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-4}$ m/s beträgt das Verhältnis von entzogener Energie zu nachgelieferter Energie, bezogen auf 1m Sondenlänge, ca. 4 zu 1. Bei hydraulischen Gradienten von 2‰ wird demnach bei Durchlässigkeiten größer als $4 \cdot 10^{-5}$ m/s die gesamte über die Heizperiode entzogene Energiemenge durch den natürlichen Grundwasserstrom ersetzt. Bei k_f -Werten kleiner $1 \cdot 10^{-6}$ m/s ist selbst bei hohen hydraulischen Gradienten kein nennenswerter energetischer Einfluß der Grundwasserfließbewegung mehr zu erwarten. In Klufwasserleitern, für die auch das Gesetz von Darcy nur begrenzt gilt, ist zusätzlich zu berücksichtigen, daß nur bei homogen verteilter Klüftung der ganze Sondenbereich von der Energiezufuhr durch Grundwasser profitiert. Wie bei anderen Verfahren der thermischen Nutzung gilt also auch hier, daß nicht der (Gebirgs-) k_f -Wert an sich, sondern das Verteilungsmuster der Grundwasserfließbewegung entscheidend ist. Wenige, stark grundwasserführende Klüfte im von der Sonde beeinflussten Bereich, haben keinen oder nur geringfügigen Einfluß auf das Systemverhalten.

Methoden zur quantitativen Erfassung des Einflusses von strömendem Grundwasser auf das thermische Verhalten von Erdsonden werden von KLUGESCHIED ET AL. (1994) bzw. KLUGESCHIED (1997) vorgestellt.

3.2.2.1.4 Einfluß anderer Untergrundeigenschaften

Neben den energetischen Betrachtungen spielen auch die Kosten für den Einbau der Sonden, i.W. also die Bohrbarkeit des Gesteins, eine Rolle. Die Bohrbarkeit von Gesteinen und ihr Einfluß auf die Eignung der Gesteine im Untersuchungsgebiet wird in Kap. 4.4.7 diskutiert. Weiterhin gelten in diesem Zusammenhang die in Tabelle 3-4 gemachten Angaben im Abschnitt „Geotechnik“.

3.2.2.2 Dimensionierung von Erdsondenanlagen

Die angemessene Tiefe und Anzahl der Erdsonden bei vertikalen Erdreichwärmetauschern sind die wichtigste Voraussetzung für einen reibungslosen und wirtschaftlichen Betrieb einer entsprechenden Anlage. Wird das Entzugssystem zu klein dimensioniert, besteht das Risiko von Ausfällen bzw. einer Minderung des Komforts. Zusätzlich kann es unter Umständen auch zu einer starken irreversiblen Auskühlung des Untergrundes kommen (WERNER ET AL., 1996; vgl. dazu auch SANNER, RYBACH & EUGSTER, 1997). Überdimensionierung führt dagegen zu überhohen Kosten und Unwirtschaftlichkeit. Nach SHONDER & HUGHES (1998) ist der größere Teil der Erdwärmesondenanlagen, die in den letzten Jahrzehnten in den USA installiert wurden, eher großzügig- oder sogar überdimensioniert, was zwar in den meisten Fällen einen zufriedenstellenden Betrieb gewährleistet, aber die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit der Anlagen mindert. Die falsche Dimensionierung von Erdsonden und -kollektoren hat maßgeblich dazu beigetragen, daß das anfangs hohe Interes-

se an der Erdwärmepumpentechnologie im Verlauf der 80er Jahre deutlich zurückging (KALTSCHMITT ET AL., 1999; vgl. auch Abbildung 1-5).

Bei der Dimensionierung von Erdsonden müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, die jeweils mit Unwägbarkeiten behaftet sind. Zum einen sind der Wärme- bzw. Kältebedarf des Gebäudes, und zwar sowohl der Gesamt- als auch der Spitzenbedarf, vorherzusagen. Zum anderen müssen die thermischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Untergrund möglichst genau bekannt sein. Die Daten für den Energiebedarf können nach entsprechenden Richtlinien (Wärmeschutzverordnung) bestimmt werden. Die Untergrundparameter können abgeschätzt oder berechnet (Kap. 2.3.2.2) oder an Probenmaterial gemessen werden. Gute Ergebnisse erbringen dabei nur Messungen am Bohrkern, wobei auch hier durch die Veränderung des primären Wassergehaltes Fehler möglich sind. Ideal, aber aufwendig und teuer sind direkte Messungen im Gelände oder Kurzzeittests (z.B. GEHLIN & NORDELL, 1998). Die Planungskosten bzw. Dimensionierungsunsicherheiten werden naturgemäß geringer, wenn in einer Region bereits Erfahrungen mit Erdsondenanlagen bestehen, von denen entsprechende Werte übernommen werden können. Sehr wünschenswert sind in diesem Zusammenhang **Informationssysteme** (Kap. 6.2), die solche Erfahrungswerte bereitstellen.

In die Dimensionierung gehen des Weiteren auch die Kenndaten der eingesetzten Wärmepumpe, der Sonden-typ und das Sondenmaterial, das Sondenfluid, die Eigenschaften des Verfüllmaterials, der Bohrlloch-durchmesser, die angestrebte Betriebsdauer (Gesamt- und jährliche) und andere Größen ein. Es existiert eine Fülle von Berechnungsprogrammen für die Auslegung von Erdsondenwärmanlagen mit denen von der einfachen Grobdimensionierung bis hin zur Berechnung des Langzeitsystemverhaltens großer Energiever-sorgungsanlagen, die unterschiedlichsten Aufgaben bewältigt werden können. Nur als Beispiele seien hier die Arbeiten von HELLSTRÖM ET AL. (1997), RYBACH ET AL. (1992), NANI ET AL. (1996) und WETTER & HUBER (1997) genannt. Das Geothermal Heat Pump Consortium stellt einen Vergleich verschiedenster Software-produkte und gedruckter Materialien für die Planung von Erdsondenanlagen zur Verfügung²⁵. Einen aktuel-len Überblick über verschiedene Softwareprodukte mit einer Vielzahl von weiterführenden Literaturziten geben SANNER ET AL. (2000).

Einfache, überschlägige Verfahren eignen sich für die Dimensionierung kleinerer Anlagen. Zur einer groben Einschätzung der Situation genügt es häufig auf Vergleichstabellen zurückzugreifen. Als Beispiel wird hier ein Vorschlag aus der VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 1998) wiedergegeben (Tabelle 3-8). Ähnliche Tabellen sind in vielen Werken, z.B. auch SIA (1996) oder BUWAL (1994) zu finden. Eine Zusammenfassung wichtiger Ge-sichtspunkte der Dimensionierung mit einfachen und stärker spezialisierten Auslegungsmethoden gibt SAN-NER (2000).

²⁵<http://www.geoexchange.org/dsgntool/dsgn-dir.htm>, Geothermal Heat Pump Consortium, USA.

- max. 1800 Jahresbetriebsstunden
- nur Wärmeentzug (Heizung einschl. Warmwasser)
- Länge der einzelnen Erdwärmesonden zwischen 40 und 100 m
- kleinster Abstand zwischen zwei Erdwärmesonden: mindestens 5 m bei Erdwärmesondenlängen von 40 bis 50 m
mindestens 6 m bei Erdwärmesondenlängen > 50 bis 100 m

Aus Erdwärmesonden kommen Uoppel-U-Sonden mit Durchmesser der Einzelrohre von 25 oder 32 mm oder Koaxialsonden mit mindestens 60 mm Durchmesser zum Einsatz.

Untergrund	Spezifische Entzugsleistung	Erdwärmesondenlänge pro kW _m	
		β _a = 3	β _a = 3,5
Allgemeine Richtwerte:			
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) (λ < 1,5 W/(m · K))	20 W/m	33 m	36 m
Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment (λ = 1,5 – 3,0 W/(m · K))	50 W/m	13 m	14 m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit (λ > 3,0 W/(m · K))	70 W/m	9,5 m	10 m
Einzelne Gesteine:			
Kies, Sand, trocken	< 20 W/m	> 33 m	> 36 m
Kies, Sand, wasserführend	55 – 65 W/m	12 – 10 m	13 – 11 m
Ton, Lehm, feucht	30 – 40 W/m	22 – 17 m	24 – 18 m
Kalkstein (massiv)	45 – 60 W/m	15 – 11 m	16 – 12 m
Sandstein	55 – 65 W/m	12 – 10 m	13 – 11 m
saure Magmatite (z.B. Granit)	55 – 70 W/m	12 – 9,5 m	13 – 10 m
basische Magmatite (z.B. Basalt)	35 – 55 W/m	19 – 12 m	20 – 13 m
Gneis	60 – 70 W/m	11 – 9,5 m	16 – 10 m
Die Werte können durch die Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken.			
Ausnahmen (Sie müssen gezielt begründet werden):			
Bei starkem Grundwasserfluß in Kies und Sand, für Einzelanlagen	80 – 100 W/m	8,3 – 6,7 m	8,9 – 7,1 m
Bei einer größeren Anzahl von Einzelanlagen an einem Standort	mögliche Erdwärmesonden-Entzugsleistung muß um 10 bis 20 % reduziert werden		
Bei wesentlich geringeren projektierten Betriebsstunden (< 1000 Stunden/Jahr)	Erdwärmesondenlänge kann um bis zu 10 % verringert werden		

Tabelle 3-8: Mögliche Entzugsleistung für verschiedene weitverbreitete Gesteinstypen. Aus der VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 1998).

Ebenfalls aus VDI (1998) stammt die folgende empirisch ermittelte Berechnungsformel, nach der sich die mögliche spezifische Entzugsleistung L [W/m] mit:

$$L = 13 \cdot \lambda + 10 \quad \text{oder wahlweise mit} \quad L = 20 \cdot \lambda \quad \text{für} \quad 1 < \lambda < 3 \quad \text{berechnen läßt.}$$

Das in Abbildung 3-19 gezeigte Nomogramm erlaubt die Ermittlung der notwendigen Sondenlänge bei bekannter Wärmeleitfähigkeit, Heizleistungsbedarf und Kenndaten der Wärmepumpe:

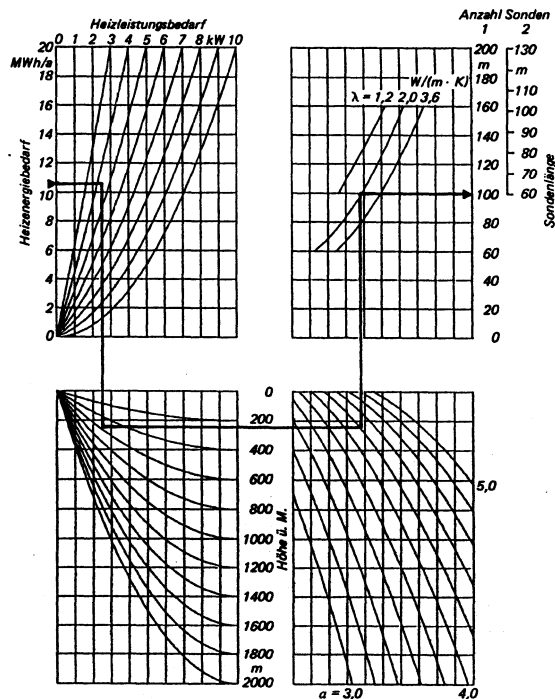


Abbildung 3-19: Nomogramm zur Ermittlung der Sondenanzahl und -länge in Abhängigkeit von der Höhenlage (→ Untergrundtemperatur) und der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes.

Der Parameter a wird aus dem jährlichen Heizenergiebedarf Q_H [kWh/a], der Jahresarbeitszahl β_a und dem jährlichen Energiebedarf der Nebenverbraucher (Umwälzpumpe etc.) nach

$$a = \frac{Q_H}{(Q_H / \beta_a) - P_p}$$

bestimmt. Das Nomogramm gilt innerhalb gewisser Grenzen, die in der VDI 4640 wiedergeben sind. Sie limitieren die Gültigkeit insbesondere auf kleinere Anlagen.

In der VDI-Richtlinie 4640 wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß solche Grobdimensionierungsverfahren bei Anlagen mit einer Heizleistung von mehr als 20kW nicht mehr zulässig sind. Nach SANNER & REUB (2000) liegt die Fehlerbandbreite solcher Überschlagsverfahren bei bis zu 25%. Nach ihren Angaben sind die besten Ergebnisse mit dem Programm EED (HELLSTRÖM ET AL., 1997) zu erzielen.

3.2.2.3 Energiepfähle

In jüngster Zeit werden, vor allem in der Schweiz, vermehrt sogenannte „Energiepfähle“ eingesetzt. Energiepfähle sind Gründungspfähle oder andere erdberührte Bauteile, die mit Wärmetauschern bestückt werden. Diese Technik kann bei Bauwerken, die wegen ungünstiger Untergrundverhältnisse auf tiefe Gründungen angewiesen sind, dazu beitragen Kosten zu sparen. Nähere Angaben dazu geben unter anderem GORHAN ET AL. (1993), SANNER (1995) und KATZENBACH ET AL. (1997).

3.2.3 Vergleich der Entzugsverfahren

In Tabelle 3-9 werden die Vor- und Nachteile der hier behandelten Untergrundwärmequellen für Wärmepumpen einander gegenübergestellt. Es wird allerdings darauf hingewiesen, daß sich, insbesondere im Arbeitsgebiet, nur in seltenen Fällen mehrere Lösungen als Alternativen anbieten werden.

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Grundwassergekoppelte Wärmepumpen	<ul style="list-style-type: none"> hohe und gleichbleibende Wärmequellentemperatur bei hohem Grundwasseranstrom enorme Leistungsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Kosten für Brunnen Energieverbrauch durch Grundwasserpumpen Anfälligkeit für hydrochemische Probleme keine kurzfristigen Überschreitungen der maximalen Entzugsleistung möglich
Erdreichgekoppelte Wärmepumpen (allgemein)	<ul style="list-style-type: none"> universeller einsetzbar einfachere Genehmigungsverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> zweifache Tauscherverluste Energieaufwendungen für Umwälzpumpe
Vertikale Erdreichwärmetauscher	<ul style="list-style-type: none"> kann kurzfristig auch überbelastet werden Nutzung als saisonaler Energiespeicher möglich 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Installationskosten
Energiepfähle	<ul style="list-style-type: none"> wenige Erfahrungen dokumentiert 	
Horizontale Erdreichwärmetauscher	<ul style="list-style-type: none"> keinen nennenswerten 	<ul style="list-style-type: none"> niedrige Wärmequellentemperatur in der Heizperiode Flächenbedarf

Tabelle 3-9: Vor- und Nachteile der verschiedenen Entzugsverfahren. Ergänzt, nach KNOBLICH ET AL. (1993).

3.3 Kombinierte Nutzungen

Der Energiebetrag, der durch erdgekoppelte Wärmepumpen aus dem Untergrund entzogen werden kann (spezifische Entzugsarbeit, Kap. 3.2.2) ist im Allgemeinen dadurch begrenzt, daß die aus dem Einflußbereich der Sonde entzogene Wärme aus sondenfernen Bereichen nur mit einer begrenzten Geschwindigkeit nachfließen kann. Bei überhöhten Entzugsleistungen kann es deshalb z.B. zu extremen Auskühlungen mit mittelfristig nicht reversibler Eisbildung kommen. Prinzipiell kann diese Begrenzung durch die Erhöhung der Sondenlänge (Anzahl bzw. Tiefe) aufgehoben werden, wodurch sich allerdings die Kosten erhöhen. Es ist deshalb naheliegend zu versuchen, das während der Heizperiode entstandene Energiedefizit durch eine „Wiederbeladung“ auszugleichen. Bei erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen, die sowohl zur Heizung als auch zur Kühlung eingesetzt werden, geschieht dies durch die unterschiedlichen Betriebsweisen im Sommer und im Winter. Im Winter wird durch den Wärmeentzug der Untergrund abgekühlt, im Sommer wird die durch Klimatisierung entstandene Abwärme in den Untergrund abgeführt, insgesamt entsteht ein Ausgleich. Ob es zu einem vollkommenen Ausgleich oder einem Nettowärme- oder -kälteüberschuß kommt, hängt von der Betriebsweise der Anlage ab. In jedem Fall kann die jährliche Entzugsarbeit deutlich gesteigert werden.

In vielen Fällen, v.a. im privaten Sektor, besteht hierzulande (zumindest derzeit noch) kein Kühlbedarf. Es besteht aber z.B. die Möglichkeit, eine teilweise „Wiederbeladung“ oder Regeneration des Untergrundes durch Wärme aus Solarkollektoren zu erzielen. Solche Kollektoren, die im Winter zur Unterstützung der Wärmepumpe eingesetzt werden können, geben an sonnigen Sommertagen enorme Wärmemengen meist ungenützt ab. Wenn man diese in den Untergrund abführt, kühlt man gleichzeitig die Kollektoren und erhöht

so deren Lebensdauer. Eine Anlage, bei der dieses Prinzip realisiert wurde, wurde im Untersuchungsgebiet bei Arnstein errichtet (RÖHLE ET AL., 1997). Dort werden 20 Niedrigenergiehäuser u.a. mit 250m² Kollektorfläche und 12 Erdsonden mit Wärme versorgt. Die Überschußwärme wird im Sommer über die Sonden in den Untergrund abgeführt. Ähnliche Systeme werden z.B. auch von MATHEY (1994) und FANINGER (1997) beschrieben. Nach einer Untersuchung von (ZOGG, 1998) ist die Regeneration von Erdwärmesonden mit Hilfe von Solarkollektoren im privaten Sektor, d.h. für kleinere Objekte mit geringem Wärmebedarf, nicht sinnvoll. Die zusätzliche Investition für die Kollektoren wird hier durch die Verbesserung des Wärmepumpenbetriebsverhaltens nicht kompensiert. Bei größeren Projekten sind entsprechende Aufwendungen dagegen offensichtlich gerechtfertigt (BAKEMA & SNIJDERS, 1997)

Die thermische Regeneration des Untergrundes ist auch durch andere (Ab-)Wärmequellen, z.B. BHKWs oder andere Prozeßwärme möglich. Es ist offensichtlich, daß zwischen dem reinen „Nachladen“ einer vorwiegend als Wärmeentzugssystem betriebenen Anlage und dem Speichern von thermischer Energie im Untergrund keine klare Abgrenzung getroffen werden kann. So ist es denkbar, immer dann von Speicherung zu sprechen, wenn im Sommer Überschußwärme in den Untergrund abgeführt wird, was zum Beispiel auch dann der Fall ist wenn die Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen eingesetzt wird. So verwenden z.B. SANNER & STILES (1997) den Begriff „Speicher“ für **alle** erd- (und Grundwasser-) gekoppelten Wärmepumpensysteme, wenn maximal 25% der jährlich entzogenen Energie aus dem Untergrund **außerhalb** des Speicherbereichs stammen. 75% der erzeugten Energie stammen also aus dem System selbst und werden saisonal zwischengespeichert. Ein ähnliches gedankliches Konzept stellt WILLEMSSEN (1998) vor.

Die Frage, ob ein System mehrheitlich dem Wärmeentzug oder der Speicherung von Wärme dient, ist im Rahmen dieser Untersuchung letztlich unbedeutend. Der wesentliche Unterschied ist wohl darin zu sehen, daß ein „echter“ Speicher einen tatsächlichen Energieüberschuß im Untergrund schaffen sollte, während beim „reinen“ Entzug ein Defizit geschaffen wird. Die Untergrundvoraussetzungen bleiben davon unberührt. Allerdings ist davon auszugehen, daß ein System, bei dem die Speicherung vorrangig der Regeneration des Wärmeentzugs dient, weniger hohe Ansprüche an den Untergrund stellt als eines, bei der hochwertige Energie gespeichert werden soll. Einige wesentliche Gemeinsamkeiten und die auffälligsten Unterschiede in den Anforderungen von Speicherung, Entzug und kombinierten Nutzungen werden in Tabelle 3-10 genannt.

Verfahrensgruppen	grundwasserabhängige Verfahren			grundwasserunabhängige Verfahren		
	Wärmeentzug aus dem GW	Aquiferwärmespeicherung	kombiniert	Wärmeentzug mit Erdsonden	Erdsondenwärmespeicher	kombiniert
hohe Porosität,	sehr wichtig	sehr wichtig	sehr wichtig	unterschiedlich	unterschiedlich	unterschiedlich
hohe Permeabilität	sehr wichtig	sehr wichtig	sehr wichtig	unterschiedlich	unterschiedlich	unterschiedlich
hohe natürliche Grundwasserfließbewegung	günstig	sehr ungünstig	ungünstig	sehr günstig	sehr ungünstig	ungünstig
hydrochemische Verhältnisse	bedeutsam	sehr bedeutsam	sehr bedeutsam	unwichtig	unwichtig	unwichtig
hohe Wärmeleitfähigkeit	unwichtig	unwichtig	unwichtig	sehr wichtig	unterschiedlich	eher wichtig

Tabelle 3-10: Wesentliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede verwandter Entzugs- und Speicherverfahren im Hinblick auf eine kombinierte Nutzung

3.4 Direkte Kühlung

Verfahren, bei denen Grundwasser unmittelbar, d.h. ohne Verwendung einer Wärmepumpe zur Kühlung von technischen Prozessen eingesetzt wird, werden in Mitteleuropa seit langem angewendet. Inzwischen wird direkte Kühlung nicht nur mit Grundwasser, sondern auch mit Erdsonden betrieben. So existieren nach GEHLIN & NORDELL (1998) in Schweden einige Anlagen, bei denen Telefonstationen mit Hilfe von Erdsonden direkt gekühlt werden.

Die Anforderungen, die die Verfahren zur direkten Kühlung an den Untergrund stellen, sind jeweils die gleichen, wie die der entsprechenden Verfahren mit Wärmepumpen.

3.5 Umweltrisiken durch thermische Nutzung des Untergrundes

Kurz angesprochen werden sollen hier mögliche Umweltrisiken, die durch die Speicherung und die Gewinnung von Wärme aus Gestein und Grundwasser auftreten können. Sofern es sich um Risiken handelt, die speziell bei bestimmten Verfahren auftreten, wurden sie an der entsprechenden Stelle bereits behandelt. Die Risiken lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

1. Nachteilige Veränderungen der Grundwasserqualität (physikalisch, chemisch, biologisch/hygienisch).
2. Nachteilige Auswirkungen auf die Vegetation durch Abkühlung oder Erwärmung.

Dazu können als dritte Gruppe mögliche geotechnische Risiken gerechnet werden, die aber nicht als Umweltisiko im engeren Sinne gelten können. Angaben zu geotechnischen Aspekten machen z.B. SANNER & KNOBLICH (1993). Eine Zusammenfassung umweltrelevanter Auswirkungen von Untergrundwärmespeichern geben MOROFSKY & CRUICKSHANKS (1997).

3.5.1 Auswirkungen auf das Grundwasser

Bedenken bezüglich der Veränderung der Grundwasserqualität werden von Seiten der Wasserwirtschaftsbehörden geäußert. Befürchtet werden insbesondere (zusammengefaßt nach WENDEL, 2000):

- Beeinflussung der natürlichen Grundwasserfließrichtung.
- Änderung der Druckverhältnisse in gespannten Aquiferen.
- Aufhebung der Stockwerkstrennung.
- Biologische Veränderungen: Hygienische Verunreinigung durch vermehrtes Keimwachstum bei Temperaturerhöhung, Behinderung biologischer Abbauprozesse durch Änderung der Temperaturverhältnisse, Verbinden von „sauberen“ und biogen belasteten Aquiferen.
- Chemische Veränderungen: Sole- und Kältemittelaustritt aus Erdreichwärmetauschern, Verbinden von Aquiferen unterschiedlicher chemischer Eigenschaften, Verschiebung von Lösungsgleichgewichten.
- Physikalische Veränderungen: Erhöhung der Temperatur und Verlust der Trinkwasserqualität.

Bei den Verfahren der Untergrundspeicherung sind unmittelbare Qualitätsveränderungen im Grundwasser durch Verunreinigung nur bei der Aquiferspeicherung (und Bohrlochspeicherung) zu erwarten (Kap. 3.1.1.4.3). Bei den Entzugsverfahren betrifft dies nur grundwassergekoppelte Wärmepumpenanlagen und Anlagen zur direkten Kühlung mit Grundwasser.

Weiterreichende Verunreinigungen durch Erdsonden und sind eigentlich nur bei Unfällen (Leckage der Sonden) oder beim unsachgemäßen Einbau (unzureichende Absperrung grundwasserführender Horizonte) möglich. Dies gilt gleichermaßen für Speicher- und Entzugsverfahren. Besonderes Augenmerk gilt dabei Anlagen mit Direktverdampfung, bei denen das Kältemittel der Wärmepumpe durch die Sonde gepumpt wird. Diese Technik wird selten, meist bei horizontalen Erdreichwärmetauschern eingesetzt, von Versuchen mit Erdsonden wird berichtet (KNOBLICH ET AL., 1993).

Mit den Bedenken gegen eine Grundwasserabkühlung durch Wärmeentzug befaßte sich eine Studie der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1980; zitiert in HÖLTING, 1996). Ergebnisse der Untersuchung zeigen, daß die Folgen geringfügiger Grundwasserabkühlungen im Allgemeinen gering sind und Schäden ausbleiben. Kritisch werden dagegen Grundwasserabkühlungen auf regionalem Niveau gesehen. Die Abkühlung wird dabei allerdings insgesamt als weniger gefährlich betrachtet als die Tatsache, daß grundwasserüberdeckende Schichten verletzt werden.

Zu den Umweltrisiken, die von Erdsonden ausgehen, ist anzumerken, daß bislang offensichtlich noch keine Schadensfälle aufgetreten sind. So wird aus dem Kanton Bern berichtet, daß es bei 2600 Anlagen bisher

nie zu einem Schadensfall gekommen ist, der eine Gefährdung von Grundwasservorkommen nach sich gezogen hätte (mündl. Mittlg. Herr Berdat, WEA Bern, 1997).

3.5.2 Auswirkungen auf die Vegetation

Thermischen Veränderungen an der Erdoberfläche mit Auswirkungen auf die Pflanzenwelt können sowohl bei der Speicherung als auch beim Entzug von Wärme auftreten. Besonders risikoreich sind hier die Verfahren mit horizontalen Erdreichwärmetauschern, bei denen der Entzug (Abkühlung) unmittelbar im Bereich der durchwurzelten Zone und zudem großflächig stattfindet. Mit entsprechenden Problemen befaßt sich z.B. eine Arbeit von TROEDSSON (1983). Deutlich weniger ausgeprägt ist ein entsprechendes Risiko bei vertikalen Erdreichwärmetauschern, bei denen eine Beeinflussung der Temperatur an der Erdoberfläche nur punktuell auftritt. Bei Speichern sind bislang wenige Erfahrungen im Zusammenhang mit dieser Problematik bekannt. Prinzipiell kann man davon ausgehen, daß es bei der Speicherung vermieden wird, den erdoberflächennahen Bereich in das Speichervolumen einzubeziehen, da hier die größten Temperaturgradienten und saisonale Temperaturschwankungen auftreten und so das Risiko von Verlusten gegeben ist. Häufig wird auch eine Isolationsschicht vorgeschlagen (z.B. SEIWALD & HAHNE, 1994). Dennoch wird es nicht auszuschließen sein, daß es über lange Zeiträume zu einer relativen Erwärmung oder Abkühlung des Bereichs über dem Speicher, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Vegetation kommt. Setzt man den Flächenbedarf eines Untergrundwärmespeichers und die Fläche der von ihm versorgten Gebäude in Beziehung, so fallen entsprechende Schäden aber wohl nicht ins Gewicht.

3.6 Rechtliche Aspekte der thermischen Nutzung des Untergrundes

Wegen der in 3.5 genannten Umweltrisiken wurden in Deutschland Rechtsvorschriften aufgestellt, die in die Genehmigungsverfahren zur eingehen. Die meisten beruhen auf dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG), in Bayern auch auf dem Bayerischen Wassergesetz (BayWG). Die bayerischen Vorschriften sind in einem Merkblatt des Landesamtes für Wasserwirtschaft (BayLFW, 1996) niedergelegt. Die rechtlichen Aspekte der oberflächennahen Erdwärmenutzung sind für die Standortbewertung von höchster Bedeutung. Es ist allerdings nicht sinnvoll detailliert auf diese Thematik einzugehen, da die rechtliche Beurteilung sehr stark vom Einzelfall abhängig ist. Es werden also nur grundlegende Vorschriften wiedergegeben. Weiterführende Angaben zu rechtlichen Fragen der oberflächennahen Erdwärmenutzung sind bei DIEDRICH (1980), HEILAND (1997), MUND (1994), NAST (1997) und WENDEL (2000) zu finden. Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Genehmigungspraxis werden von SANNER (1999) berichtet. In Baden Württemberg wurde ein Leitfaden herausgegeben, in dem rechtliche Fragestellungen erläutert werden (MUVBW, 1998).

3.6.1 Bergrecht

Für die grundstücksbezogene Entnahme von Erdwärme aus Grundwasser oder Erdreich ist das Bundesberggesetz (BbergG) nicht anzuwenden. Bohrungen von mehr als 100m Tiefe erfordern allerdings eine Bohranzeige nach §127 BbergG. Weiterführende Angaben bei den oben genannten Autoren.

3.6.2 Wasserrechtliche Zulassungsverfahren

Verfahren, bei denen in das Grundwasser eingegriffen wird, bedeuten eine Benutzung des Grundwassers nach § 3, Abs. 1 Nr. 5 und 6 WHG (Wasserhaushaltsgesetz) und erfordern deshalb eine Erlaubnis oder Bewilligung. Die resultierenden Konsequenzen für die unterschiedlichen Verfahren sind in Tabelle 3-11 zusammengefaßt.

Verfahren	Sachverhalt und Rechtsgrundlage	Zielsetzungen der Wasserwirtschaft in Bayern (Merkblatt LfW Nr. 4.8-3)
Grundwasser-gekoppelte Wärmepumpen	Entnahme von Wärme aus dem zutage geförderten Grundwasser: Benutzung des Grundwassers (nach § 3, Abs. 1 Nr. 5 und 6 WHG) erfordert Erlaubnis oder Bewilligung	<ul style="list-style-type: none"> keine Abkühlung des Wassers um > 5°C Rückführung des abgekühlten Wassers in den Untergrund (gleicher Aquifer) Brunnenausbau muß Eindringen wasser-gefährdender Stoffe in das GW verhindern Nutzung oberflächennaher Aquifere
Vertikale Erdsonde	<p>Wärmeentzug aus dem Grundwasser: <i>Benutzung des Grundwassers (nach § 3, Abs. 2 Nr. 2 WHG) erfordert Erlaubnis oder Bewilligung</i></p> <p>Wärmeentzug aus dem „Erdreich“ (ungesättigte Zone): stellt keinen Eingriff in das Grundwasser dar und bedarf daher i.d.R. keiner wasserrechtlichen Gestattung. Es ist jedoch anzunehmen, daß i.d.R. die Wasserbehörden zumindest die „Maßgabe des Einzelfalls“ prüfen werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Bohrungen für Erdwärmesonden sind immer erlaubnispflichtiger Benutzungstatbestand Trinkwasserversorgung genießt Vorrang gegenüber Erdwärmennutzung Bei qualitativer oder quantitativer Einwirkung auf das GW erlaubnispflichtiger Benutzungstatbestand Erdsonden in WSG sind verboten, Ausnahmen in Zone IIIb sind möglich. In HSG grundsätzlich verboten. „Ergiebige Tiefengrundwasservorkommen“ bleiben TW-Versorgung vorbehalten, der Einbau von Sonden in Tiefengrundwasser soll grundsätzlich unterbleiben Einbau von Sonden oder Kollektoren nur bei freiem GW-Spiegel möglich Sondenfluid der Wassergefährdungsklasse 0 (in anderen Bundesländern auch Klasse 1)
Horizontale Wärmetauscher	Sind normalerweise genehmigungsfrei, wenn Grundwasser nicht beeinträchtigt wird. Einzelfallprüfung, ob Einwirkung auf das Grundwasser vorliegt dann: <i>Benutzung des Grundwassers (nach § 3, Abs. 2 Nr. 2 WHG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wassergefährdungsklasse 0 (in anderen Bundesländern auch Klasse 1)
Grundsätzlich:	<ul style="list-style-type: none"> Anzeige einer Bohrung bei der Unteren Wasserbehörde (§37 WHG) bei Freilegung des Grundwassers „Begrenzung“ der thermischen Nutzung ist erwünscht 	

Tabelle 3-11: Wasserrechtliche Aspekte der thermischen Nutzung des Untergrundes durch Wärme- und Kälteentzug in Deutschland und besondere Anforderungen in Bayern. Die Tabelle enthält sowohl Vorschriften als auch Zielsetzungen der Wasserwirtschaft, die im Genehmigungsverfahren im Einzelfall zum Tragen kommen können. Für thermische Energiespeicher im Untergrund liegen bisher keine speziellen Vorschriften vor. Es ist jedoch anzunehmen, daß bei diesen **mindestens** die selben Vorschriften gelten wie bei den Entzugsverfahren, sehr wahrscheinlich jedoch deutlich höhere Anforderungen an die Sicherheit gestellt werden.

Drei der genannten Rechtsvorschriften sind für die vorliegende Untersuchung von besonderer Bedeutung:

1. Der (weitgehende) Ausschluß von gespannten Grundwasserleitern von der thermischen Nutzung.
2. Der (weitgehende) Ausschluß von tieferen Grundwasserstockwerken von der thermischen Nutzung.
3. Der **vollständige** Ausschluß von Wasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten.

Bei einer Standortbewertung, die die rechtlichen Vorschriften miteinbezieht, ergeben sich aus Punkt 1 und 2 erhebliche Probleme. Für jeden Standort muß ermittelt werden, ob und in welcher Tiefe ein gespannter oder ein tieferliegender Grundwasserleiter angetroffen wird. Steht diese Tiefe fest, so muß bewertet werden, ob sich dadurch eine Anwendung des Verfahrens ausschließt oder sich nur eine qualitative Einschränkung ergibt (z.B. wenn eine Nutzung durch mehrere weniger tiefe Sonden möglich ist). Dahingehende Fragen und ihre Lösung werden in Kap. 8.2.4.3 erörtert.

Es wird darauf hingewiesen, daß die hier aufgeführten Rechtsvorschriften meist sehr allgemein formuliert sind. Deshalb ergeben sich für die Beurteilung von Vorhaben zur thermische Nutzung des Untergrundes relativ große Ermessensspielräume für den einzelnen Bearbeiter. Einige der zugrundeliegenden geologischen Begriffe, z.B. „tieferes Grundwasserstockwerk“, erfordern ohnehin eine der lokalen geologischen Situation angemessene Definition.

4 Geologie und Hydrogeologie im Untersuchungsgebiet

4.1 Erläuterungen zur geologischen Beschreibung

4.1.1 Verwendete und weiterführende Literatur

Eine ausführliche und umfassende Darstellung der Geologie Unterfrankens gibt GEYER (2000). An diesem Werk, das mir Herr PD Dr. G. Geyer freundlicherweise in Manuskriptform zur Verfügung stellte, orientieren sich die meisten Ausführungen zur Stratigraphie und Lithologie im Raum Unterfranken. Weitere Übersichtsdarstellungen geben die geologischen Führer von RUTTE & WILCZEWSKI (1983), MATTHES & OKRUSCH (1965) und SCHRÖDER (1970). Die umfassendste Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse bieten der „Wasserwirtschaftliche Rahmenplan Main“ (BAYGLA, 1993), das „Mainprojekt“ (ANDRES & GEORGOTAS, 1978) und die „Wasserwirtschaftlichen Rahmenuntersuchungen Donau und Main“ (DOBNER & WEINELT, 1980). Sehr detaillierte Darstellungen geologischer und hydrogeologischer Bedingungen auf lokaler Ebene bieten die Erläuterungen zu den amtlichen geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 (GK25; BAYGLA). Abbildung 4-1 zeigt im Überblick, zu welchen Blättern der TK25 solche Kartierungen und Erläuterungen vorliegen. Weitere wichtige Informationsquellen, insbesondere für die Gebiete, in denen bislang keine Kartierungen des BAYGLA (GK25) durchgeführt wurden, bieten die zahlreichen Dissertationen, Diplomarbeiten und Diplommkartierungen, die im Bereich Unterfranken vor allem von Studenten der Universität Würzburg angefertigt wurden.

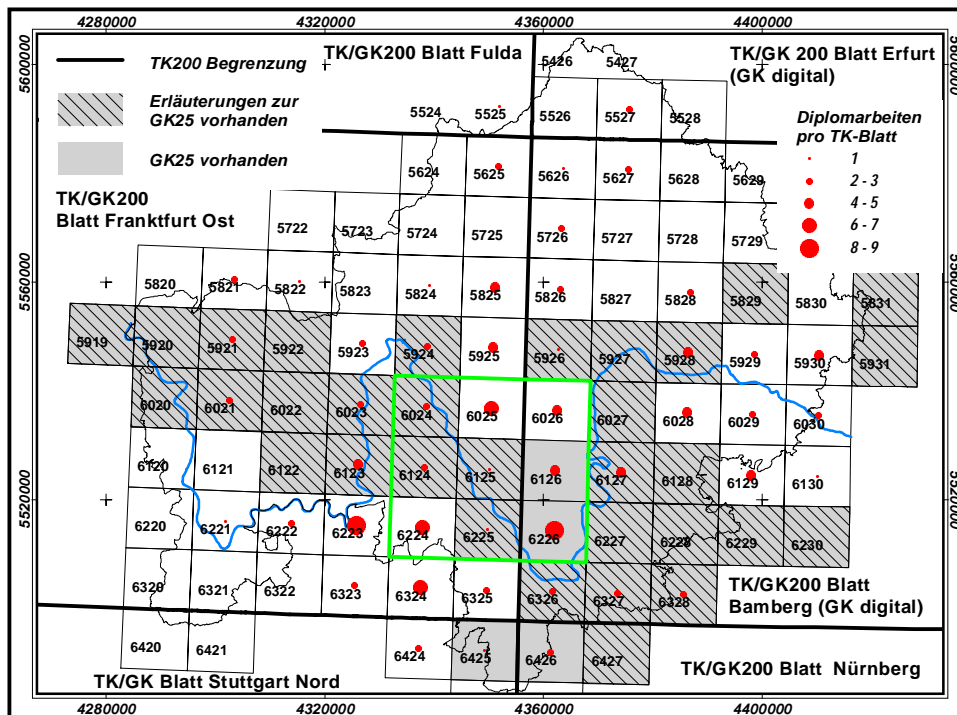


Abbildung 4-1: Übersicht über die bislang erschienenen amtlichen geologischen Karten des Bayerischen Geologischen Landesamtes (BayGLA) im Maßstab 1:25.000 (GK25) und 1:200.000 (GÜK200) sowie Diplomarbeiten und -kartierungen des geologischen Instituts der Universität Würzburg. Stand 1999. Grüner Rahmen: Beispiel-ausschnitt der detaillierten Bearbeitung (vgl. Abbildung 1-7).

TK: Topographische Karte
GK: Geologische Karte

4.1.2 Betrachtungsmaßstab

Die Beschreibung der Geologie im Untersuchungsgebiet Unterfranken orientiert sich an der Detailgenauigkeit der Geologischen Übersichtskarte 1:200.000 (GÜK200). Stratigraphische Einheiten und geologische Strukturen, die in diesem Kartenwerk nicht verzeichnet sind, werden auch hier nicht gesondert behandelt. Das bedingt in einigen Fällen, daß Horizonte mit teilweise sehr unterschiedlichen lithologischen Eigenschaften zu größeren Einheiten zusammengefaßt werden. Untergeordnete stratigraphischen Einheiten, die aufgrund ihrer Eigenschaften besondere Bedeutung für thermische Untergrundnutzungen haben, werden jedoch im Einzelfall ausführlicher behandelt.

4.1.3 Besonderheiten und Schwerpunkte

Die geologische Beschreibung hält sich mit Rücksicht auf die Ziele der Untersuchung nicht streng an die stratigraphische Gliederung, sondern faßt teilweise Schichten zusammen, die stratigraphisch nicht direkt aufeinanderfolgen (Beispiel: Untere und Obere Röttone). Ebenso werden auch größere stratigraphische Einheiten gemeinsam abgehandelt, sofern ihre Eigenschaften bezüglich der relevanten Eigenschaften ähnlich sind (Beispiel: Unterer und Mittlerer Buntsandstein).

Alle Angaben zur Verbreitung und zu den Flächenanteilen von Einheiten beziehen sich auf eine abgedeckte Version der GÜK200. Da die geringmächtigen quartären Bildungen (insbesondere Löß), die auf der GÜK200 fast 30% der Gesamtfläche Unterfrankens einnehmen, für die hier betrachteten thermischen Nutzungen nicht relevant sind, wurden sie bei der Erstellung der digitalen geologischen Karte von Unterfranken entfernt (vgl. dazu Kap. 7.1).

Die einzelnen geologischen Einheiten werden in dieser Beschreibung gemäß ihrer Bedeutung für die thermische Untergrundnutzung behandelt. Der Grad der Bedeutung wird durch folgende Faktoren bestimmt:

1. **Mächtigkeit der Einheit (Schicht):** Da die meisten thermischen Nutzungen sich über einen größeren Teufenbereich erstrecken, ist eine Schicht um so bedeutender, je größer ihr Anteil an der Gesamtmächtigkeit ist. Für verschiedene Verfahren ist die Frage von Bedeutung, ob die Mächtigkeit einer Schicht allein für eine Nutzung ausreichend ist.
2. **Verbreitung der Einheit:** Maßstab ist hier nicht nur die flächenhafte Verbreitung (Größe des Ausstrichbereichs einer Schicht), sondern vor allem der Bereich, in dem diese Schicht für eine Nutzung in Betracht kommt. Dies ist der Bereich, in dem eine Schicht bei Erschließungen bis 200m Tiefe noch angetroffen wird. Dieser Bereich ist deutlich größer als der Ausstrich (vgl. Kap. 7.2.3.1.4).
3. **Nutzungs- bzw. Nachfragepotential:** Neben der flächenhaften Verbreitung spielt in einigen Fällen auch eine Rolle, wie dicht der Verbreitungsbereich besiedelt ist. So haben z.B. die quartären Ablagerungen im dicht besiedelten Maintal nur eine geringe Verbreitung, während die großen Ausstrichbereiche des Buntsandsteingebietes im Spessart gering besiedelt sind (vgl. Kap. 6.4.2.2.2 und Tabelle 5-6).
4. **Besondere Eigenschaften:** Eigenschaften mit außergewöhnlich positivem oder negativem Einfluß für die thermische Nutzung. Beispiele hierfür sind hohe Wärmeleitfähigkeit oder extreme Verkarstungsanfälligkeit.

Besondere Beachtung finden die thermischen Eigenschaften der Gesteine, weil sie für die Bewertung meist von hoher Bedeutung sind. Da es über die thermischen Eigenschaften der Gesteine in Unterfranken nahezu keine Angaben in der Literatur gibt, wurden sie indirekt mit Hilfe der in Kap. 2.3.2.2 beschriebenen Methoden abgeschätzt. Die hierfür erforderlichen mineralogischen und sedimentpetrographischen Eigenschaften werden behandelt, soweit es der Bedeutung der Einheit entspricht (s.o.).

4.2 Geologisch-geomorphologische Übersicht

4.2.1 Oberflächenform

Unterfranken befindet sich größtenteils im Bereich des Süddeutschen Schichtstufenlandes. Dieses wird charakterisiert durch eine Abfolge schwach nach Osten und Südosten einfallender sedimentärer Gesteine des Mesozoikums. Aufgrund des Einfallens streichen von West nach Ost immer jüngere Gesteine aus. Wegen des Wechsels von verwitterungsanfälligen und –resistenten Gesteinen kommt es zur Ausbildung von markanten, etwa NNE-SSW verlaufender Geländestufen, die das Landschaftsbild prägen und namensgebend sind (Abbildung 4-2).

Die Schichtstufen und die ihnen vorgelagerten Flächen werden von den Tälern des Mains und seiner Nebenflüsse durchschnitten, wobei es im Bereich harter, verwitterungsbeständiger Gesteine zur Ausbildung tief eingeschnittener Kerbtäler mit sehr steilen Hängen kommt. Im Bereich tonig-sandig-mergeliger Gesteine sind weite, flache Talformen anzutreffen. Interessant ist die starke Korrelation zwischen der Gesteinsausbildung und der Morphologie. So herrschen in den Sandsteingebieten Hangneigungen von 8-15°, in den Kalk-

steingebieten solche von 3-8° und in den tonig-siltig dominierten Gebieten Hangneigungen von 0-3° Grad vor.

Im Norden, Nordwesten und Westen wird das im zentralen Unterfranken etwa 150 bis 350m hoch gelegene Gebiet von den Höhenzügen der vulkanischen Rhön, des Vogelsbergs und des kristallinen Spessarts begrenzt. Im Westen und Südwesten bildet die Keuperschichtstufe, mit den Haßbergen und dem Steigerwald die morphologische Begrenzung. Daraus ergibt sich eine morphologische Dreiteilung des Gebiets in den zentralen Bereich mit den Mainfränkischen Platten, den Rahmenhöhen sowie den Talbereichen des Mains und anderer Flüsse (MÜLLER, 1996; vgl. Abbildung 4-2).

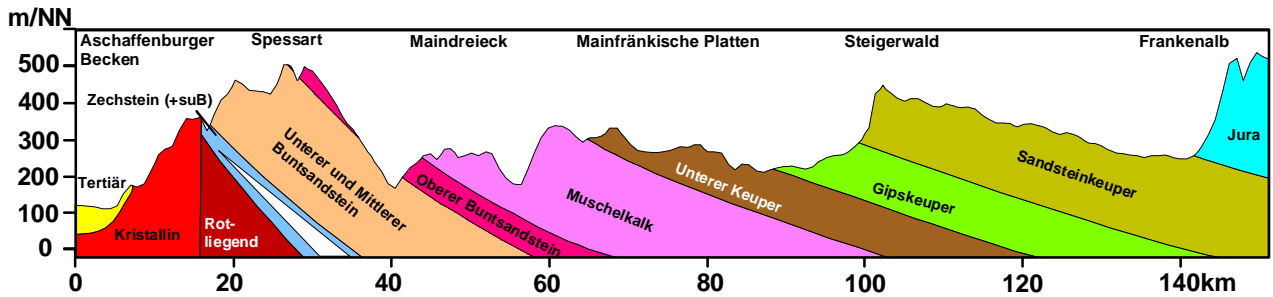


Abbildung 4-2: Vereinfachtes Querprofil durch Unterfranken von West nach Ost, 50-fach überhöht.

4.2.2 Gesteine

Die Geologie Unterfrankens wird vor allem durch Gesteine der Trias geprägt, deren gesamte Abfolge abgeschlossen ist. Gesteine der Trias nehmen mehr als 93% der Gesamtfläche ein. Jura und Perm treten in flächenmäßig kaum nennenswerten Anteilen im äußersten Osten bzw. Westen des Regierungsbezirks auf. Die verbleibenden 7% der Fläche werden von kristallinen Gesteinen des Spessarts, vulkanischen Gesteinen der Rhön sowie von tertiären und quartären Lockersedimente der Talungen eingenommen. Die Flächenanteile der maßgeblichen geologischen Einheiten Unterfrankens sind in Tabelle 5-6 wiedergegeben.

Die Gesteine der Trias decken ein weites Spektrum verschiedener Sedimentgesteine ab. Dieses beinhaltet grob- bis feinstkörnige siliziklastische Sedimente, Karbonate und Evaporite. Tabelle 4-1 faßt die Flächenanteile der in Unterfranken auftretenden Gesteinstypen zusammen.

Gesteinstyp	Fläche km ²	Anteil
Sandsteine	3053	35.7%
Verschiedene (vorwiegend tonig dominierte Abfolgen mit eingeschalteten Sandsteinen, Karbonaten, Evaporiten, Kohlen)	1868	21.9%
Kalksteine (und mergelige Gesteine)	1367	16.0%
Sand-Tonstein-Wechsellagen	983	11.5%
Tonsiltsteine	718	8.4%
Sand, Kies, Ton (Lockergesteine)	237	2.8%
Metamorphite	223	2.6%
Vulkanite	69	0.8%
Plutonite (bzw. "plutonitähnliche")	14	0.2%
Konglomerate	9	0.1%
Pyroklastika	6	0.1%
Gesamt	8546	100%

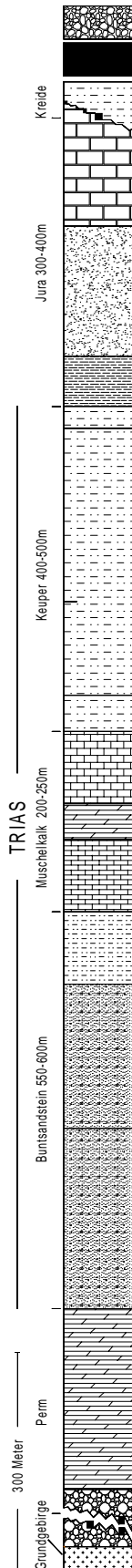
Tabelle 4-1: Flächenmäßiger Anteil verschiedener Gesteinstypen am geologischen Aufbau Unterfrankens, bestimmt anhand der abgedeckten Karte (GÜK200 digital; Kap. 7.1).

4.2.3 Historisch-geologischer Überblick

Der Bereich des heutigen Unterfranken lag zur Zeit der Trias im sogenannten Germanischen Becken, einem flachem Epikontinentalmeer, das im Norden mit dem arktischen Ozean in Verbindung stand. Durch diese Verbindung kam es immer wieder zu Meeresvorstößen, die von Zeiten längeren Trockenfallens unterbrochen wurden. Diese Wechsel führten, gemeinsam mit klimatischen Veränderungen, zu sich ständig ändernden Ablagerungsbedingungen. Nachdem sich am Ende des Perm das Zechsteinmeer zurückzog, herrschten während des Buntsandstein überwiegend terrestrische Bedingungen. Bei aridem Klima bildeten sich unter fluviatilen, teilweise auch äolischen Sedimentationsbedingungen, vorwiegend rote Sandsteine, in tieferen oder ruhigeren Beckenbereichen auch rötliche, siltige und tonige Gesteine. Im Muschelkalk kam es dann durch einen erneuten Meeresspiegelanstieg zur Ablagerung vorwiegend mariner Sedimente, meist Kalke, Mergel und tonige Gesteine. Im Mittleren Muschelkalk führte ein vorübergehender Meeresspiegelrückgang zur Bildung von Evaporiten, der Obere Muschelkalk war wieder vorwiegend vollmarin geprägt. Im Keuper zog sich das Meer wieder weitgehend zurück. Der Sedimentationsraum wurde in dieser Zeit von küstennahen Schwemmebenen, Deltabereichen und fluviatilen Systemen bestimmt, in denen tonige, sandige und karbonatische Sedimente nebeneinander abgelagert wurden. Episodische Überflutungen und Sabkhabildung führten zur Entstehung von Evaporiten zu Beginn des Mittleren Keuper (Gipskeuper). Im weiteren Verlauf des Mittleren Keuper wurden mächtige Sandsteinkomplexe von der vindelizischen Masse im Süden und Südosten aus geschüttet (Sandsteinkeuper). Diese wurden gegen Ende des Mittleren Keuper durch eintönige Tonsiltsteine abgelöst, die als Ablagerungen von Überschwemmungsebenen im Binnenland gesehen werden (Feuerletten). Im Oberen Keuper werden letztmals terrestrische Ablagerungen in einem flachen Küstenbereich unter lateral und vertikal rasch wechselnden Sedimentationsbedingungen gebildet. Sandsteinkomplexe in Rinnen, im Wechsel mit tonigen Sedimenten und Kohlen, verzahnen sich zum Hangenden hin mit ersten marinen Schichten des Unteren Jura. Im Verlauf des Jura wurde der gesamte Ablagerungsraum infolge der Transgression des Thethysozeans von Süden her überflutet. Von diesen marinen Sedimenten sind in Unterfranken nur Relikte erhalten. Etwa ab dem Mittlerem Jura begann die Heraushebung der Mitteldeutschen Kristallinschwelle, die das Meer nach Süden zurückdrängte. Unterfranken wurde zum Abtragsgebiet. Kreidesedimente fehlen vollständig. Erst im Oligozän führten Meeresvorstöße aus den Senkungszonen im Rheingebiet zur Sedimentation unter vorwiegend fluviatilen und limnischen Bedingungen in der Rhön und im Untermaingebiet. In den anderen Gebieten kam es unter dem Einfluß des subtropisch wechselfeuchten Klimas zu tiefgreifender Verwitterung der Kristallingebiete und zur Bildung von Rumpfflächen. Im Quartär befand sich der Raum im periglazialen Bereich mit Tundrenklima. In dieser Zeit entstanden die heute noch weitverbreiteten periglazialen Bildungen wie der allgegenwärtige Löß und die tiefeingeschnittenen Flußtäler mit ihren Sand-Kiesablagerungen. Diese werden im Holozän von Auelehmen und anderen Bildungen bedeckt.

4.2.4 Stratigraphischer Überblick

Abbildung 4-3 gibt einen Überblick über die wesentlichen stratigraphischen Einheiten Unterfrankens und angrenzender Gebiete.



Quartär: Sande und Kiese in Flußtälern „Mainquartär“.

Vulkanisches Tertiär : Basalte, Phonolithe und Pyroklastika, sehr variabel. Rhön, Untermaingebiet, Heldburger Gangschar.

Kreide: Limnisch-fluviatile Quarzsandsteine und Sande mit tonigen Zwischenlagen. Schlecht bis mäßig durchlässig. – In Unterfranken nicht vorhanden.

Malm: Überwiegend karbonatische Gesteine, teils in gebankter, teils in Riff-Fazies, häufig verkarstet. Bedeutendster Karstaquifer in Mitteleuropa. In Unterfranken nicht vorhanden.

Doggersandstein: Feste, mittel- bis grobkörnige Sandsteine. Bedeutender Kluft(-Poren)wasserleiter mit bereichsweise sehr guter Durchlässigkeit. Kommt in Unterfranken nicht vor.

Dogger, Opalinuston: Tonsteine und Schiefertone. Meist undurchlässig. – Kommt in Unterfranken nicht vor

Lias: Tonsteine, an der Basis Sandsteine, ausgeprägter Wasserstauer. Nur reliktilisch im Osten Unterfrankens vorhanden.

Oberer Keuper = Rhät: 30-35m Sand- und Tonsteine in Wechsellagerung. In Sandsteinfazies häufig sehr guter Kluft-Poren-Wasserleiter.

Mittlerer Keuper, Feuerletten: 45-60m, Violetrote Tonsiltsteine mit dolomitischen Zwischenlagen, Grundwasserstauer.

Mittlerer Keuper, Burgsandstein, Blasensandstein, Lehrbergschichten und Schilfsandstein (=Sandsteinkeuper): 200-260m grobkörnige Sandsteine mit tonigen Zwischenlagen. Bedingte Kluft(-Poren)wasserleiter (K_f $1 \cdot 10^{-5}$ bis $3 \cdot 10^{-4}$ m/s). Lehrbergschichten 25-40m: Tonsteine und Kalkmergel, GW-Stauer.

Mittlerer Keuper, Estherienschichten, Myophorienschichten (=Gipskeuper): Tonmergel, Gipslagen, z.T. bis 15m mächtig (Grundgipsschichten), Steinmergel; gesamt 90-130m mächtig; Grundwasserstauer.

Unterer Keuper: Kalk-Ton-Sandstein-Wechselfolge, sehr heterogen. Lokal gute Kluftgrundwasserleiter (Werksandstein, Oberer Sandstein) 30-50m.

Oberer Muschelkalk: Wechselfolge von Kalk- und Tonsteinen, 80m, bedingter Kluft- (Karst-)wasserleiter.

Mittlerer Muschelkalk: Dolomitische Mergel, Tonsteine, Zellenkalke, lokal Gips und Steinsalz, guter Karstwasserleiter, z.T. sehr stark mineralisierte Wässer.

Unterer Muschelkalk: Kalksteinbänke in typischer „Wellenkalkausbildung“ mit dünnen Tonzwischenlagen. Bei Verkarstung (v.a. in Störungszonen) guter GW-Leiter, meist aber ausgesprochener GW-Stauer.

Oberer Buntsandstein, Röttonsteine: Rote Ton- Siltsteine, GW-Stauer. ca. 65m, getrennt in Obere und Untere Röttonsteine durch den Rötquarzit (s.u.)

Oberer Buntsandstein, Rötquarzit, Plattensandstein: Feinsandsteine. Stellenweise gute Kluftwasserleiter.

Mittlerer und Unterer Buntsandstein, Sandsteine und Wechselfolgen: Mittel- bis grobkörnige Sandsteinepakete und Silt- Tonstein- Sandsteinwechselfolgen. Im allgemeinen gute Kluft(-Poren)wasserleiter. Gesamt etwa 400m mächtig

Unterer Buntsandstein Bröckelschiefer: 0-70m, Ton-, Silt- und Sandsteine. GW-Stauer (wird heute zum Zechstein gestellt).

Zechstein: Karbonate, Tonsteine, Anhydrit, Stein- und Kalisalz ("Zechsteinserien") in lokal sehr unterschiedlicher Mächtigkeit (30-300m), sehr stark mineralisierte Wässer.

Rotliegend: Sandsteine, Tonsteine und Fanglomerate, daneben Kohleflöze, Vulkanite und Pyroklastika. In Unterfranken nur etwa 9 km^2 ausstreichend.

Abbildung 4-3: Stratigraphische Übersicht und geologisch-hydrogeologische Kurzcharakteristik der Abfolge in Unterfranken und angrenzenden Gebieten

4.3 Geologisch-hydrogeologische Beschreibung der Schichtenfolge in Unterfranken

4.3.1 Kristallines Grundgebirge

Das präpermische Grundgebirge streicht in Unterfranken im Bereich des kristallinen Spessarts auf einer Fläche von etwa 240 km² (2,8% der Gesamtfläche) aus. Es wird im Westen von den quartären und tertiären Lockersedimenten des Untermain, im Osten und Süden von paläozoischen und mesozoischen Sedimenten überlagert. Nach Osten hin wächst die Überlagerung durch die sedimentäre Abfolge rasch an, so daß das Kristallin dort in den meisten Gebieten in Tiefen liegt, die für die hier angestellten Betrachtungen uninteressant sind (>200m). Im Westen ist die Überlagerung durch Quartär und Tertiär weniger mächtig, so daß im gesamten unterfränkischen Anteil des Aschaffener Beckens das kristalline Grundgebirge bei Erschließungen bis 200m Tiefe erreicht werden könnte. Abbildung 4-4 zeigt die Verbreitung des kristallinen Grundgebirges im Untersuchungsraum.

4.3.1.1 Geologie

Im kristallinen Vorspessart treten Metamorphite und „plutonitähnliche“²⁶ Gesteine unterschiedlichen Alters auf. Sie werden heute in sieben Nordost-Südwest streichende Einheiten gegliedert, die als lithostratigraphische Einheiten gesehen werden. In älterer Literatur und Karten erscheinen demgegenüber noch Formationsnamen, die sich aus der Gesteinsbezeichnung und dem Hauptmineralbestand zusammensetzen. Da im Hinblick auf die untersuchte Thematik Gesteinsausbildung und Mineralbestand eine größere Bedeutung haben als genetische Deutungen, wurden diese älteren Bezeichnungen den modernen vorgezogen. Die Formationsbezeichnungen orientieren sich an MATTHES & OKRUSCH (1965) und der Gliederung auf der GÜK200 Blatt Frankfurt Ost (1985), ohne dabei alle Details zu übernehmen. Nach dieser Gliederung ergeben sich für den kristallinen Spessart vier Einheiten, die hier von NW nach SE aufgelistet sind (vgl. Abbildung 4-4):

- Die **Quarzit-Glimmerschiefer-Serie** (QuGISch) besteht vorwiegend aus Glimmerschiefern verschiedener Ausprägung, die selten auch in Gneise übergehen. In die partienweise quarzreichen Glimmerschiefer sind Quarzitlagen und -züge, die Mächtigkeiten von bis zu 400m erreichen, eingeschaltet. Wesentlich im Hinblick auf thermische Nutzungen ist vor allem die bereichsweise hohe Quarzföhrung der Gesteine.
- Zone der **staurolithführenden Paragneise** (STPGn). Die Mächtigkeit beträgt bis zu 2000m (GEYER, 2000). Es handelt sich zu 95% um Gneise, 5% Quarzite. Nach MATTHES & OKRUSCH (1965) bestehen die Gneise vorwiegend aus Plagioklas, Quarz, Biotit und Muscovit.
- Es folgt eine Zone, die hier als **Zone der Gneise und Schiefer** zusammengefaßt wird (GnSch). Es treten vor allem Gneise und Schiefer unterschiedlicher Ausbildung auf, bereichsweise sind Marmore und Amphibolithe eingeschaltet.
- Der **Diorit(Quarzdiorit)-Granodiorit-Komplex** (G): Hierbei handelt es sich nach heutiger Auffassung wahrscheinlich nicht um Intrusivgesteine sondern um Metamorphite mit nach Mineralbestand und Textur plutonitähnlicher Ausbildung (GEYER, 2000).

Die Gesteine des Spessart nehmen innerhalb der Palette der metamorphen Gesteine ein sehr breites Spektrum ein, dem die Zusammenfassung in die vier genannten Einheiten nicht unbedingt gerecht wird. Genauere Betrachtungen scheinen aber nur anhand von wesentlich detaillierterem Daten- und Kartenmaterial möglich. Da andere, weiter verbreitete geologische Einheiten für die thermische Nutzung interessanter sind, wird der kristallinen Spessart nicht ausführlicher behandelt. Übersichten zur Petrographie und Genese des kristallinen Spessart geben BACKHAUS (1967), GEYER (2000), MATTHES & OKRUSCH (1965), WEINELT ET AL. (1985) oder WALTER (1995).

²⁶ Wurden in der älteren Literatur als Plutonite gedeutet.

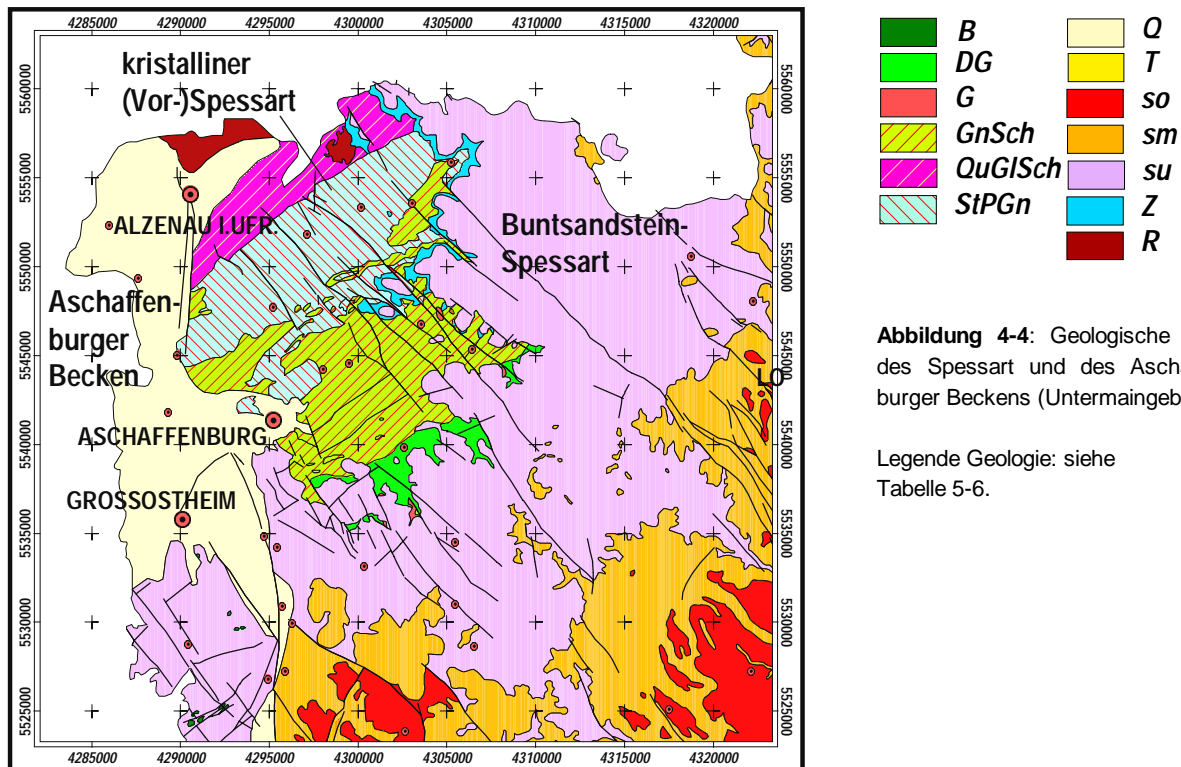


Abbildung 4-4: Geologische Karte des Spessart und des Aschaffener Beckens (Untermaingebiet).

Legende Geologie: siehe Tabelle 5-6.

4.3.1.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Die kristallinen Gesteine sind im unverwitterten, ungeklüfteten Zustand nahezu wasserundurchlässig. Grundwasser kann in geringem Umfang ausschließlich durch Tiefbohrungen in Kluff- und Verwerfungszonen erschlossen werden (WEINELT, 1962). Die Kluftdichte ist allerdings gering und nimmt nach der Tiefe hin ab, so daß die Wasserwegsamkeit auf seltene, tiefreichende Verwerfungszonen beschränkt ist (STREIT & WEINELT, 1971). Die tiefgründigen Verwitterungsdecken des Kristallin weisen bereichsweise gute Durchlässigkeiten auf. Dort bilden sich lokale Grundwasservorkommen, deren Sohlschicht das unverwitterte Gestein bildet. Die Mächtigkeit dieser Verwitterungsdecken schwankt stark und liegt häufig bei 3-4m, in Einzelfällen auch weit darüber. Sie kann dann bis zu 20 oder gar 30m erreichen (MATTHES & OKRUSCH, 1965 bzw. WEINELT, 1962). Die Korngrößenverteilung des Zersatzmaterials zeigt feinsandigen bis schluffigen Charakter. Daneben treten in sehr gut durchlässigen quartären Schuttmassen lokale Grundwasservorkommen auf, die häufig mit denen der Zersatzzonen in Verbindung stehen (WEINELT, 1962). Pleistozäne Talkiese sind meist stark verlehmt und haben schlechte Durchlässigkeiten.

UDLUFT (1979) faßt die Wässer des kristallinen Vorspessarts mit den Wässern der Rhönbasalte hydrochemisch zusammen und beschreibt sie als im Allgemeinen schwach mineralisiert mit einem Lösungsinhalt um 70 mg/l. Die elektrische Leitfähigkeit liegt bei 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°), unter Einfluß von landwirtschaftlicher Nutzung oder einer weitflächigen Lößüberdeckung auch bei 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der pH-Wert liegt um 5,4.

4.3.1.3 Petrographie und thermische Parameter

Die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine innerhalb der einzelnen Serien ist nach den Literaturangaben sehr variabel. Es ist wegen der geringen Verbreitung der kristallinen Gesteine deshalb nicht lohnend sie im Detail wiederzugeben. Tabelle 4-2 zeigt in einer Übersicht die wesentlichen Gesteinstypen und die entsprechenden geschätzten thermischen Parameter für die einzelnen Serien.

Serie	Mineralbestand /Ausbildung	λ_e [W/(mK)]		ρc [10^6 J/(m ³ K)]	
		min	max	min	max
Quarzit-Glimmerschiefer-Serie (QuGISch)	Quarzite	5	6	2.2	2.6
	quarzreiche Glimmerschiefer	3.5	5		
	Glimmerschiefer	2.0	3		
Staurolithführende Paragneise (STPGn)	Plagioklas, Quarz, Biotit, Muscovit	3.5	4.5		
Zone der Gneise und Schiefer (GnSch)	Gneise und Schiefer	2.5	3.5		
	Marmore	2.6	2.9		
	Amphibolithe	3.5			
Diorit(Quarzdiorit)-Granodiorit-Komplex (G)	Quarzdiorit (-ähnliche)	2.8	3.5		
	Granodiorit (-ähnliche)	2.5	3		

Tabelle 4-2: Thermische Parameter der wesentlichen Gesteinstypen im kristallinen Spessart, abgeschätzt aus dem Hauptmineralbestand nach Kap. 2.3.2.2 und Vergleichswerten aus der Literatur (vgl. Kap. 2.3.2.2)

4.3.2 Paläozoikum

Paläozoische Gesteine streichen ausschließlich am Nord- und Nordostrand des kristallinen Spessart aus. Es handelt sich dabei um permische Sedimente, die insgesamt 0,2% der Fläche Unterfrankens einnehmen. Davon entfallen 9km² auf Konglomerate und Brekzien des Rotliegend und 15km² auf Zechsteinsedimente vielfältiger Ausbildung. Wegen der geringen Verbreitung dieser Gesteine werden die paläozoischen Gesteine hier nicht eingehender behandelt.

Es bleibt anzumerken, daß nach den Beschlüssen der Subkommision Perm-Trias der Bröckelschiefer, der vormals dem Unteren Buntsandstein zugerechnet wurde, heute offiziell zum Zechstein gehört (LEPPER, 1993). Da dies aber, mit wenigen Ausnahmen (z.B. GK 500, 4. Auflage, BAYGLA, 1996) in den aktuell verfügbaren Datenquellen noch nicht verwirklicht ist, wird der Bröckelschiefer in dieser Arbeit als *suB* bezeichnet und dem Unteren Buntsandstein zugerechnet²⁷.

4.3.2.1 Rotliegend (r)

Rotliegendesedimente werden in dieser Untersuchung aufgrund ihrer geringen Verbreitung und der großen Tiefenlage, in denen sie in den übrigen Gebieten Unterfrankens anzutreffen sind, nicht berücksichtigt.

4.3.2.2 Zechstein (z)

Ablagerungen des Zechstein sind in Unterfranken kaum weiter verbreitet als das Rotliegend, spielen wegen ihrer salinaren Wässer aber für hydrochemischen Betrachtungen eine gewisse Rolle. In den Schwellengebieten des Spessarts und der Rhön tritt der Zechstein aufgrund der präpermischen Hochlage hauptsächlich in dolomitisierter Riff-Fazies auf. Die Mächtigkeit des anstehenden Zechsteins beträgt dort meist nur wenige Meter. In den Trogbereichen beiderseits der Spessart-Rhönschwelle ist er in Beckenfazies z.T. mit mächtigen Steinsalzlager ausgebaut. UDLUFT (1979) trennt die Wässer des Zechsteins gemäß ihrer Herkunft und ihres wasserchemischen Auftretens in den Mg-Ca-HCO₃-Typ des östlichen Spessarts und den Na-Cl-Typ der Rhön. Der Aufstieg salzhaltiger Wässer aus dem Zechstein ist für den Chemismus vieler Heil- und Mineralwässer in der südlichen Rhön (z.B. Bad Kissingen) und im nördlichen Spessart (z.B. Bad Orb) von Bedeutung.

²⁷ Z.B. für Flächenberechnungen, die auf älteren Kartenmaterialien beruhen.

4.3.2.3 Bröckelschiefer (*suB**)

Der Bröckelschiefer (*suB*; vgl. auch Tabelle 4-3) besteht im Wesentlichen aus rotbraunen Tonsiltsteinen. An seiner Basis tritt meist eine Brekzie aus Verwitterungsprodukten des Liegenden auf. Weiterhin sind insbesondere im unteren Bereich Einschaltungen von grüngrauen Siltsteinen, im oberen Bereich eisenreiche Horizonte feststellbar. Die Mächtigkeiten variieren auf kurze Distanz stark, da der *suB* ein Paläorelief auskleidet. Sie werden von GEYER (2000) mit 40m i.M. angegeben, können aber auch deutlich über oder unter diesem Wert liegen.

Hydrogeologie: Die feinkörnigen Gesteine des *suB* sind geringdurchlässig und bilden die Sohlschicht des darüberliegenden Hauptgrundwasserstockwerks des Buntsandstein. Nach UDLUFT (1969) ist die Durchlässigkeit im Bereich der Rhön so gering, daß Verbindungen zwischen dem Zechstein-Aquifer im Liegenden und dem hangenden Buntsandsteinstockwerk nur im Bereich besonderer geologischer Strukturen auftreten. Dieses Erkenntnis läßt sich auf den Spessart übertragen.

Auf die **thermischen Eigenschaften** des *suB* wird an dieser Stelle nicht speziell eingegangen. Grundsätzlich gelten für alle siltig-feinsandig-tonige Gesteine im Untersuchungsgebiet die für die Röttonsteine gemachten Angaben (Kap. 4.3.3.3).

4.3.3 Buntsandstein (s)

4.3.3.1 Verbreitung, Bedeutung und Gliederung

Die Ausstrichfläche des Buntsandstein in Unterfranken beträgt fast 3000km² bzw. 35% der Gesamtfläche. Er tritt im westlichen und nordwestlichen Bereich des Regierungsbezirks und bildet dort den nichtmetamorphen Anteil der Höhenzüge des Spessarts bzw. den Sockel des tertiären Deckgebirges in der Rhön. In den östlichen Gebieten wird er nur durch Tiefbohrungen erschlossen und ist dort als Aquifer mit Thermalwasserführung von Interesse (vgl. BAUER, 2000). Bei einer Gesamtmächtigkeit von 500 bis 650m hat er einen sehr hohen Anteil am geologischen Aufbau der Region.

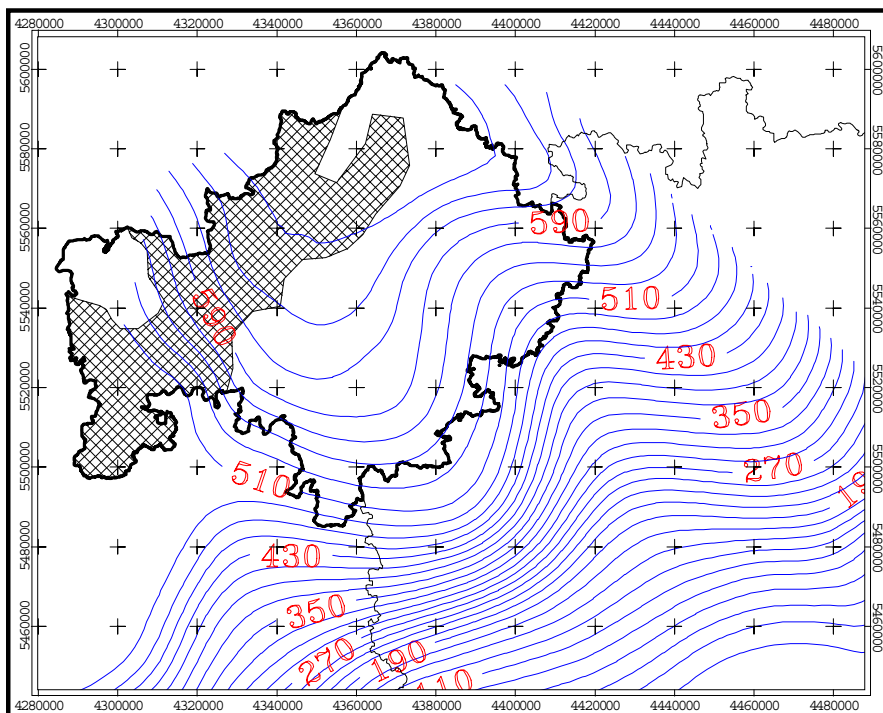


Abbildung 4-5: Verbreitung und Mächtigkeiten des Buntsandstein in Nordbayern. Im Wesentlichen nach BAYGLA (1996).

Die Mächtigkeiten nehmen in Unterfranken von Nordwesten nach Südosten tendenziell ab, während die Korngrößen in dieser Richtung zunehmen. Die größten Mächtigkeiten werden im Raum Bad Neustadt (Bohrung Mellrichstadt: 695m), die geringsten im Südwesten Unterfrankens (Bohrung Bad Mergentheim: 488m) angetroffen (RUTTE & WILCZEWSKI, 1983). Bei den Gesteinen des Buntsandstein handelt es sich fast aus-

schließlich um siliziklastische Sedimente, wobei- mittel bis grobkörnige Sandsteine den größten Anteil ausmachen. Feinkörnige Sedimente treten nur im untersten und im oberen Bereich der Abfolge in größerem Umfang auf. Konglomeratische Gesteine findet man bereichsweise als transgressive Ablagerungen an der Basis einiger Abfolgen, insbesondere aber auch in den Schwellenregionen und in Richtung der Beckenränder (vgl. Kap. 4.2.3).

Die stratigraphische Gliederung des Buntsandstein in Deutschland wurde lange Zeit intensiv diskutiert. Zwar ist die stratigraphische Zuordnung und Namensgebung für die Thematik dieser Arbeit unerheblich, um begrifflichen Verwirrungen vorzubeugen, werden in Tabelle 4-3 verschiedene Gliederungsschemata einander gegenüber gestellt. Abbildung 4-6 zeigt die Stratigraphie des Buntsandstein in Nordbayern anhand eines Säulenprofils.

Gliederung nach:	R.-B (1974)		BayGLA (1996)	BayGLA (1964)	LEPPER (1993)
Unterer Muschelkalk			Myophorien-Schichten	Myophorien-Schichten	Myophorien-Schichten
Oberer Buntsandstein, so					
Röt-Folge	so 4	s8	Obere Röttonsteine	Obere Röttonsteine	Röt-Folge
			Rötquarzit	Rötquarzit	
	so 3		Untere Röttonsteine	Unt. Röttonsteine	
			Grenzquarzit	Grenzquarzit	
	so 2		Plattensandstein	Plattensandstein	
	so 1		Chirotherienschiefer	Chirotherienschiefer	
Mittlerer Buntsandstein, sm					
Solling-Folge	smS	s7	Thür. Chirotheriensandst.	Chirotheriensandstein	Solling-Folge
			Solling-Sandstein		
Hardeggen-Folge	smH	s6	Karneol-Dolomit-Horizont	Karneol-Dolomit-Schichten	Hardeggen-Folge
			Felssandstein	Felssandstein	
			Hardeggen-Wechselfolge	Geiersberg-Wechselfolge	
			Hardeggen-Grobsandstein	Geiersberg-Grobsandstein	
Detfurth-Folge	smD	s5	Detfurth-Wechselfolge	Zwischenschichten	Detfurth-Folge
			Detfurth-Geröllsandst.	Geiersberg-Geröllsst.	
Volpriehausen-Folge	smV	s4	Volpriehausen-Wechself.	Rohrbrunner-Wechselfolge	Volpriehausen-Folge
			Volpriehausen-Geröllsst.	Rohrbrunner-Geröllsst.	
Unterer Buntsandstein, su					
Salmünster-Folge	suS	s3	Tonlagen-Sandstein	Miltenberger- WF	Bernburg-Folge
			Basis-Sandstein		
Gelnhausen-Folge	suG	s2	Dickbank-Sandstein	Miltenberger-Sst	Calvörde-Folge
			ECK'scher Geröllhorizont	ECK'scher Geröllhorizont	
			Heigenbrücken-Sandst.	Heigenbrücken Sandstein	
Bröckelschiefer-Folge	suB	s1		Bröckelschiefer Folge	
Zechstein			Bröckelschiefer		Bröckelschiefer-Folge

Tabelle 4-3: Gegenüberstellung verschiedener Gliederungsvorschläge für den Buntsandstein in Nordbayern und Deutschland. R.B. (1974) = RICHTER-BERNBURG (1974). Zusammenstellung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Dr. W. Bauer.

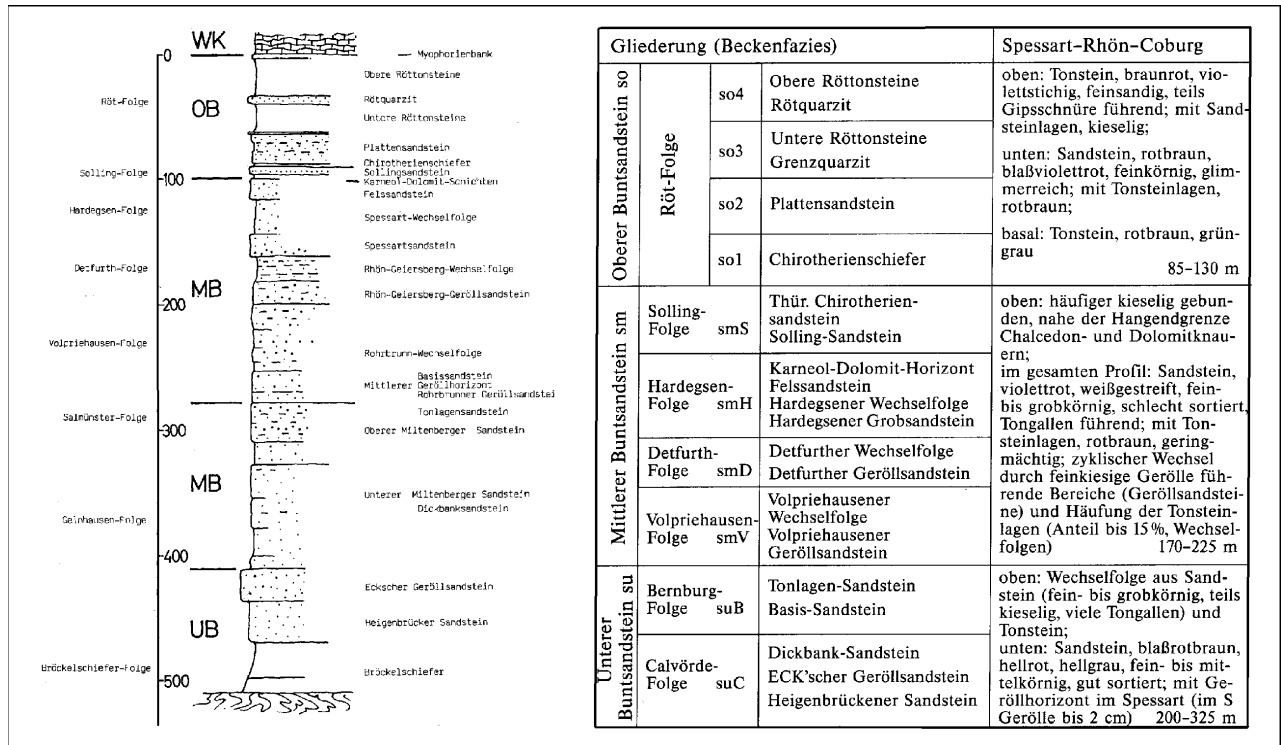


Abbildung 4-6: Stratigraphie und Kurzbeschreibung des Buntsandstein in Nordbayern. Die Verhältnisse in Unterfranken entsprechen etwa der Kategorie „Beckenfazies“. Profil aus RUTTE & WILCZEWSKI (1983), Tabelle aus BAYGLA (1996).

4.3.3.2 Unterer und Mittlerer Buntsandstein (su-sm)

4.3.3.2.1 Geologie

Mit Ausnahme des Bröckelschiefer, der eher tonig ausgebildet ist und nach neueren Vorstellungen dem Zechstein zugerechnet wird (Kap. 4.3.2), handelt es sich beim *su* und *sm* vorwiegend um Sandsteine, deren hydrogeologische und thermische Eigenschaften sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Die Gesamtmächtigkeit des Unteren und Mittleren Buntsandstein ohne (Bröckelschiefer) beträgt zwischen 350 und 450m. Gliederung, in Unterfranken übliche ältere Bezeichnungen und Lokalnamen, mittlere Mächtigkeiten, flächenhafte Verbreitung und Ausbildung des *su-sm* sind im Wesentlichen Abbildung 4-6 zu entnehmen. Da die beiden Einheiten hinsichtlich ihrer für die thermischen Nutzung relevanten Eigenschaften weitgehend ähnlich sind, werden sie hier gemeinsam abgehandelt.

Bei den Gesteinen des *sm* und *su* handelt es sich vorwiegend um mittel- bis grobkörnige, meist rötliche Sandsteine, die von Einschaltungen geringmächtiger Ton-, Silt- und Feinsandlagen unterbrochen werden. Sowohl im oberen Bereich des *su* als auch im gesamten *sm* unterscheidet man „Sandsteine“ und „Wechselfolgen“ (vgl. Abbildung 4-6), wobei Erstere zusammenhängende Sandsteinpakete größerer Mächtigkeit, letztere unregelmäßige Wechsellagerungen gröber- und feinerkörniger Sedimente darstellen. Die Sandsteinpakete befinden sich im Allgemeinen im Liegenden, die Wechselfolgen im Hangenden der Folgen. Mächtigkeiten und prozentualer Anteil von Sandsteinen und Wechselfolgen sind regionalen Variationen unterworfen. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über die mittleren Verteilungen in Unterfranken. Danach entfallen etwa 60% auf die Sandsteine, 40% auf die Wechselfolgen. Angaben über das Sand-/Tonstein-Verhältnis innerhalb der Wechselfolgen liegen im regionalen Maßstab nicht vor. Nach BAYGLA (1996) liegt der Tonanteil innerhalb der Wechselfolgen bei maximal etwa 15%. Insgesamt wird der *su-sm* demnach deutlich von sandigen Gesteinen dominiert.

Folge	Mächtigkeiten in Unterfranken [m], in () Extremwerte			
	Kürzel	„Sandsteine“	Wechselfolgen (und Äquivalente)	Gesamt
Solling	<i>smS</i>	2,5–8	0,1-1	3-10 (22)
Hardeggen	<i>smH</i>	12-20 (smHS) + 15-25 (smHF)	20-30	55-70
Detfurth	<i>smD</i>	18-26	13-20 (43)	30-45 (60)
Volpriehausen	<i>smV</i>	6 (21-38)	50-60	70-85
Saalmünster	<i>suS</i>	10-20	30-40	50-60
Gelnhausen	<i>suG</i>	vorw. Sandsteine	keine	150

Tabelle 4-4: Mächtigkeiten der „Sandsteine“ und „Wechselfolgen“ der verschiedenen Folgen des *su* und *sm*. Angaben i.W. aus GEYER (2000). Leicht abweichende Angaben macht UDLUFT (1969) für die Rhön.

Die siliziklastischen Gesteine des *su* und *sm* umfassen in Unterfranken ein Korngrößenspektrum von geröllführenden Grobsandsteinen bis hin zu tonigen Siltsteinen. Dabei treten unterschiedlichste Sortierungs- und Rundungsgrade auf. Charakteristisch sind Sandsteine mittlerer Korngröße. Umfangreiche Untersuchungen zu diesem Thema wurden von DJAHANGUIRI-KREMIANS (1977) und MAHADJER (1978) durchgeführt. Nach diesen Autoren liegen die Korngrößen (Medianwerte) bei 0,16-0,32mm im *su* und 0,1-0,46mm im *sm* im Bereich des zentralen Spessart (Mainviereck). Die Sortierung wird als gut im *su* und als gut bis mittel im *sm* bezeichnet. Diese Werte stellen nur grobe Anhaltswerte dar, die lokal starken Schwankungen unterworfen sein können. Von Interesse für diese Untersuchung sind vor allem die mineralogische Zusammensetzung und die Porosität, da diese Parameter die thermischen Eigenschaften der Gesteine bestimmen (Kap. 4.3.3.2.3). Hydrogeologisch relevante sedimentpetrographische Parameter werden in den entsprechenden Kapiteln besprochen.

4.3.3.2.2 Hydrogeologie

Grundwasserleiter: Nach SCHWARZMEIER (1980) bildet der Mittlere Buntsandstein mit seinen mächtigen Sandsteinen zusammen mit den oberen Einheiten des Unteren Buntsandsteins einen zusammenhängenden Grundwasserleiter, dessen Sohlenschicht die Hangendgrenze der Bröckelschiefer-Folge darstellt. Die Sandsteinfolgen des Buntsandstein stellen typische Kluftgrundwasserleiter dar. Besonders hervorzuheben ist der Umstand, daß es sich bei der i.M. etwa 400m mächtigen Abfolge von Sandsteinen um einen nahezu einheitlichen Aquifer handelt. Es treten zwar trennende Horizonte auf, diese werden aber durch laterale fazielle Änderungen, vor allem aber durch Klüfte und Verwerfungen so häufig unterbrochen, daß der ganze Komplex als einheitliches System angesehen werden kann.

Der Tonanteil in den Wechselfolgen wirkt sich insgesamt kaum auf die Permeabilität aus, da diese vorrangig durch die Klüftigkeit bestimmt wird (s.u.). Sandsteine und Wechselfolgen weisen zwar unterschiedliche Muster der Kluftverteilung auf, insgesamt können aber ähnliche hydraulische Eigenschaften erwartet werden.

Durchlässigkeit: Da es sich bei den Aquiferen im Buntsandstein fast ausnahmslos um Kluftgrundwasserleiter handelt, ist die am Kern gemessene **Gesteinsdurchlässigkeit** nahezu unbedeutend. Als Beispiel werden hier Meßwerte aus FIEDLER (1993) angegeben, der an Bohrkernen aus dem Bereich Lengfurt-Steinbach k_f -Werte von $1,2 \cdot 10^{-10}$ bis $7,4 \cdot 10^{-10}$ m/s ermittelte (Hardeggen-Sandstein, -Wechselfolge und Soling-Sandstein). WRABEL (1993) gibt für sechs Sandsteinproben aus dem *su* und *sm* Werte zwischen von $2,3 \cdot 10^{-8}$ und $1,7 \cdot 10^{-10}$ m/s an. UDLUFT (1969) ermittelte in der Südrhön Werte um $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, wobei Werte, die senkrecht zur Schichtung gemessen wurden, um den Faktor 2 bis 10 niedriger lagen, als die parallel zur Schichtung gemessenen. Für die aus Pumpversuchen ermittelte **Gebirgsdurchlässigkeit** werden von EINSELE & MERKLEIN (1978) für den Spessart Werte zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $1 \cdot 10^{-7}$ m/s zitiert, wobei nach ihren Angaben das Maximum der Meßwerte zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s liegt. Die Gebirgsdurchlässigkeit liegt damit um den Faktor 10^2 bis 10^5 höher als die durch die Poren bedingte Gesteinsdurchlässigkeit. Letztere spielt deshalb bei der Grundwasserbewegung im kurz- und mittelfristigem Rahmen keine Rolle. Regionale Trends der Durchlässigkeit lassen sich nicht ableiten, vielmehr fällt auf, daß sich bei eng benachbarten

Bohrungen **Abweichungen von bis zu fünf Zehnerpotenzen** bei den im Pumpversuch ermittelten k_F -Werten ergeben (vgl. auch Abbildung 4-31).

Klüftigkeit: Da der *su-sm* einen Kluftwasserleiter darstellt, ist das Auftreten, die Ausbildung und die Verteilung von Klüften entscheidend für die hydraulischen Verhältnisse im Aquifer. Naturgemäß sind diese Eigenschaften sehr unregelmäßig verteilt, so daß im regionalen Maßstab nur relativ grobe pauschale Angaben gemacht werden können. Nach Angaben aus verschiedenen Quellen (FIEDLER, 1993; WRABEL, 1993) kann von einem mittlerem Kluftabstand von etwa 1m ausgegangen werden (0,2-5m). Es besteht eine Abhängigkeit von der tektonischen Beanspruchung, der „Härte“ und der Mächtigkeit der Bänke. Die mittlere vertikale Kluftlänge liegt bei bis 1m. Es treten Kluftweiten von bis zu 10cm auf, wobei Klüfte unter 2cm Öffnungsweite deutlich überwiegen. Die geringsten Kluftabstände und die größten Kluftweiten treten in Verwerfungsnähe und Hangzerrißungszonen an Steilhängen auf. Kluftfüllungen (Lehm, Kalzit, Eisen-Manganerze, Baryt u.a.) sind eher selten.

Porosität und nutzbares Hohlraumvolumen: Für den *sm* werden von verschiedenen Bearbeitern (Übersicht in EINSELE & MERKLEIN, 1978) Gesamtporenvolumen im Bereich von 2-16% angegeben. Ein realistischer Mittelwert liegt bei 12-13% (MÄRZ, 1977). Das nutzbare Porenvolumen, das fast ausschließlich durch das Kluftvolumen gestellt wird, liegt nach UDLUFT (1969) bei 0,2 bis 0,6% in der Südlichen Rhön (GEORGOTAS, 1972: 0,4%), im Spessart bei 0,12% nach AL-AZAWI ET AL. (1978; bei Lohr). Für die gleiche Lokalität gibt UDLUFT (1972) Werte von 0,07 bis 0,18% (i.M. 0,13%) für den *su* an. Das Kluftvolumen nimmt zur Tiefe hin ab, in 100m Tiefe ist mit weniger als 0,1% zu rechnen, während an der Oberfläche bis zu 5% gemessen werden. In noch größeren Tiefen kann die Grundwasserführung auf Null reduziert sein. WITTMANN (1972) gibt an, daß die Kluftweiten in dünnbankigen Sandsteinlagen gering und die Kluftabstände klein sind, während bei mächtigeren Bänken weite Klüfte in größeren Abständen zu beobachten sind.

Erschließung von Grundwasser: Grundwasser läßt sich aus den Sandsteinen des *su* und *sm* im Allgemeinen nur dort erschließen, wo eine erhöhte Klüftigkeit auftritt, also im Bereich von Verwerfungszonen und begrenzt auch im Bereich von Hangzerrißungsklüften. Auch dort besteht allerdings das Risiko von Fehlbohrungen, da die Klüfte sehr unregelmäßig über den Gesteinsverband verteilt sind (BAYGLA, 1993). Damit lassen sich auch die auf engem Raum stark variierenden Gebirgsdurchlässigkeiten erklären (vgl. auch Abbildung 4-31).

Die spezifische Ergiebigkeit von Brunnen im *sm* liegt größenordnungsmäßig im Bereich von 0,3-0,6 l/(s·m) (Abbildung 4-7). Lokal werden aber auch abweichende Werte festgestellt. So liegen die spezifische Ergiebigkeiten nach WITTMANN (1972) auf Blatt Rothenbuch bei 0,6 bis 4,4l/(s·m), im gesamten Spessart i.M. bei 0,4l/(s·m) (SCHWARZMEIER (1979). Nach SCHWARZMEIER (1980) sind im Bereich von Blatt Lohr an 16 Brunnen spezifische Ergiebigkeiten von 0,0006 bis 1,17 l/(s·m) bei einem Mittelwert von etwa 0,5l/(s·m) festgestellt worden (*su* bis *sm*VS, teilweise mit Pleistozän). Die auf engem Raum stark variierenden Verhältnisse werden auch hier dadurch dokumentiert, daß beispielsweise im Bereich Rodenbach bei unmittelbar benachbarten Bohrungen Unterschiede in der spezifischen Ergiebigkeit von etwa 5 Zehnerpotenzen auftreten.

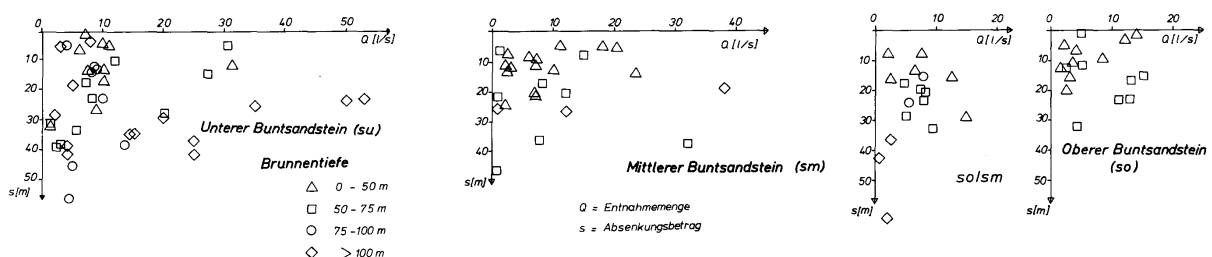


Abbildung 4-7: Spezifische Ergiebigkeiten von Brunnenbohrungen im Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandstein. Aus EINSELE & MERKLEIN (1978).

Grundwasserhöhengleichen: Detaillierte Grundwassergleichenpläne für Teilbereiche des Spessart liegen in verschiedenen Erläuterungen vor (Blatt Markt Heidenfeld, Rothenbuch und Lohr). Dort, wo der *sm* von tonigen, undurchlässigen Schichten des *so* überlagert wird, ist der Aquifer meist gespannt. Durch den Umstand, daß der gesamte *su* und *sm* einen einheitlichen Aquifer ohne interne Stockwerksgliederung darstellt, orientiert sich die Grundwasseroberfläche stark an der Morphologie bzw. am Fließgewässernetz. Fließgewässer, die die Morphologie wesentlich bestimmen, sind im *su-sm* Ausdruck des Zutagetretens der Grundwasseroberfläche des Hauptgrundwasserstockwerks. Die Grundwasseroberfläche kann dort deshalb relativ gut aus dem Auftreten von Quellen und dem Verlauf von Fließgewässern abgeleitet werden (Kap. 7.2.3.2).

Die **hydrochemischen Verhältnisse** im Unteren und Mittleren Buntsandstein haben für diese Untersuchung nur geringe Bedeutung. Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes, die eine besondere Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Grundwassers haben, sind in unterfränkischen Buntsandstein kaum realisierbar (vgl. Kap. 5.4). Eine indirekte Bedeutung besteht darin, daß Wässer aus dem *sm* im Maintalbereich dem quartären Lockergesteinsaquifer zutreten und dessen hydrochemische Eigenschaften wesentlich mitbestimmen (Kap. 4.3.8.5.5). Reine Buntsandsteinwässer haben eine durchschnittliche Gesamtmineralisation von 50 bis 100mg/l, wobei der Untere Buntsandstein Mineralisationen von etwa 150mg/l, der Mittlere Buntsandstein Mineralisationen von 30mg/l aufweist. Niedrige pH-Werte (5-6,5) und erhöhte Gehalte an freier Kohlensäure sind charakteristisch. Aufgrund des niedrigen pH-Wertes befinden sich auch bei Sauerstoffsättigung der Wässer Fe^{2+} -Ionen in Lösung. Die Gesamthärte liegt nach SCHWARZMEIER (1980) bei 1-7°dH auf Blatt Lohr. Dort werden bis zu 48mg/l freies CO_2 gemessen. Die Leitfähigkeiten liegen bei 40-150 μ S/cm.

4.3.3.2.3 Sedimentpetrographische und thermische Eigenschaften

Wie in Kap. 2.3.2.2 erläutert, sind für die thermischen Eigenschaften der Gesteine der Mineralbestand, das Bindemittel, die Porosität und die Porenfüllung (Sättigungsgrad) entscheidend. Diese Eigenschaften variieren innerhalb der stratigraphischen Abfolge und über das gesamte Verbreitungsgebiet des *su-sm* innerhalb gewisser Grenzen. In der Literatur finden sich viele Angaben, die aber im Allgemeinen nur für bestimmte Lokalitäten gültig sind. Als Beispiel sei hier eine Zusammenstellung von FIEDLER (1993) wiedergegeben (Tabelle 4-5).

Stratigraphie	Körner	Bindemittel	Poren	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gestein	Rest
smH	74	13 (60tf,40q)	13	51	6	1	12	4
smS	69	20 (60/40)	12	43	8	2	10	2
So1	68	20 (60/40)	12	39	10	7	11	2
So2	52	32 (70/30)	16	32	8	2	9	1

Tabelle 4-5: Mittlere mineralogische Zusammensetzung von Gesteinen aus dem Buntsandstein nach FIEDLER (1993).
Kürzel: tf = tonig-ferritisch, q = quarzitisch. Alle Angaben in Volumen-%.

Weitere Angaben (Auswahl) zum Mineralbestand finden sich für die Südrhön in UDLUFT (1969), für den Spessart in DJAHANGUIRI-KREMIANS (1977), GEYER (2000), MAHADJER (1978), SCHWARZMEIER (1979, 1984, 1985) und WRABEL (1993). Nach den Angaben der genannten Autoren wurde ein „durchschnittlicher“ Sandstein des *su-sm* mit den in Tabelle 4-6 aufgelisteten Eigenschaften festgelegt:

Parameter	Mittelwerte (geschätzt)	Variationsbreite
Porosität (Poren- + Klufthohlraum)	15%	5-20%
Effektive Porosität	0,4%	0,2-1,5%
Feste Bestandteile (gesamt = 100%)	85%, davon Körner 80%, Bindemittel 20%	80-95%
Bindemittel (gesamt = 100%)	40% quarzitisch (q), 60% tonig-ferritisch (tf)	20q-80q%
Quarz-Gesamtanteil an den festen Komponenten (Körner + Zement / Matrix)	75%	60-90%
Feldspat-Gesamtanteil an den festen Komponenten (Körner + Matrix)	10%	7-20%
Tonmineral-Gesamtanteil an den festen Komponenten (Matrix + Zement)	12%	5-25%
Glimmer-Gesamtanteil an den festen Komponenten (Körner + Bindemittel)	3%	1-5%

Tabelle 4-6: Idealzusammensetzung eines Sandsteins aus dem Unteren und Mittleren Buntsandstein bezüglich der für die Berechnung der thermischen Parameter relevanten Eigenschaften. Nach Angaben verschiedener Autoren (Zitate im Text).

Die thermischen Parameter für die in Tabelle 4-6 bestimmte „Idealzusammensetzung“ wurde nach den in Kap. 2.3.2.2 vorgestellten Verfahren von DRURY & JESSOP (1983) und SCHÖN (1983) bestimmt. Durch eine Variation der wesentlichen Parameter Porenanteil, Quarz-Feldspat (Q/F) und Quarz-Ton-Verhältnis (Q-T) innerhalb der zu erwartenden Variationsbreite, wurde die Bandbreite der thermischen Parameter ermittelt. Tabelle 4-7 zeigt Berechnungsergebnisse für einige Extremwerte der Parametervariation:

Bezeichnung	Poren	Glimmer	Feldsp.	Tonmin.	Quarz	T/Q	F/Q	λ naß	λ tr.	p c tr.	p c naß
su-sm ideal	15%	3%	10%	12%	75%	1:6.3	1:7.5	3.85	3.69	1.67	2.29
Poren min	2%	3%	10%	12%	75%	1:6.3	1:7.5	4.71	4.67	1.93	2.01
Poren max	20%	3%	10%	12%	75%	1:6.3	1:7.5	3.68	3.48	1.57	2.39
Q-F max	15%	3%	25%	12%	60%	1:5	1:2.4	3.41	3.24	1.63	2.25
Q-F +	15%	3%	15%	12%	70%	1:5.8	1:4.7	3.70	3.54	1.66	2.27
Q-F min	15%	3%	8%	12%	77%	1:6.4	1:9.6	3.91	3.75	1.68	2.29
Q-T max	15%	3%	10%	25%	62%	1:2.5	1:6.2	3.51	3.35	1.68	2.29
Q-T extrem	25%	3%	10%	40%	47%	1:1.2	1:4.7	2.88	2.65	1.48	2.51
Q-T min	15%	3%	10%	4%	83%	1:20.8	1:8.3	4.06	3.90	1.67	2.28
					Minimal			2.88	2.65	1.48	2.01
					Maximal			4.71	4.67	1.93	2.51

Tabelle 4-7: Berechnete thermische Parameter für den su-sm für eine gemittelte „ideale“ Zusammensetzung nach Tabelle 4-6 sowie variierte Porenvolumen, Feldspat-Quarz (F/Q) und Tonmineral-Quarz (T/Q)-Verhältnisse. tr. = trocken, ungesättigt „naß“ = gesättigt

Wie zu erwarten, wird die Wärmeleitfähigkeit vorrangig durch den Gesamtquarzgehalt bestimmt. Die maximale Wärmeleitfähigkeit von 4,7W/(m·K) berechnet sich für eine Zusammensetzung, die einem wassergesättigten Sandstein mit durchschnittlichem Quarz-Feldspat- und Quarz-Ton-Verhältnis bei extrem niedriger Porosität entspricht. Bei einem solchen Sandstein müßte annähernd das gesamte primäre Porenvolumen durch diagenetisch bzw. postdiagenetisch gebildeten quarzitischen Zement erfüllt sein. Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit [2,7W/(m·K)] wird für gesättigte, siltig-tonige Sandsteine mit hohem Tonanteil im Bindemittel ermittelt. Der Sättigungszustand spielt eine untergeordnete Rolle. Im Allgemeinen nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Sättigung etwas zu. Für eine Idealzusammensetzung nach Tabelle 4-6 wurde ein Wert von 3,85 W/(m·K) bestimmt. Diese Werte liegen innerhalb der in der Literatur angegebenen Bandbreite für Sandsteine (z.B. SCHÖN, 1983; SANNER 1992), aber oberhalb der dort angegebenen Mittelwerte. Aufschluß über tatsächliche Werte können nur Messungen an Gesteinen ergeben.

Die Wärmekapazität wird vor allem durch Porenvolumen und Sättigungszustand festgelegt. Dabei stellen die für den wasserfreien Zustand ermittelten Werte untere Grenzwerte dar, die in der Natur nicht realisiert sind.

4.3.3.3 Oberer Buntsandstein (so)

Der Ausstrich des Oberen Buntsandstein (so) nimmt etwa 10% der Fläche Unterfrankens ein. Seine Gesamtmächtigkeit variiert in Unterfranken von ca. 85 bis 100m (GEYER, 2000). Die oberen Bereiche des so (Obere Röttone) wurden im Zuge des Projektes „Erdsondenspeicher Greußenheim“ besonders eingehend untersucht (BÜTTNER ET AL., 1998, 2000).

Die **Chirotherienschiefer (so1)**, deren stratigraphische Stellung nicht überall einheitlich gesehen wird, sind in Unterfranken nach GEYER (2000) 1-3,5m mächtig. Gemeinsam mit den tonigen Bereichen an der Basis des im Hangenden folgenden Plattensandstein, bilden sie als geringdurchlässige Schicht eine lokal wirksame Begrenzung des *su-sm*-Grundwasserstockwerks. Ansonsten kommt ihnen wegen der geringen Mächtigkeit keine Bedeutung zu.

Der **Plattensandstein (so2)** ist eine Folge aus roten, feinkörnigen, tonig gebundenen Sandsteinen, die im Raum Würzburg eine Mächtigkeit von bis zu 30m erreichen kann. Nach Nordosten nimmt die Mächtigkeit stark ab (GEYER, 2000). Im Bereich der Rhön findet man an der Basis des dort geringmächtigen Plattensandsteins einen Siltsteinhorizont, der dort auch als „Rotbunte Wechselfolge“ bezeichnet wird (MARTINI, 1992). Der Plattensandstein stellt im Spessart nach SCHWARZMEIER (1980) ein eigenes Grundwasserstockwerk dar, dessen Basis der Chirotherienschiefer (so1) bildet. Nach MÄRZ (1977) weist der Plattensandstein in Bohrungen k_f -Werte zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s auf. Nach SCHWARZMEIER (1979, 1980) treten zwei verschiedene Grundwassertypen auf. Dies sind zum einen erdalkalisch-, überwiegend sulfatische Wässer, zum anderen erdalkalisch-, überwiegend hydrogencarbonatische Wässer mit Sulfatgehalten von 10-40mg/l und Hydrogencarbonatgehalten von 5-80mg/l. Die Härte liegt um 5°dH, die Gesamtmineralisation bei 50-140mg/l. Die mineralogische Zusammensetzung und thermischen Eigenschaften des Plattensandstein (und auch des Rötquarzit, s.u.) unterscheiden sich nicht wesentlich von denen der Sandsteine des *su-sm* (Kap. 4.3.3.2.3). Beim Rötquarzit kann von einer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit ausgegangen werden, was jedoch bei der geringen Mächtigkeit nur wenig Bedeutung hat.

Untere und Obere Röttonsteine (so3t und so4t) werden in der stratigraphische Abfolge durch den sogenannten Rötquarzit getrennt, hier aber gemeinsam abgehandelt, da sie weitgehend identische Eigenschaften haben. Während die Oberen Röttone in Unterfranken eine relativ konstante Mächtigkeit von 30-35m haben, nimmt die Mächtigkeit der Unteren von 18 bis 25m im zentralen Unterfranken auf 8m im östlichen Spessart ab. Bei den Röttonsteinen handelt es sich um eine relativ gleichförmige Abfolge siltiger Tonsteine mit gelegentlichen Feinsandeinschaltungen. Sie werden im Bereich Mainfranken im Allgemeinen als eintönig und homogen beschriebenen (z.B. RUTTE & WILCZEWSKI, 1983; SCHWARZMEIER, 1977). Im Bereich der Rhön treten leichte Abweichungen von der Ausbildung im zentralen Unterfranken auf (vgl. MARTINI, 1992; BARTHEL, 1993).

Nach übereinstimmenden Angaben in UDLUFT (1969), MÄRZ (1977), PÖTZL (1997) und JOST (1995) liegt der k_f -Wert von Röttonsteinen unter $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Damit sind sie als ausgesprochene Grundwassernichtleiter zu bezeichnen. Von den gleichen Autoren werden Gesamtporositäten in einer Bandbreite von etwa 20 bis 40%, bei einem Median von 26% angegeben. Nach Angaben von Dipl. Geol. und Brunnenbaumeister G. Marquard (freundl. mündl. Mittlg.) wurden in klüftigen Röttonsteinen allerdings auch schon Brunnenbohrungen mit einer Schüttung von 5l/s niedergebracht.

Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung von Röttonsteinen sind beispielsweise in SALGER & SCHWARZMEIER (1985) und PÖTZL (1997) zu finden. Die wesentlichen lithologischen und hydrophysikalischen Eigenschaften der Röttone sind in Tabelle 4-8 wiedergegeben.

Mineralogische Zusammensetzung	
Quarz	45 %
Illit	40 %
Montmorillonit	10 %
Chlorit	5%
Korngrößenverteilung (< 63µm) nach Bindemittelentfernung	
< 2,0µm	49,3 - 49,6 %
2,0 - 6,3 µm	17,5 - 22,0 %
6,3 - 20 µm	12,5 - 17,3 %
20 - 63 µm	7,6 - 9,2 %
Karbonatgehalt (1000 °C)	1,1 - 3,0 %
Organischer Gehalt	1,3 - 1,5 %

Glühverlust V_{gl}	1,8 - 3,8 %
Trockendichte ρ_d	1,51 - 1,92 g/cm ³
Korndichte ρ_s	2,68 g/cm ³
Porenzahl n	28 - 44 %
Wassergehalt w	12,3 - 19,9%
Klassifizierung nach DIN 18196	TL, TM
Effektive Porosität (n_{eff})	21 - 39 %
k_f -Wert (entmineral. Wasser)	$9,9 \cdot 10^{-12}$ - $1,1 \cdot 10^{-9}$ m/s

Tabelle 4-8: Sedimentpetrographische und hydrophysikalische Eigenschaften der Röttonsteine. Nach PÖTZL (1997).

Aus den Angaben von Tabelle 4-8 lassen sich nach DRURY & JESSOP (1983) Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 2,0 bis 2,6W/(m·K) bestimmen (vgl. Gleichung 2-30 und 2-31). Die spezifische volumetrische Wärmekapazität liegt in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad bei 2 bis 2,8MJ/(m³K). Eine ausführliche Diskussion der Berechnung thermischer Parameter der oberen Röttonsteine unter Einbeziehung des Sättigungsgrades geben BÜTTNER ET AL. (1998). Die hier für die Röttonsteine angegebenen Werte können auf die anderen im Untersuchungsgebiet auftretenden Gesteine des Ton-Siltstein-Typs weitgehend übertragen werden (vgl. Tabelle 5-2).

Der 5-8m mächtige **Rötquarzit (so4q)** trennt die Unteren von den Oberen Röttonsteinen. Typischerweise besteht er aus zwei, durch geringmächtige Siltsteinlagen getrennte, kieselig („quarzitisch“) gebundene Sandsteinlagen. Der Rötquarzit stellt einen mäßigen, teilweise sogar sehr ergiebigen Kluftgrundwasserleiter dar. Er bildet damit eine Zone hoher Permeabilität in den ansonsten undurchlässigen Röttonen. Die Wässer im Rötquarzit sind erdalkalisch - hydrogenkarbonatisch und weisen Gesamtmineralisation um 400-500mg/l auf. Wässer mit einer Gesamthärte von mehr als 20°dH stellen Mischwässer mit infiltrierendem Muschelkalkwasser dar. Zuweilen ist auch eine direkte Verbindung mit den Wässern aus den tieferen Buntsandsteinaquiferen zu beobachten.

4.3.4 Muschelkalk (m)

4.3.4.1 Verbreitung, Bedeutung und Gliederung

Der Muschelkalk besteht aus einer in Unterfranken um 220m mächtigen Abfolge vorwiegend karbonatisch dominierter Gesteine. Untergeordnet treten auch Tonsteine, dazu eine große Bandbreite tonig-mergeliger Gesteine sowie Evaporite auf. Er nimmt eine Ausstrichfläche von 1680 km² oder 20% der Fläche Unterfrankens ein (Abbildung 4-8). Wesentlich größer ist jedoch die Fläche, auf der der Muschelkalk potentiell durch Bohrungen bis 200m Tiefe erschlossen wird. Dieser Flächenanteil liegt bei über 45% der Fläche Unterfrankens (vgl. dazu Kap. 7.2.3.1.4).

4.3.4.2 Geologie

Der Muschelkalk wird in Unterfranken in drei Serien, den Unteren (*mu*), den Mittleren (*mm*) und den Oberen Muschelkalk (*mo*) gegliedert. Abbildung 4-9 zeigt das Standardprofil für den Muschelkalk auf den Blättern Würzburg Nord und Süd (HOFFMANN, 1967a). Die dort vorliegenden Verhältnisse sind, was die Mächtigkeiten und Ausbildung einzelner Horizonte anbetrifft, nicht vollständig auf ganz Unterfranken übertragbar, geben aber die Standardabfolge ausreichend gut wieder.

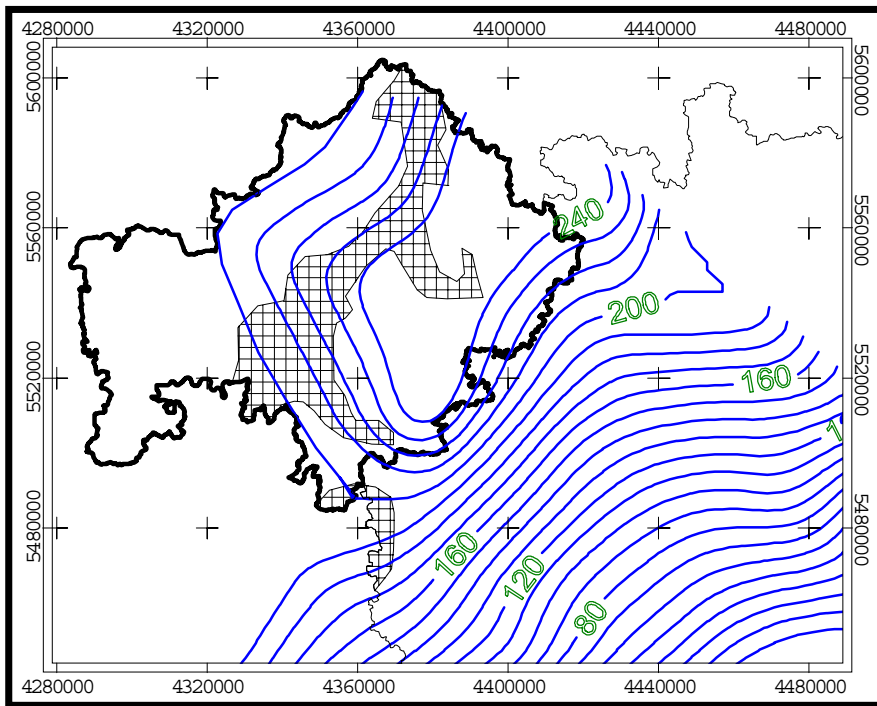


Abbildung 4-8: Mächtigkeit und Verbreitung des Muschelkalk in Nordbayern. Eigener Entwurf nach GUDDEN & HAUNSCHILD (1993) und BAYGLA (1996).

4.3.4.2.1 Unterer Muschelkalk (*mu*)

Der *mu* wird zu etwa 90% (GEYER, 2000) von einer relativ monotonen Abfolge mikritischer, wellig-flaseriger oder knaueriger Kalksteine mit feinen tonigen Zwischenlagen dominiert (daher der Name „Wellenkalk“), in die mehrere geringmächtige sparitische Schill-, „Ooid“- oder „Konglomerat“-Lagen eingeschaltet sind. Diese Einschaltungen lassen sich trotz ihrer geringen Mächtigkeit von maximal 2m üblicherweise in ganz Unterfranken wiederfinden und werden deshalb als Leitbänke zur Gliederung des *mu* herangezogen. Die dazwischenliegenden mikritischen Kalkpakete werden in acht sogenannte „Wellenkalkfolgen“ gegliedert, die sich voneinander nicht wesentlich unterscheiden. Von den sparitischen Lagen sind für diese Untersuchung nur der Grenzgelbkalk an der Basis des Muschelkalk, und die Schaumkalkbänke im obersten Bereich des *mu* von Interesse. Beide stellen häufig gute Kluft- bzw. Karstwasserleiter dar, deren Ergiebigkeit aber aufgrund der Mächtigkeiten von maximal 2m begrenzt ist. Der Grenzgelbkalk gewinnt seine Bedeutung insbesondere dadurch, daß er im Hangenden der wasserstauenden Schichten der Röttone liegt und deshalb einen wichtigen Quellhorizont bildet. Die Mächtigkeit des *mu* beträgt in Unterfranken, von Norden nach Südosten abnehmend, meist um 80m. Im Raum Würzburg liegt sie bei etwa 90m.

4.3.4.2.2 Mittlerer Muschelkalk (*mm*)

Im *mm* dominieren mergelige Gesteine. Nur an der Basis und im oberen Drittel der Abfolge treten mächtigere Kalk- oder Dolomitsteinlagen auf. Die Gesteine des *mm* sind im Allgemeinen sehr verwitterungsanfällig und deshalb selten gut aufgeschlossen. Von besonderem Interesse ist der Umstand, daß im *mm* primär große Gips- und auch Steinsalzmächtigkeiten vorlagen, die teilweise inzwischen vollständig ausgelaugt sind, z.T. aber auch noch in großer Mächtigkeit vorhanden sind (vgl. auch Abbildung 7-17). In Bereichen, in denen die Evaporite vollständig ausgelaugt sind, wird die Mächtigkeit des *mm* üblicherweise mit 40-50m angegeben. Dort, wo die Auslaugung noch nicht oder nur unvollständig erfolgt ist, kann die Mächtigkeit auf bis zu 110m anwachsen (BÜTTNER & SCHWARZMEIER, 1997). Nach BAYGLA (1993) ist mit hohen Salzmächtigkeiten insbesondere dort zu rechnen, wo der *mm* unter mächtiger Bedeckung liegt, während bei geringer oder keiner Überdeckung aktive Laugung oder vollständige Entfernung des Salzes festzustellen ist.

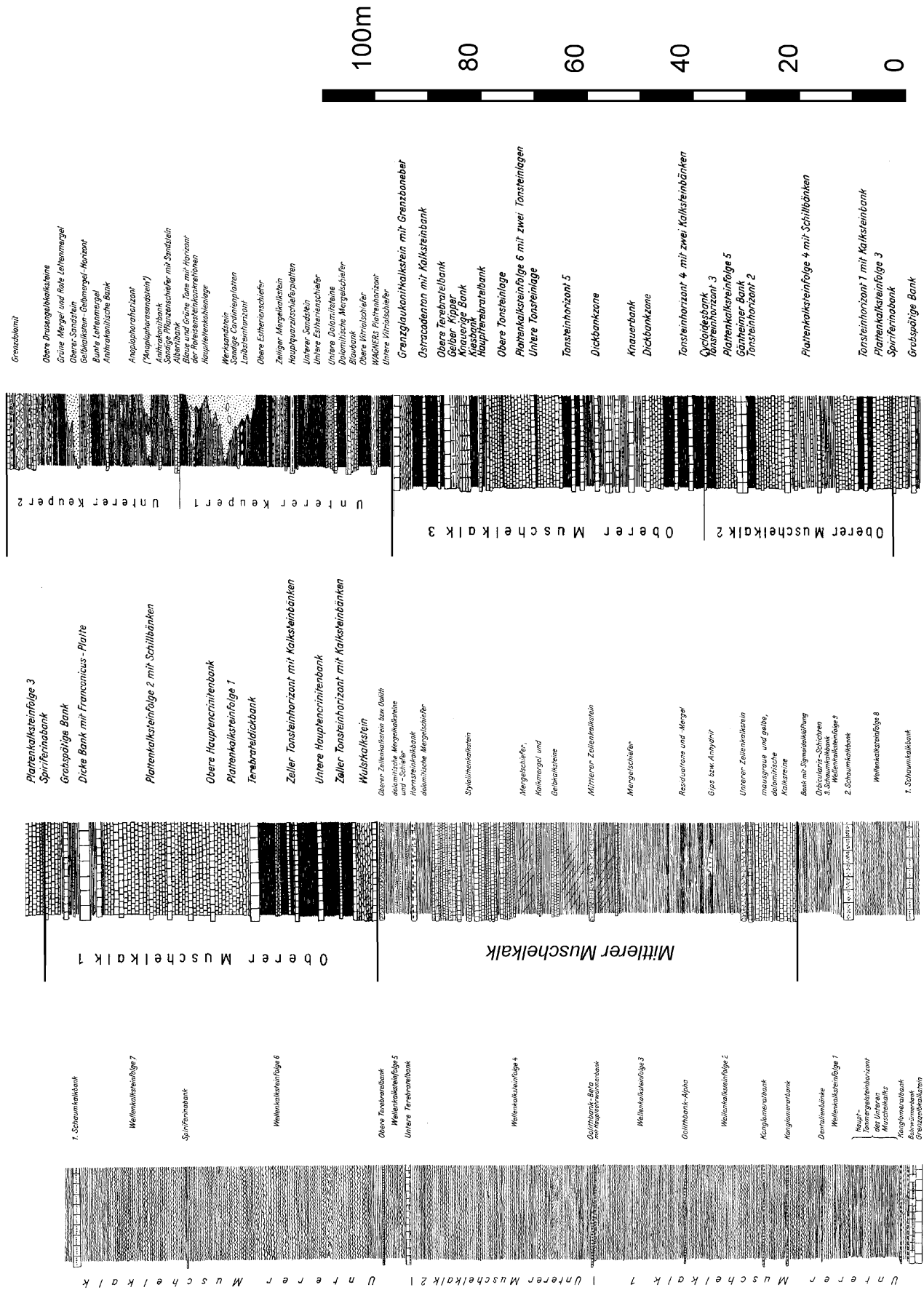


Abbildung 4-9: Standardprofil für den Muschelkalk und den Unteren Keuper im Raum Würzburg. Umgezeichnet nach HOFFMANN (1967a). Die Darstellung ist im Wesentlichen repräsentativ für den Beispielausschnitt (Abbildung 4-1), mit geringfügigen Einschränkungen (vgl. z.B. 4.3.4.2.3) auch auf ganz Unterfranken übertragbar.

Die Auslaugung von Evaporiten im *mm* hat verschiedene, für diese Untersuchung weitreichende Konsequenzen. So treten im Bereich des *mm* Karsterscheinungen auf, die auf die karbonatischen Gesteine übergreifen und aufgrund der inkompetenten Schichten im *mm* zu einer intensiven Zerrüttung des Gesteins führen (Kap. 4.3.4.3.4). Weiterhin sind die Wässer in Bereichen aktiver Laugung extrem mineralisiert. Besonders wichtig sind im Hinblick auf diejenigen GIS-Analysen, die sich auf Untergrundstrukturmodelle stützen, sind auch die teilweise extremen, auf kurze Distanz auftretenden Mächtigkeitsschwankungen, die durch die Laugung, aber auch durch andere Prozesse hervorgerufen werden. Auf die Frage der Mächtigkeitsschwankungen im *mm* wird in Kap. 7.2.3.1.3.8 näher eingegangen.

4.3.4.2.3 Oberer Muschelkalk (*mo*)

Der in Unterfranken 75-85m mächtige *mo* wird vorrangig durch den Wechsel von Kalksteinbänken und zwischengelagerten Tonstein- oder Mergellagen bestimmt. Nach GEYER (2000) bauen letztere den größeren Anteil des Gesamtprofils auf. Von besonderem Interesse sind einige mächtige Tonsteinhorizonte wie z.B. der „Zeller Tonsteinhorizont“, dessen Mächtigkeit auf Blatt 6125 Würzburg Nord i. M. 6-7m (bis 11m) erreicht (HOFFMANN, 1967b). Solche Tonsteinhorizonte sind als geringdurchlässige Schichten maßgeblich an der vertikalen hydrogeologischen Zonierung des *mo* beteiligt (s.u.). Ihre Mächtigkeit und Vorkommen sind allerdings lokal sehr unterschiedlich. So kann der besagte Zeller Tonsteinhorizont beispielsweise bei Ochsenfurt, ca. 20km südlich der Typlokalität Zell, kaum noch als Tonstein nachgewiesen werden (KUS, 1995). Nach BAYGLA (1993) ist dieser Horizont bzw. seine Äquivalente, auch im Nordosten Unterfrankens vorwiegend kalkig ausgebildet.

4.3.4.3 Hydrogeologie

Die hydraulischen Verhältnisse im Muschelkalk sind deutlich komplizierter als die im Buntsandstein. Die starke vertikale Zonierung in Gesteine unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften führt zu einer ausgeprägten Stockwerksgliederung. Diese ist aber nicht für den ganzen Betrachtungsraum einheitlich, sondern hängt stark von den lokalen faziellen, tektonischen und geomorphologischen Bedingungen ab. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Umstand zu, daß es sich bei den Gesteinen des Muschelkalk häufig um verkarstungsfähige Karbonate und Evaporite handelt. Je nach Exposition und der relativen Lage zur Gelände- bzw. Grundwasseroberfläche können diese mehr oder weniger starke Auslaugungserscheinungen aufweisen (Kap. 4.3.4.3.4). Einzelne Horizonte übernehmen deshalb regional sehr unterschiedliche hydrogeologische Funktionen. So sind Gesteine des *mu* Grundwasserstauer in Bereichen, in denen sie bei größerer Überdeckung weit unter dem Grundwasserspiegel liegen, da sie dort unverkarstet sind. Dagegen sind sie in Bereichen ohne Bedeckung häufig gute Karstwasserleiter. Zusätzliche regionale Besonderheiten werden durch ausgeprägte Störungzonen geschaffen, die zu einer erhöhten Klüftung, intensiveren Verkarstung und damit verbesserten Wasserwegsamkeit beitragen. Ebenso können Schichten, die prinzipiell stauend sind, regional durch fazielle Unterschiede abweichende Eigenschaften aufweisen (s.o.), so daß ihre stockwerkstrennende Eigenschaft aufgehoben ist. All diese Faktoren führen dazu, daß eine Charakterisierung der Aquifere im Muschelkalk meist nur auf lokale Verhältnisse angewendet werden kann, im regionalen Maßstab dagegen nur grobe Tendenzen festgehalten werden können. Ein Vorschlag für eine Stockwerksgliederung für den Raum Würzburg ist in Tabelle 4-15 wiedergegeben.

4.3.4.3.1 Unterer Muschelkalk

Die Durchlässigkeiten²⁸ im Unteren Muschelkalk sind regional und lokal sehr unterschiedlich verteilt. Sie schwanken in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren zwischen sehr gut und nahezu undurchlässig. Besonders hohe Durchlässigkeiten werden in verkarsteten Gebieten im Bereich östlich der Rhön angetroffen

²⁸ Durchlässigkeitsangaben in Klüftwasserleitern verstehen sich grundsätzlich als Gebirgsdurchlässigkeiten.

(SCHMITT, 1982). Mäßige Durchlässigkeiten treten im Bereich von Störungszonen, beispielsweise entlang der Kissingen-Hassfurter Störungzone auf (BÜTTNER, 1997). Geringe Durchlässigkeiten sind überall dort die Regel, wo der *mu* unter mächtiger Bedeckung unterhalb des Grundwasserspiegels angetroffen wird. Die kompetenten sparitischen Leitbänke des *mu* weisen im Allgemeinen eine erhöhte Klüftigkeit und Verkarsungsanfälligkeit auf. Bedeutende Grundwasserleiter mit lokaler Bedeutung für die Trinkwassergewinnung im Unteren Muschelkalk sind die Schaumkalkbänke und der Grenzgelbkalk. Da diese nur geringe Mächtigkeiten (um 2m) aufweisen, sind sie innerhalb dieser Untersuchung nicht von Bedeutung.

Wegen der regionalen Besonderheiten ist es nicht möglich den *mu* und seine Grundwasserstockwerke für ganz Unterfranken einheitlich zu charakterisieren. Grob verallgemeinernd kann festgelegt werden, daß der *mu* in nicht-überdecktem Zustand insbesondere in Störungszonen einen mäßigen bis guten Kluft- bis Karstgrundwasserleiter darstellt. Dies ist im Norden und Nordosten Unterfrankens (Rhön) besonders ausgeprägt ist. Ansonsten ist er als Wasserstauer zu bezeichnen. Das nutzbare Kluft- bzw. Hohlraumvolumen beträgt nach BAYGLA (1993) 2 bis 4%, bei fehlender Verkarstung weniger als 1%. In Bohrungen werden in größeren Tiefen nur noch 0,1% gemessen. Für die Südrhön, wo mit stärkerer Verkarstung zu rechnen ist, weist der *mu* nach UDLUFT (1969) ca. 5% nutzbares Porenvolumen auf, bei Bad Kissingen nach GEORGOTAS (1972) 3,2-5%. In Störungszonen können durch Lösungserscheinungen erweiterte Klüfte mit Weiten von bis zu 200mm (Heustreuer Störungzone; SCHMITT, 1982) auftreten. Brunnen im *mu* weisen nach EINSELE & MERKLEIN (1978) spezifische Ergiebigkeiten von 0,025 bis 7l/(s·m) bei einem Mittelwert von ca. 1l/(s·m) auf (vgl. Abbildung 4-11).

4.3.4.3.2 Mittlerer Muschelkalk

Der *mm* wird üblicherweise als einheitlicher Aquifer angesehen. Es wird allerdings auch darauf hingewiesen, daß die tatsächlichen hydraulischen Verhältnisse sehr kompliziert sein können (BAYGLA, 1993). Aufgrund des raschen Wechsels von gutdurchlässigen, verkarsteten Evaporiten und klüftigen Karbonaten einerseits und geringdurchlässigen Tonen, Mergeln, Residualschluffen und unverkarstetem Gips und Anhydrit andererseits, kommt es zur Ausbildung einer kleinräumigen Stockwerksgliederung. Die wesentlichen Grundwasserleiter im *mm* sind die diversen Zellenkalksteine, die Gips- und Anhydritschichten sowie die Dolomit- und Kalksteinhorizonte. Sie können, je nach Ausbildung, als gut bis mäßig entwickelte Kluft- bis Karstwasserleiter angesprochen werden (IGI, 1998). Für die im gesamten Bereich Unterfranken angestellten Betrachtungen ist es nicht möglich bzw. sinnvoll, den *mm* in weitere Stockwerke zu untergliedern. Generell läßt sich sagen, daß der gesamte *mm* als Aquifer zu betrachten ist, wobei sich die wesentliche Wasserführung auf die basalen Kalksteine und auf die Stylolithenkalksteine im oberen Drittel der Abfolge konzentriert. Die Residualtone und Schluffe im mittleren Bereich der Abfolge fungieren häufig als Trennschicht zwischen beiden Zonen. In diesem Fall kann man von einem unterem, häufig mit den Schaumkalkbänken des *mu* und einem oberen, mit den basalen Kalkschichten des *mo* in Verbindung stehenden Stockwerk sprechen. Diese Stockwerkstrennung läßt sich nach BAYGLA (1993) häufig hydrochemisch anhand der deutlich ansteigenden Sulfatgehalte und Gesamthärte im tieferen Stockwerk nachweisen. Nach EBHARDT (1971) führen die Zerütungs- und Auslaugungserscheinungen dazu, daß die Stockwerksgliederung häufig ganz aufgehoben ist.

Nach BAYGLA (1993) können für den *mm* in Unterfranken i.M. Gebirgsdurchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$ angenommen werden, Zellenkalk und verkarstete Gips- und Anhydritlinsen liegen mit Werten zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ und $1 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$ z.T. deutlich darüber. Die spezifischen Ergiebigkeiten von Brunnen im *mm* werden mit 5,4l/(s·m) i.M. angegeben. Nach EINSELE & MERKLEIN (1978) kann eine Streuung von 0,5 bis 10l/(s·m) beobachtet werden (vgl. Abbildung 4-10).

4.3.4.3.3 Oberer Muschelkalk

Die hydrogeologischen Eigenschaften des *mo* sind sowohl im vertikalen Profil, wegen des Wechsels von kalkig und tonig dominierten Abschnitten als auch regional unterschiedlich. So wird er beispielsweise im östlichen Grabfeld unter mächtiger Keuperbedeckung als weitgehend dicht, im westlichen Grabfeldgau dagegen als sehr gut wasserdurchlässig bezeichnet, was auf eine intensive Zerbrechung wegen der Auslaugung des *mm* zurückgeführt wird (SCHMITT, 1982). Neben den strukturellen Unterschieden sind es vor allem auch die bereits erwähnten faziellen Differenzierungen, die eine Übertragung lokal nachgewiesener hydraulischer Verhältnisse auf den regionalen Maßstab unmöglich machen. Für die Verkarstung gilt, ähnlich wie für *mu* und *mm*, daß eine Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Überdeckung und der Nähe zu Störungszonen festzustellen ist. Der Obere Muschelkalk ist nach BAYGLA (1993) überwiegend als Kluffgrundwasserleiter ausgebildet.

Eine stark verallgemeinerte Stockwerksgliederung läßt eine Einteilung in ein basales Stockwerk im *mo1*, das im Liegenden durch den Zeller Tonsteinhorizont gegen den *mm* abgegrenzt wird, und ein oberes Stockwerk, das mit dem Unteren Keuper in Verbindung steht, zu. Im Grabfeldgau fehlt nach SCHMITT (1982) eine ausgeprägte Stockwerksgliederung im *mo*, was insbesondere auf Klüftung und Verkarstung in Störungszonen zurückgeführt wird. Die Gebirgsdurchlässigkeiten erreichen im Karst maximal $3 \cdot 10^{-4}$ m/s, in unverkarsteten Bereichen liegen sie bei 1 bis $3 \cdot 10^{-5}$ m/s oder darunter. Abbildung 4-10 zeigt die Verteilung von an Brunnen gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerten. SCHMITT (1982) kann eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit mit der Entfernung von Störungszonen nachweisen. Der Obere Muschelkalk spielt als Grundwasserleiter meist nur lokal eine Rolle. Die spezifischen Ergiebigkeiten, die im *mo* erzielt werden, liegen ähnlich wie im *mu* um $11/(s \cdot m)$. Die Streuung zeigt Abbildung 4-11:

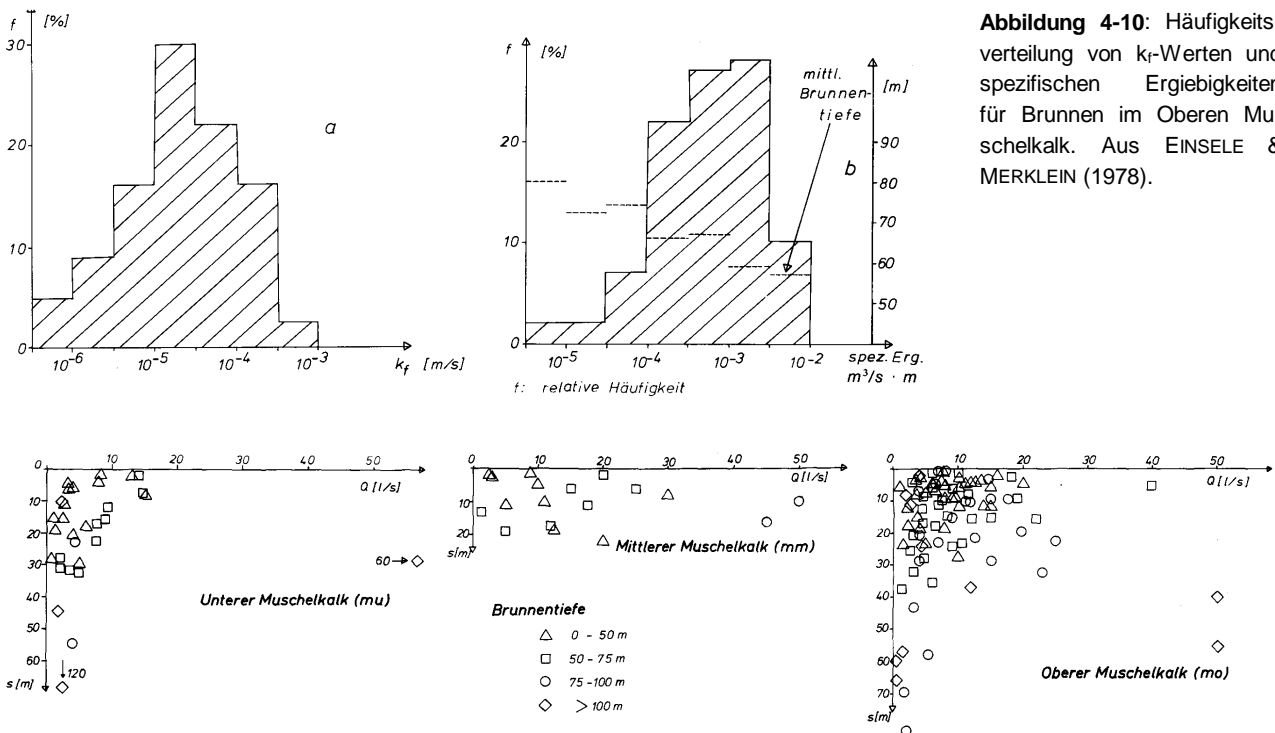


Abbildung 4-10: Häufigkeitsverteilung von k_f -Werten und spezifischen Ergiebigkeiten für Brunnen im Oberen Muschelkalk. Aus EINSELE & MERKLEIN (1978).

Abbildung 4-11: Brunnencharakteristiken (spezifische Ergiebigkeiten) für Brunnen aus dem Muschelkalk im Mainbezugsgebiet aus EINSELE & MERKLEIN (1978).

4.3.4.3.4 Verkarstung im Muschelkalk

Die Karbonate und Evaporite im Muschelkalk sind alle potentiell verkarstungsfähig. Aufgrund unterschiedlicher Gesteinsausbildungen und der in verschiedenen Bereichen unterschiedlich verlaufenen Abtragungsgeschichte des Deckgebirges, ist die Verkarstung regional unterschiedlich weit entwickelt. Nach ALBERT (1993), BITTERSÖHL (1980), BÜTTNER (1991), EBHARDT (1971, 1978), GEYER (2000), SCHMITT (1982) und SCHWARZ-

MEIER (1977) lassen sich einige allgemeine Angaben zur Verkarstung der Gesteine des Muschelkalk in Unterfranken ableiten:

Der Karst im Muschelkalk erreicht bei weitem nicht die Ausmaße des Malmkarstes der schwäbischen oder der Frankenalb. So ist der Muschelkalkkarst als Spaltenkarst und nicht als Höhlenkarst anzusprechen. Die Aquifere im Muschelkalk müssen daher als kombinierter Kluft-Karst-Wasserleiter bezeichnet werden. Karsterscheinungen beschränken sich meist auf kleinere Dolinen und Erdfälle, die überall im Ausstrichbereich des Muschelkalk beobachtet werden können. Eine besondere Häufung tritt im Ausstrich des Mittleren Muschelkalk auf. Daneben wird von einigen kleinen Höhlen im *mm* und *mu* berichtet. In vielen Muschelkalkgebieten sind Bachversickerungen zu beobachten. Besonders betroffen davon ist der südöstliche Rhönrandbereich, wo an Bächen beim Übertritt aus dem vulkanischen Tertiär in den Muschelkalk Versickerungsraten von bis zu 200l/s beobachtet werden können (BITTERSÖHL, 1980; BARTHEL, 1995). Im Zusammenhang mit solchen Versickerungen treten stark schüttende Karstquellen auf, deren bekannteste die Würzburger Bahnhofsquellen mit einer Schüttung von ca. 200l/s (EBHARDT, 1978) und die Mittelstreuerquellen mit 100-530 l/s (HOFMANN ET AL., 1991) sein dürften. Die stärkste Verkarstung ist im Bereich von Bruchzonen und in Aufwölbungszonen (Dehnungsbrüche) zu beobachten. Allgemein gilt, daß bei höherer Überdeckung des Muschelkalks durch den Keuper kaum Verkarstungsphänomene zu beobachten sind. Eine besondere Bedeutung kommt der Verkarstung in hydrogeologischer Hinsicht auch bei der durch Subrosion im *mm* hervorgerufenen extremen Mächtigkeit des quartären Lockergesteinsaquifers im Maintal zu (Kap. 4.3.8.7.3).

Im **Unteren Muschelkalk** konnte sich nur dort eine echte Verkarstung entwickeln, wo er lange Zeit Oberflächeneinflüssen ausgesetzt war und eine verstärkte Klüftung vorhanden ist. Besonders starke Verkarstung zeigen mächtigere kompakte Bänke wie die Schaumkalkbänke und der Grenzgelbkalk. Regional läßt sich besonders ausgeprägte Verkarstung im Südosten der Rhön beobachten, wo sie durch das Zutreten von geringmineralisierten, sauren Wässern aus den Basalten und Tuffen der Hochrhön verursacht wird. Diese Verkarstung kommt durch den Austritt sehr stark schüttender Karstquellen an der Basis des Unteren Muschelkalks zum Ausdruck (s.o.). Eine besonders ausgeprägte Verkarstung ist in Bruchzonen, beispielsweise dem Münnerstädter Graben (Abbildung 4-28) zu beobachten.

Im **Mittleren Muschelkalk** sind neben den Karbonaten vor allem die sulfatischen Gesteine und Steinsalz von der Verkarstung betroffen. Dort, wo noch Gips- und Steinsalzlagen vorhanden sind, werden diese aktiv ausgelaugt. In Gebieten, in denen die Auslaugung fortgeschritten oder bereits vollständig erfolgt ist, führte das Nachbrechen des karbonatischen Deckgebirges zu einer intensiven Zerrüttung und damit zu einer besseren Angriffsmöglichkeit für die Verkarstung. Beide Vorgänge führen dazu, daß der *mm* als der bedeutendste Aquifer in der unterfränkischen Trias zu bezeichnen ist.

Der **Obere Muschelkalk** zeigt eine vergleichsweise geringe Verkarstungsanfälligkeit. Es treten v.a. kleinere Bachversickerungen und Dolinen auf. Eine durchgreifende Verkarstung wird im *mo* durch die zahlreichen Tonsteinzwischenlagen verhindert. Die Karsterscheinungen treten nach ALBERT (1993) vor allem dort auf, wo Wasser freie Kohlensäure aus dem *ku* in den *mo* übertreten (vgl. Abbildung 4-30). In Gebieten, in denen der *mo* von *ku* in größeren Mächtigkeiten überdeckt wird, ist nicht mit Verkarstung zu rechnen. Im Maintal läßt sich beobachten, daß sich Subrosionserscheinungen aus dem *mm* bis weit durch den *mo* an die Oberfläche durchpausen können.

4.3.4.3.5 Hydrochemische Verhältnisse

Alle Grundwässer im Muschelkalk sind mehr oder weniger stark mineralisiert. Im *mu* werden nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978) Gesamtmineralisationen von ca. 600mg/l festgestellt (jeweils Mittelwerte), wobei die Hauptbestandteile von Erdalkalien (140mg/l) und Hydrogenkarbonat (350mg/l) gestellt werden. Sulfat kann mit bis zu 50mg/l beteiligt sein. Im Mittleren Muschelkalk treten vereinzelt Mineralisationen bis zu 1700mg/l bei einem Mittelwert von 950mg/l auf. In Bereichen aktiver Gipslaugung kann der Sulfatgehalt auf bis zu 1000mg/l steigen. Beim Auftreten von Steinsalz sind über 700mg/l Chlorid festgestellt worden, die Gesamt-

mineralisation liegt dann häufig über 3000mg/l. In Extremfällen können bei Wässern aus der Salinarfazies Laugen mit Leitfähigkeiten von 200000 μ S/cm auftreten. Der Obere Muschelkalk nimmt nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978) mit Gesamtmineralisationen um 750mg/l eine Stellung zwischen *mu* und *mm* ein. Die pH-Werte liegen bei den Muschelkalkwässern nach BAYGLA (1993) überall um 7,4 bzw. zwischen 6,9 und 7,5 (UDLUFT, 1969).

4.3.4.4 Sedimentpetrographische und thermische Eigenschaften

Für die Bestimmung bzw. Abschätzung der thermischen Parameter in den Gesteinen des Muschelkalk sind im Wesentlichen die Karbonat-Ton-Verhältnisse der einzelnen Horizonte von Interesse. In Bereichen des Mittleren Muschelkalk können auch die Karbonat-Ton-Salz-Verhältnisse von Bedeutung sein, worauf hier aber weniger Wert gelegt wird, da die Gesteine des *mm* ohnehin wenig geeignet für die thermische Nutzung sind (vgl. Kap. 5).

4.3.4.4.1 Karbonatgehalte

Aufgrund rasch wechselnder Faziesbedingungen im regionalen und lokalen Maßstab ist es nur begrenzt möglich, allgemeingültige Aussagen über das Karbonat-Ton-Verhältnis für den ganzen unterfränkischen Raum zu treffen. Den einzigen regionalen Überblick über die Faziesverhältnisse gibt HALTENHOF (1962). Dort sind für einige Lokalitäten hochaufgelöste Profile der Karbonatanteile im Unteren Muschelkalk angegeben. Eine Summendarstellung für 27 Bohrungen aus dem westlichen Unterfranken gibt einen Überblick über die tendenzielle Entwicklung in der stratigraphischen Abfolge (Abbildung 4-14). Andere Untersuchungen liegen nur im lokalen Maßstab für Einzelaufschlüsse und Teilausschnitte aus dem Gesamtprofil vor (z.B. EHRMANN, 1981; Kus, 1995). Aus entsprechenden Angaben können folgende Trends abgeleitet werden:

- ◆ Im *mu* können generell hohe Karbonatgehalte von etwa 65 bis 90% erwartet werden, wobei ein Trend zur Zunahme Richtung Top besteht. Der Mittelwert, bezogen auf den Gesamtkarbonatgehalt im Gesamtprofil, wird mit 80% angenommen.
- ◆ Im *mm* sind die Karbonatgehalte insgesamt geringer, im Bereich der Residualschluffe und in Salinarfazies sogar sehr gering. Es wird ein Mittelwert von 50% angesetzt.
- ◆ Im *mo* sind die Verhältnisse sehr heterogen. Rasch wechselnde Faziesbedingungen in vertikaler und lateraler Richtung machen pauschale Angaben unmöglich. Karbonatanteile können zwischen 40 und 99% liegen. Der Karbonatanteil am Gesamtprofil wird je nach regionaler Situation auf 65-80% geschätzt und liegt damit leicht unter dem des Unteren Muschelkalks. Generell sind die Karbonatgehalte im *mo* hoch, i.M. über 70%.

4.3.4.4.2 Porenvolumen, Wassergehalt und Sättigungszustand

Weitere wichtige Eigenschaften für die Bestimmung der thermischen Parameter sind das Poren- oder Hohlraumvolumen und der Wassergehalt (Sättigungszustand). Das Porenvolumen von Gesteinen aus dem Kalk-Mergel-Tonstein-Spektrum wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Bei mikritischen Gesteinen mit hohem Karbonatanteil werden Hohlräume ausschließlich von Klüften gestellt. Nur in den sparitischen Schillkalken des Muschelkalk können daneben auch primäre Hohlräume auftreten. Das durchflußwirksame Kluftvolumen liegt für die Gesteine des Muschelkalk im Untersuchungsgebiet bei 0.5-5% (Kap. 4.3.4.3). Kluftvolumina von bis zu 5% haben auf die thermischen Eigenschaften keinen wesentlichen Einfluß. Dagegen treten bei Gesteinen mit höherem Tongehalt neben den Kluft Hohlräumen Feinstporen auf. Diese Feinstporen, die bei Mergelgesteinen bis zu 40% des Gesamtvolumens ausmachen können, haben bedeutenden Einfluß auf die thermischen Eigenschaften.

Zur Feststellung der Abhängigkeiten von Gesamtporosität, Wassergehalt und Sättigungsgrad wurden Meßergebnisse von Kus (1995) an verschiedenen Gesteinen des *mm* und *mo* herangezogen. Aus diesen Werten läßt sich ableiten, daß Porosität und Wassergehalt generell mit steigendem Tongehalt zunehmen. So wurden für Tonmergelsteine aus dem Zeller Tonsteinhorizont (Kalkgehalt von 17,5 bis 69,7%, ϕ 41%) Porenan-

teile von 14,6 bis 41,6% ($\bar{\varnothing}$ 22,7%) bei Wassergehalten von 3,4 bis 26,4% ($\bar{\varnothing}$ 12,3%) gemessen. Der Sättigungsgrad liegt demnach bei 55 bis 100%, wobei die Werte meist über 90% liegen. Dagegen liegen bei den deutlich kalkig dominierten Gesteinen (Kalkgehalt 75 bis 99%) die Porenanteile bei nur 0,3 bis 8%, bei entsprechend niedrigen Wassergehalten (1-6%). Abbildung 4-12 zeigt den aus diesen Daten ermittelten Zusammenhang zwischen Porenanteil und Tongehalt für Gesteine aus dem *mm* und *mo*. Danach besteht ein undeutlicher linearer Zusammenhang, wonach der Porenanteil sich ungefähr aus dem Tonanteil multipliziert mit 0,55 errechnen läßt.

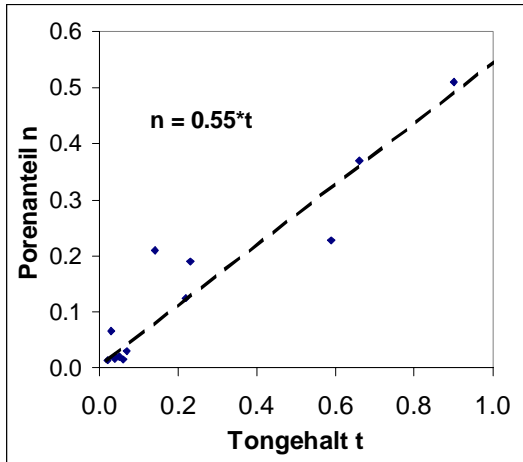


Abbildung 4-12: Abhängigkeit des Porenvolumens vom Tongehalt bei kalkigen bis tonigen Gesteinen. Bestimmt anhand von Meßergebnissen für Gesteine des Mittleren und Oberen Muschelkalk aus KUS (1995) und weiteren Literaturangaben.

Einheit	mittl. Gesamtkarbonatgehalt	Variationsbreite
<i>mo</i>	70%	40-95
<i>mm</i>	50%	20-90
<i>mu</i>	80%	65-95

Tabelle 4-9: Mittlere Karbonatgehalte im Muschelkalk, abgeschätzt nach Angaben aus der regionalen Literatur.

4.3.4.4.3 Thermische Parameter

Aus den Abschätzungen zum Karbonatgehalt, den Porenvolumina und den Wassergehalten lassen sich für Gesteine des Muschelkalk die thermischen Parameter nach den in Kap. 2.3.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmen. Abbildung 4-13 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der volumetrische Wärmekapazität für Gesteine aus dem Kalk-Tonstein-System. Abbildung 4-14 zeigt Berechnungen, die anhand der von HALTENHOF (1962) bestimmten Karbonat-Tonverhältnisse für den *mu* in Unterfranken angestellt wurden.

Nach den verschiedenen Berechnungen und Abschätzungen wurden für den *mu* mittlere Wärmeleitfähigkeiten von 2,2 bis 2,4W/(mK), für den *mm* 1,6-1,8 W/(mK), für den *mo* 1,9-2,1W/(mK) festgelegt.

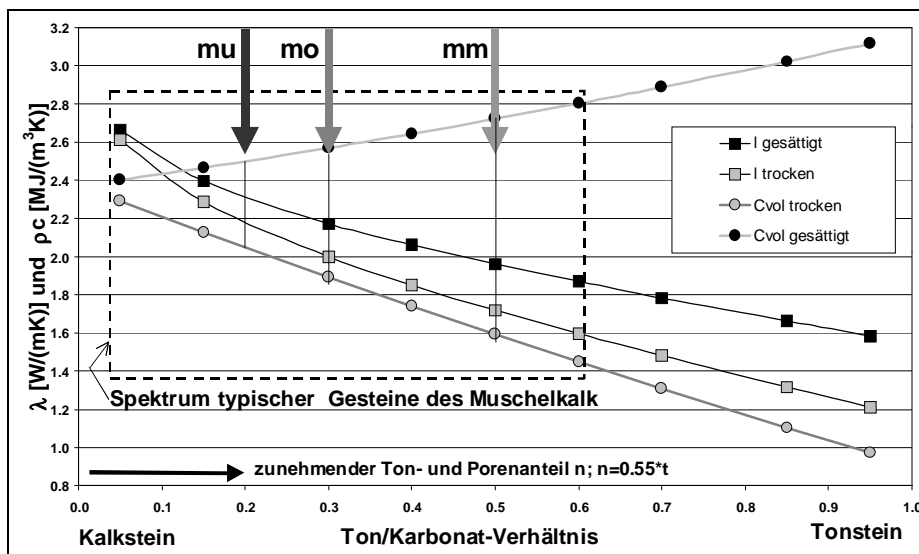


Abbildung 4-13: Nach DRURY & JESSOP (1983) bzw. SCHÖN (1983) berechnete thermische Eigenschaften für Gesteine im System Kalk- Mergel-, Tonstein unter Berücksichtigung der Verhältnisse im Muschelkalk.

l: Wärmeleitfähigkeit λ
 Cvol: volumetrische Wärmekapazität ρc

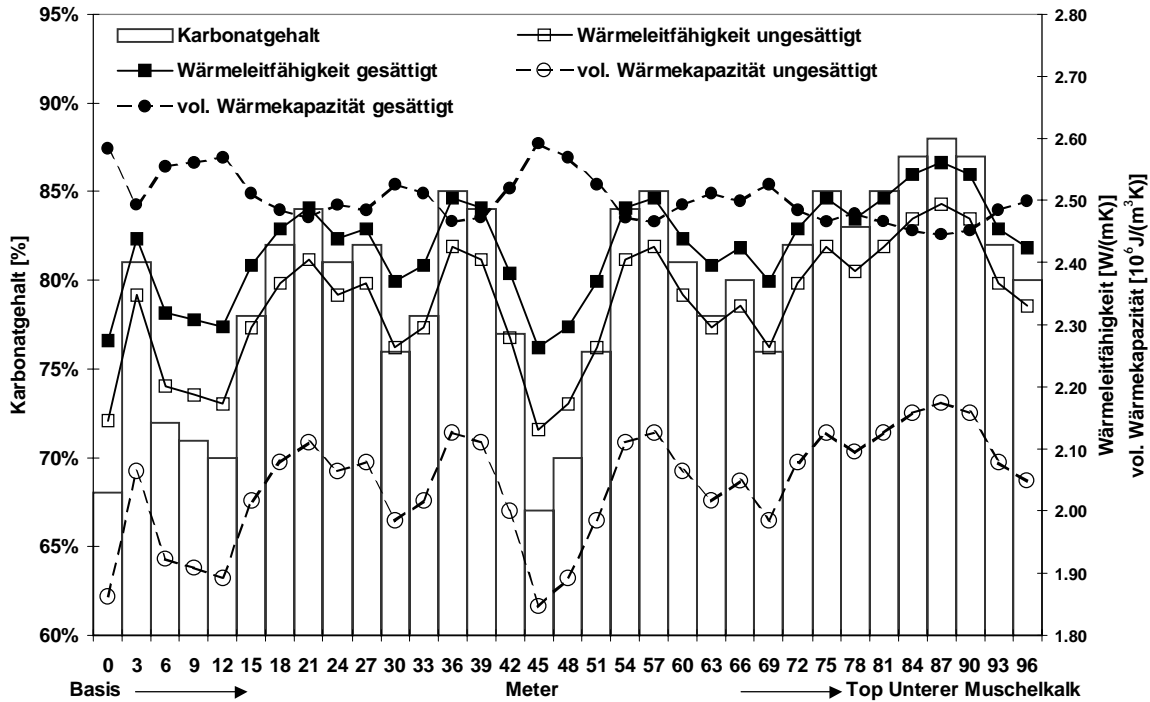


Abbildung 4-14: Mittlere Karbonatgehalte für 27 Bohrungen im Unterem Muschelkalk aus dem Raum Unterfranken (nach HALTENHOF, 1962) und die nach DRURY & JESSOP (1983) bzw. SCHÖN (1983) auf Basis dieser Daten errechneten thermischen Eigenschaften. Die Berechnungen erfolgten unter der Annahme, daß die Porosität bei zunehmenden Tongehalt steigt (vgl. Abbildung 4-12).

4.3.5 Keuper

4.3.5.1 Verbreitung, Bedeutung und Gliederung

Gesteine des Keupers nehmen mit 3290km² oder 38,4% den größten Anteil an der Fläche Unterfrankens ein. Die Mächtigkeit des Keupers beträgt in Unterfranken zwischen und 400 und 500m (Abbildung 4-15). Vorherrschende Gesteine sind Sand- und Tonsteine mit gelegentlichen geringmächtigen Einschaltungen von Karbonaten, Evaporiten und Kohlen. Ähnlich wie im Buntsandstein befindet sich die Gliederung des Keupers seit geraumer Zeit im Umbruch. Eine Neugliederung wurde von der Perm-Trias Subkommission vorgeschlagen (GEYER, 2000). Nach der „klassischen“ Gliederung werden im unterfränkischen Bereich nach vorwiegend lithologischen Kriterien der Untere Keuper (Lettenkohlenkeuper), der Mittlere Keuper (Gipskeuper und Sandsteinkeuper) sowie der Obere Keuper (Rhät) unterschieden.

4.3.5.2 Geologie

4.3.5.2.1 Unterer Keuper (*ku*)

Der *ku* nimmt im Untersuchungsgebiet eine Fläche von 1860km² (21%) ein. Die i. M. etwa 40m mächtige Abfolge besteht vorwiegend aus tonigen Gesteinen, in die Sandsteinpakete sehr variabler Mächtigkeit sowie Karbonate, Evaporite und Kohlen eingelagert sind. Der *ku* bedeckt den Oberen Muschelkalk in weiten Bereichen nur mit wenigen Metern Mächtigkeit, so daß der enorme Ausstrichbereich eine weit größere Bedeutung vorspiegelt als sie dem *ku* tatsächlich zukommt (vgl. dazu Kap. 7.2.3.1.4). Bedeutsame Einheiten sind der Werksandstein, der sich etwa in der Mitte der Abfolge befindet und der Grenzdolomit, dessen Top die Grenze zum Mittleren Keuper (*km*) bildet. Beim Werksandstein handelt es sich um einen in normaler Ausbildung 2-3m, in Rinnen aber mehr als 12m mächtigen Sandsteinkomplex (GEYER, 2000). Er besteht vor allem aus tonig gebundenen Feinsandsteinen, die einen Medianwert von 0,14mm bei einem Feinanteil von 17,7% aufweisen (SCHMITT, 1982). Der Grenzdolomit ist mit 2,5 bis 4m Mächtigkeit aufgrund seiner Neigung zur Bildung von Verebnungsflächen in Unterfranken weit verbreitet.

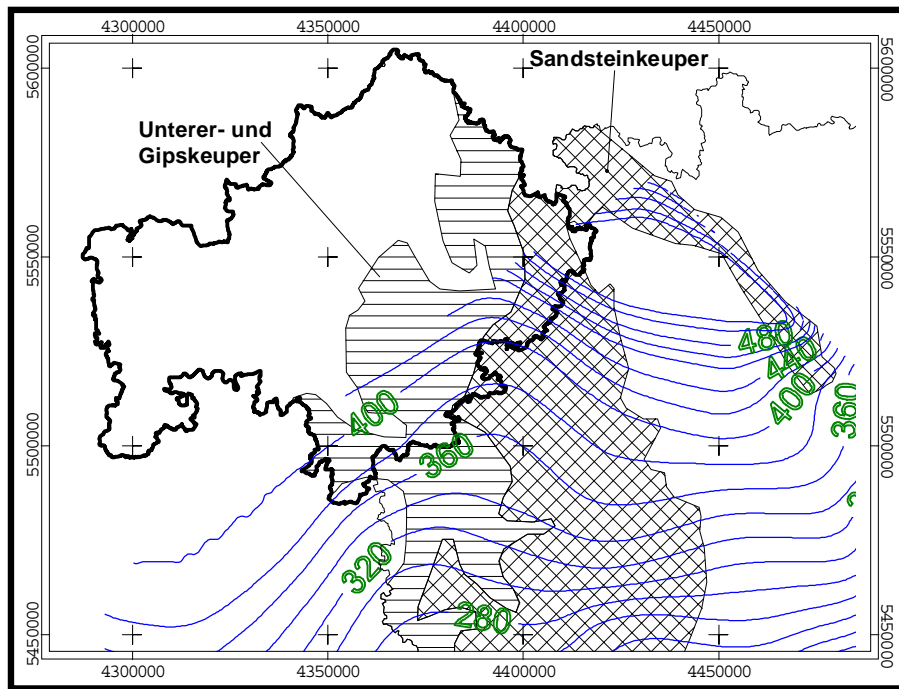


Abbildung 4-15: Verbreitung und Mächtigkeit des Keupers in Nordbayern. I.W. Nach GUDDEN & HAUNSCHILD (1993).

4.3.5.2.2 Mittlerer Keuper (*km*)

Mit einem Anteil von 17% an der Fläche Unterfrankens und einer Mächtigkeit von insgesamt etwa 400m stellt der *km* eine sehr bedeutende Einheit dar. Er wird traditionell weiter in den sogenannten „Gips“- und den „Sandstein“- Keuper gegliedert. Insgesamt werden sieben Untereinheiten, von denen vier dem **Gipskeuper** zugeordnet sind ausgeschieden:

- Die **Myophorienschichten (*kmM*)** stellen ein in Unterfranken i.M. 70m mächtiges Tonsiltsteinpaket dar, an dessen Basis ein i.M. etwa 12m mächtiger Gips-(Anhydrit)-Horizont, die sogenannten Grundgips-schichten, ausgebildet ist (vgl. auch HOFMANN, 1986).
- Die **Estherienschichten (*kmE*)** werden aus einer Abfolge dolomithaltiger, rötlicher Tonsiltsteine mit gelegentlichen Gipseinschaltungen und Steinmergelbänken gebildet. Die Mächtigkeit beträgt in Unterfranken 20-40m.
- Der **Schilfsandstein (*kmS*)** besteht aus gut sortierten Feinsandsteinen in einer Mächtigkeit von 8-38m (GEYER, 2000) bzw. 0-50m im gesamten Main Einzugsgebiet (BAYGLA, 1993).
- Bei den **Lehrbergsschichten (*kmL*)** handelt es sich um eine 25-40m mächtige Folge schwach karbonatischer Tonsiltsteine.

Im Gipskeuper herrschen demnach insgesamt feinkörnige Gesteine in relativ homogener Ausbildung vor.

Der **Sandsteinkeuper** wird in 3 Einheiten gegliedert:

- Der **Blasensandstein (*kmBl*)** ist rund 25-40m (bis 70m) mächtig und besteht aus oft feldspatreichen, mürben, mittelkörnigen Sandsteinen. Ihm wird auf der GÜK200, Blatt Bamberg, auch der ca. 5-30m mächtige Coburger Sandstein zugerechnet.
- Als **Burgsandstein (*kmB*)** wird eine 130-150m mächtige Abfolge von bis zu drei Sandsteinkomplexen (Unterer, Mittlerer, Oberer) bezeichnet, die von sogenannten Basisletten unterlagert werden.
- Den Abschluß des Mittleren Keupers bildet ein 45-60m mächtiges Paket aus violettrotten Tonmergeln oder Tonsiltsteinen, der sogenannte **Feuerletten (*kmF*)**.

4.3.5.2.3 Oberer Keuper (*ko*, Rhät)

Der Obere Keuper spielt in Unterfranken aufgrund seiner geringen Verbreitung von weniger als 0,3% der Gesamtfläche kaum eine Rolle. Die sandig bis tonig ausgebildeten, 30-35m mächtigen Gesteine gehen ohne eindeutige Abgrenzung in den Unteren Jura über und werden deshalb auf der GÜK 200 Blatt Bamberg als *ko-ju* ausgewiesen.

4.3.5.3 Hydrogeologie

Der in vielen Gebieten überwiegend tonig ausgebildete **Untere Keuper** weist im Allgemeinen eine geringe Durchlässigkeit und Wasserführung auf (SCHWARZMEIER, 1981, 1982). Lokal bilden die meist nur wenige Meter mächtigen Sandsteinhorizonte sowie die klüftigen Kalke und Dolomite wenig ergiebige Grundwasserleiter. In einigen Bereichen erlangt vor allem der Werksandstein im *ku1* größere Bedeutung, wenn er in Rinnefazies in höheren Mächtigkeiten auftritt. Auch der teilweise brekziöse Grenzdolomit ist lokal als Grundwasserleiter bedeutend. Die Durchlässigkeiten im *ku* liegen nach EINSELE & MERKLEIN (1978) um $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Wassererschließungen im *ku* erschließen selten mehr als 2l/s. Im Rahmen von regionalen Betrachtungen kann der *ku* wegen der intensiven Faziesverzahnung zu einem einzigen Stockwerk zusammengefaßt werden, das häufig auch mit den obersten Einheiten des *mo* in Verbindung steht.

Der **Gips- und der untere Sandsteinkeuper** liegen in Unterfranken vor allem in der tonigen Beckenfazies vor und sind deshalb weitgehend als Grundwassernichtleiter einzustufen (MATTHESS, 1970). Nur die verkarteten Grundgipsschichten (vgl. Kap. 4.4.2 und Abbildung 4-30) sowie der Schilfsandstein sind als Grundwasserleiter zu bezeichnen. Die Tonsteine können oberflächennah schwach geklüftet sein und geringe Mengen an Grundwasser führen. Der Schilfsandstein ist in Unterfranken als Grundwasserleiter weitgehend unbedeutend, da er sich, wie auch die darüberliegenden Schichten des Sandsteinkeupers, meist in exponierter Höhenlage und damit über der Grundwasseroberfläche befindet (SCHMITT, 1982).

Die mächtigen sandig- bis sandig-tonigen Abfolgen des **Sandsteinkeuper** stellen (potentiell) bedeutende Grundwasserleiter mit guten Durchlässigkeiten von $3,3 \cdot 10^{-4}$ bis $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s dar. Am Top der Sandsteinfolgen bildet der Feuerletten mit einer relativ einheitlichen Mächtigkeit von 60m eine gering- bis undurchlässige Überdeckung.

Das Porenvolumen der Sandsteine im *km* liegt in den Haßbergen bei 8-25%, das nutzbare Porenvolumen bei 0,4-1,5% (DOBNER, 1975). Die Gebirgsdurchlässigkeiten liegen zwischen $3 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s, (EINSELE & MERKLEIN; 1978), die Porendurchlässigkeiten bei $k_f=5,4 \cdot 10^{-8}$ m/s, bis maximal $4 \cdot 10^{-7}$ m/s (SCHMITT, 1982). In Oberflächenaufschlüssen können Kluftvolumen von 1 bis 3%, bei einer Klufthäufigkeit 2-3/m in den Sand- und 10-20/m in den Tonsteinen festgestellt werden. Trotz dieser guten, mit dem Unteren und Mittleren Buntsandstein vergleichbaren oder sogar besseren Aquifereigenschaften, spielt der Sandsteinkeuper in Unterfranken als Grundwasserleiter keine große Rolle. Die Sandsteine liegen in Unterfranken meist in den Höhenlagen der Haßberge und des Steigerwalds und damit deutlich über der regionalen Grundwasseroberfläche. Abbildung 4-16 zeigt zusammenfassend Durchlässigkeiten und spezifische Ergiebigkeiten im fränkischen Sandsteinkeuper.

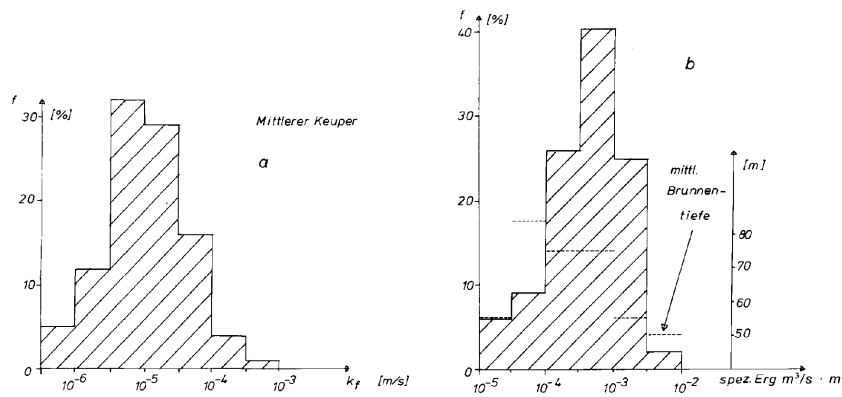


Abbildung 4-16: Durchlässigkeitsbeiwerte und spezifische Ergiebigkeiten von Brunnen aus dem Mittleren Keuper (i.W. Sandsteinkeuper). Aus EINSELE & MERKLEIN (1978).

Im **Oberen Keuper** bildet der Rhätsandstein einen Aquifer, der aufgrund seiner wechselnden Fazies- und Mächtigkeitsverhältnisse lokal sehr unterschiedlich ausgebildet sein kann.

4.3.5.4 Hydrochemische Verhältnisse

Die hydrochemischen Verhältnisse im Keuper sind entsprechend der rasch wechselnden geologischen Bedingungen heterogen. So haben die Wässer aus den dolomitischen Kalken, Mergeln und Sandsteinen des *ku* Gesamtmineralisationen von 350-750mg/l (GEORGOTAS & UDLUFT, 1978). Von diesen sind die Wässer aus den Sandsteinen am geringsten mineralisiert und mit pH-Werten unter 7 leicht aggressiv. Im *km* sind nach den oben genannten Autoren vier unterschiedliche Wassertypen zu beobachten: Sehr gering mineralisierte Wässer aus dem Schilfsandstein (100mg/l), hoch mineralisierte Wässer aus den gipsführenden Schichten des Gipskeupers (bis 2500mg/l), mittelstark bis stark mineralisierte Wässer im Unteren Sandsteinkeuper (800mg/l) sowie Wässer aus dem Oberen Sandsteinkeuper mit i.M. 500mg/l Lösungsinhalt. Je nach Ausgangsgestein können unterschiedliche Zusammensetzungen beobachtet werden.

4.3.5.5 Mineralogische und thermische Eigenschaften

Aufgrund der bereichsweise sehr heterogenen Verhältnisse im Keuper ist es nicht möglich für das gesamte Untersuchungsgebiet gültige Angaben zu den thermischen Eigenschaften zu machen. Eine Behandlung des gesamten Gesteinsspektrums des Keupers mit seinen regionalen Mächtigkeits- und Faziesvariationen ist nicht sinnvoll, da lokale Abweichungen in einer Übersicht nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Die Sandsteine des Keupers sind mit den Sandsteinen des *su-sm* vergleichbar, die tonigen bzw. tonig-sandig und tonig-mergeligen mit denen des Oberen Buntsandstein und des Muschelkalk.

Aufgrund ihrer Verbreitung und Mächtigkeit sind die feinkörnigen Gesteine des *km* von besonderem Interesse für thermische Nutzungen (vgl. Kap. 5.2.3). Angaben zu ihrer mineralogischen Zusammensetzung machen z.B. JOST (1995), KEMNITZER (1993) und PÖTZL (1997). Die thermischen Eigenschaften von Gesteinen aus dem Keuper wurden überschlägig berechnet oder anhand von Vergleichen mit ähnlichen Gesteinen abgeschätzt. Die so ermittelten Werte sind in Tabelle 5-6 aufgeführt.

4.3.6 Jura (j)

Jurassische Sediment kommen im äußersten Westen des Untersuchungsgebietes vor. Es handelt sich dabei um sandige und tonige Schichten des Unteren Lias, die in den Hochlagen der Haßberge insgesamt eine Fläche von 0.2% Unterfrankens einnehmen. Für diese Untersuchung sind sie damit ohne jede Bedeutung.

4.3.7 Tertiär (T)

4.3.7.1 Vulkanite und Pyroklastika

In Unterfranken sind tertiäre Gesteine vulkanischen Ursprungs in der Rhön, der Heldburger Gangschar und in kleinen Vorkommen im Spessart verbreitet. Neben einem breiten Spektrum von ultrabasischen, basischen bis sauren Vulkaniten und Subvulkaniten, treten Pyroklastika unterschiedlichster Ausbildung und Genese auf. Die Gesteine haben meist jungtertiäres Alter. Vulkanische Gesteine nehmen etwa 70km² oder 0.9% der Gesamtfläche Unterfrankens ein. Flächenmäßig von Bedeutung sind hierbei ausschließlich die Basaltdecken der Rhön mit etwa 67km² (GÜK200). Hierbei kann angemerkt werden, daß die Darstellung der Basaltdecken der Rhön auf der GÜK200 und anderen Karten eine den realen Verhältnissen nicht angemessene Verbreitung vortäuscht. Wie durch geophysikalische Untersuchungen und Detailkartierungen gezeigt werden konnte, werden die meisten der dort als Basalt ausgewiesenen Flächen tatsächlich von pyroklastischen Gesteinen eingenommen (BARTHEL, 1993, 1995).

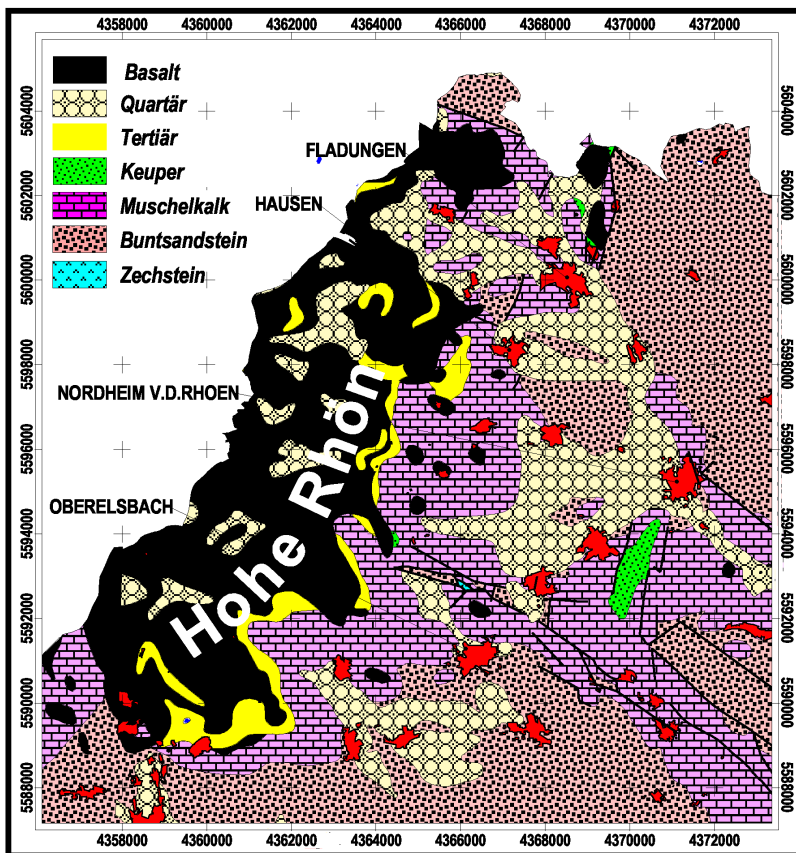


Abbildung 4-17: Verbreitung von Vulkaniten (hier einheitlich als „Basalt“ ausgewiesen), Pyroklastika und tertiären Sedimenten (zusammengefaßt als „Tertiär“) in der Hohen Rhön nach der GÜK200 (Blatt 5526 Erfurt, digital, nicht abgedeckt; vgl. Kap. 7.1). Schraffiert: Siedlungsflächen nach ATKIS25.

Legende Geologie: siehe Tabelle 5-6.

Vulkanite und Pyroklastika sind in Unterfranken nahezu ohne Bedeutung für die thermische Nutzung. Zusätzlich zu ihrer geringen Verbreitung treten sie in den am dünnsten besiedelten Regionen Unterfrankens auf (Hochrhön), von denen viele als Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate ausgewiesen sind (Abbildung 4-17). Die Nutzung von Gesteinen vulkanischen Ursprungs wird durch die stark heterogene Ausbildung erschwert. Ungünstige hydraulische Verhältnisse stellen zusätzliche Hinderungsgründe für die Nutzung dar. Wegen der komplizierten Verzahnung gut geklüfteter und gut wasserwegsamere Basalte mit geringdurchlässigen Tuffen und Tuffiten ist es schwer, Grundwasservorkommen und -bewegung quantitativ und qualitativ vorherzusagen (BARTHEL, 1995). Erschwerend kommt hinzu, daß im Bereich der Hochrhön eine intensive Verkarstung des unterlagernden Muschelkalkes auftritt (Kap. 4.3.4.3.4). Detaillierte Angaben zu den hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnissen in der Rhön geben BARTHEL (1995), BITTERSÖHL (1980) und UDLUFT (1969). Darstellungen zur Petrographie und Genese der vulkanischen Bildungen in Unterfranken geben z.B. EHRENBERG ET AL. (1994), GEYER (2000) und RUTTE & WILCZEWSKI (1983).

4.3.7.2 Tertiäre Sedimente

4.3.7.2.1 Rhön

Die Verbreitung der tertiären limnischen Sedimente, Kohlen und Süßwasserkalke in der Rhön ist so gering, daß auf sie hier nicht näher eingegangen wird. Aufgrund ihrer vorwiegend feinkörnigen Ausbildung sind sie im Allgemeinen als Grundwasserstauer anzusprechen und bilden gemeinsam mit feinkörnigen Tuffen und Tuffiten die Sohlschichten lokal ausgebildeter Grundwasservorkommen in geklüftetem Basalt.

4.3.7.2.2 Aschaffener Raum (Untermaingebiet)

Im Verlauf des Tertiärs entstanden in Mitteleuropa ausgedehnte Grabensysteme und Senkungszone, die zunächst mit marinen, später überwiegend mit fluviatilen und limnischen Sedimenten gefüllt wurden. Zu diesen Senkungszone zählt auf unterfränkischem Gebiet das Aschaffener Becken (auch „Untermaingebiet“), das den östlichen Fortsatz des am nördlichen Ende des Rheintalgrabens befindlichen Mainzer Beckens bildet. Die maximale Mächtigkeit der tertiären Sedimente beträgt im Untermaingebiet etwa 200m (DIEDERICH ET AL., 1991). Auf bayerischem Gebiet fehlt das Untermiozän (Corbicula- und Hydrobienschichten; BAYGLA, 1996). Die Sedimentation beginnt hier mit Ablagerungen des (Ober-)Pliozän und erreicht auf den Blättern Aschaffenburg und Alzenau eine Gesamtmächtigkeit von rund 50m (STREIT & WEINELT, 1971).

Das Tertiär des Untermain streicht nach der GÜK200 in Unterfranken an keiner Stelle aus, da es überall von quartären Sedimenten überlagert wird. Diese sind meist nur wenige Meter, bereichsweise auch bis zu 40m mächtig (OKRUSCH ET AL., 1967; vgl. auch Kap. 4.3.8.7.1 und Abbildung 4-4).

Die tertiären Ablagerungen bestehen vorwiegend aus Sanden und Tonen, die vor allem in der Nähe des Spessart auch in kiesige Lagen übergehen können. In die Abfolge sind Braunkohleflöze eingeschaltet, die eine addierte Gesamtmächtigkeit von bis zu 17m erreichen können. Aufgrund der wechselhaften Sedimentationsbedingungen sind eindeutige Charakterisierungen der tertiären Abfolge nicht möglich. Eine große Fülle von Profildarstellungen, Aufschlüssen und sedimentpetrographischen Untersuchungen ist in OKRUSCH ET AL. (1967) und STREIT & WEINELT (1971) dokumentiert.

Die **hydrogeologischen Eigenschaften** der pliozänen Ablagerungen ändern sich im Untermaingebiet von Norden nach Süden. Im Norden, auf Blatt Alzenau, sind die Sedimente tonig-feinsandig ausgebildet und weitgehend undurchlässig und bilden die Basis des pleistozänen Grundwasserleiters. Im Süden dagegen stellen die pliozänen Sande und Kiese in der Großostheimer Senke gemeinsam mit der quartären Abfolge einen wichtigen Porengrundwasserleiter dar. Da in diesem Bereich Pliozän und Pleistozän keine wesentlichen lithologischen Unterschiede aufweisen, werden sie zu einem einheitlichen Grundwasserleiter zusammengefaßt, der in Kap. 4.3.8.7.1 besprochen wird.

Die **thermischen Eigenschaften** der klastischen tertiären Ablagerungen unterscheiden sich nicht von ihren quartären Äquivalenten. Die in Kap. 4.3.8.6 gemachten Angaben können deshalb übertragen werden.

Das Tertiär im Aschaffener Becken wird meist in Teufenbereichen angetroffen, die für die thermische Nutzung noch interessant sind. Der potentiell nutzbare Bereich hat auf unterfränkischem Gebiet eine Ausdehnung von etwa 150- 200km (2%). In Bereichen, in denen das Tertiär sandig-kiesig ausgebildet ist, ist prinzipiell eine Nutzung mit grundwassergekoppelten Wärmepumpen (GWWP) möglich. Da in diesen Fällen meist keine eindeutige Trennung vom quartären Grundwasserleiter vorliegt, werden solche Nutzungen bei der Besprechung der Verhältnisse im Quartär abgehandelt. Anderweitige Nutzungen werden durch den heterogenen Aufbau der tertiären Abfolge und die potentiell hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten erschwert. Grundsätzlich ist die Erschließung tertiärer Sedimente für die thermische Nutzung problematisch, da sie fast immer von intensiv für die Trinkwassererschließung genutzten pleistozänen Schottern überlagert werden.

4.3.8 Quartär – Mainquartär (Q)

Auf geologischen Karten in Unterfranken werden häufig extrem große Flächen von Ablagerungen des Quartärs eingenommen. Auf den Blättern der GÜK200 sind dies etwa 30% der Gesamtfläche (z.B. GÜK200, unterfränkischer Anteil von Blatt Bamberg: 28,5% „Quartär“, davon 13% Löß). Bei den weitaus meisten dieser Flächen handelt es sich um geringmächtige Löß- und Flugsandablagerungen, Talauen-Sedimente oder sonstige junge quartäre Bildungen. Für die thermische Nutzung sind diese Ablagerungen weitgehend uninteressant²⁹, da ihre Mächtigkeit zu gering und zu variabel ist. Damit reduziert sich der für die thermische Nutzung interessante Anteil der quartären Einheiten auf die pleistozänen Sande und Kiese im Tal des Mains, die hier im Folgenden als „**Mainquartär**“ bezeichnet werden. Trotz ihrer vergleichsweise geringen Mächtigkeiten von i.M. etwa 10m (0-45m), sind sie als bedeutende Grundwasserleiter interessant für thermische Nutzungen.

4.3.8.1 Verbreitung und Bedeutung

Das Mainquartär in Unterfranken nimmt eine Fläche von 416km² oder 4,9% der Gesamtfläche ein. Davon liegen 82,4km² bzw. 19,8% im Bereich von Siedlungsflächen (übriges Unterfranken: 5,3%). Alle großen Städte Unterfrankens, Würzburg, Aschaffenburg und Schweinfurt, liegen im Maintal und seinem Einzugsbereich. 303km² oder 73% des Maintalbereichs liegen im Bereich potentiell für thermische Nutzungen „interessanter“ Flächen (definiert in Kap. 6.4.2.2.2).

4.3.8.2 Literatur und Datenquellen

Die umfassendste Darstellung der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse im Maintal geben DOBNER & WEINELT (1980). In dieser Arbeit sind die wesentlichen geologischen und hydrogeologischen Rahmendaten zu einzelnen Abschnitten des Maintals zusammengestellt. Eine ausführlichere Darstellung der hydrochemischen Gegebenheiten gibt BAYGLA (1993). Detailuntersuchungen und Hinweise auf zahlreiche weitere Untersuchungen zu hydrogeologischen und hydrochemischen Fragestellungen im Maintal stellen ANDRES & GEORGOTAS (1978) zusammen. Lokale Daten, Bohrprofile, hydrochemische Daten uvm. sind den Erläuterungen zu den Kartenblättern der GK25, die den Maintalbereich erfassen, zu entnehmen. Die betreffenden Karten und ihre Verfügbarkeit zeigt Abbildung 4-1. Speziellen Fragestellungen gehen zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, Dissertationen und Diplomarbeiten nach (z.B. Bokhari, 1977, HOBLER, 1971; HOFFMANN, 1963; KANZ, 1977 u.v.m.). Daten zu Bohrungen und Wassererschließungen liegen bei den örtlichen Wasserwirtschaftsämtern, dem BayLfW und dem BayGLA vor.

Trotz der immensen Fülle an Literatur und Datenmaterial zu Geologie und Hydrogeologie des Maintals, bestehen nach wie vor große Informationslücken. Dies betrifft insbesondere die Mächtigkeit und Ausbildung der quartären Talfüllung, die trotz der hohen Anzahl an bereits niedergebrachten Bohrungen an vielen Stellen noch vollständig unbekannt sind, wie sich z.B. im Rahmen der Kiesprospektion immer wieder zeigt (freundl. mündl. Mitt. PD Dr. K. Ernstson).

4.3.8.3 Geomorphologie

Als „Mainquartär“ werden hier pauschal alle pleisto- und holozänen Ablagerungen bezeichnet, die sich im Bereich des heutigen morphologisch abgrenzbaren Maintals, also im Bereich der Talau und der angrenzenden Hoch- und Niederterrassen befinden. Auf diese Weise werden verschiedene Bildungen zusammengefaßt, die in der GÜK200 getrennt ausgewiesen sind. Das sind im einzelnen Terrassen unterschiedlichen Alters, Löß, Dünen, Schwemmfächer, Schuttmassen und Flugsand, fluviatile Bildungen allgemein usw. Da-

²⁹ Mit Ausnahme des Wärmeentzugs mit horizontalen Erdreichwärmetauschern, der in dieser Untersuchung nicht betrachtet wurde.

Bereich	Gefälle in ‰
Maineck	0.1
Ebensfeld	0.06
Trunstadt	0.1
Schweinfurt	0.05
Kitzingen	0.01
Wertheim	0.1
Aschaffenburg	0.05

Tabelle 4-10: Gefälle des Mains für ausgewählte Lokaltäten in Unter- und Oberfranken. Aus BAYGLA (1993).

rüberhinaus werden in den entsprechenden Blättern der GK25 teilweise noch weitere Differenzierungen vorgenommen.

Der durch oben genannte Festlegung als „Mainquartär“ bezeichnete Bereich hat eine durchschnittliche Breitenstreckung von etwa 1km. Diese kann im Bereich des Aschaffener- und Schweinfurter Beckens bis zu 15km anwachsen, liegt aber über weite Strecken, insbesondere im Ausstrichbereich des Buntsandsteins und des Muschelkalks, nur bei wenigen 100m. Das Maintal ist in die umgebenden Gesteine der Trias ca. 100-200m tief eingeschnitten, im Spessart etwas tiefer, im Schweinfurter Raum dagegen nur etwa 10-30m.

Der Main hat auf unterfränkischem Gebiet ein Gefälle von i.M. 0,4‰.

Die Gefällewerte schwanken dabei zwischen 0,01 und 0,1‰ (Tabelle

4-10). Die höchsten Bereiche des Maintals liegen beim Eintritt in unterfränkisches Gebiet auf 229m/NN, am Austritt auf 104m/NN.

Das Maintal in Unterfranken wird in dieser Arbeit in sechs verschiedene Bereiche gegliedert. Die Abgrenzung erfolgt voranging nach dem umgebenden Festgesteinsrahmen und der Morphologie des Talquerschnitts. Von Westen nach Osten lassen sich danach unterscheiden (vgl. Abbildung 4-18):

3. Das **Untermaingebiet (Aschaffener Becken)**: Weiter, bis 15km breiter Talquerschnitt mit mächtigen pleistozänen Schottern auf tertiärer Unterlage, ca. 122km² (Kap. 4.3.8.7.1).
4. **Buntsandsteinspessart** von Obernburg bis Karlstadt: Maintal tief eingeschnitten (200m und mehr), enger Talquerschnitt mit sehr steilen Hängen, Festgesteinsrahmen: Unterer und Mittlerer Buntsandstein, ca. 130km² (Kap. 4.3.8.7.2).
5. **Mittelmaingebiet im Ausstrich des Muschelkalks**: Etwas weniger tief eingeschnittener, aber kaum weiterer und flacherer Querschnitt als in 2., umgeben von Gesteinen des Muschelkalks, ca. 66km² (Kap. 4.3.8.7.3).
6. **Schweinfurter Becken**: Weiter, flacher Talquerschnitt, vorwiegend im Bereich toniger Schichten des Unteren Keupers, ca. 43km² (Kap. 4.3.8.7.4).
7. **Mittelmaingebiet im Ausstrich des Grenzbereichs Oberer Muschelkalk und Unterer Keuper**: Wie 3., jedoch etwas flacherer Talquerschnitt, ca. 20km² (Kap. 4.3.8.7.5).
8. **Mittelmaingebiet im Ausstrich des Unteren Keuper**: Flacher bis mittelsteiler, wenig eingetiefter Talquerschnitt, ca. 34km² (Kap. 4.3.8.7.6).

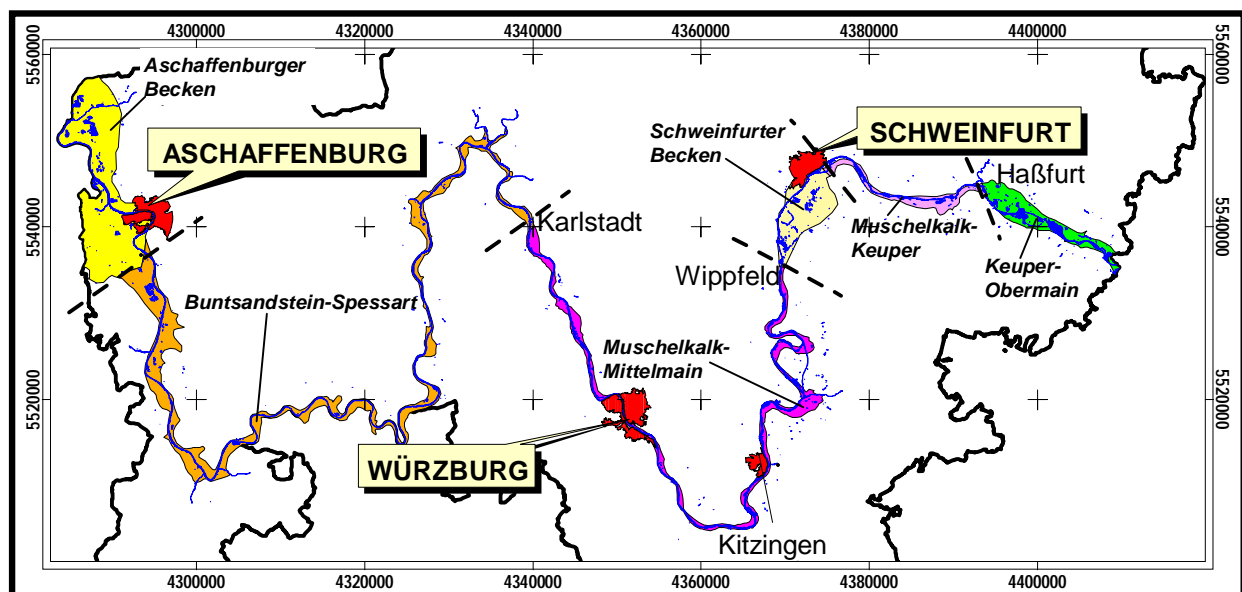


Abbildung 4-18: Gliederung des Maintals in sechs Abschnitte anhand geologisch-morphologischer Kriterien.

4.3.8.4 Geologischer Aufbau

Mächtigkeit und laterale Ausdehnung der einzelnen Grundwasserleiter sind im Maintal sehr uneinheitlich. Zusammenfassend kann man von einer ineinander verzahnten Abfolge gröberer und feinkörniger Sedimente sprechen, wobei die altpleistozänen Ablagerungen mehr kiesig, die jungpleistozänen Ablagerungen mehr sandig dominiert sind. Meist wird die Abfolge nach oben von einer sandig-schluffigen Auelehmdecke abgeschlossen (BAYGLA, 1993). In engen Bereichen des Maintals tritt häufig eine Verzahnung mit Schutt- und Schwemmfächern aus den Seitentälern des Mains auf. An den Übergängen zu den Steilhängen des Muschelkalk und des Buntsandstein sind zudem häufig mächtige Hangschuttdecken anzutreffen. In den weiten Talbereichen treten oft verlandete Altarmschleifen des Mains auf. Eine Grobgliederung, die sich an die von KÖRBER (1962) erarbeitete detaillierte Terrassengliederung anlehnt, geben DOBNER & WEINELT (1980):

Morphologische Einheit	Stratigraphische und lithologische Zuordnung
Holozän und untere Niederterrasse	Talfüllung – kiesig bis schluffig sandig
Obere Niederterrasse	jungpleistozäne Terrassensande und –schotter
Mittel- und Hauptterrasse	mittel- bis ältestpleistozäne bzw. ungegliederte Terrassensande und –schotter)

Tabelle 4-11: Stratigraphische Grobgliederung des Quartärs im Maintal. Nach AL-AZAWI ET AL. (1978), DOBNER & WEINELT (1980), KÖRBER (1962) und SCHIRMER (1978).

Die **Mächtigkeit** der quartären Maintalsedimente ist sehr variabel, da sie ein durch verschiedene Prozesse angelegtes Paläorelief auskleiden. Sie liegen i.M. bei etwa 10m (AL-AZAWI ET AL., 1978). Besonders hohe Mächtigkeiten von bis zu 30m treten im Bereich von Paläo-Rinnen auf (STREIT & WEINELT, 1971). Große Mächtigkeiten sind außerdem in Bereichen akkumuliert, in denen sich der Main im Bereich des *mm* eingetieft hat. Dort bildeten sich sehr lokal Einsturzdolinen oder auch größere zusammenhängende Subrosionsgebiete, in denen Quartärsedimente von bis zu 45m Mächtigkeit akkumulierte sind (HOBLER, 1971; HOFFMANN, 1962). Eine gute Übersicht über die Variabilität der Mächtigkeiten, das Relief der Quartärbasis und die Morphologie der Talquerschnitte bieten die Querprofile aus DOBNER & WEINELT (1980), die auszugsweise in Abbildung 4-20, 4-23, 4-24 und 4-27 und wiedergegeben sind. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen Profile durch das Maintal, daß die Mächtigkeit der pleistozänen Schotter mit der Weite des Talquerschnitts korreliert. Die Mächtigkeit ist in den breiten Beckengebieten offensichtlich etwas einheitlicher und größer als in den steil eingeschnittenen Abschnitten. In diesen ist dagegen die Bedeckung mit holozänem, von den Talhängen geschüttetem Material höher.

Die quartäre Maintalfüllung wird üblicherweise von kiesig-sandigen Ablagerungen aufgebaut, die von einer bis zu 2m mächtigen sandig-schluffigen Auelehmdecke überlagert werden. Ältere Terrassen werden häufig von Löß oder Umlagerungsprodukten in einer Mächtigkeit von über 10m (DOBNER & WEINELT, 1980) bedeckt. Der Kiesanteil der pleistozänen Kiessande wird vorwiegend vom Material der umgebenden Festgesteinseinheiten gestellt, die Sandfraktion wird dagegen immer von Quarz dominiert. Im Allgemeinen ist eine vertikale Zonierung in einen tieferen Bereich, der vorwiegend von mäßig sortierten Kiessanden mit einem Kiesanteil von >50% aufgebaut wird und einen oberflächennahen Bereich, mit gutsortierten Sanden und geringem Schluffanteil zu beobachten. Es besteht ein undeutlicher Trend, wonach die mittlere Korngröße in Fließrichtung des Mains abnimmt.

4.3.8.5 Hydrogeologie

4.3.8.5.1 Charakterisierung des Aquifers

Die grobkörnigen Sedimente des Mainquartärs bilden im allgemeinen Sprachgebrauch einen einheitlichen Aquifer. Durch den fortwährenden Wechsel der Sedimentationsbedingungen in Folge der klimatischen Veränderungen und der ständigen Verlagerung des Flußbettes, ist dieser allerdings sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung stark zoniert. Wie oben erwähnt, besteht ein genereller Trend, wonach die altpleistozänen Ablagerungen im Liegenden gröberkörniger sind als die des jüngeren Pleistozän. Letztere keilen

keilen zu den Talrändern hin aus, so daß dort die altpleistozänen Kiese zu Tage treten. Meist wird der Aquifer von holozänen, sandig-schluffigen Auenlehmen bedeckt.

Typische **Durchlässigkeiten** für die Mainsande und -kiese liegen nach verschiedensten Literaturangaben (Kap. 4.3.8.2) zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $1 \cdot 10^{-4}$ m/s, wobei Abweichungen um eine Zehnerpotenz nach oben und unten möglich sind. Aufgrund der kleinräumig komplexen Faziesgliederung der quartären Sedimente sind größere Variationen auf geringer Distanz möglich. Entsprechend der oben angeführten vertikalen Zonierung des quartären Aquifers liegen die Durchlässigkeiten in den altpleistozänen Kiesen an der Basis des Mainquartärs bei $5 \cdot 10^{-2}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, die in den eher sandigen jungpleistozänen Sedimenten etwa um den Faktor 5 bis 10 niedriger (EINSELE & MERKLEIN, 1978). Tabelle 4-12 gibt einen Überblick über die Durchlässigkeiten, die bei Wassergewinnungsanlagen im Bereich des Maintals angetroffen wurden.

Ort	TK25-Blatt	k_f min	k_f max	k_f Mittel	Anzahl
Blatt Grettstadt	6027			1.00E-03	
Kleinostheim	5920	4.0E-05	3.0E-04	1.0E-04	9
Alzenau	5920	4.0E-04	2.0E-03	1.2E-03	27
Karlstein	5920	1.5E-05	2.3E-03	1.4E-03	27
Kahl a.M.	5920	2.5E-04	1.7E-02	2.1E-03	28
Alzenau	5920	4.0E-04	1.4E-03	6.5E-04	8
Großostheim	6020	1.0E-04	1.4E-02	1.4E-03	22
Großwallstadt	6120	6.0E-04	1.6E-03	1.2E-03	16
Wörth	6221	4.0E-04	9.0E-04	6.5E-04	6
Kreuzwertheim	6223	7.0E-04		3.0E-04	6
Karlstadt	6024		1.5E-03	1.2E-03	20
Marktbreit	6326	6.0E-04	2.3E-03	9.0E-04	27
Schonungen	5927	9.0E-04	3.4E-03	1.9E-03	21
Weyer	5927	8.0E-04	1.9E-03	1.3E-03	19
Gädheim	5928			1.5E-03	6
Wönfurt	5928	7.0E-04	1.3E-01	1.4E-03	25
Haßfurt	5929	4.0E-04	8.0E-04	6.0E-04	16
Sand, Eltmann, Ebelsbach, Zeil	6029	9.0E-04	4.3E-03	1.4E-03	18
Roßstadt	6030	1.2E-03	2.2E-03	1.9E-03	7
Anzahl der Meßwerte:					308
gewichteter Mittelwert:					1.3E-03

Tabelle 4-12: Mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] im Mainquartär für verschiedene Lokalitäten im Maintal, geordnet nach TK-Blättern (Abbildung 4-1). Angaben i.W. aus BAYGLA (1993), ergänzt durch andere Quellen (vgl. Kap. 4.3.8.2).

Die **Gesamtporosität** der Kiessande des Mainquartärs liegt nach übereinstimmenden Angaben verschiedener Autoren bei etwa 30%. Der nutzbare Porenanteil liegt bei 12 bis maximal 17% (KANZ, 1978), kann aber bei feinkörnigem Material auch deutlich darunter liegen.

Je nach Ausbildung des Oberflächenreliefs, des Reliefs der Quartärbasis und der Lage der Grundwasseroberfläche, ergeben sich im Maintalbereich **Flurabstände** von ca. 2 bis 20m. Im Normalfall steigen Geländeoberfläche, Quartärbasis sowie Grundwasseroberfläche zu den Talhängen hin an. Da die Grundwasseroberfläche deutlich flacher einfällt als die beiden anderen Flächen, führt dies zu einer Verringerung oder zum Auskeilen der grundwassererfüllten Bereiche im Quartär. An den Talrändern ist deshalb nur dort mit nennenswerten **Grundwassermächtigkeiten** zu rechnen, wo fossile Rinnenfüllungen auftreten (vgl. z.B. Abbildung 4-26). Wo dies nicht der Fall ist, kann auch in relativ mächtigen quartären Ablagerungen die Grundwassermächtigkeit gering sein (vgl. z.B. Abbildung 4-23). Als Beispiele nennt BAYGLA (1993) grundwasserfreie Terrassen bei Miltenberg, Trennfeld, Marktheidenfeld, Karlburg und Schweinfurt.

Die Grundwassermächtigkeiten bewegen sich im Üblichen um 3-8m, Werte von über 10m sind die Ausnahme. Wesentlich höhere Werte von bis zu 25m treten nur bei Marktstett (Kap. 4.3.8.7.3) und südlich von Aschaffenburg (Kap. 4.3.8.7.1) auf.

Der Grundwasserspiegel im Mainquartär wird durch den Wasserstand des Mains beeinflusst. Bei Hochwässern tritt Wasser aus dem Main in den quartären Aquifer über, es kommt zu einer vorübergehenden Umkeh-

zung der Grundwasserfließrichtung im mainnahen Bereich sowie zu einer generellen Anhebung (SCHWARZMEIER, 1981). Der maximale Anstieg ist dabei an mainfernen Pegeln phasenverschoben. Für viele Bereiche des Maintals werden maximale saisonale Pegelstandsänderungen von etwa 2m angegeben.

4.3.8.5.2 Hydraulischer Zusammenhang mit der Festgesteinsbasis

Der Main bildet, abgesehen von wenigen Ausnahmen, überall den Vorfluter sowohl für den quartären im Maintal als auch für die triassischen Aquifere des Festgesteinsrahmens. Aus letzteren tritt Grundwasser großräumig direkt in die Maintalsedimente über. Eine besonders intensive Beeinflussung findet dort statt, wo der Untergrund stark geklüftet oder verkarstet ist. In Bereichen, in denen das Quartär auf geringdurchlässigen Sedimenten liegt (Oberer Buntsandstein), finden Grundwasserzutritte aus dem Festgestein dagegen nur lokal im Bereich von Verwerfungs- oder Klüftzonen oder indirekt durch Zuflüsse aus Quellen, die in höheren Talbereichen liegen, statt (BAYGLA, 1993). Bereichsweise führen Verwitterungsvorgänge, insbesondere auf Gesteinen des Muschelkalk, zu einer Verlehmung und damit Abdichtung des Liegenden.

4.3.8.5.3 Grundwasserdynamik

Die Grundwasserfließbewegung ist im Maintal meist annähernd senkrecht zum Main hin gerichtet, da das Gefälle längs des Maintals sehr gering ist, die Talhänge meist aber sehr steil sind (AL-AZAWI ET AL., 1978). Nur in Bereichen mit flacherem und weiteren Talquerschnitt kann eine stärkere talparallele Komponente der Grundwasserfließbewegung festgestellt werden (BAYGLA, 1993). Üblicherweise fällt die Grundwasseroberfläche flach zum Main hin ein und liegt in unmittelbarer Nähe zum Main auf dem Niveau des Mains. Es sind allerdings auch Fälle dokumentiert, in denen der Grundwasserspiegel bis zu 4m unter dem Mainniveau liegt (freundl. mündl. Mittlg. Prof. Dr. P. Udluft).

Die Grundwasseroberfläche wird im Maintal durch zahlreiche menschliche Eingriffe verändert. Hierzu zählen Grundwasserentnahmen für die Trink- und Brauchwasserversorgung, Staustufen und der Kiesabbau. Solche Veränderungen führen lokal zur Absenkung oder Aufhöhung des Grundwasserspiegels und damit Änderungen der Grundwasserfließbewegung. In den naturbelassenen Bereichen wird das Gefälle der Grundwasseroberfläche vor allem durch die Form des Talquerschnitts bestimmt. Bei engem Talquerschnitt und im Randbereich der Talung treten nach BAYGLA (1993) hohe Gefälle von bis zu 30‰ auf, in den Beckenbereichen bei Aschaffenburg und Schweinfurt werden deutlich geringe Gefälle angetroffen (0,5-5‰). Bei einer durchschnittlichen Durchlässigkeit von $k_f = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (Tabelle 4-12) und einem nutzbarem Porenvolumen von i.M. 13%, können daraus Abstandsgeschwindigkeiten von größenordnungsmäßig 0,5-5m/d in Bereichen mit geringem und 5-50m/d in Bereichen mit sehr hohem Grundwassergefälle abgeschätzt werden (vgl. Kap. 2.3.1.3). Damit liegen selbst bei geringem Grundwassergefälle die minimalen Fließgeschwindigkeiten im quartären Aquifer deutlich über 50m/Jahr.

4.3.8.5.4 Grundwasserneubildung - Grundwassererschließung

Nur ein geringer Prozentsatz des im Maintal umgesetzten Grundwassers wird auch im Bereich des Maintals selbst neugebildet, was bei Bilanzbetrachtungen aus den hohen möglichen Entnahmemengen und den vergleichsweise kleinen Flächen geschlossen werden kann. Für die direkt im Bereich des Maintals stattfindende Grundwasserneubildung werden Werte von $8 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ (Spessart) bis $3 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ angegeben (BAYGLA, 1993). Weitaus größere Anteile des geförderten Wassers entstammen anderen Bildungsprozessen. Die Herkunft des Grundwassers im Maintal kann durch die im Folgenden aufgelisteten Quellen erklärt werden:

- oberflächlich oder oberflächennah zufließende Wässer aus dem Bereich der Talhänge,
- Grundwasser, das aus den triassischen Grundwasserleitern randlich oder an der Basis des Quartärs eintritt,
- infiltrierendes Mainwasser, das vor allem im oberstromigen Bereich von Staustufen und gelegentlich bei Hochwässern Zutritt,
- Wasser, das im Bereich der Talaue selbst neugebildet wird.

Bei Grundwasserentnahmen werden Anteile aus allen vier genannten Quellen gefördert. Die Höhe der einzelnen Anteile läßt sich nicht pauschal angeben. Sie ist von verschiedenen Parametern, vor allem auch von der Durchlässigkeit des umgebenden Festgesteins und der Entfernung zum Main abhängig. Die möglichen Entnahmeraten werden von der Durchlässigkeit und der Grundwassermächtigkeit in den quartären Sedimenten bestimmt. Grundwasserentnahmen, die auf die quartäre Talfüllung beschränkt sind, erbringen spezifische Ergiebigkeiten von 1 bis 20 l/(s·m) (umgerechnet nach STREIT & WEINELT, 1971).

4.3.8.5.5 Hydrochemische Verhältnisse

Der Chemismus der Talgrundwässer ist nach DOBNER & WEINELT (1980) von folgenden Faktoren abhängig:

- Einzugsgebiete der unterirdisch zufließenden Wässer,
- Verweildauer in den Talsedimenten,
- Eindringen von Uferfiltrat an Staustufen oder aufgrund von Grundwasserentnahmen,
- anthropogene Einflüsse.

Da die genannten Einflußfaktoren im Verlauf des Maintals stark variieren, weist das Grundwasser aus dem Mainquartär in verschiedenen Bereichen des Maintals sehr unterschiedliche Charakteristika auf. Reine Grundwassertypen sind auch im regionalen Rahmen nicht feststellbar, vielmehr bestehen grundsätzlich Mischtypen (GEORGOTAS & UDLUFT, 1978). In Abhängigkeit von der Morphologie des Talquerschnitts, der Ausbildung des umgebenden Festgesteins und verschiedener anthropogener Einflußfaktoren, setzt es sich zu unterschiedlichen Anteilen aus den in Kap. 4.3.8.5.4 genannten Komponenten zusammen. Eine besonders starke Abhängigkeit besteht dabei von den aus dem umgebenden Festgesteinsrahmen zutretenden Wässern, vor allem im Einflußbereich aufsteigender, stark mineralisierter Tiefenwässer. Wo der Festgesteinsrahmen durch den Muschelkalk aufgebaut wird, hat das aus der Talaue stammende Grundwasser eine ähnlich hohe Karbonathärte wie Wässer, die direkt aus dem Muschelkalk gefördert werden. Im Bereich des Mittleren und Unteren Buntsandstein, wo geringmineralisierte und saure Wässer zufließen, ist das Grundwasser im Quartär etwas stärker mineralisiert als Wässer, die aus dem Buntsandstein selbst entnommen werden. Wesentlich ist hierbei neben anthropogenen Einträgen der Karbonatanteil der quartären Sedimente. Dieser wird durch die kalkaggressiven Buntsandsteinwässer gelöst, was zu einer Erhöhung der Erdalkali- und Hydrogenkarbonatgehalte und des pH-Wertes führt. In den Bereichen, in denen das Mainquartär in den Oberen Buntsandstein eingetieft ist, findet wegen der geringen Durchlässigkeit der Gesteine kaum Austausch mit den dort vorkommenden Wässern statt.

Sehr umfangreiche Angaben zu den hydrochemischen Verhältnissen im Maintal geben neben den in 4.3.8.2 genannten Autoren z.B. GEORGOTAS & UDLUFT (1978), KANZ (1977) und BOKHARI (1977).

4.3.8.5.6 Grundwassertemperaturen

Da es sich bei dem quartären Aquifer im Maintal um einen sehr flach liegenden Aquifer handelt, wirken sich saisonale Temperaturschwankungen der Lufttemperatur auf die Grundwassertemperaturen aus (vgl. Kap. 2.3.2.4). Abbildung 4-19 zeigt beispielhaft die jahreszeitlichen Temperaturganglinien von Main und Grundwasser im Raum Schweinfurt:

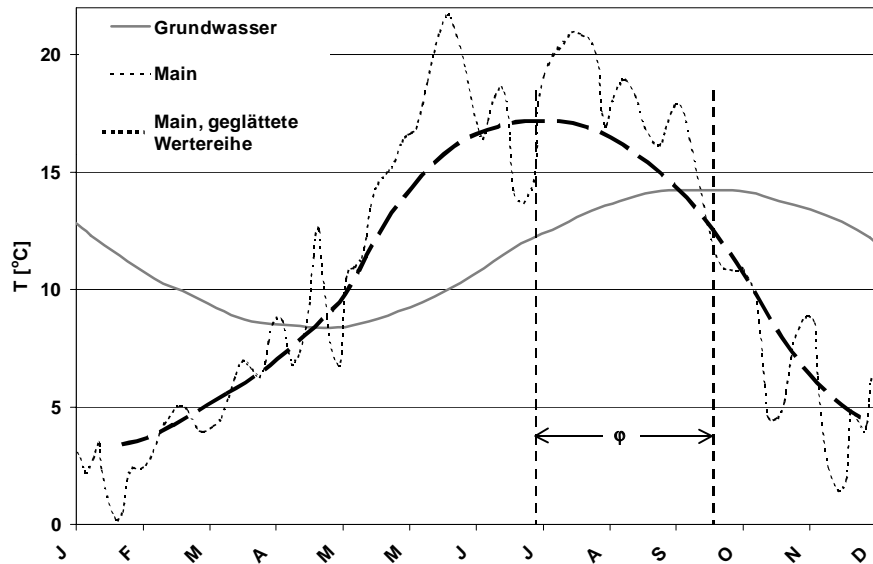


Abbildung 4-19: Jahresgang der Temperatur von Main und Grundwasser in der Talau des Maintals bei Schweinfurt. Modifiziert nach SCHWARZMEIER (1982).

Nach Abbildung 4-19 zeigt die Grundwassertemperatur gegenüber der Temperaturganglinie des Mainwassers eine deutliche Phasenverschiebung von ca. 2,5 Monaten. Es liegen allerdings keine Angaben vor, in welcher Tiefe und im welchem Abstand zum Mainufer die Meßwerte genommen wurden, wieviele Meßpunkte in die Darstellung eingegangen sind und ob es sich um Messungen in Förderbrunnen oder Beobachtungspegeln handelt. Nach den in Kap. 2.3.2.4 vorgestellten theoretischen Überlegungen ist anzunehmen, daß in tieferen Brunnen die Phasenverschiebung größer, die Amplitude der Grundwassertemperatur dagegen deutlich kleiner ist.

Bei vielen Brunnen im Mainquartär wird der Temperaturgang im Grundwasser in Abhängigkeit vom Abstand zum Mainufer und der Förderleistung durch die Uferfiltration bestimmt. Eine quantitative Auswertung dieses für thermische Nutzungen wichtigen Gesichtspunktes liegt aus einer Untersuchung von KANZ (1978) vor, die in Kap. 5.3.2.2 diskutiert wird.

4.3.8.6 Sedimentpetrographie - Thermische Parameter

Die Kiessande im Maintal setzen sich nach AL-AZAWI ET AL. (1978) zu unterschiedlichen Anteilen aus den folgenden Komponenten zusammen:

- ◆ ferntransportierte Kiessande des Mains,
- ◆ umgelagerter Hangschutt, Schwemmmaterial und Solifluktsdecken aus den Talrandbereichen,
- ◆ aufgearbeitetes Material (Residualmergel) von der Quartärbasis.

Die mineralogische Zusammensetzung der Kiese und Sande ändert sich demnach im Mainverlauf in Abhängigkeit von den umgebenden Gesteinen der Talhänge und dem Abstand zum Ursprungsgebiet des Mains. So werden im Oberlauf des Mains noch vermehrt Grundgebirgsgerölle und Material aus dem Paläozoikum des Frankenwalds gefunden. Im Muschelkalkausstrich dominieren Muschelkalkgerölle, im Buntsandsteinspessart schließlich Sandsteine. Die Feinfraktion unter 2mm wird meist von Quarzkörnern gestellt. Anhand dieser Befunde wurden die in Tabelle 4-13 angegebenen „Standardzusammensetzungen“ für verschiedenen Abschnitte des Maintals festgelegt:

Parameter	Festgelegte „Idealwerte“	Angenommene Variationsbreite
Muschelkalkgebiete		
Porenvolumen	30%	20 bis 40%
Karbonat	22% des Festgesteinsanteils	10-30%
Quarz	50% (Gerölle und Matrix)	30-60%
Tonminerale	20% (Matrix)	10-30%
Fsp., Glimmer	8%	
Buntsandsteingebiete		
Porenvolumen	30%	20 bis 40%
Karbonat	2% des Festgesteinsanteils	1-10%
Quarz	70% (Gerölle und Matrix)	50-90%
Tonminerale	20% (Matrix)	10-30%
Fsp., Glimmer	8%	

Tabelle 4-13: Durchschnittliche mineralogische und sedimentpetrographische Eigenschaften von Sedimenten aus verschiedenen Abschnitten des Maintals als Grundlage für die Berechnung der thermischen Parameter. Die „Idealwerte“ sind diejenigen Werte, die für die Berechnung der thermischen Parameter zugrunde gelegt wurden.

Anhand dieser Standardzusammensetzungen wurden nach Gleichung 2-31a,b die thermischen Parameter für typischen Gesteine des Mainquartärs berechnet. Extremwerte wurden durch Parametervariation bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 4-14. Demnach ist die Wärmeleitfähigkeit der Kiese und Grobsande im wasserungesättigten Zustand extrem niedrig, die Materialzusammensetzung selbst spielt keine Rolle. Bei gesättigten Verhältnissen sind in den Buntsandsteingebieten höhere Wärmeleitfähigkeiten zu erwarten als in muschelkalkbetonten Bereichen. Je geringer das Porenvolumen (= abhängig von Kompaktion, Sortierung), desto besser die Wärmeleitfähigkeit.

Bezeichnung	Poren	Glimmer	Feldsp.	Tonmin.	Quarz	Karbonat	K/Q	T/Q	$\lambda_{tr.}$	$\lambda_{naß}$	$\rho_{ctr.}$	$\rho_{cnaß}$
Standard _{Muschel}	0.3	0.03	0.05	0.20	0.50	0.22	0.44:1	0.4:1	0.20	2.39	1.45	2.68
n_{max}	0.4	0.03	0.05	0.20	0.50	0.22	0.44:1	0.4:1	0.14	1.94	1.24	2.88
n_{min}	0.2	0.03	0.05	0.20	0.50	0.22	0.44:1	0.4:1	0.32	2.99	1.66	2.48
Standard _{BuntSs}	0.3	0.03	0.05	0.20	0.70	0.02	0.03:1	0.29:1	0.20	2.55	1.40	2.63
n_{max}	0.4	0.03	0.05	0.20	0.70	0.02	0.03:1	0.29:1	0.14	2.05	1.20	2.84
n_{min}	0.2	0.03	0.05	0.20	0.70	0.02	0.03:1	0.29:1	0.32	3.23	1.59	2.41
T/Q_{max}	0.3	0.03	0.05	0.40	0.50	0.02	0.04:1	0.8:1	0.20	2.37	1.40	2.63
T/Q_{min}	0.3	0.03	0.05	0.10	0.80	0.02	0.03:1	0.13:1	0.20	2.63	1.39	2.62

Tabelle 4-14: Ergebnisse der Berechnung der thermischen Parameter für die Sedimente des Mainquartärs für variierte Parameter. T/Q = Ton-Quarz-Verhältnis

4.3.8.7 Besonderheiten der morphologisch-geologischen Maintalabschnitte

Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, daß die geologisch-hydrogeologischen Bedingungen im Maintal teilweise stark vom umgebenden Festgesteinsrahmen und den durch diesen vorgegebenen morphologischen Gegebenheiten bestimmt werden. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, werden im Folgenden die Besonderheiten der einzelnen in Kap. 4.3.8.3 aufgeführten Abschnitte des Maintals vorgestellt (vgl. auch Abbildung 4-18).

4.3.8.7.1 Aschaffener Becken

Als auffälligste Besonderheit des Aschaffener Beckens ist neben der Breite der Talau von bis zu 15km die bereichsweise überdurchschnittlich hohe Mächtigkeit der quartären Sedimente zu nennen. Die präpleistozäne Oberfläche der Grundwassersohle wird von zahlreichen Rinnen durchzogen, die zwei unterschiedliche Vorzugsrichtungen zeigen. Nord-Süd gerichtete Rinnen sind alten Mainverläufen, Ost-West verlaufende ehemaligen Zuflüssen aus dem Spessart zuzuordnen (DOBNER & WEINELT, 1980).

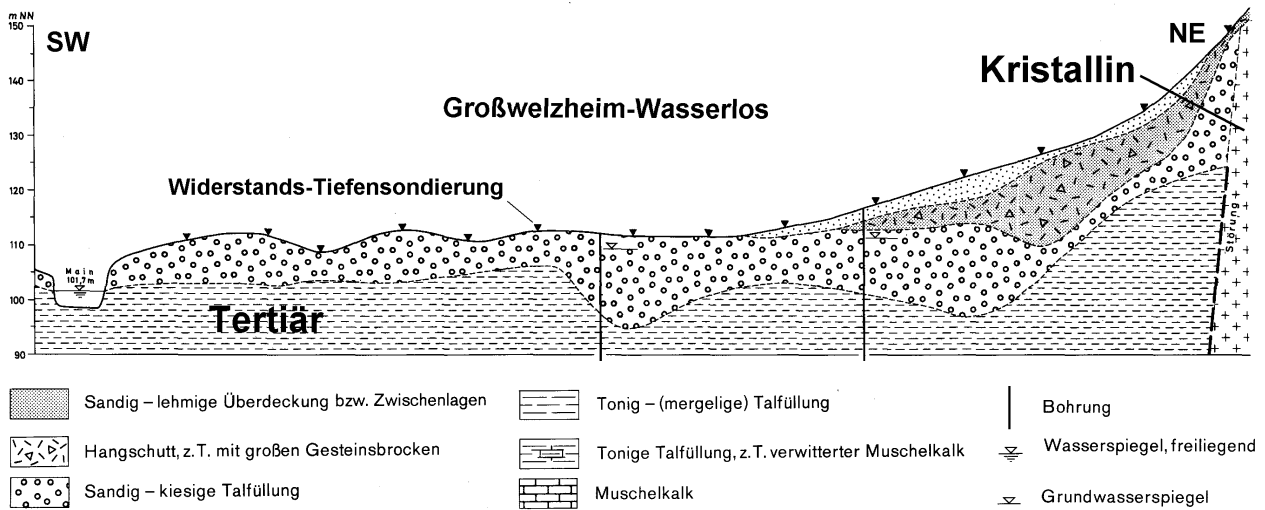


Abbildung 4-20: Schnitt durch das Maintal im Aschaffener Becken, 20-fach überhöht. Aus DOBNER & WEINELT (1980).

Durch diese Rinnen kommt es zu starken Mächtigkeitsschwankungen der pleistozänen Kiese (Abbildung 4-20). Im Norden des Beckens werden durchschnittliche Mächtigkeiten von 10-12m erreicht, wobei die maximale dort erschlossene Mächtigkeit 19m beträgt. Im Süden beträgt die mittlere Mächtigkeit 5-7m, bei Minima von 2m bei Kleinostheim und Maxima von 45m bei Großostheim (STREIT & WEINELT, 1971). Hinsichtlich der sedimentpetrographischen Eigenschaften ist häufig keine exakte Trennung zwischen Pleistozän und Pliozän möglich. Da in solchen Fällen beide zusammen einen einheitlichen Aquifer bilden, kann die Aquifermächtigkeit im Aschaffener Becken teilweise größer als die Quartärmächtigkeit sein. Ein besonderes Element im südlichen Teil des Aschaffener Beckens ist eine teilweise über 40m mächtige Rinne, die sich von Großwallstadt über Großostheim und Ringheim hinaus verfolgen läßt. Der sandig-kiesige Anteil erreicht maximal 32-35m Mächtigkeit. Diese nach Südosten gerichtete Rinne stellt eines der größten Grundwassergewinnungspotentiale in Unterfranken dar (Abbildung 4-21).

Die vertikale Abfolge zeigt wie im übrigen Maintal eine Tendenz von eher kiesig dominierten Sanden im Liegenden, zu stärker sandig betonten Sedimenten im oberen Bereich der Abfolge. Zum Spessart hin bedecken mehrere Meter mächtige Solifluktsdecken die Kiese und Sande, in Beckenbereichen treten Flugsanddecken mit Dünenbildungen auf. Den Abschluß der Abfolge bildet eine jungquartäre schluffige Auelehmdecke. Bei guten Durchlässigkeiten ($k_f=2 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s) liegen die Grundwassermächtigkeiten im Bereich der Niederterrasse i.M. bei 8-10m, in Rinnen bis deutlich darüber. Die spezifischen Ergiebigkeiten bei Absenkung von 30-50% der Grundwassermächtigkeit liegen bei 6-10 l/(s·m) im Bereich der Terrassen und 15-20 l/(s·m) in Rinnen. In Mainnähe werden 2-4 l/(s·m), im hangschuttbeeinflussten Spessarttrandbereich nur 1 l/(s·m) erreicht. Das Grundwassergefälle ist mit 1,5 bis 2‰ in Mainnähe und 5‰ am Beckenrand senkrecht zum Main hin gerichtet. Örtlich treten in geringerdurchlässigen Schichten Gefälle von 8-10‰ auf. Die Grundwässer aus dem Pleistozän haben eine Gesamthärte von 8-10.

Eine große Zahl von Daten über das Aschaffener Becken sind in den Erläuterungen zu den beiden maßgeblichen Blättern Alzenau in Ufr. (OKRUSCH ET AL., 1967) und Aschaffenburg (STREIT & WEINELT, 1971) wiedergegeben. Neben zahlreichen Bohr- und Aufschlußprofilen finden sich dort Siebkurven, Geröllanalysen und hydrochemische Daten. Zu diesen Quellen sind zwischenzeitlich zahlreiche weitere Informationen hinzugekommen, die aber nicht ohne weiteres „verfügbar“ (vgl. Kap. 6.3.4) sind³⁰.

³⁰ Am Bayerischen Geologischen Landesamt ist eine detaillierte hydrogeologische Bearbeitung des Aschaffener Raumes in Vorbereitung (Schutzfunktionskarte). Die Daten und Ergebnisse können aber derzeit Dritten noch nicht zugänglich gemacht werden (freundl. mündl. & schriftl. Mitt. durch Mitarbeiter des BAYGLA, 1999).

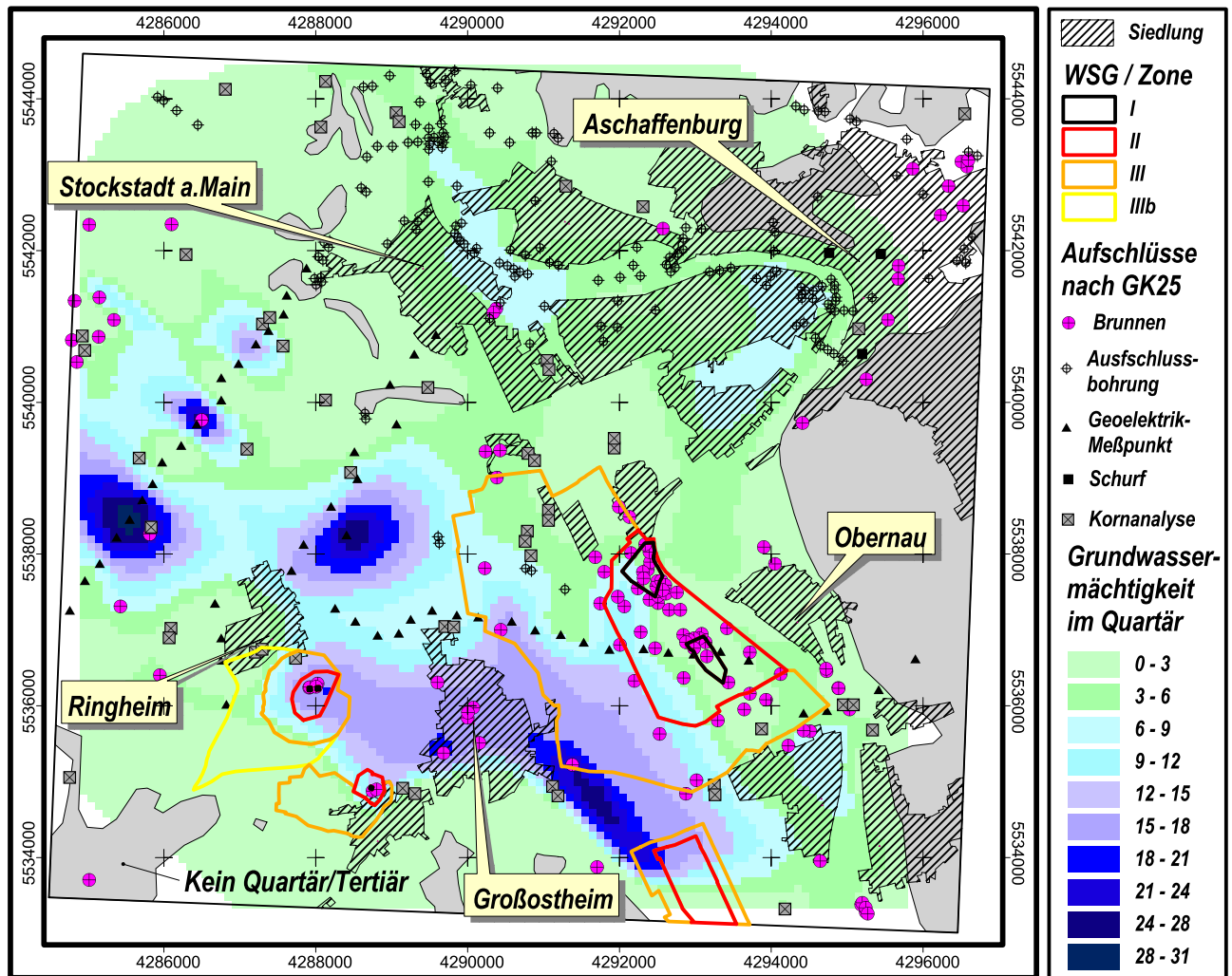


Abbildung 4-21: Grundwassermächtigkeiten, Wassergewinnung und Aufschlüsse im Mainquartär auf Blatt Aschaffenburg. Daten und Berechnungsgrundlagen i.W. aus STREIT & WEINELT (1971).

Das Aschaffener Becken ist innerhalb dieser Untersuchung vor allem deshalb von Interesse, weil dort die bislang intensivste thermische Nutzung des Untergrundes in der gesamten Untersuchungsregion, wahrscheinlich sogar in ganz Bayern stattfindet. Nach Angaben des Landratsamtes Aschaffenburg wurden im Landkreis Aschaffenburg bis 1997/98 insgesamt 54 Anlagen zur Erdwärmennutzung errichtet. Von diesen 54 Anlagen entfallen 49 (90%) auf grundwassergekoppelte Wärmepumpen (GWWP), 5 auf Erdsondenanlagen. Abbildung 4-22 zeigt die Verteilung der Anlagen im Landkreis Aschaffenburg.

Das Potential für Grundwasserentnahmen ist im Aschaffener Raum bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Insbesondere Gebiete, in denen aufgrund von Bebauung und anderweitigen Nutzungen die Ausweisung von Wasserschutzgebieten nicht möglich ist, bietet sich die Errichtung von GWWP an. Die hohen Jahresmitteltemperaturen (vgl. 4.4.6) und das große Flächenangebot stellen günstige Voraussetzungen dar (vgl. Kap. 5.3.2)

eine Verzahnung mit mächtigen Hangschuttsedimenten vorliegt, festgestellt. Das Grundwassergefälle ist senkrecht zum Main hin gerichtet und beträgt i.M. 8‰, an den Talrändern bis 30‰.

Der Chemismus der Wässer wird im Buntsandsteingebiet durch die gering mineralisierten, weichen (1-5°dH), sauren und kalkaggressiven (50mg/l freie Kohlensäure) Wässer aus dem Mittleren und Unteren Buntsandstein bestimmt. Durch Lösung von Karbonat, das vor allem aus dem Löß stammt, steigt die Härte des Wassers je nach Verweildauer auf bis 8°dH an, während der pH-Wert sinkt. Am stärksten ist dieser Effekt im östlichen Spessart, wo verstärkt auch Muschelkalkgerölle in der Talfüllung vorkommen.

Das Potential für Grundwassernahmen aus dem Quartär im Buntsandsteingebiet des Maintals ist insgesamt als mäßig bis gering anzusehen (DOBNER & WEINELT, 1980). Grund dafür sind die zahlreichen bereits bestehenden Entnahmen, die engen Talquerschnitte mit geringem Flächenangebot und die ungünstige Morphologie der Talau. Wie Abbildung 4-23 zeigt, liegt die Quartärbasis der Hochterrassen typischerweise weit über dem Grundwasserspiegel, so daß große Bereiche des Quartärs grundwasserfrei sind. In den verbleibenden Gebieten bestehen meist anderweitige (vorrangige) Nutzungen. Für die Nutzung mit GWWP kommen deshalb nur Gebiete in Frage, die für die Trinkwasserversorgung ungeeignet sind, weil keine Schutzgebiete ausweisbar sind oder die Wasserqualität des oberflächennahen Grundwassers ungenügend ist. Eine ausführliche Bewertung der Grundwasserentnahmemöglichkeiten im Maintal unter der Berücksichtigung der lokalen geologischen Verhältnisse, der bestehenden Trinkwasserentnahmen und anderweitiger (konkurrierender) Nutzungen geben DOBNER & WEINELT (1980).

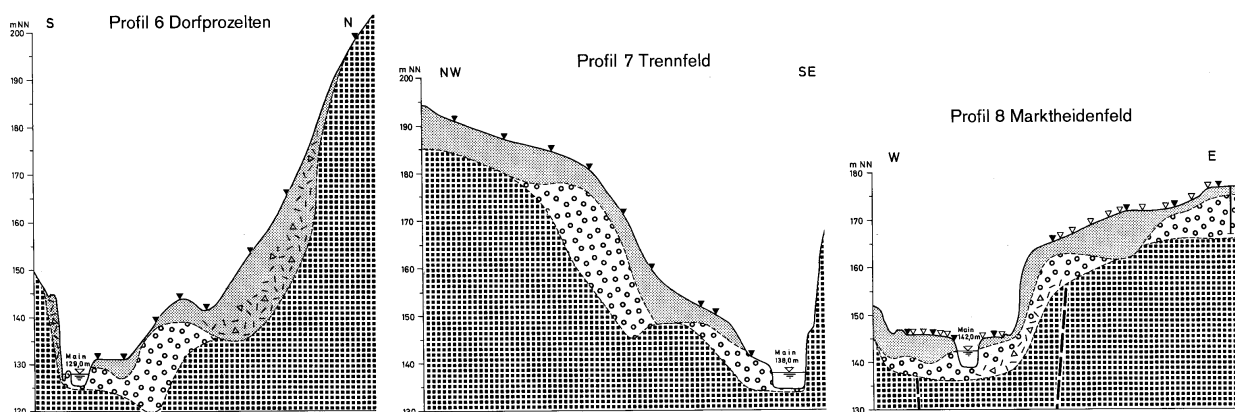


Abbildung 4-23: Schnitte durch das Maintal im Bereich des Buntsandsteinspessart, 20-fach überhöht, Legende wie Abbildung 4-20. Aus DOBNER & WEINELT (1980).

4.3.8.7.3 Muschelkalkgebiet (Karlstadt bis Wippfeld)

Das Maintal im Muschelkalkgebiet gleicht morphologisch dem im Spessart, wobei der Flußverlauf etwas weniger stark gewunden und weniger tief eingeschnitten ist. Die quartäre Talfüllung nimmt im Allgemeinen nur schmale Streifen von 20-200m Breite parallel zum Flußverlauf ein. Bei prinzipiell gleichem vertikalen Aufbau enthält sie hier mehr Muschelkalkanteile in der Kiesfraktion als im Buntsandsteinabschnitt. Das Muschelkalkgebiet läßt sich weiter untergliedern in den Ausstrichbereich des Unteren Muschelkalk, dem aufgrund der strukturgeologischen Verhältnisse teilweise auch Anteile des Oberen Buntsandstein zuzuordnen sind (Thüngersheimer Sattel, s. Kap. 4.4.1), den des Mittleren und den des Oberen Muschelkalks. Die Mächtigkeit der Talfüllung, Durchlässigkeiten und Grundwassermächtigkeiten bewegen sich in allen Bereichen größenordnungsmäßig im gleichen Rahmen wie die im Buntsandsteinbereich. Die wesentlichen Unterschiede bestehen in den hydrochemischen Eigenschaften des Talgrundwassers, das sehr deutlich von hoch mineralisierten Wässern aus dem Muschelkalk, teilweise auch dem Oberen Buntsandstein (Sulfat, vgl. Kap. 4.3.3.3) beeinflusst ist.

Besondere Phänomene sind im Ausstrich des *mm* zu beobachten: durch fossile und rezente Auslaugung von verkarstungsfähigen Evaporiten kommt es im Bereich der Quartärbasis zu Subrosionserscheinungen, die lokal die Akkumulation hoher Quartärmächtigkeiten ermöglichen (vgl. auch Kap. 4.3.4.3.4). Da sich solche Subrosionserscheinungen weit durch den Oberen Muschelkalk durchpausen können, sind auch in dessen Ausstrichbereich entsprechende Erscheinungen zu beobachten. Eine weitere Besonderheit sind mächtige lehmige Mergel an der Quartärbasis, die vor allem im Ausstrich des *mm* zu beobachten sind. Solche Schichten führen zu einer Abdichtung des Mains gegen das unterlagernde Festgestein (Abbildung 4-24).

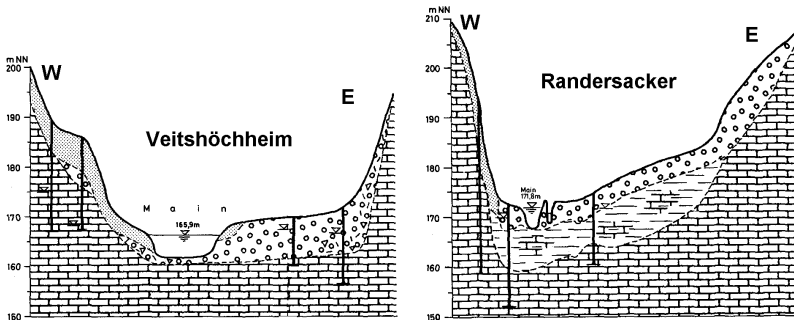


Abbildung 4-24: Schnitte durch das Maintal im Muschelkalkbereich im Raum Würzburg, 20-fach überhöht, Legende wie Abbildung 4-20. Aus DOBNER & WEINELT (1980).

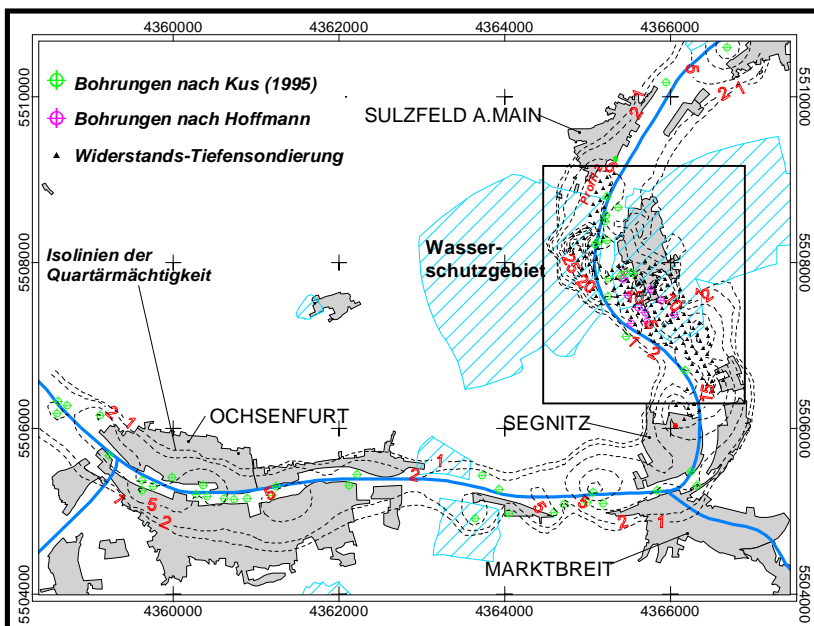


Abbildung 4-25: Quartärmächtigkeiten im Maintal zwischen Ochsenfurt und Sulzfeld. Die außergewöhnlich hohen Mächtigkeiten nördlich von Segnitz werden auf großräumige Auslaugungserscheinungen im unterlagernden Muschelkalk zurückgeführt. Durch die hohen Quartärmächtigkeiten bestehen gute Voraussetzungen für die Wassergewinnung. Große Bereiche in den besonders „interessanten“ Gebieten sind deshalb als Trinkwasserschutzgebiete ausgewiesen.

Die besondere Situation zwischen Segnitz und Sulzfeld (Kasten) ist im Detail in Abbildung 4-26 dargestellt. Im weiteren Verlauf des Maintals treten demgegenüber normale Quartärmächtigkeiten von kleiner 10m auf.

Aufgrund der stark gegliederten Stockwerkstrennung im Muschelkalk (vgl. Kap. 4.3.4.3) und der Karstererscheinungen sind die hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse insgesamt weit komplizierter als im relativ einheitlichen Buntsandsteingebiet. Die Grundwassermächtigkeit dürfte i.M. bei 3-6m liegen (vgl. auch HAUNSCHILD, 1986).

Das Potential für Grundwasserentnahmen zur Nutzung als Wärmequelle für grundwassergekoppelte Wärmepumpen kann im Bereich Karlstadt bis Wippfeld als mäßig angesehen werden. Grund dafür ist die relativ geringe Grundwassermächtigkeit bei gleichzeitig schmaler Talaue. Bereiche, in denen höhere Grundwasservorkommen zu erwarten sind, werden bereits intensiv für die Trinkwassergewinnung genutzt (Abbildung 4-25). Als ungünstig sind auch die relativ hoch mineralisierten, harten Wässer zu bewerten. Ein großflächiges Potential kann deshalb nicht ausgewiesen werden. Möglichkeiten zur Nutzung liegen aber sicherlich lokal vor, was im Einzelfall geprüft werden muß.

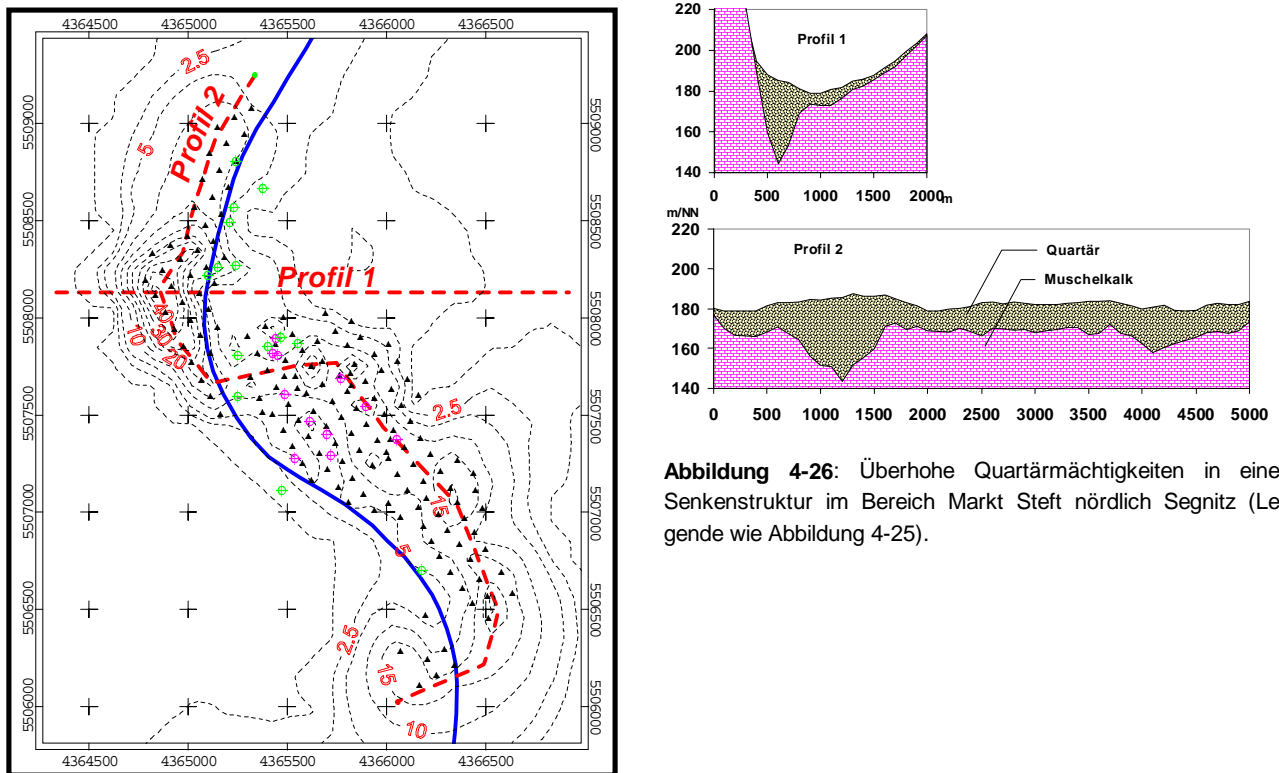


Abbildung 4-26: Überhohe Quartärmächtigkeiten in einer Senkenstruktur im Bereich Markt Steft nördlich Segnitz (Lage wie Abbildung 4-25).

4.3.8.7.4 Schweinfurter Becken

Das Schweinfurter Becken stellt eine weiträumige tektonische und morphologische Mulde dar. Der Talquerschnitt ist sehr flach und steigt auch an den Rändern nur wenig an. Das Liegende des Quartärs wird hier vorwiegend durch Gesteine des Unteren Keuper gebildet. Diese sind mit Ausnahme von einzelnen Sandsteinen und dolomitischen Lagen (vgl. Kap. 4.3.5.3) geringdurchlässig. Die Mächtigkeiten der quartären Kiese sind verglichen mit den Verhältnissen im Muschelkalkbereich eher gleichmäßig, erreichen aber selten Werte von mehr als 8m, wovon meist nur etwa 50% grundwassererfüllt sind. Die mittlere Grundwassermächtigkeit kann mit 3,5m angegeben werden. Die Durchlässigkeiten liegen im üblichen Bereich (um $k_f=1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$), das Grundwassergefälle um 1‰ im Becken und maximal 10‰ an Prallhängen der Talränder. Der Chemismus der Grundwässer ist charakterisiert durch vorwiegend sehr harte Wässer mit lokal extrem hohen Sulfatgehalten. Diese sind auf die im Unteren Keuper zwischengeschalteten Gipslager zurückzuführen.

4.3.8.7.5 Muschelkalk und Unterer Keuper östlich des Schweinfurter Beckens

Der Abschnitt von Schweinfurt bis Haßfurt ist wie der Abschnitt 3 (4.3.8.7.3) durch die verwitterungsresistenten Gesteine des Muschelkalks an der Quartärbasis und den Talhängen geprägt. Aus diesem Grund dominieren hier wieder enge und steil eingetiefte Talquerschnitte mit eher sandig ausgeprägten Sedimenten der Niederterrassen. Von der mittleren Quartärmächtigkeit von 7-10m entfallen meist 2,5 bis 4m auf Auebildungen (Lehm und Ton) etwa 3 bis 4m auf Sande und 2,5 bis 4m auf kiesige Sande an der Basis. Die Verkarstungserscheinungen des *mm* haben hier keinen Einfluß mehr, so daß keine durch Subrosion hervorgerufenen Mächtigkeitsschwankungen zu erwarten sind. Die Grundwassermächtigkeit liegt i.M. bei 4-5m. Der Chemismus ähnelt dem der Wässer aus dem Oberen Muschelkalk, vereinzelt können aufsteigende Wässer aus dem *mm* nachgewiesen werden (Gesamthärte um 70°dH; BOKHARI, 1977).

Nach DOBNER & WEINELT (1980) können die Möglichkeiten für Grundwassererschließungen zur Trinkwassergewinnung in diesem Maintalabschnitt als erschöpft gelten.

4.3.8.7.6 Unterer Keuper östlich von Haßfurt

Ähnlich wie im Schweinfurter Becken kommt es im Ausstrich des *ku* zwischen Haßfurt und Stettfeld zu einer Aufweitung und Abflachung des Talquerschnitts. Auch in anderer Hinsicht (Durchlässigkeit, Grundwassergefälle, Mächtigkeit) sind die Verhältnisse mit denen im dem Schweinfurter Becken vergleichbar. Die Mächtigkeit der quartären Sedimente ist allerdings großen Schwankungen unterworfen, die insbesondere die jüngsten schluffig-feinsandigen Ablagerungen betreffen. Im Bereich Haßfurt ist zu beobachten, daß die Grundwasserfließrichtung eine etwas stärkere mainparallele Richtung aufweist (DOBNER & WEINELT, 1980).

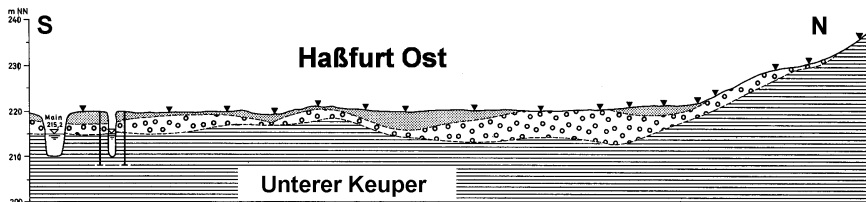


Abbildung 4-27: Schnitt durch das Maintal östlich von Haßfurt, 20-fach überhöht, Legende wie Abbildung 4-20. Aus DOBNER & WEINELT (1980).

4.3.8.8 Andere quartäre Bildungen

Löß- und Lößlehm bedecken weite Flächen im zentralen Unterfranken. Die Mächtigkeiten des vorwiegend grobsiltigen Materials betragen bis zu mehreren zehn Meter, meist jedoch nur wenige Dezimeter bis einige Meter. Insgesamt spielt diese flächenmäßig so weit verbreitete Einheit für thermische Nutzungen aufgrund der geringen Tiefenerstreckung keine Rolle.

Neben dem Löß treten lokal weitere geringmächtige pleistozäne Bildungen auf. Zu nennen sind hier **Flugsanddecken**, die Mächtigkeit von bis zu einigen Metern erreichen können. Wie beim Löß gilt, daß Flugsand ohne Bedeutung für die thermische Nutzung ist, wenn man von horizontalen Erdreichwärmetauschern absieht. Block- und Felsenmeere treten in den Hochlagen von Spessart und vor allem der Rhön auf und sind schon aufgrund ihrer meist unzugänglichen Lage nicht für entsprechende Nutzungen relevant.

Holozän: Hang- und Abschlammungen, holozäne Talfüllungen, Kalktuff und Kalksinter, Bergstürze und Hangrutsche sowie ähnliche junge Bildungen sind aufgrund ihrer geringen vertikalen und horizontalen Erstreckung wenig bedeutsam für die in dieser Untersuchung besprochene Thematik. Eine gewisse Bedeutung kommt solchen Einheiten im Bereich des Maintals zu, wo ihr Auftreten die Eigenschaften der pleistozänen Kiessande als Grundwasserleiter maßgeblich beeinflussen kann (Kap. 4.3.8.4). Den Auelehmdecken im Maintal kommt eine gewisse Bedeutung als Deckschicht des quartären Aquifers zu.

4.4 Geologisch-hydrogeologische Gesamtübersicht

4.4.1 Strukturgeologischer Überblick

Abbildung 4-28 zeigt die wesentlichen strukturellen Elemente im Untersuchungsgebiet gemeinsam mit einer Isoliniendarstellung der Grenze Unterer- gegen Mittlerer Muschelkalk³¹. Aus der Isoliniendarstellung ist zu erkennen, daß das generelle Einfallen nach ESE gerichtet ist, wobei die Einfallswinkel von Westen nach Osten abnehmen (vgl. dazu auch Abbildung 4-2). Charakteristisch ist eine Abfolge \pm parallel angelegter Sättel und Mulden in zwei Vorzugsrichtungen ($60-70^\circ$ und $150-160^\circ$). Die Strukturen haben in Unterfranken, bei einer Längserstreckung von bis zu 50km, Breiten von etwa 5km und vertikale Amplituden von 50-100m (GEYER, 2000). Neben der Spessart-Rhönschwelle, die ein tektonisches Element von überregionaler Bedeutung darstellt, ist die auffälligste dieser Strukturen im Raum Würzburg der **Thüngersheimer Sattel**, der auch im Kartenbild bei kleineren Maßstäben deutlich zum Ausdruck kommt.

³¹ Die Erstellung der Isoliniendarstellung wird in Kap. 7.2.3.1.4 beschrieben.

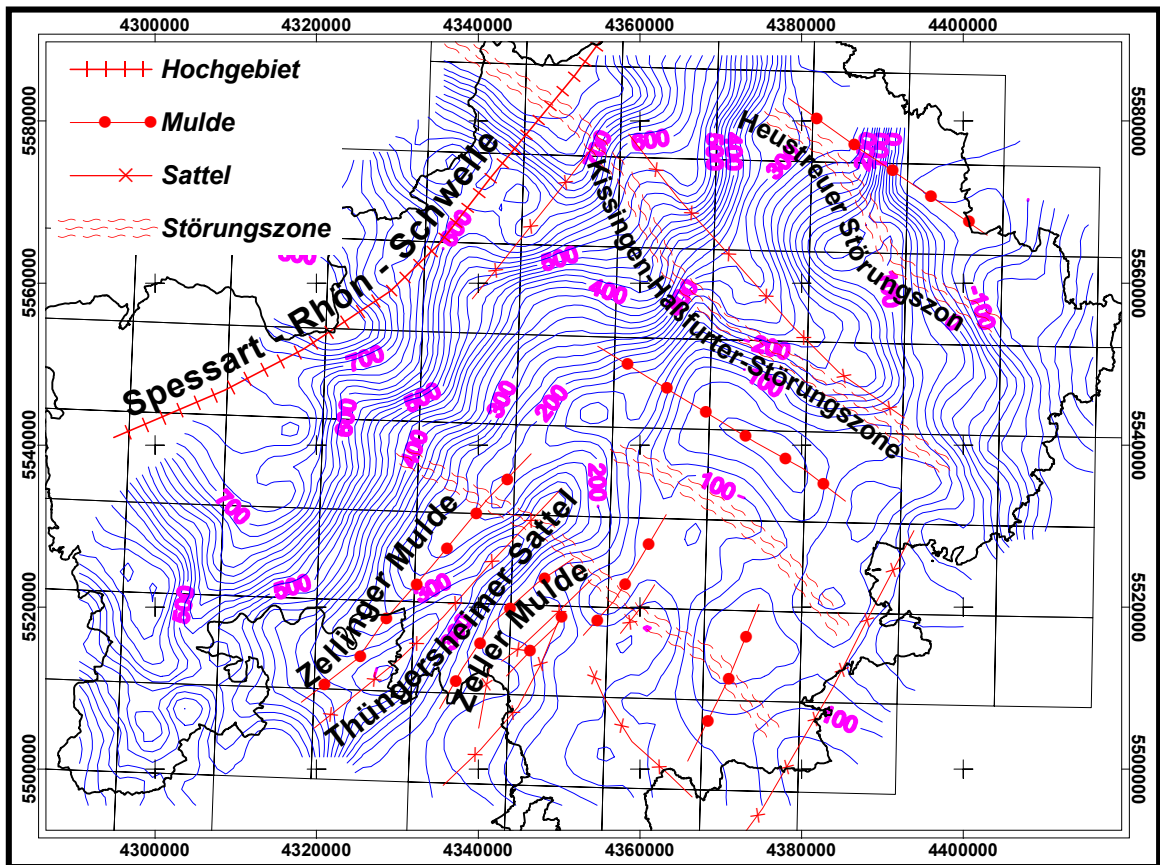


Abbildung 4-28: Isoliniendarstellung der Schichtgrenze *mul/mm* über NN erstellt aus zahlreichen Vorlagen (vgl. Kap. 7.2.3.1.4) mit den wesentlichen Strukturelementen (nach RUTTE & WILCZEWSKI, 1983) in Unterfranken.

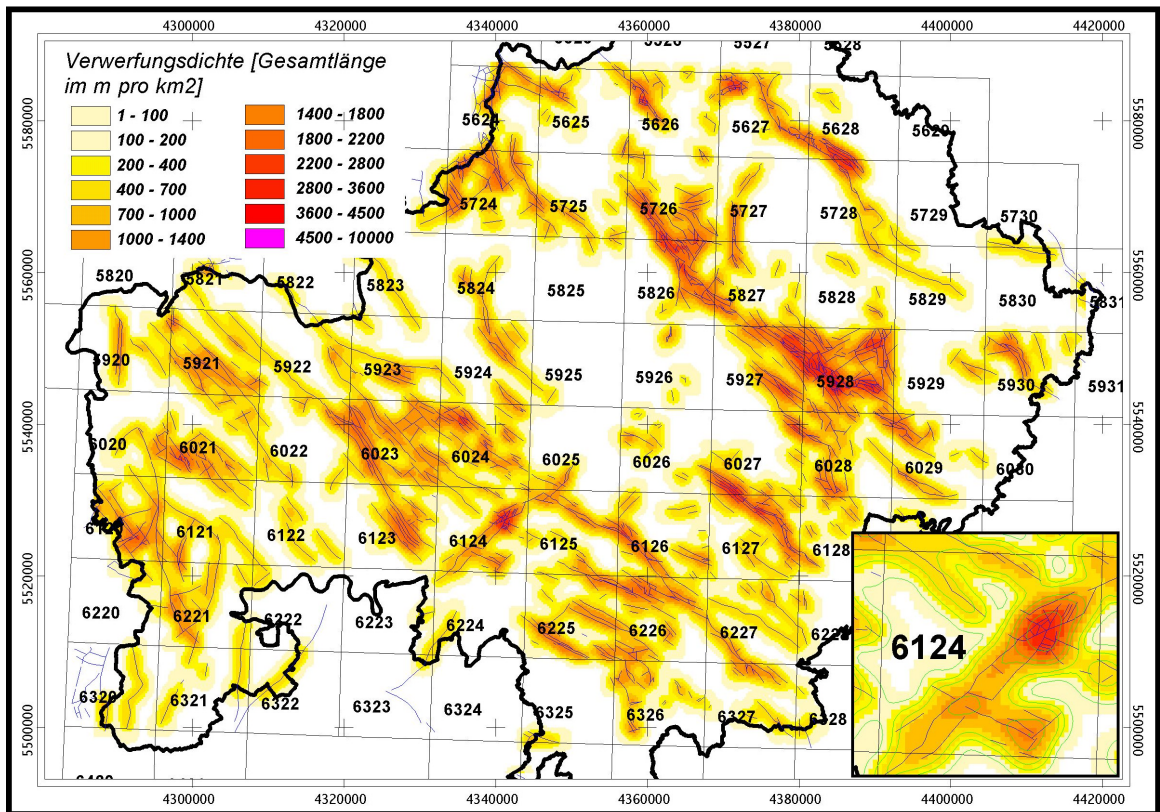


Abbildung 4-29: Verwerfungen und daraus abgeleitete Verwerfungshäufigkeit, berechnet als Verwerfungslänge pro km^2 in Unterfranken.

Unterfranken wird weiterhin von mehreren ausgeprägten Störungszonen durchzogen, die oft, aber nicht grundsätzlich, mit den oben genannten Sattel- und Muldenstrukturen korrelieren. Abbildung 4-29 zeigt die in der GÜK200 verzeichneten Verwerfungen und eine daraus abgeleitete Darstellung der Verwerfungsdichte³², berechnet als Verwerfungslänge pro km².

4.4.2 Karsterscheinungen

Karsterscheinungen sind für die thermische Nutzung des Untergrundes von außergewöhnlich hoher Bedeutung, da sie viele Nutzungen sehr stark erschweren oder gar unmöglich machen. In Unterfranken gibt es eine Vielzahl verkarstungsanfälliger Einheiten, wobei die bedeutendsten die Karsterscheinungen im Muschelkalk sind (Kap. 4.3.4.3.4). Darüberhinaus tritt Verkarstung in den Grundgipsschichten des Gipskeupers und in anderen gips- und anhydritführenden Einheiten des Keupers auf (Kap. 4.3.5.2.2).

Abbildung 4-30 stellt beispielhaft die Verbreitung unterschiedlicher Karsttypen und einige der maßgeblichen genetischen Faktoren in dem von der Verkarstung besonders stark betroffenen Gebiet südöstlich der Rhön dar. Als Ursachen für die Verkarstung sind hier zu nennen:

- ◆ das Auftreten potentiell verkarstungsfähiger Gesteine (Karbonate, Sulfate) im Muschelkalk und (Gips-)Keuper bei geringer Überdeckung,
- ◆ der Zutritt von geringmineralisierten Wässern aus dem Hangenden (vulkanisches Tertiär bzw. Unterer Keuper) und
- ◆ die erhöhte mechanische Beanspruchung des Gesteins in Verwerfungszonen (Heustreuer Störungszonen, Münnerstädter Graben).

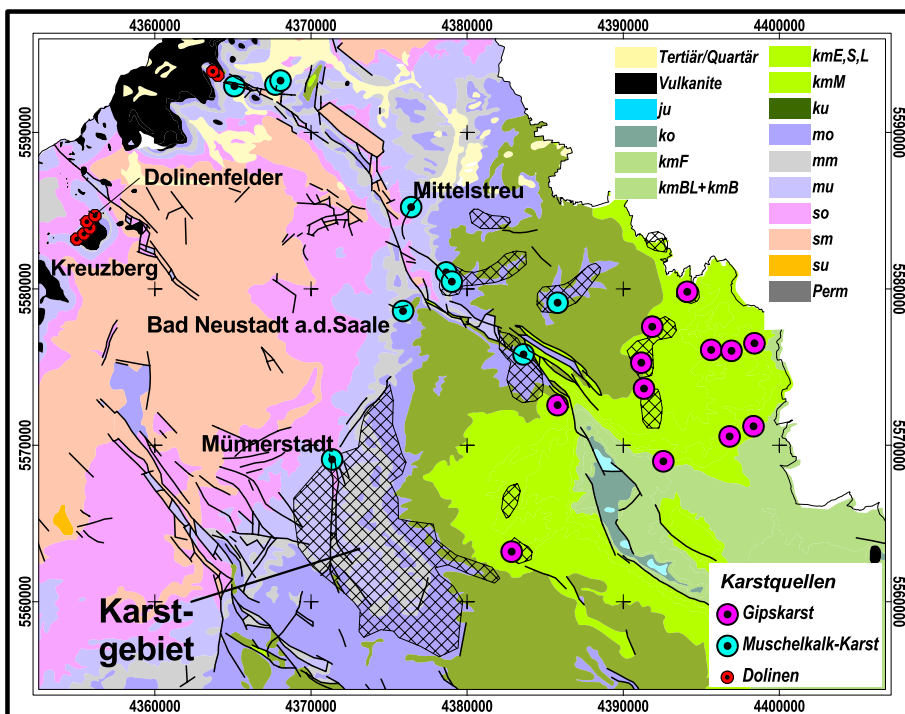


Abbildung 4-30: Karstgebiete und Karstquellen im südöstlichen Rhönvorland nach SCHMIDT (1983), BITTERSOHL (1980) und BARTHEL (1993, 1995). Die Karsterscheinungen im Muschelkalk treten gehäuft im Bereich von Störungszonen (Münnerstädter Graben, Heustreuer Störungszone, vgl. Abbildung 4-28) und im Grenzbereich Muschelkalk-Keuper auf.
Legende Geologie: siehe Tabelle 5-6.

4.4.3 Grundwasserstockwerke in Unterfranken

Wie in den einzelnen Kapiteln der stratigraphischen Beschreibung dargestellt, treten neben den überregional verbreiteten Hauptgrundwasserstockwerken auch lokal ausgebildete Teilgrundwasserstockwerke auf. In Tabelle 4-15 sind alle wesentlichen Haupt- und mögliche Teilgrundwasserstockwerke in Unterfranken zusammengestellt. Die Stockwerksgliederung orientiert sich dabei vorrangig an den Verhältnissen im Raum Würzburg.

³² Bewertungsfaktor für die Standortbewertung, vgl. Kap. 5 und 8.

Stratigraphie	Bezeichnung	Grundwasserleiter / Grundwassernichtleiter		Mächtigkeit	Typ	weitere Teil-GW-Stockwerke	Bedeutung		
		lokal bis regional	(über-) regional				lokal	Bedeutung regional /	
q	1	Quartär	I	0-45	Poren		hoch		
ko-ju	2.1.1	Rhät	II	30-35	Kluft-Poren	möglich	lokal		
kmF		Feuerfetten		50-80					
kmBl, kmB	2.2.1	Sandsteinkeuper	III	160-210	Kluft	möglich	hoch	hoch	
kmL		Lehrbergschichten		25-40					
kmS	2.2.2	Schilfsandstein	IV	0-50	Kluft	nein	lokal		
kmM-kmE		kmM-kmE Tonsiltsteine		s.u.					
kmM	2.2.3	Grundgipsschichten		0-15	Karst		unbedeutend		
kmM		kmM Tonsiltsteine		100-140					
kuD	2.3.1	Grenzdolomit	V	2-4	Kluft(-Karst)	nein	lokal	mittel	
ku		diverse					möglich		
kuW	2.3.2	Werksandstein			2-15	Kluft			lokal bis mittel
ku		diverse		k-A		möglich			
mo3	3.1.1	mo3, ku1 diverse	VIa	5-30	Kluft(-Karst)		möglich	hoch-sehr hoch	
mo2		Tonsteinhorizonte					möglich		
mo1,2	3.1.2	Plattenkalksteinfohle 1,2,3				Kluft(-Karst)	möglich		
mo		Tonsteinhorizonte					möglich		
mo1	3.1.3	Wulstkalk				Kluft(-Karst)	möglich		
mo1		Zeller Tonsteinhorizont					möglich		
mm	3.2.1	Stylolithenkalkstein		bis 10	Kluft-Karst	möglich	hoch		
mm-Normalfazies		Residualschluff				möglich			
mm-Salinarfazies	3.2.x	(Gips-)Karst			Karst	möglich	gering		
mm-Normalfazies		Residualschluff				möglich			
mm	3.2.2	Untere Zellenkalke, div.		5-8	Kluft(-Karst)	möglich	hoch		
mu3		Orbicularisschichten	VIb					mittel-hoch	
mu3	3.3.1	Schaumkalkbänke			bis 5	Kluft-Karst	nein		gering
mu		Wellenkalk							
mu1,2,3	3.3.x	mu-Karst				Kluft-Karst			
mu1,2		Wellenkalk				nein			
mu1	3.3.3	Grenzgelbkalk		1-2,5	Kluft-Karst	nein	gering		
so4		Obere Rötone				nein			
so3	4.1.1	Rötquarzit	VII	5-8	Kluft	nein	gering	gering	
so3		Untere Rötone				nein			
so2	4.1.2	Plattensandstein	VIII	10-20	Kluft	nein	gering-mittel	sehr hoch	
so1		Chriotherienschiefer, div.			5		nein		
su-sm	4.2	su-sm		250	Kluft	selten	sehr hoch		
su		Bröckelschiefer		60		selten			
z	5.1	Zechstein	IX	30-300		ja	hoch	hoch	

Grundwasserleiter
unterschiedliche Funktion
Grundwassernichtleiter

Tabelle 4-15: Grundwasserstockwerke in Unterfranken.

4.4.4 Regionale Verteilung von Wasserwegsamkeiten

Abbildung 4-31 zeigt eine Übersicht über Gebirgsdurchlässigkeiten in Brunnenbohrungen im Raum Unterfranken. Die Daten entstammen i. W. einer Arbeit von EINSELE & MERKLEIN (1978), in der auch die Herkunft und Bedeutung dieser Daten diskutiert wird. Im Hinblick auf die vorliegende Untersuchung ist vorwiegend von Interesse, inwieweit sich die lokal bestimmten Werte regionalisieren und sich Beziehungen zu anderen geologischen Parametern ableiten lassen. Hierzu wurden statistische Auswertungen vorgenommen, deren Ergebnisse aufgrund der fehlenden Signifikanz (vgl. Abbildung 4-31) hier nicht im Einzelnen vorgestellt werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich bezüglich der Gebirgsdurchlässigkeit nur sehr schwache regionale Tendenzen ableiten lassen, die vor allem auf die regionale Verbreitung unterschiedlicher Gesteine zurückzuführen sind. Diese Tendenzen lassen allerdings Aussagen über die zu erwartende lokale Gebirgsdurchlässigkeit nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit zu. Wie bereits an verschiedener Stelle erwähnt wurde (z.B. 4.3.3.2.2) variiert dieser Parameter über kurze Distanz teilweise drastisch. Es ist insbesondere überraschend, daß keine ausgeprägte Korrelation der Durchlässigkeiten mit der Verwerfungshäufigkeit feststellbar ist.

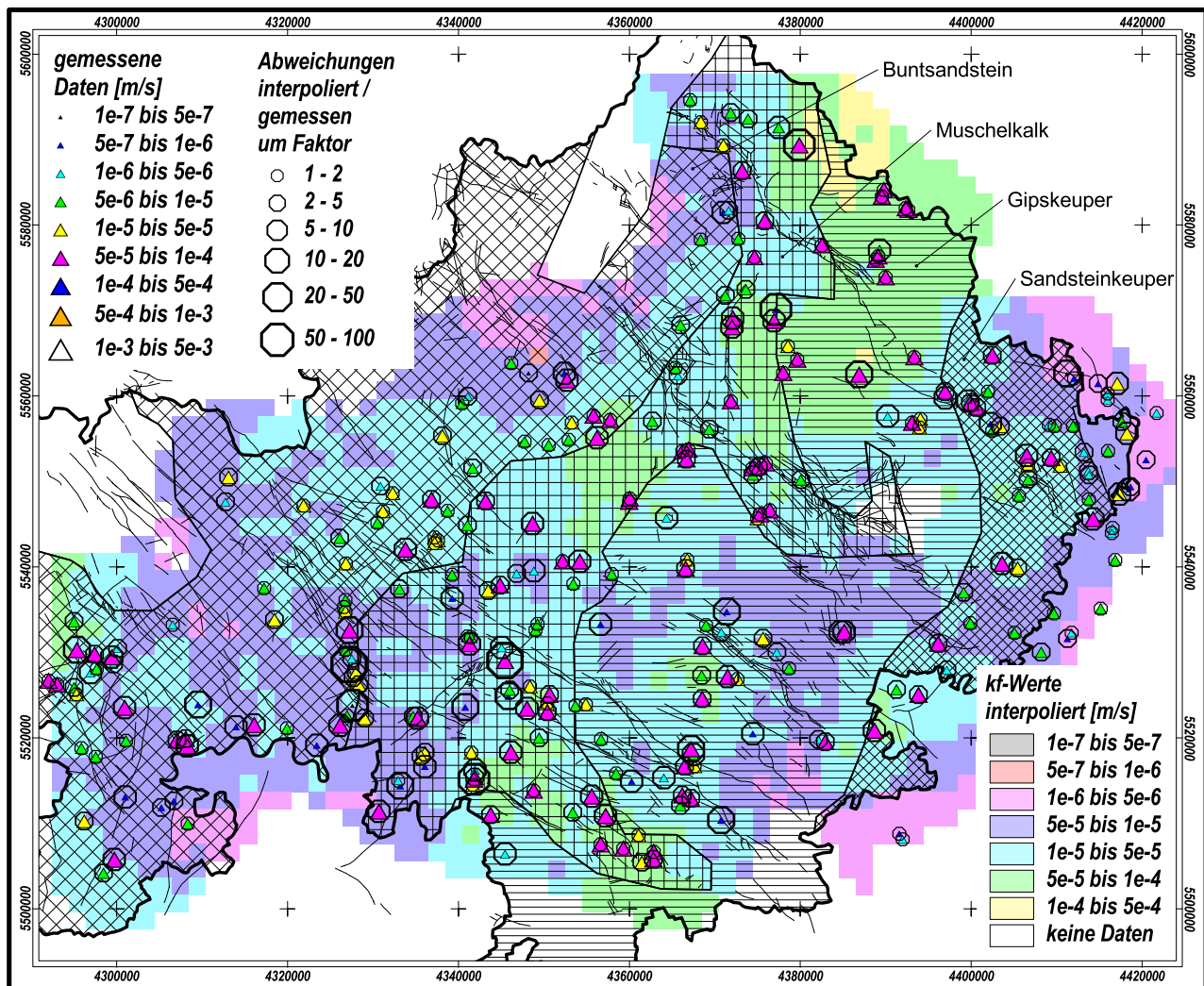


Abbildung 4-31: Interpolierte Gebirgsdurchlässigkeiten in Festgesteinsaquifere in Brunnenbohrungen und relative Abweichungen der interpolierten Werte von den Rohdaten. Daten i.W. aus EINSELE & MERKLEIN (1978). Abgesehen von regionalen Trends, lassen sich anhand solcher Interpolationen keine Vorhersagen über (lokale) Wasserwegsamkeiten treffen.

4.4.5 Grundwasserdynamik

Im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Aspekten des lokalen und regionalen Stockwerksbaus und der regionalen Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit sind auch Fragen nach dem Vorkommen und der Bewegung von Grundwasser zu klären. Die Grundwasserdynamik ist in sehr hohem Maße bedeutsam für jede thermische Nutzung des Untergrundes, so daß die genaue Kenntnis der hydraulischen Zusammenhänge unerlässlich für eine angemessene Beurteilung der Eignung ist. Es ist allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, die entsprechenden Zusammenhänge für das gesamte Gebiet Unterfrankens darzustellen. Grund dafür sind, neben der mangelhaften Datenbasis (vgl. Kap. 6.3.6.4.1), die komplizierten hydraulischen Verhältnisse bei einem heterogenen Stockwerksbau mit unterschiedlichen Druckverhältnissen, Verkarstung und anderen schwer kalkulierbaren Phänomenen. Entsprechende Aspekte werden deshalb nur für den Beispielausschnitt in Kap. 7.2.3.2 diskutiert.

4.4.6 Untergrundtemperaturen

Die Temperaturverhältnisse im Untergrund stellen naturgemäß eine für thermische Nutzungen sehr wichtige Größe dar. Dennoch wird dieser Thematik hier keine breitere Beachtung geschenkt, da die Temperaturunterschiede im vorrangig interessierenden Teufenbereich bis in 100m Tiefe relativ gering sind. Sie werden in diesen geringen Tiefen hauptsächlich durch die Jahresmitteltemperatur gesteuert, sind also indirekt von der

Höhenlage des Gebiets abhängig (vgl. dazu Kap. 2.3.2.4). Erst in Teufen von mehr als 100m lassen sich Temperaturanomalien beobachten, die ihren Ursprung eindeutig nicht im Eindringen langfristiger atmosphärischer Temperaturschwankungen haben. Für die allermeisten in dieser Untersuchung behandelten Fragestellungen ist es ausreichend, die Untergrundtemperatur am Standort anhand der Jahresmitteltemperatur bzw. regressiv aus der Höhenlage zu ermitteln. Abbildung 4-32 zeigt die Temperaturverhältnisse in verschiedenen Tiefen und die Jahresmitteltemperatur in Unterfranken im Vergleich.

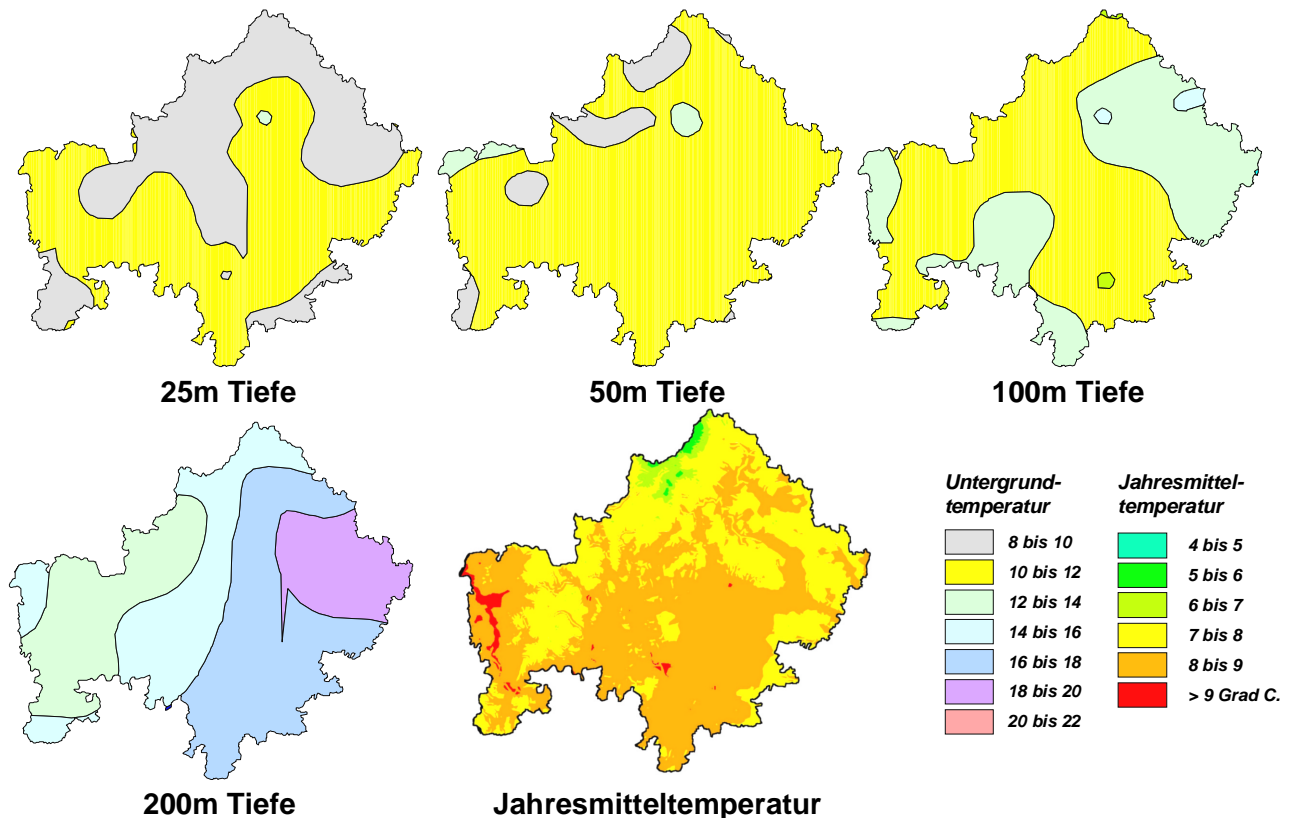


Abbildung 4-32: Untergrund- und Jahresmitteltemperaturen in Unterfranken. Die Untergrundtemperaturdaten wurden freundlicherweise von Herrn Dr. W. Bauer zur Verfügung gestellt. Ausführliche Erläuterungen dazu in BAUER (2000). Jahresmitteltemperaturen nach Klimaatlas von Bayern (BayFORKLIM, 1996).

4.4.7 Bohrbarkeit der Gesteine

Die Bohrbarkeit der Gesteine stellt insbesondere bei den Verfahren, bei denen Erdsonden eingesetzt werden, einen entscheidenden Kostenfaktor dar. Ungünstige Bohreigenschaften schließen eine Nutzung der betreffenden Einheit nicht aus, müssen aber in eine Gesamtbewertung mit einbezogen werden. Besondere Bedeutung kommt dem Parameter Standfestigkeit zu. Bei Gesteinen, die zum Nachbrechen neigen, kann das Einbringen von Sonden problematisch sein und erhöhten Aufwand erfordern. Tabelle 4-16 zeigt eine Übersicht verschiedener Parameter, die die Bohrbarkeit der Gesteine in Unterfranken betreffen. Eine Bewertung dieser Eigenschaften hinsichtlich der Eignung zur thermischen Nutzung ist in Tabelle 5-6 wiedergegeben. Einen Überblick über die Möglichkeiten zur Einbringung von vertikalen Erdreichwärmetauschern und die für verschiedene Gesteine geeigneten Bohrverfahren gibt SANNER (1992). Die Möglichkeit des Einrammens oder -spülens von Sonden ist im Untersuchungsgebiet nicht gegeben.

Bohrungen bis etwa 100m Tiefe	Bohrbarkeit allgemein				Bohrfortschritt			Stand- festigkeit			Bohrverfahren				Kosten				
	unproblematisch	gut	mäßig	sehr problematisch	> 5m/ Stunde	3 bis 5m / Stunde	1 bis 3m /Stunde	kleiner 1m/Stunde	sehr dauerhaft	unsicher / verschieden	nachbrüchig	Spülverlust möglich	Rotary	Imlochhammer	Luftheben	Seilschlag	gering	mittel	hoch
1 = sehr gut; 2 = gut; 3 = gut bis mittel; 4 = mittel bis schlecht; 5 = schlecht; 6 = sehr schlecht; 7 = extrem schlecht																			
Unterer Lias				x			x					x	x	x					x
Rhät-Tonsteine			x			x						x		x					x
Rhät-Sandsteine		x			x					x			x		x		x		
Feuerletten			x				x					x		x					x
Burgsandstein		x			x				x				x	x	x		x		
Blasensandstein		x			x				x				x	x	x		x		
Schilfsandstein		x			x				x				x	x	x		x		
Estherienschiefer		x	x		x					x			x	x	x		x		
Myophorienschiefer		x	x		x					x			x	x	x		x		
Werksandstein	x				x				x				x	x	x		x		
ku	x				x					x			x	x	x		x		
Quaderkalk	x					x			x					x				x	
mo tonig			x		x					x				x	x			x	
mo kalkig	x					x			x				x	x		x	x		
mm Salinarfazies				x				x			x				x				x
mm Normalfazies			x		x					x			x	x	x				x
mu	x				x				x					x		x	x		
Rötquarzit	x							x	x					x					x
Röttone			x				x						x	x	x				x
Plattensandstein		x			x				x				x	x	x			x	
SollingSs		x				x				x			x	x	x		x		
Felssandstein		x				x				x			x	x	x		x		
sm Wechselfolgen		x				x				x			x	x	x		x		
sm Sandsteine		x				x				x			x	x	x		x		
su		x				x				x			x	x	x		x		
Bröckelschiefer				x		x								x	x		x		
Zechstein				x		x									x		x		
Rotliegend			x			x				x					x		x		

Tabelle 4-16: Bohrbarkeit und mögliche Bohrverfahren für ausgewählte Einheiten in Unterfranken. Angaben (ergänzt) nach persönlicher Mitteilung durch Herrn Dipl.-Geol. und Bohrmeister G. Marquard, Fa. Brunnen & Bohren, Haßfurt (Unterfranken).

5 Möglichkeiten der thermischen Nutzung des Untergrunds in Unterfranken – Übersichtsbewertung und Erstellung von Übersichtskarten

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der Verfahren der thermischen Nutzung im Raum Unterfranken vor dem Hintergrund der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen geologischen Verhältnisse diskutiert. Dabei bleiben Fragen rechtlicher oder infrastruktureller Art zunächst unberücksichtigt, auch wenn diese in vielen Punkten sehr eng mit den geologischen Gegebenheiten verbunden sind. Die Frage der Trennung bzw. Kombination von geologisch-naturräumlicher und infrastrukturell-rechtlicher Bewertung wird in Kap. 6.4.2.2 behandelt.

Die Beurteilung der Eignung erfolgt für die einzelnen Verfahren getrennt, da sie unterschiedliche Anforderungen an die Verhältnisse im Untergrund stellen. Je nach „Verwandtschaft“ der Verfahren ergeben sich hierbei Überschneidungen, auf die entsprechend hingewiesen wird. Zum Verständnis dieser Ausführungen werden die in den Kapiteln 2, 3 und 4 beschriebenen physikalischen, technischen und geologischen Grundlagen vorausgesetzt.

In diesem Kapitel werden nur **pauschale Aussagen** zu den verschiedenen stratigraphischen Einheiten in Unterfranken gemacht. Es handelt sich um eine Übersichtsdarstellung, die dazu geeignet ist abzuschätzen, inwieweit verschiedene Verfahren der thermischen Nutzung in Unterfranken grundsätzlich zum Einsatz kommen können und welche Bereiche besonders günstige Voraussetzungen bieten. Eine solche Abschätzung kann nicht zur Beurteilung konkreter Standorte herangezogen werden. Zu diesem Zweck müssen wesentlich aufwendigere Analysen auf Basis einer deutlich umfangreicheren Datengrundlage durchgeführt werden. Entsprechende Verfahren und ihre Grundlagen werden in den Kapiteln 6, 7 und 8 vorgestellt.

5.1 Geologisch-hydrogeologische Aspekte von Übersichtsbewertungen

Wie diese Untersuchung zeigt, ist es letztlich nur begrenzt möglich, allgemeingültige Aussagen über die Anwendbarkeit bestimmter Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes, bezogen auf einzelne geologische Einheiten, zu treffen. Zunächst erscheint für die Prüfung, ob ein Verfahren im Untersuchungsgebiet angewendet werden kann, folgende Verfahrensweise plausibel (vgl. dazu auch Abbildung 1-6):

1. Die Anforderungen, die das jeweilige Verfahren an die geologischen Untergrund stellt, werden ermittelt (Kap. 3).
2. Die relevanten Eigenschaften der im Untersuchungsgebiet auftretenden geologischen Einheiten werden festgestellt (Kap. 4).
3. Anforderungen und Eigenschaften werden miteinander abgeglichen und es wird festgestellt, welche der Einheiten für die verschiedenen Verfahren geeignet sind.

Bei genauerer Betrachtung wird allerdings deutlich, daß sich die Frage der Eignung nicht auf **diskrete geologische Einheiten** begrenzen läßt, sondern im Zusammenhang mit der **geologisch-hydrogeologischen Gesamtsituation** erörtert werden muß. Die beiden wesentlichen Aspekte, die dabei zu beachten sind, sind zum einen die Grundwassersituation, zum anderen die Mächtigkeit und Position von Einheiten im Schichtenverband.

5.1.1 Grundwassersituation

Die Verfahren der thermischen Nutzung sind im hohen Maße vom Vorhandensein und dem Zustand (Menge, Mobilität, Fließgeschwindigkeit, -richtung, -verhalten) von Wasser im Untergrund abhängig. Diese Eigenschaften werden aber nur indirekt, teilweise auch gar nicht, von den primären lithologischen Eigenschaften einer geologischen Einheit („Schicht“) bestimmt. Die Aussage, daß eine Schicht für ein bestimmtes Verfahren geeignet ist, kann deshalb in vielen Fällen nur getroffen werden, wenn sie von bestimmten Bedingungen abhängig gemacht wird. Diese würden z.B. im Falle der Aquiferspeicherung lauten, daß eine Schicht, die einen potentiellen Grundwasserleiter darstellt, nur dann geeignet ist, wenn Grundwasser vorhanden ist und wenn dieses Grundwasser sich nur wenig bewegt (<10m/a). Weniger anschaulich gestalten sich derartige

Überlegungen im Falle der Erdsondenspeicherung. Hier ist das Auftreten von Grundwasser nicht primär Voraussetzung, es kann allerdings unter bestimmten Bedingungen die Eignung drastisch herabsetzen oder auch verbessern. Weitere Hinweise auf mögliche Konstellationen der zugrundeliegenden Bedingungen und Abhängigkeiten gibt Abbildung 5-1.

5.1.2 Mächtigkeit und Lage von Einheiten im Schichtenverband

Bei der Bewertung von Einheiten ist zu berücksichtigen, daß sie in einem Schichtenverband auftreten, in dem ihnen je nach ihrer Lage in der vertikalen Abfolge unterschiedliche Rollen zukommen. Als Beispiel wird hier Schicht C in Abbildung 5-1 (b) und (c) genannt, die einmal unbedeutend ist, da sie unterhalb des interessanten (erschließbaren) Bereichs liegt (Fall b), im Fall (c) bestimmte Nutzungen (Speicherung) verhindert, da sie im interessanten Bereich liegt und starke Grundwasserbewegungen zu erwarten sind. So kann, auch wenn Schicht B grundsätzlich für die Untergrundspeicherung geeignet wäre, in der in Abbildung 5-1c dargestellten geologischen Situation kein Speicher errichtet werden, da in Schicht C die Grundwasserfließgeschwindigkeit zu hoch ist. Weitere Beispiele lassen sich aus Abbildung 5-1 ableiten, wo allerdings nur eine begrenzte Auswahl möglicher Konstellationen gezeigt ist:

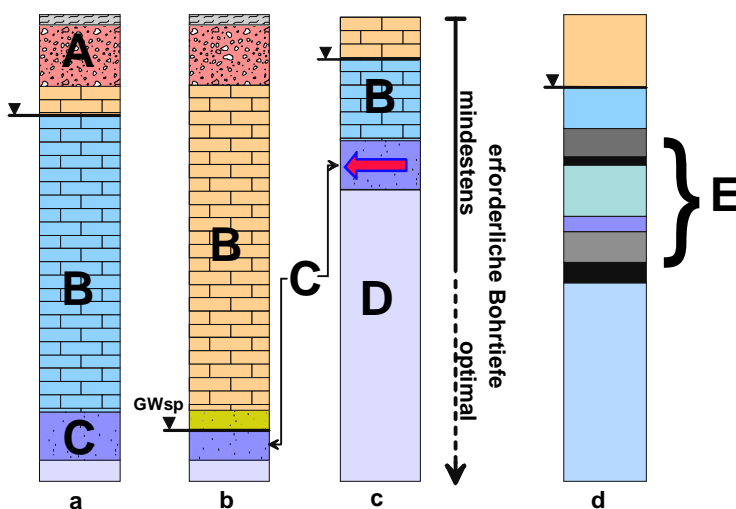


Abbildung 5-1: Beispiele zur Problematik der Beurteilung von Einheiten bezüglich ihrer Eignung für die thermische Nutzung:

Fall a und b: Die zu bewertende Einheit (B) ist in ihrer gesamten Mächtigkeit vorhanden und weitgehend gesättigt (a) bzw. grundwasserfrei (b).

Fall c: Einheit B ist nur teilweise erschlossen, ihre Mächtigkeit reicht allein für eine Nutzung nicht aus. Sie wird unterlagert von Einheit C mit hoher (potentieller) Grundwasserfließgeschwindigkeit.

Fall d: Einheit E stellt ein heterogen aufgebautes Schichtpaket mit vertikal stark variablen Durchlässigkeiten (lokale Teilgrundwasserstockwerke) dar.

Die Lage im Schichtenverband ist auch zu berücksichtigen, wenn die tatsächlich aufgeschlossene Mächtigkeit einer Einheit bzw. ihre Tiefenlage in die Beurteilung mit eingehen (Abbildung 5-1c). Bezüglich der Mächtigkeit muß zwischen der Gesamtmächtigkeit der Schicht („primäre Mächtigkeit“) und der tatsächlich vorhandenen (durch Erosion im Ausstrich bereits reduzierte Mächtigkeit) unterschieden werden. Dieser Unterscheidung kommt in Unterfranken z.B. im Fall des Unteren Keupers besondere Bedeutung zu. Der *ku* bedeckt große Flächen, ist aber meist nur in geringer Mächtigkeit vorhanden und deswegen wenig bedeutend (vgl. dazu Kap. 7.2.3.1.4).

Die Beurteilung einer Schicht muß aber zwangsläufig auch die primäre Mächtigkeit berücksichtigen. So macht die Aussage „Schicht A ist für Verfahren xy geeignet“ keinen Sinn, wenn das Verfahren bzw. die Projektgröße eine Gesamtmächtigkeit (Bohrtiefe) von 100m erfordert, die Schicht aber nur 10m mächtig ist. Andererseits kann einer solchen geringmächtigen Einheit hohe Bedeutung im negativen Sinne zukommen, wenn sie stark ungünstige Eigenschaften besitzt und in dem Teufenbereich auftritt, der für das Verfahren genutzt werden soll (z.B. Abbildung 5-1c). Besonders problematisch ist diesbezüglich auch die Bewertung von Einheiten bzw. als solche definierte Schichtpakete, die tatsächlich eine heterogen aufgebaute Abfolge von Schichten unterschiedlicher Eigenschaften darstellen (Abbildung 5-1d).

Auf die hier nur kurz angerissene Problematik der Bewertung von geologischen Einheiten bzw. der geologisch-hydrogeologischen Gesamtsituation an einem Standort wird ausführlich in den Kapiteln 7 (dort insbesondere 7.2.1) und 8 eingegangen.

5.2 Anwendbarkeit der Speicherverfahren in Unterfranken

5.2.1 Allgemeine Limitierungen für Speicherverfahren

Sowohl für die Aquiferspeicherung (ATES) als auch für die Erdsondenwärmespeicherung (ESWSp) gilt, daß im Speicherbereich keine Grundwasserfließgeschwindigkeiten größer als etwa 5-10m/a auftreten dürfen, da es sonst zu unverhältnismäßig hohen Speicherverlusten durch Wärmeabtransport im Grundwasser kommt (Kap. 3.1.3.1). Grundwasserfließgeschwindigkeiten über 10m/a können aufgrund der gegebenen hydraulischen Verhältnisse in Unterfranken **überall** dort auftreten, wo ausreichende Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeiten vorhanden sind ($k_f > \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$). k_f -Werte $> 1 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ sind in Unterfranken in **allen** Gesteinseinheiten möglich, die als Kluft-, Karst- und Porengrundwasserleiter charakterisiert wurden (vgl. dazu Tabelle 4-15). Deshalb sind in Unterfranken **alle** (potentiellen) Grundwasserleiter zunächst als ungeeignet für Speicherverfahren zu betrachten. Diese Aussage berücksichtigt allerdings noch nicht, daß eine als „Grundwasserleiter“ definierte Schicht nicht notwendigerweise auch Grundwasser führen muß.

5.2.2 Aquiferspeicherung

Aus der zuvor getroffenen Feststellung, daß in Grundwasserleitern in Unterfranken wegen der hohen Grundwasserfließbewegungen keine Speicherung thermischer Energie möglich ist, läßt sich bereits ableiten, daß die Aquiferspeicherung in Unterfranken keine praktikable Möglichkeit der thermischen Untergrundnutzung darstellt. Zu den potentiell hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten treten weitere ungünstige Faktoren hinzu, die im Folgenden kurz erläutert werden.

5.2.2.1 Kluft- und Karstaquifere in Unterfranken

Die Kluft- und Karstwasserleiter der triassischen Abfolge weisen insgesamt wenig günstige hydrogeologische Eigenschaften auf. Ihre nutzbaren Poren- bzw. Kluftvolumina sind gering und die k_f -Werte liegen im unteren Grenzbereich dessen, was für den Betrieb von Aquiferwärmespeichern noch zulässig ist. Problematisch ist vorrangig auch die extrem heterogene Verteilung dieser Eigenschaften. Eine verlässliche quantitative Modellierung des Speicherverhaltens, die zur Planung einer Anlage unerlässlich ist, ist unter solchen Voraussetzungen nicht möglich. Das Risiko des Versagens eines Speichers in entsprechenden Gesteinen erscheint generell zu hoch. Neben den ungünstigen Voraussetzungen, die durch die stark heterogene Verteilung der Wasserwegsamkeit geschaffen wird, ist auch die bereichsweise hohe Mineralisation des Grundwassers als ungünstig anzusehen. Insbesondere die sehr harten Muschelkalkwässer würden eine aufwendige und umweltbelastende Behandlung erforderlich machen. Dies betrifft insbesondere den Mittleren Muschelkalk, der als einzige Einheit die Anforderungen der Aquiferspeicherung bezüglich der Permeabilität und Porosität annähernd erfüllen könnte (vgl. Kap. 4.3.4.3.2).

Die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen dennoch nicht zweifelsfrei ausschließen, daß in den Festgesteinsarealen des Untersuchungsgebietes **einzelne** Lokalitäten vorhanden sind, an denen die Untergrundeigenschaften ausreichend günstig für die Aquiferspeicherung sind. Um solche Lokalitäten zu erschließen und das einwandfreie Funktionieren des Speichers zu gewährleisten sowie negative Einflüsse auf die Umwelt (Kap. 3.5) auszuschließen, wäre allerdings ein Untersuchungsaufwand erforderlich, der den wesentlichen Vorteil der Aquiferspeicherung - die günstigen Baukosten (Abbildung 3-13) - zunichte machen würde. In einer flächenhaft angelegten Bewertung, wie sie in dieser Untersuchung angestrebt wird (vgl. Kap. 6.2.1.5), ist es weder möglich noch sinnvoll, solche Ausnahmesituationen zu berücksichtigen. Die Eignung eines Standortes zur Aquiferspeicherung kann nur durch gezielte projektspezifische Einzelfallbetrachtungen geprüft werden.

5.2.2.2 Lockergesteinsaquifere - Porengrundwasserleiter

Lockergesteine, die aufgrund ihrer sedimentpetrographischen Eigenschaften (Porosität und Permeabilität) für die Aquiferspeicherung geeignet sein könnten, treten in Unterfranken fast ausschließlich in Form der

quartären Talfüllung des Mains auf. Ungünstig sind dort allerdings die über weite Strecken relativ geringen Grundwassermächtigkeiten und die geringen Grundwasserflurabstände, die eine saisonale Beeinflussung der Grundwassertemperatur mit sich bringen (Kap. 4.3.8.5.6). Ausreichend hohe Mächtigkeiten zur Realisierung von sinnvollen Speichervolumina sind nur an wenigen Lokalitäten vorhanden (Kap. 4.3.8.5.1). Gerade dort wird der Aquifer allerdings auch intensiv wasserwirtschaftlich genutzt. Den maßgeblichen negativen Einflußfaktor bilden aber die hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten, die im gesamten Maintalbereich weit über den für die Speicherung tolerierbaren Werten liegen (Kap. 4.3.8.5.3).

Kurz hingewiesen sei an dieser Stelle auf die Arbeit von KUCHENBROD (1996), der im Feldversuch die Eignung von quartären Maintalsedimenten zur Aquiferspeicherung untersuchte.

5.2.2.3 Trinkwasserschutz – rechtliche Aspekte

Sowohl die Fest- als auch die Lockergesteinsaquifere in Unterfranken werden nahezu in allen besiedelten Bereichen und darüberhinaus intensiv für die Trinkwasserversorgung genutzt. Die Aquiferspeicherung als offenes System stellt aus Sicht der Wasserwirtschaft eine konkurrierende Nutzung dar, die die potentielle Gefahr der Verunreinigung von Grundwasser mit Trinkwasserqualität mit sich bringt. In einer dicht besiedelten Region wie Unterfranken wird, wegen der relativ schwierigen Vorhersagbarkeit des Verhaltens von Wasser im Untergrund, der Trinkwasserschutz immer über andere Belange gestellt werden.

5.2.2.4 Aquiferspeicher in Unterfranken - Fazit

Vor dem Hintergrund der ungünstigen hydrogeologischen, hydrochemischen und rechtlichen Bedingungen wird die Aquiferspeicherung in Unterfranken als **ungeeignet** eingestuft. Sie kann im Einzelfall als Alternative erwogen werden, wobei es allerdings in den meisten Fällen vorteilhafter sein wird, das weniger kostengünstiger, aber risikoärmere Verfahren der Erdsondenwärmespeicherung vorzuziehen. Am aussichtsreichsten erscheinen Projekte, bei denen Abwärme gespeichert werden kann, die ansonsten durch energie- und kosten- aufwendige Verfahren beseitigt werden müßte. In solchen Fällen sind höhere Energieverluste u.U. tolerierbar. Generell günstig sind niedrige Speichertemperaturen zur Vermeidung von hydrochemischen und -biologischen Problemen, die auch aus wasserrechtlicher Sicht möglicherweise günstiger beurteilt werden. In diesem Zusammenhang bietet die Kältespeicherung bezüglich der geologischen wie der rechtlichen Kriterien etwas bessere Voraussetzungen. Die Gesamtbeurteilung für die Aquiferspeicherung in Unterfranken lautet: pauschal betrachtet unmöglich, im Einzelfall unter besonderen geologischen **und** projektspezifischen Voraussetzung aber erwägenswert. Eine Bewertung mit Hilfe von flächendeckend angewendeten GIS-Methoden ist vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

5.2.3 Erdsondenwärmespeicherung

5.2.3.1 Festlegung prinzipiell geeigneter Einheiten und Bereiche

Wie in Kap. 5.2.1 erläutert, scheiden auch für die ESWSp alle geologischen Einheiten bzw. Standorte aus, bei denen erhöhte Grundwasserfließgeschwindigkeiten ($>10\text{m/a}$) auftreten können³³. Das sind bei den in Unterfranken vorliegenden hydraulischen Gradienten **alle** (potentiellen) Grundwasserleiter, die sich **unterhalb** des Grundwasserspiegels befinden. Prinzipiell geeignet sind dagegen alle Einheiten und Bereiche, die entweder aufgrund ihrer lithologischen Eigenschaften un- oder geringdurchlässig sind **oder** sich über dem Grundwasserspiegel befinden (ungesättigt sind). Man kann also die für die ESWSp geeigneten Gebiete anhand zweier Kriterien bestimmen:

³³ Wasserwegsamkeiten und Grundwasserbewegungen können durch das Verpressen von Zementsuspensionen allerdings reduziert werden (vgl. Tab. 3-4).

Kriterium 1: Gebiete, in denen der Grundwasserspiegel einen Mindestabstand zur Geländeoberfläche hat, der die Errichtung eines ausreichend tiefreichenden Speichers erlaubt, ohne daß in das Grundwasser eingegriffen wird.

Kriterium 2: Gebiete, in denen Schichten auftreten, deren Durchlässigkeiten kleiner etwa $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ über den gesamten vom Speicher eingenommenen Teufenbereich sind. Hier sind die in Abbildung 5-1 gezeigten Konstellationen zu berücksichtigen.

Gebiete, die das **Kriterium 1** erfüllen, lassen sich formal sehr leicht bestimmen, sofern ein geeigneter Grundwassergleichenplan vorliegt. Sie können in einem GIS über eine einfache Abfrage ermittelt werden, die lautet³⁴:

$$\text{Kriterium 1: } [\text{DHM}] - [\text{GWGL}] > M_{\min}$$

Gleichung 5-1

mit [DHM] = Digitales Höhenmodell = Geländeoberfläche/NN³⁵, [GWGL] = Grundwasseroberfläche und M_{\min} = für den Speicher erforderliche Mindestmächtigkeit.

Problematisch ist vor dem Hintergrund komplexer hydraulischer Verhältnisse und der begrenzten Datenverfügbarkeit die Erstellung eines geeigneten Grundwassergleichenplans. Auf die damit verbundenen Schwierigkeiten und Lösungsvorschläge wird ausführlich in Kap. 7.2.3.2 eingegangen.

Für Unterfranken ergibt eine Abfrage nach Gleichung 5-1 mit $M_{\min} = 50 \text{ m}$ geeignete Gebiete in einer Gesamtfläche von fast 5000 km^2 (= 60% Unterfrankens; Abbildung 5-2; Tabelle 5-1).

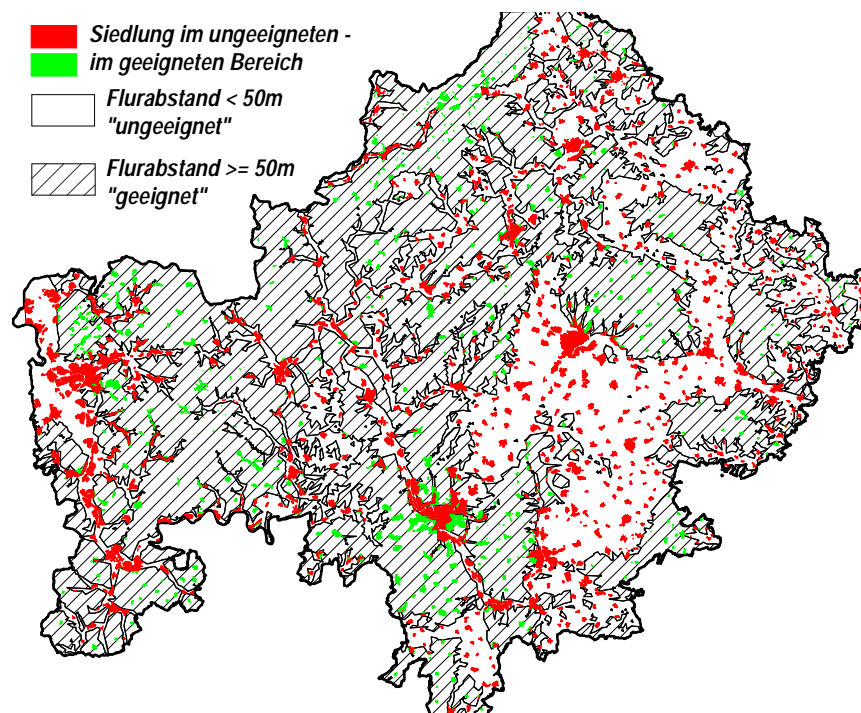


Abbildung 5-2: Gebiete in Unterfranken, in denen der Grundwasserflurabstand 50m und mehr beträgt (nach Annahmen und Berechnungen wie in Kap. 7.2.3.2 erläutert). Es fällt auf, daß die Mehrzahl der nach dieser Definition **geeigneten Flächen** in unbesiedeltem Gebiet liegt (vgl. Tabelle 5-1).

[Für den Wärmeentzug mit Erdwärmesonden können die nach dem hier angewandten Kriterium geeigneten und ungeeigneten Gebiete einfach vertauscht werden, da für EWS das Vorhandensein von Grundwasser generell günstig ist (siehe Kap. 5.3.1.2).]

Nach der oben angegebenen Abfrage können insgesamt etwa 60% der Fläche Unterfrankens als „prinzipiell geeignet für die ESWSp“ ausgewiesen werden. Interessant erscheint dabei allerdings, daß die weitaus meisten dieser Flächen in unbesiedeltem Gebiet liegen (außerhalb der Flußtäler und Beckenbereiche). Die besiedelte, also potentiell „interessante“ Fläche mit Flurabständen < 50m beträgt demnach nur etwa 20%. Fragen, die im Zusammenhang mit der Einbeziehung des „Nutzungs-“, oder „Nachfragepotentials“ stehen, werden ausführlicher in Kap. 6.2.3.1.1 und 6.4.2.2 behandelt.

³⁴ Zu den Berechnungsverfahren und GIS-Anwendungen vgl. Kap. 6.1 und 8.1.

³⁵ Eckige Klammern [] bedeuten, daß es sich um klassifizierte Rasterdarstellungen (Grids) handelt (vgl. Kap. 8.1).

Grundwasserflurabstand	Gesamtfläche		besiedelt	
	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
< 50m	3487	41	356	79%
> 50m (geeignet)	4980	59	93	21%

Tabelle 5-1: Flächenanteil der Gebiete in Unterfranken mit Grundwasserflurabständen von mehr als 50m (vgl. Abbildung 5-2).

(=geologische Karte) zu betrachten, da damit die Tiefenerstreckung dieser Schichten nicht erfaßt wird (vgl. Kap. 7.2.1). Die dreidimensionale Betrachtung erfordert einen enormen Aufwand zur Erstellung der notwendigen Datengrundlage und einen hohen Aufwand bezüglich der anzustellenden Berechnungen. Innerhalb der vorliegenden Untersuchung konnte dieser Aufwand nicht für das gesamte Gebiet Unterfrankens geleistet werden. Entsprechende Methoden wurden nur auf einen Beispielausschnitt (vgl. Abbildung 1-7) angewendet, worauf in Kap. 7 und 8 ausführlich eingegangen wird. Für das Gebiet Unterfranken kann nur angegeben werden, welche Einheiten **prinzipiell** für die ESWSp geeignet sind. Dabei muß allerdings immer berücksichtigt werden, **wie** die Einheit auftritt (vgl. Abbildung 5-1) und nicht nur die Eigenschaften der Einheit an sich.

5.2.3.2 Festlegung eines Eignungsgrades nach lithologischen Kriterien

Mit Hilfe der bislang vorgestellten einfachen Überlegungen läßt sich zwar feststellen, ob ein Standort bzw. ein Gebiet grundsätzlich geeignet sind, nicht aber wie „gut“ er sich verglichen mit anderen Standorten eignet. Der „Grad der Eignung“ auf einer Skala von „sehr gut“ bis „ungeeignet“ kann aus der Kombination von unterschiedlichen Eigenschaften und deren Ausprägung ermittelt werden. Auf die zugrundeliegenden Verfahren wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Ausführlich mit dem Bewertungsprozeß anhand multipler Kriterien befaßt sich Kap. 6.4. Für die Bewertung eines Standortes bezüglich der ESWSp sind folgende Faktoren maßgeblich. Die Auflistung erfolgt mit steigender Wertigkeit (vgl. auch Tabelle 3-4):

1. **Temperatur des umgebenden Untergrundes** (auch abhängig vom Verwendungszweck des Speichers – Wärme/Kälte): Bei Temperaturdifferenzen von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ bezogen auf 50m Tiefe im Untersuchungsgebiet kein vorrangiges Kriterium (vgl. Kap. 4.4.6).
2. **Wärmeleitfähigkeit und –kapazität der Gesteine:** Die Bedeutung der Wärmeleitfähigkeit ist im hohen Maße von der Nutzungsart abhängig (Kap. 3.1.4.2.1). Sie kann deshalb nur begrenzt in die geologische Bewertung eingehen. Gleichermaßen ungünstig sind extrem hohe und extrem niedrige Werte. Günstig ist eine hohe volumetrische Wärmekapazität, hier ist allerdings die Variationsbreite gering³⁶.
3. **Bohrbarkeit:** bedeutender Kostenfaktor.
4. **Hydrogeologische Eigenschaften:** Wasserführung (gesättigte/ungesättigte Verhältnisse), Durchlässigkeit, Porosität und Grundwasserfließgeschwindigkeit. Hohe Wassergehalte steigern die volumetrische Wärmekapazität. Wegen des Risikos von Energieverlusten durch konvektiven Wärmetransport der entscheidende Bewertungsfaktor im Untersuchungsgebiet. Ebenfalls zu beachten ist das Austrocknungsrisiko bei der Hochtemperaturspeicherung ($>50^{\circ}\text{C}$).

Abgesehen von der Bohrbarkeit lassen sich alle oben genannten Kriterien für einzelne Gesteinseinheiten nicht unabhängig von anderen Faktoren beurteilen. Es besteht fast immer eine Abhängigkeit von der Grundwasserführung, im Falle der Untergrundtemperatur auch von klimatischen Faktoren (vgl. Kap. 4.4.6). Grundsätzlich müssen auch Kriterien wie Mächtigkeit und Homogenität berücksichtigt werden. Die im Folgenden vorgestellte Beurteilung der einzelnen lithologischen Einheiten hinsichtlich ihrer Eignung für die Erdsondenspeicherung erfolgt deshalb immer unter Vorbehalt.

³⁶ Bei den im Untersuchungsgebiet für ESWSp geeigneten Gesteinen.

Die Bestimmung derjenigen Gebiete, die dem **Kriterium 2** (s.o.) genügen, bereitet demgegenüber deutlich größere Schwierigkeiten. Es ist ohne Berücksichtigung der dreidimensionalen Verteilung der Untergrundparameter nicht möglich, eine entsprechende Abfrage durchzuführen (vgl. dazu Abbildung 5-1). Es reicht nicht aus, in einer solchen Abfrage die Eigenschaften der oberflächlich ausstreichenden Schichten

Da sich die Eigenschaften verschiedener Einheiten aus unterschiedlichen Bereichen der stratigraphischen Abfolge bezüglich der oben genannten Kriterien ähneln, werden sie zu Gesteinskategorien nach Tabelle 5-2 zusammengefaßt:

Gesteins-kategorie	Beschreibung	Einheiten in Unterfranken
Tonsiltsteine	Tonsteine, tonige Siltsteine mit feinsandigen Anteilen	Bröckelschiefer, Röttone, Myophorien-, Estherienschichten, Feuerletten
Sandsteine	Sandsteine, überwiegend sandige Gesteine und Sand-Siltstein-Wechselfolgen	Unterer -, Mittlerer Buntsandstein, Plattensandstein, Schilf-, Blasen-, Burgsandstein
Kalksteine	überwiegend kalkige Gesteine	Unterer und Oberer Muschelkalk
Kalkmergelgesteine	überwiegend mergelige bis tonig-mergelige Gesteine	Mittlerer Muschelkalk, Bereiche des Oberen Muschelkalk
Wechselfolgen	heterogen zusammengesetzte Einheiten aus tonigen, kalkigen, sandigen und anderen Gesteinen	Unterer Keuper, Lehrbergschichten, Rhät(-olias)
Kristallin	Quarzite, Gneise, Glimmerschiefer u.ä.	Kristalline Gesteine des Spessart
Sonstige	Gesteine, die im Hinblick auf die hier angestellten Betrachtungen keine Bedeutung haben	Basalte, Tuffe, tertiäre limnische Sedimente und Kohlen, Evaporite, geringmächtige quartäre Bildungen

Tabelle 5-2: Zusammenfassung von stratigraphischen Einheiten zu Gesteinskategorien ähnlicher Eigenschaften hinsichtlich der Eignung für die ESWSp (gilt auch für den Wärmeentzug mit Erdsonden, Kap. 5.3.1.3).

Im Folgenden wird die Eignung der in Tabelle 5-2 aufgelisteten Gesteinskategorien für die Erdsondenwärmespeicherung erörtert. Eine Übersicht über die Eignung und die wesentlichen Eigenschaften aller Einheiten im Einzelnen wird in Tabelle 5-6 gegeben.

5.2.3.2.1 Tonsiltsteine

Wegen ihrer geringen Durchlässigkeit sind Gesteine des Tonsiltstein-Typs generell für die ESWSp geeignet. Auch bei ihnen können unter besonderen Bedingungen (Klüftung) allerdings erheblich erhöhte Durchlässigkeiten angetroffen werden. Die thermischen Eigenschaften liegen in günstigen Bereichen. Stellvertretend gelten die Werte, die für die Röttone angegeben wurden (Kap. 4.3.3.3). Günstig ist, daß die in Tabelle 5-2 genannten Einheiten der Tonsiltstein-Gruppe in Unterfranken überwiegend große Mächtigkeiten aufweisen und vergleichsweise homogen aufgebaut sind (Ausnahme: Bröckelschiefer). Die Röttone, die vom mächtigen *mu* überlagert werden, sind besonders günstig: *so* und *mu* bilden gemeinsam ein etwa 150m mächtiges Schichtenpaket, das, abgesehen von verkarsteten Bereichen im *mu*, für die Speicherung überwiegend gut geeignet ist (vgl. auch Kap. 5.2.3.2.2). Vergleichbare Gesamtmächtigkeiten weisen *kmM* mit *kmE* auf. Hier sind allerdings evaporitische Einschaltungen und mit ihnen einhergehende Verkarstung im Einzelfall zu berücksichtigen. Bezüglich der Bohrbarkeit weisen Gesteine des Tonsiltstein-Typs eher mäßige Eigenschaften auf. Am besten ist diesbezüglich das Verhalten der Gesteine im *km* (vgl. Kap. 4.4.7).

Grundsätzlich sind die Speichereigenschaften von Tonsiltsteinen um so besser, je höher der Sättigungsgrad ist, da sich bei hohem Wassergehalt das thermische Verhalten verbessert. Bei den fein- bis feinstporigen Gesteinen kann aber weder davon ausgegangen werden, daß unter der Grundwasseroberfläche alle Poren wassererfüllt sind, noch daß oberhalb der Grundwasseroberfläche ein wesentlicher Porenanteil wasserfrei ist (Kap. 2.3.1.4). Deshalb ist davon auszugehen, daß sich die Sättigungseigenschaften über und unter der Grundwasser(-druck-)oberfläche nicht drastisch unterscheiden.

5.2.3.2.2 Kalk- und Kalkmergelsteine

Kalk- und Kalkmergelsteine treten in größerer zusammenhängender Mächtigkeit nur im Oberen und Unteren Muschelkalk auf. Beide Einheiten sind sich bezüglich der für die ESWSp relevanten Eigenschaften ähnlich. Generell sind die karbonatischen Gesteine des Muschelkalk dort, wo sie wenig geklüftet und verkarstet sind, gut für die Erdsondenspeicherung geeignet, da sie problemlos und mit geringem Aufwand zu bohren sind

(Tabelle 4-16), Wärmeleitfähigkeiten in mittleren (nicht extremen) Bereichen und geringe Porenvolumen und Durchlässigkeiten aufweisen. Damit sind günstige Voraussetzungen für die Errichtung von kostengünstigen und gut kalkulierbaren, da homogenen Speichern gegeben. Problematisch sind dagegen stark geklüftete und verkarstete Bereiche unterhalb der Grundwasseroberfläche, da in solchen generell mit hohen Grundwasserfließbewegungen zu rechnen ist. Bei stärkerer Verkarstung können Probleme auch im ungesättigten Bereich auftreten, weil eine Hinterfüllung der Sonden dort erschwert wird oder unmöglich ist.

In Bezug auf die Klüftigkeit und die von ihr hervorgerufenen Wasserwegsamkeiten ist der *mu* in weiten Bereichen Unterfrankens eher unkritisch (abgesehen von den sparitischen Leitbänken wie Grenzgelbkalk und Schaumkalk, die aber geringmächtig und deshalb wenig bedeutsam sind [$< 2\text{m}$]). Dagegen kann der *mo* häufig einen guten Aquifer und damit schlechten Speicherhorizont darstellen. Günstiger sind hier also generell Bereiche oberhalb der Grundwasseroberfläche. In diesem Zusammenhang ist auch auf den Stockwerksbau, schwebende Grundwasserstockwerke und vertikale Grundwasserbewegungen v.a. im *mo* hinzuweisen. Das Problem der Wasserwegsamkeiten und der Grundwasserbewegungen sollte im Muschelkalk aber nicht überschätzt werden, da grundsätzlich auch die Möglichkeit besteht, Kluftezonen durch das Verpressen von Zementsuspensionen soweit abzudichten, daß der Speicherbereich weitgehend undurchlässig wird (vgl. Tabelle 3-4).

Insgesamt können die Gesteine des *mo* und *mu* als gut bis sehr gut geeignet für die ESWSp bezeichnet werden. Der *mu* ist wegen seiner geringeren Durchlässigkeit, dem höheren Karbonatanteil und seiner Lage im Gesamtprofil, wo er ein mehr als 150m mächtiges Paket zusammen mit den Röttonen bildet, besonders gut geeignet. Ungünstig sind dagegen verkarstete Bereiche und Störungszonen, wie sie z.B. im Südosten der Rhön auftreten (vgl. Kap. 4.4.2).

5.2.3.2.3 Mergelige bis tonige Gesteine

Den in die vorwiegend kalkigen Bereiche des *mu* und *mo* eingeschalteten tonig-mergeligen Partien kommt wegen ihrer geringen Mächtigkeit keine große Bedeutung zu. Sie bewirken keine wesentlichen Änderungen der oben beschriebenen Eigenschaften dieser Einheiten, sind allerdings als trennende Horizonte für lokal ausgebildete (schwebende) Teilgrundwasserstockwerke von Bedeutung.

Dagegen treten im Mittleren Muschelkalk (*mm*) mergelige Gesteine in größerem Umfang auf. Der gesamte *mm* ist für Speicherverfahren und andere Nutzungen schlecht bzw. gar nicht geeignet, da er zur Verkarstung neigt und größtenteils sehr schlecht bohrbar ist. Er stellt einen guten Karst- bis Kluftwasserleiter dar, so daß eine Nutzung zur Speicherung unter der Grundwasseroberfläche nicht möglich ist.

5.2.3.2.4 Sandsteine

Sandsteine des Buntsandstein (*su* und *sm*; Teile des *so*) sowie des Sandsteinkeupers (*kmS* bis *kmB*) machen mit einer addierten Mächtigkeit von etwa 500m rund 30-40% am Gesamtprofil aus und nehmen einen Flächenanteil von ca. 36% in Unterfranken ein. Als (potentielle) Kluftwasserleiter sind sie wegen der vergleichbaren hydrogeologischen Eigenschaften bezüglich der Eignung zur ESWSp ähnlich zu bewerten wie die oben genannten Karbonatgesteine des Muschelkalk. Unterschiede bestehen in der etwas weniger guten Bohrbarkeit und der höheren Wärmeleitfähigkeit, die sich ungünstig auswirken kann. Zu beachten ist auch die „zweifache“ Porosität (Klüfte und Poren), die sich im Bezug auf Sättigungsgrad und Wassergehalt bemerkbar macht (vgl. Abbildung 2-13). Positiv ist zu bewerten, daß zumindest im Buntsandstein nicht mit ähnlich komplexen hydraulischen Verhältnissen wie im *mo* gerechnet werden muß. Insgesamt wird die Eignung der Sandsteine in Unterfranken für die Erdsondenspeicherung etwas schlechter beurteilt als die der Kalksteine.

5.2.3.2.5 Wechselfolgen – heterogen aufgebaute Abfolgen

Gesteinseinheiten, die aufgrund des Ablagerungsmilieus rasche laterale und vertikale Änderungen aufweisen, treten in Unterfranken vor allem im Unteren Keuper (*ku*), in Bereichen des Sandsteinkeupers (Lehrbergschichten, *kmL*) und im Grenzbereich Keuper/Jura (*ko-ju*) auf. Hier sind heterogen aufgebaute Abfolgen von Ton-, Sand-, Kalk- und Mergelsteinen sowie Evaporite und Kohlen zu erwarten, die häufig nur sehr geringe Mächtigkeiten aufweisen, welche lateralen Schwankungen unterworfen sind. Klüftige Sandsteine und Karbonatbänke können in solchen Einheiten lokal gute Grundwasserleiter darstellen, die häufig als schwabende Aquifere ausgebildet sind. Solche Verhältnisse machen eine pauschale Beurteilung der Eignung fast unmöglich (vgl. dazu Abbildung 5-1d). Insgesamt ist allerdings davon auszugehen, daß tonige, undurchlässige Gesteine dominieren. Grundwasserführende Zonen können daher, wo notwendig, mit geringem bis mittlerem Aufwand abgedichtet werden. Da die Bohrbarkeit mäßig bzw. unterschiedlich ist, erhalten entsprechende Abfolgen eine mittlere bis schlechte Bewertung.

Zu berücksichtigen ist jedoch, daß die genannten Einheiten keine großen Gesamtmächtigkeiten aufweisen (<50m) und deshalb nur in Ausnahmefällen **ausschließlich** genutzt werden können. Deshalb ist hier auf die Lage im Schichtenverband sowie die tatsächlich anzutreffenden Mächtigkeiten Rücksicht zu nehmen. Dies betrifft insbesondere den Unteren Keuper, der in Unterfranken ca. 20% der Fläche einnimmt, aber aufgrund der oft geringen vorhandenen Mächtigkeit keine wesentliche Bedeutung besitzt. Bei der Bewertung von Flächen in denen der *ku* ausstreicht, sollte daher berücksichtigt werden, daß fast immer auch der *mo* mit erschlossen wird (vgl. dazu Kap. 4.3.5.1 und 7.2.3.1.4).

5.2.3.2.6 Kristallingebiete

In den Kristallingebieten Unterfrankens kann mit relativ guten Bedingungen für die Erdsondenwärmespeicherung gerechnet werden. Dies läßt sich aus den guten Erfahrungen ableiten, die mit dieser Speichertechnik in kristallinen Gesteinen in Schweden und in der Schweiz gemacht wurden. Die dort teilweise eingesetzten effizienteren offenen Systeme (siehe Abbildung 3-5) können aus rechtlichen Gründen in Deutschland wahrscheinlich nicht angewendet werden. Ebenso bestehen bei den offenen Systemen Probleme aus technischer Sicht, da die Standfestigkeit des Gebirges, zumindest in der teilweise mehr als 20m mächtigen Zersatzzone, teilweise nicht ausreichend sein dürfte.

Die Durchlässigkeiten sind im Mittel so gering, daß in den allermeisten Fällen kein Wärmeverlust durch Konvektion befürchtet werden muß. Speicherung bei hohen bis sehr hohen Temperaturen im ungesättigten Bereich ist in kristallinen Gesteinen unproblematisch, da eine Austrocknung des Gesteins nicht möglich ist³⁷. Positiv wirkt sich weiterhin aus, daß, anders als in den sedimentären Abfolgen, keine deutliche vertikale Zonierung vorliegt. Problematisch sind Zonen erhöhter Klüftigkeit im Bereich von Verwerfungen, weil sie die Gefahr erhöhter Wasserwegsamkeiten bergen. Verwerfungszonen und Bereiche, in denen mit Hangzereißungsklüften zu rechnen ist, sind also zu meiden. Insgesamt können die Verhältnisse in den kristallinen Gesteinen als gut bezeichnet werden.

5.2.3.2.7 Andere Gesteine - Mainquartär

Die bis hierher nicht aufgeführten Gesteine, das sind im Wesentlichen paläozoische Gesteine, Basalte, Pyroklastika und tertiäre Sedimente der Rhön sowie tertiäre Sedimente im Aschaffener Becken, sind für die ESWSp aus verschiedenen Gründen nicht geeignet oder aber so gering verbreitet, daß sich eine eingehende Behandlung nicht lohnt (vgl. auch die entsprechenden Kapitel der geologischen Beschreibung, Kap. 4.3). Im dicht besiedelten Maintal ist eine ausschließliche Nutzung des Mainquartärs mit ESWSp ausgeschlossen, da in den grundwassergesättigten Bereichen die Grundwasserfließgeschwindigkeiten bei weitem zu hoch sind, in den ungesättigten Anteilen die Wärmeleitfähigkeit zu niedrig ist. Zudem sind die Gesamt-

³⁷ Immer zu beachten: Austrocknung des Verfüllmaterials.

mächtigkeiten zu gering. Die Speicherung mit Hilfe von in weiche bindige Sedimente eingerammten oder eingespülten Sonden (vgl. z.B. GABRIELSON ET AL., 1997) ist nicht möglich, da die hierfür in Frage kommenden Formationen (Auelehm etc.) zu geringmächtig sind und im von saisonalen Temperaturschwankungen betroffenen Teufenbereich liegen. Denkbar ist im Einzelfall die Nutzung der im Liegenden des Quartärs anzutreffenden triassischen Gesteine.

5.2.3.3 Grundwassersituation und Gesteinseinheiten – Kombinierte Bewertung

Um zu einer aussagekräftigen Bewertung der Eignung für die ESWSp zu gelangen, ist es notwendig, die Informationen über die Schichteigenschaften und die lokal vorliegende geologisch-hydrogeologische Situation zu kombinieren. Wie oben gezeigt wurde, ist z.B. bei Gesteinen des Muschelkalk die Frage, ob verstärkte Klüftung oder Verkarstung vorliegt, immer dann von besonderer Bedeutung, wenn sich der betrachtete Bereich unterhalb der Grundwasseroberfläche befindet. Bei tonigen Gesteinen werden die Eigenschaften dagegen günstiger, wenn sie sich vollständig in der gesättigten Zone befinden. Aus beiden Beispielen wird ersichtlich, daß sich für die Bewertung ein System von Beziehungen zwischen Parametern ergibt, die voneinander nicht direkt abhängig sind. Diese Parameter sind die lithologisch-mineralogischen Schichteigenschaften, die Grundwassersituation (Lage zur Grundwasseroberfläche) und die tektonische Situation. Erschwert wird die Durchführung einer Bewertung dadurch, daß sich bestimmte Faktoren, z.B. das Vorhandensein von Grundwasser je nach betrachtetem Gesteinstyp unterschiedlich auswirken. Wie bereits erwähnt, war es in dieser Untersuchung nicht möglich, für ganz Unterfranken eine Bewertungsanalyse durchzuführen, die alle diese Aspekte berücksichtigt. Eine entsprechende Behandlung erfolgt nur für den Beispielausschnitt und wird in den Kapiteln 7 und 8 beschrieben.

5.2.3.4 Erstellung einer Karte der für die ESWSp geeigneten Gebiete in Unterfranken

Aus den zuvor beschriebenen Gründen ist die Erstellung einer „Karte geeigneter Gebiete“, deren Aussagekraft die einer groben Übersichtskarte übersteigt, für Gesamt-Unterfranken **nicht** möglich. Um die mit der Kartenerstellung verbundenen Schwierigkeiten aufzuzeigen, wird hier **eine** von zahlreichen Möglichkeiten, eine solche Karte aus den flächendeckend (digital) verfügbaren Informationen zu erzeugen, vorgestellt. Als Basisinformationen dienen dabei:

- ◆ Die **Geologische Karte** auf Basis der GÜK200 (abgedeckt, Kap. 7.1): Dazu wurden den geologischen Einheiten, die in der GÜK200 ausgewiesen sind, Eignungswerte von 1 bis 10 zugewiesen (Tabelle 5-3). Die Berechnung erfolgt anhand der abgedeckten Karte, da die geringmächtigen quartären Sedimente keine Rolle für die ESWSp spielen. Parameter: **[GK200]**.
- ◆ Verwerfungsdichte nach Verwerfungen der GÜK200 (Kap. 4.4.1): Klassifiziert nach Tabelle 5-3. Parameter **[VER_DICHT]**.
- ◆ Pauschalierter und vereinfachter **Grundwassergleichenplan** für Unterfranken (Kap. 7.2.3.2): Grundwasserflurabstand klassifiziert nach Tabelle 5-3. Parameter **[GW_FLUR]**.

Eignungsgrad		
Einheit	ESWSp [GK200]	Erdsonden
Q	3	10
T	6	4
B	9	4
juu	5	4
koju	5	4
kmF	3	4
kmB	4	2
kmBL	4	2
kmL	4	4
kmS	4	2
kmE	3	4
kmM	3	4
ku	5	3
mo	2	3
mm	10	8
mu	1	3
so	4	4
sm	3	2
smH	3	2
smD	3	2
smV	3	2
suG	3	1
suS	3	2
suB	6	6
su	3	2
Z	8	6
R	-1	3
DG	3	2
G	3	2
GnSch	4	2
QuGISch	4	1
StPGn	3	2

Wert [GW_FLUR]	GW-Flur- abstand [m]
6	0-5
5	5-15
4	15-30
3	30-50
2	50-100
1	>100

Wert [VER_DICHT]	Verwerfungs- dichte [m/km ²]
1	0
2	0-100
3	100-250
4	250-500
5	500-1000
6	1000-2000
7	2000-4000
8	>4000

Tabelle 5-3: Klassifikationstabellen für die Erstellung von Karten geeigneter Gebiete in Unterfranken: Geologie, Verwerfungsdichte und Grundwasserflurabstand.

- Den geologischen Einheiten wurden Eignungswerte von 1 (sehr gut) bis 10 (ungeeignet) zugeordnet.
- Grundwasserflurabstände erhalten die Wertung 1 (>100m = gut geeignet) bis 6 (<5m = schlecht geeignet). Ein Attribut 10 (ungeeignet) wird hier nicht vergeben. [Für die Berechnung der Eignungskarte für den Entzug von Wärme mit Erdsonden (Kap. 5.3.1.4) wird die Wertung in der Berechnung mit [GW_FLUR]=7-[GW_FLUR] umgekehrt (<5m = 1, etc.)]
- Die Klassifikation der Verwerfungsdichte [m/km²] (vgl. Abbildung 4-29) beruht auf der Annahme, daß in stark gestörten Bereichen hohe Wasserwegsamkeiten und ungünstige geotechnische Voraussetzungen herrschen.

Anhand der so klassifizierten Gebiete wurden unterschiedliche Bewertungsberechnungen unter Variation der verwendeten Algorithmen und Gewichtungen durchgeführt³⁸. Da keines der Berechnungsverfahren zu einem **flächendeckend** sinnvollen Ergebnis führen kann (s.u.), wird darauf verzichtet, hierauf näher einzugehen. Eine mögliche Bewertungskarte wurde nach der in Gleichung 5-2 angegebenen Gleichung berechnet. Gleichung 5-2 stellt eine beliebige Auswahl unter einer Vielzahl gleichwertiger Berechnungsmöglichkeiten dar. Abbildung 5-3 zeigt das Ergebnis der Abfrage.

$$[\text{Bewertung_ESWSp}] = ([\text{GK200}] * g_k + [\text{VER_DICHT}] * v_d + [\text{GW_FLUR}] * g_f) / (g_k + v_d + g_f)$$

mit den Gewichtungsfaktoren: $g_k=4$, $v_d=2$, $g_f=1$.

Gleichung 5-2

³⁸ Zu den Prinzipien der Klassifikation und Bewertungsberechnungen anhand multipler Kriterien vgl. Kap. 6.4.1.

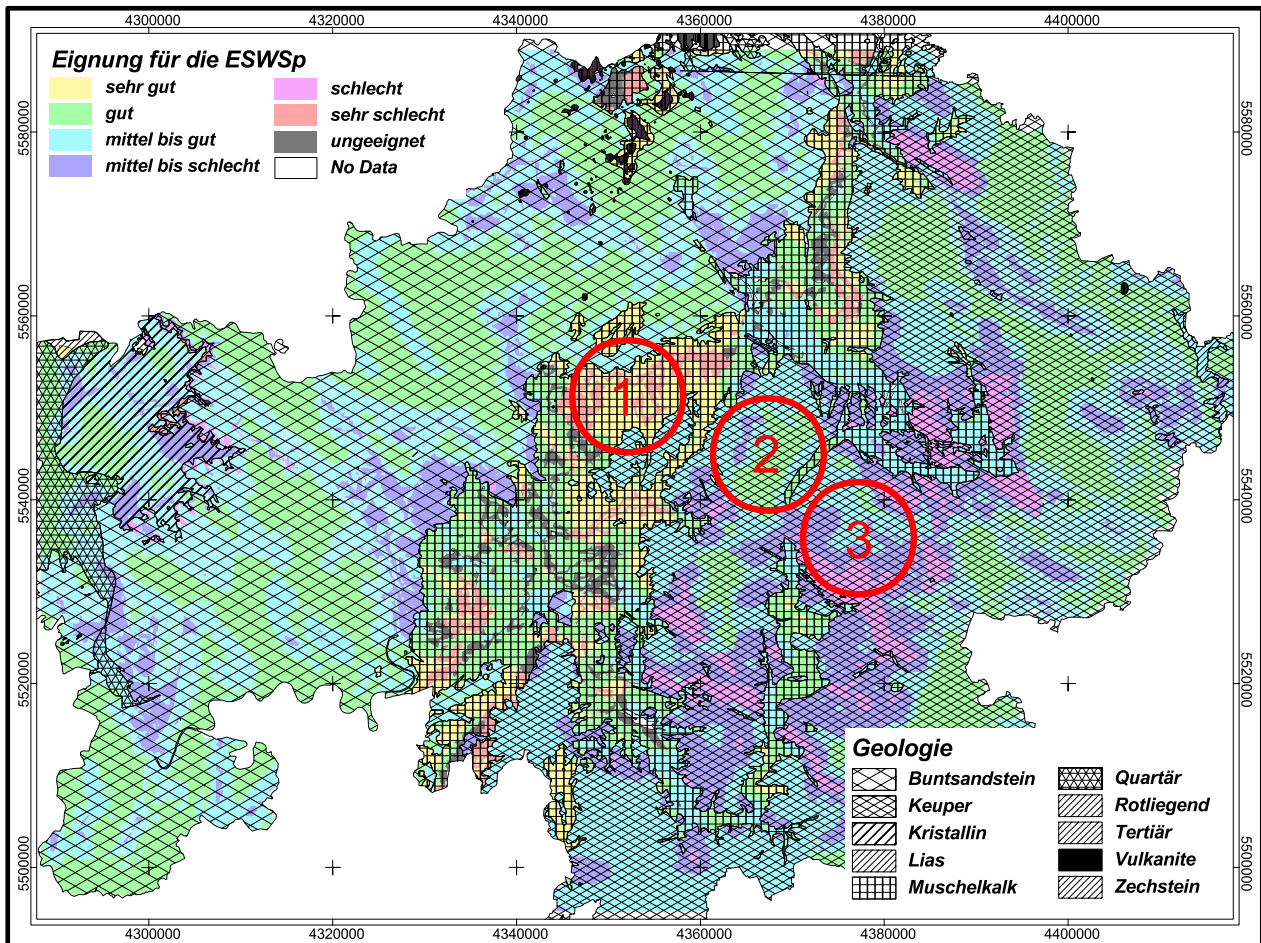


Abbildung 5-3: Karte der für die ESWSp geeigneten Gebiete in Unterfranken; **Beispiel³⁹**. Erstellt unter Einbeziehung der lithologischen Verhältnisse an der Oberfläche, des Grundwasserflurabstandes und der Verwerfungsdichte anhand Gleichung 5-2. In Kreisen markiert sind Beispiele für Problemzonen, in denen die Abfrage aus Gleichung 5-2 nicht zu sinnvollen Ergebnissen führt, die Numerierung verweist auf Erläuterungen im Text.

Es zeigt sich, daß die Ergebnisse dieses Bewertungsverfahrens nur teilweise sinnvoll sind. Im Folgenden werden einige besonders schwerwiegende Unstimmigkeiten genannt (Markierungen in Abbildung 5-3):

- (1) Bereiche, die als sehr gut, und solche, die als sehr schlecht geeignet ausgewiesen sind, liegen direkt nebeneinander. Dies betrifft im Beispiel den Ausstrich des *mm* und des *mu* bzw. *mo*. Im Falle des *mo* ist das kritisch, da im Ausstrichbereich des *mo* bei einer Bohrung oft der *mo* und der *mm* angetroffen werden. Damit würde in einem als sehr gut ausgewiesenen Gebiet, je nach Restmächtigkeit des *mo*, tatsächlich auch Anteile des sehr schlecht- oder ungeeigneten *mm* erschlossen. Gleichermäßen können in als schlecht geeignet klassifizierten Bereichen im Ausstrich des *mm*, tatsächlich vorwiegend Gesteine des gut geeigneten *mu* angetroffen werden. Es ist zwar in der Realität tatsächlich so, daß sehr gut und ungeeignete Gebiete direkt nebeneinander liegen, allerdings kann die Grenzziehung zwischen solchen Bereichen durch die hier angewendete Bewertungsmethode nicht korrekt ermittelt werden.
- (2) Der gesamte Ausstrichbereich des *ku* erscheint in der Bewertung relativ schlecht. Dies ist häufig wenig befriedigend, da bekannt ist, daß der *ku* über weite Strecken nur wenige Meter mächtig ist, also für die Bewertung gar keine Rolle spielt. Die Bewertung sollte in solchen Bereichen statt dessen die positiven Eigenschaften des *mo* im Liegenden berücksichtigen.
- (3) Bereiche im Ausstrich des *kmM* und *kmE*, die als undurchlässige Gesteine unabhängig von der Grundwassersituation als gut geeignet klassifiziert werden sollten, werden aufgrund des bereichsweise geringen Grundwasserflurabstandes schlecht bewertet, obwohl das Vorhandensein von Grundwasser in diesem Fall die Eigenschaften noch verbessern würde.

³⁹ Unter Verwendung unterschiedlicher Bewertungsalgorithmen (vgl. Gleichung 5-2) lassen sich zahlreiche **gleichwertige** Karten berechnen, von denen aber **keine** in der Lage ist in **allen** Bereichen plausible Ergebnisse zu liefern.

Die unter Punkt (1) und (2) genannten Probleme können nur zufriedenstellend gelöst werden, wenn die Tiefenlage und Mächtigkeit von Schichten mit in die Bewertung einbezogen wird, wozu aber die geologische Karte als Bewertungsgrundlage nicht ausreicht. Hier ist es unumgänglich, ein dreidimensionales Untergrundmodell miteinzubeziehen (Kap. 7.2.1).

Zur Lösung des Problems (3) ist es u.U. günstiger, auf die direkte Einbeziehung des Grundwasserflurabstandes zu verzichten und statt dessen eine kombinierte Bewertung vorzunehmen, bei der in einem ersten Schritt nur Lithologie und Verwerfungsdichte bewertet werden. In einer zweiten oder überlagerten Karte kann dann darauf hingewiesen werden, in welchen Gebieten wegen der geringen Grundwasserflurabstände (möglicherweise) Probleme zu erwarten sind. Dann kann das Bewertungsergebnis allerdings nicht mehr direkt vom Benutzer aus einer Karte abgelesen werden, sondern muß von ihm erst durch selbstständigen Vergleich der Karten ermittelt werden.

Bessere Ergebnisse bezüglich (3) können erwartet werden, wenn der Grundwasserflurabstand über folgenden Bedingungen eingeführt wird:

- ◆ **wenn** Schicht undurchlässig **dann** geringer Grundwasserflurabstand günstig.
- ◆ **wenn** Schicht durchlässig **und** Verwerfungsdichte hoch **dann** geringer Grundwasserflurabstand ungünstig.

Dies läßt sich aber auf der Basis der in diesem Kapitel vorgestellten einfachen zweidimensionalen Bewertungsverfahren nicht realisieren. Abfragen dieses Typs erfordern eine Einbeziehung der dritten Dimension und ein deutlich anspruchsvolleres Bewertungskonzept. Auf solche Verfahren wird in den Kapiteln 7 und 8 ausführlich eingegangen.

Zuletzt bestehen die Defizite einer wie im obigen Beispiel erzeugten Bewertungskarte auch in der geringen Detailgenauigkeit der verwendeten Datengrundlage. Bessere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn als Grundlage statt der GÜK200 die GK25 eingesetzt würde. Auf den Arbeitsaufwand, der hierfür zu leisten wäre, wird in Kap. 7.1 eingegangen.

5.2.3.5 Erdsondenwärmespeicherung in Unterfranken - Fazit

In Unterfranken bestehen in vielen Bereichen mittlere bis gute Voraussetzungen für die Speicherung mit vertikalen Erdsonden. Die Ausweisung von geeigneten und ungeeigneten Gebieten kann aber jeweils nur unter Vorbehalt erfolgen. In jedem Fall muß die lokale Situation vor Ort im Einzelfall geprüft werden. Erste „reale“ Ergebnisse sind in Kürze von Feldversuchen am Standort Greußenheim zu erwarten (BÜTTNER ET AL., 1998; DRACH ET AL., 2000).

5.2.4 Andere Speicherverfahren

Aus Gründen der Vollständigkeit werden hier die weiteren Verfahren der Untergrundspeicherung erwähnt. Die **Kavernenspeicherung** scheidet in Unterfranken vollkommen als Speicherverfahren aus, da es nach Erkenntnis des Autors keine hierfür geeigneten technisch-geologischen Voraussetzungen (bestehende Hohlräume) gibt. **Speichertanks**, die ganz oder teilweise im Untergrund versenkt werden, können mit Sicherheit an vielen Standorten realisiert werden. Gleiches gilt für Beckenspeicher. Weniger günstig scheinen für solche Vorhaben Bereiche im Maintal mit geringen Grundwasserflurabständen, da hier bautechnische Schwierigkeiten zu erwarten sind. Ebenso ungünstig sind Bereiche mit geringer Boden- bzw. Lockergesteinsbedeckung auf Fels, da auch hier die baulichen Maßnahmen erschwert sind. Gut geeignet sind dagegen Gebiete mit mächtiger Lößauflage oder die grundwasserfreien Hochterrassen im Maintal. Dort kann zudem mit extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten des Untergrunds, also zusätzlichen isolierenden Eigenschaften gerechnet werden.

5.3 Anwendbarkeit der Wärmeentzugsverfahren in Unterfranken

5.3.1 Vertikale Erdsonden

Bei der Beurteilung der Eignung für den Wärmeentzug mit vertikalen Erdsonden (EWS) gibt es, was die Anforderungen an den geologischen Untergrund anbelangt, wegen der gleichen Bauweise der Wärmetauscher viele Gemeinsamkeiten mit der ESWSp. Der grundlegende Unterschied besteht in der gänzlich anderen Bedeutung von bewegtem Grundwasser. Das Vorhandensein von Grundwasser ist bei den EWS grundsätzlich positiv zu bewerten, zusätzliche Vorteile ergeben sich, wenn es in Bewegung ist (Kap. 3.2.1.2.3). Zudem besteht für die Eignung beim Entzug mit Erdsonden eine annähernd lineare positive Korrelation mit der Höhe der Wärmeleitfähigkeit, die bei der Speicherung so nicht vorliegt. Insgesamt gelingt dadurch die Beurteilung der Eignung von Gesteinen für Erdwärmesonden deutlich leichter als bei der ESWSp.

Betrachtet man ausschließlich die geologischen Eigenschaften des Untergrunds, ohne ihre Auswirkungen auf rechtliche Aspekte miteinzubeziehen, so läßt sich die pauschale Aussage treffen, daß Erdsonden-Wärmepumpenanlagen in Unterfranken fast überall errichtet werden können. Ausgeschlossen von der Nutzung sind stark verkarstete Bereiche, da es hier zu unlösbaren technischen Problemen beim Einbau und Betrieb der Sonden kommen kann sowie Bereiche mit mächtigen, grundwasserfreien grobkörnigen Lockergesteinen.

5.3.1.1 Festlegung eines Eignungsgrades nach lithologischen Kriterien

Der „Eignungsgrad“ geologischer Einheiten für den Einsatz von EWS wird i.W. von vier Faktoren bestimmt. Die Auflistung erfolgt mit absteigender Wertigkeit:

1. **Hydrophysikalische Parameter/Wasserführung:** Gesättigte/ungesättigte Verhältnisse, Durchlässigkeit, Porosität und Grundwasserfließgeschwindigkeit. Wassersättigung erhöht i. A. die Wärmeleitfähigkeit und damit die spezifische Entzugsleistung, Grundwasserfließbewegung erhöht die spezifische Entzugsarbeit.
2. **Wärmeleitfähigkeit des Gesteins:** Die spezifische Entzugsleistung steigt direkt proportional zur Wärmeleitfähigkeit an.
3. **Temperatur des umgebenden Untergrundes:** Die Höhe der Wärmequellentemperatur ist grundsätzlich entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe.
4. **Bohrbarkeit des Gesteins:** Wesentlicher Kostenfaktor.

Die Ermittlung der Eignung von Gesteinseinheiten und Bereichen (Eignungskarte) erfolgt weitgehend analog wie für die ESWSp beschrieben (Kap. 5.2.3). Es gelten allerdings andere Kriterien bzw. Gewichtungen dieser Kriterien (vgl. Tabelle 5-3).

5.3.1.2 Einfluß von Grundwasser auf die Eignung

Vorhandenes Grundwasser ist grundsätzlich positiv zu bewerten⁴⁰. Bewegtes Grundwasser führt zu einem schnelleren Ausgleich des Wärmedefizits und damit zu einer höheren möglichen spezifischen Entzugsarbeit. Bezüglich des Vorkommens von Grundwasser können die in Abbildung 5-2 dargestellten Ergebnisse bzw. die Klassifikation nach Tabelle 5-3 übernommen werden. Ein interessanter Aspekt für das Nachfragepotential der Erdsonden (Kap. 6.2.3.1.1) ergibt sich daraus, daß ein Großteil der aufgrund der Grundwasserverfügbarkeit gut geeigneten Gebiete (geringer Grundwasserflurabstand), dicht besiedelt ist. Gleichzeitig muß aber bedacht werden, daß es gerade wegen der hohen Grundwasserverfügbarkeit zu Konflikten mit Trinkwassererschließungen kommen kann.

⁴⁰ *Rechtliche Aspekte unberücksichtigt!*

5.3.1.3 Bewertung der lithologischen Einheiten

Zur Bewertung von Gesteinseinheiten für die EWS werden die in Tabelle 5-2 aufgeführten Bewertungseinheiten übernommen. Prinzipiell gelten viele der im Kap. 5.2.3.2 gemachten Angaben zur EWSp auch für die EWS (z.B. im Bezug auf Verkarstung, Grundwasserführung und Bohrbarkeit), so daß nicht alle diese Aspekte nochmals wiederholt werden. Bewertungszahlen für einzelne Horizonte sind Tabelle 5-3 zu entnehmen.

Die Gesteine der **Tonsiltstein-Gruppe** weisen relativ niedrige Wärmeleitfähigkeiten auf. Da sie zudem weitgehend undurchlässig sind und keine Grundwasserbewegungen zulassen, sind sie für den Wärmeentzug mäßig gut geeignet. Zudem sind sie bezüglich der Bohrbarkeit weniger günstig zu bewerten. Ein positiver Aspekt, der in die geologische Bewertung aber nicht direkt eingehen kann, ist, daß die geringdurchlässigen Gesteine keine Schwierigkeiten bezüglich der Genehmigung erwarten lassen.

Kalksteine und Kalkmergelwechselfolgen: Bei den vorwiegend karbonatischen Gesteinen des Muschelkalk sind die mittlere Wärmeleitfähigkeit und die gute Bohrbarkeit als positive Aspekte zu nennen. In gut geklüfteten Bereichen sind unterhalb der Grundwasseroberfläche Wasserwegsamkeiten möglich, aber nicht garantiert. Ungünstig, wegen technischer Probleme, sind verkarstete Bereiche. Gesteine dieses Typs erhalten insgesamt mittlere bis gute Bewertungen.

Vorwiegend **mergelige Gesteine** des *mm* sind wegen der Verkarstungsanfälligkeit und der schlechten Bohrbarkeit ungünstig bis ungeeignet. Erfahrungen, die in benachbarten Gebieten in Baden Württemberg gemacht wurden zeigen, daß das Einbringen von Erdwärmesonden im *mm* fast immer problematisch ist.

Sandsteine weisen aufgrund des hohen Quarzgehalts hohe bis sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten auf. Die potentielle Wasserwegsamkeit und mögliche Grundwasserbewegungen sowie günstige Bohreigenschaften tragen weiterhin zu einer guten Gesamtbewertung bei. Sie werden deshalb generell als gut bis sehr gut eingestuft. Ausschlaggebend sind hierbei die thermischen Eigenschaften.

In den Sandstein-Siltstein-Wechselfolgen sind die Bedingungen ähnlich, sie werden deshalb bezüglich der Bewertung den Sandsteinen gleichgestellt.

Wechselfolgen bzw. heterogen aufgebaute Einheiten wie der *ku* können nur schlecht pauschal beurteilt werden, da ihre Wasserführung, thermische Eigenschaften und Bohrbarkeit sehr wechselhaft sind.

Gesteine des **Kristallin** weisen relativ hohe Wärmeleitfähigkeiten auf. Hervorzuheben sind Gesteine der Quarzitserien, bei denen mit enorm hohen Wärmeleitfähigkeiten zu rechnen ist. Die Niederbringung von Bohrungen ist meist unproblematisch, allerdings zeitaufwendiger als in anderen Gesteinen. Probleme können dort auftreten, wo mächtige instabile Zersatzzonen ausgebildet sind. Insgesamt sind die kristallinen Gesteine in Unterfranken gut für die EWS geeignet.

Andere Gesteine: Die quartären Lockersedimente des Maintals weisen für eine Nutzung mit Erdsonden fast durchwegs zu geringe Mächtigkeiten auf. In grundwasserfreien Bereichen sind die Wärmeleitfähigkeiten zudem sehr gering, so daß eine wirtschaftliche Nutzung unmöglich ist. Es dürfte aus genehmigungsrechtlichen Gründen meist auch problematisch sein das Quartär und darunterliegende Festgesteinseinheiten mit tieferreichenden Bohrungen gemeinsam zu nutzen. Die Eignung von Basalten, Tuffen und tertiären Sedimenten für die Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes wurde bereits in den betreffenden Kapiteln der geologischen Beschreibung diskutiert.

5.3.1.4 Erstellung einer Karte der für die EWS geeigneten Gebiete

Aus den in Kap. 5.3.1 eingangs angeführten Gründen ist die Erstellung einer Karte der für den Entzug mit Erdsonden geeigneten Gebiete einfacher und führt auch zu aussagekräftigeren Ergebnissen als im Fall der EWSp. Auch hier gilt aber, daß eine zweidimensionale Betrachtung nur zu einer groben Übersichtskarte führen kann. Für die Berechnung der Bewertungskarte wurde die in Gleichung 5-3 Beziehung herangezogen. Parameter, Randbedingungen und Einschränkungen gelten wie in Kap. 5.2.3.4 angegeben.

$$[\text{Eignung_EWS}] = ([\text{GK200}] * \text{gk} + (7 - [\text{GW_FLUR}]) * \text{gf}) / (\text{gk} + \text{gf})$$

Gleichung 5-3

mit den Gewichtungsfaktoren: $\text{gk}=4$; $\text{gf} = 1$

Die Verwerfungsdichte ist im Falle der EWS kein geeignetes Bewertungskriterium. Sie kann, je nach Ausprägung, sehr unterschiedliche Auswirkungen haben. Günstig ist, wenn sie eine verstärkte Grundwasserführung hervorruft, ungünstig ist, wenn die Bohrbarkeit verschlechtert wird.

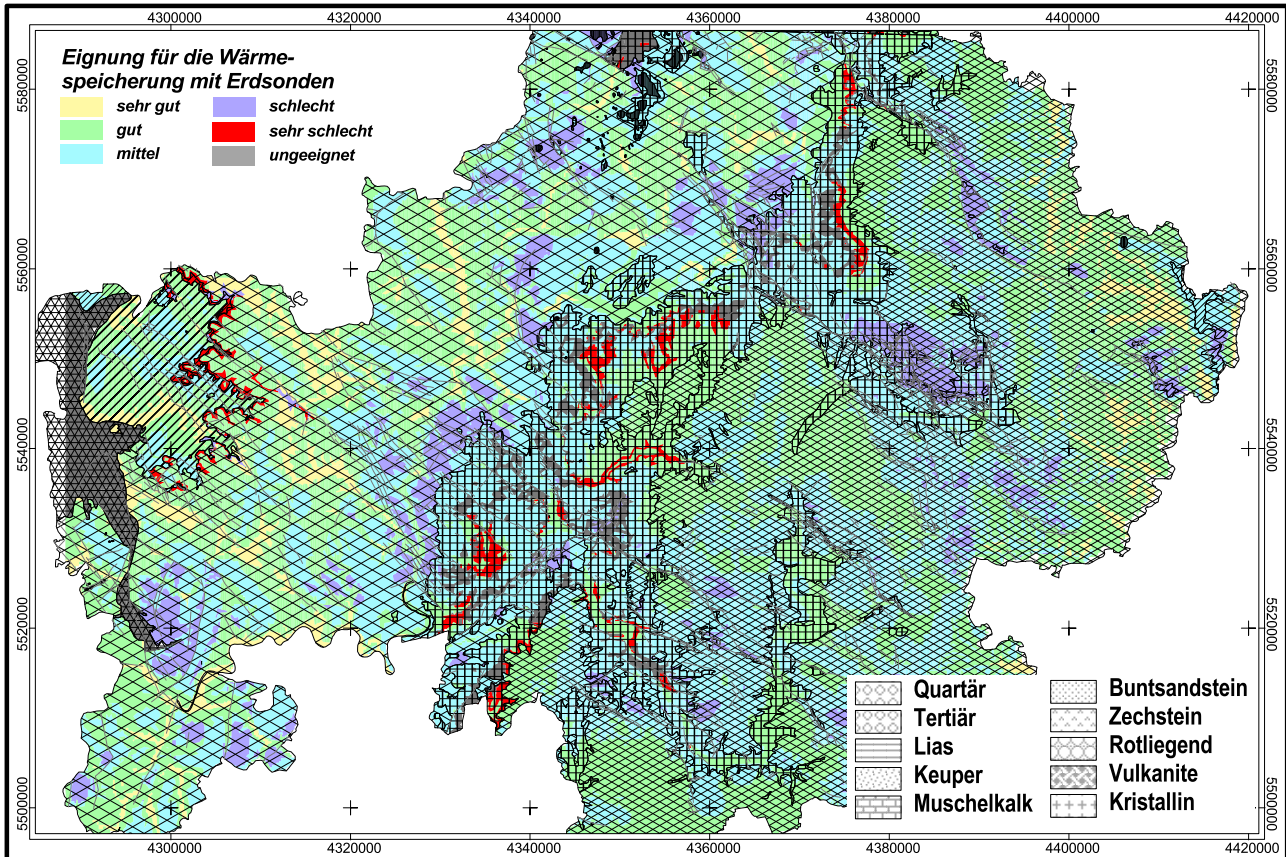


Abbildung 5-4: Beispiel für eine Übersichtskarte der für die EWS geeigneten Gebiete, erstellt unter Einbeziehung der lithologischen Verhältnisse an der Oberfläche und des Grundwasserflurabstandes anhand Gleichung 5-3.

5.3.1.5 Erdwärmesonden in Unterfranken - Fazit

Wie der (nur mit Einschränkungen gültigen; vgl. auch Kap. 5.2.3.4) Eignungskarte in Abbildung 5-4 zu entnehmen ist, sind viele Gebiete in Unterfranken gut für den Wärmeentzug mit vertikalen Erdsonden geeignet. Gebiete die tatsächlich ungeeignet sind, treten nur in geringem Umfang auf. Damit stellt die EWS die Form der thermische Nutzung des Untergrundes dar, die im Bereich Unterfranken das größte technische (geologische) Erzeugungspotential (definiert nach KALTSCHMITT ET AL., 1999; vgl. auch Kap. 6.2.3.1.1) aufweist. Diesem steht prinzipiell ein großes Nachfragepotential gegenüber, weswegen das Nutzungspotential dieser Technik insgesamt hoch ist. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, daß gleichzeitig ein hohes Konfliktpotential mit anderen Nutzungen, insbesondere mit der Trinkwassergewinnung, besteht.

5.3.2 Grundwassergekoppelte Wärmepumpen (GWWP)

Nach Kap. 3.2.1.1 sind für den Betrieb einer GWWP mindestens zwei Brunnen mit einer Förder- bzw. Reinjektionsrate von mehr als 0,5l/s erforderlich. Dabei sollte der Grundwasserleiter aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu tief liegen, wobei die maximale Tiefe auch von der Anlagengröße abhängt (Kap. 3.2.1.1). Setzt man als maximal vertretbare Bohrtiefe eine Teufe von 50m an (für kleine bis mittlere Anlage mit Leistungen 10 bis 50kW_{th}), so lassen sich die prinzipiell für GWWP geeigneten Flächen in Unterfranken bereits auf die in Abbildung 5-2 dargestellten Flächen festlegen, wobei „geeignet“ und „ungeeignet“ jeweils zu vertauschen sind. Die oben angeführten Entnahmemengen von 0,5l/s und mehr sind in einer Vielzahl der im

Untersuchungsgebiet vorhandenen Grundwasser- und Teilgrundwasserleiter **theoretisch** erzielbar. Im Folgenden wird diskutiert, welche Aquifere sich für eine entsprechende Nutzung tatsächlich eignen.

5.3.2.1 Kluft- und Karstaquifere der Trias)

In den Festgesteinsaquiferen Unterfrankens sind die hydraulischen Parameter so ungleichmäßig verteilt, daß nur in Sonderfällen eine Garantie für eine ausreichende Schüttung bei vertretbarer Bohrtiefe besteht. Ein hoher Vorerkundungsaufwand sowie Probebohrungen sind im Festgestein unerlässlich, wobei ein hohes Risiko besteht, daß die dafür aufgebrauchten Aufwendungen verloren sind. Weiterhin besteht bei thermischen Nutzungen mit offenen Systemen in Festgesteinsaquiferen grundsätzlich ein Konfliktpotential mit der Wasserwirtschaft. Vor dem Hintergrund der unregelmäßig verteilten hydrogeologischen Parameter und der unsicheren rechtlichen Situation ist es nicht sinnvoll, für die Festgesteinsaquifere in Unterfranken eine detaillierte, flächenhaft angelegte Bewertungsanalyse durchzuführen. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die geologischen und rechtlichen Verhältnisse nur in seltenen Fällen den Betrieb einer GWWP erlauben.

5.3.2.2 Mainquartär

Lockergesteins- bzw. Porengrundwasserleiter kommen in Unterfranken nur als quartäre (tertiäre) Talfüllungen in den Talauen des Mains (Mainquartär) und seiner größeren Nebenflüsse vor. Bezüglich der geforderten Schüttungsleistung ist das Mainquartär nahezu überall für den Einsatz von GWWP geeignet. Differenzierungen bezüglich der Eignung von unterschiedlichen Bereichen des Maintals können vorgenommen werden nach:

- Grundwassermächtigkeit und –flurabstand,
- Grundwasserqualität und Grundwasserchemismus,
- Grundwassertemperatur,
- Breite und Morphologie der Talaue und
- Verteilung der sedimentpetrographischen und hydrophysikalischen Parameter.

Wegen der dichten Besiedlung und der intensiven wasserwirtschaftlichen Nutzung des Mainquartärs ist es nicht sinnvoll, in diesem Bereich ausschließlich geologische bzw. naturräumliche Bewertungsfaktoren zu betrachten. Gebiete, die eine besonders gute Eignung für GWWP aufweisen, sind naturgemäß auch für die Wassererschließung gut geeignet, da die Anforderungen an Brunnen zur Trinkwassergewinnung und solchen zur thermischen Nutzung nahezu identisch sind. Hier besteht ein Konfliktpotential, das in jedem Fall berücksichtigt werden sollte. Mehr oder weniger ausgeschlossen von der Nutzung sind auch Gebiete, in denen eine hohe Besiedlungsdichte vorliegt (Stadtgebiete mit geringem Flächenangebot), da hier die Errichtung von Brunnen meist Schwierigkeiten bereitet.

Die oben genannten Aspekte zur differenzierten Bewertung der Verhältnisse im Maintal werden im Folgenden behandelt. Wegen der großen Vielfalt der geologischen und anderer naturräumlicher Phänomene im Maintal ist es nicht möglich, hier alle Bereiche im Detail anzusprechen. Die Behandlung der geologischen Parameter erfolgt, wenn nicht ausdrücklich erwähnt, unabhängig von den geologischen Verhältnissen des umgebenden bzw. unterlagernden Festgesteinsrahmens.

Grundwassermächtigkeit und –flurabstand: Wie in der geologischen Beschreibung (Kap. 4.3.8.5.1) ausgeführt, variiert die Grundwassermächtigkeit im regionalen und lokalen Maßstab so stark, daß es nicht möglich ist, diese Eigenschaft pauschal zu charakterisieren. Angaben zu den einzelnen Abschnitten sind den entsprechenden Kapiteln zu entnehmen (Kap. 4.3.8.7). Der Grundwasserflurabstand ist für GWWP in zweierlei Hinsicht bedeutsam: Zum einen bestimmt er die notwendige Tiefe der Brunnen, zum anderen das Maß, in dem die Grundwassertemperatur durch saisonale Temperaturschwankungen der Außentemperatur beeinflusst wird (Kap. 2.3.2.4.1). Im Bezug auf Grundwasserflurabstand und Grundwassermächtigkeit ist auch zu berücksichtigen, daß in der Mainaue saisonale Pegelstandsänderungen von maximal $\pm 2\text{m}$ auftreten. Es ist

Es ist aber davon auszugehen, daß in den Zeiten des höchsten Wärmebedarfs die Grundwasserstände hoch sind. Ungünstig wirken sich allerdings niedrige sommerliche Pegelstände aus, wenn Grundwasser zur Kühlung eingesetzt werden soll. Zuletzt muß im Zusammenhang mit der Grundwassermächtigkeit beachtet werden, daß häufig keine deutliche Trennung zwischen dem quartären und dem triassischen Aquifer im Liegenden besteht. Die erschließbare Grundwassermenge ist dann letztlich wesentlich höher als dies durch die Grundwassermächtigkeit im Quartär nahegelegt wird. Während bei Anlagen für die Trinkwasserversorgung der Aquifer im Liegenden häufig miterschlossen werden kann, können in einem solchen Fall bei Grundwasserentnahmen zu Zwecken der thermischen Nutzung genehmigungsrechtliche Probleme auftreten (vgl. Kap. 3.6).

Die **Breite der Talau**e bestimmt das Flächenangebot. Da wegen des Risikos thermischer und hydraulischer Beeinflussung nicht beliebig viele GWWP pro Fläche errichtet werden können, ist dieser Parameter entscheidend für das technische Angebotspotential. Das Flächenangebot kann allerdings letztlich nicht als „geologisches“ Bewertungskriterium herangezogen werden, da ein Standort mit guten hydrogeologischen Eigenschaften seine Qualität nicht verliert, nur weil die Zahl der Anlagen, die in seiner Nachbarschaft errichtet werden kann, gering ist. Das Flächenangebot gehört damit zu denjenigen Faktoren, deren Bedeutung von der Zielsetzung der Bewertungsanalyse abhängig sind. Auf entsprechende Fragestellungen wird in Kap. 6.4.2.2.2 eingegangen.

Sedimentpetrographische Parameter: Die für Grundwasserentnahmen bedeutsamen Größen Durchlässigkeit und nutzbare Porosität variieren im Mainquartär (regional) in vergleichsweise geringen Bandbreiten, so daß diesbezüglich keine besonders guten oder schlechten Bedingungen in bestimmten Maintalabschnitten zu erwarten sind. Mittelwerte werden mit $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s für den k_f -Wert und 15% für n_e angesetzt. Diese Werte sind für den Betrieb von GWWP als äußerst günstig zu bezeichnen.

Grundwassertemperatur: Die Effizienz einer Wärmepumpe (Kap. 2.2.1.2) ist im hohem Maß von der Temperatur der Wärmequelle abhängig. Bei GWWP im flachliegenden Mainquartäraquifer sind diesbezüglich drei Faktoren zu beachten:

- Die **Jahresmitteltemperatur** des Grundwassers: Diese wird fast ausschließlich durch die Jahresmitteltemperatur der Luft bestimmt. Es bestehen deshalb nur geringe Unterschiede zwischen den etwa 230m hoch gelegenen Bereichen im Osten Unterfrankens und den etwa 100-120m hoch gelegenen Bereichen im Aschaffener Raum (vgl. Abbildung 4-32), so daß diesem Faktor nur wenig Bedeutung zukommt.
- **Passive saisonale Temperaturschwankungen** infolge des Eindringens der saisonalen Temperaturwelle (Kap. 2.3.2.4.1): Da die Grundwasserflurabstände in Bereichen mit ausreichender Grundwassermächtigkeit (i.A. mainnahe Talbereiche) gering sind, machen sich diese deutlich bemerkbar. Im mainnahen Bereich tritt zudem bei hohem Wasserstand (im Winter) Mainwasser in die Aue über, das eine sehr starke Korrelation zur Lufttemperatur zeigt. Der Verlauf natürlicher saisonaler Temperaturschwankungen im Maintal wird beispielhaft durch Abbildung 4-19 dokumentiert.
- Durch Grundwasserentnahmen hervorgerufene **aktive Uferfiltration**: Durch das Absenken der Grundwasseroberfläche beim Betrieb einer GWWP wird, sofern der Entnahmetrichter bis zum Main reicht, relativ wärmeres (Sommer) oder kälteres (Winter) Mainwasser in die Aue bewegt.

Da der letzte Punkt von besondere Bedeutung für den Betrieb von GWWP in Mainnähe ist, werden hier kurz Ergebnisse einer Untersuchung von KANZ (1977, 1978) vorgestellt, die an der Uferfiltrationsanlage Karlstadt durchgeführt wurden und interessante Rückschlüsse zulassen. Abbildung 5-5 zeigt einen hydrogeologischen Schnitt sowie den Temperaturgang an Brunnen und Pegeln der Anlage. Durch die Förderung von ca. 5l/s in einem Brunnen in 150m Entfernung zum Main werden hier erhebliche Mengen Mainwasser in die Talau gepumpt. Ein Pegel, der ca. 50m vom Mainufer entfernt ist, zeigt dadurch saisonale Temperaturschwankungen von $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ bei einer Phasenverschiebung von ca. zwei Monaten.

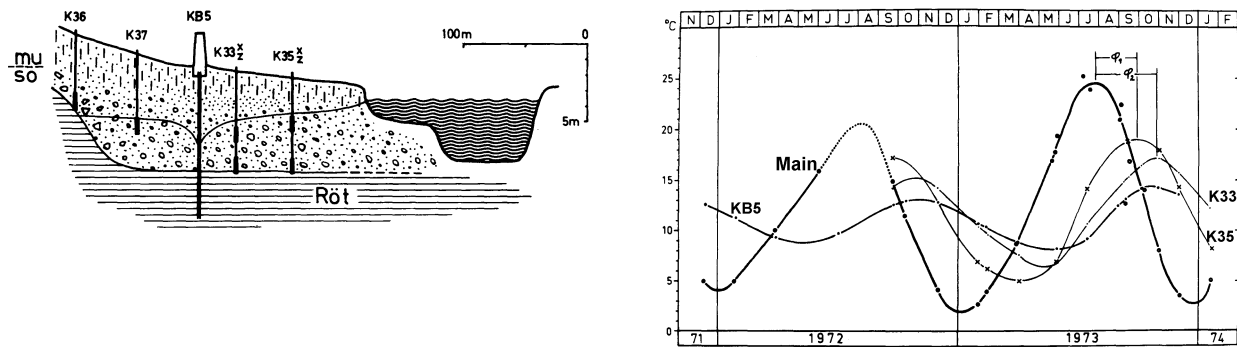


Abbildung 5-5: Hydrogeologische Situation und Temperaturgang im Bereich der Uferfiltrationsanlage Karlstadt. Aus KANZ (1977).

Aus Abbildung 5-5 wird ersichtlich, daß die Amplituden der Temperaturschwankung immer größer, die Phasenverschiebungen immer kleiner werden, je näher der Pegel am Main liegt. Noch drastischere Effekte wären zu erwarten, wenn in unmittelbarer Mainnähe gepumpt würde. GWWP in Mainnähe sind deshalb sehr ungünstig, weil gerade zur Zeit des höchsten Wärmebedarfs besonders kaltes Uferfiltrat gewonnen würde. Es bestehen allerdings auch Bedingungen, wo der Main so gut abgedichtet ist, daß es auch in unmittelbarer Mainnähe nicht zu nennenswerter Uferfiltration kommen kann.

In weiter vom Main entfernten Bereichen ist der saisonale Temperaturverlauf des Grundwassers in der Mainaue für die Wärmeengewinnung günstiger. Bei hoher mittlerer Temperatur (um 12°C) sind die Maxima im Grundwasser aufgrund der Tiefenlage des Grundwassers (3-10m) um etwa 2,5 Monate phasenverschoben, so daß zu Beginn der Heizperiode sehr gute, zu Zeiten des höchsten Wärmebedarfs (Jan/Feb) immerhin noch gute Temperaturbedingungen herrschen. Erst gegen Ende der Heizperiode verschlechtern sich die Bedingungen (vgl. dazu Abbildung 4-19).

Der Einfluß der **Wasserqualität** auf den Betrieb von GWWP wurde in Kap. 3.2.1.1 erläutert. Hoch mineralisierte Wässer sind wegen möglicher Ausfällungen besonders ungünstig. Damit sind Bereiche im Maintal, in denen der Grundwasserchemismus vorwiegend durch Muschelkalkgerölle und Zutritte von Grundwasser aus dem Muschelkalk bestimmt werden, weniger gut geeignet. Ebenso kritisch sind Bereiche, in denen saline Wässer aus dem Unteren und Mittleren Keuper in die Mainaue eintreten. Unproblematisch sind dagegen die Verhältnisse im Bereich des Buntsandstein-Spessart und im Aschaffener Becken, wo die Wässer im Quartär meist relativ weich sind.

5.3.2.2.1 Abschätzung möglicher Grundwasserentnahmemengen aus dem Mainquartär

Unter Verwendung einfacher Berechnungen nach Kap. 3.2.1.2.3 ist es möglich abzuschätzen, inwieweit die geologischen Randbedingungen im Maintal den Betrieb von Grundwasserwärmepumpen möglich machen. Zur Ermittlung der Grenzen der Anwendbarkeit wurde eine Parametervariation innerhalb der im Maintal vorherrschenden Wertebereiche für Grundwassermächtigkeit und Durchlässigkeitsbeiwerte durchgeführt. Anhand der Gleichungen 3-10 bis 3-14 wurde für **Grundwassermächtigkeiten** von 3, 6 und 12m, bei **k_f -Werten** von $1 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, die Absenkung und die Reichweite des Entnahmetrichters bei **Entnahmel Leistungen** von 0,5, 1 und 5l/s (entsprechend einer WP-Leistung von ca. 6, 12 und 60KW) bestimmt. Die Entnahmemengen bzw. Wärmepumpenleistungen stellen Werte dar, die bei einer konservativen Abschätzung dem mittleren Wärmebedarf eines Ein- bzw. Mehrfamilienhaus oder eines kleineren Gewerbeobjekt entsprechen. Die Berechnungen erfolgen unter der Annahme, daß die Entnahmen kontinuierlich stattfinden, so daß stationäre Bedingungen vorliegen.

Die Grenzen der Anwendbarkeit von GWWP im Maintal werden nach folgenden Gesichtspunkten festgelegt:

- Zur Vermeidung thermischer und hydraulischer Kurzschlüsse soll ausgeschlossen werden, daß sich Schluck- und Entnahmefrühen von derselben, bzw. von benachbarten GWWP-Anlagen gegenseitig hydraulisch und thermisch beeinflussen.
- Um den Einfluß (des in der Heizperiode stark abgekühlten) Uferfiltrats zu verhindern wird festgelegt, daß der Entnahmefrühen das Mainufer nicht erreichen soll.
- Absenkungsbeträge im Brunnen sollten nicht mehr als etwa die Hälfte der Grundwassermächtigkeit betragen.

Die durchgeführten Berechnungen erfolgen unter den beiden folgenden Einschränkungen:

- Es wird von konstanten Grundwassertemperaturen ausgegangen (10°C).
- Mögliche Zuströme aus dem Liegenden werden nicht berücksichtigt.

Da diese beiden Einschränkungen die Aussagekraft der hier angestellten Berechnungen deutlich limitieren, wurde auf die Anwendung numerischer Verfahren zur Bestimmung der Absenkung und der Reichweite des Entnahmefrühen verzichtet. Eine einfache Abschätzung liefert gleichwertige Ergebnisse und erlaubt eine übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse der Parametervariationen.

Tabelle 5-4 zeigt, daß bei durchschnittlichen Verhältnissen im Maintal (Grundwassermächtigkeit 6m, $k_f = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$) der Betrieb zahlreicher kleiner GWWP-Anlagen (Entnahme 0,5l/s) auch in relativer Mainnähe (ab 10-20m Entfernung vom Ufer) möglich ist. Thermische und hydraulische Einflüsse auf benachbarte Brunnen können im Mittel so gering gehalten werden, daß eine Anlage pro Grundstückseinheit (1000m² + Sicherheitszuschlag) realisierbar ist.

Bei Anlagen mittlerer Größe ($Q > 5 \text{l/s}$) erhöht sich der Platzbedarf bereits deutlich auf etwa 1ha, ebenso sollte eine Mindestentfernung zum Main von etwa 50m eingehalten werden (vgl. auch Abbildung 5-5). Deshalb ist der Betrieb solcher und größerer Anlagen bei Durchschnittsbedingungen zumindest in Bereichen mit schmaler Maintalaue nicht mehr problemlos möglich.

In Bereichen, in denen die Grundwassermächtigkeit nur 3m beträgt, stößt die Nutzung des Grundwassers schnell an ihre Grenzen. Nur bei überdurchschnittlichen Durchlässigkeiten kann hier noch eine höhere Anlagendichte realisiert werden. Große Anlagen sind nicht möglich.

Bei Grundwassermächtigkeiten unter drei Meter ist ein störungsfreier Betrieb von Grundwasserwärmepumpen, auch vor dem Hintergrund von Pegelschwankungen von bis zu 2m, nur noch bei sehr guten Durchlässigkeiten in Einzelfällen durchführbar.

In Bereichen mit Grundwassermächtigkeiten von 12m und mehr sind mehrere kleine Anlagen auch bei schlechten Durchlässigkeiten auf engem Raum realisierbar. Bei guten Durchlässigkeiten sind auch größere Anlagen in nicht zu kleinem Abstand möglich.

k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [cm]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]
1.E-04	0.5	3	n.m.	n.m.	1.E-04	1	3	n.m.	n.m.	1.E-04	5	3	n.m.	n.m.
5.E-04	0.5	3	0.35	24	5.E-04	1	3	0.76	51	5.E-04	5	3	n.m.	n.m.
1.3E-03	0.5	3	0.13	14	1.3E-03	1	3	0.27	29	1.3E-03	5	3	1.86	201
5.E-03	0.5	3	0.03	7	5.E-03	1	3	0.07	14	5.E-03	5	3	0.35	75
1.E-02	0.5	3	0.02	5	1.E-02	1	3	0.03	10	1.E-02	5	3	0.17	51
k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]
1.E-04	0.5	6	0.90	27	1.E-04	1	6	2.00	60	1.E-04	5	6	n.m.	n.m.
5.E-04	0.5	6	0.17	11	5.E-04	1	6	0.34	23	5.E-04	5	6	2.00	134
1.3E-03	0.5	6	0.06	7	1.3E-03	1	6	0.13	14	1.3E-03	5	6	0.68	73
5.E-03	0.5	6	0.02	4	5.E-03	1	6	0.03	7	5.E-03	5	6	0.17	36
1.E-02	0.5	6	0.01	3	1.E-02	1	6	0.02	5	1.E-02	5	6	0.08	25
k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]	k_f [m/s]	Q [l/s]	M [m]	s [m]	R [m]
1.E-04	0.5	12	0.42	13	1.E-04	1	12	0.86	26	1.E-04	5	12	5.37	161
5.E-04	0.5	12	0.08	6	5.E-04	1	12	0.17	11	5.E-04	5	12	0.86	58
1.3E-03	0.5	12	0.03	3	1.3E-03	1	12	0.06	7	1.3E-03	5	12	0.32	35
5.E-03	0.5	12	0.01	2	5.E-03	1	12	0.02	4	5.E-03	5	12	0.08	18
1.E-02	0.5	12	0.00	1	1.E-02	1	12	0.01	3	1.E-02	5	12	0.04	13

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Berechnungen zu möglichen Entnahmemengen und Flächenbedarf für Grundwasserentnahmen mit GWWP im Mainquartär. **Markiert:** $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s, Mittelwert des k_f -Wertes im Mainquartär nach Tabelle 4-12. **Q:** Entnahmemenge; **M:** Grundwassermächtigkeit; **R:** Reichweite des Absenktrichters; **s:** Absenkung; **n.m.:** Absenkung überschreitet Aquifermächtigkeit.

5.3.2.2.2 Nicht-geologische Einflußfaktoren

Im dichtbesiedelten Maintal können Fragen nach der technischen Realisierbarkeit und der Genehmigungsfähigkeit aus einer Bewertungsanalyse nicht ausgeklammert werden, da sie eine enorm hohe Bedeutung haben. Einzelne Gesichtspunkte werden im Folgenden erläutert.

Besiedlungsdichte und Bebauungsstruktur: Beides sind Aspekte, denen bei der Ermittlung von Nutzungs- und Nachfragepotentialen hohe Bedeutung zukommt (vgl. dazu Kap. 6.4.2.2.2 und 6.2.3.1.1). Im Maintal ist die Besiedlungsdichte grundsätzlich hoch, weswegen ein großes Nachfragepotential besteht. Andererseits bedingt das geringe Flächenangebot, daß eine Nutzung des Aquifers zur Wärmegewinnung durch viele Anlagen nicht möglich ist. Gleichzeitig wird der Aquifer gerade auf den besiedelten Flächen häufig anderweitig genutzt (s.u.). In innerstädtischen Bereichen mit dichter Bebauung sind GWWP meist nicht realisierbar.

Trinkwasserschutzgebiete: Das Mainquartär wird intensiv für die Trinkwassergewinnung genutzt. Dementsprechend sind große Bereiche als Wasserschutzgebiete ausgewiesen (Tabelle 5-5). Inwieweit das Gesamtpotential für GWWP durch WSG limitiert wird, kann im Rahmen einer Übersichtsdarstellung nicht ermittelt werden, da im Einzelfall zu berücksichtigen ist, ob das betreffende Schutzgebiet die potentiell nutzbaren Flächen bzw. die Flächen, auf denen ein Nachfragepotential besteht, überhaupt beeinträchtigt (s.o.). Im Allgemeinen ist davon auszugehen, daß Wasserschutzgebiete nicht in die Siedlungsflächen, wo die Errichtung von GWWP-Anlagen vorrangig stattfindet, hineinreichen. Bemerkenswert ist jedenfalls, daß gerade im Untermaingebiet um Aschaffenburg, wo besonders viele Flächen als Schutzgebiete ausgewiesen sind, die derzeit stärkste Nutzung mit GWWP überhaupt vorliegt (Tabelle 5-5, vgl. auch Kap. 4.3.8.7.1; Abbildung 4-22).

Bereich	Gesamtfläche [km ²]	Besiedelte Fläche [km ²]	Besiedelter Anteil [%]	WSG50 [km ²]	WSG50 [%]	WSG5 [km ²]	WSG5 [%]
Aschaffener Becken	122.8	24.1	19.6%	52.0	42.4%	40.1	32.7%
Buntsandstein-Spessart	130.3	29.0	22.2%	16.2	12.4%	11.6	8.9%
Muschelkalk (KA-WI)	65.5	16.1	24.6%	4.8	7.4%	1.9	3.0%
Schweinfurter Becken	42.9	7.8	18.3%	0.3	0.6%	k.A.	k.A.
Muschelkalk (SCHW-HAS)	19.7	1.9	9.6%	5.6	28.5%	k.A.	k.A.
Keuper (HAS-TR)	34.2	3.5	10.2%	1.7	5.0%	k.A.	k.A.

Tabelle 5-5: Flächenanteile von Wasserschutzgebieten im Maintal für die einzelnen Abschnitte (Kap. 4.3.8.7). Die Daten aus dem GISWaWi sind nicht überall direkt miteinander vergleichbar (vgl. dazu Kap. 6.3.6.4.2).

Angaben über aktuelle **Kiesabbauflächen** und über Gebiete, die in Zukunft für den Kiesabbau vorgesehen sind, wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht ausgewertet. Kiesabbau tritt nicht notwendiger Weise mit der thermischen Nutzung in Konflikt, da die Abbauflächen grundsätzlich einen gewissen Abstand zu Siedlungsgebieten haben.

Genauere Daten über die flächenhafte Verbreitung von **Naturschutzgebieten** im Maintal lagen in dieser Untersuchung in digitaler Form nicht vor, so daß keine entsprechende Analyse durchgeführt werden konnte. Die visuelle Beurteilung von Karten, in denen Natur- und Landschaftsschutzgebiete dargestellt sind, zeigt, daß solche Gebiete nur einen enorm geringen Flächenanteil einnehmen, meist in den Talrandlagen bzw. an den Talhängen zu finden sind und selten in die Aue hineinreichen. Ein nennenswertes Konfliktpotential zwischen allgemeinem Naturschutz und Grundwasserwärmepumpen besteht deshalb nicht.

5.3.2.3 Grundwassergekoppelte Wärmepumpen in Unterfranken - Fazit

Nach den bisherigen Ausführungen kann das geologisch-hydrogeologische Potential für GWWP im Maintal als gering bis mäßig günstig beurteilt werden. Positiv zu bewerten sind die generell guten hydrogeologischen Eigenschaften des quartären Aquifers. Ungünstig sind dagegen die bereichsweise zu geringen Grundwassermächtigkeiten, die häufig hoch mineralisierten Grundwässer und das geringe Flächenangebot in der Talau. Zu beachten sind im gesamten Maintal die konkurrierenden Nutzungen, insbesondere die Trinkwassergewinnung, die generell Vorrang genießt. Für die Nutzung mit GWWP kommen deshalb meist nur Gebiete in Frage, die für die Trinkwasserversorgung ungeeignet sind, weil keine Schutzgebiete ausweisbar sind (wegen bestehender Bebauung, Kiesabbau) oder die hygienische Wasserqualität des oberflächennahen Grundwassers ungenügend ist. Berücksichtigt man die vorwiegend negative Beurteilung der Festgesteinsaquifere, so sind damit die geologischen Bedingungen für Wärmepumpenanlagen, die Grundwasser direkt als Wärme- oder Kältequelle nutzen, in Unterfranken **insgesamt** als eher schlecht einzustufen.

5.4 Eignung der Verfahren der thermischen Nutzung in Unterfranken - Zusammenfassung

In Tabelle 5-6 sind die wesentlichen geologischen Einheiten Unterfrankens mit ihren maßgeblichen geologisch-physikalischen Eigenschaften, ihrer Bedeutung im Untersuchungsraum Unterfranken und einer Bewertung ihrer Eignung für die thermische Nutzung des Untergrundes dargestellt. Die dort angegebenen Eigenschaften sind Mittelwerte, die teilweise nur unter sehr groben Vereinfachungen bestimmt werden konnten. Insofern sind die Angaben zur Eignung der einzelnen Einheiten nur als Anhaltswerte zu verstehen. Es muß nochmals betont werden, daß eine allgemeingültige, aussagekräftige Beurteilung im (über-)regionalen Maßstab auf Basis der vorliegenden Datengrundlage (vgl. Kap. 6.3.6.4) nicht möglich ist. Bewertungen, von denen eine höhere Signifikanz zu erwarten ist, erfordern eine ungleich umfangreichere Datenbasis und ein deutlich anspruchsvolleres, auf die Verarbeitung von dreidimensional verteilter Information ausgelegtes Bewertungskonzept. Ein solches Konzept und die dafür erstellte Datengrundlage werden in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellt.

Bezeichnung			Mächtigkeit, Verbreitung, Bedeutung						Geologie, Lithogie			
System, Serie, Abteilung	Bewertungseinheit	Kürzel	Mächtigkeit [m]	Verbreitung		Siedlungsflächen pro geol. Einheit		Bedeutung für die thermische Nutzung in Unterfranken (vgl. Kap. 4.1)	Ausbildung vorwiegend / zusätzlich auch (untergeordnet)	Faziesdifferenzierung / Heterogenität		Bohrbarkeit (1= sehr gut, 6 = sehr schlecht)
				[km ²]	[%]	[km ²]	[%]			regional / lateral	vertikal	
Quartär	Holozän	(Q)	0-4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	unbedeutend	tonig / verschieden	ohne Bedeutung		2
	Löß	(Q)	0-20	2000-3000	25-35	k.A.	k.A.	unbedeutend	siltig-feinsandig			3
	Mainquartär	Q	0-45	237	2.8	55.4	13.2	(sehr) hoch	sandig-kiesig / (tonig)	gering	hoch	2
Tertär sedimentär	Aschaffenburg	T	0-60	0		0		gering	sandig-kiesig (tonig) / verschieden	hoch		3
	Rhön		0-20					unbedeutend	tonig-sandig / tuffitisch			5
Tertär vulkanisch	Tuffe	T	0-200	6	0.1	0		unbedeutend	verschieden	extrem hoch		5
	Basalte		0-100	69	0.8	0.5	0.1					5
Unterer Jura	Unterer Lias	juu	<20	19	0.2	0		unbedeutend	tonig-siltig	gering		6
Oberer Keuper	Rhätolias	koju	30-35	28	0.3	0		unbedeutend	tonig bis sandig	hoch		2-5
Sandsteinkeuper	Feuerletten	kmF	50-80	48	0.6	0.8	0.2	gering	siltig-feinsandig	gering		5
	Burgsandstein	kmB	130-150	340	4	10	2.4		sandig / siltig	gering-mittel		2
	Blasen-Ss.	kmBL	25-40	221	2.6	3.7	0.9		sandig			2
Mittlerer Keuper	Lehrberg-Sch.	kmL	25-35	87	1	2.6	0.6	mittel	tonig / verschieden	mittel	hoch	4
	Schilfsandstein	kmS	8-38 (50)	113	1.3	3.5	0.8		sandig	hoch (Rinnen)	hoch	2
Gipskeuper	Estherien-Sch.	kmE	20-40	116	1.4	2.9	0.7	hoch	siltig-feinsandig	gering		3
	Myophorien-Sch.	kmM	70	469	5.5	21.7	5.2		siltig-feinsandig / Gips (-Karst)	gering		3
Unterer Keuper		ku	35-50	1862	21.8	84	20	mittel	verschieden	sehr hoch		2-4
Oberer Muschelkalk		mo	75-85	883	10.3	62.3	7.5	sehr hoch	kalkig / mergelig-tonig	mittel	mittel	1
Mittlerer Muschelkalk		mm	35-100	328	3.8	23.1	5.5	sehr hoch (negativ)	mergelig / kalkig / evaporitisch; Salinarfazies / Normalfazies	sehr hoch	hoch	4-7
Unterer Muschelkalk		mu	75-90	479	5.6	31.7	7.5	sehr hoch	kalkig / mergelig	sehr gering		1
Oberer Buntsandstein	Obere Röttonne	so4T	30-35	905	10.6	43	10.2	sehr hoch	siltig-feinsandig	sehr gering		4
	Rötquarzit	so3q	5-8						sandig	gering		2
	Untere Röttonne	so3T	8-25						siltig-feinsandig	hoch	gering	4
	Platten-Ss.	so2	10-30						sandig / siltig-feinsandig	mittel	gering	3
Mittlerer Buntsandstein	Solling-F.	smS	3-10(22)	1284	15.1	33.4	8	sehr hoch	sandig / siltig-feinsandig	hoch	gering	
	Hardeggen-F.	smH	55-70						sandig	gering-mittel		
	Dethfurth-F.	smD	30-45 (60)						sandig			
Volpriehausen-F.	smV	70-85						sandig				
Unterer Buntsandstein	Saalmünster-F.	suS	50-60	364	4.3	21	5	hoch	sandig			
	Gelnhausen-F.	suG	150	376	4.4	17.6	4.2		sandig			
(Zechstein)	Bröckelschiefer	suB	40 (0-70)	32	0.4	1.2	0.3	sehr gering	siltig-feinsandig	hoch	gering	6
Zechstein		z	30-300	12	0.1	0.8	0.1	unbedeutend	kalkig / evaporitisch / verschieden	hoch		6

Tabelle 5-6: Übersicht über die relevanten geologischen, hydrogeologischen und thermischen Eigenschaften der wesentlichen Gesteinseinheiten in Unterfranken und ihre Eignung bezüglich der unterschiedlichen Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes (Fortsetzung auf Seite 174).

Bezeichnung		Hydrogeologie (vgl. auch Tabelle 4-15)			Thermische Eigenschaften				Eignung für die thermische Nutzung					
System, Serie, Abteilung	Kürzel	Aquifer		Bedeutung als GW-leiter bzw. -stauer (Deckschicht/ Basis)	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]		vol. Wärmekap. [MJ/m³K]		Wärme-Speicherung			Wärme-Gewinnung		
		ja / nein	Typ		gesättigt	unges.	ges.	ung.	ATES	ESWSp		EWS		GWWP
										ges.	unges.	ges.	unges.	
Quartär	(Q)	nein		verschieden	1.5	0.3-0.5	1.5-3.5	1-1.5	xxx	nein	nein	nein	nein	xxx
	(Q)	nein		verschieden	1.5-2	0.5	2-2.5	1-1.5	xxx	nein	nein	ja (M)	ja (M)	xxx
	Q	ja	Poren	überregional	2-3	0.3-0.5	2.5-3	1.5	nein (?)	nein (??)	nein	3 (M)	6	1
Tertär sedimentär	T	ja / teils	Poren	lokal	1.5-2.5	0.1-1	2.5-3	1.5	nein	3	6	3	6	2
		nein		keine	1-2	0.5			xxx	nein	nein	-	-	xxx
Tertiär vulkanisch	T	nein (teils)	(Poren)	keine	1-3	abzüglich 5 bis 25% des gesättigten Wertes, je nach Porosität bzw. Klüffigkeit und Sättigungsgrad	2.0-2.6		nein	6	6	6	6	xxx
		ja	Kluft		1.5-3				nein	6	6	6	6	6
Unterer Jura	juu	nein		keine	2-2.5			xxx	3	3	3	3-4	xxx	
Oberer Keuper	koju	ja / teils	Kluft-Poren	lokal	2.5-3			nein	(2-)6 (GWFL !)	3	2-3	3	4 (?)	
Sandsteinkeuper	kmF	nein		überregional	2-2.5			xxx	2	3	2-3	3	xxx	
	kmB	ja	Kluft-(Poren)	überregional	2.5-4			nein (?)	(2-)6 (GWFL !)	2	1	1-2	5	
kmBL	ja	überregional		nein (?)		(2-)6 (GWFL !)	2	1	1-2	5				
Mittlerer Keuper	kmL	nein / teils	[Kluft-(Poren)]	lokal	2-2.5			nein	2-3	3-4	2	3	xxx	
	kmS	ja	Kluft-(Poren)	regional	2.5-3.5			nein (?)	(2-)6 (GWFL !)	2	1	1-2	5	
Gipskeuper	kmE	nein		überregional	2-2.5			xxx	2-3	3	2-3	3	xxx	
	kmM	nein		überregional		xxx	2	3	2-3	3	xxx			
Unterer Keuper	ku	ja / teils	(Kluft)	lokal	2-3.5			nein	(2-)6 (GWFL !)	3	2	3	6	
Oberer Muschelkalk	mo	ja / teils	Kluft-(Karst)	regional	1.8-2.4			nein	(1)-6 (GWFL !)	1	2 (6 Karst)	2-3 (6 Karst)	6	
Mittlerer Muschelkalk	mm	ja	Karst-Kluft	überregional	1.5-2.3			nein	6	6	6	6	6	
Unterer Muschelkalk	mu	nein / (teils)	lokal Kluft-Karst	lokal-regional	2-2.5			nein	1-(6) (GWFL !)	1	2 (6 Karst)	2 (6 Karst)	xxx (6)	
Oberer Buntsandstein	so4T	nein		überregional	2-2.5			xxx	2-3	3	2	3	xxx	
	so3q	ja	Kluft	lokal	3.5-4.5			nein	(2-)6 (GWFL !)	3	1 (M)	2(M)	5	
	so3T	nein		überregional	2-2.5			xxx	2-3	3	2	3	xxx	
	so2			lokal-regional	2.5-4			nein	(2-)6 (GWFL !)	2	1	1-2	5	
Mittlerer Buntsandstein	smS	ja	Kluft-(Poren)	überregional										
	smH													
	smD													
smV														
Unterer Buntsandstein	suS			regional	1.5			xxx	2-4	3	2-3	3	xxx	
	suG													
Zechstein	z	ja	Kluft	überregional	1.5-2.5			nein	2-6	2-4	2-6	3-6	6	

Tabelle 5-6, Fortsetzung: Erläuterungen zur Spalte „Eignung für die thermische Nutzung“ – Bewertungsfaktoren: 1 = sehr gut, 6 = sehr schlecht; **xxx**: aus Prinzip nicht möglich; **nein**: theoretisch denkbar, aber in der (unterfränkischen) Praxis nicht möglich; **GWFL !** = Eignung abhängig von der lokalen Grundwasserfließgeschwindigkeit; **M** = Mächtigkeit der Schicht für eine alleinige Nutzung zu gering.

6 Geoinformationssysteme (GIS)

6.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Konzeptionen, Eigenschaften und Methoden von Geoinformationssystemen (GIS) vorgestellt. Wegen der enormen Vielfalt der Möglichkeiten die GIS bieten, beschränkt sich diese Einführung auf einige wenige wesentliche Elemente, die für diese Untersuchung von besonderer Bedeutung sind. Die folgenden Ausführungen beziehen sich vorwiegend auf Angaben aus Lehrbüchern und Gesamtdarstellungen von BARTELME (1995), BERNHARSDEN (1999), BILL (1999a,b), BONHAM-CARTER (1994), DEMERS (1997), LONGLEY ET AL. (1999a,b) und SAURER & BEHR (1997). Als Sammelbände mit Artikeln zu unterschiedlichen GIS-Anwendungen im deutschsprachigen Raum sind z.B. ASCH (1999a), BLASCHKE (1999), BUZIEK (1995a) und STROBEL & DOLLINGER (1999) zu nennen. Eine aktuelle Zusammenstellung von „major GIS textbooks“ geben LONGLEY ET AL. (1999a).

6.1.1 Begriffsdefinition, Einsatzgebiete und Entwicklungen

Was unter dem Begriff „Geoinformationssystem“ zu verstehen ist bzw. was ein GIS leisten soll, wurde schon in zahllosen Definitionen festgehalten. Solche Definitionen sind je nach dem fachspezifischen Blickwinkel des Autors enger oder weiter gefaßt und heben unterschiedliche Aspekte des GIS-Begriffs hervor. Verschiedene Autoren treffen zusätzlich Unterscheidungen zwischen *Geographischen-* und *Geo-Informationssystemen* (IS) oder grenzen den GIS-Begriff weiter von *Raumbezogenen IS*, *Kartographischen IS*, *Fach-IS*, *Umwelt-IS* und anderen Bezeichnungen ab. Die folgende Definition von BILL (1999a) faßt alle wichtigen Merkmale eines GIS zusammen, ohne auf fachspezifische oder anwendungsbezogene Details einzugehen:

*„Ein Geoinformationssystem ist ein rechnergestütztes System, daß aus **Hardware, Software, Daten und Anwendungen** besteht. Mit ihm können **raumbezogene Daten digital erfaßt und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert** sowie numerisch und graphisch **präsentiert** werden.“*

Im Sinne dieser Definition stellen GIS also vor allem spezialisierte Datenbanksysteme dar, deren vorwiegende Aufgabe in der Verarbeitung und Darstellung **raumbezogener** Daten besteht. Stärker hervorgehoben werden sollte vielleicht die Tatsache, daß „Daten“ im Sinne eines Geoinformationssystems auch diejenigen Informationen sind, die die Lage und Geometrie von Objekten innerhalb definierter Bezugssysteme beschreiben. Weiterhin sollte betont werden, daß die graphische Präsentation vor allem auch eine kartenmäßige Darstellung beinhaltet und ebenso, daß die Analyse spezielle Verfahren beinhalten sollte, die andere Verarbeitungsmethoden (CAD-, Datenbank-, Statistiksoftware) nicht zur Verfügung stellen. Zu nennen ist hier beispielsweise die kombinierte geometrische und inhaltliche Verschneidung von Objekten und der daran geknüpften Informationen. Einen Überblick über verschiedene Definitionen für GIS und verwandte Begriffe gibt BARTELME (1995).

Geoinformationssysteme erfahren in den letzten Jahren in den verschiedensten Fachgebieten eine geradezu explosionsartige Verbreitung, was sich beispielsweise auch in der Vielzahl der in jüngster Zeit erschienenen Lehrbücher (s.o.) manifestiert. Gründe sind vor allem in der enormen Verbreitung kostengünstiger Rechner-systeme, deutlich einfacher zu handhabender und zugleich leistungsfähiger Software und einer gestiegenen Verfügbarkeit digitaler Basisdaten zu sehen. Seit schwierig zu bedienende befehlszeilenorientierte Softwareprodukte mehr und mehr durch komfortable „Desktop“-GIS-Anwendungen (LIEBIG, 1999) abgelöst werden, kann GIS auch im Rahmen kleinerer Projekte eingesetzt werden, ohne daß speziell ausgebildetes Fachpersonal vorhanden sein muß.

Der Einsatz von GIS ist bei weitem nicht auf die klassischen „Geo“-Wissenschaften oder kartographische Anwendungen beschränkt, sondern umfaßt ein weites Spektrum, worunter z.B. auch Netzwerk- und Marketinganalysen, Kriminalistik, medizinische Studien uvm. fallen. Sie können praktisch überall dort eingesetzt werden, wo raumbezogene Informationen verarbeitet werden sollen, wobei es unerheblich ist, ob diese Informationen im globalen oder mikroskopischen Maßstab vorliegen (Kap. 6.2.1.2). Vor diesem Hintergrund ist

es zunächst überraschend, daß gerade auf dem Gebiet der Geologie GIS vergleichsweise selten eingesetzt werden. Einer der Gründe ist die mangelhafte Verfügbarkeit von **Spezialdaten**. Sie ist nach wie vor **der** limitierender Faktor für den Einsatz von GIS (vgl. Kap. 6.3.4). Bei geologischen Anwendungen kommt erschwerend hinzu, daß die relevanten Informationen fast immer 3-dimensional verteilt sind. Dies bedeutet einerseits, daß eine deutlich höhere Informationsmenge notwendig ist, um den „Untersuchungsraum Untergrund“ mit Informationen zu füllen und andererseits, daß die anzuwendenden Analyse- und Darstellungsverfahren deutlich komplexer sind. Die Verarbeitung geologischer Information erfordert deshalb eine besonders gute Kenntnis 3-dimensionaler Analysetechniken, die mangels Standardlösungen oft nur durch Programmierung eigener Anwendungen umzusetzen sind (vgl. Kap. 8.2). Gleichzeitung muß dazu auch der geologische Sachverstand zur Bewältigung des Problems vorhanden sein.

6.1.2 Konzepte, Strukturen und Methoden

6.1.2.1 Daten und Objekte

GIS verwalten Informationen mit räumlichem Bezug, die im Allgemeinen an bestimmte „Objekte“ gebunden sind. Solche Objekte können Punkte, (z.B. Probenahmestellen), Linien (z.B. Gewässer) oder Flächen (z.B. Grundstücksflächen) sein. Das GIS enthält die Daten, die die räumliche Lage und Geometrie dieser Objekte beschreiben (in den Dimensionen x,y,z,t) sowie zusätzliche Informationen, die das Objekt näher charakterisieren. Letztere werden auch als Attribute bezeichnet. Jedes Objekt kann eine Vielzahl von Attributen aufweisen. Geometrische Daten und Attribute werden in einer Datenbankstruktur abgelegt. Wie diese im Einzelfall organisiert ist, hängt von der verwendeten Software ab. Die Daten können durch ein GIS definitionsgemäß (s.o.) graphisch in Form einer Karte dargestellt werden. Moderne GIS-Software ermöglicht es dabei meist, die zu einem Objekt gehörigen Attribute direkt am Bildschirm durch „Anklicken“ abzurufen oder verschiedene Objekte zu selektieren.

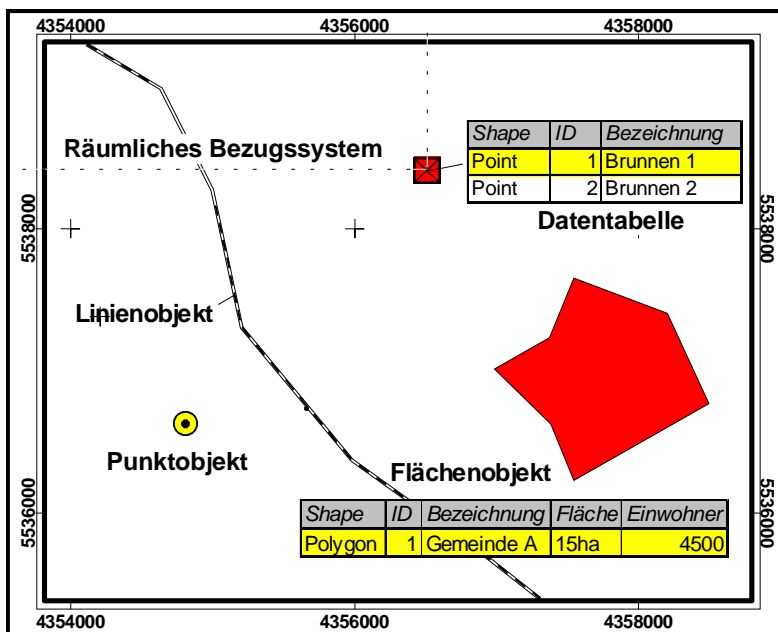


Abbildung 6-1: Objekte und Daten im GIS.

Im Vektormodell (Kap. 6.1.2.3) werden Objekte (Punkte, Linien, Flächen) gemeinsam mit Daten, die ihre Lage und Form innerhalb eines festgelegten räumlichen Bezugssystems beschreiben, abgelegt. In einer zugehörigen Attributtabelle können Sachdaten, die das Objekt näher charakterisieren, abgelegt sein. Solche Attributtabellen können nicht nur einfache „Werte“ sondern auch Dokumente, Grafiken, Audio- und Videosequenzen und ausführbare Anwendungen enthalten, die bei der Selektion des oder der Objekte angezeigt oder ausgeführt werden.

6.1.2.2 Räumliches Bezugssystem - Koordinatensysteme und Projektionen

Ein wesentliches Merkmal von GIS ist der Raumbezug der enthaltenen Information. Um diesen herzustellen, müssen Bezugssysteme geschaffen werden, die eine Lokalisierung der enthaltenen Daten relativ zueinander und absolut, bezüglich extern definierter Fixpunkte ermöglichen. Gleichzeitig sollte dieses Bezugssystem so gestaltet sein, daß ein Austausch oder die Kombination mit Daten aus anderen Quellen ohne größeren Aufwand möglich ist (Konvertierung, Transformation). Auf die theoretischen Grundlagen, die in allen GIS-Lehrbüchern und der Literatur zur Kartographie ausführlich dargestellt werden, wird hier nicht eingegan-

gen. Es wird aber darauf hingewiesen, daß die Herstellung des Raumbezugs von Informationen in der praktischen Arbeit mit GIS manchmal ein erhebliches Problem darstellt, zumindest aber häufig einen hohen Arbeitsaufwand bedeutet. Dies ist teilweise auch darauf zurückzuführen, daß den Ergebnissen vieler geowissenschaftlicher (insbesondere geologischer) Arbeiten ein nachvollziehbarer, exakter Raumbezug nicht zu entnehmen ist. Die sinnvolle Übernahme solcher Informationen in GIS wird dadurch erschwert oder unmöglich gemacht.

6.1.2.3 Raster- und Vektor- Objektmodell

In einem GIS bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten Daten zu speichern bzw. darzustellen. Im sogenannten „Rastermodell“ werden Flächen in ein Punktraster mit einer definierten Anzahl von Reihen und Spalten aufgeteilt. Jede Rasterzelle kann durch ihre Lage in einer bestimmten Zeile und Spalte genau lokalisiert werden. Zusätzlich zu den Lagekoordinaten enthält jede Zelle ein oder mehrere Attribute, die festlegen, welche Eigenschaft oder Ausprägung einer Eigenschaft am betreffenden Punkt vorliegen. Dies können Zahlenwerte (z.B. Höheninformationen) oder Werte sein, die die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Eigenschafts-„Klasse“ wiedergeben (z.B. „Wald“ in einer Landnutzungskarte). Zellen gleicher Attribute können zu „Zonen“ gruppiert werden.

Demgegenüber beinhaltet das Vektormodell definierte Objekte, die aus Punkten und Linien bestehen. Geschlossene Linienzüge bilden Flächen (auch „Polygone“), die eine eigene Objektklasse darstellen (Abbildung 6-1). Die Unterschiede zwischen Rastern und Vektoren demonstriert Abbildung 6-2.

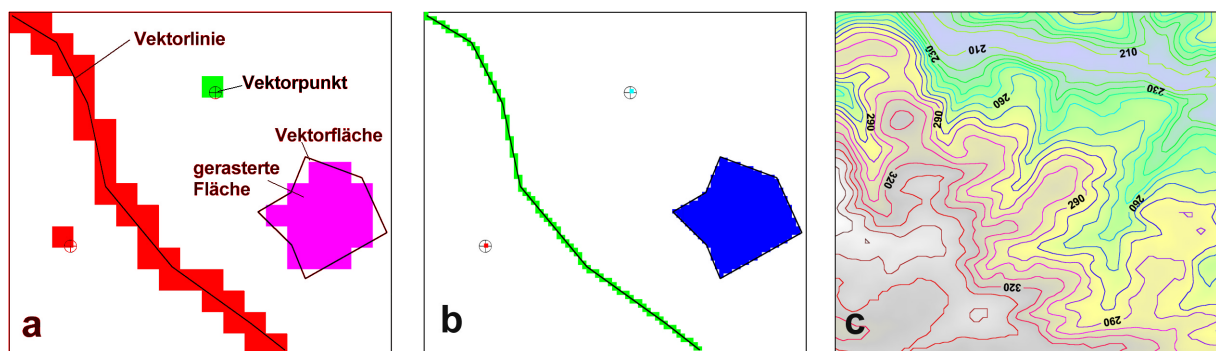


Abbildung 6-2a,b,c: Gegenüberstellung von Raster- und Vektormodell. a)+b): Darstellung von Punkt-, Linien und Flächenobjekten als Vektoren und Raster in unterschiedlichen Raster-Auflösungen (18x16 bzw. 90x80 Bildpunkte). c): Digitales Höhenmodell (90x80 Bildpunkte). Weitere Erläuterungen im Text unten.

Lagegenauigkeit und Abbildungstreue werden im Rastermodell durch die Auflösung bestimmt. Im Beispiel von Abbildung 6-2a werden die zugrundeliegenden Vektorobjekte bei einer Auflösung von 18x16 Bildpunkten nur sehr grob nachgebildet. Absolute und relative Lageungenauigkeiten sowie ungenaue Wiedergabe von Flächeninhalten sind die Folge. Bei einer 5-fach höheren Auflösung (90x80, Abbildung 6-2b) werden die Abweichung gegenüber der Vektordarstellung deutlich geringer, der Speicherplatzbedarf steigt allerdings gleichzeitig um das 25-fache⁴¹.

In Abbildung 6-2c ist ein Ausschnitt aus einem digitalen Höhenmodell (DHM) mit einer Auflösung von 90x80 Bildpunkten dargestellt. Jeder Bildpunkt enthält die Höheninformation (je nach Verfahren Mittelwert, gewichteter Mittelwert o.ä.) für eine Fläche, die durch die Zellgröße vorgegeben ist. Um die äquivalente Information im Vektormodell darzustellen, müßten im Beispiel $90 \times 80 = 720$ Polygonobjekte erzeugt werden. Isolinen, wie die in Abbildung 6-2c zusätzlich dargestellten, sind nur aus Rastern abgeleitete Darstellungen und beinhalten **nicht** die äquivalente Information.

⁴¹ Durch spezielle Verfahren der Datenverwaltung gilt diese einfache Beziehung in Abhängigkeit von der eingesetzten Software und dem Dateiformat nicht notwendigerweise (s. z.B. BERNHARDESEN, 1999).

Die wesentlichen Nachteile des Rastermodells liegen darin, daß eine höhere Detailgenauigkeit, was die Lage und Form von Objekten betrifft, nur durch eine Verkleinerung der Zellgröße zu erzielen ist, was mit einer enormen Vergrößerung des Speicherbedarfs einhergeht. Vorteile sind dagegen, daß Berechnungen und Vergleiche mit verschiedenen Datensätzen durchgeführt werden können, ohne daß die betreffenden Objekte dabei aufgelöst werden müssen (vgl. Kap. 8.1). Die Vorteile des Vektormodells liegen im geringeren Speicherplatzbedarf, bei gleichzeitig beliebig hoher Detailgenauigkeit. Dagegen können kontinuierliche Werteverteilungen weniger gut dargestellt werden. Tabelle 6-1 faßt bevorzugte Einsatzgebiete sowie Vor- und Nachteile der beiden Modelltypen zusammen:

	Raster	Vektor
Lagegenauigkeit	niedrig	hoch
Anwendung von Verknüpfungsalgorithmen (Berechnungen vom Typ [Attribut] A + B = C)	einfach	komplex
Speicherplatz für Datensätze mit geringer räumlicher Inhomogenität der Werte	hoch	gering
Qualität kartographischer Darstellungen	nur bei angepaßtem Maßstab hoch; gemeinsame Darstellung mehrerer Datensätze oft problematisch	hoch, Überlagerung unterschiedlicher Objekttypen und Themen (Layer) problemlos
Maßstabsbindung	hoch	gering
Einsatzgebiete	Darstellung und Berechnungen mit Datensätzen kontinuierlich inhomogen verteilter Information (Geländehöhe, Niederschlagsverteilung etc.)	Darstellung, Verschneidung und Kombination von Punkt- Linien und Flächeninformationen hoher Detailgenauigkeit und nicht zu hoher Inhomogenität (Klassenanzahl)

Tabelle 6-1: Vor- und Nachteile von Raster und Vektormodell. Ergänzt nach SAURER & BEHR (1997).

Raster- und Vektormodell stellen in den meisten Fällen keine sich gegenseitig ausschließenden Alternativen dar, sondern werden kombiniert eingesetzt, wobei für unterschiedliche Aufgaben das jeweils geeignetere Verfahren angewendet wird. So ist es beispielsweise wenig sinnvoll, eine geologische Karte im Rastermodell anzulegen oder umgekehrt ein digitales Höhenmodell mit Hilfe von Vektorpunkten⁴² zu realisieren. Zu beachten sind dabei immer Fragen der Lagegenauigkeit und der Informationsvielfalt. Bei einer geologischen Karte ist die Informationsvielfalt innerhalb einer Fläche gering, während der Verlauf der Schichtgrenzen eine hohe Lagegenauigkeit aufweisen kann. Um dem im Raster gerecht zu werden, müßte eine hohe Auflösung gewählt werden, deren Rastergröße der primären Lagegenauigkeit (wie im Gelände ermittelt) entspricht. Dies erhöht den Speicherplatz ungemein, wobei der Großteil der gespeicherten Information dann allerdings redundant ist. Es sollte auch beachtet werden, daß eine Konvertierung von Vektorobjekten in Raster unter Beibehaltung der ursprünglichen Detailgenauigkeit problemlos möglich ist, in umgekehrter Richtung die Lagegenauigkeit immer auf die Auflösung des Ausgangsrasters beschränkt bleibt.

Wegen der Erfordernis, Raster- und Vektorobjektmodell kombiniert einzusetzen, sind die meisten modernen GIS-Softwarepakete heute als sogenannte „hybride“ Systeme ausgelegt (BEHR, 1998).

⁴² Auf das „TIN-Modell“ wird hier nicht eingegangen. Vgl. dazu z.B. BERNHARDSEN (1999).

6.1.2.4 Datenbanken und Datenverwaltung

Die Objektattribute werden sowohl im Raster- als auch im Vektormodell in Datentabellen bzw. Datenbanken abgelegt. Im Vektormodell ist in diesen Attributtabellen jedem Objekt ein Datensatz mit beliebig vielen Feldern zugeordnet, in denen beschreibende Daten enthalten sind. Die Geometriedaten der Objekte sind zur Vermeidung von Redundanzen meist in eigenen Tabellen abgelegt. Im Rastermodell kann jeder Rasterzelle ein Datensatz zugeordnet sein, häufiger werden Datensätze für einzelne Zonen (= Zellgruppierungen gleichen Attributs) angelegt. Die Organisation der Attributtabellen wird je nach Softwareprodukt unterschiedlich gehandhabt. GIS-Software ermöglicht im Allgemeinen viele der Verfahren, die auch von Datenbanksoftware zur Verfügung gestellt werden. Dazu gehören verschiedene Abfragemöglichkeiten z.B. über SQL und die Möglichkeit zur relationalen Verknüpfung von Datentabellen. Weiterhin besteht über das Client-Server-Konzept die Möglichkeit auf extern verwaltete Daten zurückzugreifen und die Funktionalität anderer Software zu nutzen. Dies kann sowohl innerhalb lokaler Netzwerke als auch im Internet geschehen.

6.1.2.5 Methoden und Analyseverfahren

GIS können zur Bearbeitung vielfältiger Aufgabenstellungen herangezogen werden. Diese reichen von der einfachen kartenmäßigen Darstellung von Sachdaten und Meßwerten, über die Darstellung von statistisch ausgewerteten Informationen, bis hin zur komplexen Analyse multipler Datensätze. Letzteres erfolgt beispielsweise durch Überlagerung und Verschneidung von Flächen und Objekten (Vektor), durch Korrelationsanalyse (Raster) oder durch die Berechnung von Entfernungsparametern. Die Möglichkeiten sind hier so vielfältig, daß eine ausführliche Beschäftigung in diesem Rahmen nicht erfolgen kann. Besonders eingehende Beschreibungen der wesentlichen Analyseverfahren geben BONHAM-CARTER (1994) und BILL (1999b). Verfahren die innerhalb dieser Untersuchung eingesetzt wurden, werden an entsprechender Stelle erläutert, sofern es sich nicht um Standardverfahren handelt.

6.1.2.6 Automatisierung und Anwendungsprogrammierung

Moderne GIS-Software stellt eine Vielzahl von Werkzeugen (Tools) zu Verfügung, die den Benutzer in die Lage versetzen, Geodaten in verschiedenster Weise zu selektieren, zu kombinieren, zu analysieren und umzuformen. Für die Bearbeitung spezieller fach- und themenbezogener Problemstellungen sind diese Tools häufig aber nicht ausreichend. Zu diesem Zweck beinhalten viele GIS-Produkte eigene Programmier- oder Makrosprachen, mit denen es möglich ist, spezifische Tools zu entwickeln oder komplette Anwendungen zu erstellen. Innerhalb dieser Untersuchung wurde von dieser Möglichkeit intensiv Gebrauch gemacht (Kap. 8). Neben der Möglichkeit, systemeigene Programmiersprachen zu nutzen, können viele GIS auch auf externe Anwendungen zugreifen, Daten aus anderen Datenquellen lesen oder ihrerseits Daten für externe Anwendungen zur Verfügung stellen. Damit lassen sich GIS mit ihren Analyse- und Darstellungsmöglichkeiten beispielsweise in Expertensysteme integrieren (Kap. 6.4.1.3).

6.1.2.7 Modelle in GIS

Der Begriff „Modell“ wird im Rahmen von GIS-Analysen in verschiedener Weise verwendet, was teilweise zu einer gewissen begrifflichen Verwirrung führt. Weil dies so ist, befassen sich viele Lehrbücher ausführlich mit der Definition der verschiedenen Modellbegriffe (z.B. BILL, 1999a; SAUER & BEHR, 1997). Innerhalb dieser Untersuchung ist vor allem der Typ des **deskriptiven Modells** von Bedeutung, also eines Modells, das versucht ein hinreichend genaues Abbild der realen natürlichen Verhältnisse zur Verfügung zu stellen. Innerhalb eines solchen Modells soll es möglich sein, die Einflüsse unterschiedlicher Faktoren auf das zu untersuchende Phänomen vorhersagen und bewerten zu können. Diese Vorhersage wiederum erfolgt anhand **prognostischer oder deterministischer Modelle**, die auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen. Um ein geeignetes deskriptives Modell aus einer limitierten Anzahl von Daten zu schaffen, müssen vereinfachende Annahmen gemacht und Regeln aufgestellt werden. Diese müssen so gestaltet sein, daß die relevanten Ei-

vanten Eigenschaften des Naturraums hinreichend genau beschrieben werden, um eine aussagekräftige Analyse und Bewertung durchführen zu können. Dies ist naturgemäß nicht immer ganz einfach und für Dritte, die an der Erstellung des Modells nicht beteiligt waren, nicht immer nachzuvollziehen. Dazu ein Zitat aus BILL (1999b):

„Systemanalytische Ansätze versuchen beim Studium räumlicher Phänomene Annahmen und Modelle zu integrieren. Sie sind daher oftmals problemspezifisch formuliert und nicht verallgemeinerbar. Es bedarf hochgradig fachspezifischer Kenntnisse und Annahmen, um die Ergebnisse qualifiziert beurteilen zu können“.

Die Vorstellung der innerhalb der vorliegenden Untersuchung erstellten Modelle und Analysenansätze erfolgt in den Kapiteln 7 und 8.

6.1.2.8 Organisation, Konzeption und Ablauf von GIS-Projekten

Die Abwicklung eines GIS-Projektes kann in verschiedene Phasen gegliedert werden, in denen spezifische Aufgaben und Problemstellungen auftreten. In Tabelle 6-2 werden diese Aufgaben, ihre Bedeutung, der Schwierigkeitsgrad und der zu erwartende Arbeitsaufwand kurz dargestellt. Konzepte zur Planung, Organisation und dem Ablauf von GIS-Projekten werden besonders ausführlich z.B. von BEHR (1998) dargestellt. Mit den Kosten und Kosten-Nutzen-Analysen von GIS-Projekten befaßt sich BERNHARDSSEN (1999).

Gerade innerhalb der vorliegenden Untersuchung hat sich gezeigt, daß eine erfolgreiche Bearbeitung einer Aufgabe wie die der Bewertung von Standorteigenschaften für die thermische Nutzung des Untergrundes nur dann möglich ist, wenn Problemstellung, Zielsetzung und Konzeption so genau wie möglich definiert werden. Man sollte sich bewußt sein, daß es bei der „Abarbeitung“ eines solchen Schemas immer wieder notwendig sein wird, einen oder mehrere Schritte zurückzugehen und bestimmte Punkte zu überarbeiten. Beispielsweise zeigt es sich bei der Datenbeschaffung (Aufgabenbereich C in Tabelle 6-2) immer wieder, daß bestimmte Datensätze nicht verfügbar sind, was unter Umständen eine Neuformulierung der Rahmenbedingungen (Kosten) oder gar der Zielsetzung zur Folge haben kann.

Aufgabe	Erläuterung	Beispiele / Beschreibung in der vorliegenden Untersuchung
A Ideen- und Vor-Planungsphase		
Definition der Problemstellung	Erkennung und Definition des Problems	Mangelnde Bekanntheit thermischer Nutzungen des Untergrundes
Definition der Zielsetzung	Wem dienen die Ergebnisse, welcher Zweck soll mit ihnen verfolgt werden	Potentialkarte – Planungshilfsmittel; Kap. 6.2.1.1
B Planungsphase		
Festlegung der Projekt-Rahmenbedingungen	Untersuchungsraum, Kostenrahmen, Projektlaufzeit, Software, Hardware	Ausdehnung auf Gesamt-Unterfranken / Beispielausschnitt
Festlegung einer Strategie / Konzeption	Betrachtungsmaßstab, Festlegung von Schwerpunkten, Arbeitsmethoden, zeitlicher Ablauf	2-dimensionale oder 3-dimensionale Bearbeitung; Kap. 7.2.1
Festlegung der zu verwendenden Datensätze	Festlegung der notwendigen - Feststellung der vorhandenen - Feststellung der verfügbaren - Feststellung der erzeugbaren Datensätze	Kap. 6.3
Festlegung der Detailgenauigkeit	Minimale Rastergröße, Datendichte bei großen Datensätzen	Auflösung des Untergrundmodells, Zusammenfassung von Bewertungseinheiten (Kap. 7.2)
C Datenerfassung und –beschaffung, -vorbereitung		
Erfassung der Datensätze	Erhebung (Messen, Kartieren), Beschaffung (Ankauf), Eingabe, Digitalisieren	Kap. 6.3.6.1
Vorbearbeitung	Organisation, Vereinheitlichung	Herstellung gleicher räumlicher Bezüge, Anpassung von Einheiten; Kap. 6.3.6.3
D Datenaufbereitung		
Bearbeitung einzelner Datensätze	Regionalisierung, Interpolation, statistische Auswertung	Auswertung von Bohrungsdaten zur Interpolation von Grundwasser-gleichenplänen; Kap. 7.2.3.2.2
Bearbeitung multipler Datensätze	Überlagerung, Verschneidung, Verknüpfung, multivariate Statistik, Berechnungen	Berechnung der Bohrtiefe bis zum obersten gespannten GWL (rechtliche Limitierung) Kap. 8.2.4.3
E Erstellung der Datengrundlage für das Bewertungsmodell		
Modellbildung	Je nach Aufgabenstellung unterschiedlich	Erarbeitung eines Konzepts für ein Untergrundmodell; Kap. 7.2.3
Parametrisierung des Modells	Zuweisung von Eigenschaften an die Bewertungseinheiten	Festlegung der Schichteigenschaften im Modell; Kap. 7.2.3.3
F Bewertungsprozeß		
Kriteriendefinition	Festlegung und Klassifikation der relevanten Faktoren	Berechnung, Modellierung und Abschätzung der Einflüsse von Faktoren; Kap. 3
Formulierung von Bewertungsregeln	Gewichtung von Faktoren, Bestimmung von Abhängigkeiten	Regeln für die unterschiedliche Behandlung der GW-erfüllten und GW-freien Mächtigkeiten an einem Standort; Kap. 8.2.3.2
Klassifikation der Ergebnisse	Einteilung der Bewertungsergebnisse in Klassen: gut – schlecht	Kap. 6.4.4
G Darstellung der Ergebnisse		
(Kartenmäßige) Darstellung - Multimediale, digitale Präsentation; Kap. 6.2.1.4		

Tabelle 6-2: Aufgabenstellungen innerhalb eines GIS-Projekts, mit Hinweisen auf die Arbeitsschritte der vorliegenden Untersuchung.

6.2 GIS-Einsatz im Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes

Wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Klärung der Frage ob, und wenn wie, GIS sinnvoll im Bereich der Verfahren zur thermischen Nutzung des Untergrunds eingesetzt werden. „Sinnvoll“ heißt in diesem Zusammenhang, ein Verfahren zu finden, das bei einem angemessenen Zeit- bzw. Kostenaufwand einen zufriedenstellenden Nutzen erbringt. Um die Frage nach dem Aufwand- Nutzen-Verhältnis beantworten zu können, muß zunächst festgestellt werden, was GIS überhaupt zu leisten in der Lage sind und welche dieser Leistungen im Rahmen der untersuchten Thematik in Betracht kommen. Die Leistungen des GIS wiederum müssen sich an den möglichen Zielsetzungen, also an den Wünschen der in Frage kommenden Nutzer orientieren.

6.2.1 Abgrenzung des GIS-Begriffs

Nach den eingangs vorgestellten Definitionsmöglichkeiten (Kap. 6.1.1) beinhaltet der Begriff „GIS“ ein weites Spektrum sehr unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst geklärt, wie der GIS-Begriff in der vorliegenden Untersuchung aufgefaßt wird. Diese Klarstellung erfolgt nicht zuletzt deshalb, weil in anderen Untersuchung zu gleichen oder ähnlichen Themen der Begriff „GIS“ anders verstanden wird (vgl. Kap. 6.2.2).

Eine Begriffseingrenzung kann anhand der folgenden vier Gesichtspunkte erfolgen:

- der Zielsetzung des GIS-Projektes,
- dem Betrachtungsmaßstab,
- der Ausdehnung der betrachteten Fläche und/oder
- der Darstellungsweise der Ergebnisse

Die vier Punkte werden in den folgenden Abschnitten diskutiert, um abschließend eine Definition des GIS-Begriffs herzuleiten.

6.2.1.1 Mögliche Zielsetzungen

Mögliche Zielsetzungen für GIS-Anwendungen im Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes und die in Frage kommenden Nutzergruppen zeigt Tabelle 6-3.

Gemäß Tabelle 6-3 können bezüglich der Zielsetzung zwei „Großgruppen“ ausgeschieden werden. Dies sind zum einen alle Anwendungen, die auf die Erfassung und Darstellung der natürlichen, infrastrukturellen oder rechtlichen Voraussetzungen in einem größeren Gebiet ausgelegt sind („Kartierungen“ in weitesten Sinn). Sie erlauben es dem Benutzer, das Potential bzw. mögliche Einschränkungen in diesem Gebiet oder Teilgebieten desselben zu erfassen und die für seine Zwecke notwendigen Schlüsse daraus zu ziehen. Auf der anderen Seite stehen diejenigen Anwendungen, bei denen der Nutzer bereits den konkreten Wunsch hat an einem bestimmten Standort eine entsprechende Anlage zu errichten. Er erwartet sich eine Planungshilfestellung im Bezug auf die einzusetzende Technik, die zu erwartenden Kosten, Schwierigkeiten usw. Im Bereich dieser „Planungshilfestellungen“ sind als Untergruppe noch diejenigen Anwendungen enthalten, bei denen das GIS eine Entscheidung zwischen zwei oder mehreren Standortalternativen ermöglichen soll. In der GIS-Literatur werden solche Systeme als „spatial decision support systems“ (SDSS) bezeichnet. Im Bereich thermischer Nutzungen des **flachen** Untergrundes werden solche Anwendungen allerdings, abgesehen von Spezialfällen (s.u.), eher selten zum Einsatz kommen, da echte Standortalternativen, bezogen auf einen größeren Untersuchungsraum, sich nicht bieten. Letztlich könnte man als dritte Gruppe noch den Typus des Informationssystems definieren, der vorwiegend der Archivierung von Daten dient. Hier ist beispielsweise der Einsatz durch eine Behörde denkbar, bei der Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes gemeldet und archiviert werden. Dies ist zwar eine typische GIS-Anwendung, aber keine, die in spezieller Weise mit den Verfahren der Geothermie oder der Speicherung verbunden ist. Sie kann zudem Bestandteil der beiden zuerst geschilderten Anwendungsgruppen sein.

Aufgabenstellung	Verwendungszweck / Zielsetzung	GIS-Typ	Zielgruppe(n), vorrangige hervorgehoben	„Maßstab“ ⁴³	Aufwand
Analyse und Darstellung von Angebots- und Nachfragepotentialen	Landesentwicklung, Öffentlichkeitsinformation, Marketing	(Potential-) Kartierung	Industrie, öffentliche Institutionen , Endverbraucher	klein bis mittel	mittel
Umfassendes Informationssystem als Planungshilfestellung	Bereitstellung planungsrelevanter Information, Auslegungsvorschläge und -berechnungen, komplette Lösungen	Experten-system	Planungsbüros , (Endverbraucher)	groß	sehr hoch
Entscheidungshilfen für die Standortauswahl	Planungshilfestellung für begrenzte Flächen bei bestehenden Standortalternativen	spatial decision support systems (SDSS)	Planungsbüros , (Endverbraucher)	extrem groß	mittel
Karte der rechtlichen Voraussetzungen	Planungsgrundlage, Potentialbestimmung	Kartierung	Planungsbüros, Behörden, Industrie, Endverbraucher	mittel	mittel
Analyse und Darstellung von (Umwelt-)Risiken	Planungsgrundlage, Potentialbestimmung	Kartierung / Modellierung	Behörden: Naturschutz, Wasserwirtschaft	mittel, verschieden	einfach bis unmöglich
Datenarchivierung, -Bereitstellung	Übersicht über bestehende Anlagen (Kontrollfunktion)	Datenbank (Kartierung)	Behörden , Industrie	kein Maßstab	gering
Erstellung thematischer Karten der natürlichen und anderer Voraussetzungen	Planungsgrundlage, Öffentlichkeitsinformation, Potentialbestimmung	Potential- oder Planungs- Kartierung	Planungsbüros , Behörden, Industrie, (Endverbraucher)	groß bis mittel	hoch

Tabelle 6-3: Mögliche Zielsetzungen und -gruppen von GIS im Bereich thermische Nutzung des Untergrundes. „Industrie“ steht hier für Firmen, die ein Interesse an der Verbreitung der thermischen Nutzung des Untergrundes haben, insbesondere also Wärmepumpenhersteller, Stromversorgungsunternehmen, Bohrfirmen.

Wie sich bereits andeutet, gehören die meisten denkbaren GIS-Anwendung nicht exakt einem der geschilderten Typen an und werden auch nicht ausschließlich eine einzige Zielsetzung verfolgen. Bezüglich der Einsatzmöglichkeiten besteht eine hierarchische Ordnung, die in Abbildung 6-3 dargestellt ist.

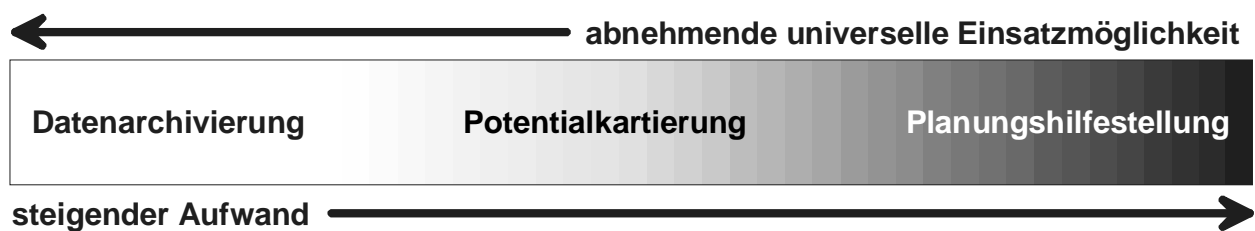


Abbildung 6-3: Hierarchische Ordnung unterschiedlicher GIS-Konzepte hinsichtlich des Arbeitsaufwandes und der Einsatzmöglichkeiten.

Die Zielsetzung des GIS-Projektes bestimmt auch welche Informationen in das GIS eingebracht werden müssen. Die Festsetzung welche Daten für welchen Anwendungstyp notwendig sind, ist nicht immer ganz einfach, zumal hier meist Abwägungen bezüglich der Verfügbarkeit von Daten erforderlich sind (Kap. 6.3.4). Bei allen Anwendungen, die eine echte Planungshilfestellung bieten sollen, müssen die geologischen, hydrogeologischen und thermischen Eigenschaften des Untergrundes, und zwar in ihrer dreidimensionalen Verteilung, möglichst exakt abrufbar sein. Dies ist nur durch einen enormen Arbeitsaufwand zu leisten, was bei der Definition der Zielsetzung berücksichtigt werden muß. Andere Anwendungen, die mehr dem Typus der

⁴³ Siehe dazu Kapitel 6.2.1.2, Maßstab.

Potentialkartierung entsprechen, erfordern dagegen weniger umfangreiches Datenmaterial und können deshalb unter Umständen auf die dritte Dimension der geologischen Information ganz oder teilweise verzichten. Dagegen sollten in eine Potentialkartierung in jedem Fall auch infrastrukturelle bzw. sozial- und wirtschaftsgeographische Aspekte einfließen, da das Potential im Wesentlichen auch von Aspekten wie der Besiedlungs- und Bebauungsstruktur, bestehender Versorgungseinrichtungen etc. abhängig ist. Die Einbeziehung der rechtlichen Voraussetzungen dagegen ist schwieriger, da es bei genauerer Betrachtung nicht ausreicht, sich auf die Darstellung der Wasserschutzgebiet zu beschränken. Vielmehr müssen wegen der Maßgabe, daß tiefere und gespannte Grundwasserleiter nicht genutzt werden dürfen, u.U. sogar sehr spezielle Informationen enthalten sein (vgl. Kap. 8.2.4.3).

6.2.1.2 Betrachtungsmaßstab

Der Begriff „Maßstab“ hat im GIS-Bereich nicht notwendiger Weise die gleiche Bedeutung wie der, der üblicherweise im Zusammenhang mit gedruckten Karten verwendet wird. Der Grund hierfür ist, daß in der „digitalen Welt“ (Darstellungs-)Maßstäbe im eigentlichen Sinn nicht existieren. Solange die Daten nicht analog, d.h. auf Papier ausgegeben werden, können nur (relative) Lagegenauigkeiten angegeben werden. Insbesondere bei Punktdaten (Bohrungen, Meßstellen etc.) ist die Frage nach dem „Maßstab“ unerheblich, sie bleiben Punkte, gleichgültig, ob sie im Maßstab 1:1 oder 1:10.000 ausgedruckt werden. Im Rastermodell empfiehlt es sich, von Auflösungen zu sprechen, wobei aber berücksichtigt werden sollte, daß die nominelle Auflösung weder einen Maßstab beschreibt noch eine Lagegenauigkeit ausdrückt. Maßstäbe haben im GIS aber insofern eine Bedeutung, als nach wie vor viele der verwendeten Datenquellen in analogen Karten bestehen (vgl. Kap. 6.3.6.3). Auch bei diesen sagt der Maßstab nichts über die Lagegenauigkeit aus, immerhin kann hier aus dem Maßstab aber die **maximal mögliche** Genauigkeit bzw. die minimale Fehlerbandbreite abgeleitet werden. Entscheidend ist dabei, daß in GIS meistens Datenquellen extrem unterschiedlicher Genauigkeiten eingesetzt werden. Sobald diese gemeinsam ausgewertet oder auch nur dargestellt werden, verliert die Angabe eines „Maßstabs“ jeglichen Sinn.

Diese Überlegungen mögen zwar trivial erscheinen, sie werden aber dennoch oft nicht ausreichend berücksichtigt. Deshalb ist z.B. häufig davon die Rede, daß ein GIS-Projekt beispielsweise „im Maßstab 1:100.000“ durchgeführt werden soll. Dem liegt wahrscheinlich die (wenig hilfreiche) Vorstellung zugrunde, daß jedes GIS-Projekt letztlich die Erstellung von Karten bestimmter Maßstäbe zum Ziel hat (vgl. dazu Kap. 6.2.1.4). Wenn der Begriff Maßstab überhaupt verwendet werden soll, sollte er nur bei der Beschreibung der Datenquellen eingesetzt werden. Unter Umständen kann auch der Begriff „Betrachtungsmaßstab“ eingeführt werden. Dieser könnte etwa als derjenige Maßstab definiert werden, der bei einer gedruckten Datenausgabe eine den primären Datenquellen angemessene Genauigkeit ermöglicht.

Der „Maßstab“ ist aus den angegebenen Gründen wenig geeignet, um den GIS-Begriff im Hinblick auf die vorliegende Untersuchung abzugrenzen. Dennoch ist es aus eben den selben Gründen notwendig die Frage des Betrachtungsmaßstabs zu berücksichtigen, da sie im Rahmen geowissenschaftlicher Fragestellungen, insbesondere wegen der nach wie vor bestehenden Notwendigkeit Ergebnisse (auch) auf Papier darzustellen (vgl. Kap. 6.2.1.4) von zentraler Bedeutung ist.

6.2.1.3 Ausdehnung von GIS-Projekten

Eine maßgebliche Größe für die Definition eines GIS, ist die räumliche Ausdehnung des bearbeiteten Gebiets. Wendet man den Begriff auf alle Vorhaben an, in denen räumliche Zusammenhänge mit Hilfe GIS-typischer Techniken untersucht werden, so sind in dieser Hinsicht keine Grenzen gesetzt, da GIS-Techniken ebenso im mikroskopischen wie auch in globalen Dimensionen anwendbar sind.

Die zwei folgenden Beispiele aus Untersuchungen anderer Autoren machen deutlich, inwiefern sich die Ausdehnung des Projektes auf die Begriffsabgrenzung auswirkt:

- **Beispiel 1:** Der geothermische Atlas von Europa (HURTER, 1997) stellt Untergrundtemperaturen und andere relevante Parameter für die geothermische Nutzung in Europa dar. Der Betrachtungs- und Darstellungsmaßstab liegt größenordnungsmäßig im Bereich 1:500.000 bis 1:5.000.000, die betrachtete Fläche bei mehreren Millionen km².
- **Beispiel 2:** Bei der Standortplanung und Vorerkundung für einen möglichen Untergrundwärmespeicher auf dem Campus der Dalhousie University in Halifax, Nova Scotia, Canada wurden relevante Daten in einem GIS gespeichert und ausgewertet. Der Betrachtungs- und Datenerhebungsmaßstab liegt größenordnungsmäßig im Bereich 1:1.000, die betrachtete Fläche bei ca. 0,5km² (COOK, 1998)⁴⁴.

Beide Beispiele wurden von den Autoren nicht explizit als „GIS-Untersuchungen“ bezeichnet, weisen aber hinsichtlich der eingesetzten Arbeitsmethoden, der verwendeten Software (im Fall 2) und der Konzeption die wesentlichen Merkmale eines GIS nach der in Kap. 6.1.1 genannten Definition auf. Es kann demnach abgeleitet werden, daß der GIS-Begriff, bezogen auf thermische Nutzungen des Untergrunds, unabhängig von der Flächenausdehnung des Projekts definiert werden kann. GIS-Arbeitstechniken können sinnvoll sowohl für sehr kleine Flächen als auch in sehr großen Gebieten eingesetzt werden.

6.2.1.4 Ausgabe-, Darstellungs- und Nutzungsmöglichkeiten von GIS

Wenn von Darstellungsmöglichkeiten der Potentiale und Möglichkeiten oberflächennaher geothermischer Nutzungen die Rede ist, wird oft vorausgesetzt, daß am Ende des Bearbeitungsprozesses eine Karte oder Kartenwerk (Atlas) steht, das die Ergebnisse der durchgeführten Analysen oder eine Synthese der relevanten Information darstellt und dem Nutzer zugänglich macht (z.B. BOUMA ET AL., 1997). Der Begriff „GIS“ wird teilweise in diesem Zusammenhang gar nicht erwähnt. Mit der grundsätzlich erkennbaren Blickrichtung auf eine „Karte“ ist sicherlich auch die teilweise mißverständliche Verwendung des Begriffs „Maßstab“ zu sehen (vgl. Kap. 6.2.1.2). Ein in diese Richtung orientiertes Verständnis von GIS bedeutet aber, die tatsächlichen Möglichkeiten stark zu unterschätzen bzw. zu limitieren. GIS sind definitionsgemäß eben mehr als Werkzeuge zur Erstellung von thematischen Karten. Mit entsprechenden Aspekten der Abgrenzung von GIS, CAD und CAC (computer aided cartography) befaßt sich beispielsweise DEMERS (1997). Eine weitergehende Betrachtung zum Themenbereich Darstellungs- und Visualisierungsmöglichkeiten geben z.B. GRÜNREICH (1995, 1997) und BUZIEK (1995b).

Um Informationen aus einem GIS abzurufen ist es nicht notwendig, sie auf einer (Papier-)Karte auszugeben. Wie bei einer „normalen“ Datenbank kann der Benutzer Informationen mit Hilfe von Abfrageoptionen die ihn interessierende Information selektieren. Ebenso wie eine Datenbank vorwiegend am Bildschirm benutzt wird, kann dies auch mit GIS geschehen. Bezüglich des „Komforts“ der Abfragemöglichkeiten und der Anforderungen, die dabei an den Nutzer gestellt werden, sind viele Möglichkeiten gegeben. So kann es möglich sein, daß der Benutzer die Informationen durch selbst formulierte Abfragen mit einer befehlszeilenorientierten Abfragesprache wie z.B. SQL selektieren muß. Es ist aber auch möglich, daß vom Ersteller des Informationssystems solche Abfragen bereits programmiert wurden und als ausführbare Befehle in einer speziell konfigurierten (graphischen) Benutzeroberfläche dem Benutzer zur Verfügung gestellt werden. Damit ist nicht nur das reine Abrufen von Information, sondern auch eine Berechnung abgeleiteter Ergebnisse möglich. Durch die Fähigkeit von GIS Daten **auch** in Kartenform am Bildschirm darzustellen, ist eine Selektion von Information mit den üblichen von graphischen Benutzeroberflächen her bekannten Mitteln möglich (Maus/Tastatur). Anders als auf einer gedruckten Karte ist es mit GIS durch Ein- und Ausblenden von Layern, die Wahl (automatisch) angepaßter Legenden (z.B. klassifiziert nach statistischen Größen) und die verschiedensten multimedialen Fähigkeiten möglich, eine Informationsdichte zu erzeugen, die eine klassische „Papierkarte“ niemals leisten kann. Gerade diese Fähigkeiten ermöglichen es GIS nicht nur zur Erstellung

⁴⁴ Diese Studie wurde 1997/98 unter Mitwirkung des Autors begonnen, aber nicht in dem geplanten Umfang zu Ende geführt.

von Potential- und Planungskarten, sondern sie als echte Planungswerkzeuge einzusetzen, beispielsweise in der Form eines Expertensystems (Kap. 6.4.1.3; Kap. 8.2.6).

6.2.1.5 Definition des GIS-Begriffs in der vorliegenden Untersuchung

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden verschiedene Aspekte diskutiert, die Hinweise darauf geben, wie GIS im Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes eingesetzt werden können und was von ihnen erwartet werden kann. Es zeigt sich, daß bezüglich der Zielsetzungen, des Betrachtungsmaßstabs, der Ausdehnung und der Darstellungsweise ein weites Spektrum an Möglichkeiten gegeben ist. Nicht alle diese Möglichkeiten werden aber durch den GIS-Begriff, wie er in der vorliegenden Untersuchung verstanden wird, abgedeckt. Welche Formen des Geoinformations-Einsatzes in dieser Untersuchung betrachtet werden, wird in der folgenden Definition festgelegt:

*Geoinformationssysteme für die thermische Nutzung des Untergrundes im Sinne der vorliegenden Untersuchung sind universell einsetzbare Datensammlungen und aus diesen abgeleitete Analysen und Darstellungen, die im regionalem Maßstab erstellt werden **bevor** an konkreten Standorten die Absicht besteht eine entsprechende Anlage zu errichten. Sie sollen dem Benutzer dazu dienen sowohl im Vorfeld als auch bei der konkreten Anlagenplanung möglichst viele relevante Informationen an einem von ihm gewählten Punkt auf der Basis von Datenbanken **und** Karten zur Verfügung zu stellen. Sie sind darüberhinaus zur Feststellung von Potentialen des Angebots und der Nachfrage sowie zur Klärung rechtlicher Gegebenheiten verwendbar.*

Mit dieser Definition soll eine Abgrenzung von denjenigen Projekten erreicht werden, bei den GIS-Software und –methoden in sehr kleinem „Maßstab“ **ausschließlich** zur Planung **konkreter** Projekte (vgl. z.B. COOK, 1998) eingesetzt werden.

6.2.2 GIS-Anwendungen und Potentialkartierungen anderer Autoren

Kartierungen des Potentials von Verfahren der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes bzw. Karten zur Standortbewertung sind bislang selten. Die folgende Übersicht umfaßt alle dem Autor bekanntgewordenen Aktivitäten dieser Art. Besonders hervorzuheben sind einige Arbeiten aus der Schweiz. Dort erschien 1996 die vom Wasser- und Energiewirtschaftsamts (WEA) und Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (GSA) herausgegebene „Übersichtskarte des Kantons Bern Wärme aus Wasser und Boden“ (WEA/GSA, 1996; BERDAT, 1997). Diese Karte im Maßstab 1:100.000 stellt vor allem Ausschlußgebiete (Wasserschutzgebiete etc.) dar und gibt ansonsten allgemeine Hinweise bei niedriger Detailauflösung. Im Kanton Zürich erschien 1996 die „Erdwärmesondenkarte 1:25.000 Blatt Albis (KANTON ZÜRICH, 1996).

In Baden-Württemberg wurde 1998 der „Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden“ herausgegeben (MUVBW, 1998). Dieser Leitfaden enthält eine Karte im Maßstab 1:1.000.000 in dem auf Basis der geologischen Karte günstige, teilweise günstige und ungünstige Gebiete ausgewiesen sind. Daneben sind Wasserschutzgebiete dargestellt.

Die bis hierhin genannten Kartenwerke machen nur sehr pauschale Angaben und stellen reine Übersichtskarten, die vor allem Informations- und Demonstrationzwecken dienen sollen, dar. Die Bewertung von Flächen erfolgte jeweils pauschal anhand geologischer Erfahrungswerte der Bearbeiter (freundl. mündl. Mittlg. Herr Dr. Wendt, GLA Freiburg und Herr Dr. Berdat, WEA Bern). Wesentlich ist in diesen Karten die Ausweisung von Wasserschutzgebieten als Ausschlußgebiete.

Dem Autor sind derzeit nur zwei Untersuchungen bekannt, bei denen Bewertungen erstellt wurden, die anhand echter Faktorenanalysen im GIS durchgeführt wurden und Untergrundparameter direkt einbeziehen wurden. Dies sind die Untersuchungen von DOSCH ET AL. (1998) im Raum Düren und eine kanadische Studie, bei der für ein 10km² großes Gebiet im Norden von Nova Scotia (Kanada) mit Hilfe eines GIS die Eignung für den Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen untersucht wurde. Soweit dem Autor bekannt ist, wurde diese Studie nicht veröffentlicht und ist deshalb nicht ohne weiteres zugänglich. Dem Autor liegt ein

Report vor (FROTTE ET AL., 1993). Bezeichnend ist, daß in beiden Fällen das Untersuchungsgebiet mit ca. 10km² sehr klein gewählt wurde.

Planungen zu regionalen Kartierungen bestehen in verschiedenen Bundesländern, darunter Brandenburg (ECKHARDT, 1997) und Nordrhein-Westfalen. Tabelle 6-4 gibt einen Überblick über bereits abgeschlossene sowie in Bearbeitung und Planung befindliche Projekte zur Ermittlung der Eignung von Gebieten für unterschiedliche Verfahren zur thermischen Nutzung.

Titel / Typ / Anwendungsbereich	Gebiet	Autor / Quelle	Stand	„Maßstab“ ⁴⁵ / Ausdehnung
Geothermischer Atlas von Europa (Kartenwerk)	Europa	HURTER (1997)	abgeschlossen	> 1:1000.000 verschieden
Geothermische Ressourcen (einfache Karte)	Mecklenburg-Vorpommern	MVBAUMIN (1997)	abgeschlossen	1:1.000.000
Geothermisches Potential von Nordbayern, Untergrundtemperaturen, Potentialkartierung/-studie	Nordbayern	BAUER (2000)	abgeschlossen	ca. 1:500.000
Landesweite Karte oberflächennahe (und tiefe) Geothermie, Potentialstudie	Brandenburg	ECKHARDT (1997)	Planung	1:50.000
Landesweite Karte oberflächennahe (und tiefe) Geothermie, Potentialstudie	Nordrhein-Westfalen	mündl. Mittl. GLA NRW (1999)	ab 2/2000	1:100.000
Landesweite Karte Erdwärmesonden, i.W. rechtliche Voraussetzungen, Geologie in begrenztem Rahmen	Baden-Württemberg	WENDT (1998); MUVBW, (1998)	abgeschlossen	1:1000.000
Karte, i.W. der rechtlichen Voraussetzungen, Erdwärmesonden	Kanton Bern, Schweiz	WEA, GSA (1996); BERDAT(1997)	abgeschlossen	1:100.000
Karte, i.W. der rechtlichen Voraussetzungen, Erdwärmesonden	Kanton Zürich, Schweiz	KANTON ZÜRICH (1996)	abgeschlossen	1:25.000
Potentialstudie Erdwärmesonden, Einbeziehung von Geologie und Infrastruktur (GIS)	Raum Düren, Niedersachsen	DOSCH ET AL. (1998)	abgeschlossen	1km ²
Detaillierte GIS-Analyse unter Einbeziehung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse (EWS)	Nova Scotia, Canada	FROTTE ET AL. (1993)	abgeschlossen	10km ²
GIS zur Standortoptimierung - Halifax, Dalhousie University Campus (Speicher)	Nova Scotia, Canada	COOK (1998)		1:1000 / <1km ²
Analyse des Nutzungspotentials (GIS)	Türkei	PAKSOY (1996, 1997)		>1:1.000.000
Regionale Potentialstudie oberflächennahe Erdwärmennutzung (nicht vorrangig Kartierung), Text	Mecklenburg-Vorpommern	POPPEI & FISCHER (1997)		--
Machbarkeitsstudie Aquiferspeicherung, Text	Nordost-deutschland	SEIBT (1995)	abgeschlossen	--

Tabelle 6-4: Übersicht über GIS-Untersuchungen, GIS-„ähnliche“ Aktivitäten (Kartierungen) und beschreibende Untersuchungen zum Potential thermischer Nutzungen des flachen Untergrundes und der tiefen Geothermie

Über die in Tabelle 6-4 angegeben Arbeiten hinaus existieren an verschiedener Stelle Karten, die potentiell geeignete Flächen in kleinen bis kleinsten Maßstäben zeigen. Solche Karten werden z.B. als Werbematerial von Firmen und öffentlichen Institutionen (z.B. NATURAL RESOURCES CANADA, 1996) oder als Beilage zu wissenschaftlichen Veröffentlichungen (SANNER, 1992) publiziert. Daneben existieren zahlreiche Potentialstudien beschreibender Art (z.B. CRUICKSHANKS & MOROFKY, 1994; ERBAS ET AL., 1997). Von den in Tabelle 6-4 aufgeführten Untersuchungen fallen die meisten, soweit sie überhaupt als GIS-Untersuchungen im engeren Sinn (s.o.) zu bezeichnen sind, in den Bereich der Übersichtsdarstellungen und Potentialkartierungen. Nur wenige beziehen tatsächlich auch den Untergrund in seiner dreidimensionalen Ausprägung ein.

⁴⁵ „Maßstab“ im Sinne von Kap. 6.2.1.2.

6.2.3 Praktische Möglichkeiten des GIS-Einsatzes

Bislang wurden die theoretisch denkbaren Zielsetzungen und eine Abgrenzung des Begriffs „GIS“ im Zusammenhang mit thermischen Nutzungen des Untergrundes vorgenommen. Bisher durchgeführte Anstrengungen auf diesem Gebiet wurden vorgestellt. Es zeigt sich, daß die Möglichkeiten, die GIS bieten, bislang bei weitem nicht als ausgeschöpft sind. Im Folgenden wird konkret auf die bestehenden Möglichkeiten eingegangen.

6.2.3.1 GIS zur Erstellung von Kartenwerken

Prinzipiell bieten sich GIS zur Erstellung von Karten an, in denen Ergebnisse von Standortanalysen und Bewertungen sowie die geologischen, rechtlichen und infrastrukturellen Gegebenheiten dargestellt werden. Wie bereits in 6.2.1.1 geschildert (vgl. auch Tabelle 6-3), gibt es ganz unterschiedliche Arten von „Kartierungen“.

6.2.3.1.1 Potentialkarten

Die Darstellung von Potentialen thermischer Nutzungen ist in vielen Bereichen von Bedeutung. Sie dienen z.B. öffentlichen Institutionen und Forschungsförderungseinrichtungen dazu ihre Förderungsaktivitäten im Bereich der Forschung oder im Endverbraucherbereich festzulegen. Sie sind wichtig zur Prognose von Trends im Bereich technischer Entwicklungen und der Energienutzung. Für Industrieunternehmen bieten sie die Möglichkeit des gezielten (regionalen) Marketings. Letztlich sind sie dazu geeignet, den Bekanntheitsgrad und das Vertrauen in entsprechende Techniken zu erhöhen. Es ist also durchaus wünschenswert, solche Karten zu erstellen.

Bei der Erstellung einer Potentialkarte muß zunächst die Zielsetzung (Zielgruppe) genau definiert und der Potentialbegriff abgegrenzt werden. Der Begriff „Potential“, bezogen auf den Einsatz erneuerbarer Energien und speziell im Bezug auf die Erdwärmenutzung, wird ausführlich bei KALTSCHMITT & WIESE (1997) und KALTSCHMITT ET AL. (1999) erörtert. Grundsätzlich wird zwischen theoretischen und technischen Potentialen unterschieden. Das **theoretische Potential** beschreibt die physikalisch maximal nutzbare Energie. Das **technische Potential** gibt denjenigen Anteil des theoretischen Potentials an, der bei Berücksichtigung der technischen und sonstigen Einschränkungen genutzt werden kann. Solche Einschränkungen sind im Fall der oberflächennahen Erdwärmenutzung z.B. ungeeignete Schichten, aber auch Wasserschutzgebiete. Die Einschränkungen müssen im Einzelnen definiert werden. Technische Potentiale werden zusätzlich in Erzeugungs- und Nachfragepotentiale gegliedert. Das technische Nachfragepotential beinhaltet die gegebene Nachfrage unter Berücksichtigung der von der Nutzerseite vorgegeben technisch physikalischen Anforderungen (z.B. benötigte Vorlauftemperatur).

Das Gesamtpotential wird durch das Angebot (technisches Erzeugungspotential) und die potentielle Nachfrage bestimmt. Tabelle 6-5 zeigt, welche Einflußfaktoren Angebot und Nachfrage beeinflussen können.

	Beschränkung	Erläuterung
Nachfrage	Besiedlungsdichte und Einwohnerzahl	Das Nutzungspotential bzw. die nutzbare Fläche beschränkt sich auf den unmittelbaren Umkreis von bebauten Flächen.
	Bebauungsdichte, Bebauungstyp, Besiedlungsstruktur	Bestimmte Bebauungsformen (z.B. innerstädtische, dichte Bebauung) erschweren den Einsatz von Erdwärmenutzung oder machen ihn unmöglich.
Angebot	rechtliche Voraussetzungen	Keine Erdwärmenutzung in WSG, NSG und Gebieten mit kritischen hydrogeologischen Verhältnissen (Kap. 3.5 und 3.6).
	geologische Voraussetzungen	Gebiete, in denen ungünstig geologische Voraussetzungen vorliegen, z.B. Karst oder Gesteine mit extrem schlechter Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 6-5: Faktoren, die das Angebot und die Nachfrage von bzw. nach Energie aus oberflächennahen Nutzungen des Untergrundes beschränken.

Die tatsächliche Nachfrage nach thermischen Nutzungen des flachen Untergrundes kann nicht mit der potentiellen Nachfrage (dem Nachfragepotential) gleichgesetzt werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, daß jeder potentielle Nutzer, der die technischen Voraussetzungen im Sinne des technischen

kann, daß jeder potentielle Nutzer, der die technischen Voraussetzungen im Sinne des technischen Nachfragepotentials besitzt, auch den Wunsch hat, eine solche Technik zu nutzen. Abbildung 6-4 zeigt das Zusammenwirken von Angebot, potentieller und tatsächlicher Nachfrage.

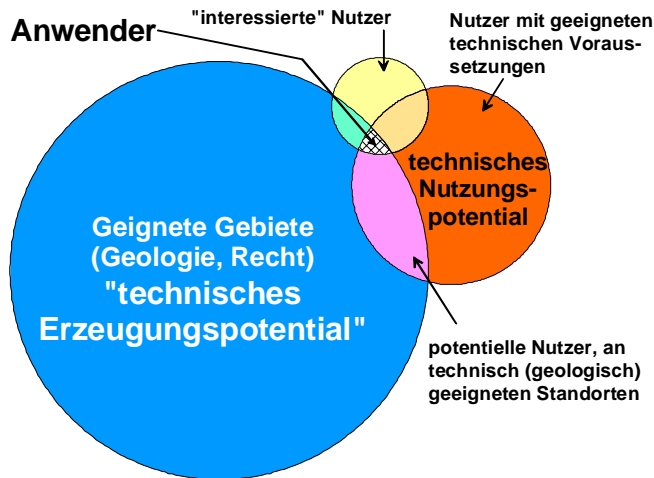


Abbildung 6-4: Potentialbegriffe:

- Ein „technisches Erzeugungspotential“ ist überall dort gegeben, wo die geologischen (und rechtlichen) Voraussetzungen die Anwendung der Erdwärmenutzung erlauben. Diese Größe ist weitgehend unveränderlich.
- Da nicht alle diese Gebiete bewohnt bzw. bebaubar sind, besteht nur in einem gewissen Anteil ein (technisches) Nachfragepotential. Die „potentiellen Nutzer“ sind alle diejenigen, die die technischen Voraussetzungen zur Nutzung von Erdwärme haben. Der Kreis der potentiellen Nutzer kann vergrößert werden.
- Nicht alle potentiellen Nutzer sind tatsächlich an der Nutzung von Erdwärme interessiert. Das Interesse an der Nutzung kann gesteigert werden.
- Das „Anwender“-Segment ist die Schnittmenge aus Angebot und tatsächlicher Nachfrage.

Grundlegende Überlegungen zum Potential der Erdwärmenutzung werden hier nicht weiter ausgedehnt. Von Interesse ist, welche Konsequenzen sich aus den unterschiedlichen Potentialvorstellungen für die möglichen Zielsetzungen und Konzeptionen von GIS ergeben. Wenn das GIS das technische Erzeugungspotential erfassen soll, so sind vorwiegend die geologischen (und rechtlichen) Voraussetzungen von Interesse. Eine Darstellung des Erzeugungspotentials ist vor allem dann notwendig, wenn das Informationssystem zur Vergrößerung der Zahl der Interessenten eingesetzt werden soll (Werbung, Förderung). Wird das Nachfragepotential untersucht, müssen infrastrukturelle Faktoren berücksichtigt werden. Nachfragepotentiale interessieren im Zusammenhang mit Planungen und Zukunftsprognosen.

Potentialkartierungen können je nach Ausrichtung und Anforderungen an die Verlässlichkeit der Aussagen auf sehr unterschiedliche Weise erstellt werden. Bei den bisher durchgeführten Potentialkartierungen (vgl. 6.2.2) wurde meist auf eine dreidimensionale Erfassung des Untergrundes verzichtet und wenige, einfache Bewertungskriterien angewendet. In der vorliegenden Untersuchung gilt das vorwiegenden Interesse nicht der Erstellung von Potentialkarten.

6.2.3.1.2 Planungskarten

„Planungskarten“ im weitesten Sinn sind darauf ausgerichtet, einen Benutzer bei der Konzeption eines konkreten Vorhabens zu unterstützen. Der wesentliche Unterschied zur einer Potentialkarte besteht darin, daß in einer Planungskarte das Nachfragepotential von sekundärem Interesse ist. Das Nachfragepotential kann aber insofern von Bedeutung sein, als es wenig sinnvoll ist, für gänzlich unbesiedelte Flächen detaillierte Planungskarten zu entwerfen (vgl. Kap. 6.4.2.2.2).

Planungskarten können je nach Detailgenauigkeit („Maßstab“; vgl. Kap. 6.2.1.2), dem eingesetzten Arbeitsaufwand und der Abgrenzung der Thematik unterschiedliche Leistungen erbringen. Abbildung 6-5 zeigt zwei Beispiele, die in dieser Hinsicht Extremfälle darstellen. Damit wird gezeigt, wo die Möglichkeiten und Limitierungen von Planungskarten liegen.

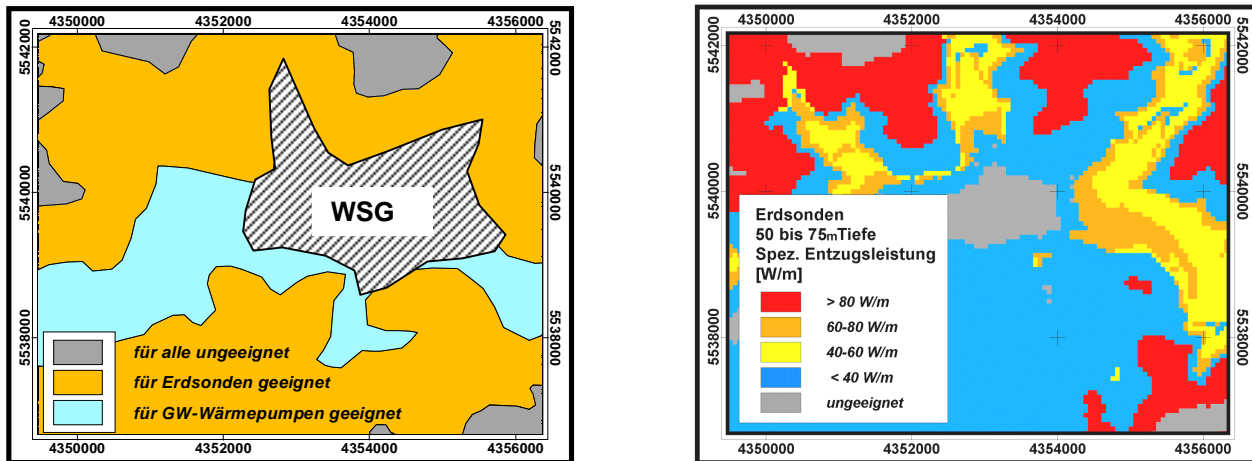


Abbildung 6-5a,b: Zwei hypothetische Beispiele für „Planungskarten“ unterschiedlicher Informationsgehalte (bei gleichem Maßstab, willkürlich). Erläuterungen im Text (unten).

Der Karte Abbildung 6-5a kann der Benutzer entnehmen, ob an seinem Standort prinzipiell die Wärmegegewinnung aus dem Untergrund mit Wärmepumpen möglich ist und welches Verfahren gegebenenfalls das geeignetere darstellt. Der Nutzer erhält nur ein Minimum an Information, die für die **konkrete Anlageplanung** kaum bedeutend ist, im Frühstadium der Planung aber wichtige Fragen zu klären hilft. Eine solche Information ist bestenfalls dazu geeignet den Anstoß zu geben, sich näher mit der Thematik zu befassen. Jede weitere Information muß vor Ort oder aus anderen Quellen gewonnen werden. Eine solche Karte entspricht damit eher dem Typus der Potentialkarte, ohne allerdings das Nachfragepotential zu berücksichtigen.

Eine Erhöhung des Informationsgehaltes des Beispiels in Abbildung 6-5a kann erfolgen, indem weitere Klassifikationen vorgenommen werden, z.B. die Aufteilung in Eignungsgrade gut, mittel, schlecht. Weiterhin kann berücksichtigt werden, daß es Gebiete gibt, in denen sowohl Erdsonden als auch Grundwasserwärmepumpen eingesetzt werden können. In der Kombination mit der Einführung von Eignungsgraden entstehen dann schon relativ viele Kategorien, da auch Fälle wie : „für Erdsonden gut geeignet - für Grundwasser schlecht geeignet“ auftreten können. Insgesamt wird es bei einer Erhöhung der Informationsdichte in zunehmendem Maße notwendig, zwischen verschiedenen Verfahren zu unterscheiden, d.h. mehrere Karten zu erstellen.

Der Informationsgehalt der Karte in Abbildung 6-5b ist dagegen weit stärker spezialisiert und bereits auf eine ganz bestimmte Fragestellung und einen bestimmten Anwendungsfall zugeschnitten. Der Benutzer kann aus dieser Karte konkrete Informationen für die Detailplanung seiner Anlage ablesen. Hier sind Verfahren und prinzipielle Eignung bereits abgeklärt, es geht nun konkret darum, die bei einem bestimmten Wärmebedarf notwendige Sondenanzahl und –tiefe zu ermitteln. Eine solche Darstellung in der entsprechenden Detailauflösung ist in hohem Maße wünschenswert. Karten dieses Typs müssen sich zwangsläufig auf ein einziges Verfahren beschränken. Zusätzlich ist es notwendig, innerhalb der einzelnen Verfahren Fallunterscheidungen zu treffen, insbesondere in Bezug auf die betrachtete Tiefe, da sich die Untergrundverhältnisse auch in dieser Dimension ändern. Eine Darstellung solcher Karten auf Papier wird dadurch praktisch unmöglich, da

sie, um eine angemessene Ablesbarkeit zu gewährleisten, in großem Maßstab ausgegeben werden müssen. Große Regionen müßten deshalb in eine Vielzahl von Einzelblättern aufgeteilt werden. Letztlich wäre ein umfangreiches Kartenwerk mit zahlreichen Einzelblättern notwendig, das teuer und zudem unkomfortabel zu handhaben wäre. In Frage kommt dagegen die Verbreitung in digitalem Format auf Datenträgern oder im Internet. Tabelle 6-6 faßt Vor- und Nachteile, Informationsgehalt und den zu leistenden Arbeitsaufwand der beiden geschilderten Extremfälle (Abbildung 6-5) zusammen. Alle bisher durchgeführten Kartierungen aus dem Bereich oberflächennaher Erdwärmennutzung stellen Karten vom Typ Abbildung 6-5a dar, während die in der vorliegenden Untersuchung vorrangig verfolgte Konzeption sich mehr an Typ b orientiert (vgl. Kap. 8).

	Informations- gehalt / Nutzen	Arbeitsaufwand	Nachteile	Vorteile
Abbildung 6-5a	gering	gering	nicht als konkrete Planungsgrundlage zu verwenden	kostengünstig zu erstellen, in gedruckter und digitaler Form leicht zu verbreiten und anzuwenden
Abbildung 6-5b	hoch bis sehr hoch	extrem hoch	Aufschlüsselung in unterschiedliche Regionen und Verfahrensgruppen erforderlich	Verbreitung in gedruckter Form unmöglich Verbreitung in digitaler Form möglich, aber aufwendig

Tabelle 6-6: Vergleich der in Abbildung 6-5a und b dargestellten Extrembeispiele von Karten des Typs „Planungskarte“.

6.2.3.1.3 Karten zur Darstellungen rechtlicher Gegebenheiten

Einen Spezialfall des Typs „Planungskarte“ stellen Karten dar, die die rechtlichen Gegebenheiten in einer Region ausweisen (vgl. dazu Kap. 3.6). Da rechtliche Limitierungen im Allgemeinen keine wertenden Faktoren sondern „constraints“ (Ausschlußkriterien) im Sinne von Kap. 6.4.1 darstellen, gehören sie zu denjenigen Kriterien, die den Anwendungsbereich von thermischen Nutzungen des Untergrundes klar begrenzen. Sie werden deshalb meist auch Bestandteil von Potentialkarten (6.2.3.1.1) und Planungskarten sein (vgl. Abbildung 6-5a). Die Darstellung der rechtlichen Limitierungen muß sich allerdings nicht auf die Darstellung von Wasserschutzgebieten beschränken, so wie das bei allen bisher durchgeführten Untersuchungen (Tabelle 6-4) der Fall ist. Um zu einer wirklich aussagekräftigen Beurteilung zu kommen, sollten auch diejenigen Vorschriften berücksichtigt werden, die das Einsatzgebiet bezüglich der möglichen Bohrtiefe limitieren, also die Maßgaben, daß keine tiefen (zweites Stockwerk) und gespannten Grundwasserleiter genutzt werden sollen. Dies kann allerdings nur geschehen, wenn die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in ihrer dreidimensionalen Ausprägung erfaßt werden (vgl. Kap. 8.2.4.3).

6.2.3.2 GIS als Planungsinstrument

Daß die Möglichkeiten eines GIS sich nicht auf die Erstellung von Karten beschränken, wurde bereits in Kapitel 6.2.1 dargelegt. Auch für den Einsatz im Bereich thermische Nutzung des Untergrundes bieten sich Lösungen an, die bei weitem über das hinaus gehen, was eine Karte im klassischen Sinn leisten kann. Um die Einsatzmöglichkeiten von GIS als Planungsinstrument zu zeigen, wird hier zunächst ein typischer Ablauf der Planung einer Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrundes am Beispiel einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage mit Erdsonden vorgestellt. Das hier vorgestellte Schema gibt im Wesentlichen Empfehlungen von SANNER (1992) wieder. Danach kann der Planungsablauf in drei Phasen gegliedert werden:

Phase 1 besteht in einer umfangreichen **allgemeinen Datensammlung**, mit der die Rahmendaten für die Anlage bestimmt und mögliche Limitierungen festgestellt werden. Dabei soll im Wesentlichen geklärt werden, um welche Nutzungsart es sich handelt, wie groß der Wärme- bzw. Kühlbedarf ist und welche technischen Voraussetzungen zu erfüllen sind. Weiterhin soll festgestellt werden, wie groß die verfügbare Grundstücksfläche ist, wie das Grundstück genutzt wird, welche Infrastruktur vorhanden ist und ob rechtliche Beschränkungen (Wasserschutzgebiete etc.) bestehen. Sodann muß ermittelt werden, welche Informationen

zum Untergrund für den Standort bereits in Form von geologischen und bodenkundlichen Karten, Bohrprofilen etc. verfügbar sind.

In **Phase 2** finden Untersuchungen vor Ort und im Labor zur **Bestimmung der relevanten Untergrundparameter** statt. Sie umfaßt je nach Art und Umfang des Vorhabens ein weites Spektrum von Arbeiten, von der Niederbringung einer Probebohrung, bis hin zur Ermittlung thermischer Gesteinsparameter im Labor.

In **Phase 3** wird mit Hilfe von Auslegungssoftware die **Feinabstimmung der Anlage** vorgenommen, z.B. die Festlegung der Sondenanzahl und -Tiefe, des Wärmepumpentyps usw. (vgl. dazu Kap. 3.2.2.2).

Ein entsprechend spezialisiertes und mit ausreichenden Daten versehenes (Geo)-Informationssystem ist (theoretisch) in der Lage, alle Aufgaben aus den Planungsphasen 1 und 3 zu erfüllen und darüber hinaus den Arbeitsaufwand in Phase 2 deutlich einzuschränken. Spezielle Untersuchungen vor Ort oder im Labor können natürlich nicht ersetzt werden. Inwieweit sich ein solches Informationssystem praktisch umsetzen läßt, hängt wiederum stark von dem Arbeitsaufwand, der bei der Erstellung des Systems geleistet werden kann, aber auch von lokalen Bedingungen ab.

Die Ermittlung des Energiebedarfs und Auslegungsberechnungen können mit externen oder im GIS implementierten Anwendungen durchgeführt werden (vgl. Kap. 6.1.2.6). Für den Komplex, der als „Datensammlung“ bezeichnet wird, bietet es sich geradezu an, Informationen in einem GIS bereitzustellen. Dies betrifft sowohl die Allgemeinen Planungsdaten (**Phase 1**) als auch Untergrunddaten (**Phase 2**). Anstatt eine Vielzahl von Kartenwerken, Behörden und Archiven zu konsultieren, können entsprechende Informationen in einem GIS per Knopfdruck abgerufen werden. Ob und in welchem Maße das GIS dazu in der Lage ist, hängt natürlich davon ab, inwieweit die entsprechenden Daten überhaupt vorliegen und wenn ja, ob in einem „GIS-tauglichen“ Format (vgl. Kap. 6.3.4). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bestehen hierbei sicherlich noch gewisse Einschränkungen. Es gibt aber durchaus eine große Vielfalt relevanter Informationen, die bereits heute mit einem hohen Flächendeckungsgrad vorliegen und ohne großen Aufwand in ein entsprechendes Informationssystem eingefügt werden können (vgl. Kap. 8.2.6).

Abbildung 6-6 zeigt schematisch das interaktive Zusammenwirken von Benutzer, GIS und externen Anwendungen im GIS-basierten Planungsablauf. Sowohl die Auslegungs- als auch die für die Genehmigungsplanung notwendigen Daten können in einem Umfang vom GIS zur Verfügung gestellt werden, der von verschiedenen Faktoren abhängig ist.

Es ist über das Schema in Abbildung 6-6 hinausgehend auch möglich, das System mit „Entscheidungskompetenz“ auszustatten, das heißt Regeln zu implementieren, die es dem System ermöglichen, selbständig oder in der Interaktion mit dem Benutzer die bestmögliche Entscheidung zu treffen (Expertensystem, vgl. Kap. 6.4.1.3). Die hier geschilderten Möglichkeiten des Einsatzes von GIS in der konkreten Anlagenplanung stellen, wie erwähnt, **potentielle** Fähigkeiten von GIS dar, was nicht notwendigerweise bedeuten soll, daß es auch **sinnvoll** ist diese Möglichkeiten voll auszuschöpfen. Hier müssen immer Aufwand-Nutzen-Aspekte sowie die Wünsche der möglichen Zielgruppen beachtet werden (Kap. 9.3). Eine technische Realisierbarkeit ist allerdings gegeben (vgl. Kap. 6.4.1.3 und 8.2.6).

6.2.3.3 Kombination von Kartierungen und Planungsinstrumenten

GIS als eigenständige und vollwertige Planungshilfsmittel und GIS als Werkzeuge zur Erstellung planungsrelevanter Karten stellen keine sich gegenseitig ausschließenden Alternativen dar, sondern können bzw. sollten kombiniert eingesetzt werden. Sie beruhen im Wesentlichen auf der gleichen Datenbasis und unterscheiden sich letztlich vor allem durch die Art des Datenzugriffs. Bei einer ausschließlichen Verwendung des Informationssystems am Computer (vgl. 6.2.1.4), verschwinden die Grenzen ohnehin, weil der Kartenbegriff dort eine ganz andere Dimension erhält als der traditionelle, von einer gedruckten Information ausgehende.

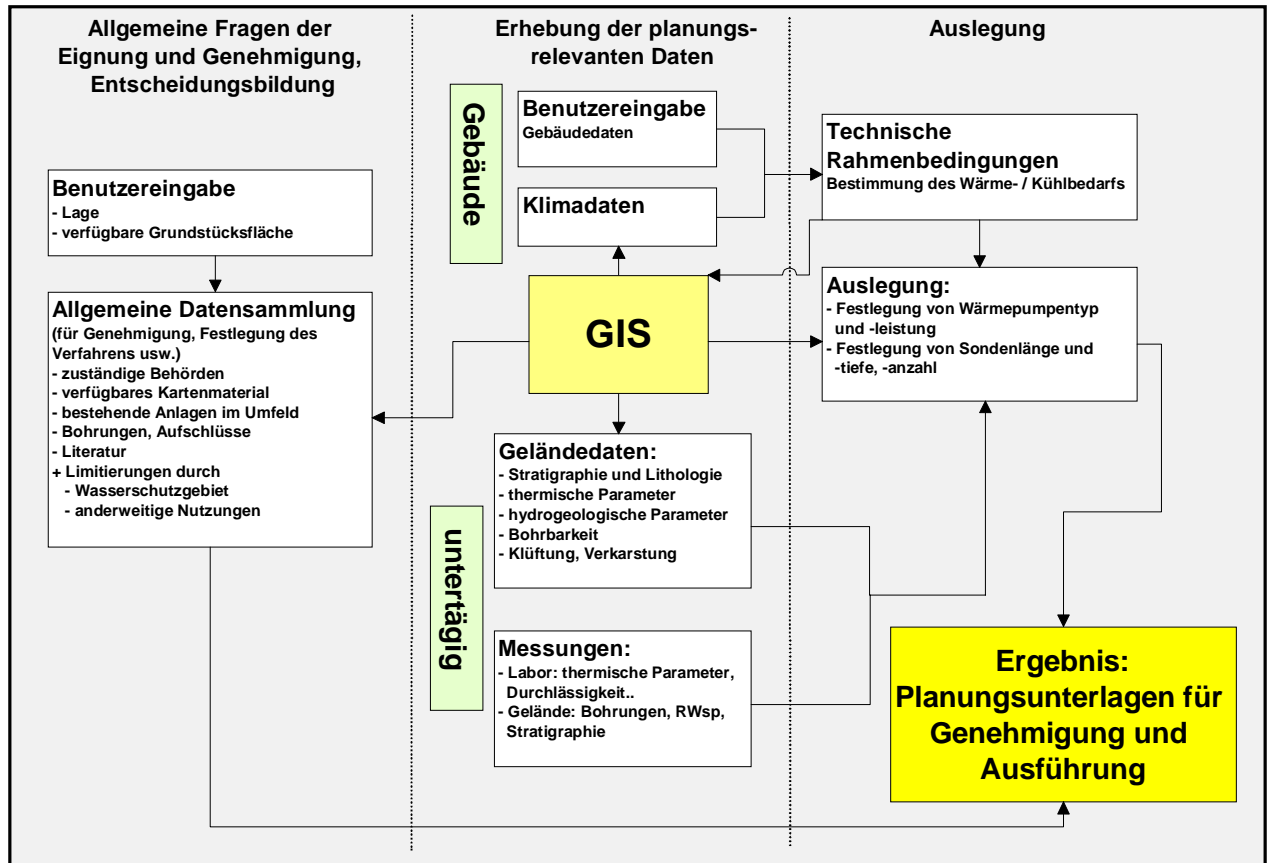


Abbildung 6-6: Planungsablauf für eine Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrundes (hier Erdwärmesonden) in einem spezialisierten Informationssystem (Expertensystem). Vom „GIS“ weggerichteten Pfeile weisen Daten aus, die das GIS dem Benutzer bzw. anderen Anwendungen für weitere Berechnungen zur Verfügung stellen kann, darauf hin gerichtete Pfeile stellen die Information dar, die dem GIS zur Verfügung gestellt werden muß.

6.3 GIS - Daten

6.3.1 Bedeutung von Daten im GIS

Hauptaufgabe eines GIS ist die Organisation und Bereitstellung von Daten zu Analyse- oder Informationszwecken. Damit ist die Leistungsfähigkeit des Informationssystems im Wesentlichen abhängig von der Anzahl, der räumlichen Verteilung und der Qualität der Daten die es beinhaltet. In der Literatur werden für den Anteil der Arbeiten zur Sammlung und Eingabe der Daten in GIS-Projekten am Gesamtaufwand Werte von ca. 60-80% genannt (z.B. BERNHARDSSEN bzw. 1999; DEMERS, 1997). Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung war es nicht möglich, einen solchen Aufwand zu betreiben und für den gesamten Untersuchungsraum Unterfranken eine umfassende Datengrundlage zu erstellen. Dennoch lag der geschätzte Aufwand für den Umgang mit Daten, von der Datenrecherche bis zu ihrer analysefähigen Aufbereitung, bei weit mehr als 50% des gesamten Arbeitsaufwands.

In der Planungs- und Konzeptionsphase eines GIS (vgl. Kap. 6.1.2.8) muß zunächst ermittelt werden, welche Daten erforderlich sind, wobei es Abstufungen zwischen unbedingt notwendigen und weniger wichtigen gibt, ob und wo diese Informationen bereits vorhanden sind oder erst erhoben werden müssen, inwieweit sie zugänglich und welcher Aufwand zu ihrer Aufbereitung notwendig ist. Entscheidend sind auch Überlegungen zur Organisation und Formatierung der Daten innerhalb des Informationssystems. Erst wenn alle erforderlichen Daten in Formaten und Strukturen vorliegen, in denen sie sinnvoll miteinander in Beziehung gesetzt werden können, kann mit der eigentlichen Auswertung des Informationssystems begonnen werden.

Da der Prozeß der Datenbeschaffung, -bearbeitung und -eingabe so eminent wichtig für die Planung des hier vorgestellten, und letztlich aller (Geo)- Informationssysteme ist, lohnt sich die nähere Beschäftigung damit. Die folgenden Ausführungen geben kurz die wesentlichen allgemeingültigen Gesichtspunkte wieder und orientieren sich dabei vorrangig an den Gegebenheiten der vorliegenden Untersuchung.

6.3.2 Datentypen, -quellen und -dimensionen

Grundsätzlich können in einem GIS nach Herkunft, Qualität und Bearbeitungszustand drei verschiedene Datentypen unterschieden werden (SAURER & BEHR, 1997):

- **Primärdaten:** Meßwerte oder Zahlen, die vor Ort ermittelt wurden (gemessen, gezählt, durch Befragung etc.).
- **Sekundärdaten:** Aufbereitete Primärdaten, die z.B. in Form von Karten, Diagrammen und statistischen Auswertungen dargestellt werden.
- **Tertiärdaten:** Aus Sekundär- oder Primärdaten erstellte, abgeleitete, modellierte oder interpolierte Datensätze.

Informationen, die Datensätze näher charakterisieren, werden als „Metadaten“ bezeichnet. Metadaten sind z.B. Kartenprojektionen, Meßmethoden, zeitliche und räumliche Gültigkeit, Vor- und Nachbearbeitung, Kontrollmechanismen, Qualitätsangaben, Quellenangaben und andere (SAURER & BEHR, 1997). Den Metadaten kommt eine hohe Bedeutung zu, da sie Auskunft darüber geben, welche Aussagekraft, Genauigkeit und Verlässlichkeit von einem Wert oder einer aus ihm abgeleiteten Aussage zu erwarten ist.

Daten können über die o.g. Grobgliederung hinaus nach einer Vielzahl von weiteren Kriterien typisiert werden. Tabelle 6-7 gibt einen Ausblick auf mögliche Merkmale von Daten oder Informationen, die in einem GIS verwendet werden können:

Merkmal	Ausprägungen
Datenmodell	Raster, Vektor; vgl. Kap. 6.1.2.3
Objekttyp	Punkt, Linie, Fläche; vgl. Kap. 6.1.2.1
Dimension	1-, 2-, 2½-, 3-dimensional; vgl. Kap. 7.2
Genauigkeit	Auflösung, Maßstab; vgl. Kap. 6.3.3
Zeit, Zeitangaben, Alter	zeitlich variable Informationen, Zeitreihen
Darstellungsart	Karten, Text, tabellarisch, Modell
Speicherung	analog, digital (Papier, Mikrofiche, Speichermedium, Datenorganisation)
Eingabeverfahren (digital)	manuell, halb-(automatisch)
Erhebungsweise	Meßgeräte, Zähl-, Auswerteverfahren
Verarbeitungs- und Analysemethoden	Modelle, Interpolationsverfahren, mathematische und statistische Methoden
Ziel der Erhebung	wissenschaftlich, kommerziell, institutionell
Eigentum, Rechte	privat, öffentlich, militärisch
Verfügbarkeit	Aspekte der Verfügbarkeit s. Kap. 6.3.4

Tabelle 6-7: Charakteristika von Datensätzen in GIS.

Datensätze lassen sich meist nicht anhand von einzelnen Merkmalen eindeutig charakterisieren. Aus den in Tabelle 6-7 genannten Charakteristika entstehen durch Kombination eine Vielzahl von weiteren Kategorien. So bestehen z.B. fast grundsätzlich Abhängigkeiten zwischen den Aspekten „Alter“, „Genauigkeit“ und „Speicherungs- und Darstellungsart“ von Daten. In der Konzeptionsphase eines GIS ist es von entscheidender Bedeutung, jeden zur Verwendung vorgesehenen Datensatz hinsichtlich der in Tabelle 6-7 genannten Merkmale eingehend zu prüfen. Dabei geht es nicht nur darum festzustellen welche quantitative und qualitative Aussagekraft eine Information besitzt, sondern auch um den Arbeitsaufwand der notwendig ist, um auf diese Information im GIS zugreifen zu können (vgl. Kap. 6.3.6.3). Dieser Aufwand erschließt sich in manchen Fällen nicht sofort aus Hauptmerkmalen eines Datensatzes. So kann beispielsweise bei Daten, die in digitaler Form vorgehalten werden, nicht notwendigerweise davon ausgegangen werden, daß dies die Zugänglichkeit und den Arbeitsaufwand zur Verarbeitung dieser Daten maßgeblich verringert. Konkret seien hier die Bohrungsdatenbanken des BayGLA und des BayLfW (Fachdatei Hydrogeologie) genannt, bei denen bislang allein das Auffinden und Auslesen der Daten einen extrem hohen Aufwand darstellt (freundl. mündl. Mittlg. Dr. König, WWA Würzburg, Mitarbeiter des BayGLA, München, 1998, 1999). Entsprechende Daten des BayGLA konnten deshalb in dieser Untersuchung nicht verwendet werden.

Wesentlich ist, daß in einem GIS sowohl für den Bearbeiter als auch für den Benutzer transparent sein sollte, welche Ursprungsdatensätze (mit allen ihren beschreibenden Merkmalen) eingegangen sind und wie diese verarbeitet, modifiziert und ausgewertet wurden. Erfahrungen aus dieser Untersuchung zeigen, daß dies kaum möglich ist, da allein die angemessene Beschreibung der verwendeten (Roh-)Datenquellen einen enormen zeitlichen Aufwand erfordern würde.

6.3.3 Datenqualität

Ein wesentliches Kriterium für die Qualität eines Informationssystems ist die Genauigkeit und Verlässlichkeit der verwendeten Daten. In der einschlägigen Literatur (vgl. Kap. 6.1.1) sind zum Aspekt der Datenqualität deshalb umfangreiche Ausführungen zu finden. Eine umfassende Betrachtung des Qualitätsaspektes führt z.B. WILKE (1995) durch. Allein die Darstellung der möglichen Fehlerquellen bei der Aufbereitung und Umwandlung (z.B. Digitalisierung) von Daten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Ein großer Unsicherheitsfaktor besteht zusätzlich darin, daß die Metadaten (s.o.) unzureichend sind. Die Daten, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, stammen aus den unterschiedlichsten Quellen, wobei nicht immer nachvollziehbar ist, wie diese Daten erhoben worden sind und welche Veränderungen sie seitdem erfahren haben. In diesem Zusammenhang ist auch wichtig, ob man Zugriff auf Rohdaten hat oder nur auf kompilierte, interpolierte oder sonstwie bearbeitete Daten. Es ist in den allermeisten Fällen nicht möglich nachzuprüfen, welche Genauigkeit die Informationen haben. Eine Möglichkeit dazu wäre das „Nachmessen“ vor Ort, eine

andere der Abgleich mit Daten, deren Genauigkeit bekannt ist. Ersteres ist fast immer zu aufwendig, letzteres scheitert häufig an der fehlenden Verfügbarkeit entsprechend genauer Daten.

In einer hier exemplarisch vorgestellten Untersuchung zur Qualität von Daten, wurden für die Ansatzpunkte von fast 1500 Bohrungen aus dem Untersuchungsgebiet die entsprechenden Höhenwerte aus dem Digitalen Höhenmodell ermittelt. Diese Werte wurden mit den Höhenangaben verglichen, die in den entsprechenden Datenquellen (Bohrungsdatenbanken, Kap. 6.3.6.4.1) angegeben sind. Abbildung 6-7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der vorgefundenen Abweichungen für die Gesamtheit der Daten. Es zeigt sich, daß in den meisten Fällen eine sehr gute Übereinstimmung besteht. So ergibt sich bei 60% der Bohrersatzpunkte eine vertikale Abweichung von weniger als $\pm 3\text{m}$ (s. Abbildung 6-7). Bei immerhin 10% der Daten werden allerdings Abweichungen von größer 17m, bei 5% Abweichungen von über 50m festgestellt. Die extremsten Differenzen liegen bei über 100m. Bei fast 1500 Einzeldaten ist es nicht möglich, für jeden Fall zu klären, wo die Ursache für den Fehler liegt. Korrekturen sind deshalb nicht möglich.

Bedenkt man, daß die Ansatzhöhen von Bohrungsdaten vergleichsweise „harte“ Daten darstellen, die z.B. bei der Erstellung von Untergrundmodellen (Kap. 7.2.3) wichtige Bezugspunkte darstellen, so sind die hier festgestellten Fehler immerhin bedenklich. Eine weitergehende Diskussion der Datenqualität, der Fehlerquellen sowie möglicher Kontroll- und Korrekturmechanismen kann hier in Anbetracht der vielen unterschiedlichen Datenquellen und Verarbeitungsoperationen nicht erfolgen. Es soll aber darauf hingewiesen werden, daß viele der in dieser Untersuchung verwendeten Daten weit stärker fehlerbehaftet sind als die im Beispiel angeführten Höhen der Bohrersatzpunkte.

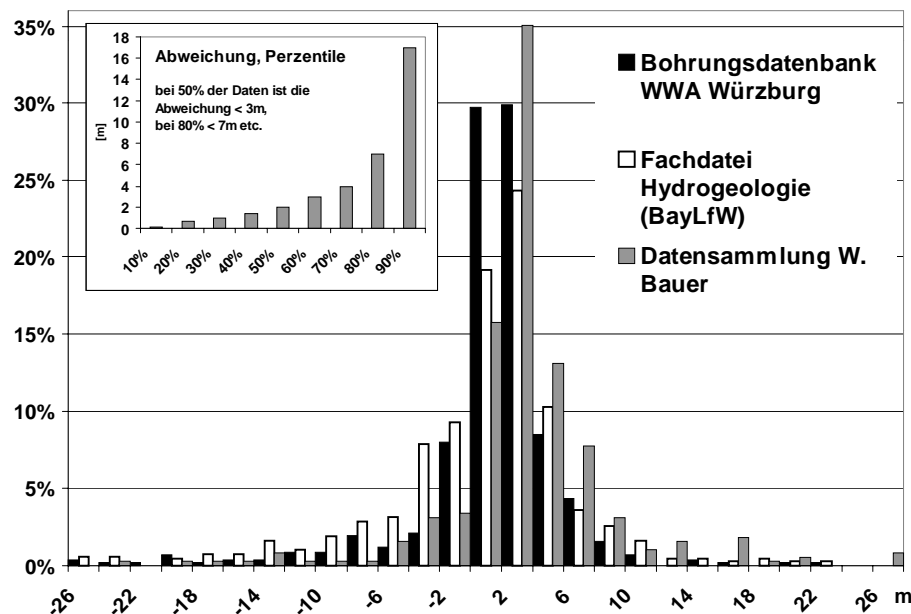


Abbildung 6-7: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Abweichungen von Bohrersatzpunkten im DHM (Höhenwerte für die entsprechende Rechts- und Hochwerte), zu den in den Datenquellen angegebenen Ansatzhöhen für insgesamt 1476 Bohrungen aus drei Datenquellen (vgl. Kap. 6.3.6.4.1).

6.3.4 Datenverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Daten ist ein, oder sogar **der** limitierende Faktor für die Qualität vieler GIS-Untersuchungen. So besteht nach HEINRICH (1999) „... eine große Diskrepanz zwischen dem Potential von GIS und Modellen und ihrer Anwendung in der Planungspraxis...“, was er auf die mangelhafte Verfügbarkeit von Geodaten zurückführt. So sind inzwischen zwar Basisdaten (Topographie) in ausreichendem Umfang vorhanden (wenngleich oft teuer), mangelhaft ist jedoch die Verfügbarkeit von Spezialdaten.

Daten können aus den verschiedensten Gründen „**nicht verfügbar**“ sein. So können Daten vorhanden, aber im Projekt nicht nutzbar, weil zu teuer sein. Ebenso kann auf viele Daten nicht zugegriffen werden, weil sie aus Gründen des Datenschutzes oder bestimmter Interessenlagen nicht an Dritte weitergegeben werden dürfen. Im Folgenden werden einige Aspekte der Verfügbarkeit von Daten näher charakterisiert:

1. **Erhebbarkeit:** Dieser Aspekt betrifft den Aufwand, der getrieben werden muß, um Primärdaten vor Ort zu erheben. Es kann unterschieden werden nach Daten, die leicht zu gewinnen sind, also evtl. im Rahmen des GIS-Projekts direkt erhoben werden können (und damit **verfügbar** gemacht werden) und solchen, die schwer zu erheben sind und deshalb nur dann verwendet werden können, wenn sie aus anderen Quellen bezogen werden.
2. **Allgemeines Interesse:** Informationen, die von allgemeinem Interesse sind (z.B. Grundwasserstände), sind im Allgemeinen besser verfügbar, als solche, die nur in Spezialfällen benötigt werden (z.B. Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen), obwohl der Aufwand zu ihrer Erhebung ähnlich hoch ist.
3. **Bearbeitungsstand:** Betrifft Informationen, die routinemäßig flächendeckend erhoben werden (z.B. geologische Kartierungen), aber aus verschiedenen Gründen noch nicht flächendeckend vorliegen. Oft können solche Lücken mit Hilfe anderer Datenquellen (größerer Maßstab) ausgefüllt werden. Bei längerfristig angelegten GIS ist es möglich, das Erscheinen solcher Daten einzuplanen.
4. **Zugänglichkeit:** Daten, die bereits erhoben wurden, aber nicht ohne weiteres zugänglich sind. Betrifft z.B. viele Daten, die von Privatleuten/Firmen gewonnen wurden und von Ämtern nur gegen die Vorlage einer Genehmigung durch den Eigentümer herausgegeben werden. Sehr verbreitet ist das Problem, daß Daten zwar vorhanden sind und auch abgegeben werden würden, aber Personal fehlt um diese Daten zu suchen, zu vervielfältigen und zu verteilen.
5. **Datenzustand:** Daten liegen in den unterschiedlichsten Formen vor. Auf Papier, Microfiche, als Karten auf Papier in verschiedener Qualität und Auflösung, tabellarisch oder als Text, handschriftlich oder gedruckt. Bei Kartendarstellungen ist entscheidend, ob Koordinatensysteme aufgedruckt und Projektionsinformationen angegeben sind, ob durch Kopieren und Umzeichnen Verzerrungen aufgetreten sind usw. Bei EDV-Datenbeständen, insbesondere älteren Datums, stellt sich häufig das Problem, daß durch Kompatibilitätsprobleme Teilinformationen bei der Weitergabe an Dritte verloren gehen (z.B. der Verlust von Objektattributen bei der Konvertierung von GIS-Daten in das dxf-Format).
6. **Preis:** Ein maßgebliches Kriterium, das zwar nicht die grundsätzliche Verfügbarkeit, sehr wohl aber die „praktische“ Verfügbarkeit betrifft. Nicht nur private Datenanbieter verlangen für Spezialdaten hohe Preise.

Der Aspekt der „Datenverfügbarkeit“ spielt in der GIS-Planungsphase (Kap. 6.1.2.8) eine entscheidende Rolle. Auch in der vorliegenden Untersuchung wurde die Erfahrung gemacht, daß sich die Projektkonzeption vorrangig an der Datenverfügbarkeit und nicht etwa an der primären Fragestellung orientiert!

6.3.5 Datenbeschaffung

Die Beschaffung von Basis- und Spezialdaten stellt einen überaus zeit-, kosten- und arbeitsintensiven Prozeß dar, bei dem die unterschiedlichsten Gegebenheiten zu berücksichtigen sind. Diese sind so vielfältig, daß sie hier nicht im Einzelnen genannt werden können. Es sei nur der Hinweis erlaubt, daß bei der Bearbeitung von GIS-Projekten ein erheblicher Anteil des eingesetzten Zeitaufwands darauf verwendet werden muß, Daten, auch wenn deren Vorhandensein und Verfügbarkeit (nach Kap. 6.3.4) längst geklärt sind, zu beschaffen. Auf die entsprechenden Maßnahmen und die dabei auftretenden Schwierigkeiten soll hier nicht eingegangen werden, da sich die Gründe für diesen Umstand teilweise jeder rationalen wissenschaftlichen Betrachtungsweise entziehen.

6.3.6 Daten in der vorliegenden Untersuchung

6.3.6.1 Ermittlung der notwendigen Daten

Die Eignung eines Standorts für die thermische Nutzung des Untergrundes wird im Wesentlichen durch drei Faktorengruppen bestimmt:

1. **Naturräumliche Faktoren**, die sich aufschlüsseln lassen in:

- Geologisch-physikalische Faktoren (lithologische, hydrogeologische und thermische Eigenschaften des Untergrunds)
- Klimatische Faktoren (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Bodenfeuchtigkeit)
- Geomorphologische Faktoren (Hangneigung, Geländeorientierung)

2. **Infrastrukturelle Faktoren** (z.B. Besiedlungsdichte, Erschließungspotential, Baubestand)

3. **Rechtliche Faktoren** (Genehmigungsfragen, Nutzungsbedingungen)

Aus diesen drei Faktorengruppen läßt sich ableiten, welche Daten erforderlich sind, um einen Standort zu charakterisieren. Zunächst ist es allerdings erforderlich zu definieren, welche Zielsetzung mit dem GIS verfolgt werden soll. So sind für eine Ermittlung und Darstellung des Nutzungspotentials andere Informationen erforderlich, als für die Schaffung einer Planungsgrundlage. Durch die Zielsetzung wird aber nicht nur festgelegt, welche Daten erforderlich sind, sondern auch die notwendige Detailauflösung und Qualität dieser Daten. Fragen die im Zusammenhang mit unterschiedlichen Zielsetzungen stehen werden in Kap. 6.4.2.1 näher erläutert.

Ob und inwieweit ein **primär** als „notwendig“ festgelegter Datensatz auch tatsächlich verwendet wird, ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

- der Verfügbarkeit der Daten (6.3.4),
- der aus der Verfügbarkeit abgeleiteten (neu-definierten) Zielsetzung.

Grundsätzlich gilt, daß das Angebot an Daten niemals den Anforderungen gerecht werden kann, die sich aus einer theoretischen Notwendigkeit heraus ableiten lassen. Aus diesem Grund muß bei GIS-Projekten häufig eine Neudefinition der Zielsetzung erfolgen, sobald die Verfügbarkeit der als notwendig festgelegten Daten geprüft wurde.

6.3.6.2 Charakterisierung der verwendeten Datenquellen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde eine Vielzahl unterschiedlichster Daten aus den verschiedensten Quellen zusammengetragen und verarbeitet. Es ist nicht möglich alle diese Quellen, soweit das nicht im Zusammenhang mit der Beschreibung bestimmter Aspekte an entsprechender Stelle erfolgt, zu nennen und näher zu charakterisieren. Bezüglich der erforderlichen Aufbereitungsarbeiten können die verwendeten Datenquellen in Gruppen eingeteilt werden (Tabelle 6-8):

Speicherung / Objektmodell / Typ	Beschreibung	Beispiel aus der vorliegenden Untersuchung	Quellen (Beispiele)	Bearbeitung	
				Schritte (teilweise optional)	Aufwand
analog	Datenpunkte, Linien und Flächen, die aus gedruckten Kartendarstellungen wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Gutachten und offiziellen Kartenwerken übernommen wurden	Aufschlüsse auf Blatt Aschaffenburg (Kap. 4.3.8.7.1), Strukturpläne (Kap. 7.2.3.1.1)	wiss. Veröffentlichungen	<ul style="list-style-type: none"> - scannen - vektorisieren (manuell, halbautomatisch) - georeferenzieren - attributieren 	sehr hoch
	Tabellarisch wiedergegebene Punktdaten in gedruckter Form, Herkunft s.o.	Schichtenverzeichnisse	wiss. Veröffentlichungen	<ul style="list-style-type: none"> - Eingabe - (Koordinatentransformation) - Anpassung von Einheiten 	hoch
	Informationen (Werte) die in Texten enthalten sind	Mächtigkeitsdaten Mittlerer Muschelkalk (Kap. 7.2.3.1.3.8)	wiss. Veröffentlichungen	<ul style="list-style-type: none"> - Eingabe - Festlegung geographischer Bezüge - verschieden 	(sehr) hoch
digital: Raster	digitale Geländemodelle, Klimakarten	DHM von Bayern, Satellitenbilder	LVA, DWD, Internet	<ul style="list-style-type: none"> - (keine) - Ausschnitte bilden 	sehr gering
	digitale topographische Rasterkarten	TK50, TK200	LVA, private Anbieter	<ul style="list-style-type: none"> - unterschiedlich 	gering
digital: Vektor (Flächen, Linien)	Computergrafiken vom CAD-Typ (dxf) mit Geometrie-, aber ohne Sachattribute	ATKIS500	LVA, Firmen	<ul style="list-style-type: none"> - Transformation der Referenzierung - Attributierung 	mittel, hoch
	„echte“ GIS-Daten (Objekte) mit Geometrie- und Sachattributen	GK500, GÜK200, ATKIS25	BayGLA, BGR, Firmen	<ul style="list-style-type: none"> - Transformation der Referenzierung 	gering
digital: Vektor (Punkte)	Datenbanken: vorwiegend tabellarische, digital gespeicherte Daten	Bohrungsdatenbank WWA Würzburg	Ämter	<ul style="list-style-type: none"> - Neuberechnung - Anpassung von Einheiten - Koordinatentransformation 	gering, mittel

Tabelle 6-8: Typisierung der Datenquellen, die in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurden, bezüglich Herkunft und Zustand der Rohdaten sowie Nachbearbeitungsbedarf.

6.3.6.3 Datenaufbereitung

Im Zeitraum, in dem diese Untersuchung durchgeführt wurde, lagen die für die GIS Analyse notwendigen Daten nur zu einem sehr geringem Teil in einer Form vor, die einen unmittelbaren Einsatz ohne vorherige Aufbereitung erlaubte (vgl. Tabelle 6-8). Eine genaue Beschreibung der zur Aufbereitung notwendigen Arbeitstechniken, Berechnungsmethoden und der eingesetzten Software kann hier mit Rücksicht auf den Umfang der entsprechenden Arbeiten nicht erfolgen. Vielmehr werden hier einige wenige Gesichtspunkte hervorgehoben, die von allgemeinem Interesse sind.

Herstellung einheitlicher geographischer Bezüge: In der vorliegenden Untersuchung wurde für alle Daten das Gauß-Krüger Koordinatensystem bezogen auf den 12. Meridian (4. Meridianstreifen, GK4) verwendet. Da sich das Arbeitsgebiet zu beiden Seiten der Grenze zwischen dem 3. und 4. Meridianstreifen im Gauß-Krüger-System befindet (10°30' Grad Ost) war es erforderlich, Datenquellen, die den 3. Meridianstreifen als Bezugssystem verwenden (i.A. alle großmaßstäbigen Karten westlich 10°30'), in den 4. zu überführen. Der 4. Meridianstreifen wurde gewählt, da nahezu alle digitalen Karten und Daten, die von offizieller Seite in Bayern herausgegeben werden, auf diesen referenziert sind.

Eine große Anzahl der verwendeten Datenquellen stellt Karten auf Papier dar. Um solche Informationen digital in GIS verfügbar zu machen, muß ihnen (nach der Digitalisierung) ein geographischer Bezug zugewiesen

werden. Bei den Papiervorlagen sind zwei Qualitäten zu unterscheiden: solche, für die das verwendete Bezugssystem bekannt und in Form von Koordinatengittern oder Paßkreuzen eingezeichnet ist und solche, auf denen diese Angabe fehlen. Zur ersten Gruppe gehören im Allgemeinen die amtlichen Karten der Landesvermessungsämter und die auf gleicher Unterlage erstellten geowissenschaftlichen Karten. Im Gegensatz dazu haben Karten aus (älteren) wissenschaftlichen Veröffentlichungen und auch viele Kartenbeilagen in Veröffentlichungen von BayGLA und BayLfW (z.B. DOBNER & WEINELT, 1980; BAYGLA, 1993) keinerlei Koordinatenangaben. Viele derartige Karten weisen unsystematische Verzerrungen auf, die teilweise nur unter enormen Aufwand und oft nur unzureichend korrigiert werden können. Die Lageabweichungen können dabei bis zu 10% des Maßstabsnenners (z.B. 5000m bei Maßstab 1:500.000 betragen). Alle durchgeführten Maßnahmen zur Georeferenzierung verwenden als Referenz bekannte Koordinaten der digitalen amtlichen Karten und Datensätze (ATKIS25, TK200 digital, TOP50, TOP200).

Digitalisieren und Attributieren: Um Daten unterschiedlichster Art und Herkunft digital verfügbar zu machen, wurden im Verlauf der Untersuchung eine Vielzahl von Einzelkarten digitalisiert. Objekte, die auf Papierkarten dargestellt sind, können entweder auf einem Digitalisieretablett oder am Bildschirm, anhand einer gescannten Vorlage, vektorisiert werden. Meist ist das Digitalisieren am Bildschirm nach Erkenntnissen des Autors komfortabler, genauer, schneller und weniger fehleranfällig. Nur in Einzelfällen, wo die Qualität und Art der Vorlage das erlaubt, wurde die Möglichkeit der automatischen Vektorisierung angewendet (s.a. Kap. 7.1 und 7.2.3.1). Den digitalisierten Objekten einer Karte müssen die entsprechenden Objektattribute zugewiesen werden - ein Vorgang, der z.B. bei Punktdaten aufwendiger ist als das Digitalisieren der Punkte selbst.

Der Aufwand, der innerhalb dieser Untersuchung zur Digitalisierung von analogen Daten getrieben wurde, beläuft sich größenordnungsmäßig auf etwa 25% des eingesetzten Zeitaufwandes. Dazu ist anzumerken, daß eine Vielzahl interessanter Daten aus Zeitgründen nicht digitalisiert werden konnte.

Erstellung von digitalen Rasterkarten aus Isoliniendarstellungen: Dem Prozeß der Verarbeitung von Isoliniendarstellungen kommt eine sehr entscheidende Bedeutung zu, da eine Vielzahl von Datenquellen im geowissenschaftlichen und in anderen Bereichen diese Darstellungsart nutzt, um flächenhafte Verteilungen, die aus einem Kollektiv von Einzelmeßpunkten interpoliert wurden, in Karten wiederzugeben. Im GIS sind Isolinien als solche allerdings nur zur Darstellungszwecken, nicht aber für Analysen und Berechnungen einsetzbar (s. Kap. 6.1.2.3). Hierzu müssen sie in Rasterdarstellung umgesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt etwa 100 analoge Isoliniendarstellungen in Raster überführt (Digitalisieren, Vektorisieren, Attributieren, Extraktion der Stützpunkte, Interpolation; vgl. auch 7.2.3.1.2).

Interpolation und Regionalisierung: In sehr vielen Fällen sind bei der Verwendung geowissenschaftlicher und anderer Daten in GIS nicht Meßwerte an diskreten Punkten, sondern die flächenhafte (im Einzelfall auch räumliche) Verteilung des betreffenden Parameters über ein größeres Gebiet von Interesse. Aus unregelmäßig verteilten Datenpunkten kann zu diesem Zweck durch Interpolation ein regelmäßiges Raster erzeugt werden. Ein solches Raster ermöglicht dann für jeden beliebigen Punkt die Angabe eines Werteattributs. Interpolationen sind insbesondere auch immer dann erforderlich, wenn Isoliniendarstellungen in Raster überführt werden sollen, was zunächst unsinnig erscheint, da Isolinien vermeintlich schon regionalisierte Parameter darstellen (s. dazu Kap. 7.2.3.1.3).

Interpolationsverfahren und ihre statistischen und mathematischen Grundlagen nehmen einen breiten Raum in der Literatur zu Geostatistik und Geoinformatik ein (z.B. DAVIS, 1986; BILL, 1999b). Auf die Vorstellung der in dieser Untersuchung eingesetzten Interpolationsverfahren wird deshalb verzichtet.

6.3.6.4 Beschreibung der verwendeten Datensätze und Datenquellen

Es wurde bereits dargelegt, daß es nicht möglich ist, alle verwendeten Datensätze hinsichtlich ihrer Qualität, Herkunft, Aussagekraft und ähnlicher Charakteristika (vgl. Tabelle 6-7) zu beschreiben. Im Folgenden werden deshalb nur die wichtigsten Datengruppen genannt.

6.3.6.4.1 Untergrunddaten - Geologie

Geologische Karten bieten als Darstellung der oberflächlichen Verbreitung stratigraphischer Einheiten erste Anhaltspunkte für den geologischen Aufbau des Untergrundes. Vom Vorhandensein einer Einheit an der Oberfläche kann nicht direkt auf deren vertikale Erstreckung im Untergrund geschlossen werden. Im Rahmen von Übersichtsdarstellungen grober Auflösung ist es aber dennoch möglich, Anhaltspunkte bezüglich der Eignung eines Standortes ableiten (vgl. z.B. Kap. 5.2.3.4). Für höheraufgelöste GIS-basierte Standortbewertungen sind geologische Karten dagegen weit weniger wichtig als angenommen werden könnte (vgl. Kap. 7.2.1). Eine wesentliche Bedeutung kommt geologischen Karten allerdings überall dort zu, wo keine ausreichenden Datengrundlagen für die Erstellung von hochauflösenden Untergrundstrukturmodellen vorliegen oder es aus zeitlichen oder finanziellen Gründen nicht möglich ist solche anzufertigen. Dort sind sie die wichtigste Informationsquelle über den Untergrundaufbau.

Geologische Karten werden von den geologischen Landesämtern und der BGR herausgegeben. Darüberhinaus werden geologische Kartierungen regelmäßig im Rahmen von Diplomarbeiten angefertigt. Bayern wird derzeit flächendeckend ausschließlich von der GK1000 und der GK500 abgedeckt, die beide inzwischen auch in digitalem Format verfügbar sind. Andere Kartenwerke (GÜK200 und GK25) weisen noch große Lücken auf und sind nur begrenzt oder nicht digital vorhanden. Die Verfügbarkeit von offiziellen geologischen Karten für das Untersuchungsgebiet ist in Tabelle 6-9 dargestellt. Den derzeitigen Bearbeitungsstand der GK25 zeigt Abbildung 4-1, in der auch die Zahl der vorhandenen Diplomkartierungen verzeichnet ist.

Name	Kurz-bez.	Maßstab	Anzahl			Fläche digital [%]
			gesamt	vor-handen	digital	
Geologische Karte von Deutschland	GK1000	1:1000000	1	1	1	100
Geologische Karte von Bayern	GK500	1:500000	1	1	1	100
Geologische Übersichtskarte von D.	GÜK200		5	5	2	ca. 30
GK25	Bayern	1:25000	91	35	0	0
	Hessen		4			
	BW		3			
Dipl.-Arb.Universität Würzburg		1:10000 (1:5000)	--	ca. 150	0	0

Tabelle 6-9: Verfügbarkeit neuerer geologischer Karten für das Untersuchungsgebiet.

Es ist davon auszugehen, daß es weit mehr Kartenmaterial gibt, als in Tabelle 6-9 angegeben. Dies betrifft vor allem großmaßstäbige (1:25.000 bis 1:5.000), also für Zwecke der Standorterkundung besonders interessante Karten. Solche Karten werden im Rahmen von Diplomarbeiten, Dissertationen und anderen wissenschaftlichen Arbeiten sowie von kommerziellen Gutachten angefertigt. Es ist nur unter hohem Aufwand möglich zu recherchieren, für welche Gebiete solche Karten vorliegen. Zudem ist im Allgemeinen fraglich, inwieweit diese Karten zugänglich und nutzbar sind, da sie kein öffentliches Gut, sondern i.A. Besitz der Autoren darstellen. Dies gilt im Übrigen auch für die im Rahmen dieser Untersuchung verwendete Diplomarbeiten der Universität Würzburg, die bei einer kommerziell orientierten Verwendung nicht ohne weiteres herangezogen werden können. Zu berücksichtigen sind im Einzelfall auch die zahlreichen älteren Kartenwerke („Positionsblätter“ u.ä.).

Einen unermeßlichen Informationsschatz stellen die Erläuterungen zu den geologischen Karten dar. Dies betrifft sowohl die amtlichen geologischen Karten als auch Diplomkartierungen. Letztere enthalten häufig auch Spezialdaten in einer Detailgenauigkeit und einem Umfang, den andere wissenschaftliche Untersuchungen bzw. die entsprechenden Veröffentlichungen nicht bieten können.

Bohrungsdaten stellen die wichtigsten und darüberhinaus die einzigen (relativ: vgl. Kap. 6.3.3) verlässlichen Informationen über den Untergrund dar. Nahezu alle Daten, die in den folgenden Abschnitten ge-

annt werden, gehen in irgendeiner Form auf Bohrungen zurück. Man kann davon ausgehen, daß im Untersuchungsgebiet eine hohe Anzahl von Bohrungen durchgeführt wurden, von denen aber nur ein vergleichsweise geringer Prozentsatz tatsächlich „GIS-verfügbar“ ist.

Die in dieser Untersuchung verwendeten Bohrungsdaten sind von sehr unterschiedlicher Qualität. Sehr detaillierte, aber nur mit großem Aufwand „verfügbar“ zu machende Informationen stellen Bohrungsbeschreibungen aus den Erläuterungen zu geologischen Karten und geowissenschaftlicher Fachliteratur dar. Von sehr unterschiedlicher Qualität sind dagegen Informationen über Bohrungen, die im Rahmen von Gutachten unterschiedlicher Art erstellt wurden. Eine umfangreiche Zusammenstellung solcher Daten stellt die Bohrungsdatenbank des WWA Würzburg dar, die von Dr. R. König freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde. Daten zu Tiefbohrungen sind i.A. den Erläuterungen zur GK25 und den Veröffentlichungen des BayGLA (Geologica Bavarica, z.B. GUDDEN & HAUNSCHILD, 1993) zu entnehmen. Eine umfangreiche Sammlung solcher Daten für den nordbayerischen Raum wurde von BAUER (2000) erstellt.

Tabelle 6-10 listet die maßgeblich in dieser Untersuchung verwendeten Datenquellen mit Bohrungsdaten auf:

Quelle (vgl. Quellenverzeichnis)	Enthaltene Attribute	Anzahl (ausgewertet)
Fachdatei Hydrogeologie, BayLfW	Bez, ID, J, RH, Z, T, Typ, RW, Q, S	ca. 300
Bohrungsdatenbank WWA Würzburg	Bez, ID, J, RH, Z, T, Typ, RW, Q, S	ca. 250
GISWaWi, BayLfW	Bez, ID, J, RH, Z, Typ	ca. 500
Daten aus Erläuterungen zur GK25	Bez, RH, J, Z, Typ, RW, Q, S	ca. 100
Literatur, div.	unterschiedlich	ca. 50
Sammlung Dissertation W. Bauer (BAUER, 200)	Bez, ID, J, RH, Z, T, Typ, RW, Q, S	ca. 50
IGI (1998)	Bez, ID, J, RH, Z	ca. 250

Tabelle 6-10: Bohrungsdaten die für diese Untersuchung ganz oder teilweise zur Verfügung standen. Nicht alle der hier aufgeführten Daten konnten letztlich auch vollständig digital verfügbar gemacht und ausgewertet werden. Erläuterung der Attribute im Text (unten).⁴⁶

In der vorliegenden Untersuchung wurde versucht, für eine möglichst große Anzahl von Bohrungen die folgenden Attribute festzustellen und verfügbar zu machen:

- Bezeichnung, Kennnummer (Bez)
- Jahr der Erstellung (J)
- Typ (Brunnen-, Pegel-, Aufschlußbohrung)
- Lage, Rechts- und Hochwert, Ansatzhöhe (RH, Z)
- Endteufe (T)
- Ruhewasserspiegel (RW)
- Quartärmächtigkeit (Q)
- Tiefenlage der wesentlichen Schichtgrenzen - Schichtenverzeichnis (S)

Von den insgesamt etwa 1500 Bohrungen im Untersuchungsgebiet konnten alle diese Daten für etwa 500 Bohrungen zusammengetragen werden. Darüberhinaus wurden für viele Bohrungen nur einzelne Informationen ausgewertet (Beispiel Mächtigkeiten des Mittleren Muschelkalk in Unterfranken, Abbildung 7-17). Abbildung 6-8 gibt einen Überblick über Bohrungen in Unterfranken.

Strukturpläne (Streichkurvenkarten) bilden die Datengrundlage für das verwendete Untergrundmodell (Kap. 7.2.3) und gehören damit zu den wichtigsten Datenquellen. Sie liegen zumeist den Erläuterungen zu geologischen Karten in Maßstäben von maximal 1:25.000 (meist kleiner) vor. Diese analogen Vorlagen dienen als Grundlage für die Erstellung digitaler Strukturmodelle. Die Darstellungen sind häufig nicht auf aktuel-

⁴⁶ Die Datenquellen an sich (Datenbanken, Sammlungen) enthalten teilweise weit mehr Informationen. Diese waren für diese Untersuchung aber nur teilweise zugänglich.

lem Stand, weswegen sie durch Informationen aus wissenschaftlichen Bearbeitungen, Dissertationen, Diplomarbeiten und Gutachten sowie aktuelle Bohrungen ergänzt werden müssen. Eine Übersicht zu vorhandenen Strukturplänen im Untersuchungsgebiet gibt Abbildung 7-7. Ausführliche Angaben zu Strukturplänen und digitalen Strukturmodellen in Kap. 7.2.3.1.1.

Schichtmächtigkeiten – Mächtigkeitkarten: Darstellungen der Mächtigkeiten von Einheiten sind in der Literatur vergleichsweise selten. Sie sind i.A. nur in regionalem oder überregionalem Rahmen vorhanden, beziehen sich auf übergeordnete Einheiten (Serien, Abteilungen) und weisen kleine bis kleinste Maßstäbe auf (<1:500.000). Die Darstellungsgenauigkeit und die Angabe der verwendeten geographischen Bezüge ist bei solchen Karten oft mangelhaft. Zu finden sind solche Karten vorwiegend in wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder auch in Veröffentlichungen des BayGLA (z.B. BayGLA, 1996; GUDDEN & HAUNSCHILD, 1993; SCHWARZ, 1970; TRUSHEIM, 1964). Mächtigkeitsverteilungen wurden in dieser Untersuchung deshalb meist aus Einzelwerten interpoliert (vgl. z.B. Abbildung 7-17). Hierzu ist anzumerken, daß für solche Interpolationen weit weniger Werte zur Verfügung stehen als in Anbetracht der großen Zahl vorhandener Bohrungen (vgl. Abbildung 6-8) zu vermuten wäre, da nur ein geringer Anteil dieser Bohrungen übergeordnete Horizonte (z.B. *so*, *mm*, *ku*) komplett durchteuft. Insbesondere Brunnenbohrungen erschließen oft nur Teilabfolgen, so daß für die Interpolation von Mächtigkeitsverteilungen nur aus relativ wenigen Bohrungen miteinander vergleichbare Informationen zur Verfügung stehen.

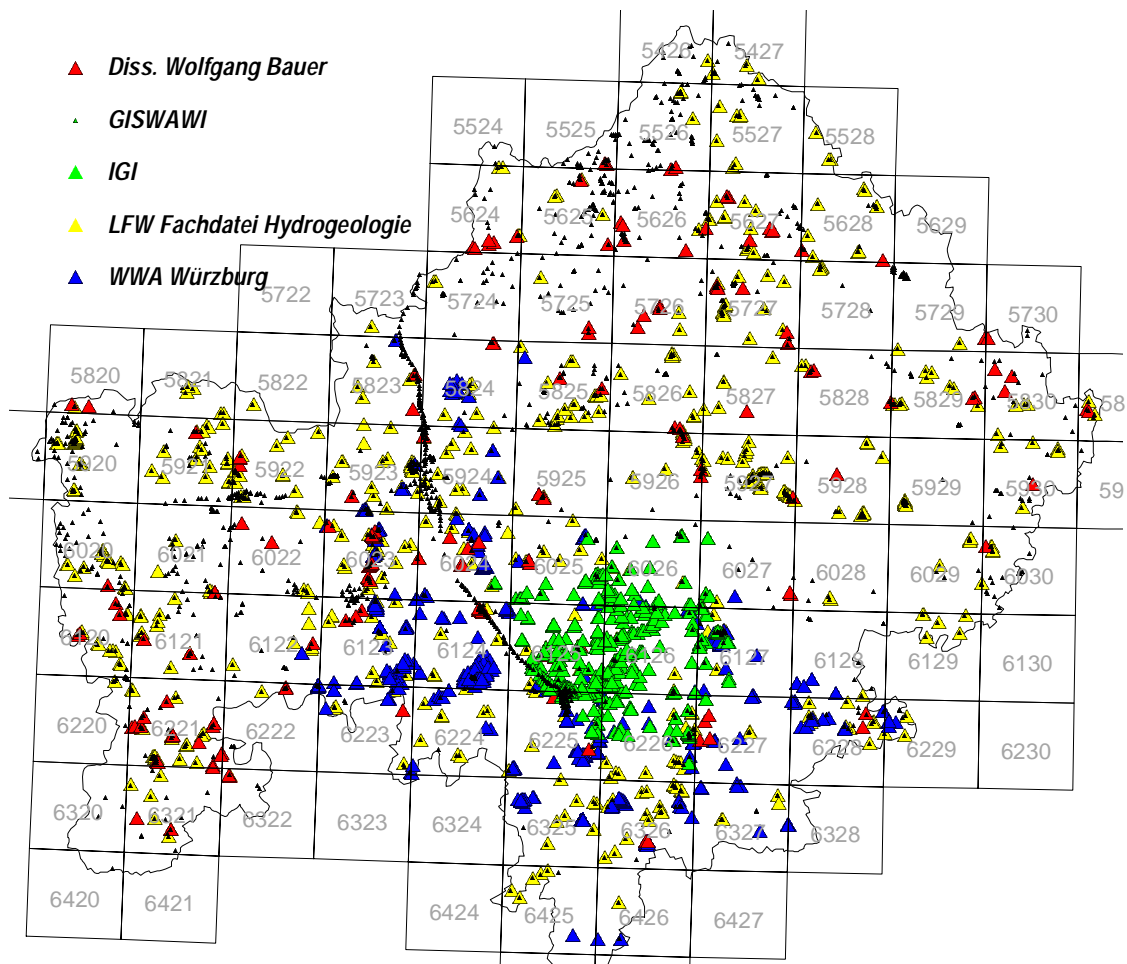


Abbildung 6-8: Bohrungen in Unterfranken. Doppelte Nennungen in unterschiedlichen Datenquellen sind möglich. Nur für einen kleinen Teil der dargestellten Bohrungen liegen komplette Datensätze (Schichtenverzeichnisse) vor.

Grundwasserspiegel – Grundwassergleichenpläne: Meßwerte des Grundwasserspiegels und daraus abgeleitete interpolierte Grundwassergleichenpläne (GWGL) geben die Lage der bzw. einer Grundwasseroberfläche über NN oder unter GOK an. Da, wie es im Arbeitsgebiet der Fall ist, in der vertikalen Abfolge mehrere ganz oder teilweise voneinander unabhängige Grundwasserstockwerke existieren können, sollten

sich solche Werte immer auf ein bestimmtes Stockwerk beziehen. Wünschenswert wäre auch die Angabe, ob es sich um gespannte oder ungespannte Verhältnisse handelt und eine Angabe des Meßdatums. Meist sind diese Angaben bei einer Vielzahl der verfügbaren Datenquellen nicht gegeben. Der Bezug zu einem bestimmten Grundwasserleiter ist häufig schon deshalb nicht herzustellen, weil in vielen Bohrungen mehrere Stockwerke gleichzeitig erschlossen werden.

Die Verfügbarkeit großmaßstäbiger, aus Interpolation bzw. Modellierung hervorgegangener Grundwassergleichenpläne für den gesamten Untersuchungsraum ist schlecht. Grundwassergleichenpläne in Maßstäben um 1:50.000 bis 1:100.000 liegen teilweise den Erläuterungen zur GK25 bei. Im Allgemeinen werden dort Druckwasserspiegelhöhen angegeben, es kommt aber, vor allem bei älteren Unterlagen, auch vor, daß Grundwassergleichen nur für freie Grundwasseroberflächen angegeben sind (z.B. HOFFMANN, 1967b) oder daß bereichsweise nur die Grundwassersohlschicht dargestellt ist (z.B. SCHWARZMEIER, 1979). Bei kleineren Maßstäben werden Stockwerke großzügig zusammengefaßt (z.B. ANDRES & WIRTH, 1985). Die wohl derzeit detaillierteste Untersuchung wurde im Rahmen eines Gutachtens erstellt, das dem Autor freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde (IGI, 1998).

Hydrophysikalische und sedimentpetrographische Daten: Parameter wie k_f -Wert, Porosität, nutzbare Porosität, Kluftvolumen, Korngrößenverteilung, Konsistenzgrenzen, Wassergehalt etc. liegen meist nicht in Sammlungen oder als Karten, sondern als sehr unregelmäßig verteilte Einzelwerte oder pauschale Angaben, die für bestimmte geologische Einheiten oder Gebiete gelten, vor. Sie können in den seltensten Fällen regionalisiert werden. Im GIS können praktisch ausschließlich grobe Schätzwerte verwendet werden.

k_f -Werte: Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit werden im Allgemeinen durch Pumpversuche bestimmt. Solche Versuche werden zu verschiedenen Zwecken häufig durchgeführt, so daß hier eine relativ große Zahl an Daten vorliegen dürfte. Die Daten sind allerdings auf die unterschiedlichsten Quellen verteilt, so daß ein hoher Aufwand betrieben werden müßte, um sie verfügbar zu machen. Eine größere Sammlung von Durchlässigkeitsbeiwerten für Unterfranken wurde von EINSELE & MERKLEIN (1978) zusammengestellt.

Hydrochemische Daten werden in den Erläuterungen zu geologischen Karten und in wissenschaftlichen Veröffentlichungen relativ häufig wiedergeben. Flächenhafte Darstellungen von wichtigen Parametern wie pH-Wert, Leitfähigkeit und der wesentlichen Anionen und Kationen werden in verschiedenen Kartenwerken dargestellt (BayGLA, 1993; DOBNER & WEINELT, 1980). Solche Daten wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht verwendet.

Mineralogische und Thermische Parameter: Daten über die mineralogische Zusammensetzung von Gesteinen im Untersuchungsgebiet sind nur schwer zu recherchieren und auszuwerten, da sie in einer Vielzahl von Einzelquellen veröffentlicht sind (vgl. z.B. Kap. 4.3.3.2.3). Meßwerte thermischer Parameter sind für das Untersuchungsgebiet überhaupt nicht vorhanden. Sie müssen aus den mineralogischen und sedimentpetrographischen Daten berechnet werden.

Messungen der **Untergrund- und Grundwassertemperatur** werden standardmäßig in Bohrungen aller Art durchgeführt. Allerdings können dabei nur bei Beachtung aller möglichen Fehlerquellen verlässliche Werte ermittelt werden (PERRIER & RAIGA-CLEMENCEAU, 1983). Bei diesem Datentyp ist deshalb die Herkunft und Qualität der Daten besonders zu prüfen. Für das Untersuchungsgebiet liegt mit der Arbeit von BAUER (2000) eine umfangreiche Datensammlung zu Untergrundtemperaturen bis zu einer Tiefe von mehreren 1000m vor. In der vorliegenden Untersuchung wurden Temperaturdaten allerdings nicht in nennenswertem Umfang verwendet (vgl. Kap. 4.4.6).

6.3.6.4.2 Oberflächendaten – Topographie, Klima, Infrastruktur

Das **digitale Höhenmodell** (DHM oder auch DGM, Digitales Geländemodell) beschreibt das Relief der Erdoberfläche. In der vorliegenden Untersuchung wurden Rastermodelle (es sind auch Vektor-, bzw. TIN-Modelle denkbar) mit Zellgrößen von maximal 50m verwendet. DHM stellen eine der wesentlichen Datengrundlagen in GIS dar. Sie bilden den Bezugshorizont für alle Analysen im 3-dimensionalen Untergrund.

Sie bieten darüberhinaus die Grundlage zur Berechnung von Hangneigung und Exposition und deren theoretische Ableitungen wie z.B. Einzugsgebietsberechnungen und Generierung theoretischer Fließgewässernetze (vgl. Kap. 7.2.3.2.2). Durch die Verschneidung des DHM mit den Schichtgrenzen geologischer Karten lassen sich Strukturinformationen über den Untergrund berechnen (Kap. 7.2.3.1.3.5). DHM's sind in Bayern derzeit flächendeckend in einer Auflösung bis 50m verfügbar.

Das **Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS)** stellt ein bundeseinheitliches, digitales Basisinformationssystem dar, in dem eine Vielzahl topographischer Objekttypen in unterschiedlichen Detailauflösungen dargestellt sind. **ATKIS25** enthält im Wesentlichen den Informationsgehalt der Topographischen Karte 1:25 000 und ist unterteilt in die Objektbereiche Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer, Relief und Gebiete (Verwaltung, Besiedlung). ATKIS-Daten werden in Bayern vom BayLVA gegen Entgelt abgegeben. Eine ausführliche Beschreibung des ATKIS gibt z.B. BILL (1999a). In der vorliegenden Untersuchung wurden Daten aus dem ATKIS25 und **ATKIS500** verwendet.

Digitale Rasterkarten stellen gerasterte digitale Versionen der amtlichen Topographischen Karten dar. Sie sind als „Hintergrundkarte“ teilweise besser geeignet als die ATKIS-Daten, da sie das „gewohnte“ Bild topographischer Information mit einer höheren Informationsdichte wiedergeben. Darüberhinaus dienen sie zur Ermittlung von Lagekoordinaten bekannter Punkte, die zur Georeferenzierung von Kartenmaterial ohne Koordinatenangaben verwendet werden. Digitale Rasterkarten werden von den Landesvermessungsämtern sowie von privaten Anbietern in Lizenz herausgegeben. In dieser Untersuchung wurden Daten der TK25, TK50 und TK200 verwendet.

Klimadaten wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht in größerem Umfang verwendet (vgl. Kap. 4.4.6). Sie können über den DWD bezogen werden. Interessant für Betrachtungen in Bayern ist auch der (digitale) Klimaatlas von Bayern (BayFORKLIM, 1996).

Landnutzung, Raumplanung, administrative Daten: Entsprechende Daten wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht oder nur kaum verwendet. Datensätze dieser Art werden von Ämtern und Behörden aller Art erzeugt und verwaltet. Die Verfügbarkeit ist wahrscheinlich stark vom Verwendungszweck abhängig. Bei verschiedenen Recherchen⁴⁷ wurde festgestellt, daß sich häufig Kompatibilitätsprobleme ergeben oder das Daten nicht bereitgestellt werden können, weil Personal nicht vorhanden ist.

Das BayLfW ist seit einigen Jahren mit der Erstellung eines **Geoinformationssystem Wasserwirtschaft (GISWaWi)** befaßt. Dieses enthält relevante Daten zu Oberflächengewässern und zum Grundwasser. Das GISWaWi ist derzeit noch im Aufbau und enthält deshalb nur lückenhafte Informationen⁴⁸. So sind z.B. in den Bohrungsdatenbanken, die vom BayLfW freundlicherweise aus dem GISWaWi zur Verfügung gestellt wurden, nur die Rechts- und Hochwerte und einige allgemeine Daten (Betreiber der Brunnen etc.) aber keine geologisch relevanten Informationen enthalten. Von hohem Wert sind allerdings die Wasserschutzgebiete, die in zwei unterschiedlichen Datensätzen zur Verfügung gestellt werden. Der eine, flächendeckend für Unterfranken, enthält digitalisierte Wasser- und Heilquellenschutzgebiete auf Basis einer älteren Karte im Maßstab 1:50.000 (freundl. mündl. Mittlg. Dr. Koschel, BayLfW), der andere Wasserschutzgebiet mit Darstellung der einzelnen Zonen auf Basis der Flurkarte 1:5.000. Letztere Daten liegen allerdings nur für etwa ein Drittel Unterfrankens vor.

⁴⁷ z.B. Regierung von Unterfranken, freundl. mündl. Mittlg. Herr RD Dittmann.

⁴⁸ Dies gilt zumindest für diejenigen Auszüge, die dem Autor durch das BayLfW zur Verfügung gestellt wurden.

6.4 GIS - Bewertungsanalysen

6.4.1 GIS als Bewertungsinstrument und Entscheidungshilfe

6.4.1.1 Einfache Bewertungsmodelle

Viele GIS-Analysen resultieren in einer wie auch immer gearteten Bewertung oder Klassifikation von Standorten, Flächen oder anderen Objekten in Bezug auf Risiken, Potentiale oder der Eignung für bestimmte Nutzungen. Die Bewertung von Standorten und Flächen anhand verschiedener Einflußfaktoren ist häufig schwierig, da eine Beurteilung, welcher der Faktoren bzw. welche Faktorenkombination letztlich bestimmend für die „Qualität“ eines Standortes ist, nicht ohne weiteres möglich ist. Beliebtes Beispiel in GIS-Lehrbüchern und -Tutorials zur Veranschaulichung des Ablaufs einer „Eignungsanalyse“ (suitability analysis), ist die Suche nach geeigneten Standorten für Mülldeponien (z.B. SAURER & BEHR, 1997; EASTMAN, 1997). Als maßgebliche Kriterien werden dort unter anderem „Entfernung zur nächsten Wohnsiedlung“, „Entfernung zum nächsten Trinkwasserbrunnen“ sowie „undurchlässiger Untergrund“, „geringe Hangneigung“ und „geringe Grundstückskosten“ genannt. Wenn entsprechende Datensätze vorhanden sind, ist es mit Hilfe von GIS sehr einfach, Flächen, die solchen Ansprüchen genügen (z.B. Entfernung zur nächsten Wohnsiedlung > 1km), zu ermitteln.

Da eine Vielzahl von Faktoren in die Bewertung eingehen, diese aber nicht alle die gleiche Bedeutung („Gewicht“) besitzen, muß festgelegt werden, wie aus der Vielzahl der möglichen Kombinationen von Standorteigenschaften die günstigste ermittelt werden kann. Hierzu bestehen verschiedene Verfahren. Ziel dieser Verfahren ist es meist, einen zahlenmäßig erfaßbaren „Eignungsgrad“ oder –„wert“ zu berechnen. Diesbezüglich können die Kriterien (Standorteigenschaften), die in die Bewertung eingehen, in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Es existieren:

1. Kriterien, die die Zustände JA oder NEIN annehmen können. „Ja“ bedeutet geeignet, „nein“ ungeeignet. Solche booleanischen Kriterien werden im Englischen als „constraints“ bezeichnet.
2. Kriterien, die unterschiedliche Werte auf einer Skala annehmen können (englisch: „factors“). Die Skalen müssen weder kontinuierlich, noch linear, noch von vornherein in Zahlenwerten ausdrückbar sein. Prinzipiell möglich sind nominale (schlecht ↔ gut), ordinale (1., 2., ... , n. Rang) und metrische Skalen (Meßwerte, Preis in DM, etc.). Um Faktoren unterschiedlichen Typs gleichzeitig auswerten zu können, ist es üblich, alle in diskrete „Klassen“ einzuteilen (z.B. 1 bis 10) bzw. sie auf eine einheitliche kontinuierliche Skala zu normieren.

Die Auswertung der Kriterien vom booleanischen Typ bereitet keine Schwierigkeiten, sie schließen eine Alternative entweder grundsätzlich aus oder grundsätzlich ein. Schwierigkeiten bereiten dagegen die „Faktoren“, die unterschiedlichen Typs und damit nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar sind. Sie müssen deshalb normiert und entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet werden. Eine allgemeine Beziehung zur Berechnung des Eignungsgrades gibt EASTMAN (1999) an:

$$\text{Eignungsgrad } E = \sum_{i=1}^n w_i \cdot X_i \prod_{j=1}^m C_j ; \quad \text{Gleichung 6-1}$$

wobei X_i die Faktoren, w_i die zugehörigen Gewichte und C_j die booleanischen Kriterien (constraints) sind. Durch die Multiplikation der gewichteten Summe der Faktoren mit dem Produkt der constraints werden Alternativen, bei denen mindestens ein Ausschlußkriterium vorliegt, ausgeschlossen. Um den Entscheidungsprozeß transparenter zu machen, werden häufig sogenannte Entscheidungsmatrizen vorgeschlagen (Tabelle 6-11):

	Faktoren			Bewertung	
	A	B	C	E _{Ergebnis}	R _{ang}
Standort 1	3	2	5	22	1.
Standort 2	3	0	5	18	2.
Standort 3	0	1	5	17	3.
Berechnung der Bewertungszahl E:					
E = A*w ₁ + B*w ₂ + C*w ₃ ; w ₁ =1, w ₂ =2, w ₃ =3					

Tabelle 6-11: Schema einer Standortbewertung in einer Entscheidungsmatrix. Es wird angenommen, daß drei Faktoren die Eignung des Standortes maßgeblich bestimmen. Diese Faktoren müssen klassifiziert sein. Da nicht alle Faktoren eine gleich hohe Bedeutung haben, werden Gewichtungen eingeführt. A erhält das Gewicht 1, B das Gewicht 2 usw. Die Bewertungszahl wird durch Addition der mit den Gewichten multiplizierten Faktorenwerte errechnet. Faktoren können auch multiplikativ oder subtraktiv in die Bewertungsberechnung eingeführt werden. Weitere Erläuterungen im Text.

Während im Beispiel (Tabelle 6-11) die Berechnung einer solchen Bewertungsmatrix einfach und schlüssig erscheint, ist das Problem des Standortvergleichs in der Praxis außerordentlich anspruchsvoll. Zunächst sind es meist weit mehr als nur drei Faktoren, die sich auf die Eignung auswirken. Von diesen müssen diejenigen ermittelt werden, die tatsächlich relevant sind. Sodann stellt sich das Problem der Klassifikation von Faktoren. Was im Lehrbuch meist unerwähnt bleibt, ist der Umstand, daß sich Faktoren wie „*undurchlässiger Untergrund*“ (Mülldeponie, s.o.) weder pauschal mit „ja = undurchlässig“ oder „nein = durchlässig“, noch in feste Klassen von 1-n, noch auf einer kontinuierlichen Skala zahlenmäßig charakterisieren lassen⁴⁹. Auch die Angabe eines k_r-Wertes (selbst wenn er für alle Schichten flächendeckend bekannt wäre) hilft hier nicht unbedingt weiter, da die Durchlässigkeit des Deponieuntergrundes auch durch Faktoren wie die Mächtigkeit, die Klüftigkeit und das Einfallen (Verbreitung) der beteiligten Schichten bzw. die Kombination dieser Faktoren bestimmt wird.

Schwierigkeiten bereitet auch die geeignete Formulierung einer Bewertungsgleichung bzw. der zugehörigen Bewertungsgewichte (vgl. Tabelle 6-11; Gleichung 6-1). Da sich eine solche häufig nicht ohne weiteres finden läßt, treten an Stelle mathematisch formulierbarer Algorithmen sogenannte „*verbal argumentative Beurteilungen*“ (BENHOLD ET AL., 1998). Solche Beurteilungen, aber auch mathematisch formulierte Beziehungen, müssen häufig in einem rekursiven Prozeß solange angepaßt werden, bis ein „zufriedenstellendes“ Ergebnis erreicht wird. Im Idealfall ist es möglich, das Bewertungsergebnis an konkreten Fällen zu „eichen“, wozu aber bei Vorhaben wie der Standortsuche von Mülldeponien (s.o.) nur selten die Möglichkeit gegeben ist. Erschwert wird eine eindeutige Bewertung oft dadurch, daß sich Faktoren häufig gar nicht unabhängig voneinander betrachten lassen. So kann es vorkommen, daß der Einfluß eines Faktors sich deutlich ändert, wenn ein anderer gleichzeitig in einer bestimmten Ausprägung auftritt. Konkret für die vorliegende Untersuchung wäre hier die Kombination der drei Faktoren Grundwasserflurabstand, hydraulischer Gradient und Permeabilität zu nennen: Ist kein Grundwasser vorhanden, spielen Durchlässigkeit und Gradient keine große Rolle, wenn ja, dann sind sie enorm bedeutend. In solchen Fällen muß der Bewertungsalgorithmus um Operationen vom WENN – DANN Typ erweitert werden und ist dann nicht mehr in der in Gleichung 6-1 beschriebenen Form formulierbar (vgl. auch Kap. 8.1).

Es existieren Bewertungsansätze, bei denen versucht wird, der hier geschilderten Problematik durch aufwendigere Verfahren zur Ermittlung von Gewichten zu begegnen. Solche Methoden werden ausführlich z.B. bei BONHAM-CARTER (1994) und EASTMAN (1999) vorgestellt. Letztlich bleibt aber bei allen Bewertungsanalysen wohl immer eine starke, durch die subjektive Einschätzung des Bearbeiters bestimmte Komponente erhalten, die sich nicht durch „wissenschaftlich korrekt“ formulierbare Zusammenhänge beschreiben läßt.

⁴⁹ Gemeint sind hier ausdrücklich Lehrbücher, nicht spezielle Untersuchungen zum Thema „Standortfindung für Mülldeponien“ (z. B. ASCH, 1999b; DORHOFER & SIEBERT, 1998) in denen die Schwierigkeiten der Thematik durchaus berücksichtigt werden.

6.4.1.2 Fuzzy Logic Ansätze

Einige der oben genannten Probleme bei der Erstellung von Bewertungen sind darauf zurückzuführen, daß Faktoren nach bestimmten, oft willkürlich festgelegten Kriterien, in ein System von festen Klassen eingeteilt werden müssen. Dies führt insbesondere in den Grenzbereichen der Klassen zu unbefriedigenden Ergebnissen. Dies wird hier am Beispiel Grundstückspreise (GP) demonstriert: diese sollen bei $GP < 25 \text{ DM/m}^2$ als niedrig (=gut), bei $GP > 25 \text{ DM/m}^2$ als hoch (=schlecht) bezeichnet werden. Ein wenig befriedigendes Bewertungsergebnis entsteht, wenn eine Fläche mit guten (z.B. geologischen) Eigenschaften und einem Preis von z.B. 26 DM/m^2 deutlich schlechter bewertet würde, als eine, die geringfügig billiger ist (24 DM/m^2), aber insgesamt schlechtere (geologische) Eigenschaften aufweist. Eine Lösungsmöglichkeit für derartige Probleme sind sogenannte „fuzzy logic“-Ansätze, bei denen strenge Klassenzugehörigkeiten durch die Festlegung eines „Zugehörigkeitsgrades“ ersetzt werden. Im obigen Beispiel erhielten dann z.B. Preise von $GP > 30 \text{ DM/m}^2$ den höchsten Zugehörigkeitsgrad =1 (bedeutet: gehören zweifelsfrei der Klasse „schlecht“ an), während Preise zwischen 30 DM/m^2 und 25 DM/m^2 immer geringe Zugehörigkeitswerte aufweisen. Hierzu müssen entsprechende Regeln definiert werden. Diese Technik läßt sich nicht nur auf zahlenmäßig erfaßbare Daten, sondern beispielsweise auch auf die Grenzziehung zwischen Flächen unterschiedlicher Eigenschaften anwenden. Entsprechende Verfahren wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht angewendet, da ihr Einsatz im dreidimensionalen Raum (vgl. Kap. 7.2.1 und 8) einen den Ergebnissen nicht angemessenen Aufwand bedeutet. Anwendungsbeispiele aus dem Raum Unterfranken geben KUS & BARTHEL (2000).

6.4.1.3 Expertensysteme

Eine weitere Alternative zu den eingangs beschriebenen „starrten“ Bewertungsmodellen stellen sogenannte Expertensysteme dar. Der Begriff „Expertensystem“ stammt aus dem Wissenschaftsgebiet der „künstlichen Intelligenz“ und soll darauf hinweisen, daß das System mit dem Fachwissen und der Entscheidungskompetenz eines Experten ausgestattet ist. Expertensysteme sind nach BARTELME (1995) auf ein eng abgegrenztes Wissensgebiet ausgerichtete Informationssysteme, die einem Nicht-Fachmann Entscheidungshilfen bei der Bewältigung definierter Aufgaben bieten sollen. Das „Experten“-Wissen wird in einer „Wissensbasis“ (knowledge base) bereitgestellt, die aus **Fakten** (Daten, Informationen) und **Regeln** oder Entscheidungskriterien besteht. Diese Regeln liegen in der Form „Wenn A, dann B“ vor, wodurch das System in die Lage versetzt wird Entscheidungen zu treffen, sobald ein bestimmtes Ereignis oder eine festgelegte Verkettung von Ereignissen eintreten (Eingabe des Nutzers, Auftreten einer bestimmten Datenkonstellation). Abbildung 6-9 zeigt die wesentlichen Bestandteile eines Expertensystems und deren Interaktion. Weitere Angaben bei BILL (1999b).

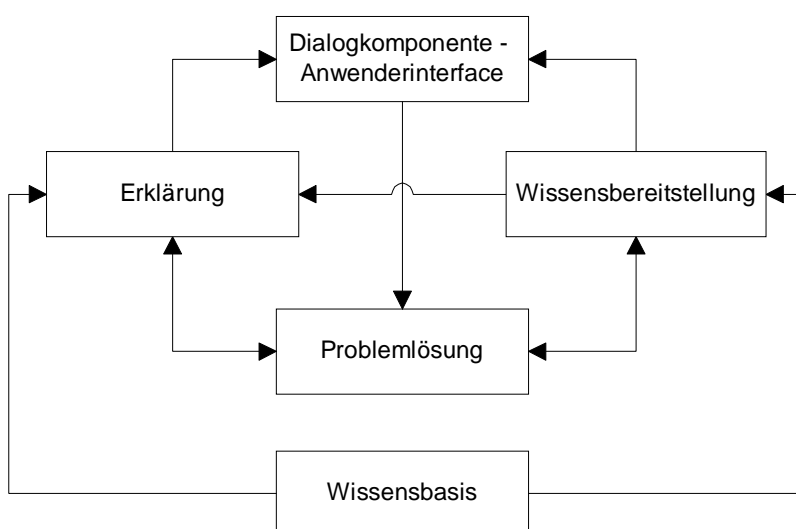


Abbildung 6-9: Interaktion der Bestandteile eines Expertensystems nach BARTELME (1995).

Durch die Möglichkeit auf Benutzereingaben zu reagieren, ist ein Expertensystem einem einfachen (GIS-)Datenbanksystem, das Daten nur bereitstellt, überlegen. Es nimmt dem Benutzer die Aufgabe ab, diese Daten selbst zu interpretieren. Ein solches System bietet sich für den Einsatz bei der in der vorliegenden Untersuchung bearbeiteten Aufgabenstellung geradezu an, da bei der Bewältigung der anfallenden Aufgaben bei der Planung von Anlagen zur oberflächennahen thermischen Nutzung des Untergrundes Expertenwissen unterschiedlichster Art (geologisches-, physikalisches-, technisches-) gefordert ist, das selten in einer Person vereinigt ist. Auf die konkreten Einsatzmöglichkeiten von Expertensystemen für die Planung und Standortbewertung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes wird in Kap. 8.2.6 eingegangen.

6.4.2 Zielsetzung und Anwendungsbereich von Bewertungen

Im vorhergehenden Kapitel wurden einige grundlegende Bewertungskonzeptionen vorgestellt, wie sie bei GIS-Analysen häufig zum Einsatz kommen. Wie gezeigt wurde, stellt die Definition und Gewichtung von aussagekräftigen Kriterien ein generelles Problem bei entsprechenden Analysen dar. Im folgenden Kapitel werden die speziellen Problemstellungen behandelt, die bei Bewertung von Standorten hinsichtlich der Eignung für die thermische Nutzung des Untergrundes auftreten. Dazu werden insbesondere die Frage nach den Randbedingungen der Bewertung (was wird bewertet), dem Bewertungsmaßstab (Ziel- oder Kontrollgröße) und die Festlegung der Bewertungskriterien diskutiert.

6.4.2.1 Bewertungsmaßstäbe, Ziel- und Kontrollgrößen

Zur Durchführung einer Bewertung muß grundsätzlich ein Maßstab vorhanden sein, der eine Beurteilung der zu bewertenden Eigenschaften im Sinne von **gut** ↔ **schlecht** bzw. **geeignet** ↔ **ungeeignet** zuläßt. Im Falle der thermische Nutzung des Untergrundes bieten sich unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe an, die hier als „Ziel-“ oder „Kontrollgrößen“ bezeichnet werden. Im Fall der saisonalen Speicherung thermischer Energie kann als Bewertungszielgröße beispielsweise der Speichernutzungsgrad (vgl. Kap. 3.1.3), bei der Wärmegewinnung z.B. die spezifische Entzugsleistung (vgl. Kap. 3.2.2) definiert werden. Je höher die erreichten Werte sind, desto „besser“ ist der Standort bzw. die Untergrundeigenschaften. Eine entsprechende, vorwiegend an energetischen Gesichtspunkten orientierte Beurteilung, läßt allerdings Kosten und Umweltaspekte unberücksichtigt. So lassen sich besonders gute Ergebnisse aus energetischer Sicht beispielsweise dann erzielen, wenn ein besonders hoher technischer Aufwand betrieben wird (→ Erhöhung der Kosten) oder wenn umweltschädigende oder risikobehaftete Techniken eingesetzt werden (z.B. offene statt geschlossene Systeme bei vertikalen Erdreichwärmetauschern; vgl. Kap. 3.1.1.5.1).⁵⁰

Bei genauerer Betrachtung läßt sich aus den drei Faktoren *Energie – Kosten – (negative) Umwelteinflüsse* ein kompliziertes Beziehungsgeflecht herstellen, das je nach Betrachtungsweise zu unterschiedlichen Bewertungen führt. Eine wirklich „objektive“ Beurteilung wird dadurch unmöglich. Das Problem läßt sich eingrenzen, indem man festlegt, daß bei den Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes wegen ihres Anspruchs regenerative Energiequellen darzustellen, das oberste Ziel die Einsparung von Energie und CO₂ gegenüber herkömmlichen Techniken sein muß. Gleichzeitig müssen dabei schädigenden Einflüsse auf die Umwelt so gering wie möglich gehalten werden. Die Kosten sollten dabei letztlich zweitrangig sein. Als geeignete Bewertungszielgröße (Maßstab) könnte damit beispielsweise das optimale „(Kosten-) Energie- und CO₂ -Einsparungs – Umweltverträglichkeits - Verhältnis“ mit entsprechenden Gewichtungen definiert werden. Abbildung 6-10 zeigt in schematischer und idealisierter Form die Zusammenhänge von energetischen Aspekten, positiven und negativen Folgen für die Umwelt und den Kosten einer Untergrundenergieanlage.

⁵⁰ Vgl. hierzu auch Kap. 3.1.4.2.1.

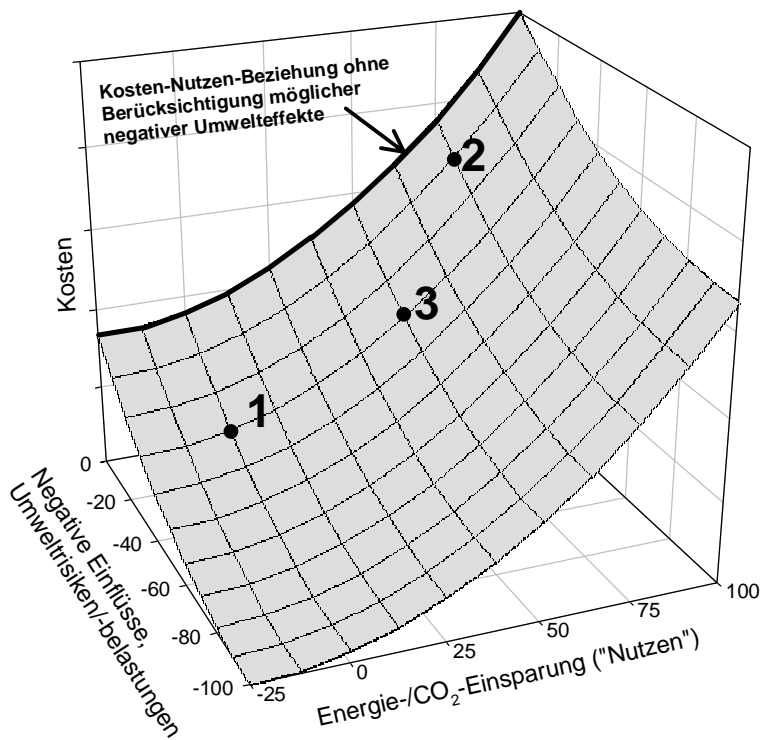


Abbildung 6-10: Schematisierte Darstellung des Kosten-„Nutzen“-Verhältnisses für Energiesysteme mit Untergrundspeicheranlagen. Als angestrebter „Nutzen“ wird hier die Möglichkeit der **Energie- bzw. CO₂-Einsparung** gegenüber herkömmlichen Energiesystemen, also in der Bilanz **positive Umwelteffekte**, definiert.

Maßnahmen mit negativen Folgen für die Umwelt können die Kosten senken und die Energie-/CO₂-Einsparung steigern, führen aber zu einer Verschlechterung der **Gesamtbilanz der Umwelteffekte** (z.B. schädliche Eingriffe in das Grundwasser). Es wird unterstellt, daß von jeder Form der Energienutzung negative Umwelteinflüsse ausgehen.

Beispiele:

- 1) Herkömmliches Heizsystem
- 2) Heizsystem mit Nutzung regenerativer Energie bei hohen Kosten, sehr niedrigen CO₂-Emissionen und geringen Eingriffen in die Umwelt.
- 3) Wie 2), aber kostengünstiger und stärkeren Belastungen für die Umwelt.

Eine weitergehende Beschäftigung mit dieser wichtigen Thematik ist hier leider nicht möglich. Welche Bedeutung entsprechende Überlegungen haben, zeigt z.B. die in Kap. 2.2.1.5 erwähnte Diskussion um den Anspruch der Wärmepumpe als umweltfreundliche Technologie. Allgemeine Betrachtungen zu Thema Energieerzeugung – Umweltaspekte - Kosten und werden von KALTSCHMITT & WIESE (1997) angestellt. Speziellen Fragen der Bilanzierung energetischer und umweltrelevanter Aspekte im Bereich geothermischer Nutzungen gehen z.B. KAYSER & KALTSCHMITT (1997) nach. Eine entsprechende Betrachtung, die speziell auf Untergrundspeicherverfahren ausgerichtet ist, stellen MOROFSKY & CRUICKSHANKS (1997) vor.

Innerhalb dieser Untersuchung wurde versucht, die Bewertungsfrage so weit wie möglich von solchen grundlegenden Aspekten zu trennen und als Maßstab vorwiegend „geologische“ Kriterien anzulegen. Ziel ist eine weitgehend von Systemparametern **unabhängige** Bewertung des Standortes (siehe auch Kap. 6.4.2.2). Daß dies nicht ohne weiteres möglich ist, zeigen allerdings die in Kap. 3.1.4.2.1 angestellten Betrachtungen zum Einfluß der thermischen Untergrundeigenschaften auf Erdsondenwärmespeicher. Dort konnte z.B. gezeigt werden, daß eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Gesteins den Speichernutzungsgrad reduziert, gleichzeitig aber auch die Speicherbau Kosten senkt. Je nach Betrachtungsweise ist diese Größe also unterschiedlich bewertbar.

6.4.2.2 „Grenzen“ und Anwendungsbereiche der Bewertung

Die „Grenzen“ der Bewertung legen fest, welche Aspekte in die Bewertung eingehen und welche gegebenenfalls ausgeklammert werden können oder müssen. Eine Bewertung, die, wie oben beschrieben, die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit berücksichtigen soll, muß zwangsläufig sehr spezifische Anlagenparameter berücksichtigen, was im Sinne einer Vorabbewertung von Standorten ohne konkreten Anlagenplan nicht möglich ist (vgl. dazu Definition in Kap. 6.2.1.5).

Zusätzlich zu diesem Aspekt, der z.B. bereits in Kap. 3.1.4.2.1 diskutiert wurde, stellen sich weitere grundsätzliche Fragen, die bei der Konzeption eines Bewertungskonzepts bzw. bereits bei der Definition der Zielsetzung der Untersuchung zu bedenken sind. So ist beispielsweise zu überlegen, inwieweit infrastrukturelle Gegebenheiten, z.B. das Vorhandensein einer Wärmequelle (Industrieanlage), besonders günstige Bedingungen schaffen, auch wenn die geologischen Bedingungen vielleicht weniger gut sind. Ähnliche Bedeutung

haben klimatische Faktoren, Landnutzung und Relief, die naturräumliche Eigenschaften darstellen, aber keinen unmittelbaren Einfluß auf die Untergrundeigenschaften des Standorts besitzen. Sie tragen in vielen Fällen maßgeblich zur Eignung eines Standortes bei, könnten also auch in die Bewertung einfließen (Beispiel: Globalstrahlungssummen und Sonnenscheindauer bei Anlagen die solarthermische Energie nutzen).

Ein Aspekt aus dem selben Problemkreis wurde in Kap. 5.3.2.2 bei der Beurteilung der Eignung des Mainquartärs für die Nutzung mit grundwassergekoppelten Wärmepumpen besprochen. Dort stellte sich die Frage, ob ein stark begrenztes Flächenangebot (konkret die bereichsweise geringe Breite der Maintalau) einen ungünstigen Standortfaktor darstellen kann, wenn gleichzeitig die geologisch-hydrogeologischen Voraussetzungen gut sind. Konkret: kann ein Gebiet als „sehr gut geeignet“ ausgewiesen werden, wenn dort nur einige wenige Anlagen (diese dafür aber sehr gut) realisierbar sind? Ebenfalls muß diskutiert werden, ob rechtliche Faktoren in die Bewertung einbezogen werden sollen. Sie sind einerseits von hoher Bedeutung für die Eignung des Standortes (ausschließende Kriterien), stellen aber andererseits keine standortspezifischen (geologischen) Konstanten dar.

Die Frage, ob infrastrukturelle Gegebenheiten mitberücksichtigt werden sollen, stellt sich auch noch in anderer Hinsicht. So kann es beispielsweise im Sinne eines angemessenen Aufwand-Nutzen-Verhältnis einer GIS-Analyse sinnvoll sein, dünn- oder nicht-besiedelte Gebiet von der Bearbeitung auszuschließen und damit die zu bearbeitende Fläche, d.h. den Arbeitsaufwand, einzuschränken.

Die grundsätzliche Frage lautet also, ob es insgesamt sinnvoll ist, eine Standortbewertung nach rein geologischen Kriterien durchzuführen oder ob ein Standort nicht vielmehr anhand der Summe aller relevanten Standortfaktoren beurteilt werden muß. Orientiert man sich ausschließlich an den geologischen Voraussetzungen, erhält man unter Umständen zwar in sich stimmige Bewertungsergebnisse, die aber in der Praxis nicht relevant sind, weil sie die Nachfrage und die technischen Voraussetzungen nicht berücksichtigen.

Mit diesen Überlegungen soll deutlich gemacht werden, daß die Erstellung eines Bewertungskonzeptes die Definition eines **Anwendungs- oder Gültigkeitsbereichs der Bewertung** erfordert. Diesbezüglich sind einige grundlegenden Anwendungsbereiche zu unterscheiden, die sich aus der Kombination der geologischen, der oberflächlich-naturräumlichen, der rechtlichen und der infrastrukturellen Gegebenheiten ergeben. Dazu treten technische Fragestellungen, insbesondere die Frage nach den zu betrachtenden Verfahren und inwieweit diese in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden.

Es ist offensichtlich, daß die Definition des Gültigkeitsbereichs eng mit den Zielsetzungen (vgl. Kap. 6.2.1.1) einer entsprechenden GIS-Bewertung verknüpft ist. In der Konzeptionsphase müssen deshalb Zielsetzung und Bewertungskonzept ständig aneinander angepaßt werden. Unabhängig von der Frage der Zielsetzung ist im Bewertungskonzept zu berücksichtigen, daß sich geologische und nicht-geologische, standort- und projektspezifische Parameter in manchen Fällen gar nicht voneinander trennen lassen. Dies wird in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

6.4.2.2.1 Einbeziehung projektspezifischer Größen in die Standortbewertung

Im Folgenden wird am Beispiel von Untergrundspeichern gezeigt, wie sich nicht-geologische Faktoren auf eine rein geologisch ausgerichtete Bewertungsanalyse auswirken. In Kap. 3.1.4 wurde bereits erläutert, warum die Beurteilung verschiedener Standorteigenschaften häufig nur dann möglich ist, wenn ein konkretes Anlagenkonzept bereits bekannt ist. Dieser Umstand kann in einem **projektspezifischen** Bewertungskonzept, in dem zunächst nur die **prinzipielle** (geologische) **Eignung** von Standorten geprüft werden soll, nicht berücksichtigt werden. Anders verhält es sich mit einigen allgemeingültigen Überlegungen zu Eigenschaften, die zwar ebenfalls keine primären Untergrundfaktoren darstellen, sich aber dennoch deutlich auf die Standorteignung auswirken. Hier sind vorrangig die folgenden beiden Gesichtspunkte zu nennen:

1. Um einen Speicher einer bestimmten Größe mit einem nach energetischen Gesichtspunkten sinnvollen Breiten/Höhen-Verhältnis (Kap. 3.1.4.3.2) errichten zu können, ist eine **minimale Mächtigkeit (M_{\min})** der zur Speicherung geeigneten Schicht oder des geeigneten Schichtpaketes (=Speicherhorizont) erforderlich.
2. Die zur Speicherung geeignete Schichtenfolge muß am Standort in einer Tiefe erreichbar sein, die wirtschaftlich sinnvoll zu erschließen ist. Diese **maximale Bohrtiefe (T_{\max})** ist über die Kosten-Nutzen-Frage an das Speichervolumen gekoppelt.

Die Frage nach der minimal notwendigen Mächtigkeit des Speicherhorizontes⁵¹ läßt sich relativ einfach beantworten. Nach Kap. 3.1.4.3.2 sind für ein günstiges Speicherbetriebsverhalten Breiten/Höhen-Verhältnisse von etwa 1:0,5 bis 1:2 erforderlich. Tabelle 6-12 zeigt die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Mächtigkeit des Speicherhorizontes für verschiedene Speichergrößen. Berücksichtigt man noch „Sicherheitszuschläge“ an der oberen und unteren Speicherbegrenzung von jeweils 2 bis 10m, so ergeben sich für „große“ Speicherprojekte Mindestmächtigkeiten von 50 bis 100m, für mittlere von 30-70m und für kleine von 15-40m.

	Durchmesser	Tiefe	D/T	Volumen (ca.)
Große Projekte (100- 500.000m ³)	86	43	0.5	250000
	68	68	1	250000
	60	90	1.5	250000
	54	108	2	250000
Mittlere Projekte (20-100.000m ³)	51	25	0.5	50000
	40	40	1	50000
	35	53	1.5	50000
	32	63	2	50000
Kleine Projekte (2-10.000m ³)	24	12	0.5	5000
	19	19	1	5000
	16	25	1.5	5000
	15	30	2	5000

Tabelle 6-12: Verhältnis von Durchmesser D zur Tiefe T eines zylinderförmigen (Erdsonden-)Wärmespeichers für verschiedene Speichergrößen.

Das Verhältnis D/T sollte nicht wesentlich höher oder niedriger als 2 bzw. 0,5 liegen, da sonst das Oberflächen-Volumen-Verhältnis ungünstig wird und die Speicherverluste anwachsen. Damit kann für jedes vorgegebene Speichervolumen eine erforderliche Mindestmächtigkeit (=Tiefe) des Speicherhorizontes vorgegeben werden.

Auch die maximale, sinnvolle oder realisierbare Bohrtiefe ist an das Speichervolumen gekoppelt, wobei sich der Zusammenhang allerdings nicht gleichermaßen anschaulich formulieren läßt. Grundsätzlich gilt, daß bei kleinen Speichervolumina große Bohrtiefen nicht sinnvoll sind. Die Tiefenlage des Speicherhorizontes und die Speichergröße sollten in einem angemessenen Verhältnis stehen.

Abbildung 6-11 veranschaulicht schematisch die Beziehung zwischen Speichervolumen, minimaler Mächtigkeit des Speicherhorizontes und maximaler Bohrtiefe sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf die für die Speicherung geeigneten Bereiche.

⁵¹ Speicherhorizont meint hier nicht eine bestimmte stratigraphische Einheit, sondern die Summe der für die Speicherung geeigneten Horizonte. Vgl. dazu Kap. 5.1.2.

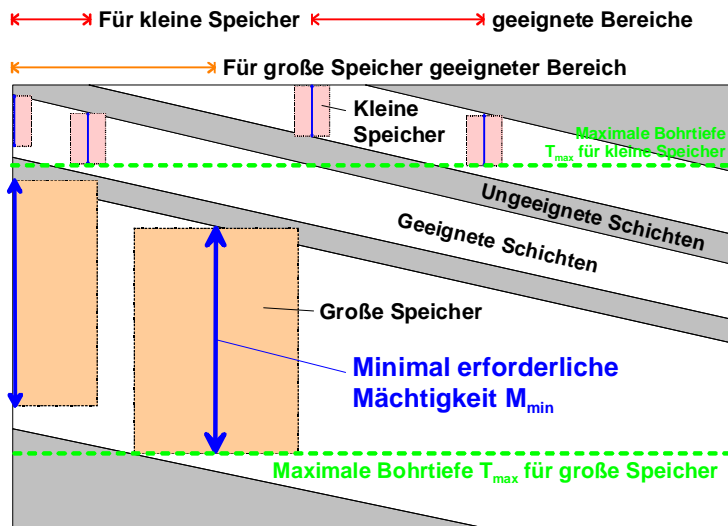


Abbildung 6-11: Einbeziehung von Systemkenngrößen und nicht-geologischen Faktoren (hier Speichervolumen und Bohrtiefe → Baukosten) in das Bewertungskonzept. Zugrunde liegen Überlegungen zur Speichergeometrie (Tabelle 6-12), wonach ein Speicher eine seinem Volumen angemessene Mindesthöhe haben sollte. Eine für die Speicherung geeignete Schicht oder ein Schichtpaket muß deshalb eine Mindestmächtigkeit M_{min} aufweisen. Diese wird durch die primäre Mächtigkeit der Schicht und die Schichtgeometrie limitiert. Als weitere Limitierung ergibt sich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine maximal mögliche (sinnvolle) Bohrtiefe T_{max} . Die Parameter M_{min} und T_{max} schränken den für die Speicherung geeigneten Bereich ein, sollten deshalb in das Bewertungskonzept mit aufgenommen werden.

Abbildung 6-11 macht deutlich, daß die Einbeziehung des Speichervolumens sich entscheidend auf die Festlegung der geeigneten Gebiete auswirkt. Es kann gefolgert werden, daß ein Standort, der für kleine Projekte sehr gut geeignet ist, für große ungeeignet sein kann, da diese eine erheblich größere Mächtigkeit des Speicherhorizontes voraussetzen. Andererseits kann der Speicherhorizont bei größeren Projekten tiefer liegen. Aus beidem folgt, daß ein Standort eigentlich nur dann bezüglich seiner Eignung beurteilt werden kann, wenn bereits bekannt ist, wie groß der Speicher etwa werden soll.

Letztlich ergibt sich daraus ein konzeptionelles Problem, da sich eine regionale Analyse der generellen Eignung für Unterspeicherverfahren und eine bereits vorher festgelegte Speicherkonfiguration eigentlich ausschließen. Lösungen für dieses Problem bieten Bewertungsmodelle, die hinsichtlich der Speicherkonfiguration flexibel sind. Ein solches Modell wird in Kap. 8.2 vorgestellt. Die andere Lösungsmöglichkeit besteht darin, das zu bewertende Verfahren in unterschiedliche Kategorien aufzusplittern und diese getrennt zu behandeln. Die Einteilung in verschiedenen Kategorien kann dabei nach verschiedenen Kriterien erfolgen: dem Speichertyp, dem Speichervolumen und der Speichertemperatur. Die Speichertemperatur wird hier eingeführt, da davon auszugehen ist, daß die geologischen Anforderungen mit der Höhe der Speichertemperatur spezifischer werden, nicht zuletzt deshalb, weil Verluste und Wirtschaftlichkeit eng mit diesem Parameter verknüpft sind. Tabelle 6-13 zeigt einen Vorschlag zur Kategorienbildung für Erdsondenspeicher.

Kategorien		Volumen in 1000m ³		
		Klein: V < 10	Mittel: 10 < V < 50	Groß: V > 50
T _{max} [°C]	Kälte/NT: T < 15	1	2	3
	MT: 15 < T < 50	4	5	6
	HT: T > 50	7	8	9

Tabelle 6-13: Vorschlag zur Einteilung der Speicherverfahren in „bewertbare“ Kategorien am Beispiel Erdsondenwärmespeicher: Soll geprüft werden, ob ein Standort für die Erdsondenspeicherung geeignet ist, so macht es einen erheblichen Unterschied, ob der Speicher 10.000 oder 250.000m³ Volumen haben soll, da der größere Speicher eine größere Mächtigkeit des zur Speicherung geeigneten Horizontes erfordert (vgl. Abbildung 6-11).

Die Einteilung in drei Temperaturniveaus erfolgt, da die Anforderungen an den Untergrund mit steigender Temperatur anwachsen. Sie ist aber weniger bedeutsam als die Einteilung nach dem Speichervolumen.

Der in Tabelle 6-13 gezeigte Vorschlag schafft insgesamt neun Projektkategorien für die Erdsondenwärmespeicherung, was aus technischer und physikalischer Sicht durchaus plausibel erscheinen mag. Allerdings muß nun für jede einzelne dieser neun Projektkategorien eine eigene Bewertung durchgeführt werden. Für

das Bewertungskonzept hat die weitreichenden Konsequenzen: eine „Bewertungskarte der Eignung für Erdsondenwärmespeicher“ z.B. könnte nur die Eignung für eine einzige Kategorie zeigen, es müsste also gegebenenfalls für jede Kategorie eine eigene Karte erstellt werden (siehe dazu auch Kap. 6.2.3.1.2).

6.4.2.2.2 Einbeziehung von infrastrukturellen Kriterien in die Standortbewertung

Die Frage ob und inwieweit infrastrukturelle Gesichtspunkte in eine Bewertung oder Potentialanalyse einbezogen werden sollten, ist interessant, gleichzeitig aber auch extrem vielschichtig. Besonders diskussionsbedürftig ist dabei der Aspekt „Besiedlungsdichte“. Im Vordergrund steht die Frage, ob eine niedrige Besiedlungsdichte zwangsläufig das Potential für Erdwärmennutzungen senkt oder es nicht gerade dünnbesiedelte Gebiete sind, die aufgrund der schlechten oder teureren Erschließung mit Gas/Heizöl besonders günstig für den Einsatz von Erdwärme sind. Der Aspekt der Besiedlungsdichte ist somit insbesondere dann interessant, wenn das Nachfragepotential einer Region ermittelt werden soll. Aber auch wenn eine geologisch orientierte Bewertung durchgeführt wird, ist zu überlegen, ob dünnbesiedelte Gebiete aus der Untersuchung ausgeklammert werden können, um den Arbeitsaufwand für die Datenerhebung zu verringern.

Bezüglich der Besiedlungsdichte müssen zwei Größen unterschieden werden: Die bestehende Besiedlung und die zukünftige Entwicklung der Besiedlung. Im Bereich der aktuellen Besiedlung („Bestand“) besteht kurzfristig das höchste (Nachfrage-)Potential. Die zukünftige Besiedlung ist dagegen von besonderem Interesse, da in Bereichen, die für eine zukünftige Bebauung vorgesehen sind, ein besonders hohes Potential für den Einsatz moderner regenerativer Energiekonzepte zu erwarten ist. Die zukünftige Besiedlungsdichte kann aus Planungsunterlagen und Bebauungsplänen abgeleitet oder aber anhand einfacher Überlegungen abgeschätzt werden. Da im Gegensatz zu vielen anderen Ländern das deutsche Recht Bebauung weit außerhalb von bestehenden Siedlungsflächen kaum zulässt, kann davon ausgegangen werden, daß mit einem gewissen Abstand zu den bestehenden Gemeindegrenzen die Wahrscheinlichkeit, daß Wohngebäude oder gewerbliche genutzte Gebäude errichtet werden, extrem sinkt. Gebiete, die einen bestimmten Abstand zu aktuell besiedelten Flächen haben, weisen also kein oder sehr geringes Nachfragepotential auf und sind deshalb auch nicht für eine detaillierte Standortbewertung von Interesse. Sowohl für Potentialstudien als auch für anderweitig orientierte Zielsetzungen ist es interessant, den Anteil dieser Gebiete zu ermitteln. Für Unterfranken ergibt sich folgende Situation:

Von den 8535km² Gesamtfläche Unterfrankens befinden sich 452km² oder 5,3% auf besiedeltem Gebiet (Siedlungsflächen nach ATKIS25). Das potentielle zukünftige Wachstum wird berücksichtigt, indem um alle aktuellen Siedlungsflächen eine Pufferzone festgelegt wird, die einen definierten Abstand zur bestehenden Siedlungsgrenze hat. Man kann dafür einen konstanten Wert festlegen (z.B. pauschal 1km von der Siedlungsgrenze) oder die Pufferdistanz von der Siedlungsfläche (oder Einwohnerzahl) abhängig machen. Über die Einbeziehung der Siedlungsgröße in die Festlegung der Pufferdistanz kann berücksichtigt werden, daß bei sehr kleinen Ortschaften die zukünftige Bebauung sich nicht im gleichen Maß von den Siedlungsgrenzen entfernen wird, wie z.B. bei Großstädten. Tabelle 6-14 zeigt ein Beispiel für eine entsprechende Festlegung, Abbildung 6-12 die Anwendung dieser Werte auf die Siedlungsflächen in Unterfranken.⁵²

⁵² Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit „echte“ raumplanerische Daten (Bebauungspläne etc.) auszuwerten, was im Einzelfall sicher sinnvoll ist, für Gesamtunterfranken in Anbetracht der Gemeindezahl einen ungerechtfertigt hohen Aufwand bedeuten würde.

Siedlungsfläche [km ²]	Abstand zur aktuellen Siedlungsgrenze (=interessanter Bereich) [m]
größer 5	2500
5 bis 2	1250
2 bis 1	500
1 bis 0.2	250
<0.2	125

Tabelle 6-14: Festlegung eines „interessanten“ Bereichs um eine Siedlung durch Festsetzung einer Pufferzone in Abhängigkeit von der Siedlungsgröße. Vgl. Abbildung 6-12.

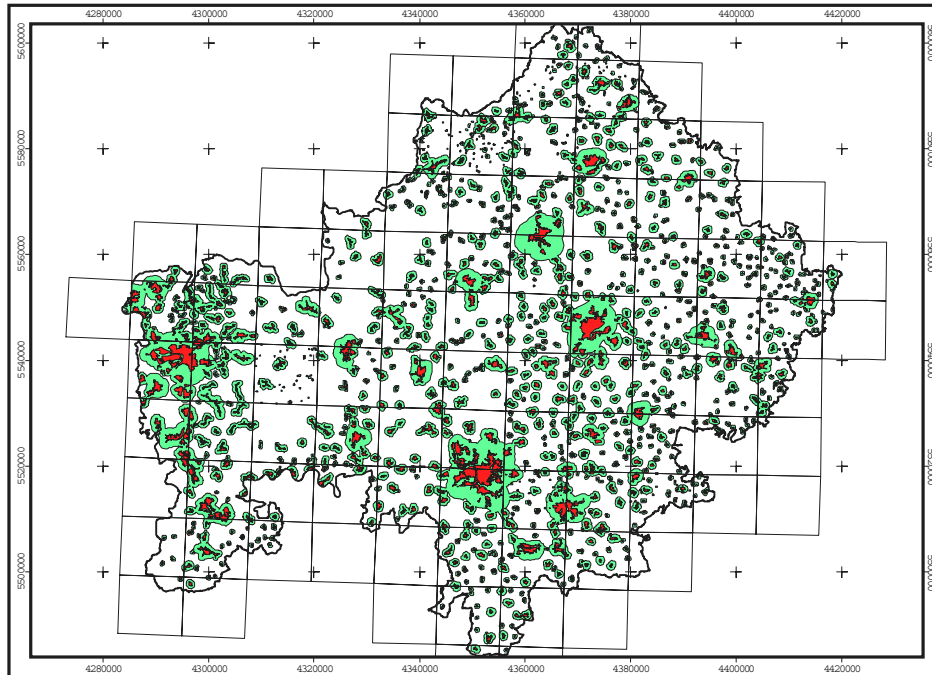


Abbildung 6-12: Gebiete mit aktuellem und zukünftigem Nutzungspotential in Unterfranken bzw. Gebiete in denen eine genaue Untersuchung der Standorteignung vorrangig erscheint. Die Festlegung der Pufferdistanzen erfolgt nach Tabelle 6-14.

Rot: Siedlungsflächen nach ATKIS25

Grün: zukünftiges Nutzungspotential (nach Tabelle 6-14).

Durch die Eingrenzung der „interessanten“ Gebiete auf solche Pufferzonen um besiedelte Flächen nach Tabelle 6-14 sind etwa 2640km² oder 31% der Fläche Unterfrankens verstärkt untersuchungswürdig. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, wie sich diese interessanten Flächen auf die geologischen Einheiten verteilen. Entsprechende Werte sind Tabelle 5-6 zu entnehmen.

Ein besonderer Aspekt der Besiedlungsdichte ist die **Bebauungsdichte**. Auch diese wirkt sich auf die Anwendbarkeit von Verfahren und damit auf das Potential bzw. die Bewertung von Flächen aus. So ist in dicht bebauten, innerstädtischen Bereichen im Allgemeinen keine umfangreiche Anwendung thermischer Nutzungen des Untergrundes möglich, da dort aufgrund des geringen Platzangebots Bohrungen nicht in größerer Zahl problemlos niedergebracht werden können (vgl. KALTSCHMITT ET AL. 1999).

Weitere infrastrukturelle Aspekte werden nicht behandelt. Es bleibt anzumerken, daß eine Bewertung infrastruktureller Voraussetzungen schwieriger ist, als dies auf den ersten Blick scheinen mag. So ist z.B. die Feststellung, daß das Vorhandensein eines Nah- oder Fernwärmenetzes ein günstiger Faktor für die Eignung zur thermischen Nutzung sei, nicht notwendigerweise zutreffend. Definiert man, daß Standorte, die eine Distanz von <1km zu einem solchen Netz haben (oder auch zu einer Wärmequelle, Industrieanlagen etc.) günstig sind, so können mit Hilfe von einfachen Distanzoperatoren die (scheinbar) günstigen Gebiete ermittelt werden. Bei genauerer Betrachtung erweisen sich pauschale Distanzen aber als wenig geeignet. Entscheidend ist nicht nur die Distanz, sondern auch die Schwierigkeit, die damit verbunden ist, diese Strecke mit einer Rohrleitung zu überbrücken. Hindernisse sind z.B.: dichte Bebauung, Straßen, Fließgewässer, unwegbares Gelände etc. Im GIS ist es möglich, solche Kriterien in sogenannten „Kostenanalysen“ zu berücksichtigen (BILL, 1999b). Der dazu notwendige Aufwand steht aber in keinerlei Verhältnis zu einem denkbaren Nutzen. Für die **oberflächennahe Geothermie** sind solche Überlegungen ohnehin nicht wesentlich, da die

Anlagengrößen in den seltensten Fällen eine Entfernung Wärmequelle ↔ Wärmeverbraucher von mehr als einigen 100m erlauben. Im Gegensatz dazu können entsprechend infrastrukturelle Voraussetzungen bei Potentialstudien zu tiefen Geothermieprojekte durchaus berücksichtigt werden (vgl. dazu ERBAS ET AL., 1997; RUHLAND, 1997).

6.4.3 Bildung und Festlegung der Bewertungskriterien

Die Festlegung von aussagekräftigen Kriterien gehört zu den wesentlichen und gleichzeitig schwierigsten Aufgaben einer GIS-gestützten Bewertung. Auf die generellen Probleme bei der Definition und Gewichtung von Kriterien wurde bereits in Kap. 6.4.1 eingegangen. Im folgenden Abschnitt wird auf die speziellen Probleme der Kriteriendefinition für die Standortbewertung für die thermische Nutzung des Untergrundes eingegangen. Die Betrachtungen beschränken sich auf die Verfahren der Untergrundspeicherung. Die Entzugsverfahren sind in dieser Hinsicht weniger problematisch, da sie weniger spezielle Anforderungen an den Untergrund stellen und zugleich schon deutlich mehr verwertbare Erfahrungen vorliegen, an denen die Bewertungskriterien „eichbar“ sind.

6.4.3.1 Herleitung von Kriterien Erfahrungen mit bestehenden Projekten

Die ursprüngliche Konzeption dieser Untersuchung sah vor, bestehende Erfahrungen aus Speicherprojekten auszuwerten und aus den Ergebnissen möglichst allgemeingültige Kriterien abzuleiten. In einer umfangreichen Literaturrecherche wurden etwa 1500 Literaturtitel aus dem Bereich Speicherung und verwandter Themengebiete erfaßt. Damit konnte ein weitgehend vollständiger Überblick über die bestehenden Speicherprojekte bis etwa 1997/98 gewonnen werden. Die Zahl derjenigen Projekte, über die zumindest ein Minimum an verwertbarer Information vorliegt, beläuft sich dabei auf etwa 120 (vgl. Kap. 3.1.6.1). Die Quellen haben allerdings einen sehr unterschiedlichen Informationsgehalt. Häufig sind die Projektbeschreibungen sehr lückenhaft, teilweise auch nicht zweifelsfrei verlässlich. Nicht zu allen Projekten konnten Informationen aus direkten, von unmittelbar an den Projekten beteiligten Autoren verfaßten Quellen, bezogen werden. Teilweise stammen die Daten auch aus früheren Zusammenstellungen anderer Autoren.

Das Ziel, aus der Analyse bestehender Projekte allgemeingültige Kriterien zu Untergrundspeicherprojekten aller Art abzuleiten, konnte nur sehr unzureichend bzw. gar nicht erfüllt werden. Dafür läßt sich eine Reihe von Gründen angeben:

1. Die Gesamtzahl der bestehenden Projekte pro Speichertyp ist zu gering, um deutliche Trends bezüglich der zulässigen Wertebereiche von Untergrundeigenschaften erkennen zu lassen (vgl. Abbildung 3-14).
2. Nicht über alle in der Literatur erwähnten Projekte liegen verwertbare Informationen vor.
3. Detaillierte Angaben zu Projekten, auch zu Forschungsvorhaben, sind häufig nicht veröffentlicht. Sie liegen vielmehr nur in instituts- oder firmeninternen Berichten vor, die nur mit großem zeitlichen und/oder finanziellem Aufwand erhältlich sind. Oftmals sind Daten (z. B. Pumpversuchsauswertungen) gar nicht mehr verfügbar.
4. Häufig fehlt eine wissenschaftliche Bearbeitung. Meist beschränkt sich die Förderung offensichtlich auf die Planung und den Bau entsprechender Anlagen, während für eine wissenschaftlich Projektbegleitung und langfristiges Monitoring keine Mittel zur Verfügung stehen.
5. Die meisten Veröffentlichungen über Speichervorhaben stellen Kurzfassungen von Tagungsbeiträgen dar. Vom geologischen Standpunkt aus macht sich hier nachteilig bemerkbar, daß auf den einschlägigen Fachtagungen (vgl. Tabelle 1-2) vorrangig über technische und physikalische Fragestellungen, Systemverhalten und Wirtschaftlichkeit berichtet wird.
6. Nur wenige Veröffentlichungen befassen sich tatsächlich mit der Geologie am Speicherstandort (s. Punkt 5). Angaben zu den geologischen Verhältnissen sind teilweise irreführend, da von fachfremden Autoren unzulängliche Begriffe verwendet werden.
7. Meist ist bei den angegebenen Werten nicht nachvollziehbar wie und wo sie ermittelt wurden. So ist z.B. bei k_f -Werten fast nie nachvollziehbar, ob sie im Labor- oder Feldversuch ermittelt wurden oder aus anderen Daten berechnet (oder abgeschätzt) wurden.

8. Es ist nicht immer zweifelsfrei erkennbar, ob die angegebenen Untergrunddaten oder Anlagenparameter in der Planungs-, in der Bau- oder in der Betriebsphase ermittelt wurden. Es ist dann fraglich, ob es sich um Abschätzungen, Modellierungsergebnisse oder um gemessene Werte handelt (vgl. auch Punkt 7). Da häufig die Originalquellen nicht verfügbar sind (siehe Punkt 3) kann dann nicht mehr nachvollzogen werden, welche Angaben die „richtigen“ sind. Ebenso wurden Projekte gegenüber der Planungsphase erweitert oder verkleinert, in unterschiedlichen Quellen werden dann verschiedene Angaben gemacht.
9. Ein Zusammenhang zwischen Systemverhalten (Wirkungsgrad, Wirtschaftlichkeit, Einsparungen) und den geologischen Voraussetzungen am Speicherstandort läßt sich so gut wie nie herstellen, da selten über beide Aspekte aussagekräftige Daten vorliegen. Es läßt sich deshalb nicht ermitteln, welche Bedingungen besonders günstig oder besonders schlecht sind.
10. Die Bandbreite, was die Größe, Temperaturen und das gesamte Anlagenkonzept der Speicherprojekte anbetrifft ist sehr groß. Es gibt selten zwei oder mehrere Projekte, die bei ähnlicher Konzeption unter vergleichbaren geologischen Bedingungen durchgeführt wurden. Damit ist eine Vergleichbarkeit nicht gegeben.

Die Ergebnisse der Recherche zu den bestehenden Projekten im Bereich UTES lassen sich wie folgt zusammenfassen:

UTES-Projekte sind nach wie vor in fast allen Fällen absolute Unikate. Standardlösungen zeichnen sich erst langsam in wenigen Anwendungsbereichen ab (z.B. Aquifer-Kältespeicher in den Niederlanden und Kühlung von Telestationen in Schweden; SANNER, BOISSAVY ET AL., 1999). Aus der Bandbreite bisher vorliegender Erfahrungen werden bestenfalls **Trends** sichtbar, die Machbares von nicht Machbarem unterscheiden lassen. Diese Trends liegen allerdings im Bereich dessen, was schon aus einfachen Überlegungen abzuleiten ist. So z.B. die Feststellung, daß k_f -Werte von kleiner $1 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ ungünstig für die Aquiferspeicherung sind. Eine Umsetzung dieser Erfahrungs- oder Schätzwerte in **zahlenmäßig erfaßbare** (skalierbare) Kriterien ist meist nicht möglich.

Zu gleichen Erkenntnissen, was die Herleitung von Kriterien aus bestehenden Projekten betrifft, kommen auch andere Autoren. So stellte beispielsweise Herr Dr. B. Sanner (freundl. mündl. Mittlg.) fest, daß es bei vielen Projekten nicht mehr möglich ist, die relevanten Untergrunddaten zu ermitteln, selbst wenn persönliche Kontakte zu an der Planung beteiligten Personen bestehen.

Die Ableitung von Bewertungskriterien für die Untergrundeigenschaften innerhalb dieser Untersuchung stützt sich deshalb im Wesentlichen auf die in den Kapiteln 2 und 3 angestellten Überlegungen zu den an den Verfahren beteiligten hydrogeologisch-physikalischen Prozessen.

6.4.3.2 Charakterisierung der Bewertungskriterien

Kriterien für die Bewertung von Standorten bezüglich der thermischen Nutzung des Untergrundes können unterschiedlich klassifiziert werden:

- Schema 1:** Nach formalen Gesichtspunkten, d.h. nach dem Typ (factor oder constraint; vgl. Kap. 6.4.1) oder der verwendeten Skala (metrisch, ordinal, nominal).
- Schema 2:** Nach ihrer Zugehörigkeit zu einem Themenkomplex (naturräumlich, kulturräumlich, rechtlich).
- Schema 3:** Nach ihrem Anwendungs- oder Gültigkeitsbereich (vgl. Kap. 6.4.2.2).

Nach der formalen Klassifikation (**Schema 1**) können insgesamt drei (Haupt-)Typen unterschieden werden:

- a) **Ausschließende Kriterien** (= geeignet/ungeeignet). Beispiel: Trinkwasserschutzgebiet.
- b) **Unabhängig bewertbare Kriterien** (= GUT \leftrightarrow SCHLECHT). Beispiel: Wärmeleitfähigkeit bei erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen; hoch = gut; niedrig = schlecht.
- c) **Abhängig bewertbare Kriterien** ($x\{y\}$ = GUT, WENN $x=1$ UND $y=1$ aber SCHLECHT, WENN $x=1$ und $y=10$). Beispiel: Grundwasserführung bei der Erdsondenwärmespeicherung - gut bei niedriger Grundwasserfließgeschwindigkeit, schlecht bei hoher Grundwasserfließgeschwindigkeit.

Diese Haupttypen werden durch die auf das Kriterium anwendbaren Skalen weiter gegliedert (z.B. Bohrbarkeit, Typ b = nominal skaliert, Wärmeleitfähigkeit gleichfalls Typ b = metrisch skaliert; vgl. Kap. 6.3.2).

Die Klassifikation von Kriterien nach **Schema 2** ist eng mit den Aspekten der Zielsetzung und Abgrenzung der Bewertungsanalyse (Kap. 6.2.1.1 und 6.4.2.2) verknüpft. So müssen bei einer Analyse des Nutzungspotentials (Kap. 6.2.3.1.1) infrastrukturelle (kulturräumliche) Faktoren berücksichtigt werden, wohingegen bei einer rein geologischen Betrachtung solche Aspekte ausgeklammert werden können oder gar müssen.

Schema 3 berücksichtigt, daß jedes Kriterium unterschiedliche Bedeutungen sowohl für verschiedene Verfahren als auch innerhalb der einzelnen Verfahrensgruppen haben kann. Das Kriterium mit dem universellsten Anwendungsbereich ist sicherlich die Frage Trinkwasserschutzgebiet JA/NEIN, wohingegen die Aspekte Porosität, Permeabilität und thermische Parameter sehr verfahrensspezifisch sind.

6.4.3.3 Bewertungskriterien für die Standortbewertung

6.4.3.3.1 Geologische Kriterien

Die geologischen (Untergrund-) Kriterien wurden in Kapitel 3 bei der Vorstellung der einzelnen Verfahren vorgestellt und diskutiert (siehe dort). Tabelle 6-15 faßt die maßgeblichen Untergrundeigenschaften und ihre Bedeutung für die verschiedenen Verfahren der thermische Nutzung des Untergrundes zusammen:

	allgemeine Gesteinsparameter										hydrogeologische Parameter							geo-hydro-chemische Param.					thermische Param.		
	sehr günstig: ++ günstig: + ungünstig: - sehr ungünstig: -- unterschiedlich: ~ ohne Bedeutung: o unmöglich: /	Festgestein	Lockergestein	Lockergest.: kleine Korngroßen	hoher Zementationsgrad	starke Klüftigkeit	starke vertikale Zonierung	stark anisotrope Eigenschaften	gute Bohrbarkeit	hohe Bohrlochstandfestigkeit	starke GW-Bewegung	gesättigt	ungesättigt	unges.: hoher Sättigungsgrad	gespannter Aquifer	hohe Transmissivität	hohe effektive Porosität	hohe Permeabilität	hohe Ges.-Mineralisation des GW	hohe Härte (Gesamt / Karbonat)	Eisen, Mangan	extreme Eh/pH-Bedingungen	hohe Sulfidgehalte (Gestein)	hohe vol. Wärmekapazität	hohe Wärmeleitfähigkeit
Untergrundfaktoren																									
Speicherverfahren																								zunehmende Ansprüche an den Untergrund	
Erd/Kiesbeckenspeicherung	--	++	o	-	+	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-		-
ESW Sp in der unges. Zone	++	~	++	+	--	-	-	++	+	-	-	++	-	-	-	-	-	o	~	~	o	o	+		~
ESW Sp in der ges. Zone	+	+	+	~	-	-	-	++	+	--	-	-	o	~	++	--	-	o	~	~	o	o	+		~
Kavernenspeicher	++	/	/	++	--	--	-	++	++	--	~	~	~	o	--	--	--	--	--	--	--	--	--		--
Bohrlochspeicher	++	/	/	++	-	-	-	++	++	--	++	--	++	o	~	~	~	--	--	--	--	--	+		~
Aquiferspeicher	~	++	--	~	++	--	--	o	o	--	/	-	+	(~)	++	++	++	--	--	--	--	--	+		o
Entzugsverfahren																								zunehmende Ansprüche an den Untergrund	
Grundwassergekoppelte WP	-	++	--	-	++	o	o	++	+	++	-	\	-	++	++	++	--	--	--	--	--	o	o		
Vertikale Sonden unges. Zone	~	-	++	o	+	o	o	++	++	-	-	++	-	-	-	-	o	o	o	o	o	+	++		
Vertikale Sonden, gesättigte Zone	~	+	o	++	--	-	o	++	++	++	-	-	o	o	++	++	o	~	~	o	o	+	-		
Kollektoren	--	++	++	--	--	--	-	-	-	(-)	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	++	

Tabelle 6-15: Übersicht über die geologischen Anforderungen an die in Kapitel 3 beschriebenen Untergrundspeicher- und Entzugsverfahren. Leere Felder: Parameter und Verfahren schließen sich gegenseitig aus Prinzip aus.

6.4.3.3.2 Kriterien an der Oberfläche

Oberflächenfaktoren können sowohl aus dem **naturräumlichen** als auch aus dem **kulturräumlichen** Themenkreis stammen. Primär sind die Verfahren der thermischen Untergrundnutzung (abgesehen von horizontalen Erdreichwärmetauschern) weitgehend unabhängig von den Verhältnissen an der Oberfläche. Die wenigen **direkt** bedeutsamen (und unveränderlichen) Einschränkungen durch oberflächenbezogene Faktoren sind offensichtlich und werden deshalb nicht weiter diskutiert. Als Beispiel werden hier Flächen in **extremen Steillagen** oder innerhalb von **Oberflächengewässern** genannt, die aus naheliegenden Gründen ungeeignet sind.

Viele Oberflächenfaktoren haben allerdings eine indirekte Bedeutung für die Standorteignung. Unter den naturräumlichen Faktoren können hier als Beispiel Standorte mit hoher Sonneneinstrahlungssumme angeführt werden, die bei einer kombinierten Anwendung von Untergrundspeicherung und solarer Wärmeversorgung (Kap. 3.3) besonders günstig sind. Bei den kulturräumlichen Faktoren wirken sich z.B. Gesichtspunkte wie Zugänglichkeit und Erschließbarkeit auf die Standorteignung aus. Schon aus diesen wenigen Beispielen erschließt sich, daß die Frage, ob solche Aspekte in die Standortbewertung einbezogen werden können (oder sollen) stark von der Zielsetzung der Untersuchung abhängig ist. Im ersten Fall (Sonneneinstrahlung) ist die Einbeziehung nur sinnvoll, wenn gezielt die Eignung für den beschriebenen speziellen Anwendungsfall (z.B. Speicherung von thermischer Solarenergie) untersucht wird, im zweiten Fall (Zugänglichkeit), wenn eine Potentialstudie im Sinne von Kap. 6.2.3.1.1 erstellt werden soll (Nachfragepotential, Anwendungspotential). Da in dieser Untersuchung der Versuch unternommen wird eine möglichst **generelle** Bewertung der **Untergrundsituation** durchzuführen, wird auf die eingehende Behandlung der Oberflächenfaktoren verzichtet. Einige grundlegende Aspekte werden im Folgenden zusammengefaßt:

Wesentliche **naturräumliche Faktoren** sind Klima und Relief. Die klimatischen Verhältnisse sind in zweierlei Hinsicht bedeutsam: sie sind zum einen entscheidend für die Anlagenkonzeption (Wärmebedarf, Energieangebot) zum anderen wirken sich auf die Untergrundverhältnisse aus (Wasserhaushalt, Untergrundtemperatur). Daraus lassen sich direkte Schlüsse für die Eignung eines Standortes ziehen. Standorte mit niedrigen Jahresmitteltemperaturen sind ungünstig, da hier ein hoher Wärmebedarf, bei gleichzeitig niedriger Untergrundtemperatur (vgl. Kap. 4.4.6) vorliegt. Die Folge sind relativ höhere Verluste bei der Speicherung und schlechte Wärmepumpen-Effizienz beim Wärmeentzug. Nach HART & COUVILLION (1986) ist allerdings bei der Frage, ob erdgekoppelte Wärmepumpen energetisch sinnvoll eingesetzt werden können (verglichen mit herkömmlichen Heizsystemen), nicht der Betrag der Jahresmitteltemperatur (und damit auch die Temperatur des Untergrundes), sondern die Differenz zwischen jährlichem Temperaturmaximum und -minimum verantwortlich. Insgesamt ist fraglich, ob der Faktor „(Außen-)Temperatur“ in eine vergleichende Standortbewertung aufgenommen werden sollte.

Die Bedeutung des Faktors „Relief“ wurde in diesem Kapitels bereits eingangs erwähnt und bedarf keiner umfangreichen Erläuterung. Hangneigung und Exposition spielen bei allen Nutzungen eine (wenngleich wenig bedeutsame) Rolle, bei denen Solarenergie als Wärmequelle genutzt wird (s.o.). Zu den naturräumlichen Oberflächenfaktoren können zuletzt auch Bodentyp- und -art gerechnet werden. Sie sind für die in dieser Untersuchung betrachteten Verfahren wenig relevant⁵³. Klimatische Faktoren, Relief, Exposition und Bodenkundliche Parameter sind im Bereich thermischer Nutzungen des Untergrundes ausschließlich für die Gewinnung von Wärme mit horizontalen Erdreichwärmetauscher von Bedeutung. Eine ausführliche Betrachtung hierzu gibt WITTEK (1998)

Auf die Bedeutung von **infrastrukturellen Kriterien** wurde in Kap. 6.4.2.2.2 eingegangen. Dort nicht genannte Einflußfaktoren sind die verkehrstechnische Erschließung, bestehende Energieversorgungseinrichtungen (z.B. Ferngasleitungen) und auch potentielle (Ab-)Wärmelieferanten wie Industrieanlagen oder

⁵³ Diskutiert werden könnte theoretisch ein Einfluß der Grundwasserneubildung.

Blockheizkraftwerke. Um das Nachfragepotential an Erdwärmennutzungen zu ermitteln, sollte man feststellen, inwieweit sich bestehende Einrichtungen an ein Erdwärmeenergiesystem anbinden lassen. Derart spezielle technische Fragestellungen können aber in einer geologisch orientierten Untersuchung nicht erörtert werden.

6.4.3.3.3 Rechtliche Kriterien

Die rechtlichen Kriterien gehören prinzipiell dem kulturräumlichen Themenkreis an, werden aber gesondert betrachtet, da auch sie eine „geologische Komponente“ besitzen. Letztlich bilden sie derzeit das entscheidende Kriterium für die Beantwortung der Frage, ob an einem Standort eine Erdwärmeanlage überhaupt realisierbar ist. Die rechtlichen Voraussetzungen für untiefe Erdwärmeanlagen wurden in Kapitel 3.6 vorgestellt. Zusammengefaßt lauten die für die Bewertungskonzeption wesentlichen Aussagen:

- keine Erdwärmeanlagen in Trinkwasserschutzgebieten Zone 1-3a. In der Zone 3b in Ausnahmefällen,
- keine Erdwärmeanlagen in gespannten oder in tiefergelegenen Grundwasserstockwerken (i.d.R.).

Die erste Aussage ist dabei als Kriterium unmißverständlich und bei Vorhandensein der entsprechenden Daten (digitalisierte Schutzgebietsgrenzen) in einer GIS-basierten Bewertung direkt anwendbar. Die Einbeziehung der zweiten Aussage in das Bewertungskonzept erfordert einen enormen Aufwand und eine ausreichend gute geologische und hydrogeologische Datenbasis. Selbst wenn diese vorhanden ist, bestehen große Unsicherheiten, die sich aus Definitions- und Ermessensfragen ergeben. Die entsprechenden Zusammenhänge werden in Kap. 8.2.4.3 beschrieben.

6.4.3.3.4 Gewichtung der Bewertungskriterien

Nicht alle Kriterien sind, was ihre Bedeutung für die Eignung zur thermische Nutzung des Untergrundes betrifft, gleichwertig. Deshalb müssen sie nach dem in Kapitel 6.4.1 beschriebenen Muster „gewichtet“ werden. Hierin liegt eine der Hauptschwierigkeiten des Bewertungsvorgangs, da Daten, die zur Kalibrierung der Gewichte herangezogen werden könnten, nicht vorliegen (vgl. Kap. 6.4.3.1). Das daraus resultierende Defizit wurde durch einen Bewertungsansatz ausgeglichen, der bezüglich der Gewichtung flexibel ist und eine fallweise Neufestlegung der Gewichte ermöglicht (vgl. Kap. 8.2.1)

Grundsätzlich problematisch sind die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kriterien bzw. Kriteriengruppen. Dies betrifft insbesondere alle Fragen, die mit dem Vorkommen und Zustand von Grundwasser zu tun haben. Einfache lineare Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und dem Bewertungsergebnis lassen sich häufig nicht herstellen. Das in dieser Untersuchung erstellte Bewertungsmodell, mit dem versucht wird dieser Problematik zu begegnen, wird in Kap. 8.2 erläutert.

6.4.4 Bildung von Kategorien

Innerhalb des Bewertungsprozesses ist an unterschiedlichen Stellen die Bildung von „Kategorien“ erforderlich. Kategorisiert werden:

- die zu bewertenden Verfahren (Speicherung - Wärmeentzug, große Speicher - kleine Speicher, Hochtemperatur - Niedertemperatur etc.; siehe Kap. 3 und 6.4.2.2.1),
- die Bewertungskriterien (gut – mittel – schlecht, siehe Kap. 6.4.3.2),
- die Bewertungsergebnisse (s.u.),

Die Bewertungsergebnisse können beispielsweise in 6 Kategorien nach folgendem Schema eingeteilt werden:

- 1 = **sehr gut** (geeignet): in jeglicher Hinsicht ohne Kompromisse geeignet
- 2 = **gut**: wie 1, aber mit geringfügigen Einschränkungen geeignet
- 3 = **bedingt**: in den meisten Fällen geeignet, bedarf aber immer einer genaueren Einzelfallbetrachtung, in den meisten Fällen ist eine optimale Konfiguration nicht möglich
- 4 = **ungünstig**: in vielen Fällen nicht geeignet, wenn doch, dann nur mit größeren Abstrichen
- 5 = **schlecht**: nur in wenigen Ausnahmefällen geeignet
- 6 = **ungeeignet**: Nutzung in jedem Fall ausgeschlossen

Die Frage der Bildung von Kategorien kann hier nicht wesentlich vertieft werden, weil sie letztlich in dieser Untersuchung nicht zufriedenstellend beantwortet werden kann⁵⁴. Es wird aber darauf hingewiesen, daß solche Kategorien elementare Bestandteile der Bewertungskonzeption sind. Immer muß ein Kompromiß zwischen der Anzahl der Kategorien und der Aussagekraft der einzelnen Kategorie getroffen werden. So erlaubt eine Einteilung in nur drei Kategorien (z.B. gut geeignet, schlecht geeignet und ungeeignet) keinerlei Differenzierung, wenn Standorte sehr unterschiedlicher Eigenschaften miteinander verglichen werden. Die Einführung einer hohen Anzahl von Kategorien führt bei einer kartenmäßigen Darstellung dagegen zu einer unübersichtlichen Aufsplitterung in sehr kleine Flächen (vgl. dazu auch Kap. 6.2.3.1).

6.4.5 Bewertungsanalysen Zusammenfassung

Die in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Überlegungen zeigen vor allem, daß für eine Bewertungsanalyse von Standorten zur thermischen Nutzung des Untergrundes keine Standardlösungen angegeben werden können. Die möglichen Bewertungsansätze können unterschiedliche Kriterien einbeziehen und diese, je nach Zielsetzung der Bewertung, unterschiedlich gewichten. Auch wenn, wie in der vorliegenden Untersuchung, eine rein geologisch orientierte Bewertung von Standorteigenschaften im Vordergrund steht, können bestimmte technische und infrastrukturelle, vor allem aber auch rechtliche Gesichtspunkte, nicht ohne weiteres ausgeklammert werden. Ein schwerwiegendes Problem stellt dabei dar, daß eindeutige Bewertungskriterien oft nicht aufgestellt werden können, da zwischen einzelnen Bewertungsfaktoren wechselseitige Abhängigkeiten bestehen, die für unterschiedliche Nutzungsarten unterschiedlich definiert werden müssen.

Eine Bewertungskonzeption, die all dies berücksichtigt, muß deshalb vor allem ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen. Ideal wäre eine Lösung, bei der die Rahmenbedingung der Bewertung nicht von vornherein festgesetzt sind, sondern fallweise (vom Benutzer) neu bestimmt werden können. So können unterschiedliche Anlagenkonzepte oder unterschiedliche Bewertungszielsetzungen individuell behandelt werden. Ansätze für die Verwirklichung eines entsprechenden Bewertungsmodells werden in Kapitel 8.2 vorgestellt.

⁵⁴ Insbesondere aufgrund der fehlenden Erfahrungswerte für die Definition der Kriterien.

7 Erstellung der Datengrundlagen für das Bewertungsmodell

In den folgenden Kapiteln werden die Datengrundlagen vorgestellt, die für die Bewertung von Standorten und Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für die thermische Nutzung des Untergrundes innerhalb dieser Untersuchung erarbeitet wurden. Besonders ausführlich wird dabei auf die Konzeption und Verwirklichung eines dreidimensionalen Untergrundmodells eingegangen. Dieses Modell beschreibt die geologische und hydrogeologische Situation in dem neun Kartenblätter der TK25 umfassenden Beispielausschnitt (vgl. Abbildung 1-7). Einleitend wird auf die Erstellung der digitalen geologischen Karte von Unterfranken auf Basis der GÜK200 eingegangen. Andere Datengrundlagen, die nicht unmittelbar die grundsätzliche Konzeption des Bewertungsmodells betreffen („Basisdaten“), werden hier nicht explizit erwähnt. Sofern sie von Bedeutung sind, wurden solche Datensätze in Kap. 6.3.6.4 behandelt.

7.1 Digitale geologische Karte

Bei der Arbeit mit GIS sind geologische bzw. geowissenschaftliche und andere Karten ganz allgemein nur dann sinnvoll einzubeziehen, wenn sie in digitalem Format vorliegen. Karten auf Papier sind bestenfalls zur visuellen Kontrolle von Eingaben und Ergebnissen von Interesse. Zu Analysezwecken sind ausschließlich digitale, klassifizierte (attributierte), georeferenzierte vektorisierte oder gerasterte Karten einsetzbar. Klassifiziert bedeutet in diesem Fall, daß zu jeder Vektorfläche (Polygon) oder jeder Rasterzelle die Information zur Geologie in einer Attributtabelle abgelegt ist (vgl. Kap. 6.1.2.1). *Gescannte* georeferenzierte Karten dienen nur als Hintergrundbilder und sind nicht zur Analyse zu verwenden (vgl. auch HEITZMANN & PHILLIPP, 1999).

Der kleinstmögliche sinnvolle Maßstab⁵⁵ für Analysezwecke in einem GIS, so wie es in der vorliegenden Untersuchung verstanden wird (vgl. Kap. 6.2.1.5), beträgt etwa 1:200.000. Für eine Standortanalyse, die mehr als nur eine grobe Übersicht darstellt, ist dagegen der Maßstab 1:25.000 geeigneter. Betrachtet man die Verfügbarkeit digitaler geologischer Karten in entsprechenden Maßstäben (Tabelle 6-9), so ist sofort einzusehen, daß dieses Material für die vorliegende Untersuchung unzureichend ist. Aus diesem Grund wurden Karten in aufwendiger Arbeit per Hand digitalisiert, georeferenziert und mit Attributen versehen. Zu Beginn dieser Untersuchung wurde, um den notwendigen Arbeitsaufwand in Sinne einer Aufwand-Nutzen-Analyse einschätzen zu können, ein Blatt der GK25 (6125 Würzburg Nord, HOFFMANN, 1967b) digitalisiert. Dabei wurde festgestellt, daß die Digitalisierung und Attributierung eines Kartenblattes mittlerer Komplexität (bezogen auf die Anzahl der Einzelflächen und die Komplexität der Begrenzungslinien) durch eine Person ca. zwei Wochen Zeit in Anspruch nimmt. Dies allerdings nur unter der Voraussetzung, daß gewisse Vereinfachung vorgenommen werden: im Fall von Blatt Würzburg Nord wurden beispielsweise geringmächtige Leithorizonte (z.B. *kuW*, Werksandstein, vgl. Kap. 4.3.5.2.1) nicht berücksichtigt und mit den entsprechenden Haupteinheiten (*ku*) zusammengefaßt. Nimmt man solche Horizonte noch hinzu, ist wegen der zusätzlich zu vektorisierenden Linien und zu definierenden Flächen deutlich mehr Zeit erforderlich. Weiterhin wird das Vektorisieren für die Belange dieser Untersuchung dadurch erschwert, daß die amtlichen geologischen Karten Bayerns grundsätzlich nicht abgedeckt vorliegen. Das heißt, auch geringmächtige Löß- und Flugsanddecken sowie Terrassen etc. sind in den Karten dargestellt und verdecken die viel wesentlichere Information des darunterliegenden Festgesteins. Auf manchen Blättern Unterfrankens betrifft das bis zu 50% der Gesamtfläche. Leider wird auch in den digitalen Versionen der amtlichen geologischen Karten in Bayern offensichtlich an diesem Prinzip festgehalten (GÜK500, digital, BayGLA, 1996, 1998). Obwohl es gerade bei kleinmaßstäbigen digitalen Karten kein Problem wäre, jeweils eine abgedeckte und eine „normale“ Karte in zwei Versionen bzw. auf getrennten Layern zur Verfügung zu stellen, will das BayGLA aber von dieser Möglichkeit keinen Gebrauch machen (freundl. mündl. Mittlg. Dr. Geiß, BayGLA, 1998).

Um Blatt 6125 für die Untergrundanalyse nutzbar zu machen, wurde zusätzlich zur „normalen“ digitalen Version des Kartenblattes eine **abgedeckte** Karte konstruiert, die nur das Festgestein zeigt. Im Bereich des

⁵⁵ Maßstabsbegriff in GIS: siehe Kap. 6.2.1.2.

Maintals ist das allerdings teilweise nicht möglich. Das Abdecken eines Kartenblattes erfordert Kenntnisse der regionalen Geologie, prinzipielles Verständnis geologischer Strukturen und teilweise auch eine besondere Aufmerksamkeit für Unstimmigkeiten in der analogen Kartenvorlage.

Bei ca. 90 relevanten Kartenblättern im Bereich Unterfranken und einem mittleren Aufwand von 80 Arbeitsstunden pro Blatt ergäbe sich für die Erstellung einer digitalen Kartengrundlage auf Basis des Maßstabs 1:25.000 eine Bearbeitungsdauer von ca. vier „Mannjahren“. Dies ungeachtet der Tatsache, daß nur etwa 30% der Fläche Unterfrankens bislang durch herkömmliche analoge Karten dieses Maßstabs abgedeckt werden (vgl. Abbildung 4-1, Tabelle 6-9). Es ist offensichtlich, daß es derzeit weder möglich noch sinnvoll ist, ein derartiges Vorhaben ausschließlich für die thermische Nutzung des Untergrundes zu realisieren. Auch ist es in näherer Zukunft nicht zu erwarten, daß eine entsprechende, auch nur teilweise flächendeckende, digitale Kartengrundlage von offizieller Seite zur Verfügung gestellt werden kann.

Um dennoch auf eine einigermaßen genaue digitale geologische Kartengrundlage zurückgreifen zu können, wurde die für Unterfranken in gedruckter Form inzwischen flächendeckend vorliegende GÜK 200 herangezogen. Wie Tabelle 6-9 zeigt, liegen in diesem Maßstab seit 1998 etwa 30% von Unterfranken auch digital vor. Zu Beginn der Untersuchungen lag noch keines der Blätter digital (abgabefertig) vor, weswegen alle Bereiche der GÜK200 Blatt Frankfurt Ost, Bamberg, Nürnberg und Stuttgart-Nord, soweit sie auf unterfränkischem Gebiet liegen, manuell vektorisiert wurden. Blatt Erfurt, das einen kleinen Teil Unterfrankens im Bereich der Rhön abdeckt, lag bis 1998 weder digital noch analog vor. In manchen Darstellungen in dieser Arbeit fehlt dieser Bereich deshalb.

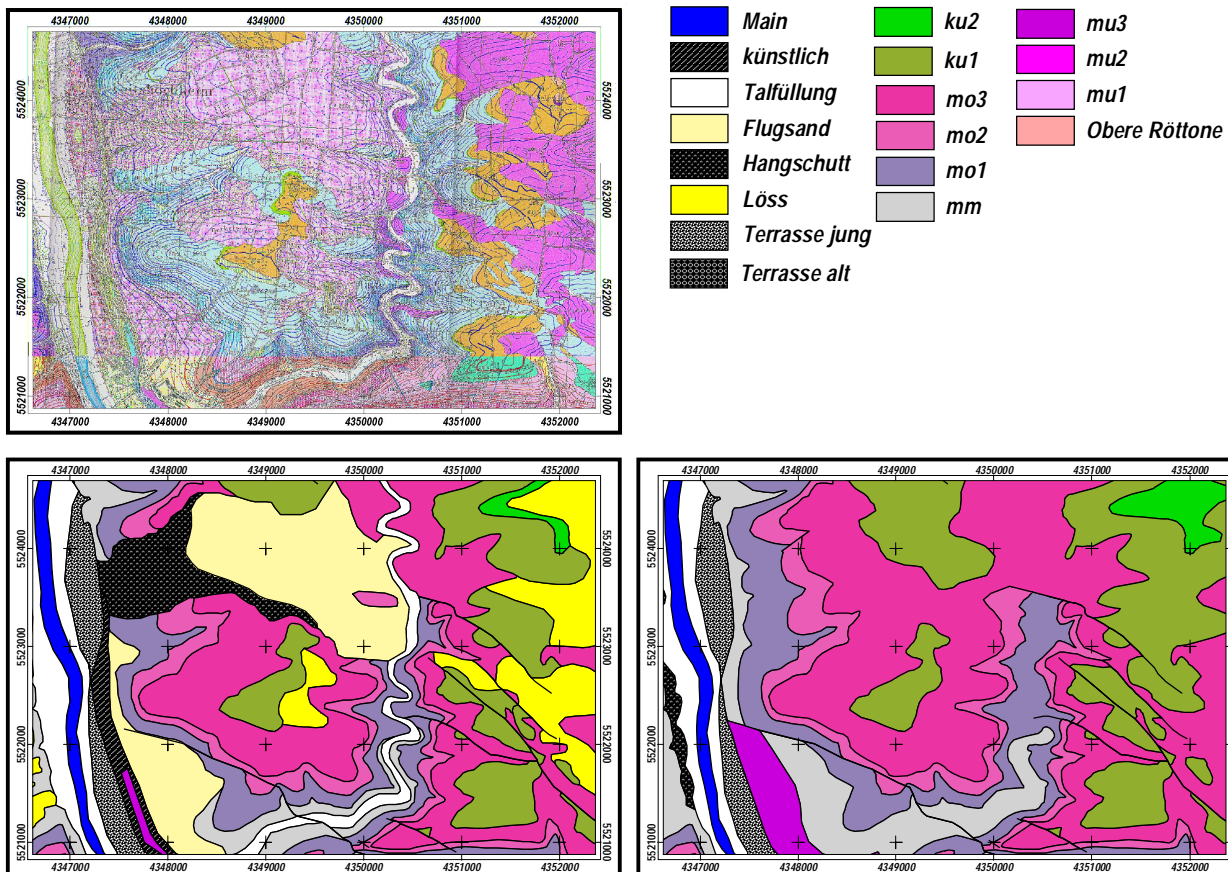


Abbildung 7-1: Digitalisieren geologischer Karten und Erzeugung abgedeckter Karten am Beispiel der GK25 Blatt Würzburg Nord (Ausschnitt). **Oben links:** Gescannte analoge Vorlage; **Unten links:** vereinfachte, nicht-abgedeckte Karte; **Unten rechts:** abgedeckte, vereinfachte Karte. In Gebieten, in denen die Informationen nicht ausreichen um eine Abdeckung vorzunehmen, sind die quartären Einheiten dargestellt (Maintal).

Die Blätter der GÜK200 haben eine weit größere Detailgenauigkeit als die der GK25, da wesentlich mehr Einzelflächen mit komplexerer Geometrie dargestellt sind. Damit steigt auch der Aufwand bei der Vektorisierung und der Attributierung der Flächen. Für das Gebiet Unterfranken wurden insgesamt etwa 6-8 Arbeitswochen aufgewendet. Es wurde eine abgedeckte Version erstellt, d.h. Schichtgrenzen unter Löß- oder anderer Bedeckung wurden konstruiert. Bis auf eine Fläche im Bereich Aschaffenburg liegt somit eine abgedeckte digitale Karte der Festgesteinsoberfläche für den Regierungsbezirk Unterfranken vor.

Abbildung 7-1 zeigt am Beispiel eines Ausschnittes aus der GK25 Blatt 6125 Würzburg Nord einen Vergleich zwischen der analogen Kartenvorlage mit den vektorisierten Ergebnissen der Digitalisierung.

7.2 Dreidimensionales Untergrundmodell

Dieses Kapitel beschreibt das dreidimensionale geologisch-hydrogeologische Untergrundmodell, das die wesentliche Datengrundlage für die Durchführung der Bewertungsanalysen (Kap. 8) darstellt. Das Modell besteht aus diskreten Schichten, deren Lage im Raum durch digitale Strukturmodelle sowie die Mächtigkeit der einzelnen Schichten bestimmt wird. Das Auftreten von Grundwasser wird durch einen vereinfachten, pauschalisierten Grundwassergleichenplan sowie die hydrophysikalischen Eigenschaften der Schichten beschrieben.

7.2.1 Problemstellung

Eine aussagekräftige Beurteilung des Untergrundes bezüglich seiner Eignung für die thermische Nutzung erfordert zweierlei: die Definition plausibler Bewertungskriterien und die genaue Kenntnis der Untergrundverhältnisse, auf die diese Kriterien angewendet werden können. Die Untergrundverhältnisse können, was die Detailgenauigkeit und die Reichweite der Information betrifft, mit sehr unterschiedlichen Mitteln beschrieben werden. Bei der Erstellung eines Bewertungskonzeptes muß deshalb zunächst entschieden werden, welche Form der Beschreibung die sinnvollste ist, um eine dem Bewertungskonzept und -ziel angemessene Basis zu bieten. Dabei muß wiederum am Anfang die Überlegung stehen, welche Information über den Untergrund für die Bewertung eines Standortes tatsächlich entscheidend ist und in welcher Form diese vorliegen sollte.

Im Folgenden wird anhand eines „konstruierten“ Beispiels demonstriert, wie eine Standortbewertung bzw. die Standortsuche für ein Verfahren der thermische Nutzung des Untergrundes prinzipiell aussehen könnte. Aus dieser stark vereinfachten, schematischen Betrachtung lassen sich die wesentlichen Anforderungen an eine Darstellung des Untergrundes (Untergrundmodell) in einem entsprechenden Bewertungssystem ableiten.

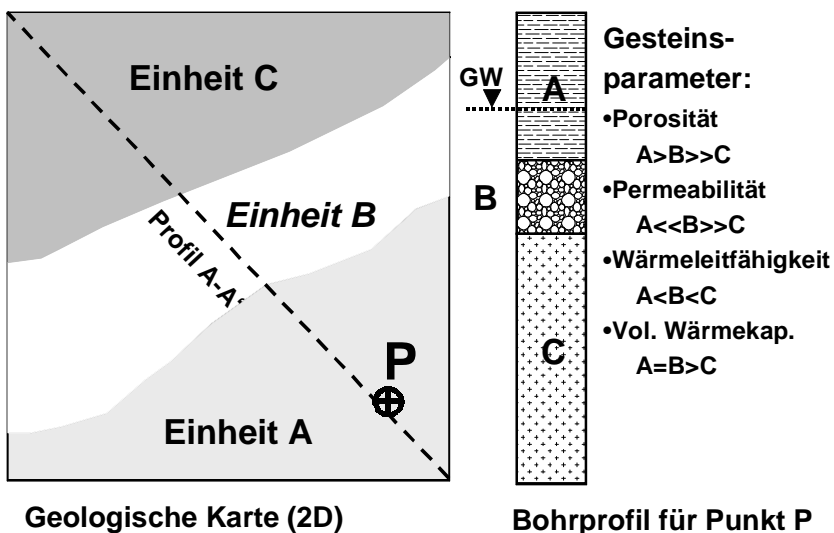


Abbildung 7-2: Ermittlung von für die Aquiferspeicherung geeigneten Standorten (schematisch). Die Skizze zeigt die Ausgangssituation der Bewertung: gegeben sind die „geologische Karte“ und ein Bohrprofil am Punkt P. Die für die Aquiferspeicherung relevanten Eigenschaften der auftretenden Einheiten sind bekannt. Geeignet für die Speicherung sei demnach Schicht B. Weitere Erläuterungen im Text.

Gegeben sei die in Abbildung 7-2 dargestellte Situation: Im einem, hier in Form einer „geologischen Karte“ dargestellten Bereich, sollen mit Hilfe von GIS-Verfahren alle diejenigen Bereiche ermittelt werden, in denen Aquiferspeicher errichtet werden können. Nach der geologische Karte streichen in diesem Bereich drei Einheiten aus, von denen jeweils die für die Bewertung relevanten Eigenschaften bekannt sind. Die einzige für die Aquiferspeicherung geeignete Einheit (ausreichende Porosität, Permeabilität vgl. Tabelle 3-2) sei demnach Schicht B.

Man könnte nun bei erster Betrachtung annehmen, die für die Aquiferspeicherung geeigneten Standorte lägen alle im Ausstrich der als geeignet definierten Schicht B. Daß dieser Schluß so nicht ohne weiteres zulässig ist, wird bereits durch das in Abbildung 7-2 dargestellte Bohrprofil angedeutet. Es zeigt, daß die Schicht B nicht nur in ihrem Ausstrich, sondern darüberhinaus auch an allen Punkten im Ausstrich von Schicht A anzutreffen sein muß. Deutlicher wird dies aus der Darstellung des Querprofils in Abbildung 7-3, aus der letztlich hervorgeht, daß im Ausstrichbereich von Schicht B gar keine geeigneten Standorte gefunden werden können⁵⁶. Entscheidend für die Eignung eines Standortes ist nämlich nicht nur die Frage, ob die potentiell geeignete Schicht an diesem Standort überhaupt auftritt, sondern auch, in welcher Tiefe sie anzutreffen ist, welche Mächtigkeit zu erwarten ist und, für die Aquiferspeicherung besonders entscheidend, ob sie überhaupt grundwasserführend ist. Dies ist im Ausstrich von Schicht B nicht der Fall.

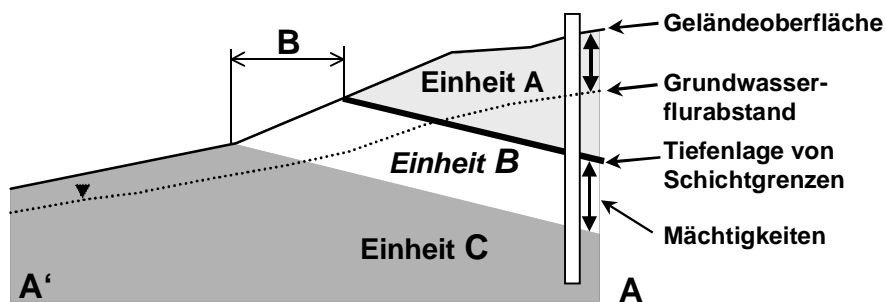


Abbildung 7-3: Querprofil A-A' durch die in Abbildung 7-2 dargestellte „Karte“. Gekennzeichnet sind die relevanten „geometrischen“ Untergrundparameter.

Im Fall des gezeigten Beispiels bedeutet das, daß alle für die Aquiferspeicherung geeigneten Gebiete im Ausstrich von Einheit A liegen, da Einheit B in ihrem Ausstrich entweder zu geringmächtig ist oder eine zu geringe Grundwassermächtigkeit aufweist. Allerdings kann unter Umständen auch nicht der komplette Ausstrich von A genutzt werden, da durch das steile Einfallen die Schicht B in wirtschaftlich nicht mehr zu erschließende Tiefen abtaucht.

Die wesentliche Folgerung, die aus diesem Beispiel abgeleitet werden kann, ist, daß die geologische Karte als zweidimensionale Darstellung der Gesteine an der Oberfläche **allein** keine aussagekräftige Information für die Standortbewertung bringt. Tatsächlich erschließen sich die relevanten Informationen erst bei der Hinzunahme der dritten Dimension des Untergrundes. Diese läßt sich aus der geologischen Karte aber nur durch die interpretative Vorstellungskraft des geologisch geschulten Betrachters ableiten und das auch nur dann, wenn zusätzlich zum Ausstrich von Schichten weitere Informationen gegeben sind. Im Idealfall sind dies Angaben zur Mächtigkeit und zum Einfallen der Schichten, mindestens müssen aber Höhenlinien enthalten sein, mit Hilfe derer sich Strukturen des Untergrundes konstruieren lassen.

Ein GIS ist aber nicht mit der räumlichen Vorstellungskraft und den Kenntnissen eines Geologen ausgestattet, so daß es nicht unmittelbar möglich ist, aus der geologischen Karte und Höheninformationen Informationen über die Struktur von Schichten im Untergrund zu ermitteln. Mittelbar kann das in einem relativ aufwendigen Arbeitsprozeß erfolgen, der in Kap. 7.2.3.1.3.5 beschrieben wird.

Die geologische Karte ist demnach also keine geeignete Darstellungsform der Untergrundverhältnisse im Sinne der einleitend angestellten Überlegungen. Aufgrund ihres zweidimensionalen Charakters ist sie nicht in der Lage die folgenden, unbedingt erforderlichen Informationen zu liefern (vgl. auch Abbildung 7-3):

⁵⁶ Diese Aussage gilt zunächst nur für die Schnittebene A-A'.

- Die tatsächlich **vorhandene** Mächtigkeit einer Schicht unter Berücksichtigung:
 - a) der lateral variablen primären Mächtigkeit,
 - b) der Tatsache, daß im Ausstrich der Schicht – quasi per Definition - ein Teil der Mächtigkeit fehlt.
- Das Einfallen und damit die Tiefenlage einer Schicht unter Gelände.

Im GIS müssen also zusätzliche Datensätze in einer Form, die die entsprechende Verarbeitung erlaubt, zur Verfügung gestellt werden (vgl. Abbildung 7-3):

- die Geländehöhe (digitales Höhenmodell) als oberes Bezugsniveau,
- die Tiefenlage von Schichtgrenzen,
- die Mächtigkeitsverteilung der Schicht,
- Angaben zur Grundwasserführung (Grundwassergleichenpläne).

Mit diesen Informationen ist es möglich, jeden Punkt mit den Koordinaten x, y und z im dreidimensionalen Raum (R^3) einer bestimmten Schicht zuzuordnen. Dabei wird allerdings noch nicht berücksichtigt, daß eine Schicht hinsichtlich der relevanten Eigenschaften sowohl vertikal, als auch lateral inhomogen aufgebaut sein kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Darstellung der Untergrundverhältnisse in jedem Fall unter Berücksichtigung der dritten Dimension erfolgen muß, wenn verlässliche Aussagen getroffen werden sollen. Nur in Fällen, in denen das Ziel der Analyse eine grobe Übersichtsdarstellung des Potentials ist (vgl. Kap. 6.2.3.1.1) kann darauf u.U. verzichtet werden. Dreidimensionale Darstellungen der Untergrundverhältnisse werden im Folgenden als „Untergrundmodelle“ bezeichnet.

7.2.2 Untergrundmodelle - Einführung

7.2.2.1 Qualität, Erstellungsaufwand und Nutzen von Untergrundmodellen

Um das „passende“ Untergrundmodell zu ermitteln muß zunächst definiert werden, was ein solches Modell überhaupt ist und was es leisten muß. Ein **ideales** Untergrundmodell ist ein Datensatz oder System von Datensätzen, in dem für **jeden** Punkt $P(x, y, z)$ im R^3 **alle** relevanten Eigenschaften in jeder beliebigen Detailgenauigkeit gespeichert und abrufbar sind. Einem **realen** Untergrundmodell sind diesbezüglich deutliche Grenzen gesetzt. Diese bestehen zum einen darin, daß die Ausdehnung der „Raumpunkte“ nicht beliebig klein sein kann, es also nicht möglich ist, die gegebenen Inhomogenitäten in beliebig großer Detailauflösung zu erfassen. Ein reales Modell muß deshalb in diskrete Einheiten aufgeteilt werden, denen jeweils bestimmte Eigenschaften pauschal zugeordnet werden, auch wenn bekannt ist, daß diese Eigenschaften innerhalb der Raumeinheit variieren können. Zum anderen sind die Informationen, die zur Parametrisierung des Modells erforderlich sind, weder in beliebig hoher Dichte noch in gleichmäßiger Verteilung verfügbar. In ein reales Modell müssen also Annahmen einfließen, die es erlauben, ausgehend von den vorhandenen Daten, die aus Geländeaufschlüssen, Bohrungen, und indirekten Datenquellen (Geophysik, Photogrammetrie) an diskreten Punkten gewonnen wurden, Vorhersagen über diejenigen Bereiche zu treffen, in denen keine solchen Erkenntnisse vorliegen. Dies geschieht durch Interpolation mit Hilfe einfacher linearer Verfahren oder angepaßter geostatistischer Methoden (s. z.B. DAVIS, 1986).

Die Erstellung von **idealen** Untergrundmodellen ist also aus naheliegenden Gründen nicht möglich, da der Untergrund je nach geographischer und stratigraphischer Lage unterschiedlich ausgeprägte horizontale und vertikale Inhomogenitäten aufweist. Diese lassen sich nur durch eine extrem hohe Auflösung beschreiben, die in der Praxis nicht realisierbar ist (s.o.). Zusätzlich muß für die Erstellung eines solchen idealen Modell eine enorm hohen Dichte realer Daten vorhanden sein, die aber nicht gegeben ist.

Ein **realisierbares** Modell berücksichtigt sowohl die Inhomogenität des Untergrundes als auch die mangelhafte Datenlage. Das realisierbare Modell basiert auf **allen** verfügbaren Daten und hat eine dieser Datengrundlage angemessene Auflösung (Detailtreue), die je nach Datenverfügbarkeit auch sehr hoch sein kann.

Im Hinblick auf den Arbeitsaufwand, den die Modellerstellung inklusive Beschaffung, Prüfung, Eingabe und Verarbeitung der Daten erfordert, muß aber hinterfragt werden, in welchem Verhältnis Arbeitsaufwand und Anwendungsnutzen stehen. Das Aufwand/Nutzen-Verhältnis für ein solches Modell wird durch zwei Extremfälle limitiert:

- a) Das Modell ist so ungenau, daß eine sinnvolle Beurteilung der Situation im Sinne des Anwendungszwecks nicht mehr möglich ist. Damit ist der Nutzen so gering, daß das Modell unnötig ist.
- b) Das Modell ist sehr genau, aber der Aufwand zur Erstellung insgesamt so hoch, daß in (Abhängigkeit von der Anzahl der möglichen Anwendungen) eine gezielte Vorort-Untersuchungen weniger Arbeitseinsatz erfordert. In diesem Fall ist der Aufwand zu hoch, das Modell ist unnötig.

Es muß also eine Abwägung zwischen Arbeitsaufwand und Nutzen getroffen werden. Leider kann der Nutzen meist erst dann evaluiert werden, wenn das Modell bereits erstellt ist. Nach gewissen Überlegungen gelangt man somit letztendlich von der Vorstellung des Idealmodells über das „realisierbare Modell“ zu einem Modell, das hier als „**sinnvolles Modell**“ bezeichnet wird.

7.2.2.2 Untergrundmodelltypen

Für die Erfassung und Behandlung von geometrischen oder anderen Daten im Raum bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten:

Da ist zunächst die „echte“ **3-dimensionale** Darstellung. Wie im zweidimensionalen Raum kann auch hier zwischen einer Vektor- und einer Raster-basierten Modellumgebung unterschieden werden (vgl. Kap. 6.1.2.3). Vektorobjekte im Raum können Punkte, Linien, Flächen und beliebig geformte Körper darstellen, denen Attribute zugeordnet sind (vgl. Abbildung 7-4). Auf Vektormodelle im \mathbb{R}^3 wird hier nicht weiter eingegangen. Bei den Raster-äquivalenten Modellen wird der Raum in eine definierte Anzahl von Raumspalten (x), Raum-Zeilen (y) und Raum-„Säulen“ (z) aufgeteilt. Jede der dadurch entstehenden Raumzellen, die als **Voxel** bezeichnet werden, wird ähnlich wie eine Rasterzelle (Pixel) mit ihren Lagekoordinaten sowie einem oder mehreren beschreibenden Attributen gespeichert (**x,y,z + individuelles Attribut**).

Im Gegensatz dazu wird bei der sogenannten **2½-dimensionalen** Darstellung jeweils nur ein bestimmtes Attribut pro Datensatz behandelt (BILL, 1999a). Alle Datenpunkte eines Datensatzes werden durch ihre x-, y- und z-Koordinate beschrieben, besitzen aber kein (punkt-)spezifisches Attribut. Dieses wird einmalig für alle Datenpunkte per Definition (Datei-, Themen-, Layername) festgelegt (**x,y,z + globales Attribut**). Typische Anwendungsfälle für solche 2½-dimensionalen Datensätze sind digitale Darstellungen der Geländehöhe oder der Grundwasseroberfläche. 2½-dimensionale Darstellungen stellen damit einen ganz bestimmten Typus des Rastermodells dar, bei dem das individuelle Zellattribut immer eine Höheninformation ist.⁵⁷ In der Literatur werden solche Modelle als Digitale Geländemodelle (DGM) bezeichnet, was aber manchmal irreführend erscheint, da der Begriff DGM vielfach ausschließlich auf Darstellungen der Geländeoberfläche („Höhenmodell“, DHM) angewendet wird.⁵⁸

Der wesentliche **Unterschied** zwischen den „echten“ 3- und den 2½-dimensionalen Modellen ist, daß im ersten Fall aus einem **einzigen Datensatz** abgelesen werden kann, welches Attribut ein Punkt mit den Koordinaten x,y,z besitzt **und gleichzeitig**, welches Attribut alle benachbarten, das heißt auch darüber oder darunter liegende Raumpunkte besitzen. Dagegen kann bei einer einfachen, aus nur einem Datensatz bestehenden, 2½-dimensionalen Darstellung lediglich festgestellt werden in welcher „Höhe z“ sich in der benachbarten Zelle ein gleiches globales Attribut (z.B. „Geländehöhe“) befindet. Eine Übersicht über eine Vielzahl von Modelltypen zur Analyse und Darstellung dreidimensional verteilter Untergrundinformationen, ihre Vor- und Nachteile sowie Einsatzgebiete gibt JESSELL (2000).

⁵⁷ „Höhe“ kann hier auch als Höhe eines Wertes eines beliebigen Parameters aufgefaßt werden.

⁵⁸ Noch weiter gefaßte Definitionen bezeichnen als DGM auch andere digitale Darstellungsformen der „realen Welt“.

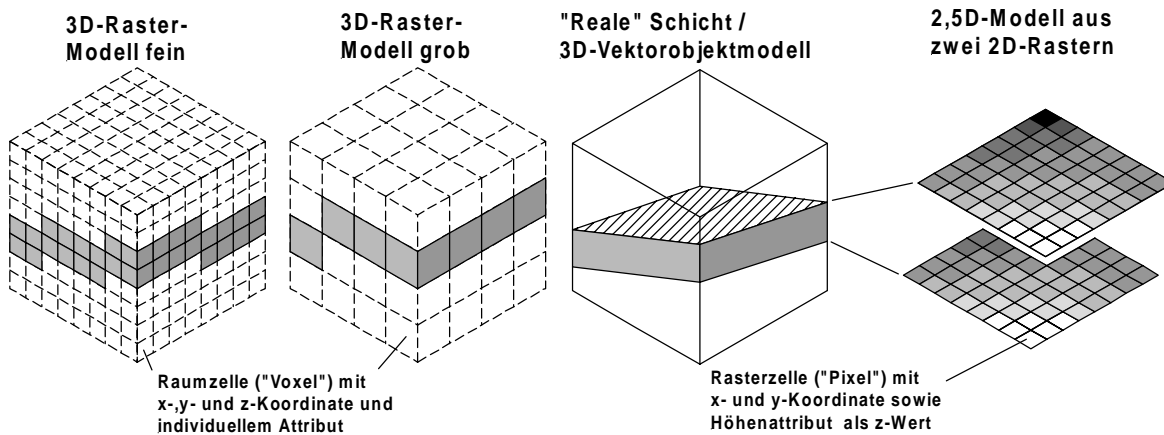


Abbildung 7-4: Darstellungsmöglichkeiten geologischer (schichtenbezogener) Information in „echten“ 3D- und 2½D („quasi-dreidimensionalen“) Modellkonzepten. Mit 3D-Vektorobjektmodellen (Raumpunkte $[x,y,z]$ verbunden durch 3D-Linien) lassen sich einfach und komplex geformte Objekte im Raum „realitätsnah“ und mit einer auflösungsunabhängigen Genauigkeit darstellen. Sie sind jedoch nur bedingt geeignet für Berechnungen im R^3 . Mit 3D-Rastern (Voxeln) kann die Geometrie von Raumobjekten nur durch eine hohe Auflösung genau abgebildet werden.

7.2.2.1 „Echte“ 3D-Modelle

Mit der zuletzt getroffenen Feststellung scheinen 2½-dimensionale Modelle also ungeeignet für die Darstellung von Untergrundstrukturen, wo es ja, wie oben gezeigt wurde, darauf ankommt Punkten mit den Koordinaten x, y und z im R^3 Eigenschaften zuzuordnen. Demzufolge wäre es also zwingend notwendig auf echte 3D-Modelle zurückzugreifen. Solche 3D-Modelle haben aber den ganz entscheidenden Nachteil, daß sie sehr aufwendig zu handhaben sind und vor allem enormen Speicherplatz beanspruchen, wenn man mit ihnen hohe Detailauflösungen erzielen will. Bei der Verdoppelung der Auflösung in allen Dimensionen steigt die Anzahl der Raumpunkte oder Voxel um das 8-fache. Eine Erhöhung der Auflösung ist deshalb nur dann ratsam, wenn eine entsprechende Informationsdichte (gemessene Werte) in allen drei Dimensionen zugrunde liegt. Es ist deshalb fraglich, ob die Anwendung solcher Modelle für den hier angestrebten Einsatzzweck tatsächlich geeignet ist. Um dies festzustellen ist es sinnvoll zu betrachten, wie Informationen über den Untergrund tatsächlich vorliegen:

Abgesehen von Daten, die unmittelbar von der Erdoberfläche stammen und damit nur einer einzigen, speziellen Modellebene des R^3 zuzuordnen sind, werden Informationen über den Untergrund fast ausschließlich in Bohrungen gewonnen. Das hat zur Folge, daß im R^3 punktuell eine hohe Informationsdichte in der z -Dimension, bei gleichzeitig geringer Dichte in den anderen Dimensionen (x, y), vorliegt. Möchte man die hohe Informationsdichte aus der z -Dimension beibehalten, so ist es im 3D-Voxelmodell entweder erforderlich eine sehr hohe Anzahl kleiner Raumzellen zu erzeugen oder aber Raumzellen zu schaffen, die eine geringe Höhe bei großer Breite und Länge besitzen. Letzteres bedeutet wiederum dann Nachteile, wenn in horizontaler Richtung Änderungen auf sehr kleinem Raum stattfinden, z.B. bei Auftreten von Verwerfungen.

Ein weiterer Aspekt, der gegen die Verwendung von Raumzellenmodellen spricht, erschließt sich, wenn man sich vor Augen hält, wie Informationen aus Bohrungen tatsächlich gewonnen und verbreitet werden. Dabei fällt auf, daß von Ausnahmen abgesehen (z.B. geophysikalische Logs) Bohrungen nicht nach diskreten Längeneinheiten, sondern schichtenweise beschrieben werden. Horizonte gleicher Eigenschaften werden in Schichtenprofilen zusammengefaßt, so daß fast nie eine echte Information vom Typ $P(x,y,z, \text{Attribut})$ sondern eher Informationen vom Typ $P_{1-n}(x,y, \text{Attribut } a \text{ von } z_1 \text{ bis } z_2, \text{Attribut } b \text{ von } z_{n-1} \text{ bis } z_n \text{ usw.})$ vorliegt (vgl. Abbildung 7-5). Die Informationsdichte innerhalb des Horizontes ändert sich dabei unter Umständen über große vertikale Distanzen nicht, während sie sich an genau definierten Stellen schlagartig ändert. Ein Vo-

xelmodell kann dies nur mit einer kleinen Zellgröße in der z-Dimension berücksichtigen, was aber bedeutet, daß bis auf wenige definierte Punkte - die Schichtgrenzen - keine Erhöhung der Informationsdichte erfolgt (vgl. Abbildung 7-5).

Zusätzlich ergibt sich bei Voxel-Modellen ein nachteiliger Aspekt aus der Tatsache, daß die Füllung des Raums zwischen den Punkten bekannter Eigenschaften im R^3 deutlich schwieriger ist als im 2-dimensionalen Fall. Dieser Problematik soll hier nicht weiter nachgegangen werden, bekannt ist aber, daß, zumindest gegenwärtig, bei Interpolationen im Raum noch deutliche Limitierungen durch die Rechenleistung gegeben sind. Insgesamt scheint also die Einteilung des Untergrundes in Zellen nicht bzw. nur dann geeignet, wenn wirklich eine hohe Informationsdichte in allen Dimensionen vorliegt, was im Allgemeinen nur bei kleinen Untersuchungsgebieten der Fall sein dürfte.

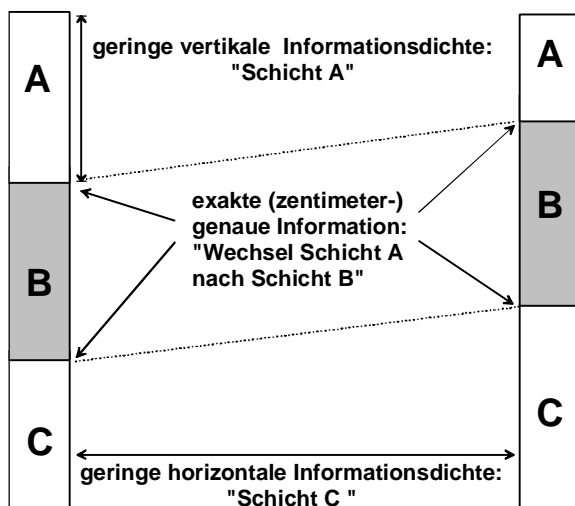


Abbildung 7-5: Häufigste Verteilung der „Informationsdichte“ typischer geologischer Informationen (aus Bohrungen, Aufschlüssen). Die meisten Daten liegen horizontabhängig vor, was zur Folge hat, daß über eine größere vertikale Distanz keine neue Information hinzukommt, während sich an diskreten Stellen (Schichtgrenzen), die sehr genau definiert sein können (cm-Bereich), sich die Information schlagartig ändert.

7.2.2.2 Quasi-dreidimensionale Schichtenmodelle

Eine Alternative zu „echten“ 3D-Modellen stellen Modelle dar, die aus einer Kombination mehrerer 2½-dimensionaler Datensätze bestehen. Für solche Modelle wird die Bezeichnung „quasi-dreidimensional“ vorgeschlagen, weil sie zwar eine annähernd gleiche Informationsdichte bieten, aber nicht exakt die gleichen Anforderungen erfüllen (s.u.).

Auch im quasi-dreidimensionalen Schichtenmodell erfolgt eine Aufteilung des Untergrundes in diskrete Raumeinheiten. Allerdings bilden hier nicht abstrakte Zellen die Grundeinheiten, sondern die geologischen Einheiten (Schichten) selbst. Eine Schicht bildet im Modell eine homogene Raumeinheit mit definierten Eigenschaften. Ihre räumliche Geometrie wird durch zwei Grenzflächen bestimmt, die als 2½-dimensionale Raster (DGMs) vorliegen: Höhenlage von Top und Basis der Schicht (vgl. Abbildung 7-4). Für jede Schicht muß genau **eine** solche Grenzfläche definiert werden, die zweite ist identisch mit der Hangend- bzw. Liegendgrenzfläche der darüber- oder darunterliegenden Schicht. Als Referenzfläche an der oberen Begrenzung des Modells fungiert die Geländeoberfläche, die ebenfalls durch ein 2½-dimensionales Raster, das DHM (oder DGM, s.o.) repräsentiert wird. Ausgehend von diesen Grenzflächen, läßt sich durch einfache Differenzbildung für jeden Punkt im Raum feststellen, welcher Schicht er angehört. Wird als zusätzliche Grenzfläche noch der Grundwassergleichensplan einbezogen, läßt sich zudem noch feststellen ob Grundwasser bzw. gesättigte Verhältnisse zu erwarten sind.

Die Auflösung bzw. Detailtreue des 2½-dimensionalen Untergrundmodells wird von der Zellgröße der Einzelraster (Ebene x-y) und von der Feingliederung des Schichtenmodells (z-Ebene) bestimmt (vgl. Abbildung 7-4). Bei der Festlegung der Modelleinheiten müssen (genauso wie bei der Festlegung geologischer Einheiten auch) Zusammenfassungen getroffen werden. Entscheidend ist, daß man Einteilungen trifft, die die Abfolge hinsichtlich der zu untersuchenden Thematik in möglichst homogene Horizonte gliedert. Dabei ist es

unerheblich, ob einzelne Schichten im 100-, 10- oder 1m-Maßstab festgesetzt werden, solange das Kriterium der Homogenität der Schicht bestmöglich erfüllt wird.

Die wesentlichen **Vorzüge** eines 2½-dimensionalen Modells lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es kann mit relativ hohen horizontalen Auflösungen gearbeitet werden, da die vertikale Auflösung des Modells nicht oder nur bedingt an die horizontale Auflösung (Zellgröße) gebunden ist.
- Die Grundeinheiten des Modells (Schichten) orientieren sich an geologisch relevanter Information und nicht an abstrakten Raum-Zellenmodellen.
- Die einzelnen Elemente (Grenzflächen der Schichten) können unabhängig voneinander konfiguriert und vor allem auch kontrolliert werden. Datensätze, die eine geringere Qualität haben (z.B. schwer zu ermittelnde Schichtgrenzen), beeinflussen nicht direkt die Genauigkeit der Gesamtheit der Daten.
- Es ist relativ leicht, geometrische und andere mathematisch formulierbare Bezüge zwischen Elementen des Modells herzustellen (siehe dazu Kap. 8.1).

Die **Nachteile** sind:

- Die Eigenschaften eines Raumpunktes können nicht direkt abgefragt werden, sondern müssen in einem relativ aufwendigen Verfahren aus der Gesamtheit mehrerer Einzeldatensätze berechnet werden.
- Es ist nicht unmittelbar möglich die Tatsache einzubeziehen, daß Schichten lateralen Veränderungen, z.B. der Fazies, unterworfen sein können. Allerdings gibt es Möglichkeiten diesen Nachteil durch Hinzufügung schichtspezifischer Eigenschaftsgrids auszuräumen.

Entscheidend für die Konzeption des Modells ist die Anzahl und Mächtigkeit der Schichten (vertikale Auflösung), die Zellgröße der 2½-dimensionalen Grenzflächen (horizontale Auflösung) und die Flächenausdehnung des Modells. Da laterale Änderungen von Eigenschaften innerhalb von Schichten nicht direkt erfaßt werden können, ist es unter Umständen angebracht, die Flächenausdehnung des Modells an solche Faktoren anzupassen. Eine andere Möglichkeit zur Einbeziehung der lateralen Variabilität besteht darin, für jede Schicht ein oder mehrere besondere Grids (Raster) zu erstellen, die die lateralen Veränderung einer Eigenschaft beschreiben.

In Abbildung 7-6 wird anhand eines Beispiels demonstriert, wie einer Schicht eine in horizontaler Richtung variable Eigenschaft zugeordnet werden kann. Im Beispiel wird angenommen, daß sich die Wärmeleitfähigkeit einer Schicht, z.B. aufgrund von Faziesunterschieden lateral, ändert. Bei Bewertungsberechnungen, in die die Wärmeleitfähigkeit eingeht, kann die horizontale Variabilität dieser Eigenschaft einbezogen werden, indem statt eines für die ganze Fläche konstanten Wertes für jeden Punkt ein Wert, der durch ein „Wärmeleitfähigkeitsgrid“ festgelegt wird verwendet wird. (vgl. Abbildung 7-6).

Mit der im Beispiel demonstrierten Einbeziehung zusätzlicher Eigenschaftsgrids können die Defizite des Schichtenmodells hinsichtlich der lateralen Variabilität eingegrenzt werden. Prinzipiell lassen sich auch vertikale Veränderungen in der Schicht, die nicht in allen Gebieten proportional sind, auf diese Weise dokumentieren. Dies erfordert allerdings einen enormen Aufwand, der an den für die Erstellung eines „echten“ 3D-Modells heranreicht. Für alle diese Qualitätsverbesserungen des Modells ist Voraussetzung, daß die dazu notwendigen Daten vorhanden sind. Diese Voraussetzung ist aber (z.B. auch im Untersuchungsgebiet) oft nicht erfüllt. Es ist also grundsätzlich zu prüfen, ob der dazu notwendige Aufwand durch das Ergebnis gerechtfertigt wird. In der vorliegenden Untersuchung wurde festgestellt, daß im Beispielausschnitt die Voraussetzungen für entsprechende Verfeinerungen des Modells nicht gegeben sind.

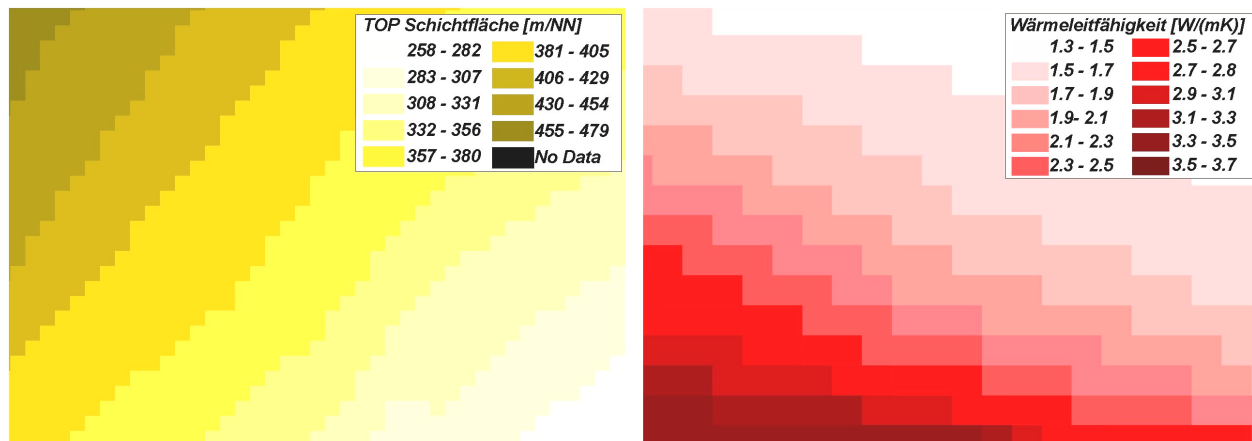


Abbildung 7-6: Beispiel für die Einbeziehung der lateralen Variabilität von Schichten in einem quasi-dreidimensionalen, aus diskreten Schichten aufgebautem Modell (schematisch): Zusätzlich zu den Daten, die die geometrischen Eigenschaften der Schicht im Raum beschreiben (hier z.B. das Top der Schicht) werden in „Eigenschaftsgrids“ Angaben zu lateral veränderlichen Eigenschaften der betreffenden Schicht (hier z.B. Wärmeleitfähigkeit) abgelegt. Es sind beliebig viele Eigenschaftsgrids für alle beteiligten Schichten möglich. Damit erhält das aus Schichten aufgebaute Modell den äquivalenten oder höheren Informationsgehalt eines entsprechenden „echten“ 3D-Modells.

7.2.2.2.3 Vergleich der Modelltypen

Die wesentlichen Merkmale von 3- und 2½-dimensionalen Modellen sind einander in Abbildung 7-4 gegenübergestellt. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß ein aus mehreren 2½-dimensionalen Grenzflächen bestehendes, quasi-dreidimensionales Untergrundmodell wesentlich besser in der Lage ist die zur Bewertung erforderlichen Informationen zur Verfügung zu stellen, als ein „echtes“ 3D-Modell. Letzteres bringt Vorteile nur dann, wenn die zugrundeliegende Informationsdichte enorm hoch und in allen Dimensionen etwa gleich verteilt ist. Die Daten, auf die bei Untersuchungen größerer Gebiete zurückgegriffen werden kann, sind dagegen in den horizontalen Dimensionen oft nur in sehr geringer Dichte vertreten, während sie vertikal punktuell jeweils eine hohe Informationsdichte aufweisen (vgl. Abbildung 7-5). Dieser Konstellation wird das quasi-dreidimensionale Untergrundmodell deutlich besser gerecht. Hinzu kommt, daß die Information, die zur Bewertung von Standorten erforderlich ist, sehr viel eher dem Typ entspricht, wie ihn das quasi-dreidimensionale Modell liefert: Gefordert ist immer vorrangig eine Information über den vertikalen Schichtenbau am betrachteten Standort. Das Schichteinfallen, der Grundwasserspiegel und der hydraulische Gradient können ebenfalls im Modell enthalten sein bzw. ermittelt werden, womit einige wesentliche Parameter für die Anlagenplanung und Standortbewertung gegeben sind.

Ein gemeinsames Problem aller Modelle ist es, daß der Modellraum nicht gleichmäßig mit Information, also mit Meßwerten im weitesten Sinn ausgefüllt ist. In einem Modell, das als Datenbasis für die Standortbewertung herangezogen werden soll, müssen aber für **jeden** beliebigen Raumpunkt Werte der relevanten Parameter abrufbar sein. Um dies zu gewährleisten müssen aus einem Datensatz von unregelmäßig im Raum verteilten Meßpunkten durch Interpolation gleichmäßig verteilte Datennetze berechnet werden. Auf die hierzu angewendeten Interpolationsverfahren wird hier nicht eingegangen. Sie werden in der Literatur ausführlich beschrieben (Z.B. Davis, 1986; vgl. auch Kap. 7.2.3.1.3).

7.2.3 Erstellung des Untergrundmodells für den Beispielausschnitt

Ein Untergrundmodell nach dem oben beschriebenen quasi-dreidimensionalen Typ muß nach Kap. 7.2.1 aus den folgenden Komponenten bestehen (vgl. Abbildung 7-2):

- Geländeoberfläche (Digitales Höhenmodell, DHM)
- Schichtgrenzen (Digitales Strukturmodell, DSM und Mächtigkeitsverteilungen der beteiligten Einheiten)
- Grundwasseroberfläche(n) (Hydrogeologisches Modell)

Während ein DHM in einer angemessenen Auflösung zur Verfügung stand (vgl. Kap. 6.3.6.4.2) mußten das DSM, die Mächtigkeitsverteilungen und das hydrogeologische Modell in der vorliegenden Untersuchung erzeugt werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben Konzeption und Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Datengrundlagen.

7.2.3.1 Digitales Strukturmodell (DSM)

Ein digitales Strukturmodell (DSM) stellt die Oberfläche einer Schicht bzw. die Lage der Grenzfläche zweier Schichten in Form eines 2½-dimensionalen Rasters dar. Ein DSM basiert auf dem Prinzip des klassischen „Streichkurvenplans“, bei dem die Lage einer Schichtgrenze über NN in Form von Isolinien dargestellt wird. Als Referenzfläche wird meist eine gut definierte, gut kartierbare Schichtgrenze, die etwa in der Mitte der im betreffenden Gebiet aufgeschlossenen Abfolge liegt, gewählt. Datengrundlage für den Streichlinienplan bzw. das DSM sind Bohrungen, in denen die betreffende Schichtgrenze erbohrt wurde sowie die Höhe der Punkte, an denen die Grenze an der Oberfläche aufgeschlossen bzw. sichtbar (kartierbar) ist. Durch Addition und Subtraktion der Mächtigkeiten darunter- und darüberliegender Schichten ist es möglich, auch andere Schichtflächen in die Datengrundlage einzubeziehen. Das erfordert allerdings die genaue Kenntnis der **lokalen** Mächtigkeiten aller beteiligter Schichten. Im DSM werden diese durch die Verwendung von Mächtigkeitsverteilungsrastern einbezogen (Kap. 7.2.3.1.3.8).

Es muß hervorgehoben werden, daß die Isoliniendarstellung einer Streichkurvenkarte und ein gerastertes DSM **nicht** die gleichen Informationsdichte beinhalten, auch wenn das zunächst so scheinen mag. Eine Isoliniendarstellung und ebenso die äquivalente digitale Vektordarstellung stellt keine unmittelbar für Berechnungen abrufbare Information für jeden beliebigen Punkt zur Verfügung.

Für den in dieser Untersuchung gewählten Beispielausschnitt wurde ein DSM auf der Basis von analogen Streichlinienplänen erstellt. Als gemeinsames Bezugsniveau wurde die Grenze *mu-mm* gewählt. Diese Grenze bietet sich an, da sie etwa in der Mitte der stratigraphischen Abfolge liegt, die im Beispielausschnitt (Abbildung 7-7) aufgeschlossen ist.

7.2.3.1.1 Datengrundlage

Analoge Streichlinienpläne sind fast grundsätzlich Bestandteil der Erläuterungen zu geologischen Kartierungen im Raum Unterfranken. Sie sind im Allgemeinen als beste mögliche Datenquelle für Strukturinformationen zu betrachten, da dem kartierenden Geologen ein Vielzahl von Informationen zur Verfügung stehen, die weder veröffentlicht sind, noch in vertretbarem Aufwand durch eigene Untersuchungen zu ermitteln wären. Es ist praktisch ausgeschlossen, Strukturpläne ausschließlich durch die Interpolation von Bohrungsdaten zu erstellen. Die weitaus meiste Information über die strukturelle Situation stammt aus der Kartierung. Bohrungen stellen nur ein wichtiges Kontrollelement dar, das unerlässlich ist um die interpretativen Ergebnisse der Oberflächenuntersuchung zu kontrollieren.

Der in der vorliegenden Untersuchung erstellte digitale Strukturplan wurde aus den in Abbildung 7-7 dargestellten analogen Datenquellen erstellt.

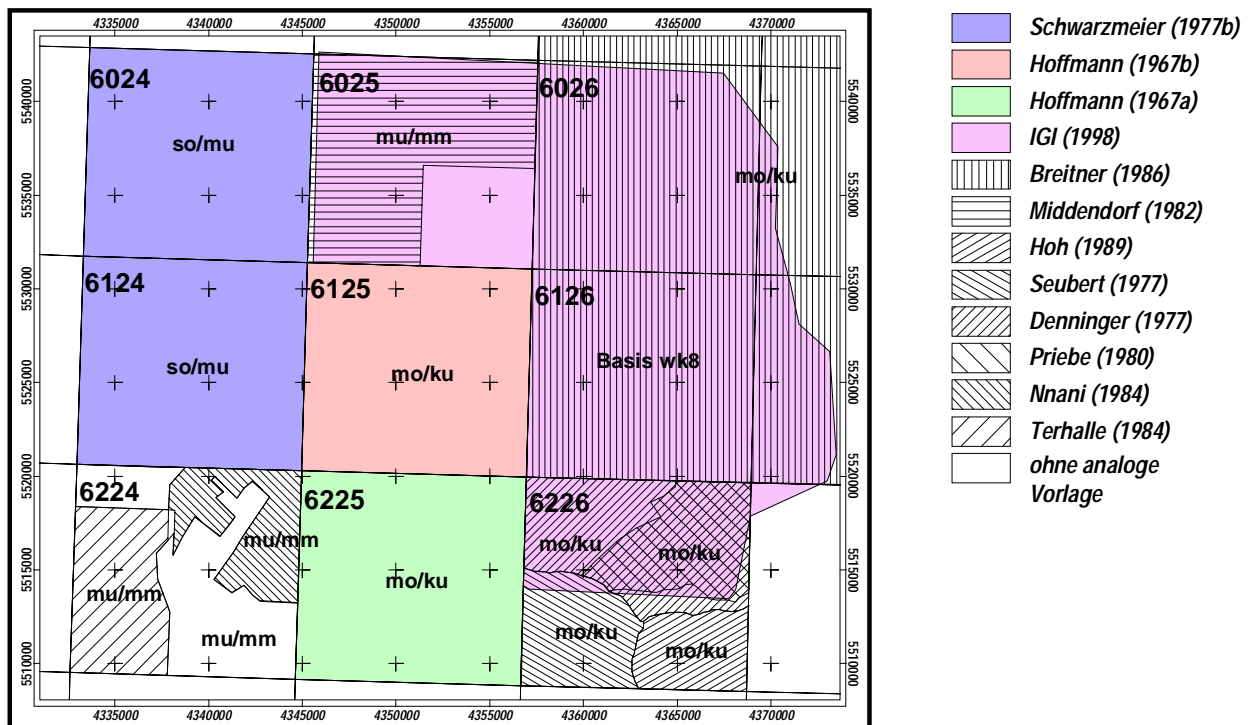


Abbildung 7-7: Übersicht über die verwendeten Isolinien darstellungen für die Erstellung des digitalen Strukturplans *mu-mm*. Angegeben sind die Bezugsniveaus der analogen Vorlagen; *wk8* = Top der Wellenkalkfolge 8 im *mu*.

7.2.3.1.2 Vorgehensweise

Die in Abbildung 7-7 angegebenen Strukturpläne in den Maßstäben 1:10.000 bis 1:50.000 wurden digitalisiert und mit Höhenattributen versehen. Die Stützpunkte der digitalisierten Isolinien wurden als xyz-Koordinaten-Tripel extrahiert⁵⁹ und mit Hilfe einer Interpolation in ein regelmäßiges Raster (Digitales Strukturmodell) überführt.

Da sich die Quellen auf unterschiedliche stratigraphische Grenzen beziehen, war es notwendig, diese durch Subtraktion bzw. Addition der Mächtigkeiten darüber und darunter liegender Schichten auf ein einheitliches Bezugsniveau (*mu-mm*, s.o.) zu überführen. Weil die Mächtigkeiten lokalen Schwankungen unterworfen sind, ist bei diesem Vorgang zu befürchten, daß bereichsweise größere Fehler entstehen. Kritisch ist dies insbesondere dann, wenn zwischen ursprünglichem Bezugsniveau und dem vereinheitlichten Bezugsniveau größere vertikale Distanzen liegen. Um derartige Fehler vermeiden bzw. eingrenzen zu können, wurde mit zwei verschiedenen Verfahren experimentiert: im ersten Fall wurden **konstanten Mächtigkeitswerte** für das ganze Gebiet verwendet. Hierzu wurden zunächst mittlere Mächtigkeiten für alle in Frage kommenden Einheiten für den Beispielausschnitt festgelegt. Die dazu verwendeten Datenquellen und die gemittelten Werte sind in Tabelle 7-1 aufgelistet. Es zeigte sich, daß die in den Datenquellen angegebenen Mächtigkeitswerte nicht in jedem Fall die günstigsten Ergebnisse erbringen (vgl. Kap. 7.2.3.1.3.6). Es wurden deshalb Anpassungen vorgenommen, die auf Plausibilitätskontrollen beruhen, die in Kap. 7.2.3.1.3.6 beschrieben werden.

Wie aus Abbildung 7-7 ersichtlich ist, liegen für einige Bereiche des Blattes 6224 Helmstadt keine Streichkurvenkarten vor. Für diese Bereiche wurde mit Hilfe eines Verfahrens, das in Kap. 7.2.3.1.3.5 beschrieben wird, ein Streichlinienplan durch die Verschneidung von Höhenlinien und Schichtgrenzen erstellt. Dieses Verfahren wurde auch angewendet um einen Strukturplan für ganz Unterfranken zu erstellen (Kap. 7.2.3.1.4).

⁵⁹ In der vorliegenden Untersuchung wurde dies mit einer zu diesem Zweck erstellten Visual-Basic Anwendung durchgeführt, die die Koordinaten der Isolinienstützpunkte und die Höhen aus einer *dxf*-Datei liest.

Bereich	TK25-Blatt		Blattmittelpunkt		Mächtigkeit der Einheit [m]						
	NR	Blatt Name	RW	HW	sm	so	mu	mm	mo	ku	
Ausschnitt	6024	Karlstadt	4338544	5537149		89	91	55	80		
Ausschnitt	6026	Werneck	4362462	5536483			90	40	80		
Ausschnitt	6124	Remlingen	4338210	5526029		88	92	45	76		
Ausschnitt	6125	Würzburg Nord	4350193	5525683		86	93	40	76	40	
Ausschnitt	6224	Helmstadt	4337876	5514910			91	44	78		
Ausschnitt	6225	Würzburg Süd	4349884	5514563				40	81	36	
Ausschnitt	6226	Kitzingen	4361893	5514243				80	80	43	
erweitert	5924	Gemünden a. Main	4338879	5548269	194	98	95	48			
erweitert	5925	Gauaschach	4350813	5547923					87		
erweitert	5926	Geldersheim	4362747	5547604						50	
erweitert	5927	Schweinfurt	4374681	5547311			86	65	88	48	
erweitert	6023	Lohr a. Main	4326585	5537522	183	88	90	43			
erweitert	6027	Grettsstadt	4374421	5536190					90	46	
erweitert	6123	Markt Heidenfeld	4326226	5526403	189	89	91	43			
erweitert	6127	Volkach	4374161	5525070	219	87	84	55	80	39	
erweitert	6223	Wertheim	4325868	5515283			88				
erweitert	6227	Iphofen	4373902	5513949			92	97	73	41	
erweitert	6323	Tauberbischofsheim West	4325510	5504163			90	40			
erweitert	6324	Tauberbischofsheim Ost	4337543	5503790		80		40	80		
erweitert	6326	Ochsenfurt	4361609	5503123				46	81	34	
erweitert	6327	Markt Einersheim	4373642	5502829						35	
erweitert		Bohrung Kirchheim	4345000	5504000				70			
erweitert		Bohrung Kist	4344399	5514129				75			
					Mittelwert:	196	88	90	54	81	41
					Mittlere Abweichung:	11.4	2.8	2.0	13.5	3.3	4.5
					Anzahl Angaben:	4	8	13	18	14	10

Tabelle 7-1: Mittlere Schichtmächtigkeiten für die TK25-Blätter des Beispielausschnitts und den angrenzenden Blättern („erweiterter Ausschnitt“). Die Mächtigkeitsangaben wurden aus den Erläuterungen zu den geologischen Karten, der GK25 von Bayern, Diplomkartierungen und –arbeiten und Dissertationen der Universität Würzburg, regional-geologischen Arbeiten und Bohrungsdaten aus Datenbanken des GLA, LfW und WWA Würzburg sowie mündlichen Mitteilungen zusammengestellt und anschließend gemittelt.

7.2.3.1.3 Methoden zur Erzeugung von digitalen Strukturmodellen aus analogen Vorlagen

Die Umsetzung von analogen Streichlinienplänen in digitale Strukturpläne kann auf unterschiedliche Weise mit qualitativ stark variierenden Ergebnissen erfolgen. Es wurden daher Vergleiche verschiedener Methoden durchgeführt, um die dem Anwendungszweck angemessene Vorgehensweise zu ermitteln. Diese werden in den folgenden Kapiteln beispielhaft anhand des Blattes Würzburg Nord vorgestellt.

7.2.3.1.3.1 Problematische Bereiche

Bei der Überführung von analogen Isolinien darstellungen beliebiger Art in digitale Rastermodelle sind einige prinzipielle Grundregeln bezüglich des Digitalisiervorgangs (Abstand der Isolinien, Abstand der Stützpunkte etc.) zu beachten. Bei Streichkurvenplänen kommt als Erschwernis hinzu, daß Isolinien diskontinuierlich sein können, d.h., daß Sprünge (Verwerfungen) in der betrachteten Grenzfläche vorliegen können. Bei Interpolationsverfahren, die solche Diskontinuitäten nicht berücksichtigen, bewirkt die Interpolation zwischen zwei Punkten, die auf verschiedenen Seiten der Diskontinuität liegen, eine Glättung (Abbildung 7-8).

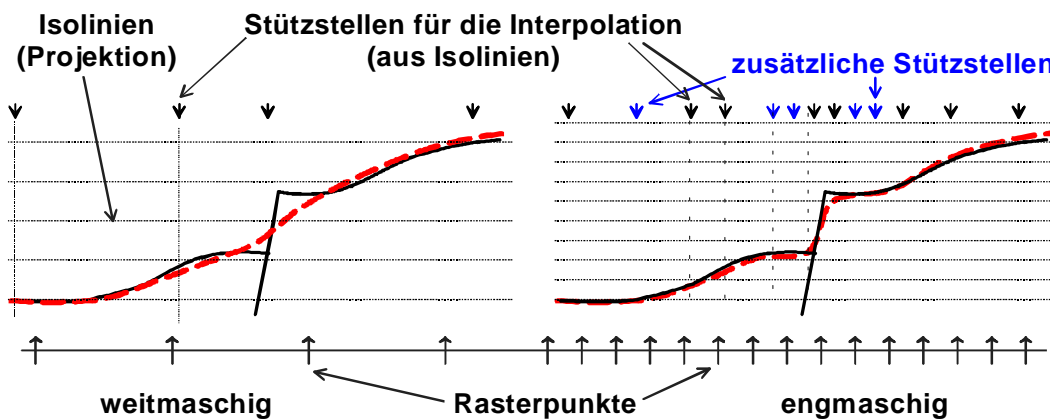


Abbildung 7-8: Ursachen und Möglichkeiten zur Behebung von Problemen bei der Behandlung von Diskontinuitätsstellen (Verwerfungen) bei der Interpolation von Daten aus analogen Streichlinienplänen. Um eine ungewollte „Glättung“ von Verwerfungen zu vermeiden, muß die Maschenweite des zu erzeugenden regelmäßigen Rasters klein gewählt werden. Dies setzt aber voraus, daß eine gleichmäßig hohe Dichte von Stützpunkten (unregelmäßig verteilte xyz-Werte), insbesondere im Verwerfungsbereich selbst, vorliegt.

Ungünstig wirken sich auch Bereiche stark unterschiedlichen Reliefs aus. Bei steilem Einfallen liegen die Isolinien dicht beieinander, so daß eine hohe Stützpunktdichte erreicht werden kann. Dagegen sind bei flach liegenden Grenzflächen die Stützpunktabstände unter Umständen enorm groß (vgl. Abbildung 7-8). Bei verschiedenen Interpolationsverfahren führt dies zu Problemen (Abbildung 7-9).

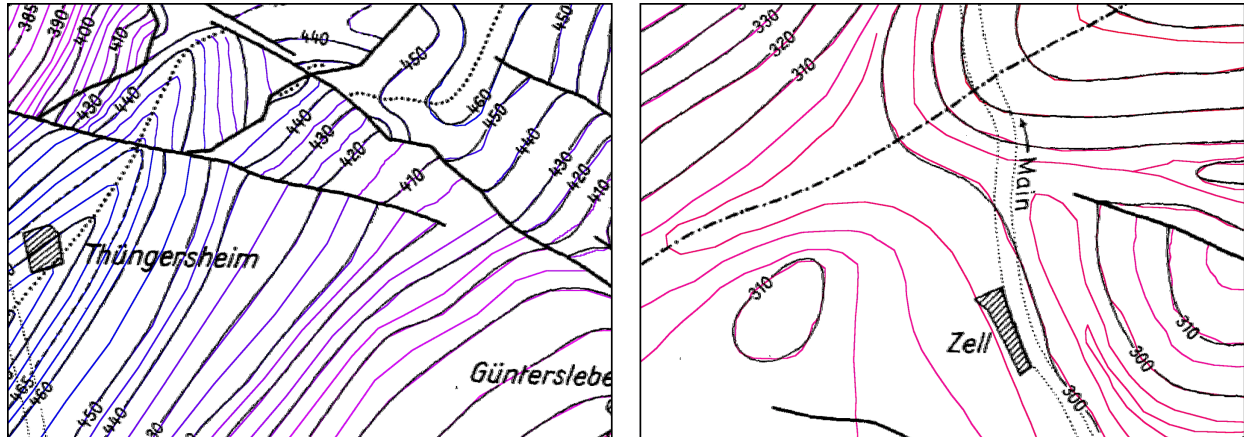


Abbildung 7-9: Problematische Bereiche bei der Erstellung von digitalen Strukturplänen aus analogen Vorlagen (hier Ausschnitte aus dem Streichkurvenplan zu Blatt Würzburg Nord; HOFFMANN 1967b). Im Beispiel **links** hat die Schichtfläche ein starkes Relief und wird durch zahlreiche Verwerfungen relativ hoher Versatzbeträge in einzelne, diskret begrenzte Schollen zerlegt (nach der Modellvorstellung von HOFFMANN). In diesem Bereich sind die in Abbildung 7-8 dargestellten Probleme besonders gravierend. Ein möglicher Lösungsweg ist die Erhöhung der Stützpunktdichte durch Einfügung zusätzlicher Isolinien. **Rechts** ist ein Ausschnitt mit sehr geringem Relief dargestellt. Weit auseinanderliegende Isolinien führen zu einer geringen Stützstellendichte. Auch hier müssen zusätzliche Isolinien eingefügt werden (in 2,5- oder 1m-Schritten). Das Interpolationsverfahren muß an beide Extremfälle, die ja innerhalb eines einzigen Datensatzes auftreten, angepaßt werden.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten verglichen, die angewendet werden können, um die Ungenauigkeiten, die aus einer Interpolation von Isolinienplänen mit Diskontinuitäten resultieren, gering zu halten. Die Verfahren werden im Folgenden vorgestellt:

7.2.3.1.3.2 Definition diskreter Höhenpolygone

Ein Verfahren zur Überführung von analogen Streichkurvenplänen in digitale Strukturmodelle, bei dem **keine** Interpolationsverfahren eingesetzt werden, besteht darin, den Flächen zwischen Isolinien ein Höhenattribut zuzuweisen, das dem Mittelwert der benachbarten Isolinien entspricht. Man erhält auf diese Weise einen Strukturplan aus Vektorpolygonen, das den Informationsgehalt der analogen Vorlage weitgehend wiedergibt. Verwerfungen werden auf die Weise lagegenau berücksichtigt. Der Nachteil der Methode besteht darin, daß letztlich ein „Stufenmodell“ entsteht (Abbildung 7-10). Dies macht sich vor allem dann negativ bemerkbar, wenn beispielsweise das Streichen und Fallen von Schichten berechnet werden soll („slope“ des DSM). Den aus Polygonflächen erstellten Strukturplan für das Blatt Würzburg Nord zeigt Abbildung 7-10. Für andere Gebiete wurden Strukturpläne auf diese Weise nicht erstellt, da der Arbeitsaufwand durch das Ergebnis nicht gerechtfertigt wird. Da viele analoge Vorlagen Isolinienabstände von 10-20m und mehr aufweisen, ist von dem Verfahren ohne aufwendiges Hinzufügen zusätzlicher Isolinien keine hohe vertikale Auflösung zu erwarten.

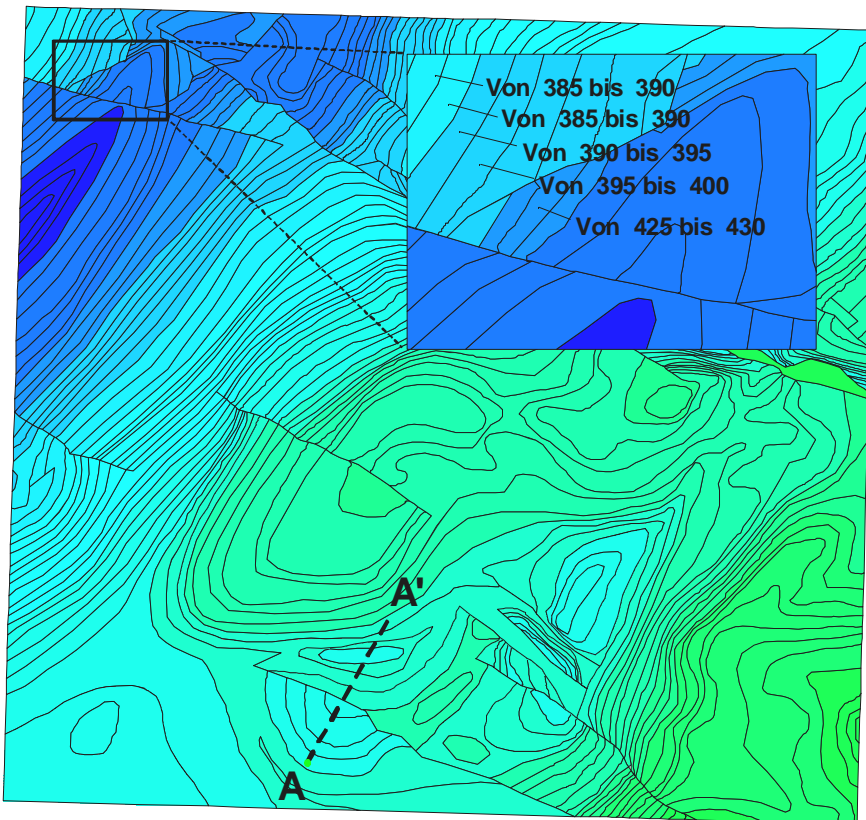
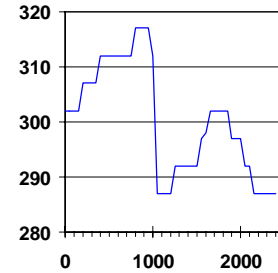


Abbildung 7-10: Digitaler Strukturplan von Blatt Würzburg Nord aus Polygonflächen. (Analoge Vorlage: HOFFMANN, 1967b). Die Flächen zwischen den Isolinien wurden als Polygone definiert und mit dem Mittelwert der Begrenzungsisolines versehen. Die Zuweisung erfolgte in 5er Schritten, weswegen zusätzliche Isolines eingefügt werden mußten.

Profil A-A':



7.2.3.1.3.3 „Einfache“ Interpolation

Die einfachste Methode ein DSM aus der analogen Vorlage zu erzeugen ist es, die Isolinien zu digitalisieren, ihnen Höhenattribute zuzuweisen und die Stützpunkte der Linien als Basis für die Interpolation eines regelmäßigen Rasters zu verwenden. Qualitätsverbesserungen können durch genaue Beachtung der Gesetzmäßigkeiten des verwendeten Interpolationsverfahrens, der Wahl einer angemessenen Rastergröße und die Einhaltung der üblichen Grundregeln erzielt werden (vgl. dazu z.B. DAVIS, 1986). Weiterhin sollten zur Verringerung der in Abbildung 7-8 gezeigten Probleme zusätzliche Isolinien in Bereichen geringen Reliefs sowie zusätzliche Stützpunkte (Isolinien mit geringem Stützpunktabstand) eingefügt werden. Auf diese Weise erhält man ein DSM, das mit gewissen Einschränkungen den Informationsgehalt der analogen Vorlage wiedergibt.

7.2.3.1.3.4 Einbeziehung von Verwerfungen in die Interpolation

Mit verschiedenen Softwareprodukten ist es möglich, in die Interpolation unregelmäßig verteilter Daten Diskontinuitäten miteinzubeziehen. Das Berechnungsgebiet wird dazu in diskrete Blöcke aufgeteilt oder es werden Grenzlinien (Verwerfungen) definiert, über die die Interpolation nicht hinweggreift. Solche Verfahren ermöglichen (theoretisch) die optimale Behandlung der oben genannten Probleme (vgl. Kap. 7.2.3.1.3, Abbildung 7-8). In der vorliegenden Untersuchung wurde hierfür das Programm Surfer, Version 7 verwendet, bei dem bei verschiedenen Interpolationsverfahren „fault- und breaklines“ definiert werden können. Die Ergebnisse (unter Berücksichtigung aller in 7.2.3.1.3.3 geschilderten Maßnahmen), sind dabei als hervorragend zu bezeichnen. Allerdings hat die Methode den Nachteil, daß größere Flächen mit hoher Auflösung nur dann bearbeitet werden können, wenn die Zahl und die Komplexität von Verwerfungen deutlich reduziert werden. Für den Bereich Würzburg Nord lassen sich so in vertretbarer Rechenzeit sehr gute Ergebnisse erzielen (vgl. Abbildung 7-11). Für den gesamten Beispielausschnitt wurde von dieser Möglichkeit nicht Gebrauch gemacht, da die zur Verfügung stehende Hardware dafür nicht leistungsfähig genug war.

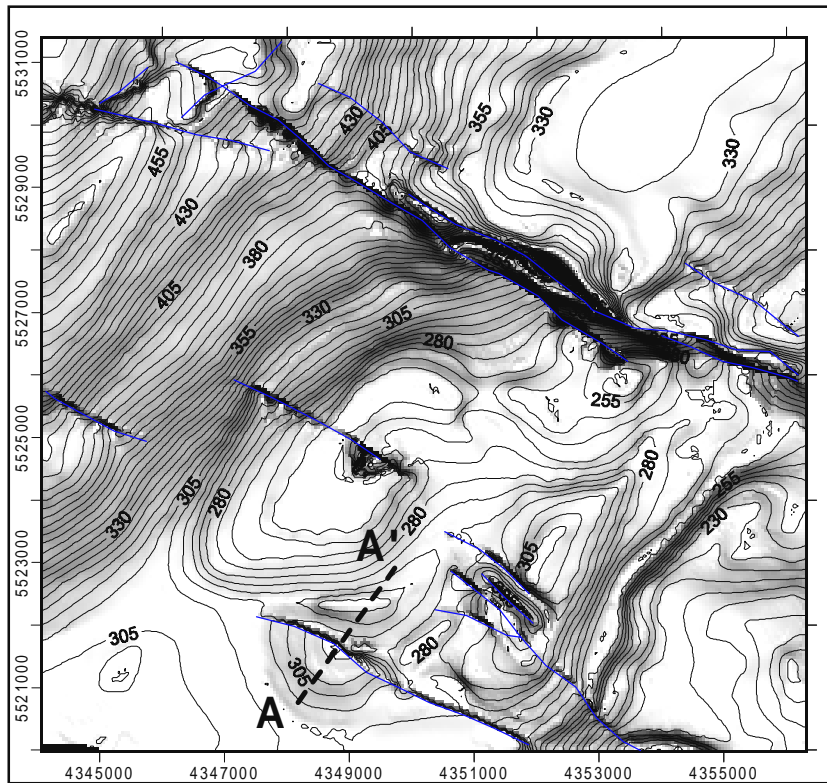
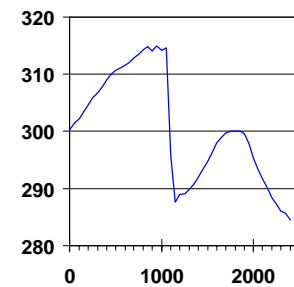


Abbildung 7-11: Digitaler Strukturplan von Blatt Würzburg Nord. Rasterweite 50m. Die Interpolation der aus der analogen Vorlage durch abdigitalisieren gewonnenen Daten erfolgte im Krigingverfahren unter Einbeziehung der eingetragenen Verwerfungen. Die Berechnung gelingt nur bei einer deutlichen Reduktion und Vereinfachung der Verwerfungen. Zur Qualitätsverbesserung mußten zu den Isolinien aus der Originalvorlage ca. die doppelte Anzahl hinzugefügt werden.

Profil A-A':



7.2.3.1.3.5 Erstellen von digitalen Strukturplänen ohne analoge Vorlage

Nicht für alle Bereiche des Beispielausschnitts liegen analoge Streichkurvenpläne vor (vgl. Abbildung 7-7). Um für diese Bereiche dennoch eine Datengrundlage für die Bewertung der Untergrundsituation zur Verfügung stellen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, halbautomatisch Strukturpläne aus Schichtgrenzen der digitalen geologischen Karte und dem digitalen Höhenmodell zu erzeugen. Dieses Verfahren kann auch vollständig automatisiert werden, was aber einen erheblichen Aufwand erfordern würde, der dem Ziel in diesem Fall nicht angemessen erschien.

Das Verfahren beruht auf der Tatsache, daß jeder Punkt, an dem eine Schichtgrenze die Geländeoberfläche schneidet, bei bekannten Koordinaten eine Stützstelle für die Interpolation eines Streichkurvenplans darstellt. Im Raster-GIS lassen sich alle diese Punkte durch sehr einfache Rechenoperationen extrahieren: Wird der Schichtgrenze das Attribut 1 zugewiesen, so erhält man die z-Koordinate jedes Punktes (x,y), an dem diese Schichtgrenze auftritt, durch Multiplikation des Schichtgrenzengrids mit dem DHM (Abbildung 7-13). Da eine bestimmte Schichtgrenze nur in einem begrenzten Bereich ausstreicht, müssen zur flächendeckenden Bearbeitung alle verfügbaren Schichtgrenzen herangezogen werden. Zu den Höhepunkten der Schichtgrenzen, die nicht dem Bezugsniveau angehören, müssen die entsprechenden Mächtigkeitswerte der darüber und darunterliegenden Schichten addiert oder subtrahiert werden. Hierzu werden alle Schichtgrenzen mit entsprechenden Attributen versehen. Die Addition der Mächtigkeiten kann auf unterschiedliche Weise erfolgen: Für kleinere Gebiete, in denen keine großen Mächtigkeitschwankungen zu erwarten sind, genügt es konstante Mächtigkeitswerte zu verwenden. In größeren Bereichen (z. B. ganz Unterfranken, Kap 7.2.3.1.4) müssen Mächtigkeitsverteilungen (vgl. Kap. 7.2.3.1.3.8) als Grids miteinbezogen werden. Das Verfahren wird dadurch deutlich aufwendiger. Der Ablauf des gesamten Prozesses wird durch die Abbildung 7-12 und 7-13a bis f demonstriert.

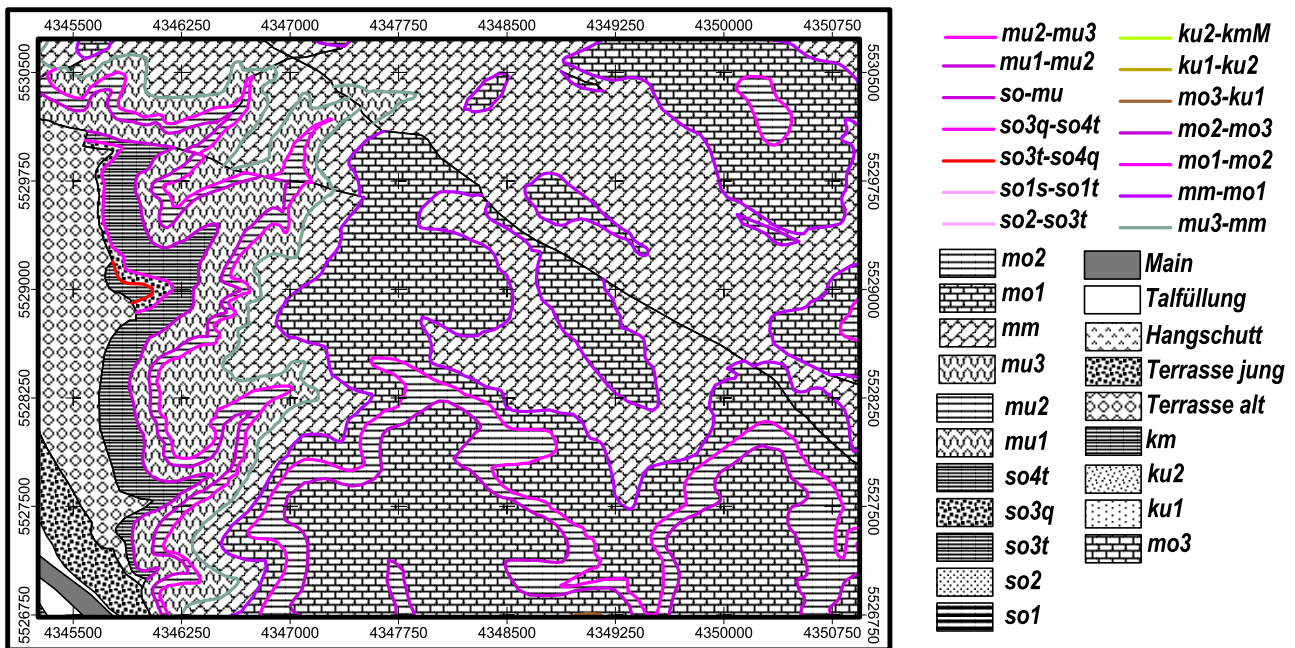


Abbildung 7-12: Erstellung von Strukturplänen durch die Verschneidung von Schichtgrenzen und digitalem Geländemodell (Ausschnitt aus GK25 Blatt Würzburg Nord). **Schritt 1:** Die Karte wird digitalisiert und abgedeckt (vgl. Abbildung 7-1). Allen Schichtgrenzen wird ein individuelles Attribut zugewiesen. Die weiteren Schritte zeigen die Abbildungen 7-13a-f.

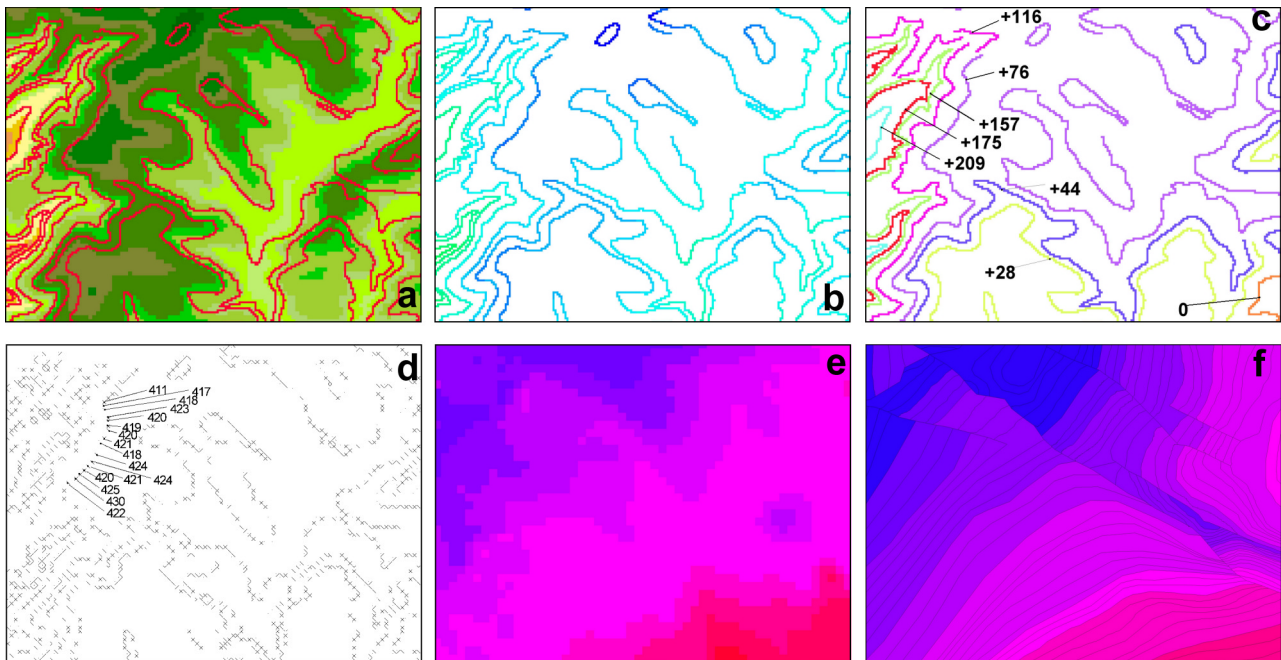


Abbildung 7-13a bis f: Erstellung von Strukturplänen durch Verschneidung von Schichtgrenzen digitaler geologischer Karten mit dem Digitalen Geländemodell. Beispielhaft demonstriert anhand eines Ausschnittes aus Blatt Würzburg Nord.

Bild a): DHM und Schichtgrenzen (gerastert) werden miteinander multipliziert,

Bild b): Ergebnis der Multiplikation, jeder Punkt, an dem eine Schichtgrenze vorkommt, erhält den entsprechenden Höhenwert des DHM

Bild c): Die Differenzen zum Bezugshorizont (hier *mu-mm*) werden addiert oder subtrahiert, um die Höhenpunkte aller Schichtgrenzen auf das gleiche Bezugsniveau zu bringen. Im Beispiel werden konstante Mächtigkeiten verwendet. In Fällen, wo die Mächtigkeiten stark schwanken, müssen statt konstanter Mächtigkeiten die Grids, die die Mächtigkeitsinformation enthalten addiert oder subtrahiert werden (vgl. Kap. 7.2.3.1.4)

Bild d): Die entstandenen (Raster-)Höhenpunkte werden in xyz-Koordinaten-Tripel umgewandelt.

Bild e): Die unregelmäßig verteilten xyz-Werte werden durch geeignete Interpolationsverfahren in ein regelmäßiges Raster (Digitales Strukturmodell, DSM) überführt.

Bild f): zeigt zum Vergleich das nach Kap. 7.2.3.1.3.2 erstellte DSM.

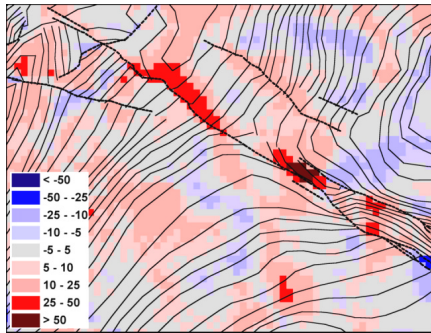
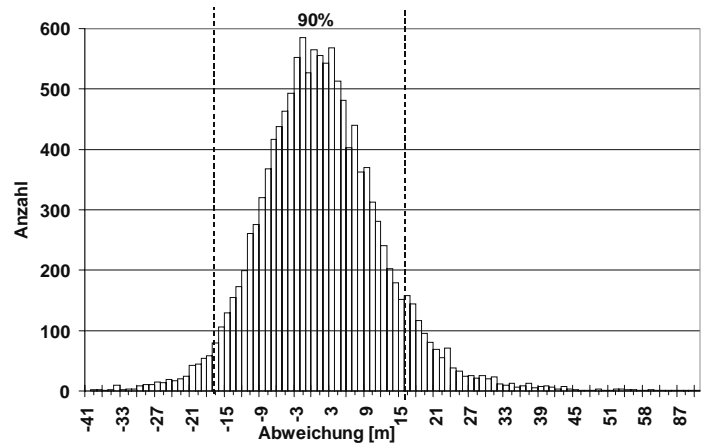


Abbildung 7-14: Links: Vergleich zwischen dem aus Schichtgrenzen erstellten DSM und dem durch Definition von Höhenpolygonen erstellten DSM (Abbildung 7-10). Rechts: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen.



Das Verfahren zur Erstellung von digitalen Strukturplänen aus Schichtgrenzen der geologischen Karte und dem Höhenmodell wurde auch auf ganz Unterfranken angewendet. Auf diese Weise konnte für die gesamte Region ein DSM, bezogen auf die Grenze *mu-mm*, mit einer horizontalen Auflösung von 500m erstellt werden. Weiteres dazu in Kap 7.2.3.1.4.

7.2.3.1.3.6 Qualitätskontrolle von digitalen Strukturmodellen

Ebenso wie aus Schichtgrenzen und dem Digitalen Höhenmodell Strukturpläne berechnet werden können, ist es möglich, in „umgekehrter Richtung“ aus Strukturplänen und DHM „theoretische“ geologische Karten zu erstellen. Damit besteht eine hervorragende Möglichkeit, die erstellten DSM auf Plausibilität zu prüfen. Der Vorgang der Erstellung einer solchen „theoretischen“ geologischen Karte wird hier nur kurz skizziert:

- Für jede Einheit wird ein Grid erstellt, das den Ausstrich dieser Schicht zeigt. Dies geschieht durch die Abfrage:
- $(([\text{DHM}] - [\text{BAS}]) \geq 0) \text{ AND } (([\text{DHM}] - [\text{TOP}]) < 0)$;
(Erklärung: Alle Bereiche, in denen die Basis der Schicht [BAS] unter, und das Top der Schicht [TOP] über Gelände liegen, bilden den Ausstrich der Schicht; [BAS] und [TOP] werden als DSM aus dem Abstand zum Referenzgrid berechnet. Je nach Verfahren werden konstante Werte oder Mächtigkeitsverteilungen verwendet.)⁶⁰
- Die Ausstriche aller so berechneten Einheiten werden entsprechend mit Attributen versehen und addiert.

Das Ergebnis einer solchen Berechnung zeigt Abbildung 7-15. Die Erstellung lässt sich auch in einem Schritt bzw. durch Programmierung umsetzen, was hier aber nicht näher erläutert wird (→ Kap. 8).

⁶⁰ Vgl. hierzu auch die in Kap. 8.1 vorgestellten Berechnungsmethoden im Raster-GIS.

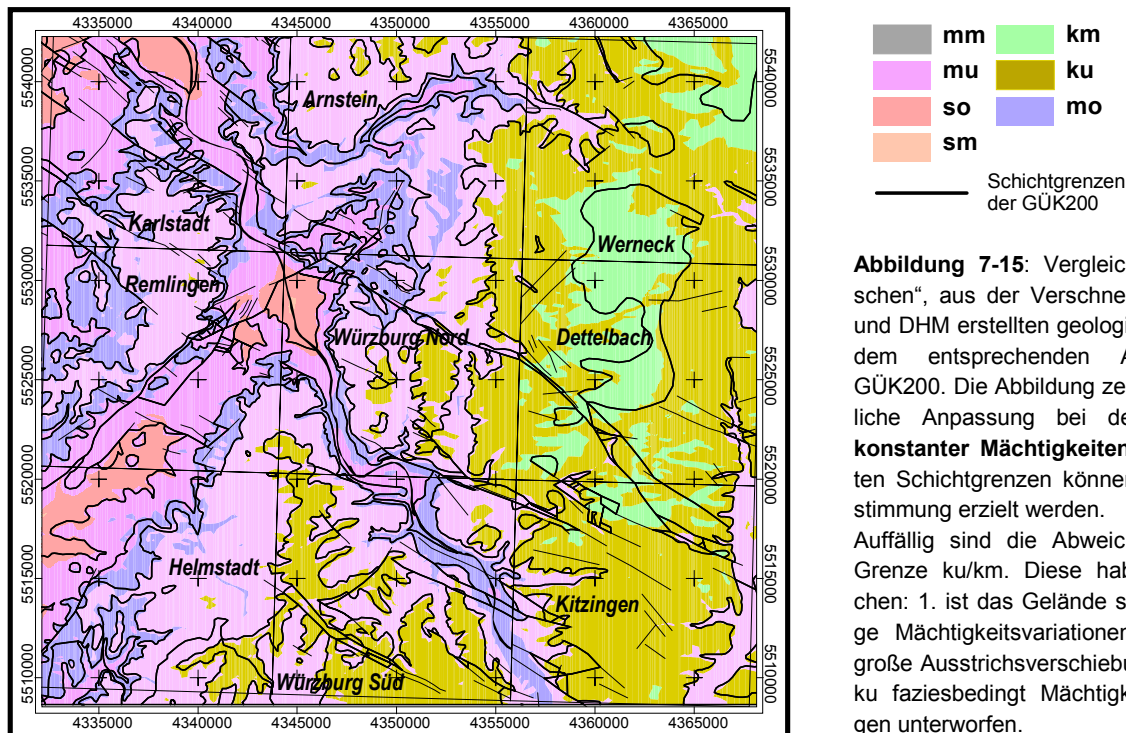


Abbildung 7-15: Vergleich der „theoretischen“, aus der Verschneidung von DSM und DHM erstellten geologischen Karte mit dem entsprechenden Ausschnitt der GÜK200. Die Abbildung zeigt die bestmögliche Anpassung bei der Verwendung **konstanter Mächtigkeiten**. Für die meisten Schichtgrenzen können gute Übereinstimmung erzielt werden.

Auffällig sind die Abweichungen an der Grenze ku/km. Diese haben zwei Ursachen: 1. ist das Gelände sehr flach, geringe Mächtigkeitsvariationen ergeben also große Ausstrichverschiebungen, 2. ist der ku faziesbedingt Mächtigkeitsveränderungen unterworfen.

Die Schichtgrenzen der theoretische Karte können nun mit einer vorhandenen geologischen Karte visuell oder durch Anwendung statistischer Methoden verglichen werden. Für eine statistisch gesicherte Qualitätsprüfung werden die Abweichungen der Höhenwerte der berechneten Schichtgrenzen zu den Höhenwerten der auf der Kartenvorlage eingetragenen Schichtgrenzen bestimmt. Die Abweichungen können für einzelne Schichtgrenzen oder für Teilbereiche der Karte ermittelt werden. Es ist auf diese Weise relativ leicht zu überprüfen, ob und wo bestimmte Schichtgrenzen generell zu hoch oder zu niedrig liegen. Bei der Verwendung konstanter Mächtigkeiten kann dann eine Anpassung erfolgen, indem die Mächtigkeitswerte solange verändert werden, bis eine optimale Übereinstimmung gefunden ist. Ebenso kann verfahren werden, wenn variable Mächtigkeiten verwendet werden. Hier können die Mächtigkeitsverteilungen lokal angepaßt werden, was aber mit einem hohen Aufwand verbunden ist.

Die hier beschriebene Methode ist ein hervorragendes Mittel um beispielsweise Annahmen bezüglich der Mächtigkeitschwankungen von Einheiten zu korrigieren. Insbesondere bei Einheiten die schlecht aufgeschlossen sind und selten vollständig durchbohrt werden (z.B. *mm*), läßt sich auf diese Weise feststellen, ob die angenommene Mächtigkeit tatsächlich vorhanden ist.

Es ist anzumerken, daß der hier beschriebene Kontrollprozess keine „echte“ Qualitätskontrolle darstellt, da letztlich nur zwei modellhafte Beschreibungen der realen Verhältnisse (DSM und geologische Karte) miteinander verglichen werden. Echte Qualitätsprüfungen sind nur anhand von Vergleichen mit tatsächlich gemessenen Aufschlußdaten (Bohrungen) durchzuführen. Allerdings ergibt sich dabei meist das Problem, daß viele der Meßwerte, die zur Prüfung herangezogen werden könnten, bereits Bestandteil (Stützpunkte) der Modellerstellung waren, weswegen in gewissen Rahmen Ausgangsdaten und Ergebnis mit sich selbst verglichen werden. Weiteres dazu in Kap. 7.2.3.4.

7.2.3.1.3.7 Diskussion

Der digitale Strukturplan stellt innerhalb des erarbeiteten Bewertungskonzeptes die für die Qualität der berechneten Bewertungen entscheidende Datengrundlage dar. Bei der Erstellung von Strukturplänen müssen deshalb besonders hohe Anforderungen bezüglich der Detailgenauigkeit und der Abbildungstreue gestellt werden. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Verfahren zur Erstellung von Strukturplänen entwickelt und verglichen. Dabei zeigt sich, daß alle Verfahren Vor- und Nachteile aufweisen. Um zu zeigen, welches Verfahren den Informationsgehalt der analogen Streichkurvendarstellung am besten wiedergibt, wurden sta-

Verfahren den Informationsgehalt der analogen Streichkurvendarstellung am besten wiedergibt, wurden statistische Methoden angewendet auf die hier nicht explizit eingegangen wird (vgl. z.B. Abbildung 7-14). Am besten veranschaulicht werden können die Qualitätsunterschiede mit Querprofilen, die durch die Ergebnisse gelegt werden. Die Ergebnisse eines solchen Vergleichs zeigt Abbildung 7-16.

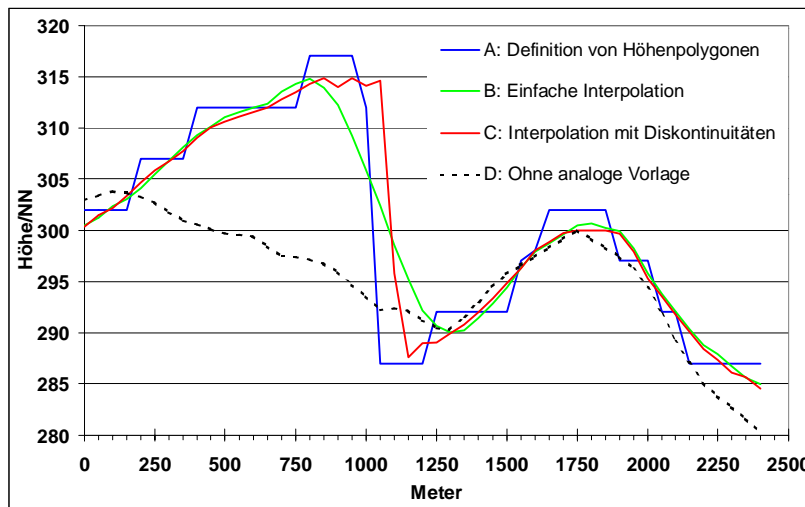


Abbildung 7-16: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren zur Umsetzung analoger in digitale Strukturpläne (Profilardarstellung A-A' in Abbildung 7-10).

Verfahren:

A: Kap. 7.2.3.1.3.2

B: Kap. 7.2.3.1.3.3

C: Kap. 7.2.3.1.3.4

D: Kap. 7.2.3.1.3.5

Deutlich zu erkennen sind in Abbildung 7-16 die „Stufen“ im durch Höhenpolygone dargestellten DSM (A), das aber ansonsten die Lage und Sprunghöhe der Verwerfung am exaktesten wiedergibt. Durch die „einfache“ Interpolation (B) wird die Verwerfung dagegen relativ stark geglättet. Optimale Ergebnisse bringt die Einbeziehung der Verwerfungen in die Interpolation (C). Nachteil dieser Methode sind extrem lange Rechenzeiten. Das Verfahren, bei dem das DSM aus Schichtgrenzen und Höhenwerten berechnet wurde (D), ist nicht in der Lage die Verwerfung abzubilden. Bereichsweise sind die Übereinstimmung aber überraschend gut. Abgesehen von diesem letzten Verfahren, das ja nur eine Behelfslösung darstellt, ist es möglich, mit den Interpolationsverfahren die analoge Vorlage gut abzubilden. Ob der zusätzliche Aufwand durch die Einbeziehung von Diskontinuitäten (C) in die Berechnung gerechtfertigt ist, hängt von der Aufgabenstellung und der Qualität der Ausgangsdaten ab.

Die Qualitätsfrage betrifft zunächst ausschließlich die Umsetzung der analogen Vorlage in eine digitale (Raster-) Darstellung. Vollkommen unabhängig davon ist die Frage, inwieweit diese analoge Vorlage die **realen** Strukturverhältnisse wirklich wiedergibt. Da Streichkurvenpläne aus Kartierungen i.A. die bestmögliche Informationsquelle über die Untergrundstruktur darstellen, bildet die korrekte Umsetzung dieser Daten das oberste Qualitätskriterium. Es wird darauf hingewiesen, daß es, ohne aufwendige und in diesem Zusammenhang nicht durchführbare konstruktive Maßnahmen, **nicht** möglich ist, neue zusätzliche Informationen (Bohrungsdaten) **einfach** in ein bestehendes Strukturmodell einzuarbeiten.

Bezüglich der Problematik der Abbildung von Verwerfungen ist anzumerken, daß die Festlegung und Darstellung einer Verwerfung durch den kartierenden Geologen im Raum Unterfranken im Allgemeinen mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Demzufolge ist es nicht entscheidend, ob eine solche Verwerfung wirklich detailgetreu durch das DSM wiedergegeben wird. Sinnvoller erscheint es hier, den Bereich von Verwerfungen als „Unsicherheitszonen“ zu definieren. Im Bewertungsmodell (vgl. Kap. 8) wird dies durch die Definition einer „Verwerfungswahrscheinlichkeit“ in Abhängigkeit von der Verwerfungsdichte umgesetzt (siehe auch Abbildung 4-29).

7.2.3.1.3.8 Einbeziehung von regionalen Mächtigkeitenverteilungen in das DSM

Für größere Gebiete mit stark variablen Schichtmächtigkeiten ist es nicht möglich sinnvolle DSMs zu erzeugen, indem unterschiedliche Bezugsniveaus durch die Addition und Subtraktion von **konstanten** Mächtigkeitwerten in ein einheitliches Niveau überführt werden. Wo die Grenzen der Gültigkeit vereinfachter Verfahren mit konstanten Mächtigkeiten liegen, hängt stark von der gewünschten Detailauflösung, der Qualität der Ausgangsdaten und den regionalen geologischen Verhältnissen ab. Liegen die Mächtigungsunterschiede zwischen Ausgangs- und Zielbezugsniveau in der Summe bei weniger als 10-20m, bringt die Einbeziehung von Mächtigungsunterschieden meist keine Qualitätssteigerung.

Dabei ist der zusätzliche Arbeitsaufwand zu beachten, der vor allem in der Ermittlung der Mächtigkeitenverteilungen der einzelnen Schichten zu sehen ist. Diese können aus Bohrungsdaten, teilweise auch aus vorhandenen Isopachenkarten erstellt werden (vgl. Kap. 6.3.6.4.1). In der vorliegenden Untersuchung wurden Mächtigkeitenverteilungen für alle wesentlichen stratigraphischen Einheiten in Unterfranken erstellt. Die Ergebnisse sind in den entsprechenden Kapiteln der geologischen Beschreibung wiedergegeben (z.B. Abbildung 4-5). Über den ganzen Raum Unterfranken sind die Mächtigungsunterschiede einiger Einheiten immerhin so erheblich, daß sie in die Erstellung des Strukturplans miteinbezogen werden müssen. Eine kurze Erläuterung zur Erstellung des DSM für ganz Unterfranken wird in Kap. 7.2.3.1.4 gegeben.

Eine detaillierte Betrachtung der Mächtigkeitsschwankungen wurden für den Beispielausschnitt vorgenommen. Hier lagen analoge Grunddaten mit vier verschiedenen Bezugsniveaus vor, die in ein einheitliches Niveau überführt werden mußten (vgl. Abbildung 7-7). Um zu klären, ob hier das vereinfachte Verfahren mit konstanten Mächtigkeitwerten zulässig ist oder die Mächtigkeitenverteilungen berücksichtigt werden müssen, wurde ein Vergleich beider Methoden angestellt. Zu diesem Zweck wurden die Mächtigkeiten aller relevanten Einheiten für alle 9 beteiligten Kartenblätter sowie der umgebenden 16 Kartenblätter aus Bohrungsdaten und anderen Quellen ermittelt und für jede Einheit pro Kartenblatt (soweit sie dort vorkommt) ein Mittelwert festgelegt (vgl. Tabelle 7-1). Die den Beispielausschnitt umgebenden 16 Kartenblätter wurden hinzugezogen, um auch an den Rändern des Modellgebiets zuverlässige Daten für die Interpolation zu gewinnen. Als Datengrundlage kommen dabei weit weniger Bohrungen in Frage als angenommen werden könnte, da überraschend wenige Bohrungen die gesamte Mächtigkeit der Haupteinheiten durchteufen. Beispielsweise durchteufen Trinkwasserbohrungen im *mo* und *mm* fast nie den gesamten *mm*, so daß dessen Gesamtmächtigkeit selten gegeben ist.

Tabelle 7-1 zeigt, daß die Mächtigkeitsschwankungen zwischen einzelnen Kartenblättern (Mittelwerte) für den Beispielausschnitt mit Ausnahme des Mittleren Muschelkalk sehr gering ausfallen. Daraus ist abzuleiten, daß die Überführung des Bezugsniveaus *so/mu* in das Referenzniveau *mu/mm* unproblematisch ist. Schwierigkeiten bereitet dagegen die Umrechnung von Daten des Bezugsniveaus *mo/ku*, da hier die bedeutenden Mächtigkeitsschwankungen im *mm* zu berücksichtigen sind. Dem *mm* ist bei der Erstellung von Strukturplänen im Untersuchungsgebiet besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da er die einzige Einheit ist, die auch auf kurzen Distanzen größeren Mächtigkeitsschwankungen aufweist (Kap. 4.3.4.2.2). Die extremsten Mächtigkeiten treten im Raum Kitzingen und im Raum Schweinfurt auf, wo in Tiefbohrungen Mächtigkeiten von bis zu 100m, davon jeweils hohe Anteile in Sulfat- bzw. Steinsalzfazies, angetroffen wurden. Die geringsten Mächtigungsangaben mit 35-40m liegen aus dem Südwesten des Betrachtungsgebietes vor. Es besteht eine Tendenz der Mächtigungszunahme nach Süden und Südosten.

Aus allen verfügbaren Mächtigungsangaben wurde eine Mächtigkeitenverteilung für den *mm* im Beispielausschnitt berechnet (Abbildung 7-17). Interessant ist, daß die Trends, die in der Darstellung zum Ausdruck kommen, offensichtlich durch sehr lokale Phänomene verursacht werden. Da der Thematik der Mächtigkeiten im *mm* eine relative hohe Bedeutung zukommt, wurde diese Fragestellungen eingehend untersucht. Dabei ergaben sich einige sehr interessante Aspekte, deren Darstellung im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich ist. Es wird nur angemerkt, daß sich durch die Überlagerungsmöglichkeiten von Strukturkarten, Digitalem Geländemodell und Mächtigkeitenverteilungen mit GIS völlig neue Ansätze zur Prüfung bestehender Modellvorstellungen ergeben.

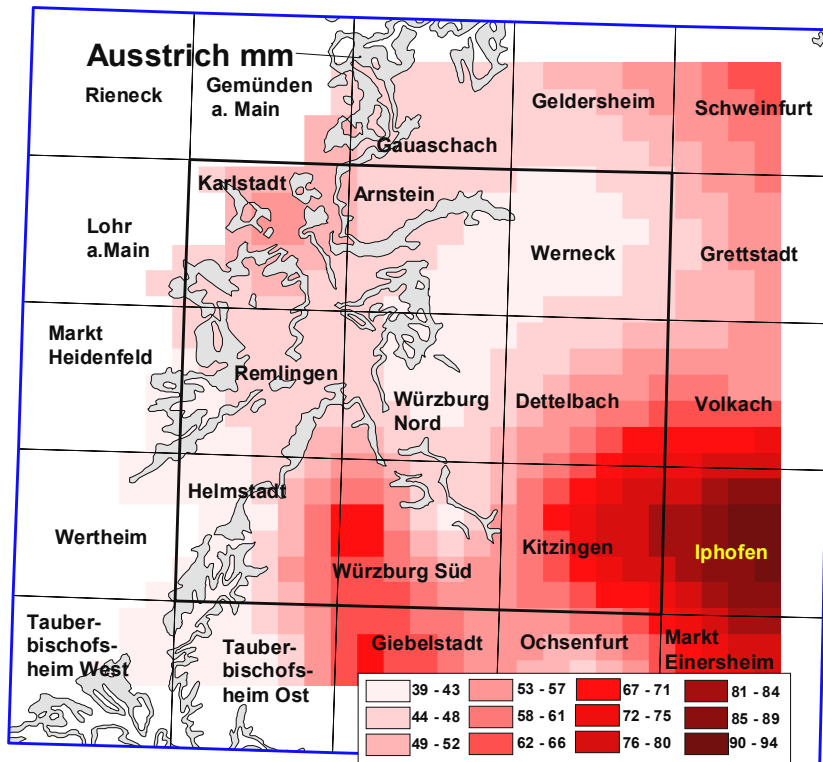


Abbildung 7-17: Interpolierte Mächtigkeiten des Mittleren Muschelkalk im erweiterten Beispielausschnitt nach Daten aus Erläuterungen der GK25 und GK500 von Bayern, Diplomarbeiten, Dissertationen, regionalgeologische Arbeiten, Bohrarchiven und ingenieurgeologischen Gutachten (vgl. Kap. 6.3.6.4.1). Die der Abbildung zu entnehmenden Werte und Trends müssen mit Vorbehalt betrachtet werden, da sich hier regionale und sehr lokale Phänomene zu überlagern scheinen. Für eine angemessene geostatistische Untersuchung fehlt die Datenbasis.

7.2.3.1.4 Strukturplan für Gesamt-Unterfranken

Für den Bereich Unterfranken wurde ein Übersichts-DSM erstellt, für das allerdings aus Zeitgründen nicht alle verfügbaren analogen Datenquellen herangezogen werden konnten. Insgesamt liegen für etwa 45% der Fläche Unterfrankens analoge Streichkurvenpläne in Maßstäben kleiner 1:100.000 vor. Die Erstellung eines DSMs für ganz Unterfranken ausschließlich auf der Basis analogen Vorlagen ist also nicht möglich. Deshalb wurde auf das in Kap. 7.2.3.1.3.5 beschriebene Verfahren der Erstellung von DSM aus dem Höhenmodell und der digitalen geologischen Karte Gebrauch gemacht. Da die Mächtigkeiten der maßgeblichen Einheiten im Raum Unterfranken erheblichen Schwankungen unterworfen sind, wurden für alle beteiligten Einheiten zunächst Mächtigkeitsverteilungskarten erstellt (vgl. z.B. Abbildung 4-5, 4-8, 4-15).

Eine Gesamtdarstellung des Verfahrens muß hier unterbleiben, da die einzelnen Arbeitsschritte relativ aufwendig sind. Prinzipiell ist der Ablauf allerdings ähnlich wie der in Kap. 7.2.3.1.3.5 beschriebene. Das Ergebnis ist als Übersichtsdarstellung in Abbildung 4-28 wiedergegeben.

Mit dem Strukturplan von Unterfranken lassen sich interessante Betrachtungen anstellen, die z.B. Hinweise auf mögliche Fehlerquellen bei der Erstellung von Übersichtskarten zur thermischen Nutzung des Untergrundes (vgl. Kap. 6.2.3.1 und 9.2.1.1) geben. Wie schon mehrfach erwähnt, gibt die geologische Karte allein keine guten Anhaltspunkte für die Bewertung von Gebieten (vgl. Kap. 7.2.1). Zusätzlich kann die Betrachtung der Ausstrichflächen allein zu falschen Beurteilungen führen, da lithologische Einheiten entsprechend ihres Verwitterungsverhaltens unterschiedliche reliefbildende Eigenschaften haben. So kann z.B. eine Schicht mit hoher Verwitterungsresistenz im Kartenbild trotz relativ hoher Mächtigkeit sehr geringe Ausstrichflächen einnehmen, während eine Schicht mit hoher Verwitterungsanfälligkeit und vergleichsweise geringer Mächtigkeit sehr weit verbreitet sein kann. Je nach dem, welche Eigenschaften die jeweiligen Schichten bezüglich der gewünschten Nutzungsart haben, kann dies den Betrachter zu falschen Einschätzungen des Potentials verleiten.

Wenngleich dieser Sachverhalt für den Geologen trivial ist, ist es doch lohnend ihn näher zu betrachten, zumal mit dem vorliegenden Datenmaterial eine quantitative Analyse einfach durchführbar ist. Im Beispiel werden für *mo* und *ku* Ausstrichflächen, Schichtvolumen bis 200 Tiefe und die Fläche, auf denen die Einheiten in 200m Tiefe erbohrt werden, in Beziehung gesetzt. Als Eingabedateien für die Berechnung werden die Tie-

fenlage der Basis und des Tops sowie das DHM benötigt. Die Berechnung des Volumens einer Schicht bis zur Tiefe T auf der Fläche A_R erfolgt nach dem Schema:⁶¹

1. Berechnung des Volumenanteils im Ausstrichbereich: $(([DHM]-[BAS]) * ([BAS] > [DHM] \text{ AND } [TOP] > [DHM])) * A_R$
2. Berechnung des Volumenanteils dort, wo die Schicht vollständig erschlossen wird: $(([TOP]-[BAS]) * ([TOP] < [DHM] \text{ AND } [BAS] > ([DHM]-T)) * A_R$
3. Berechnung des Volumenanteils dort, wo das Top über, die Basis unter der T liegt: $(([TOP]-[DHM]-T) * ([TOP] > [DHM]-T \text{ AND } [BAS] < [DHM]-T)) * A_R$

Für den Fall, daß die betrachtete Tiefe kleiner ist als die Mächtigkeit der Schicht muß noch eine vierte Abfrage eingeführt werden: $(([TOP] > [DHM] \text{ AND } [BAS] < [DHM]-T) * T) * A_R$

Tabelle 7-2 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Werte für den *mo* und *ku*. Die Berechnung wurde auf den Bereich beschränkt, in dem beide Einheiten vorkommen:

Schicht / Verhältnis	Ausstrichfläche (1)	Verbreitung bei 200m Bohrtiefe (2)	Verhältnis (1) zu (2)	erschließbares Volumen bis 200m Tiefe (3)	(3) zu (1)
<i>ku</i>	1501km ²	2008km ²	1 zu 1.34	54km ³	0.036 zu 1
<i>mo</i>	693km ²	2784km ²	1 zu 4.02	192km ³	0.277 zu 1
<i>ku zu mo (mo =1)</i>	2.2 zu 1	0.71 zu 1	0.33 zu 1	0.28 zu 1	0.12 zu 1

Tabelle 7-2: Vergleich der Ausstrichflächen von Oberem Muschelkalk (*mo*) und Unterem Keuper (*ku*), den Flächen, auf denen diese Einheiten bei einer Bohrtiefe bis 200m angetroffen werden und den Volumina, die bei dieser Bohrtiefe erschlossen werden. Es zeigt sich, daß der *ku* zwar sehr große Flächen einnimmt, verglichen mit dem *mo* aber nur relativ kleine Anteile am Untergrunderdaufbau hat. Vgl. Abbildung 7-18.

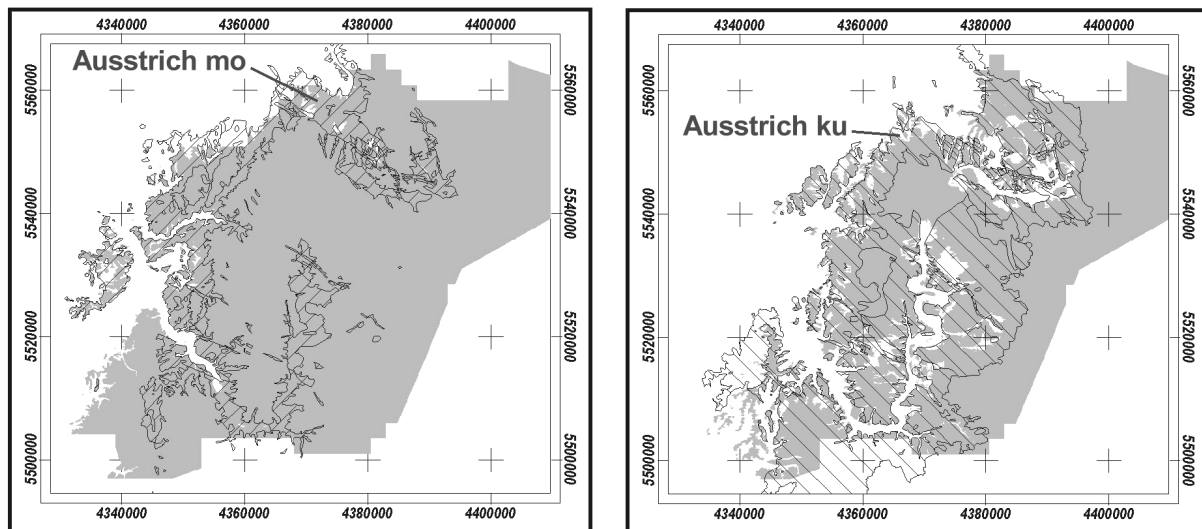


Abbildung 7-18: Vergleich von Ausstrichfläche (schraffiert) und der Fläche, auf der die Einheiten *mo* (links) und *ku* (rechts) bei einer Bohrtiefe von 200m angetroffen werden (grau). Abweichungen zwischen der berechneten Fläche und den Ausstrichgrenzen auf der digitalen GÜK200 (vgl. Kap. 7.1) sind auf die mäßige Genauigkeit des zugrundeliegenden DSM für Unterfranken zurückzuführen.

Es zeigt sich, daß der *ku*, der im Untersuchungsgebiet eine Mächtigkeit von 30 bis 50m hat, zwar eine sehr große Ausstrichfläche einnimmt, aber volumenmäßig gegen den *mo* (Mächtigkeit um 80m) stark zurücktritt. Das geringe Volumen ist darauf zurückzuführen, daß der *ku* in Bereichen der Gäuflächen westlich der Gipskeuperrandstufe nur eine geringmächtige Auflage auf dem *mo* bildet. Für Standortbewertungen und das Nutzungspotential bedeutet dies, daß auf diesen Flächen der unterlagernde *mo* eine weit höhere Bedeutung hat als der in Karte ausgewiesene *ku*.

⁶¹ Zu den Berechnungsmethoden und den verwendeten Parametern vgl. Kap. 8.1 und Tabelle 8-5.

7.2.3.2 Grundwasser im Untergrundmodell

Die Bedeutung des Auftretens von Wasser im Untergrund für die Standortbewertung zur thermischen Nutzung wurde in den Kapiteln 2 und 3 ausführlich dargelegt. Kriterien sind dabei die Zustandsformen (gesättigt, ungesättigt), die Mobilität sowie quantitative und qualitative Aspekte. In Anbetracht dieser hohen Bedeutung ist klar, daß ein Untergrundmodell, das eine aussagekräftige Beurteilung der Situation erlauben soll, in der Lage sein muß, die hydrogeologische Situation so genau wie möglich zu beschreiben. Im Idealfall sollte es die folgenden Fragestellungen beantworten können:

Allgemeine Fragestellungen:

- Wie hoch ist die Porosität, die effektive Porosität und die Permeabilität der angetroffenen Schichten?
- Wie sind diese Parameter horizontal und vertikal verteilt?
- Ab welcher Teufe wird am zu bewertenden Standort Grundwasser angetroffen?

Fragestellungen die gesättigte Zone betreffen:

- Kann Grundwasser durch Pumpen zutage gefördert bzw. reinjeziert werden? Wenn ja, welche Raten sind möglich?
- Ist Grundwasser in Bewegung? Wenn ja, wie schnell bewegt es sich?
- Handelt es sich um ein Haupt-, Teil- oder ein schwebendes Grundwasserstockwerk?
- Ist die Grundwasseroberfläche frei oder gespannt?
- Ab welcher Teufe wird das nächsttiefere Stockwerk erreicht?
- Gibt es hydraulische Verbindungen zwischen den Stockwerken?
- Welcher Grundwasserchemismus ist zu erwarten?

Fragestellungen die ungesättigte Zone betreffen:

- Wie ist der Sättigungszustand in der ungesättigten Zone?

Modelle, die entsprechende Informationen enthalten, werden nach FRISCH ET AL. (2000) als „**Hydrogeologische Modelle**“ bezeichnet. Sie basieren auf Untergrundstrukturmodellen, die den geologisch-geometrischen Modellrahmen vorgeben und auf Annahmen bzw. Informationen über die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund. Das hydrogeologische Modell ist Basis von mathematischen Grundwassermodellen (Grundwasserströmungs- oder –Transportmodelle), die Prognosen über das Verhalten des Grundwassers unter konstanten oder zeitlich variablen Bedingungen erlauben. Dazu können analytische oder numerische Verfahren eingesetzt werden. Grundwassermodelle sind für die Planung größerer Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes von enormer Bedeutung, insbesondere solche Modelle, die auch die Behandlung von Wärmetransportvorgängen ermöglichen. Auch für die Bewertung von Standorten werden Informationen benötigt, die nur über mathematische Grundwassermodelle (zumindest formal) korrekt ermittelt werden können (z.B. Grundwasserfließgeschwindigkeit und –richtung).

Es kann hier ohne umfangreiche Diskussion festgestellt werden, daß die Erstellung eines Grundwassermodells, das die Bestimmung der maßgeblichen Parameter (s.o.) in allen raum-zeitlichen Dimensionen in einer für die Bewertung ausreichenden Genauigkeit ermöglicht, für ein Gebiet der Größe Unterfrankens nicht möglich ist. Auch für den Beispielausschnitt aus neun TK-Blättern (1200km²), in dem eine insgesamt mindestens 500m mächtige, aus vier Hauptgrundwasserstockwerken bestehende Abfolge vorliegt, war die Erstellung eines solchen Modells im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Um in diesem Bereich dennoch zu einer annehmbaren Beurteilung der Grundwassersituation zu kommen, wurde ein stark vereinfachtes hydrogeologisches Modell (im Sinne von FRISCH ET AL., 2000) in das Untergrundstrukturmodell integriert.

Abbildung 7-19 zeigt die unterschiedlichen Zustände von Wasser im Untergrund, die bei der Bewertung der Eignung zur thermischen Nutzung berücksichtigt werden müssen. Oberstes Kriterium ist die Frage, ob „ech-

tes“ Grundwasser (Abbildung 2-8) vorliegt oder nicht. Bei ungesättigten Verhältnissen müssen Verfahren, die auf die Förderung von Grundwasser angewiesen sind, ausgeschlossen werden. Liegt Grundwasser vor, so ist entscheidend, ob ausreichende Förder- und Injektionsraten erzielbar sind. Wenn ja, so ist bei der Speicherverfahren auszuschließen, daß eine natürliche Grundwasserfließbewegung besteht, was hingegen bei den Verfahren zur Wärmegegewinnung eher günstig ist (vgl. Kap. 3.2.1.2.3).

7.2.3.2.1 Konzeptioneller Rahmen für das hydrogeologische Modell

Das hydrogeologische Modell, das in dieser Untersuchung erstellt wurde, geht von einigen sehr grob vereinfachenden Annahmen aus:

- Es wird davon ausgegangen, daß für das ganze Gebiet **ein** einheitlicher Grundwasserspiegel vorliegt, der für **alle** Stockwerke bzw. Aquifere gültig ist und von Diskontinuitätsstellen (Verwerfungen, Schicht- und Faziesgrenzen) nicht beeinflusst wird (vgl. Abbildung 7-19).
- Sowohl die Aquifere als auch die stauenden Horizonte werden als kontinuierliche, homogene Schichten betrachtet. Damit sind keine vertikalen Flüsse zwischen einzelnen Stockwerken möglich.
- Schwebende Grundwasserstockwerke kommen im Modell nicht vor.

Abbildung 7-18 veranschaulicht die Vereinfachungen und die Gegebenheiten, auf die sie angewendet werden:

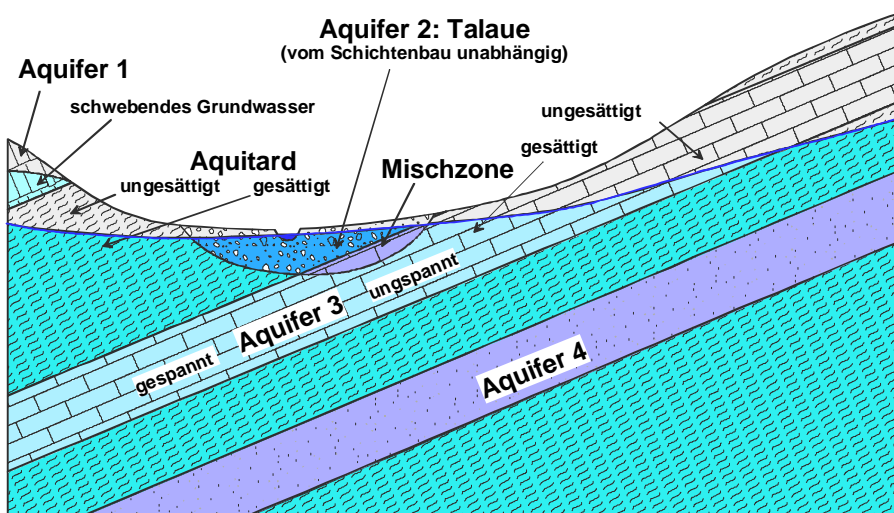


Abbildung 7-19: Vereinfachte Modellvorstellung zum Auftreten von Wasser im Untergrund. Diese Modellvorstellung bildet die theoretische Grundlage für das hydrogeologische Modell als Bestandteil des erstellten Untergrundmodells.

Die oben genannten Vereinfachungen bedingen eine gewisse Herabsetzung der Aussagekraft von Bewertungsergebnissen, die auf Basis des Untergrundmodells erstellt werden. Man muß sich dabei im Klaren darüber sein, daß ein solches Modell bestenfalls in der Lage ist, die realen Verhältnisse im Rahmen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu beschreiben. Um eine sinnvolle Bewertung zu ermöglichen, sollte dabei immer ein möglichst konservativer Ansatz verfolgt werden. Daraus ergeben sich allerdings wiederum gewisse konzeptionelle Probleme, da die Bedeutung der Wertung „konservativ“ hier von dem zu bewertenden Verfahren abhängig ist. So sollte für eine aussagekräftige Standortbewertung für Aquiferspeicher **zweifelsfrei** feststehen, daß am betrachteten Standort Grundwasser vorhanden ist. Dagegen muß unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. in klüftigem Gestein) für die Erdsondenspeicherung **zweifelsfrei** ausgeschlossen werden können, daß in der gewünschten Tiefe Grundwasser vorkommt.

Als Konsequenz muß eine Kompromißlösung angestrebt werden, wenn, wie hier geschehen in Anbetracht des Arbeitsaufwands nur ein einziges Modell erstellt wird⁶². Diese sollte Aussagen zur Grundwassersituation

⁶² Im erstellten Bewertungsmodell (Kap. 8.2) wäre die Einbeziehung mehrerer Grundwasseroberflächen konzeptionell allerdings problemlos und ohne nennenswerten Aufwand möglich.

im Hinblick auf alle betrachteten Verfahren erlauben, gleichzeitig aber mit vertretbarem Aufwand erstellbar sein. Da es sehr unwahrscheinlich ist, daß im Betrachtungsraum Aquiferspeicher in größerer Zahl errichtet werden (vgl. Kap. 5.2.2.4), wird bezüglich der betrachteten Verfahren bei den Speicherverfahren die Priorität auf Erdsondenwärmespeicher gelegt. Bei den Entzugsverfahren wird davon ausgegangen, daß grundwassergekoppelte Wärmepumpen auf den Bereich des Maintals beschränkt sind. Auch hier ist die Grundwassersituation für den weitaus größten Flächenanteil also besonders für die Erdsondenverfahren interessant.

Das „hydrogeologische Modell“ geht von den folgenden Annahmen aus:

- Erdsondenwärmespeicher sind entweder in geringdurchlässigen Schichten oder im ungesättigten Bereich möglich (Kap. 5.2.3.1). Im gesättigten Bereich ist in Unterfranken bei gut durchlässigen Gesteinen mit großer Wahrscheinlichkeit mit hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten, also extrem ungünstigen Bedingungen zu rechnen. Das Auftreten von Grundwasser stellt im Hinblick auf die Erdsondenwärmespeicherung unter bestimmten Voraussetzungen also ein Ausschlusskriterium dar. Ein Modell, daß eine konservative Beurteilung im Hinblick auf die Realisierbarkeit von Erdsondenwärmespeichern erlaubt, muß also von einem hochliegenden Grundwasserspiegel ausgehen (vgl. Abbildung 7-20b).
- Bei Erdwärmesonden zum Wärmeentzug ist das Vorhandensein von Grundwasser grundsätzlich günstig, Grundwasserbewegung bringt weitere Vorteile. Andererseits bedeutet, abgesehen von grobkörnigen Lockergesteinen, daß Nicht-Vorhandensein von Grundwasser keine dramatische Verschlechterung der Standorteigenschaften. Das Auftreten von Grundwasser ist also keine Bedingung, sondern ein wertender Faktor. Es ist deshalb im Falle der Erdwärmesonden weniger bedeutsam das Auftreten von Grundwasser sicher vorherzusagen.

Aus den beiden oben vorgestellten Feststellung folgt, daß das Grundwassermodell so ausgelegt sein muß, daß die Prognose, daß ab einer bestimmten Teufe Grundwasser auftritt, mit hoher Wahrscheinlichkeit zutrifft (vgl. Abbildung 7-20).

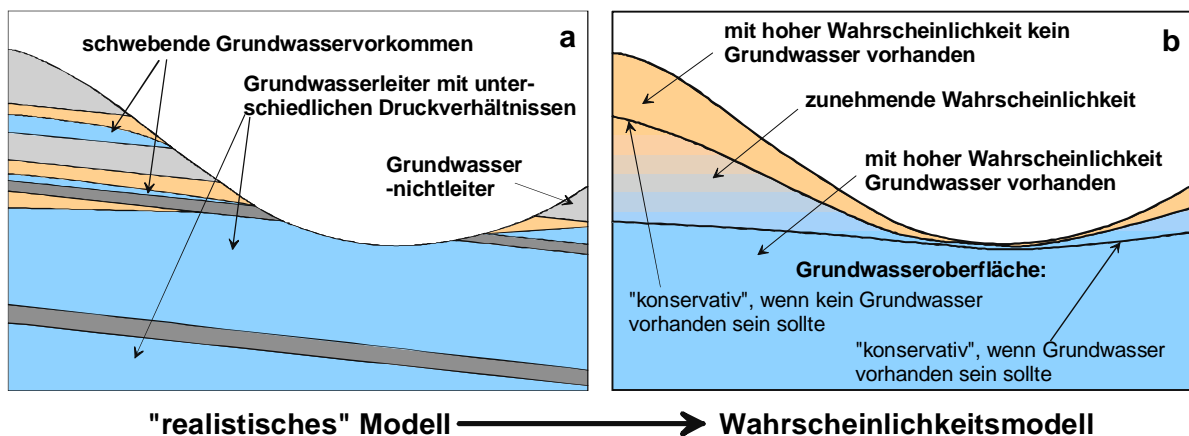


Abbildung 7-20: Ersatz von „realistischen“ hydrogeologischen Modellvorstellungen (a) durch „realisierbare“ Modellvorstellungen (b). Ziel ist eine Aussage, die mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit eine Aussage über die Grundwassersituation hinsichtlich der Eignung für das betrachtete Verfahren zulässt.

In das in dieser Untersuchung erstellte Untergrundmodell wurde auf der Basis der oben angestellten und in Abbildung 7-20 graphisch veranschaulichten Überlegungen ein Grundwasser(Zustands-)modell in Form eines Grundwassergleichenplans eingebaut, der eine konservative Abschätzung im Sinne eines „hoch“ liegenden Grundwasserspiegels darstellt.

7.2.3.2.2 Erstellung des Grundwassergleichenplans

Für weite Teile des Arbeitsgebietes liegen analoge Grundwassergleichenpläne nicht oder nur in extrem niedriger Auflösung vor (z.B. ANDRES & WIRTH, 1985: 1:500.000). Die wenigen bestehenden Datengrundlagen in angemessen hoher Auflösung, beziehen sich auf bestimmte Stockwerke (z.B. IGI, 1998) und sind deshalb

im Sinne der oben diskutierten Vorstellung eines Wahrscheinlichkeitsmodells nicht direkt verwendbar (vgl. Abbildung 7-20). Als Datengrundlage standen deshalb nur die vorhandenen Ruhewasserspiegel aus Brunnen-, Pegel- und anderen Bohrungen zur Verfügung. Die entsprechenden Datenquellen sind in Kap. 6.3.6.4.1 aufgeführt. Bei den Angaben zu vielen Bohrungen ist leider nicht nachvollziehbar, auf welches Stockwerk sie sich beziehen. Dies ist allerdings im Bezug auf die verwendete Konzeption unproblematisch, da mit solchen Informationen immerhin festgestellt werden kann, ab welcher Tiefe mit dem Auftreten von Grundwasser zu rechnen ist (→ Wahrscheinlichkeit, Abbildung 7-20). Teilweise sind hier aber auch geringmächtige Grundwasservorkommen betroffen, die sehr deutlich (bis zu 100m) über dem regionalen Hauptgrundwasserstockwerk liegen (vgl. dazu Kap. 7.2.3.4).

Eine Interpolation von Pegeldaten aus unregelmäßig verteilten und räumlich weit auseinander liegenden Bohrungen (vgl. Abbildung 6-8) muß zwangsläufig zu einem unsinnigen Ergebnis führen, wenn die Morphologie des Geländes nicht berücksichtigt wird (Abbildung 7-21).

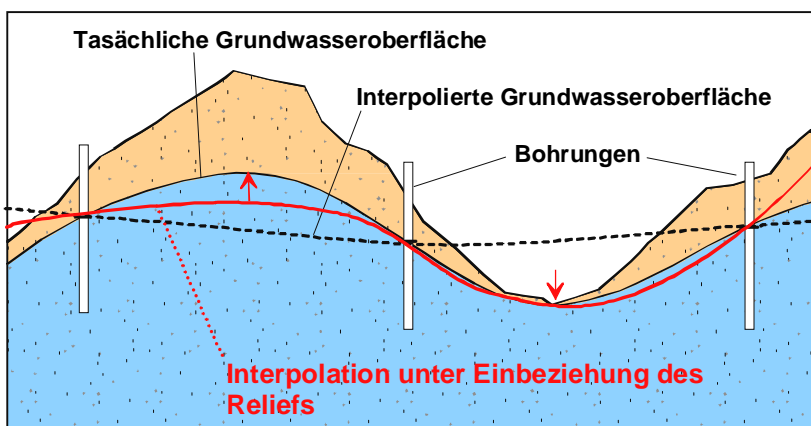


Abbildung 7-21: Fehlerquellen bei der Interpolation von Grundwasserspiegel-daten aus Bohrungen. Liegen die Bohrungen weit voneinander entfernt, entstehen u.U. unsinnige Ergebnisse. Täler werden „gefaltet“. Eine bessere Anpassung erfordert eine Berücksichtigung der Morphologie (vgl. dazu Abbildung 7-24).

Die in Abbildung 7-21 skizzierten Zusammenhänge zeigen bereits einen möglichen Lösungsansatz: da davon ausgegangen werden kann, daß ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Relief der Grundwasseroberfläche und dem Relief der Geländeoberfläche besteht, können verschiedene morphologische Informationen in die Erstellung des Grundwassergleichenplans einbezogen werden. Die Lage der Grundwasseroberfläche im Bezug zur Geländeoberfläche wird durch verschiedene Faktoren auf einen bestimmten Bereich begrenzt. Täler stellen zunächst in jedem Fall eine **maximale** Obergrenze für die Lage der Grundwasseroberfläche dar⁶³. Täler mit Vorflutgewässern stellen per Definition Schnittlinien zwischen Grundwasser- und Geländeoberfläche dar. Die „Höhenpunkte“ dieser Täler können deshalb als Stützstellen für die Interpolation verwendet werden. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, daß in Gebieten, in denen Grundwasserneubildung stattfindet, in morphologischen Hochgebieten auch die Grundwasseroberfläche höher als in den benachbarten Tälern liegt. Insgesamt läßt sich damit die Form der Grundwasseroberfläche als eine an die Geländeoberfläche angepaßte, geglättete Fläche beschreiben. Da sie nicht über die Geländeoberfläche hinausgreifen kann, stellt sie eine „untere Hüllfläche“ dar, die die Geländeoberfläche entlang einiger Linien (Täler) berührt (s. Abbildung 7-21).

Diese Erkenntnis läßt sich bei der Erstellung eines Grundwassergleichenplans (im Sinne von Abbildung 7-20b) umsetzen. Dazu werden die Höhenpunkte von Fließgewässern, von denen bekannt ist, daß sie Vorfluter darstellen, als Stützpunkte für die Interpolation herangezogen. Da aber nicht für jedes Gewässer und in allen Bereichen dokumentiert ist, ob es einen Vorfluter darstellt, muß in einem vereinfachten Verfahren festgelegt werden, welche Fließgewässer **wahrscheinlich** in die Grundwasseroberfläche eingreifen (d.h. Vorfluter darstellen). Dazu wurden zwei verschiedene Methoden angewendet:

⁶³ In diesen Überlegungen werden artesische Verhältnisse nicht berücksichtigt.

Verfahren 1: Eine Klassifikation von Tälern nach der theoretisch berechneten Abflußmenge (bedeutet: Täler bzw. Gewässer mit hoher Abflußmenge sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Vorfluter).

Verfahren 2: Eine Klassifikation über die Ordnung der Flüsse (bedeutet: Flüsse höherer Ordnung stellen mit hoher Wahrscheinlichkeit Vorfluter von Hauptgrundwasserstockwerken dar).

Auf das **Verfahren 1** kann hier nur sehr kurz eingegangen werden, obwohl es eine Fülle von äußerst interessanten Aspekten für hydrologische und hydrogeologische Betrachtungen erschließt. Aus dem DHM werden Hangneigung und Exposition und aus diesen wiederum das theoretische Abflußsystem errechnet. Für jeden Rasterpunkt des Höhenmodells wird dabei bestimmt, wieviele „Wasserteilchen“ ihm theoretisch zufließen würden, wenn alle Punkte gleichmäßig⁶⁴ „beregnet“ werden⁶⁵. Durch Festlegung eines Schwellenwertes können so alle Täler bzw. Talbereiche festgestellt werden, denen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausreichend viel Wasser zufließt, damit sie mit hoher Wahrscheinlichkeit Vorfluter darstellen und im Kontakt mit dem Grundwasser stehen. Nachteilig, gleichzeitig aber auch besonders interessant an diesem Verfahren ist, daß das theoretische und das aktuelle Gewässernetz in Abhängigkeit von der Lithologie der Deckschichten unterschiedlich gut übereinstimmen (Abbildung 7-22).

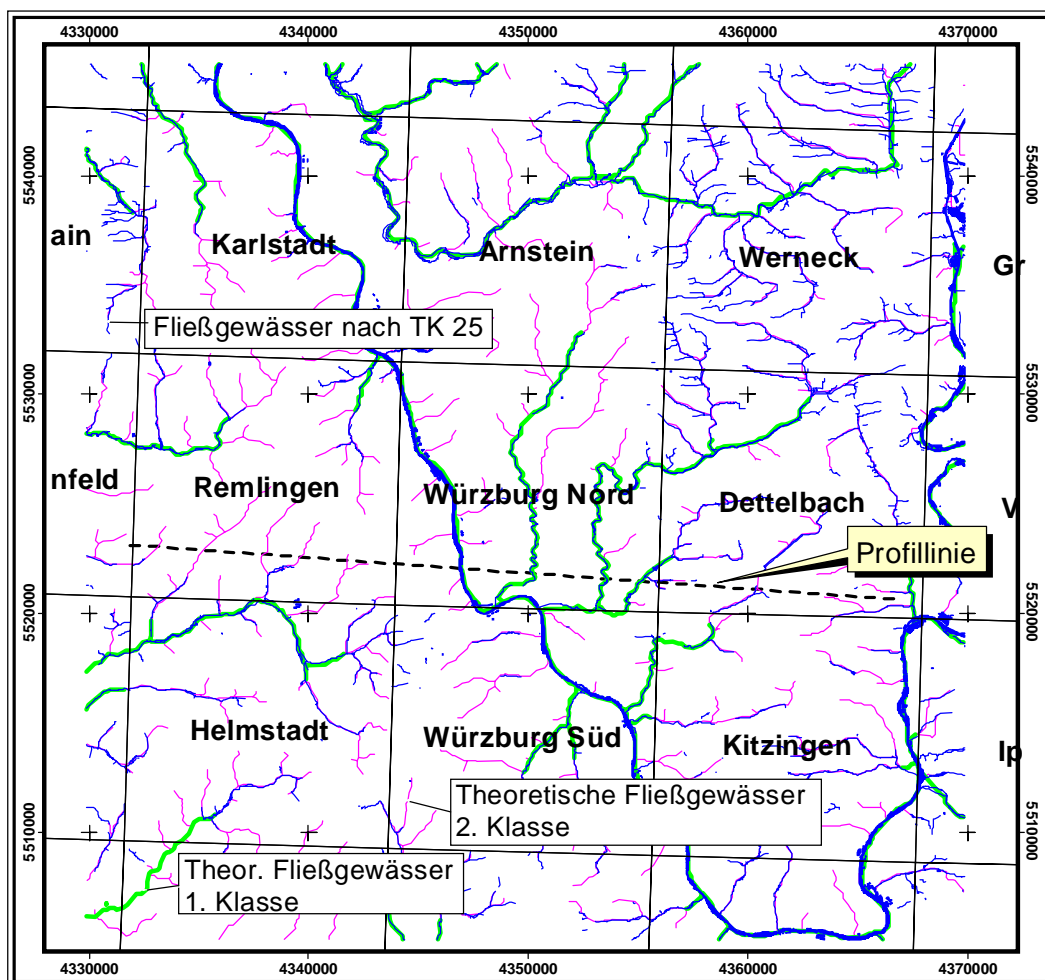


Abbildung 7-22: „Theoretisches“, aus dem DHM berechnetes und „tatsächliches“ Fließgewässernetz nach der TK25. Gewässer „1. Klasse“ sind alle theoretischen Gewässer, denen eine Mindestmenge an „Wasserteilchen“ zufließt, wenn alle Flächenpunkte gleichmäßig „beregnet“ werden. Für die Gewässer „2. Klasse“ wurde der Schwellenwert für die Mindestmenge entsprechend niedriger gesetzt. Gewässer 1. Klasse entsprechen in etwa den Fließgewässern 1. und 2. Ordnung⁶⁶.

⁶⁴ Es ist auch möglich die tatsächliche Niederschlagsverteilung zu berücksichtigen.

⁶⁵ Bestimmung von Hangneigung, Exposition, Einzugsgebieten und theoretischen Abflußverläufen sind standardmäßig in vielen Raster-GIS Anwendungen möglich (vgl. z.B. HALLAM & SALISBURY, 1996).

⁶⁶ „**Ordnung**“: Klassifikation der Fließgewässer anhand standardisierter Kriterien (übernommen aus GISWaWi); „**Klasse**“: Eigene Klassifikation nach empirisch festgelegten Kriterien, basierend auf der theoretischen Abflußmenge in Tälern.

Abbildung 7-22 zeigt die Fließgewässer aus dem ATKIS25 für den Beispielausschnitt, gemeinsam mit den für das gleiche Gebiet berechneten theoretischen Fließgewässern. Die theoretischen Fließgewässer wurden so klassifiziert, daß sie in etwa Gewässern 1. und 2. Ordnung entsprechen. Abbildung 7-23 zeigt einen Schnitt durch einen „Grundwassergleichenplan“, der ausschließlich auf Basis der Höhenpunkte solcher theoretisch berechneten Fließgewässer interpoliert wurde. Da die Stützstellen, bedingt durch das Verfahren, ausschließlich in Tälern liegen, gelingt eine Anpassung an das Relief, die einem „echten“ Grundwassergleichenplan nahe kommt. Das Maß, in dem sich die interpolierten Hüllflächen an das Relief anpassen, wird durch die „Klasse“ (vgl. Abbildung 7-23) respektive die Ordnung der Gewässer bestimmt, die als Stützstellen herangezogen werden.

Vergleicht man die Schnitte durch den aus theoretischen Fließgewässern erstellten „Grundwassergleichenplan“ in Abbildung 7-23 mit der angestrebten Modellvorstellung aus Abbildung 7-20, so zeigt sich, daß diese Methode den Anforderungen gut gerecht wird.

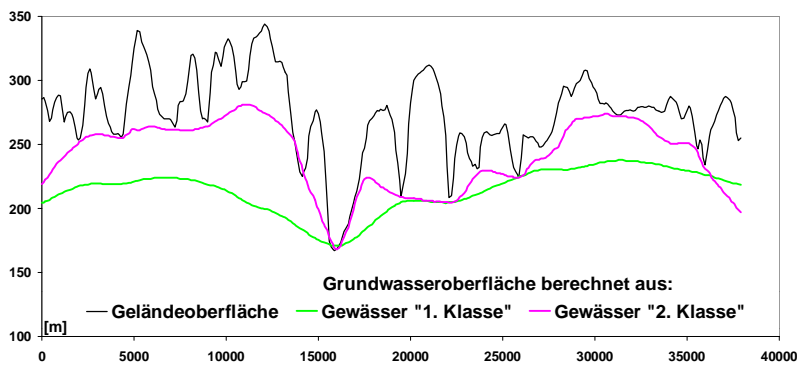


Abbildung 7-23: Schnitte durch „Grundwassergleichenpläne“, die durch die Interpolation der Höhenpunkte von theoretischen Fließgewässernetzen (vgl. Abbildung 7-22), **ohne** die Verwendung von Bohrungsdaten erstellt wurden. Das Verfahren ermöglicht die Erstellung einfacher digitaler Grundwassergleichenpläne. Regional können Anpassungen an die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Verwendung unterschiedlicher „Gewässersklassen“ vorgenommen werden.

Verfahren 2 beruht auf der gleichen konzeptionellen Vorstellung wie das zuerst erläuterte. Hier wird pauschal angenommen, daß Flüsse höherer Ordnung (definiert im GISWaWi) mit großer Wahrscheinlichkeit Vorfluter darstellen. Um festzustellen, inwieweit diese Vermutung zutrifft, wurden verschiedene Grundwassergleichenpläne unter Verwendung der Höhenpunkte zunächst aller Fließgewässer, dann nur der erster Ordnung, nur der erster und zweiter Ordnung usw. berechnet und die Ergebnisse mit Daten aus Bohrungen verglichen. Die Höhenpunkte von Fließgewässern werden erzeugt, indem die Gewässer der gewünschten Ordnung selektiert und in ein binäres Raster überführt werden, dem durch Multiplikation mit dem DHM die entsprechenden Höhenpunkte zugewiesen werden. Diese werden als Raumpunkte mit x,y und z-Koordinaten extrahiert und durch Interpolation in ein regelmäßiges Raster überführt. Durch eine visuelle Auswertung von Profilen und eine Korrelationsanalyse von Ruhewasserspiegeln aus Bohrungen mit den Gridwerten an den entsprechenden Bohransatzpunkten, wird die bestmögliche Übereinstimmung festgelegt.

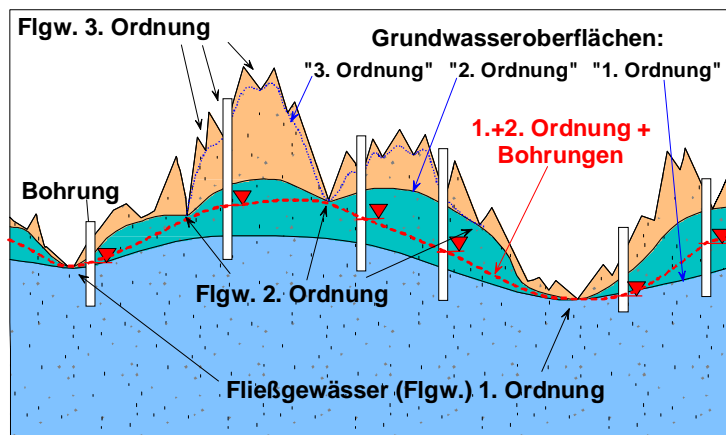


Abbildung 7-24: Modellvorstellung und Konzeption für die Erstellung eines Grundwassergleichenplans aus Bohrungsdaten, digitalem Höhenmodell und Fließgewässernetz. Fließgewässer höherer Ordnung greifen in Grundwasseroberfläche ein. Höhenpunkte dieser Fließgewässer bilden damit Stützstellen für die Interpolation der Grundwasseroberfläche. In der Grafik sind schematisch „Grundwasseroberflächen“ dargestellt, die die Gewässer 1., 2. bzw. 3. Ordnung als Stützstellen verwenden. Rot eingetragen ist ein Verfahren, bei dem die Stützstellen von Gewässern 1. und 2. Ordnung und Bohrungsdaten (gewichtet) kombiniert wurden.

Zunächst zeigt sich, daß sehr deutliche regionale Unterschiede bestehen, was die Korrespondenz von Fließgewässern mit dem Grundwasser anbetrifft. So sind in den Buntsandsteinarealen des Spessart nahezu alle Fließgewässer 1., 2. und 3. Ordnung, darüberhinaus bereichsweise auch solche niedrigerer Ordnungen, mit dem Hauptgrundwasserstockwerk in Kontakt. Dagegen greifen im Ausstrichbereich des Muschelkalk fast ausschließlich die Gewässer 1. und 2. Ordnung in das Grundwasser ein. Besonders extrem ist die Situation dort, wo der Muschelkalkaquifer durch den Unteren Keuper bedeckt ist. Dort hat das oberflächliche Gewässernetz keinen direkten Bezug zur Ausbildung der Grundwasseroberfläche des (Haupt-) Muschelkalkstockwerks (vgl. Kap. 7.2.3.4, Abbildung 7-30).

Die Ergebnisse dieser Betrachtungen führten zu einem Konzept zur Erstellung eines Grundwassergleichenplans für Unterfranken nach dem folgenden Verfahren (vgl. Abbildung 7-24):

1. Stützstellen für die Interpolation sind:
 - a) Ruhewasserspiegeldaten aus Bohrungen: Gewichtung 10-fach,
 - b) Höhepunkte der Fließgewässer 1. Ordnung: Gewichtung 4-fach,
 - c) Höhepunkte der Fließgewässer 2. Ordnung Gewichtung 1-fach.
2. Regionale Anpassungen: Im Buntsandstein werden die Höhepunkte der Fließgewässer 3. Ordnung mit 1-facher Gewichtung hinzugezogen.

Mit dieser Konzeption konnte ein Grundwassergleichenplan erzeugt werden, der im Vergleich mit anderen Informationen plausibel ist und gleichzeitig den in Kap. 7.2.3.2.1 genannten Anforderungen entspricht. In den meisten Fällen kann davon ausgegangen werden, daß die so ermittelte Grundwasseroberfläche tendenziell höher liegt als die tatsächliche (= konservative Abschätzung im Sinne von Abbildung 7-20b). Andererseits werden sehr lokale, kleinräumige Grundwasservorkommen nicht berücksichtigt. Die Ursachen für die Abweichungen von den tatsächlichen Verhältnissen werden in Kap. 7.2.3.4 diskutiert. Deutliche Verbesserungen der Ergebnisse konnten erzielt werden, indem lokale und regionale Korrekturen eingebracht wurden. Die Modellvorstellung und Konzeption werden in Abbildung 7-24 vorgestellt.

Bei der Plausibilitätskontrolle zeigt sich, daß die Erstellung von Grundwassergleichenplänen nach dem oben vorgestellten Konzept sehr gute Ergebnisse im Bereich des Buntsandstein-Spessarts bringt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß dort verhältnismäßig einfache hydrogeologische Bedingungen vorliegen, die der zugrundeliegenden Modellvorstellung (Abbildung 7-24) weitgehend entsprechen. Wie in Kap. 4.3.3.2.2 beschrieben, stellen die Sandsteine des *su* und *sm* einen einheitlicher Aquifer dar, der keine über größere Entfernungen aushaltende vertikale Zonierung aufweist. Dagegen gelingt eine Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse im Muschelkalkbereich nur ungenügend. Wegen des intensiven, lokal variablen Stockwerksbaus korrelieren die oberflächenhaften Vorgänge (Niederschlag - Abfluß - Grundwasserneubildung) nicht unmittelbar mit der Ausbildung der Grundwasseroberfläche. Es liegen heterogene Verhältnisse vor, die durch das Konzept eines einheitlichen Grundwassergleichenplans nicht mehr aufgelöst werden können. Im Sinne eines Kompromisses zwischen Arbeitsaufwand und erzielbarem Nutzen (Informationsgehalt) liegt aber eine Datengrundlage vor, die mit einer annehmbaren Wahrscheinlichkeit das Auftreten von Grundwasser vorhersagen läßt.

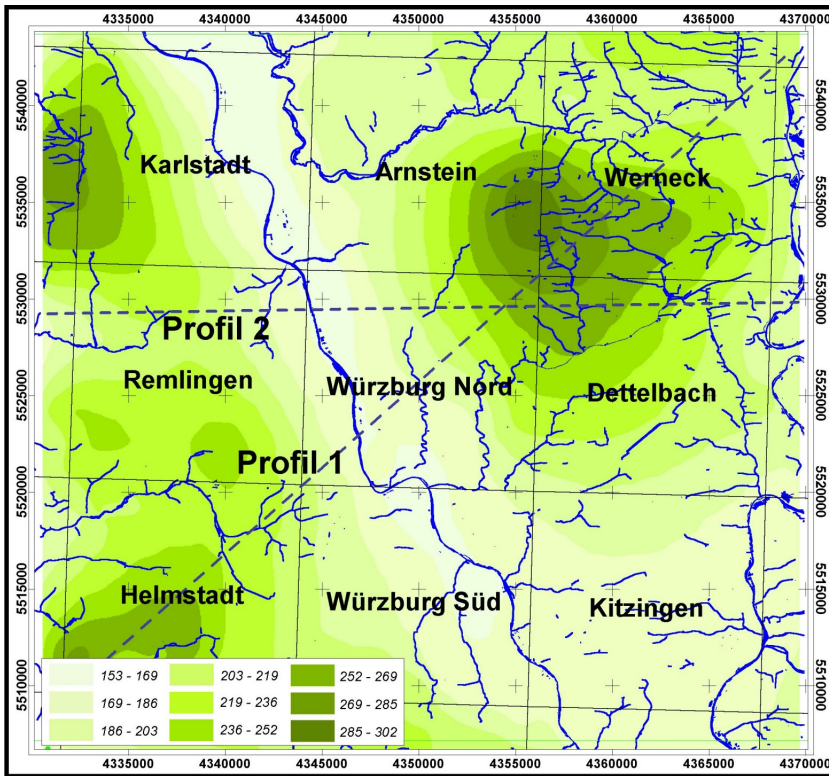


Abbildung 7-25: Grundwassergleichenplan für den Beispielausschnitt. Erstellt aus Bohrungsdaten und Höhenpunkten von Fließgewässern. In den Muschelkalkbereichen, insbesondere im Nordosten des Ausschnitts, liegt der berechnete Grundwasserspiegel deutlich höher, als der aus Bohrungsdaten bekannte des Muschelkalk- Haupt-Grundwasserstockwerks. Dies ist auf Grundwasservorkommen in höhergelegenen, schwebenden Stockwerken (z.B. im *kuW*) zurückzuführen.

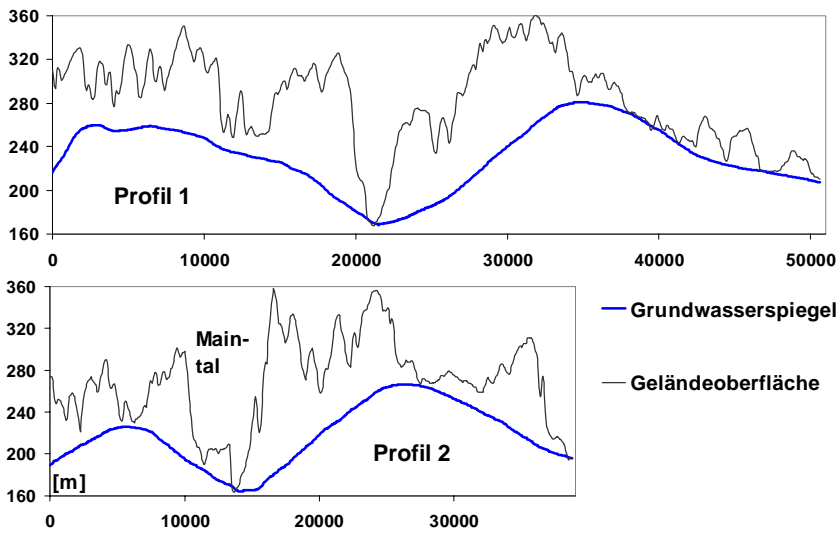


Abbildung 7-26: Profile durch den Grundwassergleichenplan (Abbildung 7-25).

7.2.3.3 Definition der Modelleinheiten

Maßgeblich für die Konzeption eines Untergrundmodells, das aus diskreten Schichten aufgebaut ist, ist eine den geologischen Verhältnissen angemessene Definition der einzelnen Modellhorizonte. Auf die Anforderung bezüglich der lateralen und vertikalen Homogenität wurde in Kap. 7.2.1 eingegangen. Da für die meisten Bewertungsfragen die Grundwassersituation eine entscheidende Rolle spielt, ist es sinnvoll, die hydrogeologischen Eigenschaften der Schichten bei der Festlegung der Modellhorizonte vorrangig zu berücksichtigen. In den meisten Fällen fallen die durch Konvention festgelegten stratigraphischen Einheiten in Unterfranken mit den hydrostratigraphischen Einheiten weitgehend zusammen, da der Gliederung im Allgemeinen eine lithostratigraphische Zuordnung zugrundeliegt. Nur in wenigen Fällen werden biostratigraphische Kriterien angewandt, die dann meist nicht in das hydrogeologische Konzept passen. Für den Beispielausschnitt wurde ein Schichtenmodell festgelegt, das aus insgesamt 14 Schichten besteht, von denen fünf als Aquifere, sieben als Grundwasserstauer und zwei als „unterschiedlich“ definiert wurden. In Tabelle 7-3 sind die 14 Schichten aufgelistet. Abbildung 7-27 zeigt diese Schichten im stratigraphischen Übersichtsprofil (vgl. auch Tabelle 4-15 und Tabelle 8-6).

	Schicht (Bez.)	BAS	TOP	M	Stratigraphie (vgl. Abbildung 7-27)	Typ
1	km	180	380	200	<i>km</i> , soweit aufgeschlossen	E
2	ku2+kuW	150	180	30	<i>ku2</i> mit Werksandstein	F
3	ku1+mo3	125	150	25	Basis Dickbankzone im <i>mo3</i> bis Top Grenzdolomit (<i>kuD</i>)	B
4	mo3	99	125	26	bis Basis Dickbankzone	C
5	mo2+mo1	62	99	37	bis Cycloidesbank	A
6	mo1	52	62	10	Zeller Tonsteinhorizont	C
7	mm	12	52	40	<i>mm</i> ohne die basalen Kalksteine (Schicht 8)	B
8	mm+mu	2	12	10	Schaumkalkzone des <i>mu</i> und basale Kalke des <i>mm</i>	A
9	mu	-88	2	90	<i>mu</i> : Grenzgelbkalk bis Wellenkalkfolge 8	A
10	so4T	-118	-88	30	Obere Röttone	C
11	so3Q	-124	-118	6	Rötquarzit	D
12	so3T	-143	-124		Untere Röttone	C
13	(so2)+sm+su	-383	-143	240	Plattensandstein, Sandsteine und Wechselfolgen des Mittleren und Unteren Buntsandstein	B
14	suB	-450	-383	67	Bröckelschiefer	E

Tabelle 7-3: Modelleinheiten (Schichten) des Untergrundmodells und stratigraphische Zuordnung. BAS, TOP, M: Lage der Basis bzw. des Tops unter oder über der Referenzgrenze *mu-mm*; Mächtigkeit.

Lithologische Typen: **A:** vorwiegend kalkig; **B:** vorwiegend mergelig bis tonig; **C:** Kalk-Mergel-Wechselagerung, **D:** vorwiegend sandig, **E:** vorwiegend siltig-tonig; **F:** vorwiegend feinsandig-siltig-tonig, untergeordnet karbonatisch-mergelig.

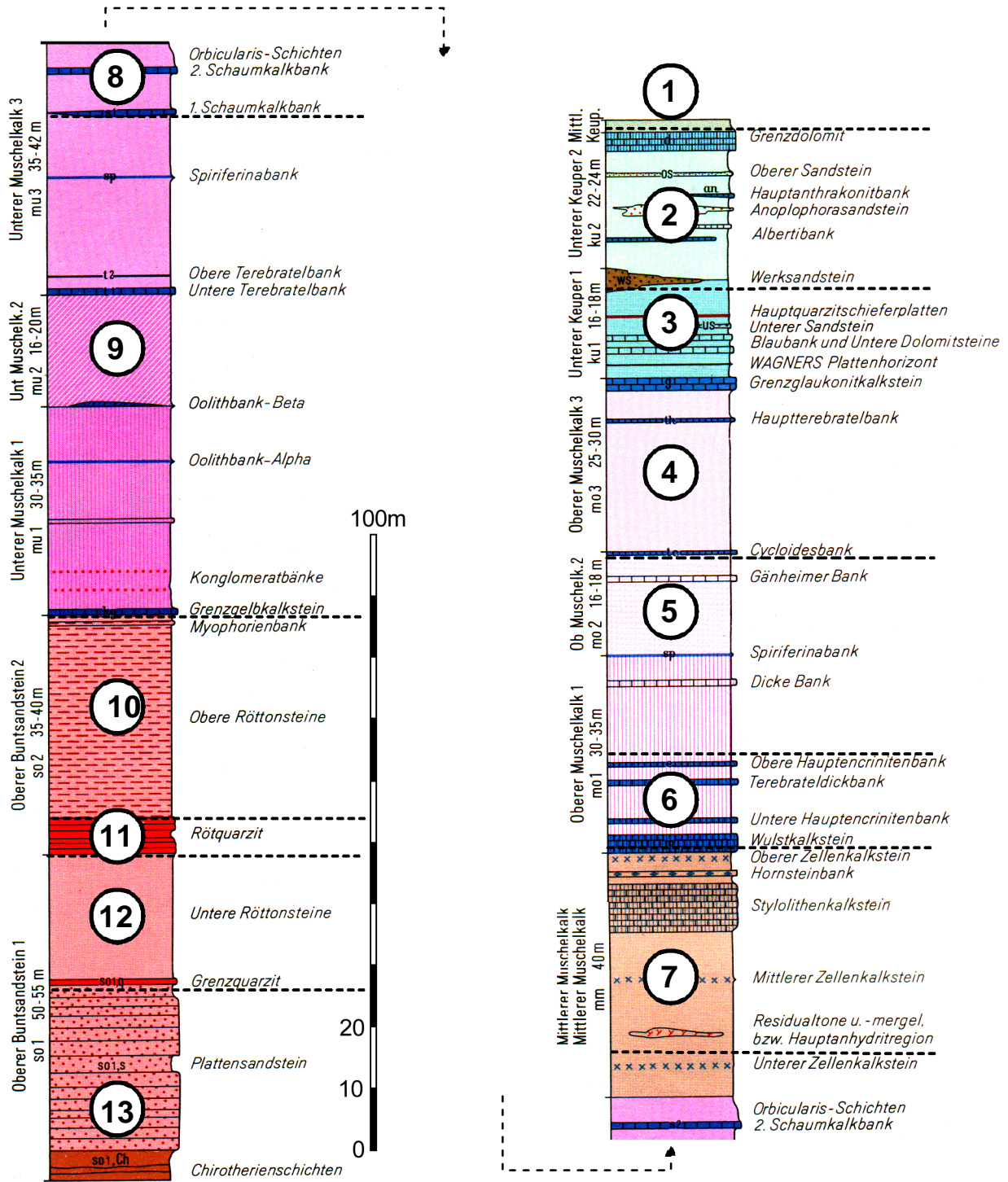


Abbildung 7-27: Stratigraphisches Übersichtsprofil für Blatt 6125 Würzburg Nord der GK25. Aus HOFFMANN (1967a). Die Verhältnisse können mit geringen Einschränkungen auf den den übrigen Beispielausschnitts übertragen werden. Markiert: Die Schichten bzw. Schichtpakete, aus denen sich das Untergrundmodell zusammensetzt (vgl. Tabelle 7-3). Nicht dargestellt: Einheit 14, Bröckelschiefer und der weitaus größte Anteil von Einheit 13 (su+sm).

7.2.3.4 Qualitätsprüfung und Bewertung des Untergrundmodells

Das in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellte Untergrundmodell besteht aus drei Komponenten: Dem **Digitalen Strukturmodell** (DSM), das die geometrische Modellumgebung vorgibt, dem **Schichtenmodell**, das die qualitativen Eigenschaften festlegt und dem **hydrogeologischen Modell**, welches das Auftreten von Grundwasser beschreibt. Anhand dieser drei Modellkomponenten können für jeden beliebigen Punkt im R^3 Eigenschaften ermittelt werden. Allerdings bedarf dies eines gewissen rechnerischen Aufwandes, da dem Modell verschiedene Datensätze zugrunde liegen, die erst in der Kombination die gewünschte Information liefern. Wie dies erfolgt, wird in Kap. 8.1 anhand eines Beispiels demonstriert. Die Berechnung von Werten aus dem Untergrundmodell erfolgt in dieser Untersuchung mit Hilfe von Programmen, die in der Sprache „A-venue“ innerhalb des Softwarepaketes ArcView GIS 3.2 erstellt wurden. Die Programme werden in Kap. 8.2 vorgestellt.

Das erstellte Untergrundmodell wurde einer Qualitätsprüfung unterzogen, um zu ermitteln, wie verlässlich die Informationen sind, die es zur Verfügung stellt. Dazu wurden Bohrungen herangezogen und ihre Schichtenverzeichnisse mit den Werten verglichen, die das Modell am gleichen Standort liefert. Zu diesem Zweck wurden für die Ansatzpunkte der bekannten Bohrungen mit Hilfe der oben erwähnten Programm theoretische Bohrprofile berechnet. Kontrolliert wurde jeweils die Abweichung der Lage der berechneten Schichtgrenzen von der Lage der tatsächlichen Schichtgrenzen (Bohrungen) bezogen auf GOK sowie die Differenz zwischen der tatsächlichen und der berechneten Mächtigkeit einzelner Schichten.

Insgesamt wurden für den Vergleich von Mächtigkeiten und Schichtgrenzen 28 Bohrungen herangezogen. Theoretisches und erbohrtes Profil wurden einander gegenübergestellt und die Differenzen der Höhenlage von Schichtgrenzen und die Mächtigkeitsunterschiede bestimmt. In Abbildung 7-28 zeigt einen Vergleich von berechneten und tatsächlichen Bohrprofilen für sechs ausgewählte Bohrungen.

Die mittlere Abweichung (Betrag) der Schichtgrenzen liegt für alle 28 Bohrungen bei 7,8m, die mittlere Abweichung der Mächtigkeiten bei 4,9m. Die maximale Abweichung liegt bei 21,5m für die Lage der Schichtgrenzen und bei 15m für die Mächtigkeiten. Die Abweichungen für einzelne Schichten und Schichtgrenzen sind in Tabelle 7-4 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Schichtgrenzen *ku2/ku1* und *ku1/mo3* tendenziell zu hoch liegen, die Grenzen *km/ku* und *mm/mu* im Mittel zu tief. Bei den Schichtmächtigkeiten ist festzustellen, daß sie bis auf den *ku1* und den *mo3* zu hoch sind. Wie zu erwarten treten die höchsten betragsmäßigen Unterschiede in der Mächtigkeit beim *mm* auf (s. Kap. 7.2.3.1.3.8).

Insgesamt fallen die Abweichungen der berechneten Bohrprofile von den tatsächlich in Bohrungen angetroffenen nach den 28 Stichproben sehr gering aus und überschreiten 10m im Mittel nicht (Tabelle 7-4).

Schicht	Grenze	Mittlere Abweichungen der Schichtgrenzen		Mittlere Abweichungen der Mächtigkeiten	
		Vorzeichen berücksichtigt	Betrag	Vorzeichen berücksichtigt	Betrag
km	kmM/ku2	-5.0	5.0	5.0	5.5
ku2	ku2/ku1	6.7	6.7	-3.5	4.2
ku1	ku/mo3	3.7	7.4	0.8	4.5
mo3	mo3/mo2	4.3	7.9	-0.3	3.9
mo2	mo2/mo1	1	8.4	1.3	3.9
mo1	mo1/mm	1.9	9.4	3.6	4.6
mm	mm/mu	-8.3	9.0	7.4	7.4
mu	mu/so	-1.8	5.5	1.5	5.0

Tabelle 7-4: Differenzen der Höhenlage von Schichtgrenzen sowie Mächtigkeitsunterschiede zwischen berechneten theoretische Bohrprofilen und tatsächlichen Bohrprofilen am gleichen Standort für insgesamt 28 Bohrungen.

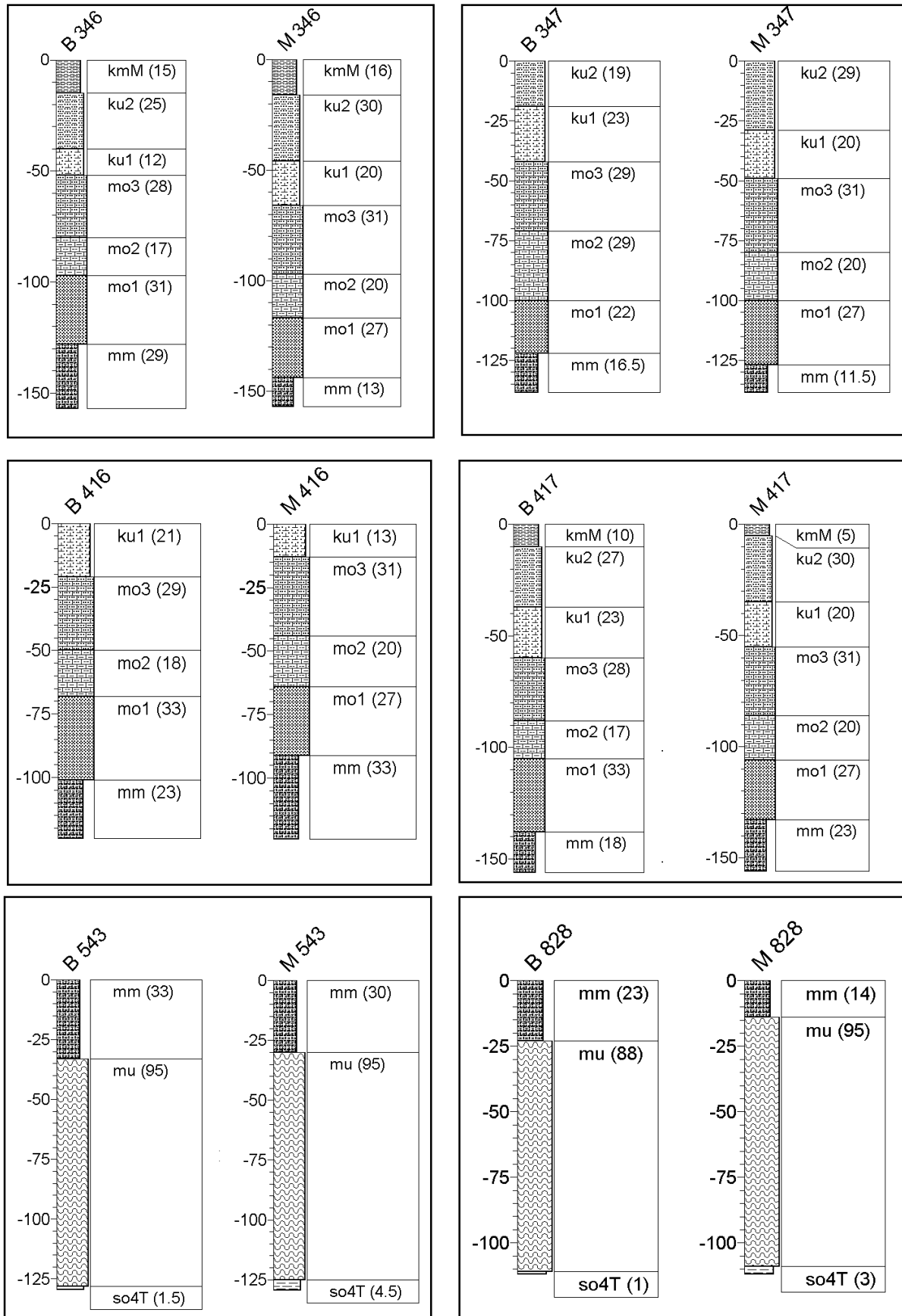


Abbildung 7-28: Vergleich von sechs Profilen aus der Bohrungsdatenbank des Wasserwirtschaftsamts Würzburg (gekennzeichnet mit M) und mit den für die gleichen Standorte berechneten theoretischen Bohrprofilen (gekennzeichnet mit B).

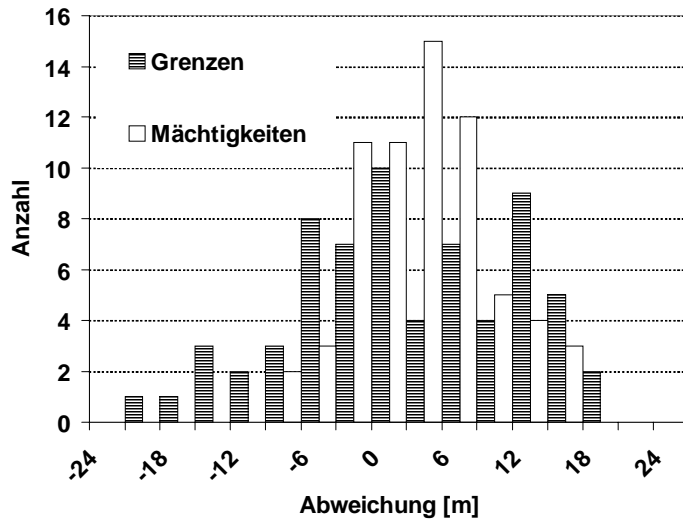


Abbildung 7-29: Häufigkeitsverteilung der Abweichung von Bohrungsdaten von den Daten, die das Untergrundmodell für die entsprechenden Punkte liefert. Dargestellt sind die Abweichungen aller in den Bohrungen angetroffenen Schichtgrenzen (z.B. *mo/ku*) bezogen auf GOK und die Mächtigkeitsdifferenzen zwischen tatsächlichen und berechneten Werten.

Ein Vergleich der gemessenen und der errechneten Grundwasserspiegelhöhen führt zu qualitativ ähnlichen Ergebnissen. Die absolute Abweichung der berechneten von den gemessenen Grundwasserspiegeln liegt hier im Mittel bei 7m. Wegen einiger Extremwerte (s.u.) liegen die berechneten Werte leicht unter den gemessenen (3,9m im Mittel). Läßt man jedoch diese Extremwerte außer Acht, stellt man fest, daß die meisten der Werte leicht über den gemessenen liegen, was im Sinne der Modellkonzeption gewünscht ist (vgl. Kap. 7.2.3.2.1).

Es treten auch einige besonders hohe positive Abweichungen auf, bei denen Grundwasser in Bohrungen weit über dem Niveau angetroffen wird, an dem es nach der Berechnung zu erwarten ist. Betrachtet man die Lage der Bohrungen, die besonders hohe Abweichungen zeigen (25m und mehr; vgl. Abbildung 7-31), so stellt man fest, daß sie sich alle auf den Hochflächen befinden, die von den Gesteinen des Unteren und Mittleren Keupers eingenommen werden. Dort treten hängende Stockwerken auf, die meist in den sandigen Partien des *ku2* oder *ku1* (Werksandstein, oberer Sandstein) seltener auch im *mo3* ausgebildet sind. Diese Aquifere sind lokal häufig so gut nach unten abgedichtet, daß sich dauerhafte, oft auch ergiebige schwebenden Grundwasservorkommen ausbilden, die weit über dem Hauptstockwerk liegen.

Das folgende Diagramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen berechneten Werten aus dem Untergrundmodell von den in Bohrungen gemessenen.

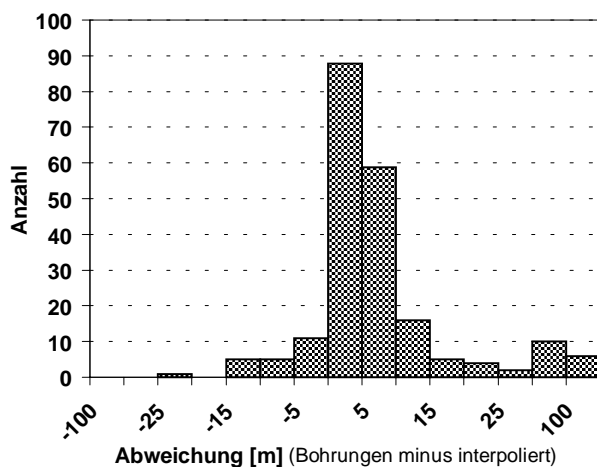


Abbildung 7-30: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen Ruhewasserspiegeln aus Bohrungen und den Daten, die das Untergrundmodell für die entsprechenden Punkte liefert. Ca. 70% der berechneten Werte weisen eine Abweichung von weniger als 5m auf. Abweichungen von 50m und mehr sind darauf zurückzuführen, daß die Daten aus Bohrungen teilweise aus schwebenden Grundwasservorkommen stammen. Es muß allerdings auch berücksichtigt werden, daß viele Daten aus Flachbohrungen stammen, bei den ohnehin keine sehr großen Abweichungen auftreten können.

Abbildung 7-30 zeigt die Bohrungen, die für die Berechnung der Abweichungen herangezogen wurden und die entsprechenden Abweichungen.

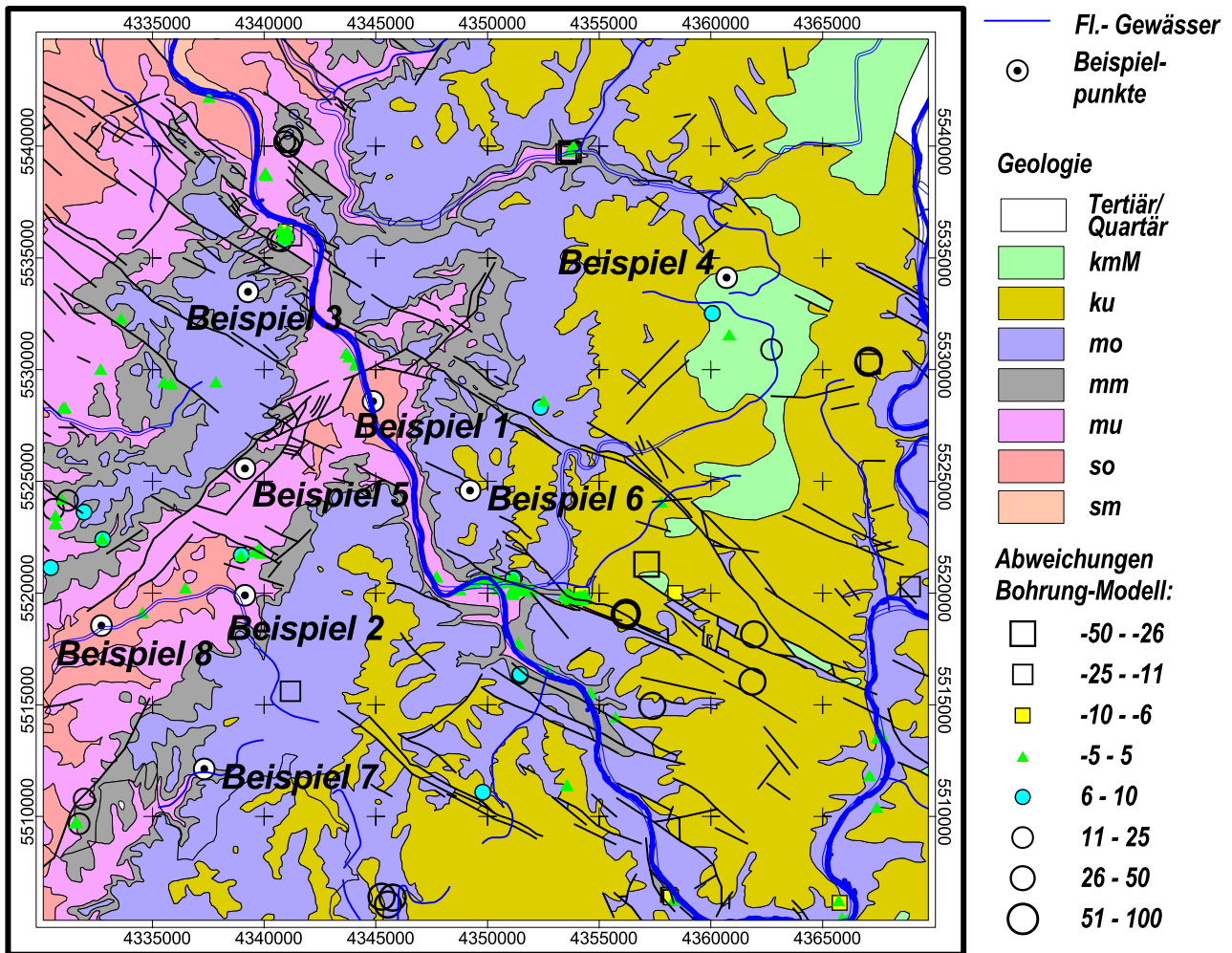


Abbildung 7-31: Abweichung der berechneten Grundwasserspiegel von Werten aus Bohrungen. Besonders hohe positive Abweichungen (Bohrung minus Berechnung) weisen Bohrungen im Bereich des *ku* auf. Die Bohrungsdaten in diesem Bereich stammen teilweise aus schwebenden Stockwerken, die im *ku* (Werksandstein) oder den obersten Bereichen des *mo* ausgebildet sind. Der interpolierte Grundwassergleichenplan orientiert sich dort aber stärker an den Grundwassergleichen im Muschelkalk-Hauptgrundwasserstockwerk.

Die eingetragenen „Beispielpunkte“ beziehen sich auf die in Kap. 8.2.5 diskutierten Bewertungsbeispiele.

8 Bewertungsmodell zur automatisierten Standort- und Flächenbewertung

In diesem Kapitel wird ein Bewertungsmodell vorgestellt, das sich methodisch auf das in Kap. 6.4.1.3 beschriebene Konzept des „Expertensystems“ stützt. Mit Hilfe von in der Programmiersprache „Avenue“ des Softwarepakets ArcView GIS (Version 3.2) verwirklichten Anwendungen können damit Standortbewertungen für vom Nutzer vorgegebene Lokalitäten durchgeführt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, spezialisierte Planungskarten automatisch nach Benutzervorgaben erstellen zu lassen. Es fehlt jedoch die für ein Expertensystem charakteristische „Entscheidungs“-Kompetenz. Um eine solche vollständig zu implementieren, müßte ein deutlich höherer Programmieraufwand betrieben werden und eine bessere Datenbasis verfügbar sein. Die hier realisierten Programme stellen keine ausprogrammierten Anwendungen dar, sondern verstehen sich als einfache Demonstrationen dessen, was bei einer entsprechend orientierten Zielsetzung machbar wäre.

Das verwirklichte Bewertungskonzept basiert auf dem in Kap. 7.2.3 beschriebenen dreidimensionalen Untergrundmodell, ohne das entsprechende Analysen nicht möglich sind. Das in dieser Untersuchung erstellte Untergrundmodell umfaßt den Beispielausschnitt aus neun TK25 Blättern rund um Würzburg (vgl. Abbildung 1-7). Damit ist auch der Gültigkeitsbereich für das Bewertungsmodell auf diesen Bereich festgelegt. Eine Übersichtsbewertung für ganz Unterfranken auf der Basis einfacher Überlegungen wurde in Kap. 5 vorgestellt.

8.1 Einführung in die Methoden der Bewertungsberechnung

In den folgenden Kapiteln werden zahlreiche Berechnungs- und Analyseverfahren vorgestellt, bei denen in einer weitgehend automatisierten Programmumgebung zwar nicht außerordentlich komplexe, aber aufgrund der 3-dimensionalen Betrachtungsweise teilweise schwer nachvollziehbare Abläufe beschrieben werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden zunächst die elementaren Grundlagen der verwendeten Methoden, später ein vereinfachter Bewertungsablauf in allen Einzelschritten gezeigt. Die Bewertungsprogramme selbst sind ohne Grundkenntnisse in der Avenue-Programmierung voraussichtlich nicht ohne weiteres verständlich.

8.1.1 Berechnungen mit Rasterdarstellungen in GIS

Im Folgenden werden einige für die Ergebnisse dieser Untersuchung wichtige Analyse- und Berechnungsverfahren exemplarisch vorgestellt. Es ist nicht annähernd möglich, alle verwendeten Verfahren zu beschreiben oder zu erwähnen. Viele davon sind jedoch GIS-Standardmethoden und werden in der Literatur ausführlich behandelt (z.B. BONHAM-CARTER, 1994). Für die hier durchgeführten Analysen und Bewertungen wurde ein quasi-dreidimensionales Untergrundmodell entwickelt. Dieses Modell besteht aus einer Kombination von 2½-dimensionalen Rastern, mit denen ein 3-dimensionaler Raum, der aus beliebig vielen Schichten (Einheiten) gleicher Eigenschaften aufgebaut ist, beschrieben werden kann (vgl. dazu Kap. 7.2.2.2). Um in diesem Raum auf die Eigenschaften von Punkten oder (Raum-)Einheiten zugreifen zu können bzw. Beziehungen zwischen verschiedenen Einheiten herstellen zu können, sind verschiedene Rechen- und Abfrageoperationen notwendig. Im folgenden Kapitel werden die zugrundeliegenden Berechnungsverfahren und ihr Einsatz innerhalb dieser Untersuchung vorgestellt.

8.1.1.1 Einfache Rechenoperationen

Ein wesentlicher Vorzug des Rastermodells gegenüber dem Vektormodell ist, daß sowohl Verknüpfungen zwischen zwei oder mehreren Rastern als auch Rechenoperationen, die sich auf nur ein einziges Raster beziehen, einfach zu realisieren sind. Zu den Verfahren, die sich auf nur ein Raster beziehen, gehören beispielsweise statistische Verfahren und die große Gruppe der Filteroperationen. Multiple Rasteranalysen werden in vielen Bereichen, u.a. auch in der (Satelliten-)Bildanalyse eingesetzt. Abbildung 8-1 veranschaulicht einige elementare Rechenoperationen, aus denen sich auch die meisten komplexeren Verfahren ablei-

ten lassen. Besonders eingehend werden die Verfahren der Rasteranalyse z.B. von BONHAM-CARTER (1994) beschrieben.

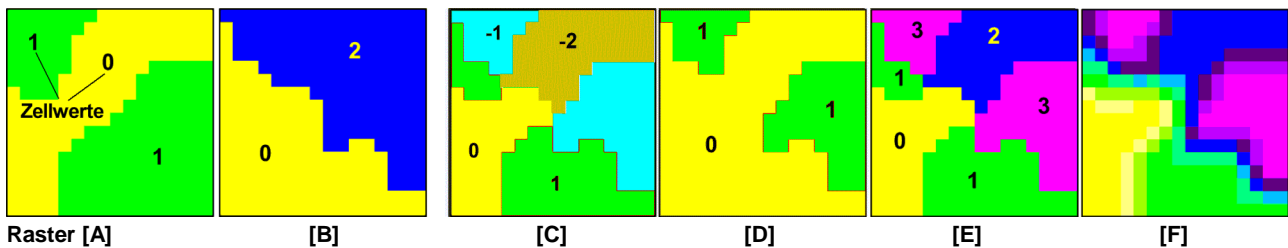


Abbildung 8-1: Beispiele für einfache Rechenoperationen mit Rastern (Grids):

1. **Vergleichsoperationen und logische Verknüpfungen:** $[D] = ([A] > 0) \text{ UND } ([B] > 0)$
2. **Bedingte Rechenoperationen:** $[C] = \text{WENN } [A] > [B] \text{ DANN } [C] = [A] + [B]; \text{ WENN } [A] < [B] \text{ DANN } [C] = [A] - [B];$ entspricht: $([A] > [B]) * ([A] + [B]) + ([A] < [B]) * ([A] - [B])$
3. **Arithmetische Operationen:** $[E] = [A] + [B]$
4. **Statistische Operationen,** Glättung, Filterung (nur ein Raster beteiligt): Hier z.B. Bildung des Mittelwertes in der Zentralzelle einer 3 X 3 Zellen großen Umgebung angewendet auf [E]; das Ergebnis zeigt [F]

Eckige Klammern drücken aus, daß es sich bei der Variablen um ein klassifiziertes Raster (im Sinne der Programmierung ein Variablenfeld mit räumlicher Anordnung der Feldelemente) handelt.

Prinzipiell sind nach den in Abbildung 8-1 gezeigten Schemata beliebig komplexe Berechnungen möglich. Besonders interessant in Bezug auf die morphologische Analyse von Oberflächen (Gelände-, Schicht-, Grundwasseroberflächen) sind Verfahren zur Bildung von horizontalen Gradienten. In diesen Bereich fallen auch viele hydrographische und hydrologische Methoden, z.B. die Berechnung von Einzugsgebieten und theoretischen Fließgewässernetzen (vgl. Kap. 7.2.3.2.2).

Von großem Interesse sind bei Berechnungen mit Grids auch Abfragen vom WENN → DANN Typ, die vor allem bei komplexen Abfragen und bei der Programmierung (vgl. Kap. 8.1.2) Anwendung finden. Solche Abfragen können bei der Arbeit mit Grids häufig durch Multiplikationen ersetzt werden (vgl. Abbildung 8-1, Beispiel 2). Sollen z.B. zwei Grids miteinander verglichen werden und als Ergebnis ein neues Grid [C] erzeugt werden, das überall dort, wo Grid [A] einen höheren Wert als [B] hat, den Wert $[A] + [B]$ erhält (Schema: WENN $[A] > [B]$ DANN $[A] + [B]$), dann kann das auch durch eine Multiplikation (Schema: $[A] > [B] * ([A] + [B])$) ausgedrückt werden. Hier wird zunächst ein binäres Grid (0,1) erzeugt, das bei der Erfüllung der Bedingung $[A] > [B]$ den Wert 1 erhält. Die Multiplikation eines binären Grids mit einem zweiten Grid oder einem festen Zahlenwert ergibt an den 0-Stellen des binären Grids den Wert 0, an den Stellen mit dem Wert 1 den Wert des zweiten Grids. Der Ersatz von Abfragen durch Multiplikationen ist bei der Programmierung wichtig, weil die Anwendung von Bedingungen des „if-then-else“-Typs auf Grids nicht möglich ist (vgl. Kap. 8.2.4).

Rechenoperationen, wie die hier gezeigten, können mit beliebigen Softwareprodukten durchgeführt werden, die über die Möglichkeit verfügen, Raster (Grids) mit Hilfe von mathematischen und logischen Verknüpfungen zu kombinieren oder zu transformieren. Das sind i.A. alle als „Raster-GIS“ bekannten Softwareprodukte, Software zur Interpolation und Visualisierung von 2½- und 3-dimensionaler Werteverteilungen, Software zur Bildanalyse im Bereich Fernerkundung und im Prinzip auch viele Programme zur Bildverarbeitung aus dem Grafikbereich. Die Syntax der in den Beispielen verwendeten Gleichungen und Abfragen orientiert sich an den Konventionen des „Map Calculators“ in Arc View (Spatial Analyst).

8.1.1.2 Berechnungen im dreidimensionalen Raum

Im folgenden Beispiel wird anhand einer Sequenz von Abbildungen demonstriert, wie sich räumliche Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Grenzflächen im dreidimensionalen Raum herstellen lassen und wie diese für Fragen der Standortbewertung herangezogen werden können. Vergleichbare, wenn auch etwas komplexere Rechenoperationen bilden die Grundlage des für diese Untersuchung entwickelten Bewertungskonzeptes, das in eine automatisierte Anwendung integriert wurde (Kap. 8.2). Da aufgrund des räumlichen Charakters der Operationen und der Ergebnisse die Prozeduren nicht leicht nachvollziehbar sind, wird

hier anhand eines „konstruierten“ Beispiels der prinzipielle Ablauf entsprechender Berechnungen demonstriert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Betrachtungsfläche dabei auf 16*16 Rasterzellen beschränkt.

Die gewählte Fragestellung ist typisch für die Aufgaben, die bei der Standortbewertung in der Praxis auftreten: in einem Gebiet soll festgestellt werden, welche Bereiche für die Errichtung von Grundwasserwärmepumpen (Kap. 3.2.1) geeignet sind. Es wird festgesetzt, daß in dem Gebiet nur ein einziger Aquifer auftritt, welcher aufgrund seiner hydrogeologischen Eigenschaften genügend Wasser für den Betrieb einer Grundwasserwärmepumpe liefern kann. Dieser Aquifer wird in den Beispielabbildungen kurz als „Schicht“ bezeichnet. Weiterhin wird festgelegt, daß im Aquifer eine Mindest-Grundwassermächtigkeit von 5m vorhanden sein soll. Die maximale (wirtschaftlich vertretbare) Bohrtiefe wird auf 20m festgesetzt.

Die Situation im Untergrund wird durch die in Tabelle 8-1 aufgelisteten Grids (=Rasterkarten) beschrieben. Abbildung 8-2 zeigt die in Tabelle 8-1 aufgelisteten Basisgrids. Zwei Querprofile veranschaulichen die relative Lage der einzelnen Grids im Raum (Abbildung 8-3).

Grid (Rasterkarte; vgl. Abbildung 8-2)	Erläuterungen	Bezeichnung/Formel
Geländeoberfläche, digitales Höhenmodell (a)	fällt nach E bis SE	[DHM]
Digitaler Strukturplan (b,c,d)	Referenzfläche für die Struktur des Untergrundes, fällt nach SSW	[DSM]
Top der Schicht über NN (b)	abgeleitet aus dem DSM und den Mächtigkeiten der darüber und darunterliegenden Schichten (M_i)	[TOP]
Basis der Schicht über NN (c)	siehe Top	[BAS]
Mächtigkeit der Schicht (d)	Mächtigkeit der Schicht; im Beispiel 30 bis 45m, wächst nach NNE an	[M]; hier [TOP] – [BAS]
Grundwasseroberfläche über NN (e)	fällt wie [DHM], aber flacher	[GWGL]
Flurabstand (f)	nimmt nach NW zu	[GWFlur] = [DHM] - [GWGL]

Tabelle 8-1: Beschreibung der Eingabegrids für das Berechnungsbeispiel. [DHM], [DSM] und [GWGL] und [M] sind die Eingangsgrößen, aus denen sich das dreidimensionale Untergrundmodell herleiten läßt. Da im Beispiel nur eine Schicht betrachtet wird, wird davon ausgegangen, daß [TOP] und [BAS] unabhängig vom DSM und der Mächtigkeit anderer Schichten bereits bekannt sind.

Wegen des unterschiedlichen Einfallens der Referenzflächen ergeben sich in verschiedenen Bereichen der betrachteten Fläche unterschiedliche relative Positionen der Grenzflächen Geländeoberfläche, Top und Basis der Schicht und Grundwasseroberfläche ([GWGL]) zueinander. Die „Schicht“ wird dadurch in unterschiedliche Abschnitte gegliedert, die in Abbildung 8-3 (unten) gekennzeichnet sind. Hier können unterschieden werden (Tabelle 8-2):

Abschnitt / Fall	Erläuterung	Bedingung
Abschnitt 1	Die Schicht ist in voller Mächtigkeit vorhanden und vollständig grundwassererfüllt.	[TOP] <= [GWGL]
Abschnitt 2	Die Schicht ist in voller Mächtigkeit vorhanden aber nur ein Teil (2b) ist grundwassererfüllt (gesättigt); 2a ist dagegen ungesättigt.	[TOP] <= [DHM]
Abschnitt 3	Die Schicht ist nicht in voller Mächtigkeit vorhanden mit einem gesättigten (3b) und einem ungesättigten Anteil (3a).	(([TOP] > [DHM]) AND ([BAS] < [GWGL])
Abschnitt 4	Die Schicht ist nicht in voller Mächtigkeit vorhanden und vollständig ungesättigt.	(([TOP] > [DHM]) AND ([BAS] < [DHM]) AND ([BAS] > [GWGL])
Abschnitt 5	Die Schicht kommt im betrachteten Bereich nicht vor.	[BAS] > [DHM]

Tabelle 8-2: Erläuterung der in Abbildung 8-3 unten dargestellten Abschnitte.



Abbildung 8-2: Basisgrids (Raster) für die Erstellung einer Abfrage, in der die für den Einsatz von grundwassergekoppelten Wärmepumpen geeigneten Gebiete auf einer Beispielfläche von 16x16 Rasterzellen bestimmt werden sollen. Die Kriterien für die Abfrage sind: Maximale Bohrtiefe 20m, minimale Grundwassermächtigkeit im Aquifer 5m. Digitales Höhenmodell [a], Digitales Strukturmodell (hier mit den Komponenten Top [b], Basis [c] und Mächtigkeit [d] der Schicht) und Grundwasserspiegelplan [e] stellen die Grundlage der Berechnungen dar. Mit diesen Informationen kann die Lage und Form einer Schicht im Raum beschrieben werden. Die Profile A – A' und B – B' zeigt Abbildung 8-3.

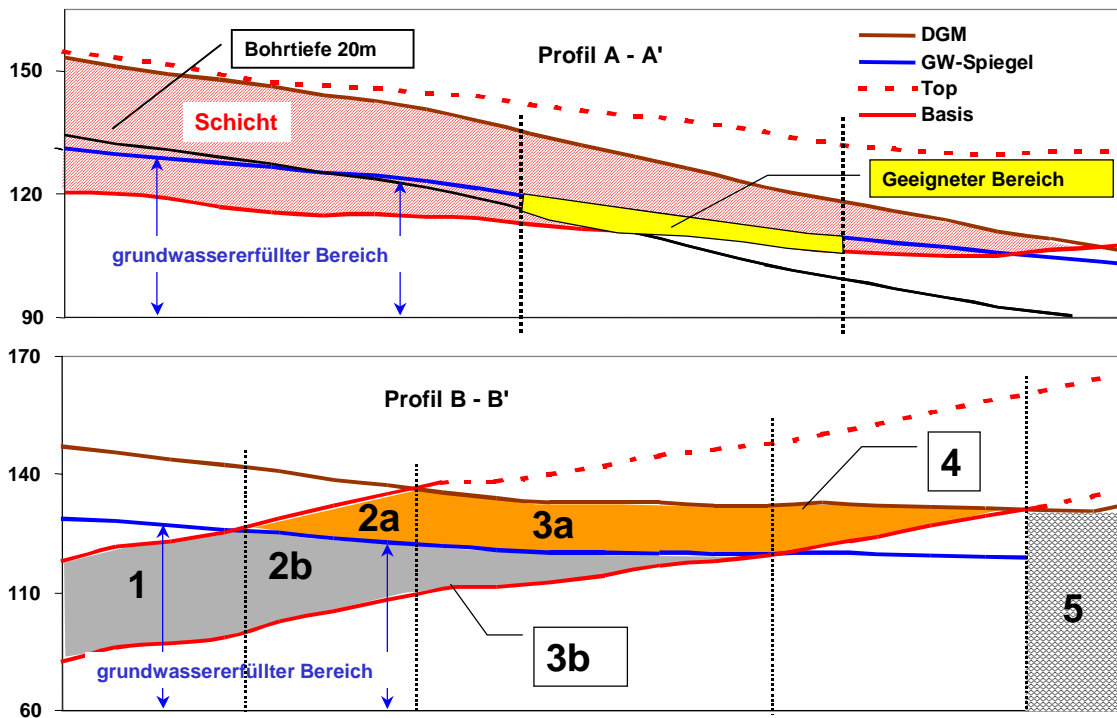


Abbildung 8-3: Querprofile A-A' und B-B' (Abbildung 8-2c). Dargestellt sind Geländeoberfläche, Basis und Top der Schicht sowie der Grundwasserspiegel. Durch die variierende Mächtigkeit und das in verschiedenen Bereichen unterschiedliche Einfallen der Schicht können bezüglich des Auftretens, der Mächtigkeit und der Grundwassererfüllung fünf Abschnitte unterschieden werden (Abschnitte 1 bis 5, erläutert in Tabelle 8-2).

Aus den in Tabelle 8-2 aufgelisteten Fällen läßt sich schon in etwa abschätzen, welche Bereiche potentiell die Voraussetzungen für den Betrieb einer grundwassergekoppelten Wärmepumpe erfüllen: Die Bereiche 5 und 4 scheiden in jedem Fall aus, da hier die Schicht nicht vorhanden ist bzw. kein Grundwasser führt. In den Bereichen 1, 2b und 3b ist jeweils Grundwasser vorhanden. Fraglich ist allerdings, ob bei einer maximalen Bohrtiefe $T_{\max} < 20\text{m}$ die geforderte Grundwassermächtigkeit $GWM_{\min} > 5\text{m}$ noch vorhanden ist. So kann im Bereich 1 angenommen werden, daß die Schicht relativ schnell unter die 20m-Grenze abtaucht. Im Bereich 3b ist dagegen zu erwarten, daß ab einem bestimmten Punkt die Grundwassermächtigkeit auskeilt. Grundsätzlich scheiden alle Bereiche aus, in denen entweder das Top der Schicht ([TOP]) oder die Grundwasseroberfläche ([GWGL]) tiefer als 15m unter Gelände liegt. Liegen beide weniger als 15m tief, können aber dennoch Fälle auftreten, in denen die Grundwassermächtigkeit geringer als 5m ist, allerdings nur dann, wenn das Top der Schicht über der Grundwasseroberfläche liegt.

Um aus den in Tabelle 8-1 aufgelisteten Grids ermitteln zu können, welche Zellen die Bedingung Grundwassermächtigkeit $GWM_{\min} > 5\text{m}$ bei Bohrtiefe $T_{\max} < 20\text{m}$ erfüllen, muß ein Set aus Abfragen entwickelt werden, das alle möglichen Fälle und Bedingungen berücksichtigt. Diese Abfragen erfolgen, wie in Tabelle 8-2 angegeben, mit Hilfe von Vergleichsoperatoren ($>$, $<$ etc.). Zustände, die nur dann eintreten, wenn gleichzeitig eine oder mehrere andere Bedingung erfüllt sind, lassen sich mit booleanische Operatoren vom Typ UND bzw. ODER (AND; OR) sowie Abfragen vom WENN \rightarrow DANN (*if-then-else*) abfragen. Bei komplizierter gestalteten (realen) Flächen ist es dabei nicht immer einfach, alle möglichen Konstellationen zu erfassen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist es deshalb günstig, solche Probleme in verschiedene Teilaufgaben aufzuteilen. Im Beispiel wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- Schritt 1:** Ermittlung der gesamten vorhandenen Mächtigkeit der Schicht ($[M_{\text{vorh}}]$), **ohne Berücksichtigung der Tiefenlage** (vgl. Tabelle 8-2) für jede Rasterzelle. Dieser Schritt ist für die Beantwortung der Frage nach den geeigneten Gebieten nicht unbedingt erforderlich, zeigt aber gut das Prinzip entsprechender Berechnungen.
- Schritt 2:** Ermittlung der vorhandenen Mächtigkeit der Schicht **bei einer Bohrtiefe von 20m** ($[M_{\text{vorh}20}]$).
- Schritt 3:** Ermittlung der Grundwassermächtigkeit [GWM] über einer Basisfläche, die entweder durch die Basis der Schicht oder durch die Bohrtiefe $T_{\max} = 20\text{m}$ festgelegt ist.
- Schritt 4:** Festlegung der Gebiete, in denen die Bedingung [GWM] $> 5\text{m}$ erfüllt ist (= [Ergebnis]).

Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben:

Schritt 1, Ermittlung der gesamten Mächtigkeit: Die Mächtigkeit einer Schicht an einem beliebigen Punkt wird durch die Position von Top und Basis der Schicht relativ zur Geländeoberfläche bestimmt. Es können genau drei Fälle auftreten, für die jeweils eine Berechnungsformel gilt (Tabelle 8-3):

Fall	Bedeutung	Bedingung	Berechnung der vorhandenen Mächtigkeit $[M_{\text{vorh}}]$
Basis der Schicht liegt über der Geländeoberfläche Abbildung 8-4a	Schicht kommt nicht vor	$[Bed1] = ([BAS] > [DHM])$	$[M_{\text{vorh}}] = [Bed1] * [M] = 0$
Basis und Top der Schicht liegen unter der Geländeoberfläche Abbildung 8-4b	Schicht kommt in voller Mächtigkeit vor	$[Bed2] = ([TOP] \leq [DHM])$	$[M_{\text{vorh}}] = [Bed2] * [M]$; entspricht: (WENN $Bed2 = \text{ja}$ DANN $[M_{\text{vorh}}] = [M]$)
Basis liegt unter, Top liegt über der Geländeoberfläche Abbildung 8-4c	Schicht kommt in unvollständiger Mächtigkeit vor	$[Bed3] = ([BAS] \leq [DHM]) \text{ AND } ([TOP] > [DHM])$	$[M_{\text{vorh}}] = [Bed3] * ([DHM] - [BAS])$

Tabelle 8-3: Berechnung der vorhandenen Mächtigkeit einer Schicht (vgl. Abbildung 8-4).

Abbildung 8-4 zeigt schrittweise die Anwendung der Bedingungen und Berechnungsformeln aus Tabelle 8-3 auf die im Beispiel vorliegende Situation. In der oberen Reihe (Abbildung 8-4a-c) wird das Ergebnis der Vergleichsabfragen gezeigt. Die Abfrage $[BAS] > [DHM]$ erzeugt ein binäres Raster mit dem Wert 1 dort, wo die

Bedingung erfüllt ist (Schicht kommt nicht vor) und dem Wert 0 wo sie nicht erfüllt ist (Abbildung 8-4a). Die Anwendung der anderen in Tabelle 8-3 genannten Bedingungen erfolgt analog (Abbildung 8-4b,c). Abbildung 8-4, untere Reihe, zeigt das Ergebnis der Anwendung der in Tabelle 8-3 angegebenen Formeln für den jeweiligen Gültigkeitsbereich. Die vorhandene Mächtigkeit einer Schicht für alle Rasterzellen erhält man, wenn man die Teilergebnisse addiert (Abbildung 8-4f). Die gesamte Berechnung (Teilergebnisse a-f) lässt sich auch in einer einzigen Berechnung durchführen:

$$[M_{\text{vorh}}] = ([\text{BAS}] > [\text{DHM}]) * [M] + ([\text{TOP}] \leq [\text{DHM}]) * [M] + (([\text{BAS}] \leq [\text{DHM}] \text{ AND } ([\text{TOP}] > [\text{DHM}])) * [M]$$

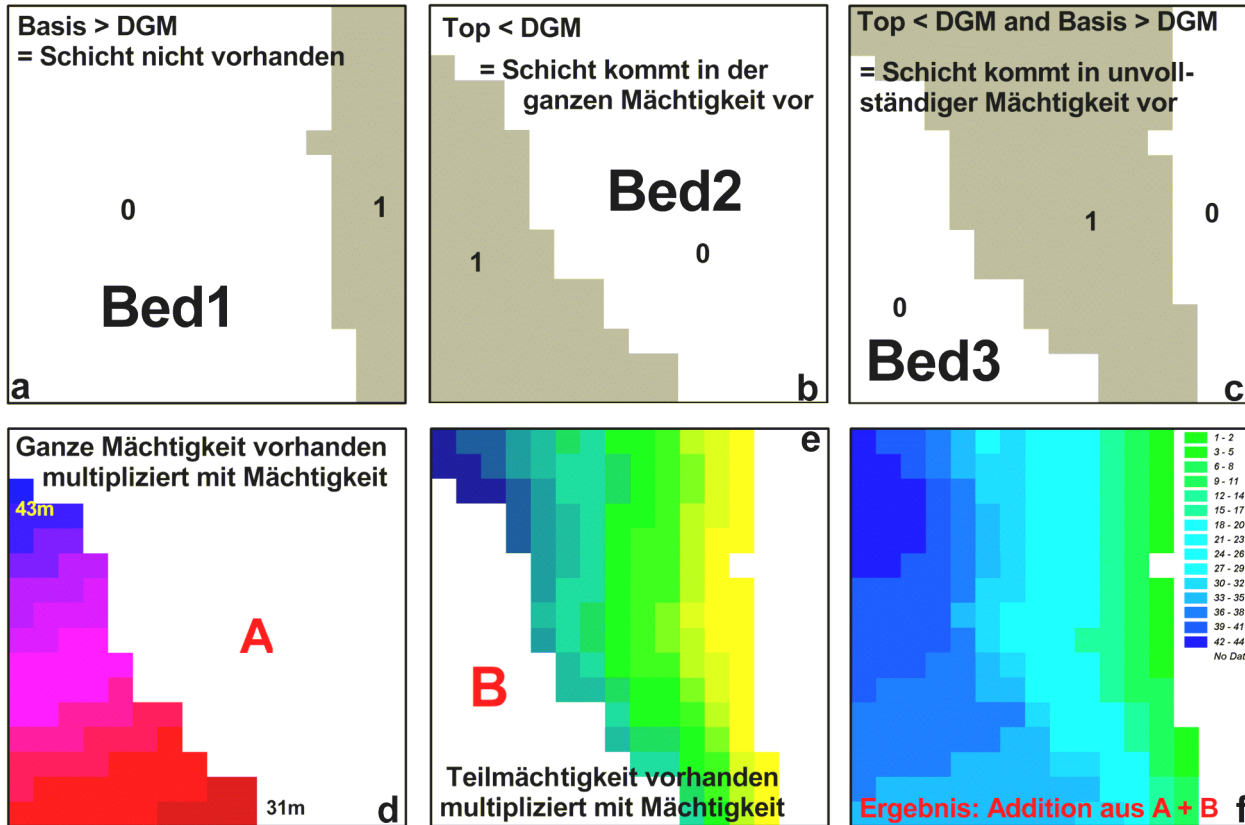


Abbildung 8-4: Berechnung der vorhandenen Mächtigkeit $[M_{\text{vorh}}]$ einer Schicht für alle Punkte des Rasters. Das Ergebnis setzt sich aus denjenigen Anteilen, wo die Schicht nicht vorkommt (a), aus denen, wo sie in voller Mächtigkeit vorkommt (c), und denen, wo sie nur teilweise vorkommt (b), zusammen (vgl. auch Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3). Bed1 bis Bed3: Bedingungen nach Tabelle 8-3.

Schritt 2, Ermittlung der erschließbaren Mächtigkeit bei 20m Bohrtiefe: Im zweiten Schritt wird ermittelt, wie groß die **erschließbare** Mächtigkeit bei einer Bohrtiefe von 20m ist. Die Bedingungen sind hier im Wesentlichen die gleichen wie in Schritt 1, mit dem Unterschied, daß an den Stellen, an denen die Basis der Schicht tiefer als 20m unter Gelände liegt, nicht die Basis der Schicht, sondern die Fläche $[\text{DHM}] - T_{\text{max}}$ die untere Begrenzung bildet. Der Bereich, in dem die Schicht in einer Tiefe von weniger als 20m angetroffen wird, ist kleiner als der ohne Berücksichtigung der Tiefe, da die Schicht aufgrund ihres Einfallens abtaucht (vgl. Abbildung 8-3). Die Flächen, auf denen die Schicht bis in eine Tiefe von 20m vorkommt, müssen die folgende Bedingung erfüllen:

$$([\text{BAS}] \leq [\text{DHM}]) \text{ AND } ([\text{TOP}] \geq ([\text{DHM}] - T_{\text{max}})) \quad (\text{s. Abbildung 8-5a})$$

Für die Berechnung der vorhandenen Mächtigkeit bis 20m Tiefe $[M_{\text{vorh}20}]$ müssen drei Fälle unterschieden werden (Tabelle 8-4):

Fall	Bedingungen und Berechnung der vorhandenen Mächtigkeit $[M_{\text{vorh20}}]$
Nur die Fälle, in denen die Schicht bis 20m Tiefe (T_{max}) vorhanden ist, sind aufgelistet!	
Basis liegt höher als 20m unter GOK	$[M_{\text{vorh20}}]=([[\text{BAS}]>([\text{DHM}]-T_{\text{max}})] \text{ AND } ([[\text{BAS}] \leq [\text{DHM}]]) * ([\text{DHM}] - [\text{BAS}])$
Top liegt unter Gelände aber höher als 20m	$[M_{\text{vorh20}}]=([[\text{TOP}] \geq ([\text{DHM}]-T_{\text{max}})] \text{ AND } ([[\text{TOP}] < [\text{DHM}]]) * (T_{\text{max}} - ([\text{DHM}] - [\text{TOP}]])$
Ganze Mächtigkeit von 20m vorhanden	$[M_{\text{vorh20}}]=([([\text{TOP}] \geq [\text{DHM}])]) \text{ AND } ([[\text{BAS}] \leq ([\text{DHM}] - T_{\text{max}})]) * T_{\text{max}}$

Tabelle 8-4: Bedingungen und Berechnungsformeln für die Bestimmung der erschließbaren Mächtigkeit einer Schicht bei einer Bohrtiefe bis 20m.

Die Ergebnisse der Anwendung der Bedingungen sowie der Berechnung auf das Beispiel sind in Abbildung 8-5a-c zusammengestellt. Abbildung 8-5c zeigt die Mächtigkeiten der Schicht, die bei einer Bohrtiefe von 20m angetroffen würden. Das Ergebnis dieser Berechnung läßt sich wiederum in einem einzigen Vorgang bestimmen:

$$[M_{\text{vorh20}}] = ([[\text{BAS}]>([\text{DHM}] - T_{\text{max}})] \text{ AND } ([[\text{BAS}] \leq [\text{DHM}]]) * ([\text{DHM}] - [\text{BAS}]) + ([[\text{TOP}] \geq ([\text{DHM}] - T_{\text{max}})] \text{ AND } ([[\text{TOP}] < [\text{DHM}]]) * (T_{\text{max}} - ([\text{DHM}] - [\text{TOP}]]) + ([([\text{TOP}] \geq [\text{DHM}])]) \text{ AND } ([[\text{BAS}] \leq ([\text{DHM}] - T_{\text{max}})]) * T_{\text{max}}$$

Schritt 3, Einbeziehung der Grundwasseroberfläche: Im letzten Schritt der Berechnung wird einbezogen, daß aufgrund der Ausbildung der Grundwasseroberfläche nicht alle Bereiche der Schicht, die in weniger als 20m Tiefe angetroffen werden, auch tatsächlich grundwassererfüllt sind und mindestens 5m Grundwasser enthalten. Die Bestimmung der Flächen, die diesen Anforderungen genügen, wird wieder in drei Teilschritte zerlegt :

3a: Zunächst wird festgelegt, wo Grundwasser in einer Tiefe von weniger als 20m überhaupt vorhanden ist. Dies geschieht durch die Abfrage:

$$([\text{DHM}] - 20) \leq [\text{GWGL}],$$

deren Ergebnis Abbildung 8-5d zeigt.

3b: Durch den Berechnungsschritt 3a wurde noch nicht festgelegt, ob sich dieses Grundwasser auch wirklich in der fraglichen Schicht befindet. Wie groß die Grundwassermächtigkeit $[GWM_{20}]$ über der Basis bzw. über der Tiefe T_{max} ist, kann anhand der folgender Überlegung ermittelt werden:

Bezugshorizont für die Ermittlung der Grundwassermächtigkeit ist entweder die Tiefe $T_{\text{max}}=20\text{m}$ (wenn in 20m Tiefe die Basis noch nicht erreicht ist) oder die Basis der Schicht selbst. Die Mächtigkeit der Schicht über diesem Bezugshorizont wurde in Schritt 2 bereits bestimmt ($[M_{\text{vorh20}}]$). Damit kann die Tiefenlage des Bezugshorizontes einfach durch $[\text{DHM}] - [M_{\text{vorh20}}]$ berechnet werden. Um zu ermitteln, wieviel Grundwasser sich oberhalb dieser Begrenzungsfläche befindet, bildet man die Differenz zur Grundwasseroberfläche. Durch die Multiplikation des Ergebnisses mit der Bedingung, daß die Differenz > 0 sein muß, wird sichergestellt, daß tatsächlich nur dort Werte berechnet werden, wo die Bedingung „Grundwasser in 20m Tiefe innerhalb der Schicht vorhanden“ erfüllt ist:

$$[GWM_{20}] = ([[\text{GWGL}] - ([\text{DHM}] - [M_{\text{vorh20}}])]) > 0 * ([\text{GWGL}] - ([\text{DHM}] - [M_{\text{vorh20}}]));$$

das Ergebnis zeigt Abbildung 8-5e.

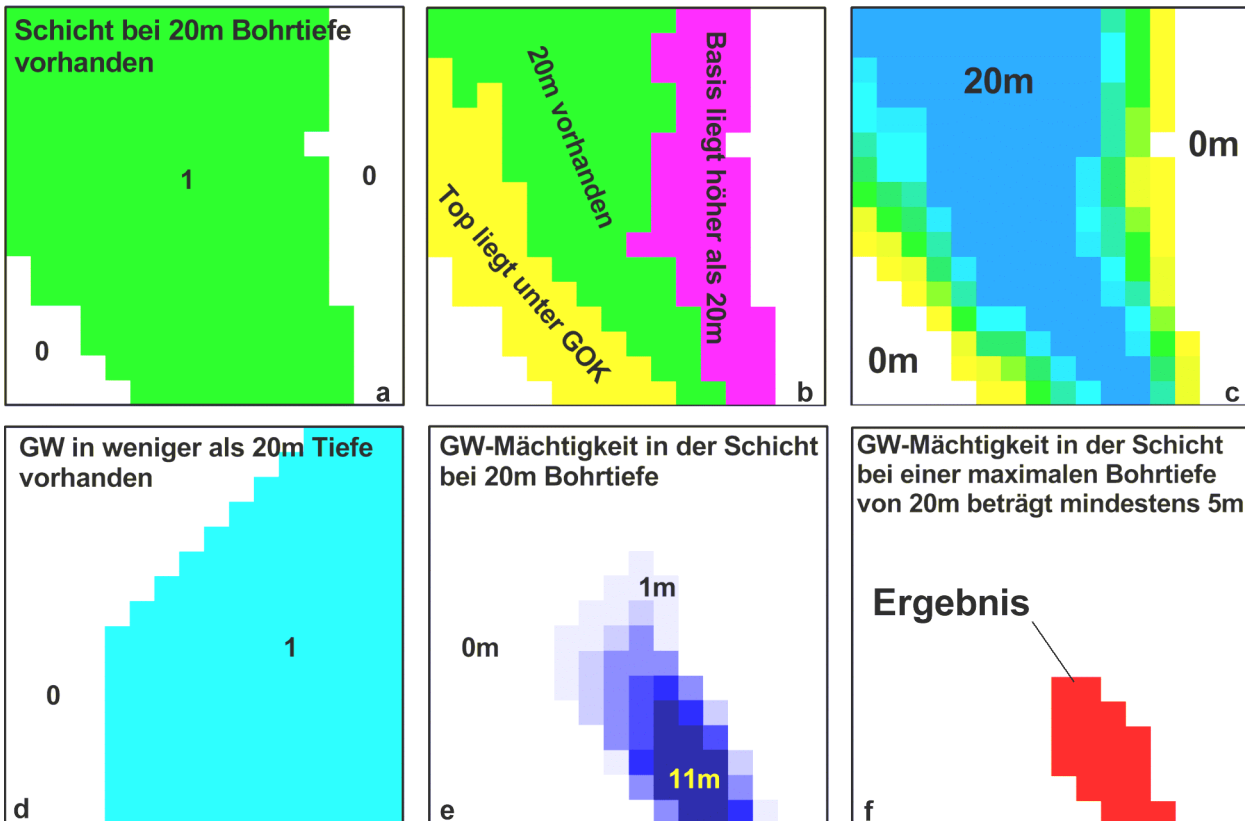


Abbildung 8-5: Berechnung von Schichtanteilen und Grundwassermächtigkeiten unter Einbeziehung einer maximalen Bohrtiefe $T_{max}=20m$. Das Ergebnisgrid (f) zeigt die Fläche, auf der bei einer Bohrtiefe von maximal 20m mindestens 5m Grundwassermächtigkeit in der fraglichen Schicht angetroffen werden.

3c: Im allerletzten Schritt muß nun festgestellt werden, in welchem Bereich die Grundwassermächtigkeit größer 5m ist. Dies geschieht durch die Berechnung von

$$[GWM_{20}] > GWM_{min}; \quad \text{mit } GWM_{min} = 5m$$

Das Ergebnis dieser Abfrage zeigt Abbildung 8-5f. Es ist auch hier wiederum möglich, die einzelnen Teilschritte zusammenzufassen und die gesamte Abfrage in einer einzigen Berechnung durchzuführen. Dazu müssen die verwendeten Zwischenergebnisse durch die jeweils verwendeten Berechnungsformeln substituiert werden:

$$\begin{aligned}
 \text{[Ergebnis]} = & ((([GWGL] - ([DHM] - (([BAS] > ([DHM] - T_{max})) \text{ AND } ([BAS] \leq [DHM])) * ([DHM] - [BAS]) + \\
 & (([TOP] \geq ([DHM] - T_{max})) \text{ AND } ([TOP] < [DHM])) * (T_{max} - ([DHM] - [TOP])) + ((([TOP] \geq [DHM])) \text{ AND} \\
 & ([BAS] \leq ([DHM] - T_{max})) * T_{max})) > 0) * ([GWGL] - ([DHM] - (([BAS] > ([DHM] - T_{max})) \text{ AND } ([BAS] \leq [DHM])) * \\
 & ([DHM] - [BAS]) + (([TOP] \geq ([DHM] - T_{max})) \text{ AND } ([TOP] < [DHM])) * (T_{max} - ([DHM] - [TOP])) \\
 & + ((([TOP] \geq [DHM])) \text{ AND } ([BAS] \leq ([DHM] - T_{max})) * T_{max}))) > GWM_{min}
 \end{aligned}$$

Die hier angegebene Berechnungsformel ist erforderlich, um das Ergebnis in **einem** Schritt aus den Eingabegrößen $[DHM]$, $[GWGL]$, $[BAS]$, $[TOP]$ und den Größen T_{max} und GWM_{min} zu bestimmen. Die Berechnung in einem einzigen Schritt hat gegenüber der Aufteilung in Einzelschritte den deutlichen Vorteil, daß die permanente Erzeugung und Speicherung der Zwischenergebnisse nicht notwendig ist. Andererseits sind die Schritte und das Ergebnis anhand einer solchen Formel, zumindest für Dritte, kaum noch nachvollziehbar. Eleganter, übersichtlicher und flexibler ist die Verwendung von Programmcode zur Lösung solcher Aufgaben (siehe Kap. 8.1.2).

8.1.1.3 Berechnungsbeispiel - Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Beispiel stellt einen „konstruierten“, vereinfachten Fall dar. Im „realen“ Bewertungsfall sind die geometrischen Verhältnisse im Raum ungleich schwieriger zu erfassen. Die Berechnungen werden dadurch noch aufwendiger und unübersichtlicher. Eine Kontrolle der Ergebnisse auf Plausibilität wird dadurch erschwert. Zusätzlich müssen Gesichtspunkte beachtet werden, die in diesem Beispiel unberücksichtigt bleiben. Hier ist vor allem die in der Realität gegebene Möglichkeit zu beachten, daß mehrere Grundwasserstockwerke auftreten können. Will man in die Bewertung die rechtlichen Bedingungen mit einbeziehen, so sind die Fälle auszusondern, bei denen der betrachtete Aquifer das zweite (tiefere) Stockwerk darstellt oder aber wegen des Auftretens einer undurchlässigen Deckschicht gespannt ist (vgl. Abbildung 8-8, Abbildung 8-9). Schwebende GW-Stockwerke oder vertikale hydraulische Barrieren zu berücksichtigen ist theoretisch ebenfalls möglich, allerdings liegen in der (unterfränkischen) Realität selten flächendeckend ausreichend Daten vor, um dies sinnvoll zu ermöglichen. Realistischer, wenn auch schwierig, ist die Berücksichtigung mehrerer Stockwerke oder gespannter Verhältnisse. Hierzu muß der oben für eine einzige Schicht vorgestellte Ablauf für alle Schichten durchlaufen werden, die im Untersuchungsgebiet vorkommen⁶⁷. Es ist nahezu unmöglich, die dazu notwendigen Berechnungen in einem einzigen Schritt durchzuführen, da die resultierenden Berechnungsformeln unüberschaubar würden. Teilt man die Bearbeitung dagegen wie im gezeigten Beispiel in viele Einzelschritte auf, so müssen (bei 14 Modellschichten) mehr als 100 Zwischenergebnisse erzeugt (und gespeichert) werden.

8.1.2 Programmierung in einer GIS-Umgebung

Bei Bewertungen in GIS besteht meistens die Notwendigkeit, die Randbedingungen der Bewertung zu variieren, um sie an geänderte Voraussetzungen und Erfordernisse anzupassen. Im oben verwendeten Beispiel könnte z.B. für größere Grundwasser-Wärmepumpenanlagen auch eine Bohrtiefe von $T_{\max}=50\text{m}$ angesetzt und die minimale Grundwassermächtigkeit auf $GWM_{\min}=15\text{m}$ erhöht werden. Es ist auch denkbar, das starre Schema für T_{\max} und GWM_{\min} zu verlassen und statt dessen die geeigneten Werte von anderen Parametern, z.B. der Durchlässigkeit, abhängig zu machen. Für solche Aufgaben müssen Lösungen gefunden werden, die es erlauben, die Berechnungen beliebig häufig unter veränderten Bedingungen zu wiederholen, ohne dabei eine Vielzahl von Zwischenergebnissen (s.o.) zu erzeugen. Es bietet sich deshalb geradezu an, diese Aufgaben in Programmen abzuwickeln, die es ermöglichen, Parameter einzugeben, Auswahlen zu treffen oder durch eine Abarbeitung von Schleifen eine Vielzahl von Berechnungen in einem Schritt durchzuführen. In der vorliegenden Untersuchung wurden solche Programme in der Programmiersprache Avenue des Softwarepakets ArcView (ESRI) erstellt. Avenue ist eine objektorientierte Programmiersprache, die den Zugriff auf die typischen GIS-Komponenten (Rasterkarten, Vektorobjekte, Grafiken, Tabellen usw.) ermöglicht und dabei die üblichen Programmerroutinen wie Schleifen, bedingte Abfragen usw. zur Verfügung stellt. Mit dieser Sprache ist es möglich, komplette Anwendungen zu programmieren, die dem Benutzer eine für seine Zwecke konfigurierte Programmoberfläche bieten. Programme haben gegenüber der Bearbeitung in einzelnen „manuellen“ Berechnungsschritten den Vorteil, daß sie Eingabedaten auch aus Tabellen und externen Datenbanken lesen können. Diese können Daten, aber auch Verweise auf Dateien enthalten. Programmgesteuerte Berechnungen auf der Basis von Raster- (und Vektor-) Karten sind aufgrund der besonderen „Struktur“ der Variablen, für den mit „herkömmlicher“ Programmierung Vertrauten zunächst ungewöhnlich. Es ist dazu vielleicht hilfreich, sich die Karten als Variablenfelder vorzustellen, in denen ein Parameter je nach räumlicher Lage unterschiedliche Werte annehmen kann. Durch die Möglichkeit, mehrere Attribute an ein Objekt zu knüpfen, erhalten die „Felder“ eine weitere Dimension.

⁶⁷ „Schicht“, im Sinne einer im Untergrundmodell definierten Modelleinheit (Kap. 7.2.3.3).

8.2 Vorstellung des Bewertungsprogramms

8.2.1 Problemstellung und Konzeption

Eines der Hauptziele der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung und Erprobung von Instrumenten zur Bewertung von Standorten oder Gebieten für die thermische Nutzung. Eingangsgrößen einer solchen Bewertung sind zum einen die Untergrundeigenschaften am jeweiligen Ort, zum anderen die Bewertungskriterien, die auf diese Eigenschaften angewendet werden. Die Bewertungskriterien leiten sich aus den technischen Anforderungen ab, die durch die unterschiedlichen Verfahren gestellt werden.

Die genannten Eingangsgrößen stellen keine unveränderlichen Konstanten dar, sondern können in verschiedener Hinsicht variieren. So sind die Bewertungskriterien in hohem Maße abhängig vom Typ der thermischen Nutzung und darüberhinaus auch von speziellen Parametern wie Größe, Temperaturbereich und Anwendungszweck (vgl. Tabelle 3-1, Tabelle 6-12, Abbildung 6-11, Kap. 6.4.4). Zudem können Bewertungskriterien bislang nicht eindeutig festgelegt werden, da keine ausreichenden Informationen zur ihrer Kalibrierung vorliegen (Kap. 6.4.3). Die Untergrundeigenschaften scheinen dagegen zunächst unveränderlich zu sein. Tatsächlich sind auch sie im Bewertungskonzept variable Größen, da sie im Informationssystem nur **modellhafte Beschreibungen** der Realität darstellen, also einen **momentanen Erkenntnisstand** wiedergeben. Kommt neue Information hinzu, muß das Modell angepaßt und verbessert werden.

Ein Bewertungsinstrument sollte also flexibel reagieren können auf:

- den Bedarf unterschiedliche Nutzungsarten (Typ, Größe der Anlage, Anwendungszweck, Temperaturbereich) individuell zu bewerten,
- geänderte Erkenntnisse über die Bedeutung und Gewichtung von Bewertungskriterien,
- geänderte Informationen über den Untergrundaufbau (Modellanpassung).

Da eine Standortbewertung durch eine Vielzahl von Kriterien beeinflusst wird, die jeweils auf unterschiedliche Weise Einfluß auf das Bewertungsergebnis nehmen (vgl. Kap. 6.4.3.3), kann eine solche Flexibilität nur erreicht werden, wenn der Prozeß der Bewertung selbst weitestgehend automatisch erfolgt. Auf diese Weise kann ohne großen Aufwand eine Neu-Bewertung eines Standortes oder eines Gebiets erfolgen, sobald sich eine der oben beschriebenen variablen Eingangsgrößen ändert. „Automatisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, daß die notwendigen Überlagerungen und Berechnungen nicht in Einzelschritten vom Bearbeiter „manuell“ ausgeführt werden müssen (vgl. Kap. 8.1.1.2), sondern in einem festgelegten, ereignisgesteuerten (Benutzerinteraktion) Programmablauf erfolgen.

Eine entsprechende Automatisierung wurde in der vorliegenden Untersuchung mit einer Anwendung realisiert, die in der Programmiersprache Avenue geschrieben wurde. Das Programm verfolgt zwei verschiedene Ansätze: der Erste ist auf die Erstellung von (Planungs-)Karten ausgerichtet (vgl. Kap. 6.2.3.1.2). Er erlaubt die Berechnung von Bewertungskarten für wählbare Flächenausschnitte nach verschiedenen, vom Benutzer vorgegebenen Gesichtspunkten. Der Zweite orientiert sich an dem in Kap. 6.4.1.3 als „Expertensystem“ beschriebenen Konzept (vgl. auch Kap. 6.2.3.2). Er ermöglicht dem Benutzer für einen per Mausklick wählbaren Punkt (auf einer digitalen Karte am Bildschirm) eine Bewertungszahl berechnen zu lassen sowie Informationen zu verschiedensten Themen abzurufen.

Da im Untersuchungsgebiet fast ausschließlich Verfahren mit vertikalen Erdsonden zur Anwendung kommen können (Speicherung und Gewinnung von Wärme/Kälte; vgl. Kap. 5.4), wurde darauf verzichtet, das Programm zur automatisierten Bewertung auf andere Verfahren auszudehnen (Aquiferspeicherung, Grundwasserwärmepumpen; vgl. dazu auch Kap. 8.2.4.7). Die folgenden Erläuterungen beschränken sich auf die Bewertung von Erdsondenwärmespeichern (mittleren Temperaturniveaus). Die Bewertung für Erdsondensysteme zum Wärmeentzug verläuft weitgehend analog und ist zudem deutlich einfacher (vgl. Kap. 5.3.1 und 8.2.4.6)

Die Möglichkeiten, individuelle Systemparameter eines Speichers vorzugeben sind dabei beschränkt (vgl. Kap. 8.2.6). Als vorrangig erschien eine Einbeziehung der Speichergöße, die sich, wie in Kap. 6.4.2.2.1 demonstriert, auf die notwendige Bohrtiefe auswirkt. Anhand der vorgegebenen Speichergöße wird also ein

Teufenbereich festgelegt, der durch geometrische Überlegungen (Verhältnis Breite/Höhe) und wirtschaftliche Gesichtspunkte (maximale Bohrtiefe) abgegrenzt wird. Die Berechnung der Bewertungszahl erfolgt deshalb immer für eine bestimmte Maximaltiefe T_{\max} (vgl. Abbildung 8-6). Für die Erstellung von Bewertungskarten scheint es am sinnvollsten, Bewertungskarten für drei unterschiedliche Kategorien (kleine, mittlere, große Speicher; vgl. Tabelle 6-12 und 6-14) durchzuführen.

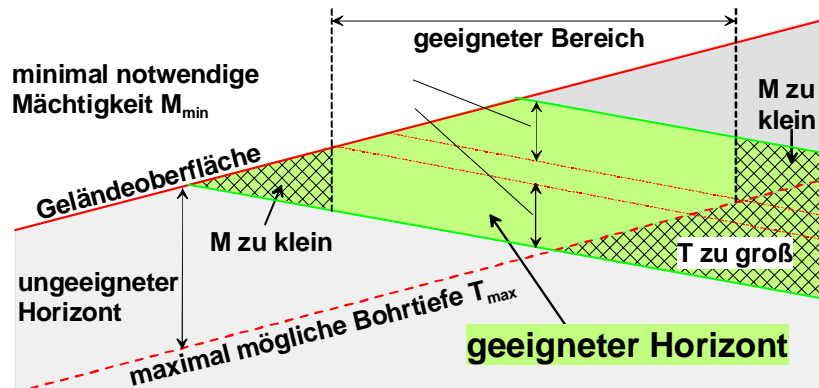


Abbildung 8-6: Festlegung der **minimal erforderlichen Mächtigkeit** (M_{\min}) und **maximal möglichen Bohrtiefe** (T_{\max}). Der Aspekt „minimale Mächtigkeit“ wurde nach anfänglichen Versuchen nicht ins Bewertungskonzept aufgenommen, da durch die Definition eines solchen Parameters (für einen Horizont) eine insgesamt zu starre Vorgabe entsteht. Besser ist ein Konzept, das den Teufenbereich bis zur maximalen Bohrtiefe komplett bewertet (inklusive der „ungeeigneten“ Schichten).

Es ist ohne weiteren (programmiertechnischen) Aufwand auch möglich, die Bewertung an die Speichertemperatur anzupassen, also z.B. auch Standorte zu ermitteln, die für die Hochtemperaturspeicherung geeignet sind. Hierzu fehlen allerdings bislang noch aussagefähige Informationen zu den besonderen Anforderungen von Hochtemperaturspeichern (vgl. Kap. 3.1.4.3.1 und 2.3.2.3).

Die Bewertungskonzeption des Programms orientiert sich an folgenden Fragen:

- Welche Einheiten sind am Standort bei einer Bohrung bis zur gewünschten Bohrtiefe T zu erwarten? Als „Einheiten“ werden hier die im Schichtenmodell (vgl. Kap. 7.2.3.3) zu Horizonten zusammengefaßten Bewertungseinheiten aufgefaßt.
- Wie groß ist der prozentuale Anteil einzelner Einheiten am gesamten Bohrprofil?
- Welche thermischen und hydrogeologischen Eigenschaften haben diese Einheiten und wie wirken diese Eigenschaften sich innerhalb des Bohrprofils auf die Gesamtbewertung des Standortes aus?
- Welche Einheiten bzw. welcher Anteil derselben liegen im gesättigten bzw. ungesättigten Bereich?
- Ist mit Grundwasserbewegung zu rechnen? Wenn ja, in welchem Teufenbereich und mit welcher Fließgeschwindigkeit?
- Liegt der Standort im Bereich von Verwerfungszonen, Karstgebieten oder anderen Phänomenen, die sich nachteilig auf die Speichereigenschaften auswirken könnten?

Weiterhin können in die Bewertung optional Fragen, die mit der rechtlichen Situation in Zusammenhang stehen, einbezogen werden:

- Liegt der gewünschte Standort in einem Wasserschutzgebiet?
- Wird bei einer Bohrung bis zur Teufe T_{\max} ein gespanntes oder tieferes Grundwasserstockwerk angetroffen (vgl. Kap.)? Wenn ja, in welcher Tiefe?

8.2.2 Eingabeparameter

Um die oben genannten Fragen beantworten zu können, müssen die Geometrie der geologischen Verhältnisse (Lage der Schichten im dreidimensionalen Raum) und die relevanten Eigenschaften der beteiligten Schichten bekannt sein. Beide Informationen müssen dem Bewertungsprogramm zugänglich sein.

8.2.2.1 Geometrische Eigenschaften des Schichtenmodells

Um zu ermitteln, welche Schichten in welcher Mächtigkeit bei einer Bohrung bis in eine vorgegebene Tiefe T an einem Punkt (Standort) zu erwarten sind, sind folgende Informationen erforderlich:

- die Höhenlage des Punktes über NN,
- die Lage der Grundwasseroberfläche über NN,⁶⁸
- die Lage der jeweiligen Schichtgrenzen über NN.

Diese Informationen werden durch das in Kap. 7.2 vorgestellte Untergrundmodell zur Verfügung gestellt. Sie sind als 2½-dimensionale Grenzflächenmodelle in Form von Rasterkarten (Grids) Bestandteil der Datenbasis des Bewertungsmodells. Das Bewertungsprogramm liest die Grids zur Auswertung vom Datenspeicher. Tabelle 8-5 zeigt die Eingabegrids im Überblick.

Bezeichnung	Erläuterung	Auflösung
Basisdatensätze		
[DHM]	Digitales Höhenmodell	50m
[DSM]	Digitales Strukturmodell, Referenz-Grenze: <i>mu-mm</i>	50m
[GWGL]	Höhenlage des Grundwasserspiegels über NN	200m
[MV _i] (optional, wird hier nicht eingesetzt)	Mächtigkeitsverteilung der einzelnen Schichten i=1 bis 14	1000m
abgeleitete Datensätze		
[T]	Tiefenlage der maximalen Bohrtiefe T unter Gelände als Fläche: [T]= [DHM]-T (T: Bohrtiefe in m, konstant)	50m
[GRAD]	hydraulischer Gradient (Horizontalgradient von [GWGL])	
[TOP] _(i) , [BAS] _(i)	Top bzw. Basis einer Schicht über NN berechnet aus dem Referenzstrukturplan, dem [DHM] und den Mächtigkeiten (vgl. Tabelle 8-6)	
[M _(i)]	bezeichnet im Programm den nicht-grundwassererfüllten Anteil einer Schicht, also den Anteil, der über der Grundwasseroberfläche liegt	
[GW _(i)]	bezeichnet im Programm den grundwassererfüllten Anteil einer Schicht	
besondere Datensätze		
[RECHT]	die maximal mögliche Bohrtiefe, die erschlossen werden kann, ohne daß ein tieferer oder gespannter GW-Leiter angetroffen wird (vgl. dazu Kap. 8.2.4.3)	50m

Tabelle 8-5: Erläuterung der Eingabedaten (Basisdatensätze) und der aus den Basisdatensätzen abgeleiteten Datensätze für das Bewertungsprogramm. Die Daten liegen als Rasterdaten (Grids) vor. Der Index (i) bezeichnet die Schichten i=1 bis n im Schichtenmodell (vgl. Tabelle 8-6).

8.2.2.2 Qualitative Eigenschaften des Schichtenmodells

Das Untergrundmodell, das durch die in Tabelle 8-5 genannten Grenzflächen beschrieben wird, ist kein kontinuierliches, sondern besteht aus Schichten, die nach oben und unten diskret voneinander abgegrenzt sind. Eine Schicht ist damit als eine über die ganze vertikale Erstreckung homogene Einheit zu betrachten. Die Vor- und Nachteile dieses Modelltyps wurden in Kap. 7.2.2.2.2 diskutiert.

Um eine sinnvolle Bewertung zu ermöglichen, muß die Zusammenfassung von lithologischen zu Bewertungseinheiten so gewählt werden, daß sie den realen Verhältnissen mit ihren kontinuierlichen verteilten Eigenschaften gerecht wird, die Anzahl der verwendeten Schichten aber gleichzeitig so gering gehalten wird, daß das Modell übersichtlich bleibt. Solche Bewertungseinheiten sollten in allen für die Bewertung wesentlichen Parametern gleiche oder ähnliche Eigenschaften aufweisen.

Für das Arbeitsgebiet „Ausschnitt“ wurden 14 Bewertungseinheiten festgelegt, die bereichsweise mit den Einheiten der regional üblichen stratigraphischen Gliederung zusammenfallen (Abbildung 7-27). Hierbei wird zunächst unterschieden, ob eine Schicht einen Aquifer oder Aquitarden darstellt, da Aquifere aufgrund der potentiellen Möglichkeit zu Grundwasserbewegung und dem damit verbundenen Risiko von Wärmeverlusten gesondert bewertet werden müssen. Weitere Kriterien für die Zusammenfassung bilden der Ton-, Quarz-, und Karbonatgehalt der Schichten, da diese sowohl die thermo- als auch die hydrophysikalischen Eigenschaften bestimmen. Für jede Schicht sind die Porosität, der k_f -Wert, die Wärmeleitfähigkeit und die volu-

⁶⁸ Zur Begründung, warum hier vereinfachend von **einer** Grundwasseroberfläche gesprochen wird, vgl. Kap. 7.2.3.2.

metrische Wärmekapazität der Gesteine angegeben. Diese Daten stellen jeweils gemittelte Schätzwerte dar, die auf Literaturangaben, Berechnungen und Erfahrungswerten beruhen (Kap. 4.3).

Die 14 auf diese Weise festgelegten Horizonte wurden mit unterschiedlich gewichteten Bewertungsfaktoren belegt, die teilweise aus Berechnungen, teilweise durch Abschätzung ermittelt wurden. Für jede Schicht wurden drei Bewertungsfaktoren festgelegt:

- Der „**Formationsfaktor**“ **FW** beschreibt als Summenparameter die mineralogische Zusammensetzung, die Korngrößen und die Porosität der Einheit.
- Der „**Aquiferfaktor**“ **AW** legt fest, ob eine Einheit ein potentieller Aquifer oder Aquitard ist, und wenn ja, wie stark diese Eigenschaft jeweils ausgeprägt ist.
- Der „**Bohrbarkeitsfaktor**“ **BW** legt fest, wie „gut“ sich die Gesteine der Einheit bohren lassen.

Die Bedeutung und Anwendung dieser Faktoren wird in Kap. 8.2.4.2 erläutert.

Die in Tabelle 8-6 wiedergegebene „Schichtdatentabelle“ stellt die Basis des Bewertungsprogramms dar. Sie enthält alle für den Bewertungsvorgang relevanten geometrischen und qualitativ beschreibenden Eigenschaften der 14 Einheiten des Untergrundmodells. Die Bedeutung der einzelnen Parameter wird in Tabelle 8-7 erklärt.

Bezeichnung		geometrische Eigenschaften			qualitative Eigenschaften									Bewertungsfaktoren			
i	SCHICHT	BAS	TOP	M	TON	QU	CA	N	KF	c	cGW	L	LGW	BW	FW	AQU	AW
1	km	180	380	200	3	2	1	0.2	1.E-10	1.8	2.4	2.6	2.8	1.0	1.5	nein	1.8
2	ku2, kuW	150	180	30	2	3	2	0.1	1.E-05	1.9	2.3	3.0	3.2	1.3	1	ja	-1.2
3	ku1, mo3	125	150	25	3	1	2	0.2	1.E-08	1.9	2.6	2.3	2.5	1.1	1	teils	1.1
4	mo3	99	125	26	3	1	3	0.1	1.E-08	2.2	2.4	2.7	2.8	1.3	1.5	teils	-1.2
5	mo2, mo1	62	99	37	1	0	4	0	1.E-06	1.9	2.0	2.6	2.7	1.5	1.8	ja	-1.4
6	mo1	52	62	10	3	0	1	0.1	1.E-09	2.1	2.5	2.9	3.1	1.3	1.3	nein	1.5
7	mm	12	52	40	2	0	3	0	1.E-04	2.1	2.3	2.3	2.4	0.5	0.5	nein	-1.8
8	mu, mm	2	12	10	1	0	4	0	1.E-04	1.9	2.0	2.5	2.6	1.3	1.9	ja	-1.6
9	mu	-88	2	90	1	0	4	0	1.E-09	2.0	2.0	2.7	2.7	1.5	1.9	nein	1.6
10	so4T	-118	-88	30	4	2	0	0.3	1.E-10	1.5	2.5	2.4	2.6	0.8	1.5	nein	2
11	so4Q	-124	-118	6	0	5	1	0.1	1.E-04	1.9	2.1	4.3	4.4	1.1	0.9	ja	-1.4
12	so3T	-143	-124	19	4	2	0	0.3	1.E-10	1.5	2.5	2.4	2.6	0.8	1.4	nein	2
13	so2,sm,su	-383	-143	240	2	4	0	0.1	1.E-04	1.8	2.2	3.7	3.8	1.2	1.4	ja	-1.8
14	suB	-450	-383	67	4	2	0	0.2	1.E-10	1.6	2.4	2.4	2.6	0.5	0.5	nein	2

Tabelle 8-6: „Schichtdatentabelle“ als Grundlage des Bewertungsmodells. Hier sind die maßgeblichen geometrischen und qualitativen Eigenschaften der einzelnen Bewertungseinheiten (Schichten) und die Bewertungsfaktoren abgelegt. Das Bewertungsprogramm liest die Daten für die am Standort angetroffenen Schichten (vgl. Kap. 8.2.4.1) aus der Tabelle und berechnet anhand der vorgefunden Bewertungsfaktoren eine Bewertungszahl. Die einzelnen Parameter werden in Tabelle 8-7 erläutert. Die stratigraphische Zuordnung der Schichten wird in Tabelle 7-3 und Abbildung 7-27 erklärt. Die hier angegebene Tabelle gilt für Erdsondenwärmespeicher. Für die Bewertung der Eignung für den **Wärmeentzug mit Erdsonden** müssen die Parameter FW und AW entsprechend modifiziert werden (vgl. dazu Kap. 8.2.4.6 und Tabelle 8-16).

Die Zusammenfassung zu den in Tabelle 8-6 genannten 14 Bewertungseinheiten (Schichten) berücksichtigt folgende Kriterien:

- überwiegende Ausprägung als Aquifer bzw. Aquitard, Zugehörigkeit zu einem (Haupt-)Grundwasserstockwerk bzw. einem trennenden Horizont,
- ähnliche lithologische Eigenschaften mit Vorherrschen eines bestimmten Typs,
- Auftreten im gesamten betrachteten Gebiet unter Einhaltung einer Mindestmächtigkeit (ca. 10m).

Den Zusammenfassungen liegen die in Kap. 7.2.2.2 geschilderten Überlegungen zur vertikalen Auflösung von Untergrundmodellen zugrunde. Die Beurteilung und Zusammenfassung von Schichten zu Bewertungseinheiten beruht vorwiegend auf den Normalprofilen Blatt Würzburg Nord und Süd, HOFFMANN (1967a,b; vgl. Abbildung 7-27). Tabelle 7-3 erläutert die zusammengefaßten Einheiten.

Parameter in Tabelle 8-6	Bedeutung / Erläuterung
Bezeichnung	
i	fortlaufende Numerierung der Schichten
SCHICHT	Bezeichnet einen Horizont mit einheitlichen qualitativen Eigenschaften (Bewertungseinheit). Vergleiche Abbildung 7-27, Tabelle 7-3 .
Geometrie	
BAS	Gibt an, wie weit die Basis einer Schicht unter (negative Werte) bzw. über dem Referenzniveau (Grenze μ/mm) liegt. Der Abstand zum Referenzniveau wird hier durch einen konstanten Wert, der über die ganze Fläche gültig ist, festgelegt. Es ist aber auch möglich, statt dessen die lateralen Mächtigkeitsschwankungen zu berücksichtigen (siehe Parameter M).
TOP	Top der Schicht über oder unter Referenzniveau, siehe [BAS].
M	Mächtigkeit, hier ein konstanter Wert. Statt der konstanten Werte können in dieser Spalte auch Verweise (Dateinamen) zu Grids abgelegt werden, die die Mächtigkeitsverteilung dieser Schichten enthalten. Dies ist erforderlich, wenn eine oder mehrere Schichten lateral stark variierende Mächtigkeiten aufweisen. Es bringt aber für das betrachtete Beispielgebiet keine Vorteile (vgl. Kap. 7.2.3.1.3.8), daher wurde aus Gründen der Berechnungsgeschwindigkeit darauf verzichtet.
Qualitative Eigenschaften	
Lithologisch - Mineralogische Eigenschaften	
TON	mittlerer Tonanteil (die Höhe dieser Werte auf einer Skala von 0 bis 5 gibt an, wie stark die Einheit von dieser Mineralgruppe dominiert wird)
QU	mittlerer Quarzanteil, siehe TON
CA	mittlerer Karbonatanteil, siehe TON
Hydrogeologische Eigenschaften (gemittelt nach Angaben aus Kap. 4.3)	
N	Gesamtporosität
KF	Gebirgs- k_f -Wert
Thermische Eigenschaften (berechnet nach Angaben aus Kap. 2.3.2.2 und 4.3)	
c	volumetrische Wärmekapazität des grundwasserfreien Anteils der Schicht
cGW	volumetrische Wärmekapazität des grundwassererfüllten Anteils der Schicht
L	Wärmeleitfähigkeit des grundwasserfreien Anteils der Schicht
LGW	Wärmeleitfähigkeit des grundwassererfüllten Anteils der Schicht
Bewertungsfaktoren	
FW	„Formationsfaktor“: Bewertungsfaktor, der die lithologischen Eigenschaften des Horizontes beinhaltet. Wird aus der mineralogischen Zusammensetzung und anderen lithologischen Eigenschaften der Schicht ermittelt. Wertebereich 0 = schlecht ⁶⁹ bis 2 = sehr gut
AW	„Aquiferfaktor“: Bewertungsfaktor, der durch die potentiellen Eigenschaften des Horizontes als Aquifer bestimmt wird. Potentiell deshalb, weil nicht von vornherein bekannt ist, ob Grundwasser vorhanden ist. In Abhängigkeit vom Sättigungszustand kann dieser Faktor positiv oder negativ in die Bewertung eingehen. Wertebereiche AW = -2 bis -1 für Aquifere und 1 bis 2 für Aquitarden
BW	„Bohrbarkeitsfaktor“: Bewertungsfaktor, der die Bohrbarkeit der Schicht zum Ausdruck bringt. Wertebereich: 0,5 = schlecht bohrbar bis 1,5 = problemlos bohrbar

Tabelle 8-7: Erläuterung der Parameter aus der „Schichtdatentabelle“ (Tabelle 8-6)

⁶⁹ „Schlecht“: Führt dazu, daß eine Schicht einen negativen Einfluß auf die Gesamtbewertung hat usw.

8.2.3 Bewertungsfaktoren

Die Bewertungsfaktoren FW, AW und BW (Tabelle 8-7) bilden die qualitative Grundlage der automatischen Standortbewertung. Die Berechnung der Gesamtbewertungszahl aus der anteiligen Mächtigkeit der am Standort angetroffenen Schichten und den Bewertungsfaktoren wird in Kap. 8.2.4.2 erläutert. Alle Bewertungsfaktoren stellen nach den in den Kapiteln 2 und 3 vorgestellten Grundlagen sehr frei definierte Werte dar. Eine sinnvolle und aussagekräftige Festlegung der Faktoren wird im Prinzip erst möglich, sobald die Möglichkeit einer „Eichung“ anhand einer größeren Anzahl von meßbaren Ergebnissen besteht, was aber aufgrund der geringen Anzahl von Referenzanlagen derzeit nicht möglich ist (vgl. Kap. 6.4.3.1).

8.2.3.1 Formationsfaktor FW

Die ursprüngliche Konzeption des Formationsfaktors sah vor, diesen Bewertungsfaktor aus einer Kombination mineralogischer, thermischer und sedimentpetrographischer Eigenschaften sowie der Mächtigkeit der Schicht zu ermitteln. Die Mächtigkeit wurde als Kriterium hinzugezogen, da davon ausgegangen wird, daß gleichbleibende Eigenschaften über einen großen Teufenbereich generell günstig sind.

Auf der Basis dieser Parameter wurden Versuche unternommen, einen entsprechenden Faktor **zu berechnen**. Es zeigt sich aber, daß eine solche Berechnung nicht zu sinnvollen Ergebnissen führen **kann**, da die vorhandene Datenbasis und der Erkenntnisstand über die Bedeutung von Kriterien der Komplexität des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Kriterien nicht gerecht wird (vgl. Kap. 6.4.3.1).

Nach unterschiedlichen Versuchen zur Aufstellung eines mathematisch formulierbaren Algorithmus wurde deshalb entschieden, den Bewertungsfaktor „Formation“ zwar als solchen beizubehalten, die Festlegung des Wertes aber nicht durch Berechnung, sondern durch „*verbal argumentative Beurteilungen*“ (s. Kap. 6.4.1) festzusetzen. Als „argumentative“ Grundlage gelten dabei die in Kap. 5.2.3.2 angestellten Betrachtungen. Die Anpassung des Faktors erfolgt durch Plausibilitätskontrollen anhand von Berechnungsergebnissen (siehe Kap. 8.2.5).

8.2.3.2 Aquiferfaktor AW

Der Aquiferfaktor gibt die potentielle Fähigkeit einer Schicht zum Transport von Grundwasser an. Diese Eigenschaft ist sehr entscheidend, da eine Schicht, in der sich Grundwasser mit hoher Fließgeschwindigkeit bewegt, sich sehr ungünstig auf die Speicherung auswirkt (→ konvektive Speicherverluste, Kap. 3.1.3.1). Der Aquiferfaktor ist damit vor allem ein Maß für das Risiko (Wahrscheinlichkeit), einen Bereich hoher Grundwasserfließgeschwindigkeiten anzutreffen (vgl. dazu auch Abbildung 7-20).

Die maßgeblichen Größen, die bestimmen, ob eine Schicht einen Aquifer darstellt, sind Permeabilität und Porosität. Dies sind Eigenschaften, die im Prinzip auch schon in den Formationsfaktor (s.o.) eingehen. Sie müssen im Bezug auf die Grundwasserbewegung aber anders bewertet werden. Grund hierfür ist, daß bei einer Schicht, die einen **potentiellen** Aquifer darstellt, nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden kann, daß sie:

- tatsächlich Grundwasser führt (unter dem Grundwasserspiegel liegt),
- dieses Grundwasser in Bewegung ist (ein ausreichend hoher hydraulischer Gradient vorliegt).

Ein **potentieller** Aquifer hat aber für die Speicherung nur **dann** nachteilige Eigenschaften, wenn er grundwassererfüllt ist **und** dieses Grundwasser sich schnell ($>10\text{m/a}$) bewegt. Sind beide oder eine der beiden Voraussetzungen nicht gegeben, so sind folgende Bedeutungen eines potentiellen Aquifers möglich:

- (a) Er liegt über dem Grundwasserspiegel. Dann ist eine geringe Durchlässigkeit von Vorteil, um bei hohen Speichertemperaturen Austrocknung zu verhindern (vgl. Kap. 2.3.2.3).
- (b) Er liegt unter dem Grundwasserspiegel, aber der hydraulischen Gradient ist gering. In diesem Fall ist die Anwesenheit von Grundwasser positiv zu bewerten.

Um den Aquiferfaktor auf eine Schicht anzuwenden, muß also immer erst unterschieden werden, ob diese Schicht am entsprechenden Standort unter dem Grundwasserspiegel liegt und wie hoch dort der hydraulische Gradient ist. Dazu wird im Bewertungsprogramm für jede Schicht der grundwassererfüllte und der grundwasserfreie Anteil bestimmt. Der Aquiferfaktor wird nur auf den grundwassererfüllten Anteil angewendet. Zusätzlich wird eine Fallunterscheidung nach dem hydraulischen Gradienten durchgeführt (s.u.). Der dreidimensionale Charakter der Grundwasserdynamik kann in diesem Bewertungsmodell allerdings nicht berücksichtigt werden, da keine ausreichenden Daten vorliegen bzw. der Aufwand, ein angemessenes Grundwassermodell zu erstellen, unangemessen hoch wäre. Die Anwendung eines mittleren lokalen hydraulischen Gradienten auf Basis der in Kap. 7.2.3.2 berechneten Grundwasseroberfläche, stellt hier nur einen wenig befriedigenden Kompromiß dar.

Der Aquiferfaktor wurde analog zum Formationsfaktor durch Abschätzung festgesetzt und anhand von Plausibilitätskontrollen solange angepaßt, bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt wurden (Kap. 8.2.5). Er nimmt Werte von -2 bis -1 und von 1 bis 2 an, wobei negative Werte eine Schicht als Aquifer kennzeichnen. Die betragsmäßige Größe ist ein Maß für die Stärke der Ausprägung dieser Eigenschaft. Im Bewertungsprogramm hat diese diskontinuierliche Skala zur Folge, daß die Gesamtbewertungszahl beim Auftreten eines Aquifers unter der Grundwasseroberfläche reduziert wird, während sie sich bei einem Aquitarden um einen entsprechenden Betrag verbessert. Letzteres berücksichtigt, daß sich die Speichereigenschaften in wenig durchlässigen Gesteinen durch die Anwesenheit von GW verbessern. Tabelle 8-8 erläutert die Anwendung des Aquiferfaktors in einer Übersicht:

Aquiferwert AW	Bedeutung	Auswirkung auf die Bewertungszahl		
		ohne Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit v_a	mit Einbeziehung von v_a	
			v_a hoch	v_a niedrig
AW = -2	„perfekter“ Aquifer, hoher k_f -Wert, hohe nutzbare Porosität n_e , große laterale Verbreitung	Aquiferwert negativ: Beim Vorhandensein von Grundwasser werden immer hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten vorausgesetzt. „Gute“ Aquifere bewirken eine deutliche Verschlechterung der Gesamtbewertung.	AW= $AW^2 \cdot (-1)$ Ein perfekter Aquifer bewirkt bei hoher v_a eine extreme Verschlechterung der Gesamtbewertung	wird mit (-1) multipliziert; d.h. ein perfekter Aquifer trägt bei geringer v_a zur geringfügigen Verbesserung der Bewertung bei
$-2 < AW < -1$	die oben genannten Eigenschaften „verschlechtern“ sich			
AW = -1	„schlechter“ Aquifer mit niedrigem k_f -Wert, geringer n_e			
AW = 2	„perfekter“ Grundwasserstauer (Aquifuge) mit extrem niedrigem k_f -Wert, große laterale Verbreitung	Aquiferwert positiv: Undurchlässige Schichten sind für die SONDENSPEICHERUNG grundsätzlich günstig, da hier weder konvektive Wärmeverluste noch Verschlechterungen des Systemverhaltens durch Austrocknungserscheinungen zu befürchten sind. „Gute“ Aquitarden bewirken eine deutliche Verbesserung der Gesamtbewertung.		
$1 < AW < 2$	die oben genannten Eigenschaften „verbessern“ sich			
AW = 1	„schlechter“ Grundwasserstauer („hemmer“)			

Tabelle 8-8: Zur Erläuterung der Bedeutung des Aquiferwerts AW.

Zusätzlich besteht optional die Möglichkeit, die Grundwasserfließgeschwindigkeit in die Berechnung der Bewertungszahl zu integrieren⁷⁰. Bei hydraulischen Gradienten, die zu Grundwasserfließbewegungen kleiner als 5m/a führen, wird davon ausgegangen, daß sich die Grundwasserbewegung **nicht** negativ auf die Speicherung auswirkt, da ein nennenswerter Abtransport von eingespeicherter Energie innerhalb einer Speicher-

⁷⁰ Grundsätzlich ist es im Arbeitsgebiet nicht sinnvoll, diese Option zu nutzen, da eine korrekte Berechnung von Grundwasserfließgeschwindigkeiten nicht möglich ist bzw. diese voraussichtlich ohnehin überall zu hoch sind (vgl. Kap. 5.2.1).

periode von maximal 6 Monaten nicht auftritt. In diesem Fall würde sich das Vorhandensein von GW in einem Aquifer als **positiv** erweisen. Um dies zu berücksichtigen, kann der AW z.B. einfach mit (-1) multipliziert werden, was insgesamt eine Verbesserung der Gesamtbewertung hervorruft. Bei Geschwindigkeiten von 5 bis 10m pro Jahr wird davon ausgegangen, daß sich die positiven Effekte, die die Anwesenheit von GW hervorruft, und die negativen, durch den Abtransport von Wärme bedingten Effekte, gerade aufheben, so daß der Aquiferwert in diesem Fall auf 1 gesetzt wird und keinen Einfluß auf die Gesamtbewertung liefert. Bei höheren Geschwindigkeiten als 10m/a wird von einem negativen Einfluß ausgegangen, und der negative Wert des Aquiferfaktors kommt zum Tragen.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurde mit unterschiedlichen Ansätzen zur Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit experimentiert. Möglich sind neben linearen auch exponentielle oder quadratische Abhängigkeiten. Verschiedene Berechnungsmethoden führen zu **formal** stimmigen Bewertungsergebnissen. Insgesamt ist eine Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit unter den gegebenen Voraussetzungen nicht sinnvoll, da keine wirklich angemessene Ermittlung der tatsächlichen Fließgeschwindigkeiten möglich ist. Es scheint deshalb am sinnvollsten anzunehmen, daß die Grundwasserfließgeschwindigkeit in Aquiferen im Untersuchungsgebiet für die Durchführung von Speicherprojekten generell zu hoch ist (vgl. dazu auch Kap. 5.2.1).

Im Programm besteht die Möglichkeit zu wählen, ob Bewertungen mit oder ohne Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit berechnet werden sollen. Die berechnete Grundwasserfließgeschwindigkeit und ein entsprechender Kommentar werden in der Ergebnisausgabe angezeigt (vgl. Programmcode im Anhang).

8.2.3.3 Bohrbarkeitsfaktor BW

Die Bohrbarkeit von Gesteinen ist eine wichtige Größe bei der Bewertung der Eignung von Standorten zur Ersondenwärmespeicherung, da der Aufwand, der zur Niederbringung und Sicherung der Bohrungen betrieben werden muß, einen bedeutenden Kostenfaktor darstellt. Der Bohrbarkeitsfaktor kann Werte von 0,5 (schlecht) bis 1,5 (gut) annehmen. Ein Wert kleiner 1 steht für eine schlechte Bohrbarkeit und bewirkt eine Verkleinerung der Gesamtbewertungszahl. Eine gute Bohrbarkeit dagegen erhöht die Gesamtbewertungszahl um einen entsprechenden Betrag. Der Bohrbarkeitswert wurde für die einzelnen Einheiten anhand der in Kap. 4.4.7 vorgestellten Kriterien festgesetzt.

8.2.4 Berechnungen im Programm

8.2.4.1 Berechnung der Schichtanteile

Die Bewertung eines Standortes beruht auf der Berechnung der Mächtigkeitsanteile jeder Schicht, die in einer Bohrung bis zur gewünschten Tiefe angetroffen wird. Jede einzelne Schicht hat einen bestimmten Einfluß auf die Gesamtbewertungszahl. Je höher die anteilige Mächtigkeit der Schicht am Gesamtprofil, desto höher ist dieser Einfluß. Durch die Multiplikation des Anteils mit den Bewertungsfaktoren wird der Einfluß qualitativ festgelegt. Der grundwassererfüllte und der grundwasserfreie Anteil jeder einzelnen Schicht kann aus den Bestandteilen des Untergrundmodelles (s. Tabelle 8-5) berechnet werden. Die Berechnung der Schichtanteile beruht auf einfachen Verknüpfungen der Grenzflächen Geländehöhe, Grundwasserspiegel und Schichtgrenzen (über NN). Diese einfachen Berechnungen gelten allerdings immer nur für bestimmte Fälle, die zunächst für jeden Punkt ermittelt werden müssen. Wie in Abbildung 8-7 gezeigt wird, können die verschiedenen Grenzflächen unterschiedliche Positionen relativ zueinander einnehmen. Die Berechnungen verlaufen weitgehend analog wie die im Einführungsbeispiel beschriebenen (vgl. Kap. 8.1.1.2), sind aber aufgrund der höheren Anzahl geometrischer Konstellationen etwas komplizierter. Abbildung 8-7 zeigt eine Auswahl unterschiedlicher Konstellation, die die geometrischen Eingabeparameter des Schichtenmodell zueinander einnehmen können:

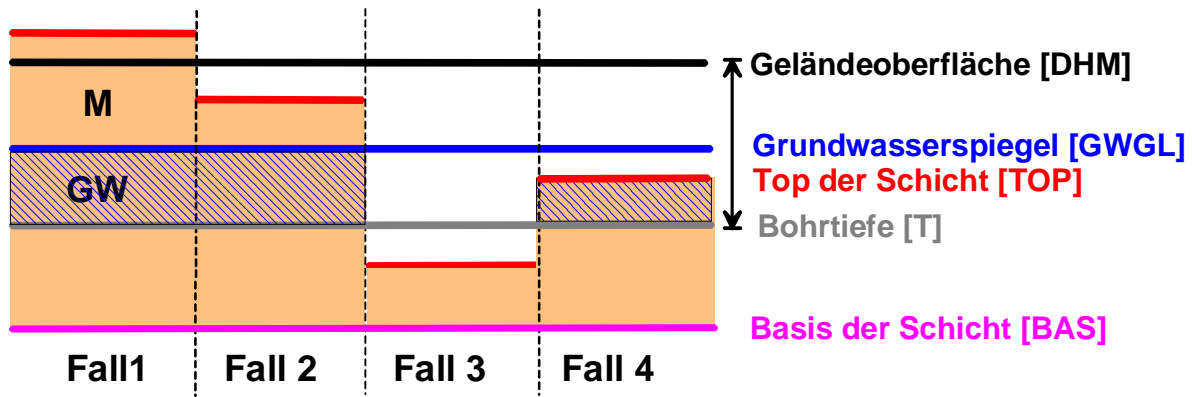


Abbildung 8-7: Unterschiedliche Konstellationen der für die Berechnung von Schichtanteilen maßgeblichen Eingabegrößen Geländeoberfläche, Top und Basis von Schichten und Grundwasserspiegel. **M:** grundwasserfreier Anteil der Schicht, **GW:** grundwassererfüllter Anteil der Schicht. Die vier gezeigten Fälle stellen nur eine Auswahl aller möglichen Konstellationen dar. Eine komplette Übersicht über alle vorkommenden Fälle gibt Tabelle 8-9.

In **Fall 1** liegt das Top der Schicht ([TOP]) über der Geländeoberfläche, die Basis ([BAS]) unterhalb der gewünschten Bohrtiefe (T). Damit wird der gesamte Bereich bis in die Bohrtiefe T von dieser einzigen Schicht eingenommen. Der Grundwasserspiegel ([GWGL]) liegt über T, so daß die Schicht in einen grundwassererfüllten (GW) und einen grundwasserfreien (M) Bereich aufgeteilt wird. Die Berechnung der Anteile erfolgt nach:

$$M = [DHM] - [GWGL]$$

$$GW = [GWGL] - [T]$$

In **Fall 2** liegt das Top der Schicht unter Gelände. Damit besteht das Bohrprofil aus mindestens zwei Schichten. Die Berechnung der Anteile für die gezeigte Schicht erfolgt nach:

$$M = [TOP] - [GWGL]$$

$$GW = [GWGL] - [T]$$

In **Fall 3** liegt das Top der Schicht unterhalb der Bohrtiefe T, so daß die Schicht keinen Anteil an einem Bohrprofil bis in T hat:

$$M = 0$$

$$GW = 0$$

In **Fall 4** liegt das Top der Schicht unter der Grundwasseroberfläche, so daß der Anteil der Schicht, der im Bohrprofil bis zur Bohrtiefe T auftritt, vollständig grundwassergefüllt ist.

$$M = 0$$

$$GW = [TOP] - [T]$$

Diese vier Fälle stellen nur eine Auswahl dar. Insgesamt sind bei zwei festen ([DHM], [T]) und drei relativ zu den anderen verschiebbaren Grenzflächen ([TOP], [BAS], [GWGL]) eine Vielzahl verschiedener Fälle denkbar. Legt man zugrunde, daß der Grundwasserspiegel nicht über Geländeoberfläche liegen kann (das Untergrundmodell sieht diesen Fall nicht vor), so können insgesamt 10 relevante Fälle auftreten. Für jeden dieser Fälle gilt, ebenso wie für die vier in Abbildung 8-7 gezeigten, eine andere Berechnungsvorschrift. Alle Fälle und die zugehörigen Berechnungsformeln sind in Tabelle 8-9 wiedergegeben:

Fall / Bedingung Ebene 1	Unterfall / Bedingung Ebene x1	Unterfall / Bedingung Ebene xx1	Unterfall / Bedingung Ebene xxx1	Berechnung Anteil mit GW [GW]	Berechnung Anteil ohne GW [M]	Erläuterung	Fall	
[BAS] > [DHM]	keiner	keiner	keiner		[M] = 0	Schicht liegt über Gelände (kommt nicht vor)	--	
[TOP] < [T]	keiner	keiner	keiner		[M] = 0	Schicht liegt unter Bohrtiefe T (kommt nicht vor)	--	
[BAS] < [DHM] AND [TOP] > [T] bed1	[BAS] > [T]; bed11	[TOP] < [DHM]; bedxx1	[GWGL] <= [BAS]; bedxxx1	[GW] = 0	[M] = [TOP] - [BAS]	Schicht liegt voll im Teufenbereich T	und enthält kein Grundwasser	1
			[GWGL] > [TOP]; bedxxx2	[GW] = [TOP] - [BAS]	[M] = 0		und liegt voll im Grundwasser	2
			[GWGL] > [BAS] AND [GWGL] <= [TOP]; bedxxx3	[GW] = [TOP] - [GWGL]	[M] = ([TOP] - [BAS]) - [GW]		und liegt teilweise im Grundwasser	3
		[TOP] >= [DHM]; bedxx2	[GWGL] <= [BAS]	[GW] = 0	[M] = [DHM] - [BAS]	Teil der Schicht liegt über GOK	und enthält kein Grundwasser	4
			[GWGL] > [BAS] AND [GWGL] <= [TOP]	[GW] = [GWGL] - [BAS]	[M] = ([DHM] - [BAS]) - [GW]		und liegt teilweise im Grundwasser	5
		[BAS] <= [T]; bed12	[TOP] < [DHM]	[GWGL] > [TOP]	[GW] = [TOP] - [T]	[M] = 0	Teil der Schicht liegt unter dem Teufenbereich T	und liegt voll im Grundwasser
	[GWGL] > [BAS] AND [GWGL] <= [TOP]			[GW] = [GWGL] - [T]	[M] = ([TOP] - [T]) - [GW]	und liegt teilweise im Grundwasser		7
	[GWGL] <= [BAS] OR [GWGL] <= [T]; bedxxx4			[GW] = 0	[M] = [TOP] - [T]	und enthält kein Grundwasser		8
	[TOP] >= [DHM]		[GWGL] > [BAS] AND [GWGL] <= [TOP]	[GW] = [GWGL] - [T]	[M] = T - [GW]	Teufenbereich T wird komplett von Schicht eingenommen	und liegt teilweise im Grundwasser	9
			[GWGL] <= [BAS] OR [GWGL] <= [T]	[GW] = 0	[M] = T		und enthält kein Grundwasser	10

Tabelle 8-9: Fälle, „Unterfälle“ und zugehörige Berechnungsformeln für die Berechnung der Anteile einer Schicht an einem Bohrprofil bis zur Teufe T. Die angegebenen Parameter und Abkürzungen werden in Tabelle 8-5 erläutert. Die Bezeichnung „bed1, bedxx1“ usw. sind Kurzformen der Bedingungen, die als Variablen im Programmcode der Avenue-Anwendung verwendet wurden (s. Codebeispiel 8-1 bis -3). T bedeutet Bohrtiefe in Metern (numerisch), dagegen kennzeichnet [T] die Fläche [DHM]-T, also die entsprechende Tiefe unter GOK.

Das Berechnungsprogramm geht wie folgt vor: In einer Schleife werden nacheinander alle Schichten abgefragt. Zunächst wird geprüft, ob eine Schicht im Teufenbereich T überhaupt auftritt. Dies erfolgt über die Abfrage [BAS] < [DHM] (Basis der Schicht liegt unter Gelände \Rightarrow Schicht vorhanden) und [TOP] > [T] (Top der Schicht liegt über der Bohrtiefe T \Rightarrow Schicht im zu untersuchenden Teufenbereich). Sind diese beiden Bedingungen erfüllt (bed1 in Tabelle 8-9), so befindet sich mindestens ein Teil der Schicht im untersuchten Teufenbereich. Dann werden nacheinander alle Fälle, die in Tabelle 8-9 aufgelistet sind, untersucht. Im Codebeispiel 8-1 wird in einem vereinfachten Programmcode (Avenue) die programmiertechnische Umsetzung der oben beschriebenen Überlegungen wiedergegeben. Der vollständige Original-Code ist im Anhang aufgelistet.

for each SCHICHT in Schichtentabelle	'Schleife für alle Schichten in Tabelle 8-6
if (([BAS]<[DHM]) and([TOP]>[T])) then	'bed1
if ([BAS]>[T]) then	'bed11
if ([TOP]<[DHM]) then	'bedxx1
if ([GWGL]<=[BAS]) then	'Fall 1
[GW]=0	
[M]=[TOP]-[BAS]	
elseif ([GWGL]>[TOP]) then	'Fall 2
[GW]=[TOP]-[BAS]	
[M]=0	
elseif (([GWGL]>[BAS]) and ([GWGL] <=[TOP])) then	'Fall 3
[GW]=[TOP]-[GWGL]	
[M]=([TOP]-[BAS])-[GW]	
end	
elseif([TOP]>=[DHM]) then	'bedxx2
if ([GWGL]<=[BAS])then	'Fall 4
[GW]=0	
[M]=[DHM]-[BAS]	
elseif (([GWGL]>[BAS]) and ([GWGL] <=[TOP])) then	'Fall 5
[GW]=[GWGL]-[BAS]	
[M]=([DHM]-[BAS])-[GW]	
end	
end	
elseif ([BAS]<=[T]) then	'bed12
if ([TOP]<[DHM]) then	'bedxx1
if ([GWGL]>[TOP]) then	'Fall 6
[GW]=[TOP]-[T]	
[M]=0	
elseif (([GWGL]>[BAS]) and ([GWGL] <=[TOP])) then	'Fall 7
[GW]=[GWGL]-[T]	
[M]=([TOP]-[T])-[GW]	
elseif(([GWGL]<=[BAS]) or ([GWGL]<=[T])) then	'Fall 8
[GW]=0	
[M]=[TOP]-[T]	
end	
elseif([TOP]>=[DHM]) then	'bedxx2
if (([GWGL] > [BAS]) and ([GWGL]<=[TOP])) then	'Fall 9
[GW]=[GWGL]-[T]	
[M]=T-[GW]	
elseif (([GWGL]<=[BAS]) and ([GWGL] <=[T])) then	'Fall 10
[GW]=0	
[M]=T	
end	
end	
end	
end	
end	

Codebeispiel 8-1: Umsetzung der in Tabelle 8-9 angegebenen Bedingungen und Berechnungsformeln in (vereinfachtem) Programmcode (Avenue, ArcView GIS 3.2). Berechnet werden grundwassererfüllter [GW] und grundwasserfreier Anteil [M] einer Schicht an **einem Punkt** (vom Benutzer beliebig per Mausklick auf dem Bildschirm wählbar) bei einer Bohrtiefe T. Die Lage der Schicht im Raum wird durch die Parameter [TOP] (Top/NN) und [BAS] (Basis/NN) und M (Mächtigkeit) festgelegt. Der Grundwasserspiegel/NN wird durch [GWGL] angegeben. Die Eingabeparameter werden in Tabelle 8-5 erläutert.

Zur Bestimmung eines **theoretischen Bohrprofils** (alle Schichten) bzw. zur Standortbewertung wird der Code in einer Schleife für alle in der Schichtdatentabelle (Tabelle 8-6) enthaltenen Schichten ausgeführt. Analog, allerdings weitaus aufwendiger, verläuft die flächenhafte Berechnung von Schichtanteilen **für alle Punkte** eines größeren Bereichs. Dann enthalten die Variablenwerte [DHM], [TOP] usw. nicht mehr einzelne

Zahlenwerte, sondern stellen für den Beispielausschnitt Grids (Raster) aus bis zu 64000 Einzelwerten dar (vgl. Codebeispiel 8-2 und 8-3).

Bei Berechnungen für ganze Flächen (Raster) kann deshalb das in Codebeispiel 8-1 gezeigte Schema nicht angewendet werden. Wie in Kap. 8.1.1.1 gezeigt wurde, sind beim Rechnen mit Rastern Abfragen vom „if-then-else“-Typ nicht möglich, da für jeden Punkt jedes einzelnen Grids unterschiedliche Gegebenheiten vorliegen. Hier erfolgen die Abfragen durch die Erzeugung von Grids, die dort, wo eine bestimmte Bedingung erfüllt ist, den Wert 1 erhalten; wo die Bedingung nicht erfüllt ist, den Wert 0. Logische Verknüpfungen (AND, OR) müssen durch Multiplikation und Addition ersetzt werden. Im folgenden Beispiel (Codebeispiel 8-2) wird demonstriert, inwiefern sich Berechnungsmethoden für Einzelpunkte und Raster unterscheiden:

Aufgabenstellung: Wenn Parameter A am Punkt P(x,y) größer oder gleich Parameter B ist, dann lautet die Berechnungsvorschrift für den Wert Z an P(x,y) : Z=A+B; wenn A < B, dann lautet sie Z=A-B	
Einzelpunkte	Raster
Erläuterung: a und b sind die Werte der Parameter A und B am Punkt P mit den Koordinaten (x,y); z das zu berechnende Ergebnis für den gleichen Punkt.	Erläuterung: Es liegt je ein(e) Raster(karte) mit der flächenhaften Verteilung der Parameter A und B (Kennzeichnung [A] und [B]) vor. Als Ergebnis wird eine flächenhafte Verteilung des Parameters Z berechnet ([Z]).
Lösung: Anweisung: if a ≥ b then z=a+b elseif a<b then z=a-b end	Lösung: 1. Erzeugung von binären Rastern [C] und [D], die die Bedingung wiedergeben: [C] = [A] ≥ [B] [D] = [A] < [B] (bedeutet. [C] und [D] sind gleich 1 an den Stellen, wo die Bedingung erfüllt ist, und 0, wo sie nicht erfüllt ist.) 2. Berechnung der Teilergebnisse [Z]_{1,2}: Durch die Multiplikation mit den binären Rastern [C] und [D] wird an Stellen, die die Bedingungen jeweils nicht erfüllen, der Wert Null bestimmt. Alle anderen erhalten den Wert je nach Anweisung: [Z] ₁ =[A]+[B]*[C] für die Bedingung 1: A≥B [Z] ₂ =[A]-[B]*[D] für die Bedingung 2: A<B 3. Berechnung des Ergebnistrasters [Z]: Durch die Addition der Teilergebnisse [Z] ₁ und [Z] ₂ entsteht das Ergebnistraster [Z], das an jeder Stelle den Wert enthält, der in der Aufgabenstellung gefragt war. [Z]=[Z] ₁ + [Z] ₂

Codebeispiel 8-2: Schematisiertes Beispiel für die unterschiedliche programmiertechnische Umsetzung bei Berechnungen für Einzelpunkte eines Rasters und für die gesamte Rasterfläche. A und B stellen Parameter dar, die auf der betrachteten Fläche unterschiedliche Werte annehmen können. A kann bereichsweise größer, kleiner oder gleich B sein. Während Einzelwerte an bestimmten Punkten einfach über Abfragen vom „if-then-else“-Typ berechnet werden können, müssen gleichartige Berechnungen, die für alle Werte des ganzen Rasters ([]) durchgeführt werden sollen, in einzelne Schritte aufgelöst werden.

Um die anteiligen Schichtmächtigkeiten zu berechnen, werden für jeden der in Tabelle 8-9 angegebenen Fälle „Bedingungsgrids“ erzeugt, die dort, wo der entsprechende Fall vorliegt, den Wert 1 haben. Nach der dem Fall zugehörigen Berechnungsvorschrift werden dann die Mächtigkeiten für den grundwassererfüllten und grundwasserfreien Anteil der Schicht berechnet und mit den Bedingungsgrids multipliziert. Alle auf diese Weise entstandenen Einzelgrids werden aufaddiert, so daß zwei Grids entstehen, die an jedem Punkt der betrachteten Fläche jeweils die Mächtigkeit des grundwasserfreien und des grundwassererfüllten Anteils angeben. Diese Grids werden dann durch die Bohrtiefe T dividiert, und man erhält für jeden Punkt den prozentualen Anteil einer Schicht (grundwassererfüllt, grundwasserfrei) an einem (theoretischen) Bohrprofil.

In Codebeispiel 8-3 wird anhand der ersten beiden Fälle nach Tabelle 8-9 demonstriert, wie das eben geschilderte Verfahren in Programmcode umgesetzt werden kann:

```

*****
Festlegung der Bedingungen (hier nur für Fall 1 und Fall 2 nach Tabelle 8-9):
*****
bed1 = ([BAS] < [DHM] ) * ([TOP] > T)           'alle Gebiete, in denen die Schicht im Teufenbereich T liegt,
bed11 = [BAS] > T                               'erhalten den Wert 1
bedxx1 = [TOP] < [DHM]
bedxxx1 = [GWGL] <= [BAS]
bedxxx2 = [GWGL] > [TOP]
bed2= ...                                       'hier folgt die Berechnung aller
bed12=....                                     'Bedingungen (bed...) nach Tabelle 8-9
*****
Berechnung der anteiligen Mächtigkeit (M_(i): ohne-; GW_(i): mit Grundwasser
*****
M_1 = ([TOP] - [BAS])*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx1           'Fall 1
GW_1=0.AsGrid
M_2=0.AsGrid                                             'Fall 2
GW_2=([TOP] - [BAS])*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx2
M_3=...
GW_3= .... usw.
*****
Berechnung des Ergebnisgrids (enthält die Mächtigkeit einer Schicht bis zur Bohrtiefe T für alle Punkte der Karte)
durch Addition aller 10 Fälle jeweils für den grundwassererfüllten und grundwasserfreien Anteil.
*****
M = M_1+M_2 ...+M_10                                     'Anteil ohne GW
GW = GW_1+M_2 ...+GW_10                                 'Anteil mit GW
*****
Dieses Verfahren muß für alle 14 in der Schichtdatentabelle enthaltenen Einheiten durchlaufen werden. Dazu
müssen aus den Eingabegrids jeweils zuerst die Grids für [TOP], [BAS] usw. berechnet werden.

```

Codebeispiel 8-3: Berechnungsverfahren für die flächenhafte Bestimmung von Schichtanteilen, vereinfachter Auszug aus dem Programmcode. Die Berechnung erfolgt hier für die beiden Fälle 1 und 2 aus Tabelle 8-9. Vgl. dazu Codebeispiel 8-3. Der vollständige Programmablauf für die flächenhafte Bewertung ist nur bei einer intensiven Befassung mit der Problemstellung nachzuziehen (Anhang).

Die Bestimmung der Bewertungszahl erfolgt ab hier analog zur Berechnung der Bewertung für einen Einzelpunkt. Die berechneten Grids, die die prozentualen Anteile beinhalten, werden mit den in der Datentabelle für diese Schicht abgelegten Bewertungsfaktoren multipliziert. Wurde das Verfahren für alle 14 Schichten durchlaufen, werden die Bewertungszahlen aller Schichten für jeden Punkt addiert und man erhält ein Bewertungsgrid, das für jeden Punkt die Gesamtbewertungszahl für die Erdsondenwärmespeicherung angibt (vgl. Abbildung 8-13). Diese Bewertungszahl gilt nur für die angegebene Tiefe.

Etwas aufwendiger gestaltet sich bei der flächenhaften Berechnung die Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit, da diese nicht über das ganze Gebiet konstant ist und sich je nach ihrer Größe positiv oder negativ auf die Bewertungszahl auswirken kann (vgl. Tabelle 8-8). Hierfür gibt es programmiertechnische Lösungen, mit denen das Problem formal behandelt werden kann. Diese Lösungen sind aber letztlich bedeutungslos, weil die Datengrundlage die sinnvolle Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit nicht zuläßt. Die entsprechenden Anweisungen sind dem Script 2_Flaechenbewertung im Anhang zu entnehmen.

8.2.4.2 Berechnung der Bewertungszahl

Wenn für den gewählten Einzelpunkt bzw. für alle Punkte der gewählten Fläche (flächenhafte Bearbeitung) die anteiligen Mächtigkeiten der grundwassererfüllten und grundwasserfreien Bereiche der Schichten bestimmt wurden, erfolgt die Berechnung der Gesamtbewertungszahl. Die prozentualen Schichtanteile werden mit den Bewertungsfaktoren multipliziert und aufaddiert. Die resultierende Gesamtbewertungszahl kann entweder in Kartenform für alle Punkte des bearbeiteten Gebiets dargestellt (Programmteil zur flächenhaften Bewertung; vgl. Abbildung 8-11) oder für den jeweiligen Punkt abgerufen werden.

Anhand von Tabelle 8-10 wird das Berechnungsschema der Bewertungszahl für eine 50m tiefe Bohrung, in der drei Schichten (A, B und C) angetroffen werden, gezeigt:

Bohrtiefe (T) = 50m	Schicht	Mächtigkeit (M _{ges})	Anteil am Bohrprofil (M _{ges} / T)	Anteil GW-frei (M)	LW	AW	BW	M*GW*LW*AW*BW
				GW-erfüllt (GW)				
GW-Spiegel unter GOK: 25m	A	20	0.4	0.4	1.8	1	1.5	1.08
				0	1.8	1.5	1.5	0
	B	15	0.3	0.1	0.6	1	1.3	0.078
				0.2	0.6	-2	0.7	-0.1512
	C	15	0.3	0	1.1	1	0.7	0
				0.3	1.1	1.9	0.7	0.4389
Gesamtbewertungszahl Σ *100:								145

Tabelle 8-10: Beispiel für die Berechnung der Bewertungszahl für einen hypothetischen Fall. In einer Bohrung am gewünschten Standort bis in 50m Tiefe werden die drei Schichten A, B, und C angetroffen. Ihre Anteile an der Gesamtteufe werden mit den Bewertungsfaktoren (vgl. Tabelle 8-7) multipliziert und die Ergebnisse aufaddiert. Wesentlich ist dabei, daß der gesättigte und der ungesättigte Anteil der Schicht unterschiedlich behandelt werden.

Im Beispiel liegt der Grundwasserspiegel 25m unter Gelände, so daß die Schicht A kein Grundwasser führt, Schicht B teilweise- und C ganz von Grundwasser erfüllt ist. Im Berechnungsbeispiel hat Schicht A gute Gesamteigenschaften (FW = 1,8), ist ein „nicht vollkommener“ Aquitard (AW = 1,5) und weist eine gute Bohrbarkeit auf (BW = 1,5). Bei Schicht B, die als „guter“ Aquifer den Faktor AW = -1,9 erhält, kommt dieser stark negative Faktor nur im grundwassererfüllten Bereich zur Anwendung⁷¹. Im grundwasserfreien Anteil hat er keine Bedeutung und wird 1.

Weiterhin wird im grundwassererfüllten Anteil der Faktor für die Bohrbarkeit auf:

$$BW_{GW} = (-1) * BW$$

gesetzt um zu verhindern, daß eine gute Bohrbarkeit eine Verschlechterung bzw. eine schlechte Bohrbarkeit eine absolute Verbesserung der Gesamtbewertung erzeugt.

Die mit den Faktoren multiplizierten Schichtanteile werden zur Gesamtbewertungszahl aufsummiert. Diese gilt für den jeweiligen Punkt und die vorgegebene Bohrtiefe. Bei anderen Bohrtiefen kann sich diese Bewertungszahl für den gleichen Punkt erheblich ändern. Das Ergebnis von 145 für die Bewertung des Standortes muß nun noch kategorisiert bzw. „kalibriert“ werden (vgl. Kap. 6.4.4 und 8.2.5).

8.2.4.3 Einbeziehung rechtlicher Fragestellungen

In Kap. 3.6 wurde erläutert, wie sich rechtliche Limitierungen auf die Eignung eines Speicherstandortes auswirken. Da diesen rechtlichen Bestimmungen eine hohe Bedeutung zukommt, ist es sinnvoll, sie in eine automatisierte Gesamtbewertung einzubeziehen.

Grundsätzlich kann das Bewertungsprogramm der Datenbasis entnehmen, ob sich der gewählte Punkt bzw. welche Bereiche der zur Bewertung ausgewählten Fläche sich in einem Wasserschutzgebiet befinden. Diese Feststellung ist trivial und bedarf keiner Erläuterung der programmiertechnischen Umsetzung. Komplexer ist dagegen die Einbeziehung derjenigen Limitierungen, die sich durch die Vorschrift ergeben, daß weder tieferer noch gespannte Grundwasserleiter erbohrt werden sollen. Hierzu muß das Untergrundmodell bezüglich der relativen Lage (potentieller) Aquifere zueinander sowie im Bezug zur Grundwasseroberfläche ausgewertet werden. Maßgeblich ist hierbei die Frage, ob bei der gewünschten Bohrtiefe ein gespannter oder tieferer Grundwasserleiter erreicht wird.

⁷¹ Für den Standardfall, daß die tatsächliche Grundwasserfließgeschwindigkeit nicht berücksichtigt wird (vgl. **Tabelle 8-8**).

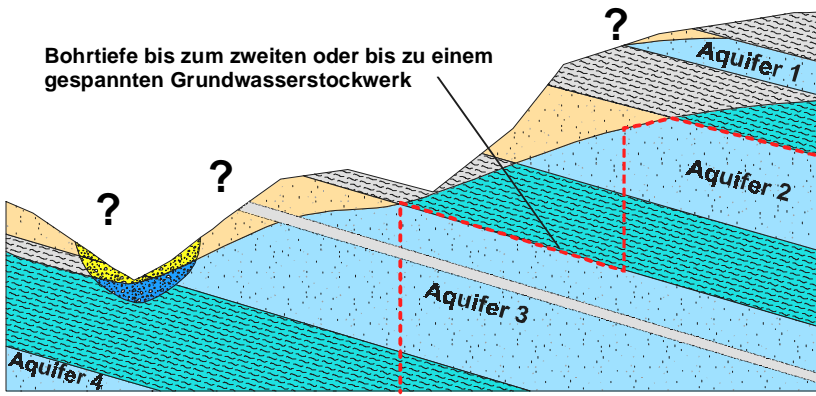


Abbildung 8-8: Ermittlung der Bohrtiefe bis zu einem gespannten oder „tiefen“ (zweiten) Grundwasserstockwerk. In der Skizze ist die entsprechende Tiefe „Rechtsgrenze“ (Grenzfläche, die nicht durchbohrt werden soll) markiert. Fraglich ist, wie in diesem Zusammenhang schwebende, quartäre („diskordante“) und geringmächtige Grundwasserleiter bzw. trennende Horizonte behandelt werden sollen. Zu beachten: Hydrogeologische Modellvorstellung nach Abbildung 7-19.

Die Tiefenlage dieser „Rechtsgrenze“ wird nach dem in Abbildung 8-8 gezeigten Schema ermittelt. Im 3- bzw. 2½-dimensionalen Fall kann dies allerdings nicht mehr durch visuelle Beurteilung, sondern nur durch eine mathematische Behandlung erfolgen. Die Formulierung der dazu notwendigen Abfragen erfordert eine Reihe von einfachen Überlegungen (Tabelle 8-11):

Frage	Antwort	Abfrage-Formulierung
Wann ist ein Aquifer (nach den Modellvorstellungen) gespannt und gleichzeitig der oberste gespannte Aquifer?	Ein Aquifer ist gespannt, wenn sein Top unter der Grundwasseroberfläche liegt. Er ist der oberste gespannte Aquifer, wenn der darüberliegende ungespannt ist.	$[Top_{A_{x-1}}] > [GWGL]$ AND $[Top_{A_x}] < [GWGL]$
Wann ist ein Aquifer ein „tieferer“ Aquifer bzw. das zweite Grundwasserstockwerk?	Wenn zwischen seinem Top und der Geländeoberfläche die Basis von mindestens einem weiteren (grundwassererfülltem, vgl. aber auch Abbildung 8-9) Aquifer liegt.	$[Bas_{A_{x-1}}] > [GWGL]$ AND $[Bas_{A_{x-1}}] < [DHM]$ AND $[Bas_{A_x}] < [GWGL]$

Tabelle 8-11: Grundlegende Überlegungen zur rechnerischen Ermittlung der Tiefenlage von gespannten und tieferen Stockwerken. (A_x = betrachteter Aquifer, A_{x-1} darüberliegender Aquifer, vgl. Abbildung 8-9).

Die Frage nach dem tieferen Grundwasserleiter ist überflüssig, wenn per Definition ein Grundwasserstockwerk nur dann als solches betrachtet wird, wenn es auch wirklich Grundwasser enthält. In diesem Fall wäre bei einem Modell, das von einem einheitlichen Grundwasserspiegel für alle Grundwasserstockwerke ausgeht, jedes Stockwerk, das an einem Standort das zweite Stockwerk bildet, gleichzeitig auch ein gespanntes. Man kann bei Festlegung dieser Definition also auf die Frage nach dem tieferen Grundwasserstockwerk verzichten und ausschließlich die Tiefenlage des obersten gespannten Grundwasserleiters zum Kriterium für die maximal (rechtlich) mögliche Bohrtiefe machen. Abbildung 8-9 erläutert dies näher.

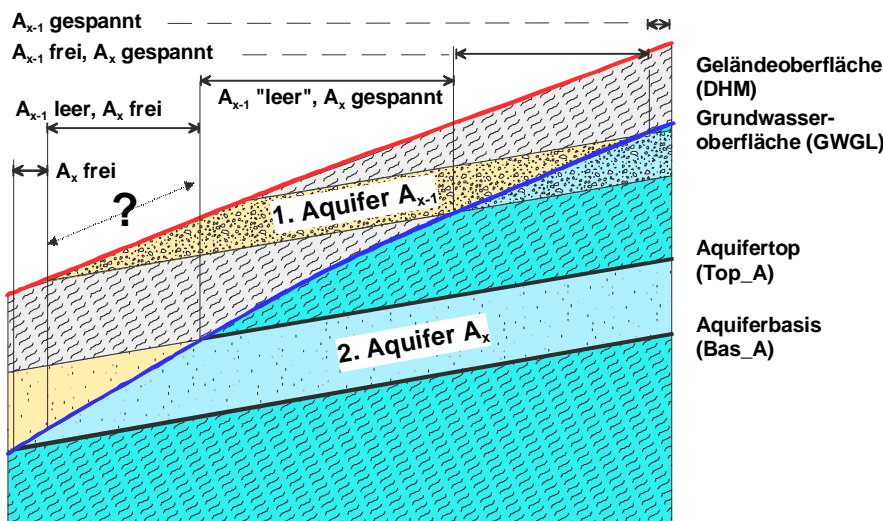


Abbildung 8-9: Mögliche Konstellationen von zwei Grundwasserstockwerken bezüglich der Zustände gespannt-ungespannt und der Stellung als 1. oder 2. Stockwerk. Fraglich ist die Behandlung von Bereichen, in denen zwei Aquifere übereinander liegen, wobei der obere oberhalb des Grundwasserspiegels liegt (kein Grundwasser enthält) und der untere ungespannt ist (mit „?“ gekennzeichnet). Zu beachten: Hydrogeologische Modellvorstellung nach Abbildung 7-19.

Anhand der in Tabelle 8-11 vorgestellten Überlegungen kann die maximal mögliche Bohrtiefe bis zum Erreichen eines gespannten oder des tieferen Stockwerkes durch eine Kombination verschiedener Abfragen und

Berechnungen durchgeführt werden. Maßgeblich sind dabei die in Abbildung 8-9 dargestellten Konstellationen. Da die Abfragen für jeden einzelnen Aquifer des Schichtenmodells durchgeführt werden müssen, gestaltet sich der Berechnungsvorgang aufwendig. Der prinzipielle Ablauf ist wie folgt:

- Schritt 1:** Feststellung der Verbreitung aller potentiellen Aquifere des Schichtenmodells.
Schritt 2: Feststellung, welcher Aquifer den jeweils obersten (potentiellen) Aquifer bildet.
Schritt 3: Feststellung, ob der oberste Aquifer gespannt ist bzw. ob er Grundwasser enthält (relative Lage der Grundwasseroberfläche zum Top der Schicht).
Schritt 4: Fallunterscheidungen: Ist der oberste Aquifer gespannt, so ist die Tiefenlage seines Tops maßgeblich. Ist der oberste Aquifer teilweise grundwassererfüllt, so ist die Tiefenlage des Tops des nächsttieferen Aquifers maßgeblich. Ist er „leer“, muß die gleiche Fallunterscheidung für den nächsttieferen Aquifer durchgeführt werden usw.
Schritt 5: Kombination aller Ergebnisse aus Schritt 4. Für alle Bereiche Festlegung, welcher Aquifer der oberste gespannte bzw. (je nach Definition, siehe Abbildung 8-9) und der zweite grundwassererfüllte ist.
Schritt 6: Berechnung der Tiefenlage der Tops dieser Aquifere.
Schritt 7: Kombination der so berechneten Tiefenwerte für einzelne Bereiche zu einem Gesamtgrid.

Abbildung 8-10 zeigt das Ergebnis der Berechnung für den Beispielausschnitt:

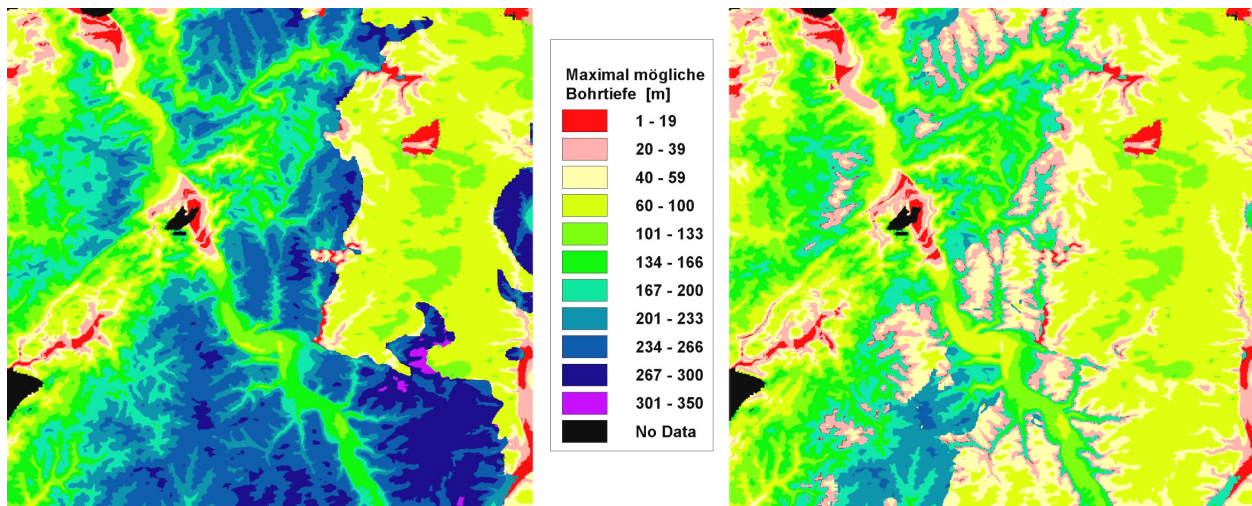


Abbildung 8-10: Maximal mögliche Bohrtiefe bis zur Erreichung einer „Rechtsgrenze“ im Beispielausschnitt. **Links:** Ein Grundwasserstockwerk wird nur dann als solches behandelt, wenn es ganz oder teilweise grundwassererfüllt ist. **Rechts:** Alle vorhandenen (auch „leere“) Grundwasserstockwerke werden berücksichtigt (vgl. Abbildung 8-9). Beachte: die maximal mögliche Bohrtiefe sinkt bereichsweise beträchtlich. Schwebende Grundwasserstockwerke werden nicht berücksichtigt.

Die Betrachtung der Fragestellung nach den gespannten und tieferen Grundwasserleitern bleibt letztlich sehr theoretisch:

1. Was ein „tieferer“ oder „gespannter“ Grundwasserleiter tatsächlich ist, ist Ermessensfrage und stark von der individuellen Standortsituation im Hinblick auf anderweitige Nutzungen (Trinkwasser) bzw. bestehende Verunreinigungen abhängig. Grundsätzlich problematisch ist die Definition, wann eine Schicht überhaupt ein echtes Grundwasserstockwerk darstellt, insbesondere dann, wenn zahlreiche geringmächtige grundwasserführende Horizonte auftreten oder die Stockwerkstrennung lokal unterbrochen wird.
2. Das vorliegende Untergrundmodell beschreibt die tatsächlichen Verhältnisse nicht ausreichend gut für eine verlässliche Beurteilung.

Aus diesen beiden Gründen ist es vollkommen ausgeschlossen, die rechtliche Situation eines Standortes mit Hilfe eines GIS im Sinne einer Vorabbewertung **zweifelsfrei** zu bewerten. Im Bewertungskonzept werden die rechtlichen Fragen deshalb nicht in die Gesamtbewertung integriert, sondern parallel zur geologischen Bewertung als Hinweis ausgegeben (siehe Tabelle 8-16).

Prinzipiell ist es nicht notwendig, die Berechnung der maximalen Bohrtiefe (vgl. Abbildung 8-10) bei jedem Bewertungsvorgang (Programmdurchlauf) neu durchzuführen, da sie, vorausgesetzt die Eingabeparameter des Untergrundmodells werden nicht geändert, konstant ist. Der entsprechende Wert für die maximale Bohrtiefe kann deshalb aus einem in der Datenbasis enthaltenen Grid ([RECHT]) ausgelesen werden. Um die Möglichkeit zu berücksichtigen, daß an den qualitativen oder geometrischen Eigenschaften des Schichtenmodells Änderungen vorgenommen werden (müssen), ist die Berechnung der Tiefenlage der „Rechtsgrenze“ aber auch im Programm individuell möglich.

Im Programm wird abgefragt, ob die vom Benutzer gewünschte Bohrtiefe tiefer liegt als diese „Rechtsgrenze“. Ist dies der Fall, so wird ein entsprechender Hinweis ausgegeben (bei Punktbewertungen) oder die Bewertung auf „ungeeignet“ gesetzt (flächenhafte Bewertung). In einem Expertensystem könnte an dieser Stelle eine Funktion in Verbindung mit einer Benutzerinteraktion eingebaut werden, die eine automatische oder interaktive Neuanpassung der Auslegung (Bohrtiefe) an die vorgefundenen Bedingungen erlaubt. Als einfache Lösung wurde im Programmteil zur Bewertung von Einzelpunkten die Möglichkeit geschaffen, die Bewertung für eine Liste kleinerer und größerer Tiefenwerte zu rechnen und ausgeben zu lassen. So läßt sich einfach ermitteln, ob es sinnvoll ist, die Anlage auf eine andere Tiefenerstreckung auszulegen.

8.2.4.4 Berechnung von Bewertungskarten

Wie eingangs in Kap. 8.2.1 beschrieben, ist mit den erstellten Bewertungsmechanismen sowohl die Berechnung einer Bewertungszahl für einen Einzelpunkt als auch die Berechnung der flächenhaften Verteilung der Bewertungszahl möglich. Flächendeckend erzeugte Bewertungskarten können die Grundlage für Übersichtskarten (z.B. Potentialkarten; vgl. Kap. 6.2.3.1.1) darstellen, sind aber ansonsten aufgrund der begrenzten Möglichkeiten unterschiedliche Informationen gleichzeitig wiederzugeben, nicht von besonderem Wert. Sie werden hier vor allem dazu genutzt, bei Einzelpunktbewertungen die Bewertung in der näheren Umgebung des betrachteten Standortes darzustellen, was insbesondere in kritischen Bewertungsfällen (vgl. Kap. 8.2.5) hilfreiche Zusatzinformationen erbringt.

Die Abbildungen 8-11a,b zeigen das Ergebnis einer flächenhaften Berechnung der Eignung für Erdsondenspeicher mittlerer Größe (bis 50m Tiefe). In der Darstellung wurden rechtliche Aspekte miteinbezogen, d. h. Gebiete, in denen bei einer Bohrtiefe von 50m ein gespanntes oder tieferes Grundwasserstockwerk angetroffen wird, sind als „ungeeignet“ ausgewiesen. Abbildung 8-11a zeigt das unklassifizierte Berechnungsergebnis ohne die rechtlichen Einschränkungen, Abbildung 8-11b die nach Tabelle 8-13 klassifizierte „Eignungskarte“ unter Einbeziehung der rechtlichen Limitierungen.

Das Beispiel zeigt vor allem auch die limitierten Möglichkeiten einer Ausgabe der Ergebnisse in Form einer (Papier-)Karte. Aufgrund der Notwendigkeit, Kategorien zu bilden und der eingeschränkten Zahl von Informationen, die gleichzeitig in einer Karte dargestellt werden können, sinkt der Informationsgehalt beträchtlich (vgl. auch Kap. 6.2.1.4).

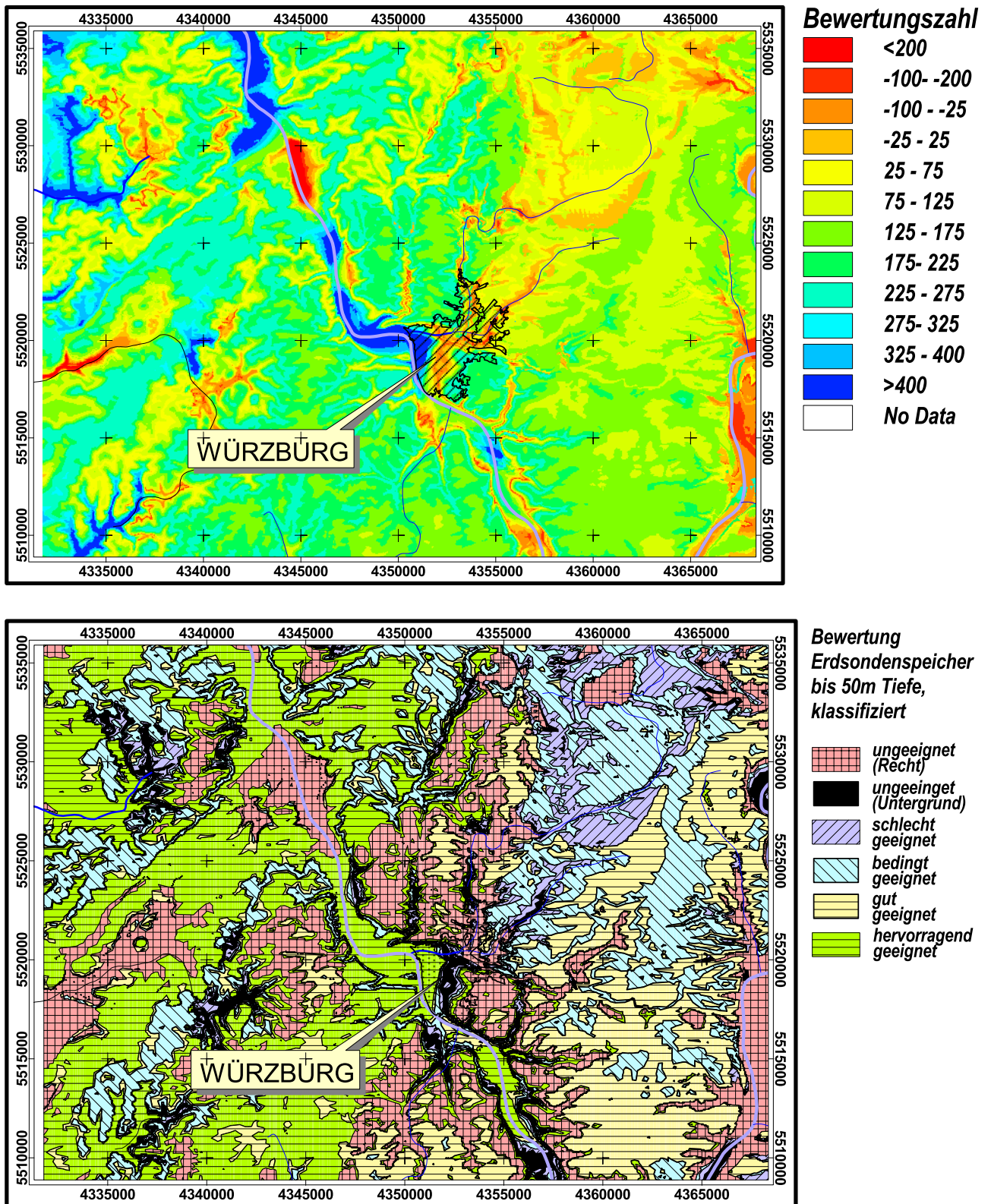


Abbildung 8-11a,b: Bewertungskarten für Erdspeicherspeicher bis 50m Tiefe, Teilbereich des Beispielausschnitts.

- a) „Unklassifizierte“⁷² Darstellung der berechneten Bewertungszahlen, rechtliche Limitierungen nicht berücksichtigt.
- b) Klassifiziert nach Tabelle 8-13. Als „ungeeignet – Recht“ werden diejenigen Gebiete klassifiziert, in denen bei einer Bohrtiefe von 50m ein gespanntes oder tieferes Grundwasserstockwerk angetroffen wird. Wasserschutzgebiete sind nicht dargestellt.

⁷² Eine ungewollte „Klassifikation“ ergibt sich bei der Ausgabe auf Papier letztlich aufgrund der begrenzten Anzahl der visuell unterscheidbaren Farben.

8.2.4.5 Berechnung abgeleiteter Parameter

Die Berechnung der anteiligen Mächtigkeiten von Horizonten für einen bestimmten Punkt oder für ganze Flächen ermöglicht auch die Bestimmung von Größen, die die Mächtigkeit als Parameter beinhalten. Beispielsweise bietet es sich an, die Transmissivität ($T = k_f \cdot M$ [m/s^2]) für das zu erwartende Profil als Summe der Produkte aus der anteiligen Mächtigkeit und dem k_f -Wert jeder beteiligten Schicht zu berechnen. Weiterhin können die mittlere Wärmeleitfähigkeit und die mittlere volumetrische Wärmekapazität für das Bohrprofil berechnet werden.

In der erstellten Anwendung wurde dies realisiert. Die Berechnung verläuft jeweils analog zur Berechnung des Bewertungsfaktors. Nach der Bestimmung des Anteils eines Horizonts am Bohrprofil wird dieser Anteil mit dem für diese Schicht in der Datentabelle abgelegten Wert des betreffenden Parameters multipliziert. Sind alle Schichten abgearbeitet, werden die Einzelwerte aufaddiert. Bei der Berechnung der thermischen Parameter wird jeweils danach unterschieden, ob die Schicht grundwassererfüllt ist. Die Transmissivität wird nur für den grundwassererfüllten Anteil bestimmt.

Berechnungen abgeleiteter Parameter bieten sich z.B. zur Erstellung von Karten mittlerer Wärmeleitfähigkeiten an. Solche Karten können als Planungsgrundlage für Erdsonden-Wärmepumpenanlagen dienen. Abbildung 8-12 zeigt einen entsprechenden Kartenausschnitt aus dem Beispielgebiet:

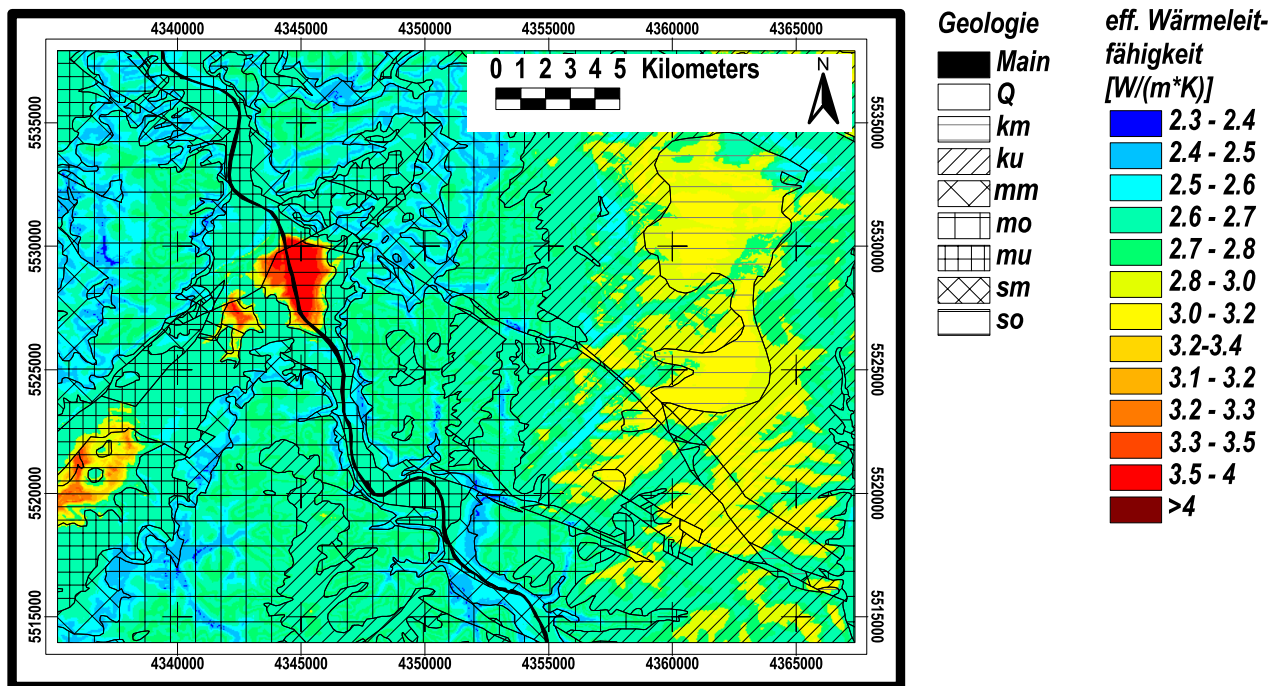


Abbildung 8-12: Mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit für jeweils 50m tiefe Bohrungen in einem Teilbereich des Beispielausschnitts. Deutlich hervortretend die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in den zentralen Bereichen des Thüngersheimer Sattels, wo bei Bohrtiefen von 50m immer größere Anteile der Sandsteinfohlen des so2 und sm angetroffen werden. Eine besondere Erhöhung ist in den wassergesättigten Bereichen im Maintal und anderen Gebieten mit geringem Grundwasserflurabstand festzustellen.

8.2.4.6 Bewertungsberechnungen für Erdwärmesonden zum Wärmeentzug

Darstellungen, wie die in Abbildung 8-12 gezeigte, können im Prinzip bereits zur Einschätzung der Eignung von Standorten für die Wärmegewinnung mit Erdwärmesonden herangezogen werden. Es ist darüberhinaus aber auch ohne größeren Aufwand möglich, die Programme zur Bewertungsberechnung für Flächen und Einzelstandorte, die hier für die Erdsondenwärmespeicherung vorgestellt wurden, für die Eignungsermittlung von Erdsonden-Wärmepumpenanlagen (EWS) heranzuziehen. Damit ist es möglich eine differenziertere Betrachtung unter Einbeziehung von Parametern wie der Bohrbarkeit und der Grundwasserbewegung auch für EWS vorzunehmen. Alle Optionen der Informationsbereitstellung, wie sie in Kap. 8.2.6 („Expertensystem“),

genannt werden, sind damit auch für dieses Verfahren nutzbar. Eine Erweiterung des Bewertungsprogramms für die Bewertung der Eignung von EWS erfordert lediglich eine Modifikation der Bewertungsfaktoren FW und AW (vgl. Tabelle 8-6). Die notwendigen Anpassungen des Formationsfaktors FW basieren i.W. auf den in Kapitel 5.3.1.1 vorgestellten Überlegungen. Die wesentlichen Anpassungen betreffen den Aquiferfaktor AW. Da Grundwasserbewegung für die Wärmegegewinnung grundsätzlich positiv ist, entfallen nun die negativen Werte des AW vollständig. Die positiven Werte werden neu festgelegt. Gut wasserwegsame Schichten erhalten bessere Faktoren (Tabelle 8-12).

Bezeichnung		Bewertungsfaktoren			
i	SCHICHT	BW	FW	AQU	AW
1	km	1	1.4	nein	1
2	ku2, kuW	1.3	1.5	ja	1.2
3	ku1, mo3	1.1	1.5	teils	1.1
4	mo3	1.3	1.5	teils	1.2
5	mo2, mo1	1.5	1.5	ja	1.4
6	mo1	1.3	1.2	nein	1
7	mm	0.5	0	nein	1
8	mu, mm	1.3	1.5	ja	1.6
9	mu	1.5	1.5	nein	1
10	so4T	0.8	1.5	nein	1
11	so4Q	1.1	2	ja	1.4
12	so3T	0.8	1.4	nein	1
13	so2,sm,su	1.2	2	ja	1.8
14	suB	0.5	0.9	nein	1

Tabelle 8-12: Anpassung der „Schichtdatentabelle“ (Ausschnitt von Tabelle 8-6) an die Bewertung von Standorten hinsichtlich der Eignung zur Wärmegegewinnung mit Erdsonden.

8.2.4.7 Bewertungsberechnungen für andere Verfahren

Durch Anpassungsmaßnahmen, wie sie im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurden, lassen sich die Bewertungsprogramme auch zur Bewertung der Eignung für Aquiferspeicher und grundwassergekoppelte Wärmepumpen (GWWP) heranziehen. Im Fall der Aquiferspeicher ist dies nicht sinnvoll, da solche Speicher im Untersuchungsgebiet ohnehin nicht möglich sind (vgl. Kap. 5.2.2), für eine Bewertung von GWWP fehlt im Untersuchungsgebiet die Datenbasis (Quartärmächtigkeiten und Grundwassergleichen im Mainquartär). Prinzipiell erfordert eine Bewertung solcher Verfahren gleichfalls nur eine Anpassung der Bewertungsfaktoren für die einzelnen Bewertungseinheiten des Untergrundmodells (analog zu Tabelle 8-12). Grundsätzlich scheidet bei den hier genannten Verfahren alle Aquitarden von der Nutzung aus. Ebenso wie bei den Verfahren mit geschlossenen Sonden kehren sich die Verhältnisse bezüglich der Bedeutung des Aquiferwerts AW bei Speicher- und Entzugsverfahren um.

8.2.5 Diskussion des Bewertungskonzepts

8.2.5.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Das hier vorgestellte Konzept zur automatisierten Bewertung von Standorten oder Flächen bezüglich ihrer Eignung zur thermischen Nutzung des Untergrundes (hier diskutiert am Beispiel EWS_{Sp}) erfüllt die meisten Voraussetzungen eines Bewertungssystems, wie sie Kap. 8.2.1 ermittelt wurden: es ist in der Lage, dreidimensional verteilte Untergrundparameter zu berücksichtigen, es kann auf unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Speichergröße reagieren und es ist flexibel im Hinblick auf die Neubewertung von Kriterien und eine geänderte Informationsbasis über den Untergrund. Trotz dieser Leistungen sind die Ergebnisse der automatisierten Bewertung in mehrerlei Hinsicht diskussionsbedürftig. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, daß die Bewertungsinstrumente sich in einer breiten Unsicherheitszone bewegen, solange sie nicht an konkreten Fällen eichbar sind. Dennoch bringen die Ergebnisse, obwohl nur auf Abschätzungen be-

ruhend, auch in der vorliegenden Form gute Hinweise auf die Eignung von Standorten. Um diese richtig interpretieren bzw. gegebenenfalls anpassen zu können, müssen die implementierten Kriterien dem Benutzer transparent sein.

Bei der Diskussion über den Sinn und Nutzen bzw. die Qualität eines solchen Bewertungssystems werden zwei unterschiedliche Gesichtspunkte betrachtet:

Frage 1: Inwieweit gibt das zugrundeliegende Untergrundmodell die „realen“ geologischen Verhältnisse korrekt wieder, wie groß sind die Abweichungen von der tatsächlichen geologischen Situation? Dieser Aspekt betrifft also insbesondere die Auflösung und Qualität der geometrischen Ausgangsdaten (vgl. auch Kap. 7.2.2.1).

Frage 2: Inwieweit sind die berechneten Bewertungszahlen der geologischen Situation angemessen? Frage 2 umfaßt mehrere Teilaspekte:

- Ist die Zusammenfassung von lithologische Einheiten zu Bewertungseinheiten dem Bewertungsziel angemessen gewählt?
- Wurden den Bewertungseinheiten die „richtigen“ lithologischen und hydrogeologischen Eigenschaften zugewiesen?
- Sind die Kriterien, die der Bewertung zugrunde liegen (Bewertungsfaktoren) richtig gewichtet?
- Sind die Beziehungen und Abhängigkeiten der einzelnen Bewertungsfaktoren zueinander richtig gewählt?

Frage 1 läßt sich beantworten, indem man die „geometrischen“ Ergebnisse, die das Modell liefert, mit den realen Bedingungen am jeweiligen Ort vergleicht. Ein solche Qualitätsprüfung wurde in Kap. 7.2.3.4 vorgestellt. Das dort festgestellte, überraschende gute Ergebnis gibt allerdings nur die Qualität der geometrischen Parameter des Untergrundmodells wieder (Lage von Schichtgrenze, Mächtigkeiten), nicht aber die qualitativen Aussagen bezüglich der Verteilung der relevanten geologisch-physikalischen Eigenschaften. Vor dem Hintergrund der nicht allzu hohen Verlässlichkeit der Datenbasis kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Abbildungsgenauigkeit des Modells in dieser Hinsicht sehr groß ist. Eine „Prüfung“ ist allerdings nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich.

Die Beantwortung der in **Frage 2** zusammengefaßten Aspekte fällt dagegen schwer oder ist unmöglich: Als Ergebnis der Berechnung wird eine für einen „Punkt“ (Rasterzelle) der Größe 50x50m gültige Bewertungszahl ausgegeben. Wenn dieses Ergebnis als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden soll, muß es kalibriert und klassifiziert werden. Eine verlässliche Kalibrierung der Bewertungszahlen kann aber nur anhand von Erfahrungen aus bestehenden Projekten, u.U. auch anhand von gezielten, projektspezifischen Modellrechnungen erfolgen (vgl. Kap. 3.1.4). Da dies im Arbeitsgebiet aber aufgrund des Fehlens konkreter Projekte oder Projektplanungen nicht möglich ist, erfolgt die „Eichung“ anhand von Abschätzungen und Vergleichen. Hierzu werden einzelne Standorte betrachtet und die hierfür errechneten Bewertungszahlen vor dem Hintergrund der geologischen Gegebenheiten am Standort zu beurteilt.

8.2.5.2 Diskussionsbeispiele

Zur Beurteilung der Bewertungszahl werden im Folgenden sieben verschiedene Standortbewertungen betrachtet, die mit dem Programmteil zur Berechnung von Einzelpunktbewertungen berechnet wurden. Es wird diskutiert, welche Einflußfaktoren sich in welcher Weise auf das Ergebnis auswirken. Anhand von Vergleichen und Einschätzungen können diese Einflußfaktoren dann gegebenenfalls angepaßt werden. Die Punkte, für die diese Beispiele berechnet wurden, sind in Abbildung 7-31 dargestellt. Es sind jeweils nur Auszüge aus dem Ergebnisprotokoll wiedergegeben. Die berechneten „theoretischen Bohrprofile“ für alle Beispiele zeigt Abbildung 8-13:

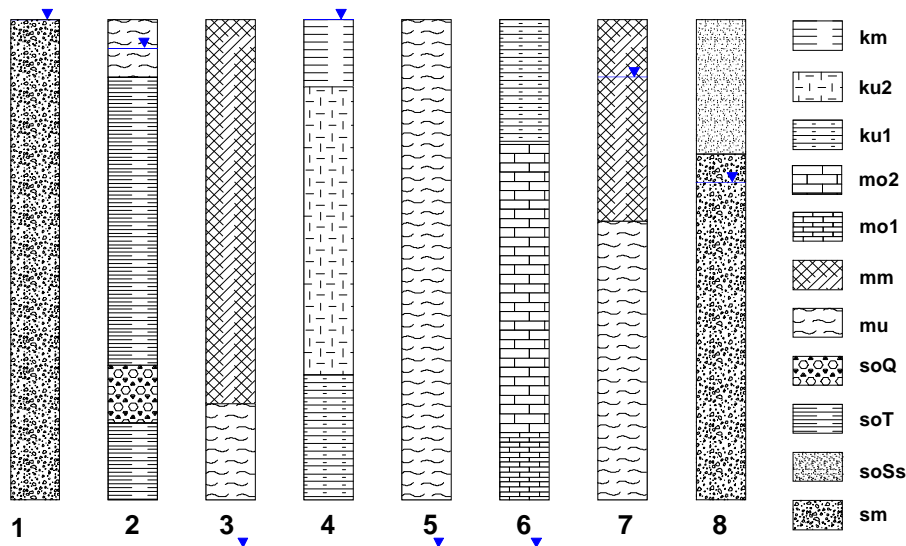


Abbildung 8-13: Profildarstellung der im Text beschriebenen Bewertungsbeispiele. In den „Bohrungen“ 3, 5 und 6 liegt der Grundwasserspiegel unterhalb der betrachteten Teufe von 50m. Legende siehe Tabelle 5-6.

Die Bewertungszahlen werden nach dem in Tabelle 8-13 gezeigten Schema kategorisiert (vgl. auch Kap. 6.4.4):

Bewertungszahl	Kategorie	Erläuterung
>200	sehr gut	In jeglicher Hinsicht ohne Kompromisse geeignet.
125 bis 200	gut	Wie 1, aber mit geringfügigen Einschränkungen geeignet.
50 bis 125	bedingt	In den meisten Fällen geeignet, bedarf aber immer einer genaueren Einzelfallbetrachtung; in den meisten Fällen ist eine optimale Konfiguration nicht möglich.
-25 bis 50	ungünstig	In vielen Fällen nicht geeignet; wenn, dann nur mit größeren Abstrichen.
-200 bis -25	schlecht	Nur in wenigen Ausnahmefällen geeignet.
< -200	ungeeignet	Nutzung in jedem Fall ausgeschlossen.

Tabelle 8-13: Bewertungskategorien für die Klassifikation der Bewertungszahl.

Beispiel 1 (Erläuterungen der Angaben)
 Betrachtete Tiefe: 50m (= die Bewertung gilt für den vom Benutzer vorgegebenen Teufenbereich von 0 bis 50m)
 Lagekoordinaten: RW= 4344803, HW= 5528562, Höhe über NN: 163m (**korrekt: die Bewertung gilt für eine durch die Rasterweite der Basisgrids vorgegebene Fläche, hier also 50x50m**)
 Bewertungszahl: -252, d.h. ungeeignet (**vgl. Tabelle 8-13**)
 Maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit: 170m/a (**berechnet aus dem hydraulischen Gradient, k_f und n_e**)
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: -252 (**GW-Fließgeschwindigkeit einbezogen nach Tabelle 8-8**)
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: -201 (**Bohrbarkeit - hier gut \Rightarrow Verbesserung der Bewertungszahl - einbezogen nach Kap. 8.2.4.2**)
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 307m (**vgl. Kap. 8.2.4.3**)
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m: (**stratigraphisch**)
 sm: 50m
 Verwerfungsdichte: gering (**vgl. Kap. 4.4.1**)
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 162m/NN bzw. 1m unter GOK

Beispiel 1 stellt einen Sonderfall dar, da der betrachtete Standort unmittelbar am Mainufer liegt, wo der Grundwasserflurabstand nur 1m beträgt. Hierzu muß angemerkt werden, daß die Berechnung der Bewertungszahl ohne Berücksichtigung der quartären Maintalfüllung erfolgt. Für die Berechnung ist die Maintalfüllung aufgrund der vergleichsweise geringen Mächtigkeiten wenig erheblich⁷³.

Eine Bohrung am Punkt 1 erschließt ausschließlich den *sm* und liegt vollständig im gesättigten Bereich. Die Sandsteine des *sm* sind potentiell gute Aquifere, weswegen aufgrund der vollständigen Sättigung und des

⁷³ Der quartäre Aquifer im Maintal spielt als oberstes Stockwerk bei rechtlichen Fragestellungen eine Rolle. Hier sind allerdings Ermessensfragen zu erörtern, die sich nicht mit dem hier vorgestellten Bewertungskonzept klären lassen.

stark negativen Aquiferfaktors eine sehr schlechte Gesamtbewertungszahl errechnet wird. Durch die Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit ändert sich diese Bewertung nicht, da der lokale hydraulische Gradient hoch ist. Andere Faktoren, z.B. die relativ gute Bohrbarkeit, fallen in diesem Beispiel nicht ins Gewicht, da sie den negativen Einfluß der zu erwartenden Grundwasserfließbewegung nicht ausgleichen können. Der Standort 1 ist also nicht zur Erdsondenspeicherung geeignet. Dies wird vom Bewertungsprogramm korrekt ermittelt und läßt sich anhand einfacher Überlegungen nachvollziehen.

Beispiel 2

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4338992, HW= 5519950, Höhe über NN: 236
 Bewertungszahl: 141
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 141
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 136
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 36m
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 mu: 6m
 Obere Röttone: 30m
 Rötquarzit: 6m
 Untere Röttone: 8m
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 233m/NN bzw. 3m unter GOK

An **Punkt 2** wird eine stärker gegliederte Abfolge angetroffen. Auch hier liegt wie in Beispiel 1 die Grundwasseroberfläche dicht unter Gelände. Im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel sind hier vorwiegend schlecht durchlässige Gesteine am Aufbau des Profils beteiligt. Ungünstig ist nur das Auftreten des Rötquarzits, der einen guten Kluftwasserleiter darstellt, unter der Grundwasseroberfläche. Dies sorgt auch dafür, daß die aus rechtlicher Sicht maximal mögliche Bohrtiefe an diesem Standort nur 36m beträgt, da in dieser Tiefe das Top des gespannten Rötquarzit erreicht wird. Es stellt sich hierbei aber generell die Frage, welche Konsequenzen das Auftreten einer so vergleichsweise geringmächtigen ungünstigen Schicht tatsächlich hat. Grundsätzlich stellt der Rötquarzit einen im gewünschten Speicherbereich gelegenen Horizont dar, in dem es potentiell zu Wärmeverlusten kommen kann. Quantifiziert werden kann dieses Risiko allerdings nur durch Modellierung auf der Basis von Vorort-Erkundungsmaßnahmen. Denkbar wäre in diesem Fall auch die Abdichtung des Bereichs durch Verpressen offener Klüfte. In jedem Fall wird dokumentiert, daß das Auftreten eines solchen Aquifers die Bedingungen insgesamt verschlechtert, allerdings wird der Standort immer noch gut bewertet. In einem Expertensystem (vgl. Kap. 8.2.6) könnte an dieser Stelle eine Neufestlegung der Projektkonzeption mit einer Bohrtiefe von in diesem Fall 30 bis 35m statt der ursprünglichen 50m vorgeschlagen werden.

Beispiel 3

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4339272, HW= 5533463, Höhe über NN: 251
 Bewertungszahl: 80
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 80
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 60
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 132m
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 mm: 40
 mu: 10
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 197m/NN bzw. 54m unter GOK

Für den Standort in **Beispiel 3** bestimmt das Programm eine Bewertungszahl im „bedingt geeigneten“ Bereich. Die Bohrung erreicht kein Grundwasser und steht im Wesentlichen im *mm*, der aufgrund seiner kalkig mergeligen Ausbildung und der Verkarstungsanfälligkeit einen niedrigen Formationsfaktor FW hat. Die Bohrbarkeit des *mm* ist sehr schlecht, wodurch die Gesamtwertung weiter herabgesetzt wird. An Standort 4 kann ein Speicherprojekt nur nach genauen Voruntersuchungen und voraussichtlich unter höheren Kosten realisiert werden. Zu diskutieren ist, ob ein Standort, an dem vorwiegend der *mm* erschlossen wird, noch die Bewertung „bedingt geeignet“ erhalten sollte. Im Beispiel ist dies darauf zurückzuführen, daß hier kein Grund-

wasser auftritt. Die Bewertungen „ungünstig“ bis „ungeeignet“ können nach dem Bewertungskonzept nur erreicht werden, wenn Grundwasserbewegung zu befürchten ist. Interessant ist es auch, an diesem Standort eine 100m tiefe Bohrung zu betrachten. Diese erhält wegen der guten Eigenschaften des μ eine Bewertung von 186, also bereits annähernd „sehr gut“, was in Anbetracht der immerhin 40m mm im oberen Bereich der Abfolge unsinnig erscheint. Dem hier dokumentierte Problem kann mit Lösungen begegnet werden, in denen nicht nur das Auftreten einer Schicht an sich beurteilt wird, sondern eine Gewichtung ihres Einflusses anhand ihrer relativen Lage im Gesamtprofil durchgeführt wird (vgl. dazu Kap. 5.1.2). Eine solche Lösung ist sicherlich sinnvoll, wurde aber nicht implementiert (vgl. Kap. 8.2.5.3).

Beispiel 4

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4360766 HW= 5534233 Höhe über NN: 261
 Bewertungszahl: -6
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 152
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: -5
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 7m
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 kmM: 7
 ku2 + kuW: 30
 ku1: 13
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 260m/NN bzw. 1m unter GOK

Beispiel 4 ist ein Fall, bei dem sich durch die Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit (GWF) die Bewertungsbedingungen drastisch ändern. An Punkt 5 liegt der Grundwasserspiegel sehr hoch⁷⁴. Sehr wahrscheinlich handelt es sich hier um ein hängendes Stockwerk im $ku2+kuW$ (Schicht 2, vgl. Tabelle 7-13). Die dort angetroffenen Gesteine des Unteren und Mittleren Keuper weisen mäßige bis gute lithologische Grundeigenschaften (FW= 1 bis 1,5) auf. Sehr stark negativ wirkt sich der geringe Grundwasserflurabstand aus, der in den als Aquifere charakterisierten Gesteinen des $ku2+kuW$ zu potentiell hohen Grundwasserfließgeschwindigkeit führt. Bezieht man jedoch die Grundwasserfließgeschwindigkeit, wie sie durch die errechneten Gradienten gegeben ist, direkt ein, so bewirkt man eine Umkehrung der Verhältnisse. Da die Gradienten an Punkt 4 sehr gering sind, werden dort (theoretisch) geringe Abstandsgeschwindigkeiten errechnet. Das Vorhandensein von Grundwasser in einem Aquifer hat hier also **positive** Auswirkungen. Ob das so akzeptiert werden kann, ist fraglich, da aufgrund von Erfahrungswerten (freundl. mündl. Mittlg. Prof. Udluft) auch im Bereich von Punkt 4 mit hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten gerechnet werden muß. Insgesamt ist dieses Beispiel eher problematisch: Der Untere Keuper ist eine sehr heterogene Abfolge mit starken Faziesänderungen auf kurze Distanz. Die pauschale Charakterisierung als „Aquifer“ führt hier dazu, daß eine Schicht mit 30m Mächtigkeit, also 60% Anteil und negativem Aquiferfaktor, die Gesamtbewertung sehr stark verringert, obwohl es durchaus denkbar ist, daß die potentiellen Aquifere des ku an diesem Standort gar nicht auftreten. Andererseits sind im ku durchaus sehr gut wasserführende Schichten bekannt, die auch größere Mächtigkeiten annehmen können. Es wäre also hilfreich, wenn man bei der Bewertung auf Daten zurückgreifen könnte, die dieser heterogenen Verteilung der Eigenschaften gerecht werden.

Beispiel 5

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4339062 HW= 5525621 Höhe über NN: 311
 Bewertungszahl: 190
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 190
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 275
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 112m
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 μ : 50
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 221m/NN bzw. 90m unter GOK

⁷⁴Ist auch durch Bohrungsdaten belegt.

In **Beispiel 5** wird ausschließlich der *mu* angetroffen. Der *mu* erhält als kompaktes, sehr gut bohrbares Karbonatgestein eine sehr gute Bewertung. Diese könnte noch besser sein, wenn in der Bohrung Grundwasser angetroffen würde. Diese Bewertung ist nur dann gültig, wenn der *mu* unverkarstet ist, was in der Mehrzahl der Fälle zutrifft. Oberhalb des Grundwasserspiegels ist aber auch eine (mäßige) Verkarstung unproblematisch. Eine in dieser Hinsicht eindeutiger Bewertung wäre möglich, indem Verkarstungsbereiche als potentiell Einflußfaktoren in die Berechnung miteinbezogen würden, ähnlich wie dies in der bestehenden Bewertungskonzeption beispielsweise mit der Verwerfungsdichte geschieht (vgl. Anhang A). Die notwendige Datenbasis dazu fehlt allerdings.

Beispiel 6

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4349213, HW= 5524571, Höhe über NN: 271
 Bewertungszahl: 142
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 142
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 176
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 90m - unbedenklich
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 ku1: 12m
 mo3: 31m
 mo2: 7m
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 181m/NN bzw. 90m unter GOK

Beispiel 6 liegt im Grenzbereich *ku-mo*. Dort sind Gesteine mit mittleren bis guten lithologischen Eigenschaften anzutreffen. Da Grundwasser erst in einer Tiefe von 90m unter GOK erreicht wird, sind hier keine Verluste durch Grundwasserfließbewegung zu erwarten. Eine Bewertung von 127 bzw. 154 unter Einbeziehung der Bohrbarkeit scheint insgesamt gerechtfertigt. Nicht auszuschließen ist allerdings, daß im betreffenden Bereich schwebende Grundwasservorkommen angetroffen werden, die durch das hydrogeologische Modell nicht dokumentiert werden.

Beispiel 7

Betrachtete Tiefe: 50m
 Lagekoordinaten: RW= 4337241, HW= 5512179, Höhe über NN: 264
 Bewertungszahl: 10
 Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 10
 Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 19
 Maximal mögliche Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht: 113m
 Zu erwartendes Bohrprofil bei einer Bohrtiefe von 50m:
 mm: 21m
 mu: 29m
 Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 258m/NN bzw. 6m unter GOK

Beispiel 7 ähnelt im lithologischen Aufbau Beispiel 4 mit dem Unterschied, daß der weitaus größte Anteil des Profils in der gesättigten Zone liegt. Da der *mm* einen guten potentiellen Aquifer darstellt, wirkt sich sein Auftreten negativ aus. Problematisch ist hier, daß zwei Schichten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften jeweils zu etwa gleichen Teilen das Bohrprofil aufbauen. Es ist immerhin gerechtfertigt, daß dieser Standort in die Kategorie „ungünstig“ fällt, da hier auf jeden Fall eine sehr gezielte Einzelfallbetrachtung erforderlich ist.

8.2.5.3 Zusammenfassung der Diskussionsergebnisse

Insgesamt zeigt der Vergleich der Bewertungszahlen aus den 7 genannten Beispielen, daß das Bewertungskonzept in sich stimmig ist. Es existieren allerdings zahlreiche „Sonderfälle“ (vgl. z.B. Kap. 8.2.5.2, Beispiel 3), in denen das Konzept nicht differenziert genug ist. Im Prinzip könnten viele dieser Sonderfälle durch entsprechende Maßnahmen (Fallunterscheidungen und zusätzliche Berechnungsmethoden) korrekt behandelt werden. Ohne angemessene Validierungsmöglichkeiten ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis solcher Maßnahmen allerdings fraglich. Abgesehen von den Sonderfällen sind die errechneten Bewertungszahlen aber plausibel, wenn man davon ausgeht, daß, wie es das zugrundeliegende Untergrundmodell vorschreibt,

alle Schichten in ihrer vertikalen und horizontalen Verbreitung gleiche Eigenschaften aufweisen. Dies ist selbstverständlich in der Realität nicht der Fall, worin einer der Schwachpunkte des Konzepts zu sehen ist. Korrekturen an den Bewertungsfaktoren für einzelne Schichten sind ebenfalls denkbar. Im gegenwärtigen Zustand stellt das Konzept ein Arbeitsmodell dar, das so flexibel gestaltet ist, daß es in vielerlei Hinsicht an reale Gegebenheiten besser angepaßt werden kann. Solche Anpassungen vorzunehmen scheint derzeit allerdings wenig sinnvoll, da es keine Möglichkeit gibt festzustellen, welche tatsächlichen Verbesserungen von ihnen zu erwarten sind. Zu klären ist zudem, ob nach einem solchen Bewertungsprogramm überhaupt Nachfrage besteht (vgl. Kap. 9.2.2). Maßnahmen, die zur Verbesserung des Bewertungskonzepts und der zugrundeliegenden Datenbasis getroffen werden können, sind in Tabelle 8-14 zusammengestellt:

Maßnahme		Nutzen / Aufwand bezogen auf		erforderliche Daten / Arbeiten	Datenverfügbarkeit	Kommentar, Aufwand / Nutzen	
		a) Ausschnitt	b) Unterfranken				
		Nutzen	Aufwand				
A) Maßnahmen zur Verbesserung des Untergrundmodells							
(1)	Erhöhung der Schichtenzahl bei konstanten Mächtigkeiten	a	gering	niedrig	Studium regionaler Literatur, Erweiterung der Schichtdatentabelle	vorhanden	mäßig sinnvoll
		b	keiner	niedrig			nicht anwendbar
(2)	Berücksichtigung von Mächtigkeitsschwankungen	a	gering	mittel	Literaturstudium, Auswertung von Bohrungen, Bohrungsdatenbanken, Isopachenkarten	teilweise vorhanden	bringt keinen Vorteil
		b	hoch	hoch			unbedingt erforderlich
(3)	Erhöhung der Schichtenzahl und (2)	a	hoch	sehr hoch	siehe (1) + (2)		fraglich
		b	gering	sehr hoch			nicht sinnvoll
(4)	Berücksichtigung lateraler Änderungen von Klüftigkeit, Fazies, Durchlässigkeiten etc.	a	hoch	sehr hoch	Auswertung aller verfügbaren geologischen Informationen	schlecht	fraglich
		b	sehr hoch	extrem hoch			
(5)	Berücksichtigung verschiedener Grundwasserstockwerke	a	nicht zu groß	sehr hoch	Auswertung von Bohrungs- und Pegeldata, Pumpversuchen, Stichtagmessungen, Modellrechnungen	sehr schlecht	fraglich
		b	groß	extrem hoch			erforderlich
(6)	(5) und exakte Bestimmung von Grundwasserfließgeschwindigkeiten	a	hoch	sehr hoch	wie 5, Auswertung von Färbeversuchen, umfangreiche Modellrechnungen	siehe (5)	fraglich
		b	hoch	extrem hoch			
B) Maßnahmen zur Verbesserung des Bewertungskonzepts							
(7)	Maßnahmen zur Behandlung von Sonderfällen		mittel	mittel	Programmierung Plausibilitätskontrollen	?	fraglich
(8)	Einbeziehung spezieller Untergrundparameter (z.B. Verkarstung, Klüftigkeit)		hoch	hoch	Datensammlung, -eingabe, -verarbeitung, Anpassung der Konzeption	schlecht	sinnvoll
(9)	gezielte Modellrechnungen zur Kontrolle der Bewertungsergebnisse		sehr hoch	sehr hoch	Konzeption von Modellen und Modellprojekten	?	fraglich

Tabelle 8-14: Möglichkeiten zur Optimierung des Bewertungskonzepts. „Ausschnitt“ und „Unterfranken“ (Spalte 2) stehen stellvertretend für die Bearbeitung kleinerer Gebiete mit hoher Detailauflösung (Ausschnitt) bzw. größerer Gebiete in Form von Übersichtsbewertungen (Unterfranken); **fraglich**, (Spalte 6) bedeutet: der Aufwand ist hoch, der Nutzen ist hoch. Das Verhältnis Aufwand/Nutzen ist schwer einzuschätzen.

8.2.6 Expertensystem

In Kap. 6.2.3.2 wurden als möglicher Ansatz zur Informationsbereitstellung durch ein GIS sogenannte „Expertensysteme“ vorgestellt. Ein mögliches Ablaufschema für ein solches mit „Entscheidungskompetenz“ ausgestattetes Informationssystem wurde in Abb. 6-6 dargestellt. Um zu demonstrieren, daß ein solches System grundsätzlich realisierbar ist, wurde das in den vorausgegangenen Kapiteln vorgestellte Programm zur automatisierten Standortbewertung so konzipiert, daß es ansatzweise die Anforderungen eines „Expertensystems“ erfüllt. Es hätte aber einen erheblichen Aufwand bedeutet das Programm tatsächlich soweit zu entwickeln, daß es als anwendungstaugliches System verwendet werden könnte.

8.2.6.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Realisierung von Expertensystemen

Insbesondere hinsichtlich der implementierten Entscheidungskompetenz kann der Aufwand bei der Erstellung eines Expertensystems nahezu beliebig hoch getrieben werden, wobei im Einzelfall zu diskutieren ist, inwieweit der jeweilige Aufwand durch den möglichen Nutzen gerechtfertigt wird. Grundsätzlich stellt sich hier die Frage, wieviel Information zu Beginn eines Bewertungsablaufs minimal vom Benutzer selbst eingebracht werden muß und wieviel Fachwissen bezüglich der Verwertung der Ergebnisse von ihm erwartet werden kann. Als Beispiel aus der in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten Bewertungskonzeption wäre hier z.B. die bereits angesprochene Frage zu nennen, ob, wenn festgestellt wird, daß die gewünschte Bohrtiefe⁷⁵ aus geologischen oder rechtlichen Gründen nicht realisierbar ist, das Programm von sich aus eine angepaßte Bohrtiefe vorschlägt oder der Benutzer selbst anhand der zunächst berechneten Ergebnisse einen neuen Bewertungsvorgang mit einer von ihm angepaßten Tiefe starten muß (vgl. Kap. 8.2.4.3). Die erforderlichen Maßnahmen zu Realisierung einer solchen „automatischen“ Anpassung der Tiefe sind nicht sehr aufwendig. Allerdings muß dabei bedacht werden, daß es sich hier nur um einen von vielen gleichartigen Gesichtspunkten handelt. Werden diese alle in entsprechender Weise automatisiert, entsteht in der Summe ein erheblicher Aufwand. Es muß also abgewogen werden, welche Möglichkeiten tatsächlich notwendig und sinnvoll sind.

Bei solchen Überlegungen sind wiederum die Aspekte der grundsätzlichen Zielsetzung und der möglichen Benutzer-Zielgruppe zu beachten (vgl. Kap. 6.2.1.1). Da es beispielsweise eher unwahrscheinlich ist, daß ein so vergleichsweise aufwendiges und teures Vorhaben wie ein Untergrundwärmespeicher (vorausgesetzt, eine ernstzunehmende Planungsabsicht besteht) von fachfremden Laien konzipiert wird, erscheint es wenig sinnvoll, ein System zur Planungsunterstützung von Untergrundspeichern mit Entscheidungskompetenzen auszustatten, die grundlegende Planungen zum Energiebedarf des Systems oder der notwendigen Be- und Entladeleistung des Speichers betreffen. Es kann davon ausgegangen werden, daß solche Informationen vom Benutzer vorgegeben werden. Spezialisierte Anwendungen, die zur Konzeption des Gesamtenergiesystems außerhalb des Speichers herangezogen werden können (vgl. z.B. FRANKE & HELLSTRÖM, 1997) existieren und müssen deshalb nicht Bestandteil eines Expertensystems sein. Sinnvoll erscheint für ein GIS-gestütztes Planungssystem für Untergrundwärmespeicher vorwiegend die Bereitstellung und Verarbeitung von (geologischer) Information über den Untergrund und allgemeiner planungsrelevanter, hier vorrangig auch genehmigungsrelevanter, Information (siehe dazu auch Kap. 9.2.2).

Weiterhin muß entschieden werden, wie „komfortabel“ und benutzerfreundlich eine entsprechende Anwendungsumgebung gestaltet werden soll. Beispielsweise können Hilfestellungen in multimedialer Form angeboten werden. In dieser Hinsicht ist sicherlich vieles machbar, wiederum muß der zu betreibende Aufwand aber daran gemessen werden, ob der Bedarf an solchen Leistungen besteht und ob ein weiterreichender Nutzen davon zu erwarten ist.

Überlegungen zum Umfang der Entscheidungskompetenz und zur allgemeinen Ausstattung eines entsprechenden Programms sind ohne die konkrete und problemorientierte Absicht ein solches Programm zu erstellen

⁷⁵ Z.B. in Abhängigkeit vom erforderlichen Speichervolumen, vgl. Kap. 8.2.1.

len wenig zweckmäßig, da je nach Zielrichtung unterschiedliche Schwerpunkte unterschiedlich weit entwickelt werden können. Es läßt sich aber festlegen, welche Anforderungen ein solches Programm mindestens erfüllen sollte. Ein vor dem Hintergrund der oben angestellten Überlegungen zu Aufwand und Nutzen „vernünftiges“ Expertensystem sollte demnach wenigstens etwa Folgendes leisten:

Das Programm soll dem Benutzer zunächst alle wesentlichen in der Datenbasis enthaltenen Informationen, die er zur Planung der von ihm projektierten Anlage benötigt, bereitstellen und übersichtlich ordnen (vgl. Kap. 6.2.3.2). Da Daten aus den unterschiedlichsten Fachgebieten zusammengetragen werden müssen, ist es für den Einzelnen häufig schwierig zu ermitteln, welche Daten er zu beschaffen hat, wo diese zu finden sind und wie sie im Hinblick auf das Planungsziel zu interpretieren sind. Hierbei soll ihm das Expertensystem zur Seite stehen. Weiterhin sollte das System in der Lage sein auf der Basis der so zusammengetragenen Information Aussagen darüber zu treffen, ob das projektierte Vorhaben am gewählten Standort überhaupt bzw. im gewünschten Umfang (Größe, Konfiguration) durchführbar ist. Je nach Konzeption des Expertensystems (Zielsetzung, -gruppe s.o.) sollte ein Minimum an Erklärungen, Vorschlägen und Hilfestellungen zur Interpretation und Auswertung der Daten angeboten werden. Die ermittelten Daten sollten durch interne Berechnungen mindestens soweit aufbereitet werden, daß sie an externe Berechnungsprogrammen (automatisch) übergeben werden können. Denkbar ist hier die Erstellung von programmspezifischen Eingabefiles (z.B. für Software wie Conflow oder EED; PROBERT ET AL., 1997; HELLSTRÖM ET AL., 1997). Wesentlich erscheint auch eine graphische und textliche Ausgabe der Planungsdaten, die z.B. zur Vorlage bei Genehmigungsbehörden dienen kann.

8.2.6.2 Beschreibung der realisierten Anwendung

Die Anwendung, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt wurde (vgl. Kap. 8.2.4 und Programmcode im Anhang), erfüllt die zuletzt genannten Aufgaben nur zum Teil. Dies liegt zum einen daran, daß nicht alle dafür erforderlichen Basisdaten erzeugt werden konnten, zum anderen daran, daß bis zur Erstellung eines voll anwendungstauglichen Programms noch ein erheblicher Programmieraufwand zu betreiben wäre. Dieser Aufwand war in der vorliegenden Untersuchung nicht zu leisten. Es wurden allerdings alle wesentlichen Schritte, die für die Erstellung eines Expertensystems erforderlich sind, programmiert. Damit leistet das vorliegende Programm folgendes:

1. Ein Benutzer kann seinen Standort auf der topographische Karte am Bildschirm per Mausclick oder über die Eingabe von Koordinaten wählen und angeben, welche Nutzungsart er wünscht. Zur Auswahl stehen ihm Wärmeentzug mit Erdsonden und Erdsondenwärmespeicher, wobei bei letzteren über die Vorgabe der betrachteten Tiefe die Speichergröße miteinbezogen werden kann. Im Prinzip sind ohne größere Modifikationen auch Bewertungsberechnungen für Aquiferspeicher und grundwassergekoppelte Wärmepumpen möglich (vgl. dazu Kap. 8.2.4.6).
2. Das Programm fragt eine Vielzahl verschiedener Datensätze (Grid- und Vektorthemen) ab und liefert die in Tabelle 8-15 aufgelisteten Informationen.
3. Auf der Basis der unter 2.) abgerufenen Informationen über den gewählten Standort werden Bewertungsberechnungen unter optionaler Einbeziehung verschiedener Aspekte durchgeführt.
4. Die unter 2. genannten Informationen werden in eine Textdatei ausgegeben, die anschließend dem Benutzer angezeigt wird. Es ist auch möglich, die Informationen z.B. in eine Kalkulations- oder Datenbanktabelle zu schreiben oder die berechneten Werte des theoretischen Bohrprofils an eine Anwendung zur Erstellung von Schichtenverzeichnissen zu übergeben.

Die Möglichkeiten, die mit diesem Programm geschaffen wurden, stellen nur die Basis eines einfachen Expertensystems dar. Mit der Option, die Ergebnisse der Abfrage in Textdateien oder Datenbanktabellen zu schreiben, besteht nun die Möglichkeit, sie von dort mit anderer Software auszulesen und zu weiteren Berechnungen zu verwenden, beispielsweise zur Berechnung der optimalen Sondenzahl, -tiefe und -abstand bei einem Erdsondenspeicher. Weiterhin könnten die Ergebnisse in Form eines standardisierten Berichtes

ausgegeben werden, der zur Vorlage bei den Genehmigungsbehörden dienen kann. Tabelle 8-16 zeigt ein vollständiges Ausgabefile des Bewertungsprogramms für einen Standort in der Nähe des geplanten Forschungs-Erdsondenwärmespeichers Greußenheim (vgl. dazu BÜTTNER ET AL., 1998).

Die Methoden, die zur Gewinnung der Information aus der Datenbasis eingesetzt werden, sind in Tabelle 8-15 aufgelistet. Dort sind gegebenenfalls Verweise zu den Beschreibungen der jeweils erforderlichen Berechnungsmethoden angegeben. Weitere Erläuterungen zur konkreten Umsetzung dieser Methoden in Arc-View Gis können mit der Avenue-Programmierung vertraute GIS-Anwender dem im Anhang wiedergegebenen vollständigen Programmcode entnehmen. Dort werden auch die Methoden zur Einbindung der Berechnungen und Abfragen in eine interaktiv nutzbare Kartenumgebung erläutert.

Information	Datensatz	Methode / Berechnung
a) Rechts- und Hochwert des gewählten Punktes		Rückgabe der Mauskoordinaten P(x,y)
b) Geländehöhe des gewählten Punktes	DHM	Zellwert am Punkt P(x,y) abfragen
c) Hangneigung, Exposition	DHM	wie b); slope und aspect des DHM am Punkt P(x,y)
d) Name und Blattnummer der Topographischen Karte 1:25.000	TK/GK-Tabelle	Tabellenwerte eines Polygons abfragen, in dem sich P(x,y) befindet
e) Angaben über Vorhandensein geologischer Karten und Erläuterungen	TK/GK-Tabelle	wie d)
f) Oberflächengeologie	GÜK200 digital	wie d)
g) Entfernung zur nächsten Verwerfung, Verwerfungs-dichte	Verwerfungen, GÜK200 digital, Verwerfungs-dichte (klass.)	Abfrage von Entfernungsparametern; senkrechter Abstand zum nächstgelegenen Linienobjekt; wie b)
h) Zu erwartendes Bohrprofil bis in die gewünschte Tiefe	DHM, DSM, GWGL, Schichtdatentabelle	Berechnung nach Kap. 8.2.4.1
i) Grundwasserflurabstand, -Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung	GWGL, Schichtdatentabelle	wie b); slope und aspect der Grundwasser Oberfläche am Punkt P(x,y); Berechnung anhand der in der Schichtdatentabelle (Tabelle 8-6) abgelegten Werte
j) Lage in oder Abstand zum nächsten Wasserschutzgebiet (Zone)	WSG5	wie d) bzw. Abfrage von Entfernungsparametern: hier bis zur Grenze des nächstgelegenen WSG-Polygons
k) Berechnung einer Bewertungszahl für die vom Nutzer gewählte Anwendung		vgl. Kap. 8.2.4.2
l) Darstellung der Bewertungszahlen in einem vom Nutzer vorzugebenden Umkreis um den gewählten Punkt		optional: Mit dem Programm zur flächenhaften Berechnung berechneter Ausschnitt (vgl. Kap. 8.2.4.4)
m) Berechnung der maximal möglichen Bohrtiefe aus rechtlicher Sicht	DHM, DSM, GWGL, Schichtdatentabelle	vgl. Kap. 8.2.4.3
n) Berechnung der mittleren Transmissivität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität	DHM, DSM, GWGL, Schichtdatentabelle	vgl. Kap. 8.2.4.5
o) Untergrundtemperatur in 25, 50 und 100m Tiefe	Temperatur	wie b)
p) Klimatische Daten: mittlere Jahrestemperatur, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer	(aus Bay-FORKLIM)	wie b)
q) Landkreis, Gemeinde, zuständiges Wasserwirtschaftsamt; sonstige „administrative Information“	aus ATKIS25	wie d)
r) Entfernung zu den nächstgelegenen Bohrungen, Name, Typ, Betreiber	Bohrungen	wie g), Entfernung bis zum nächsten Punktobjekt des Bohrungsdatensatzes
s) Informationen zu „Besonderheiten“ - Besondere Phänomene, die am Standort zu erwarten sind (z.B. Verkarstung, besondere hydraulische Verhältnisse)	Besonderheiten	Abfrage von Punkt-, Linien- und Flächeneigenschaften bzw. Entfernungen zu denselben.

Tabelle 8-15: Informationsbereitstellung durch das im Anhang wiedergegebene Programm zur Bewertung von Einzelstandorten.

Zusammenfassung (greußenheim_1.txt)

Bewertung für Greußenheim am 16.07.00; Standort BHKW Eselsberg
Verfahren: Bewertung für Erdsondenwärmespeicher
Betrachtete Tiefe: 40m

*** Allgemeine Informationen zum gewählten Standort

Lagekoordinaten: RW= 4338951; HW= 5521709; Höhe über NN: 271
Hangneigung: 9.7 Grad
Exposition: 355 Grad (Nord)
Blatt TK25: 6124 Remlingen
Geologische Karte vorhanden: ja; Erscheinungsjahr: 1978
Erläuterungen vorhanden: ja
In der Institutsbibliothek vorhanden: ja; Ausgeliehen von: Barthel
Entfernung zur nächsten Ortschaft (GREUSSENHEIM) beträgt: 66m
Entfernung zum nächsten WSG (Zone III) beträgt: 4223m 'Anmerkung: neu ausgewiesenes WSG in
Zuständiges Wasserwirtschaftsamt: Würzburg 'der Datenbasis noch nicht enthalten
Zuständiges Landratsamt: Würzburg

*** Bewertungsergebnisse

Bewertungszahl: 209, d.h. sehr gut geeignet
Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: 237
Maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit: 0.00 (m/a) in Schicht: so
Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: 209

*** Bewertung LISTE

Bewertung für 10m Tiefe: 190, d.h. gut geeignet
Bewertung für 20m Tiefe: 190, d.h. gut geeignet
Bewertung für 30m Tiefe: 178, d.h. gut geeignet
Bewertung für 40m Tiefe: 209, d.h. sehr gut geeignet
Bewertung für 50m Tiefe: 227, d.h. sehr gut geeignet
Bewertung für 60m Tiefe: 165, d.h. gut geeignet
Bewertung für 75m Tiefe: 188, d.h. gut geeignet
Bewertung für 100m Tiefe: 84, d.h. bedingt geeignet
Bewertung für 150m Tiefe: -28, d.h. schlecht geeignet
Bewertung für 200m Tiefe: -84, d.h. schlecht geeignet

*** Geologie und Hydrogeologie

Geologie nach GÜK200: so
Achtung, in 354m Abstand zum Standort befindet sich eine Doline
Entfernung zur nächsten Bohrung (WWA_WRZ_814; Versuchsbohrung 1; ZAE und Universität
Wü) beträgt: 25m
Entfernungen zu den 4 nächsten Bohrungen: 36m; 136m; 373m; 416m;
Entfernung zur nächsten Verwerfung beträgt: 451m
Verwerfungsdichte (klassifiziert): sehr hoch, 4

Zu erwartendes Bohrprofil (stratigraphisch) bei einer Bohrtiefe von 40m:

mu:	21
obere Röttone:	30
Rötquarzit:	6
untere Röttone:	19
Plattensandstein:	20
sm:	104

Temperaturprofil 25, 50, 100, 200m: 10.0; 10.6; 12.0; 16.0 Grad C
Transmissivität: 2.3e-008m²/s
Mittlere Wärmeleitfähigkeit: 2.6W/m*K
Mittlere volumetrische Wärmekapazität: 2.0MJ/m³*K

Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: 241m/NN bzw. 30m unter GOK
Bohrtiefe bis zum obersten gespannten Grundwasserstockwerk: 51m
(der oberste gespannte Aquifer)
Bohrtiefe bis zum zweiten (tieferen) Grundwasserstockwerk: 76m
(d.h. der erste potentielle! Aquifer, der nicht das erste Stockwerk darstellt; die
Grundwasserführung bleibt dabei unberücksichtigt!)

Tabelle 8-16: Vollständige Ausgabedatei des Bewertungsprogramms.

9 Schlußfolgerungen

In der vorliegenden Untersuchung wurden Möglichkeiten des Einsatzes von Geoinformationssystemen (GIS) auf dem Gebiet der Planung, Standortbewertung und Potentialermittlung für Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes bis in eine Tiefe von 200m vorgestellt. Auf der Basis besonders vielversprechender Ansätze wurden konkrete Bewertungskonzeptionen erstellt. Im Folgenden werden unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten von GIS bewertet und verglichen, die wesentlichen Probleme aufgezeigt und Vorschläge zur Optimierung des GIS-Einsatzes gegeben.

Alle Ausführungen beziehen sich dabei zunächst auf die Verhältnisse in Unterfranken. Sie sind mit wenigen Ausnahmen direkt auf das gesamte Süddeutsche Schichtstufenland und andere von mesozoischen Gesteinen geprägte Gebiete Deutschlands übertragbar (Thüringer Becken, Hessisches -, Westfälisches -, Niedersächsisches Bergland). Ähnliche Verhältnisse, was die Gültigkeit der Ergebnisse betrifft, liegen auch in vielen Mittelgebirgsregionen und in Teilbereichen des Tertiärs im Alpenvorland vor. Für weite Bereiche der norddeutschen Tiefebene sowie für die Schotter- und Moränenlandschaften in Südbayern gelten sie allerdings nicht.

9.1 Möglichkeiten und Zielsetzungen von GIS-Projekten

Grundsätzlich sollten bei der Planung von GIS-basierten Studien zur thermischen Nutzung des Untergrundes sehr genaue Überlegungen darüber angestellt werden, welchen Zweck das zu konzipierende Informationssystem erfüllen **soll** und welchen Zweck es maximal erfüllen **kann**. Beide Fragen sind eng mit dem Aufwand-Nutzen-Verhältnis verknüpft, das bei GIS-Untersuchungen aller Art vorrangig auch von der Verfügbarkeit digitaler Daten abhängt.

Prinzipiell können bei GIS-basierten Untersuchungen zur thermischen Nutzung des Untergrundes zwei übergeordnete Zielsetzungen unterschieden werden. Dies sind zunächst alle Untersuchungen, mit denen das „Potential“ der Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes ermittelt werden soll. Bei solchen **Potentialstudien** kann zwischen einem „Angebotspotential“, das vorwiegend durch naturräumliche Gegebenheiten bestimmt wird und einem „Nachfragepotential“, das mehrheitlich durch infrastrukturelle Faktoren gesteuert wird, unterschieden werden. Die zweite Großgruppe wird von denjenigen Informationssystemen gestellt, die als „**Planungsgrundlagen**“ im weitesten Sinne gelten können. Bei den „Planungsgrundlagen“ steht die **Bereitstellung und Verarbeitung von planungsrelevanten Daten** im Vordergrund. Je nach Konfiguration des Systems besteht die Aufgabe vor allem darin, Daten für die Planung von individuellen Projekten verfügbar zu machen. Dagegen wird bei allen Potentialanalysen immer eine **vergleichende Bewertung von Standorteigenschaften** durchgeführt. Der wesentliche Unterschied ergibt sich aus dem Umstand, daß eine vergleichende Bewertung die Definition aussagekräftiger Bewertungskriterien und eine Konzeption zur Ermittlung einer Gesamtbewertung aus einem System unterschiedlicher, ungleich gewichteter Einzelkriterien erfordert.

Nicht alle denkbaren und wünschenswerten Zielsetzungen lassen sich tatsächlich auch verwirklichen. Die realen Möglichkeiten werden zum einen dadurch limitiert, daß der Arbeits- und Zeitaufwand für die Erstellung eines GIS nicht beliebig hoch getrieben werden kann. Zum anderen sind derzeit viele der notwendigen Daten nicht vorhanden oder zumindest nicht in digitaler Form verfügbar, was häufig allerdings annähernd gleichzusetzen ist. An dieser Situation wird sich auch in näherer Zukunft voraussichtlich nichts ändern.

Bezüglich der Zielsetzungen und Anwendungsmöglichkeiten von GIS bestehen gewisse Unterschiede zwischen den Verfahren der Speicherung und den Verfahren zum Wärmeentzug. Speichervorhaben sind verfahrensbedingt an größere Objekte mit sehr speziellen Systemvoraussetzungen gebunden (z.B. Wohnsiedlungen mit Nahwärmenetz und zentraler Solarwärmeerzeugung), weswegen die Gesamtzahl solcher Projekte gering bleiben wird, das einzelne System aber gleichzeitig vergleichsweise aufwendig konzipiert ist. Die Planung von Untergrundspeichern setzt deshalb grundsätzlich einen hohen Aufwand an Vorerkundungsmaßnahmen vor Ort und eine umfangreiche individuelle Planung voraus. Es erscheint aus diesem Grund

wenig sinnvoll, ein flächendeckendes Geo-Informationssystem, das vorrangig auf Untergrundspeicherverfahren ausgerichtet ist, als Planungshilfsmittel zu konzipieren. Wesentlicher ist es hier darzustellen, wo solche Speicher mit einer guten Wahrscheinlichkeit überhaupt möglich sind. Eine solche Information ist im Wesentlichen dazu geeignet, den Anstoß zur Planung eines entsprechenden Projekts zu geben. Potential-„Kartierungen“ sind im Bereich der Speicherung also sinnvoll und wünschenswert.

Im Gegensatz dazu werden Anlagen zur Wärmergewinnung wesentlich häufiger zur Versorgung kleinerer Objekte, insbesondere auch von Einfamilienhäusern, eingesetzt. Es besteht damit ein ungleich höheres Anwenderpotential. Gleichzeitig kann der individuelle Planungsaufwand gering gehalten werden, da in den meisten Fällen Standardlösungen möglich sind. Auch bei den Standardlösungen sind jedoch für die Auslegung immer Informationen über den Untergrund erforderlich. Es ist daher wünschenswert, solche Daten nicht durch aufwendige individuelle Vorerkundungsmaßnahmen zu erheben, sondern sie durch Informationssysteme bereitzustellen. Dabei ist es ausreichend, wenn diese Information die tatsächlichen Verhältnisse größenordnungsmäßig wiedergibt. Man könnte den erforderlich Informationsgehalt etwa so definieren, daß er dem entsprechen sollte, was ein Geologe, der mit der regionalen Geologie und Hydrogeologie vertraut ist **und** die Anforderungen der entsprechenden Technologien kennt, bei der Begutachtung einer geologischen Karte im Maßstab 1:25.000 auszusagen in der Lage ist. Die geschilderten Leistungen können mit einem GIS, das beispielsweise wie in Kap. 8.2.6 beschrieben als „Expertensystem“ konzipiert ist, grundsätzlich erbracht werden (vgl. auch Abbildung 6-6). Der Aufwand, der zur Erstellung eines solchen GIS erbracht werden kann, muß sich dabei allerdings am möglichen Nutzen orientieren.

Auch für die Planung von Speicherprojekten können viele der Informationen, die ein solches, vorwiegend für die Planung von Wärmergewinnungsanlagen konzipiertes Informationssystem bereitstellen kann, gewinnbringend verwendet werden. Schon aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Anwendungsbereich eines solchen GIS nicht auf ein einziges Verfahren der thermischen Untergrundnutzung zu beschränken. Von diesem Gedanken ausgehend liegt es nahe, gleich über **universell einsetzbare geologischen Untergrund-Informationssysteme** nachzudenken, die **auch** im Bereich der Verfahren thermischer Nutzungen eingesetzt werden können (vgl. Kap. 9.5).

9.2 Konzepte

Wie in Kap. 6.2 ausgeführt wurde, läßt das Konzept des Geoinformationssystem ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher Einsatzmöglichkeiten zu. Aus diesem Grund wurde der betrachtete Einsatzbereich innerhalb der vorliegenden Untersuchung auf GIS-Projekte beschränkt, die nicht unmittelbar im Zusammenhang mit der **konkreten** Anlagenplanung eines ganz bestimmten Projektes stehen (vgl. Begriffsdefinition Kap. 6.2.1.5). Bezüglich der betrachteten Flächen wurde festgesetzt, daß das Informationssystem auf regionaler Ebene eingesetzt werden können soll. In der verbleibenden Bandbreite sind immer noch zahlreiche Möglichkeiten des GIS-Einsatz denkbar. Im Folgenden werden die in dieser Untersuchung als machbar ermittelten Konzepte, geordnet nach steigendem Informationsgehalt bzw. Spezialisierung, aufgelistet.

9.2.1 „Kartenwerke“

Der Einsatz von GIS zur Erstellung thematischer Karten ist naheliegend und sinnvoll. Der Begriff „Karte“ wird hier allerdings in Anführungszeichen gesetzt, da die Konzeption und die Möglichkeiten moderner digitaler Informationstechnologie weit über das hinaus gehen, was eine (Papier-)Karte im „klassischen“ Sinn leisten kann. „Karten“ verstehen sich hier als endgültig fertiggestellte (auch digitale) Darstellungsformen raumbezogener Information, die vom Benutzer nicht mehr manipuliert werden können (bzw. müssen). Siehe dazu auch Kap. 6.2.1.4.

9.2.1.1 Übersichtskarten

9.2.1.1.1 Übersichtskarten zu Informations- und „Marketing“-Zwecken

GIS können sehr gut zur Erstellung von Übersichts-„Karten“ der relevanten naturräumlichen, infrastrukturellen und rechtlichen Gegebenheiten herangezogen werden. Solche Übersichtskarten weisen Gebiete aus, in denen der Einsatz der entsprechenden Techniken prinzipiell möglich bzw. unmöglich ist und lassen in beschränktem Umfang auch vergleichende Standortbewertungen zu. Solche Karten dienen der Vorabinformation von Verbrauchern, Industrie und Behörden und verfolgen gemeinsam mit entsprechenden Erläuterungen vorrangig den Zweck, den Bekanntheitsgrad und die Akzeptanz von Erdwärmennutzungen zu steigern. Der „Maßstab“ solcher Karten sollte so konzipiert werden, daß die Lagegenauigkeit der Eingangsdatenquellen und die Abbildung der dargestellten Ergebnisse in einer Fehlerbandbreite von weniger als etwa $\pm 200\text{m}$ liegen. Dies entspräche bei vorsichtiger Verwendung des Begriffs einem „Maßstab“⁷⁶ von 1:100.000 bis 1:200.000. Kartenwerke, die eine höhere Detailgenauigkeit (der Eingangsdaten **und** der Ergebnisse) aufweisen, können, zumindest auf Papier, nicht mehr in angemessener Weise dargestellt und verbreitet werden (Kosten). Eine digitale Verbreitung auf Datenträgern oder im Internet in entsprechend aufbereiteter Form mit Erläuterungen und Hilfestellungen ist möglich und dem Anwendungszweck dienlicher.

Übersichtskarten der hier vorgestellten Form sind mit relativ geringem Aufwand zu erstellen. Sinnvoll ist die Einbeziehung der oberflächenhaften Geologie, wobei hier nicht kritiklos die Ausstrichbereiche von Schichten klassifiziert werden sollten, sondern angemessene Überlegungen zu Mächtigkeit und Bedeutung von Schichten einfließen sollten (vgl. Kap. 5.1 und 7.2.1). Hier sei z.B. auf den Unterer Keuper verwiesen, der ca. 20% der Fläche Unterfrankens einnimmt, wovon aber gut die Hälfte eine nur geringmächtige und damit kaum bedeutende Auflage auf Oberem Muschelkalk bilden (vgl. Kap. 7.2.3.1.4).

Zonen, in denen besondere Verhältnisse zu erwarten sind, können entsprechend gekennzeichnet werden (z.B. stark gestörte Bereiche oder Verkarstungszonen). Zusätzlich zur Geologie sollten Wasserschutzgebiete und möglichst auch Grundwasserflurabstände verzeichnet werden.

Einen höheren Aufwand zu treiben und spezialisierte Information einzubauen (z.B. dreidimensionale Untergrundmodelle) scheint nicht sinnvoll, da Darstellungsform und Charakter solcher Karten es nicht erlauben, diese spezielle Information sinnvoll zu nutzen.

9.2.1.1.2 Übersichtskarten als Planungsgrundlage

Übersichtskarten vom oben vorgestellten Typ sind als Planungsgrundlage für konkrete Vorhaben in der Praxis nicht einzusetzen, da bei der gegebenen (maximalen) Detailgenauigkeit ein Nutzer nicht zweifelsfrei erkennen kann, welche Situation an seinem Standort gegeben ist. Sie sind darüberhinaus nicht in der Lage die Vielschichtigkeit der für eine Bewertungsanalyse notwendigen Information auch nur annäherungsweise wiederzugeben. Die Information: „gut, schlecht oder nicht geeignet“, die ein Benutzer beispielsweise aus einer solchen Karte ablesen kann, läßt nicht erkennen bzw. **kann** nicht erkennen lassen, welche Faktoren im speziellen Fall zu dieser Bewertung geführt haben. Vorrangig ist hier der Aspekt zu nennen, daß eine Bewertung in vielen Fällen nur für einen bestimmten Teufenbereich und einen bestimmter Anwendungsfall (Größe, Temperatur) gültig sein kann (vgl. Kap. 6.4.2.2.1).

9.2.1.1.3 Übersichtskarten - Gesamtbeurteilung

Der maximale Nutzen, den eine Übersichtsdarstellung in Form einer oder weniger Karten mittleren (Ausgabe-) Maßstabs (1:100.000 bis 1:200.000) letztlich erreichen kann, rechtfertigt keinen hohen Aufwand bei der Erstellung der Datengrundlage. Deshalb ist die Frage, welche Informationen in eine solche Karte eingehen sollen, vorrangig von der **momentanen** Verfügbarkeit relevanter digitaler Daten abhängig. Es empfiehlt sich in der Planungs- und Konzeptionsphase einer solchen Karte genaue Überlegungen zum angestrebten Ein-

⁷⁶ Der Maßstabsbegriff in GIS wird in Kap. 6.2.1.2 erläutert.

Einsatzzweck und zum möglichen Anwenderkreis anzustellen. In diese Überlegungen sollte einfließen, daß eine Verwendung als konkrete Planungshilfestellung praktisch ausgeschlossen ist (s.o.). Planungs- und auslegungsrelevante Angaben, die den Anschein hoher Zuverlässigkeit vermitteln, sollten vermieden werden. Die Schwerpunkte sollten auf die Darstellung **potentieller** Möglichkeiten und Risiken gelegt werden. Wichtig erscheint, daß eine solche Karte nur kommentiert, also versehen mit entsprechenden und nicht zu knapp gehaltenen Erläuterungen herausgegeben werden sollte.

Der Nutzen von Übersichtskarten kann relativ groß sein, sollte aber nicht überschätzt werden. Er liegt insgesamt wohl mehr im Bereich der „Werbung“, was vor dem Hintergrund der derzeit vergleichsweise mäßigen Verbreitung entsprechender Technologien in Deutschland auch der vorrangig gewünschte Nutzen sein muß. Das Konzept der Übersichtsdarstellung kann deutlich aufgewertet werden, wenn man sich von der Vorstellung einer traditionellen (Papier-)Karte löst und die Möglichkeiten der modernen Informationstechnologie berücksichtigt. Abgesehen von geringeren Kosten, kann so eine deutlich höhere Flexibilität bezüglich der Informationstiefe und –verteilung (welche Information wird in welchem Umfang wo dargestellt) und der Aktualisierungsmöglichkeiten erreicht werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezüglich der Konzeption von Übersichtskarten besteht kaum noch. Wegen des gering zu haltenden Aufwands muß ohnehin auf bestehendes digitales Datenmaterial zurückgegriffen werden. Analyse- und Darstellungsmethoden beschränken sich im Allgemeinen auf Standardverfahren. Vorrangig erscheint die Entwicklung bzw. Anwendung bestehender Methoden der digitalen und medialen Darstellung zur Information über Verfahren der thermischen Nutzung.

9.2.1.2 Potentialkarten

Karten, die die unterschiedlichen „Potentiale“ thermischer Nutzungen des Untergrundes ausweisen (vgl. dazu Kap. 6.2.3.1.1), stellen letztlich nur stärker spezialisierte Formen des oben beschriebenen Konzepts der „Übersichtskarte“ dar. Vorrangiges Ziel solcher Karten ist es, **Erzeugungs-** (Angebot) und **Nachfragepotentiale** zusammenzuführen und damit das **Anwendungspotential** entsprechender Technologien zu ermitteln. Sie dienen damit dazu marktstrategische oder politisch motivierte Prognosen beispielsweise für den Einsatz im Bereich der Produktvermarktung, für Fördermaßnahmen und bei der Bedarfsermittlung zu erstellen. Da die Ergebnisse entsprechender Prognosen sich grundsätzlich innerhalb einer gewissen Unsicherheitsbreite bewegen, ist es weder notwendig noch zweckmäßig bei der Erstellung solcher Karten eine hohe (lagebezogene) Detailgenauigkeit anzustreben. Kleine Maßstäbe, die auf überregionaler Ebene angewendet werden, erscheinen hierzu angemessen.

GIS sind in hervorragender Weise für die Herstellung entsprechender Karten bzw. die Erstellung der zugrundeliegenden Analysen geeignet. Die erforderlichen Daten (i.W. geologische Basisdaten, statistisches Material und Angaben zur Infrastruktur) sind weitestgehend vorhanden. GIS-Anwendungen dieser Art entfernen sich allerdings deutlich vom geologischen Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung und wurden deshalb nur am Rande betrachtet.

9.2.1.3 Detaillierte Planungskarten

Die meisten der in Kap. 9.2.1.1.1 genannten Beschränkungen von „Übersichtskarten“ können ausgeräumt werden, wenn spezialisierte Planungskarten hoher Detailauflösung nach dem Muster aus Abbildung 6-5a bzw. Abbildung 8-11 erstellt werden. Spezialisiert bedeutet in diesem Fall: auf ein bestimmtes Verfahren und einen speziellen Anwendungsfall (Größe, Tiefe, Temperatur) ausgerichtet. Hohe **Detailauflösung** heißt nicht vorrangig großer Maßstab, sondern eine **Lagegenauigkeit** der Ausgangsdaten und der aus ihnen abgeleiteten Ergebnisse, die im Bereich deutlich kleiner als etwa 50m liegt. Wendet man diese Vorschrift auf gedruck-

te Karten an, so sind Ausgabemaßstäbe von 1:25.000 oder größer gefordert. Nur dann kann ein Benutzer mit hinlänglich hoher Wahrscheinlichkeit verlässliche Informationen aus der Karte ablesen⁷⁷.

Um ganz Unterfranken in einem entsprechenden Maßstab abzudecken, sind annähernd 100 Blätter vom Format der TK25 erforderlich. Da, wie oben beschrieben, echte Planungskarten eine hohe Spezialisierung erfordern, also nicht alle relevanten Informationen auf einem einzigen Blatt dargestellt werden können, bedeutet das, daß gegebenenfalls mehrere 100 Einzelblätter herausgegeben werden müßten, um ganz Unterfranken flächendeckend mit hochaufgelöster, planungsrelevanter Information abzudecken. Es bedarf keiner weiteren Diskussion um festzustellen, daß eine Ausgabe solcher Karten auf Papier nicht sinnvoll ist. Eine angemessenere Möglichkeit ist die Veröffentlichung auf CD-ROM, die auch eine flexiblere Handhabung der Maßstabsfrage erlaubt (Kap. 6.2.1.2).

Diskussionsbedürftig ist allerdings in jedem Fall der Nutzen solcher Kartenwerke. Wenn sie nicht in der Mehrzahl aller „Planungsfälle“ tatsächlich relevante Informationen in einer verlässlichen Qualität liefern, erfüllen sie ihren Zweck nicht. Es ist stark zu bezweifeln, ob flächendeckend jemals eine angemessene Datengrundlage zur Verfügung stehen wird, um diese Qualitätsanforderung zu erfüllen.

Es ist daher zu bedenken, ob man nicht auf eine flächendeckende Bearbeitung verzichtet, und nur die „interessanten“ Gebiete (vgl. dazu Kap. 6.4.2.2.2) berücksichtigt. Diese umfassen nur etwa 30% der Fläche Unterfrankens (Abbildung 6-12). Betrachtet man allerdings die Verteilung dieser Flächen, so zeigt sich, daß es auch bei einer solchen Bearbeitungsweise nicht möglich ist, größere zusammenhängende Gebiete (z.B. komplette TK-Blätter) auszuklammern (vgl. Abbildung 6-12). Dies gelänge nur, wenn man Gebiet mit kleinräumiger Besiedlungsstruktur nicht berücksichtigt und nur die (Randgebiete der) Ballungsräume bearbeitet. Im Sinne der in Kap. 6.4.2.2.2 zur Beziehung zwischen der Besiedlungs-/Bebauungsdichte und dem Potential für thermische Nutzungen geäußerten Überlegungen, stellt dies wahrscheinlich keine sinnvolle Lösung dar. Eine andere, in Baden-Württemberg angedachte, Lösung sieht vor, Untersuchungen nur noch in Gebieten durchzuführen, in denen eine Erschließung nach Bebauungsplan unmittelbar bevorsteht (WENDT, 1998 und freundl. mündl. Mittlg.). Damit würde allerdings der aktuelle Wohnbestand, der nach wie vor das größte Nutzungspotential stellt, von der Bearbeitung ausgeklammert.

Das Konzept der (detaillierten) Planungskarte (Maßstab 1:50.000 und größer) stellt vor dem Hintergrund der hier vorgetragenen Überlegungen letztlich keinen sinnvollen Ansatz für die GIS-basierte Untersuchung im Bereich der thermischen Nutzung des Untergrundes dar.

9.2.1.4 Karten der genehmigungsrechtlichen Bedingungen

Viele Maßnahmen zur thermischen Nutzung des Untergrundes haben mehr oder weniger umfangreiche Eingriffe in das Grundwasser zur Folge. Da Grundwasser in Bayern die Basis der Trinkwasserversorgung darstellt (93% des Trinkwassers nach BayGLA⁷⁸), ist es verständlich, daß solche Eingriffe mit gewisser Besorgnis betrachtet werden. Im Zweifelsfall sollte immer dem Ziel der Reinhaltung des Grundwasser Vorrang von anderen Zielsetzungen, wie der möglichen Energie- und CO₂-Einsparung und der Luftreinhaltung durch Verminderung des Schadstoffausstoßes, gegeben werden. Aus diesem Grund werden die Bereiche, in denen der Untergrund thermisch genutzt werden kann, durch Rechtsvorschriften limitiert. Nicht zulässig ist die Nutzung im Bereich von Wasserschutzgebieten und in der Regel auch die Nutzung von gespannten und tiefergelegenen Aquiferen. Für jedes Informationssystem zur thermischen Nutzung des Untergrundes ist es deshalb essentiell, Gebiete, die von der Nutzung in der Regel ausgeschlossen sind, darzustellen. Unproblematisch ist die Darstellung von Wasserschutzgebieten, sofern die betreffenden digitalen Basisdaten vorhanden sind. Die Ermittlung von Gebieten, in denen im für die Nutzung interessanten Teufenbereich gespannte

⁷⁷ Wobei auf die Tatsache hingewiesen werden muß, daß sich die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse in Unterfranken teilweise im Meterbereich drastisch ändern können, was durch **keine** Karte wiedergegeben werden **kann**.

⁷⁸ <http://www.bayern.de/gla/>

Verhältnisse oder ein tieferes Stockwerk erbohrt werden, setzt dagegen ein hochauflösendes dreidimensionales Untergrundmodell voraus, das es erlaubt, die räumliche Geometrie der Aquifere in Beziehung zur dreidimensional ausgebildeten Grundwasseroberfläche zu setzen. Solche Gebiete flächendeckend mit ausreichender Verlässlichkeit darzustellen, erfordert deshalb einen enorm hohen Aufwand. Bestenfalls kann in Übersichtsdarstellungen darauf hingewiesen werden, wo mit einer gewissen **Wahrscheinlichkeit** das Risiko besteht, daß die Bohrtiefe durch solche Vorgaben drastisch limitiert werden.

Letztlich muß man sich darüber im Klaren sein, daß Karten, die genehmigungsrechtlich relevante Gegebenheiten darstellen, niemals eine vollständige Rechtsverbindlichkeit erreichen können. Der Nutzen und Zweck von Karten der genehmigungsrechtlichen Gegebenheiten entspricht in etwa dem der in Kap. 9.2.1.1 diskutierten Übersichtskarten, so daß sich auch der Aufwand und die Darstellungsweise an den dort gemachten Angaben orientieren sollte.

9.2.2 GIS als Planungsumgebung – Expertensysteme

Es wurde in dieser Schlußbetrachtung bereits einleitend festgestellt, daß Planungs- und Expertensysteme für die Verfahren der saisonalen Untergrundspeicherung wenig geeignet sind, da sie den individuellen Planungsaufwand, der für ein solches Speicherprojekt getrieben werden muß, nur zu einem sehr geringen Teil ersetzen können. GIS als Planungshilfestellung sind also insbesondere im Bereich der Entzugsverfahren mit Wärmepumpen interessant, wo sie den individuellen Planungsaufwand deutlich herabsetzen können. Die wesentlichen Leistungen, die ein solches Planungsinstrument bringen kann, wurden in Kap. 8.2.6 anhand des innerhalb dieser Untersuchung erstellten Programms zur Bewertung und Planung von Erdsondenwärmespeichern und Erdsonden erläutert (vgl. auch Kap. 6.2.3.2, Abbildung 6-6).

Zusammengefaßt lauten die Leistungen:

- Bereitstellung planungsrelevanter Basisdaten: verfügbares Kartenmaterial, bekannte Bohrungen, Aufschlüsse, zuständige Ämter, Klimadaten uvm.
- Bereitstellung auslegungsrelevanter Daten: Stratigraphie, Lithologie, sedimentpetrographische, mineralogische und thermische Untergrundparameter.
- Aussagen zur rechtlichen Aspekten: Wasserschutzgebiete, Stockwerksbau, Charakterisierung von Aquifereen.
- Hilfestellung bei der Erstellung von Antragsunterlagen, Lageplänen.
- Hinweise auf fehlende Informationen und wo bzw. wie diese gegebenenfalls erhoben werden können.
- Auslegungsberechnungen auf der Basis von Untergrunddaten und Nutzervorgaben.

In Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit am jeweiligen Standort und dem Aufwand, der primär in die Erstellung des Informationssystems eingeht, kann der Informationsgehalt (=Nutzen) sehr unterschiedlich ausfallen. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist dabei sicherlich nicht linear. Es ist vielmehr davon auszugehen, daß der Nutzen bei geringem Aufwand zunächst sehr stark ansteigt (Bereitstellung der Basisinformation), ab einem gewissen Punkt aber kaum noch Zugewinne möglich sind (vgl. Abbildung 9-1). Es ist wenig sinnvoll einen Aufwand zu treiben, der den einer individuellen Untersuchung vor Ort übersteigt. Welcher Aufwand getrieben werden kann, hängt vorwiegend von der Nachfrage an einem solchen System ab. Der Nutzen kann allerdings theoretisch kaum evaluiert werden, er muß sich in der praktischen Anwendung erweisen.

Die Realisierung solcher Expertensystem ist möglich, wenn auch mit hohem Aufwand verbunden. Der Aufwand besteht in der Erstellung einer angemessenen Datengrundlage und in der Festlegung der erforderlichen Entscheidungsregeln (-kriterien). Beide Punkte sind mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet (vgl. Kap. 9.4). Das konzeptionelle Gerüst für ein solches Expertensystem läßt sich dagegen mit vorhandenen Standardwerkzeugen relativ einfach erstellen. Bezüglich des programmiertechnischen Aufwands sind hierbei keine Grenzen gesetzt. Die „Entscheidungskompetenz“ des Systems wird aber sicherlich stärker durch die zu-

zugrundeliegenden Daten und die Qualität der Kriteriendefinition, als durch die Entscheidungsalgorithmen des limitiert.

9.3 Aufwand und Nutzen von GIS-Projekten

Die Aspekte „Aufwand“ und „Nutzen“ des GIS-Einsatzes wurden in den vergangenen Kapiteln bei der Vorstellung der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten bereits erörtert. Wünschenswert wäre es nun, Zielsetzungen und Möglichkeiten mit gutem Aufwand-Nutzen-Verhältnis von weniger günstigen abzugrenzen. Dabei ist es auf der Basis der in dieser Untersuchung durchgeführten Arbeiten relativ gut möglich den erforderlichen Arbeits-, Zeit- und Kostenaufwand einzelner Konzepte abzuschätzen. Nicht möglich ist es dagegen den Nutzen zu quantifizieren, zumal ein solcher Nutzen, je nach Sichtweise, unterschiedlich definiert werden kann. Er kann darin bestehen, die Möglichkeiten der oberflächennahen thermischen Nutzung des Untergrundes bekannt zu machen und die Anwendung der Technik insgesamt zu verbreiten oder aber den Planungsaufwand für individuelle Anlagen zu verringern. Letzteres wirkt sich dabei womöglich gleichermaßen positiv auf die Verbreitung aus. Letztendlich ist eine Evaluation des Nutzens erst nach einem entsprechend langem Zeitraum der Erprobung möglich. Anwendungstaugliche Testsysteme für kleinere ausgewählte Gebiete sind deshalb unbedingt erforderlich.

Abbildung 9-1 zeigt in einem idealisierten Schema, in welchen Bereichen des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses einzelne Konzepte angesiedelt sind:

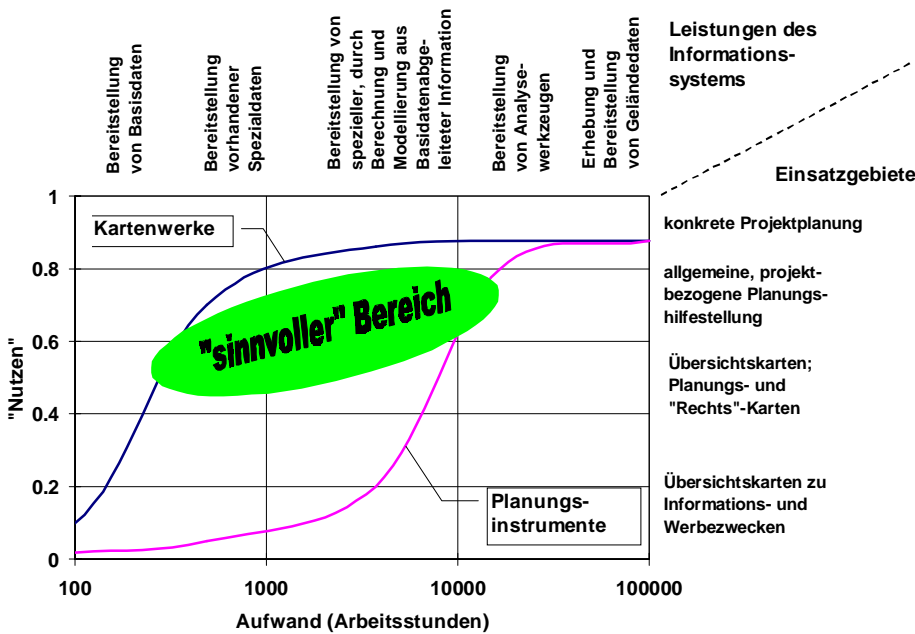


Abbildung 9-1: Beziehung von Aufwand und Nutzen bei GIS-Projekten zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

Nutzen = 1: das Informationssystem stellt **alle** planungsrelevanten Informationen **korrekt** zur Verfügung.

Nutzen = 0: das Informationssystem stellt nur Informationen und Sachverhalte dar, die ohnehin für Jeden offensichtlich sind.

Aufwand (Arbeitsstunden) bezogen auf Unterfranken (grobe Schätzung).

9.4 Probleme

9.4.1 Datenverfügbarkeit

Ein **übergeordnetes Problem**, das letztlich alle GIS-basierten Untersuchungen betrifft, ist die grundsätzliche mangelhafte Verfügbarkeit von (digitalen) Daten. GIS-Projekte im Bereich der Geologie, in denen wie in der vorliegenden Untersuchung vorwiegend Daten über den dreidimensionalen Aufbau des Untergrundes in hoher Auflösung erforderlich sind, sind davon besonders stark betroffen. Schon in einer Region mittlerer geologischer Komplexität, wie sie das Süddeutsche Schichtstufenland in Unterfranken darstellt, ist für eine angemessene flächendeckende Abbildung des Untergrundes eine immense Zahl von Daten erforderlich, die noch wesentlich steigt, wenn man auch die hydrogeologische Situation miteinbezieht. Es steht letztlich außer Frage, daß es niemals eine befriedigende Anzahl von Informationen über den Untergrund (Bohrungen) geben wird. Man sollte diese Tatsache als solche zur Kenntnis nehmen und sie in die Überlegungen zur Zielsetzung, zum Aufwand-Nutzen-Verhältnis und zur Konzeption des GIS-Projektes einbeziehen.

Das **aktuelle Problem** im Bereich der Datenverfügbarkeit besteht vorrangig darin, daß nur ein Bruchteil der bestehenden Informationen auch tatsächlich verfügbar sind und verwendet werden können. Dabei sind verschiedene Abstufungen der (Nicht-)Verfügbarkeit zu unterscheiden. Im ungünstigsten Fall sind Daten nicht mehr auffindbar, im besten Fall sind die Daten in analoger Form vorhanden und dem Bearbeiter unmittelbar (ohne Nutzungseinschränkungen) zugänglich, so daß sie nur noch in aufwendiger Arbeit digitalisiert werden müssen. Dazwischen liegt eine Vielzahl unterschiedlichster Konstellationen, die ausführlich in Kap. 6.3.4 beschrieben wurden. In der Planungsphase eines GIS sollte deshalb auf jeden Fall die Verfügbarkeit der als notwendig festgelegten Daten ermittelt werden. Dies ist in der Praxis aber fast nicht möglich, da zwischen der Erkenntnis, daß bestimmte Daten möglicherweise vorliegen und dem Zeitpunkt, an dem man diese Daten tatsächlich in Händen hält, erfahrungsgemäß lange Zeiträume liegen können.

Das aktuelle Problem der Datenverfügbarkeit wird in der Zukunft zwar nicht vollständig beseitigt, aber immerhin innerhalb gewisser Grenzen reduziert werden. Hilfreich wäre es dazu, wenn von verantwortlicher Seite der Wert und die Bedeutung allgemein und direkt zugänglicher Information erkannt und dementsprechend gehandelt werden würde (vgl. Kap. 9.5).

9.4.2 Kriteriendefinition

GIS-basierte Untersuchungen, in denen Standorteigenschaften bewertet und verglichen werden sollen, erfordern die Festlegung von aussagekräftigen Kriterien und ein Konzept, das diese Kriterien sinnvoll zueinander in Beziehung setzt. Im Bereich der Verfahren der thermischen Nutzung des Untergrundes gelingt eine zufriedenstellende Kriteriendefinition letztlich nur für die Entzugsverfahren. Hier können einfache, annähernd lineare Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern – z.B. Wärmeleitfähigkeit des Gesteins und möglicher Entzugsleistung – hergestellt werden. Da auf diesem Gebiet inzwischen eine sehr große Anzahl, auch wissenschaftlich begleiteter Projekte besteht, ist es möglich solche Kriterien auch an realen Bedingungen zu eichen.

Saisonale Untergrundspeicher und die daran angeschlossenen Wärmequellen und Verbraucher stellen dagegen sehr komplexe Systeme dar, die sehr unterschiedliche Anforderungen an den Untergrund stellen. Das Gesamtverhalten des Systems ist von einer Vielfalt von Faktoren abhängig, die unterschiedlich zusammenwirken und deshalb einzeln kaum zu beurteilen sind. Hinzu kommt, daß geologische Kriterien und Systemparameter sich nicht unabhängig voneinander betrachten lassen (vgl. Kap. 3.1.4 und 6.4.2.2). Insbesondere problematisch ist allerdings auch der Umstand, daß die Zahl der Speicherprojekte, auf deren Ergebnisse man sich bei der Kriteriendefinition stützen könnte, sehr gering ist. Fast alle bislang realisierten Vorhaben können, was die Systemkonfiguration und die geologische Situation am Standort anbetrifft, als absolute Unikate gelten (vgl. Kap. 6.4.3.1). Aus diesen Gründen gelingt eine eindeutige Kriteriendefinition derzeit nicht.

Letztlich sind die Schwierigkeiten bei der Erstellung eindeutiger Bewertungskriterien allerdings weniger hoch zu bewerten, da sie durch eine angemessene, flexible Bewertungskonzeption relativ weitgehend ausgeräumt werden können (vgl. Kap. 8.2.1). Maßgeblich bleibt damit die zuerst genannte Schwierigkeit, einem solchen Konzept eine ausreichend detaillierte und verlässliche Datenbasis zur Verfügung zu stellen.

9.5 Schlußwort - Ausblick

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß es mit Geoinformationssystemen möglich ist, Informationen über den Untergrund für die Planung von Anlagen zur thermischen Nutzung gewinnbringend in beträchtlichem Umfang zur Verfügung zu stellen. Auf der Basis dieser Information sind vergleichende Standortbewertungen und Beurteilungen des regionalen bzw. lokalen Potentials solcher Techniken möglich. Die vorrangige Schwierigkeit bei der Umsetzung solcher GIS stellt dabei nicht die Konzeption und Programmierung des Systems dar, sondern die mangelhafte Verfügbarkeit von Daten im Allgemeinen und die digitaler Daten im Besonderen.

Schon der Aufwand der erforderlich wäre, um alle vorhandenen (analogen) Informationen für ein entsprechendes GIS verfügbar zu machen, ist enorm. Würde man eine genaue Ermittlung des technischen Angebots- und des Nachfragepotentials für thermische Nutzungen des Untergrundes durchführen (vgl. Kap. 6.2.3.1.1), so käme man sehr wahrscheinlich zu dem Schluß, daß die Zahl der möglichen Anlagen in Unterfranken die Erstellung eines umfangreichen Informationssystems zur thermischen Nutzung des Untergrundes nicht rechtfertigt.

Es sollte aber berücksichtigt werden, daß eine Vielzahl der Informationen, die ein solches GIS zur Verfügung stellt, sehr viel universeller einsetzbar sind. Aufgrund der durch moderne Geoinformationstechnologien gegebenen Möglichkeit der digitalen Verarbeitung und Verbreitung von geowissenschaftlich relevanter Information, ist es möglich, die starren Konzepte spezialisierter, auf bestimmte Anwendungsfälle hin konzipierter „Karten“-Werke zu verlassen und statt dessen „Geoinformationssysteme“ (im exakten Wortsinn) zu schaffen. Solche Informationssysteme können eine universelle Datenbasis für unterschiedlichste Anwendungszwecke darstellen. Das in dieser Untersuchung entwickelte Untergrundmodell läßt sich beispielsweise nicht nur als Bewertungsumgebung für Erdwärmennutzungen einsetzen, sondern, wie KUS & BARTHEL (2000) zeigen, auch zur Analyse von Hangrutschungsrisiken heranziehen. In Kap. 7.2.3.1.3.8 wurde darauf hingewiesen, wie es mit Hilfe solcher Modelle und der durch GIS gegebenen Überlagerungs- und Analysetechniken möglich ist, bestehende Theorien bezüglich struktureller und fazieller Verhältnisse kritisch zu prüfen und zu verbessern. Ein umfassendes „Geoinformationssystem“ ist also in der Lage sowohl im angewandten- als auch im forschungsorientierten Bereich neue Wege zu öffnen. Dabei ist es **nicht** Voraussetzung, daß ein solches System für jeden beliebigen Ort gleichmäßig hochspezialisierte, hochaufgelöste Information (z.B. ein dreidimensionales Untergrundmodell) zur Verfügung stellt. Auch schon der Hinweis auf Literatur, vorhandene Karten oder andere Sekundärdatenquellen stellen geowissenschaftlich relevantes Datenmaterial dar, das ansonsten nur nach aufwendiger Recherchearbeit beschafft werden kann. „Geoinformation“ besteht in diesem Sinn nicht nur aus Zahlen, sondern auch aus Informationen darüber, wo diese Zahlenwerte möglicherweise zu finden sind. Wesentlich an einem solchen System ist ein Darstellungs- und Verbreitungskonzept, das der sich ständig ändernden Datenverfügbarkeit durch eine entsprechende Flexibilität gerecht werden kann.

Von einer solchen Idealvorstellung allgemein zugänglicher, umfassender „Geo-Informationen“ ist die Realität, nicht nur in Unterfranken, aber noch sehr weit entfernt. Grund dafür scheint nicht nur die nicht überall befriedigende Verfügbarkeit von geowissenschaftlich relevanten Spezial- und Basisdatenmaterial zu sein, sondern auch die Tatsache, daß Geodaten ein begehrtes und deshalb ein in finanzieller und wissenschaftlicher Hinsicht gut zu vermarktendes Gut darstellen. Eine freie Forschung und Entwicklung im Bereich der Geoinformationstechnologie ist damit, zumindest im universitären Rahmen, kaum möglich. Vor diesem Hintergrund ist es kaum erstaunlich, daß echte „geologische“ GIS-Anwendungen in Deutschland bislang kaum zu finden sind und entsprechende Entwicklungen vor allem in den Ländern stattfinden, in denen die Bedeutung einer unbeschränkten Entwicklung der Informationstechnologie erkannt wurde und Geo-Informationen deshalb freier und bereits in deutlich höherem Umfang verfügbar sind.

10 Literaturverzeichnis

- ABERG, B.** (1983): Thermal Front Stability in Very Permeable Aquifers. - Subsurface heat storage in theory and practice; proceedings of the international conference; Vol. 2: 793-799, Swed. Counc. Build. Res.; Stockholm.
- ADINOLFI, M., KOCH, M. & RUCK, W.** (1994): Ökologische und mikrobielle Folgen der Wärmespeicherung im Aquifer. - Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, **Bd. 124**: 89-107; München.
- AL-AZAWI, A., EBHARDT, G., HOBLER, M. & KANZ, W.** (1978): Hydrogeologie der quartären Talfüllung des Mittelmainins. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 154-174; München.
- ALBERT, K.** (1993): Erläuterungen zur geologischen Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg Blatt 6324 Tauberbischofsheim-Ost unter besonderer Berücksichtigung der Hydrogeologie der Einzugsgebiete des Grünbachs, Gerchsheimer Grabens und Rödersteingrabens. - Diss. Univ. Würzburg: 278 S., 62 Abb., 44 Tab., 3 Taf., 3 Beil., 1 Kt.; Würzburg.
- ALLEN, D.M.** (1996): Steady-state and transient hydrologic, thermal and chemical modelling of a faulted carbonate aquifer used for aquifer thermal energy storage. - Doctoral thesis, Carleton University, Ottawa, ON, Canada: 643 S.; Carleton.
- ANDERSSON, O.** (1994): Aquifer thermal energy storages in Sweden - experiences so far and market potential. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 2: 831-843; Helsinki.
- ANDERSSON, O.** (1998): Heat pump supported ATES applications in Sweden. - IEA Heat Pump Centre Newsletter **16/2**: 19-20; Sittard.
- ANDERSSON, O., MIRZA, C. & SANNER, B.** (1997): The relevance of geology, hydrogeology and geotechnique to UTES. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 241-246; Sapporo.
- ANDERSSON, S., ERIKSSON, A., & JOHANSSON, S.** (1983): Heat storage in natural ground water basins. - Subsurface heat storage in theory and practice; proceedings of the international conference; Vol. 2: 762-767, Swed. Counc. Build. Res.; Stockholm.
- ANDRES, G. & GEORGOTAS, N.** [Hrsg.] (1978): Das Mainprojekt - Hydrogeologische Studien zum Grundwasserhaushalt und zur Stoffbilanz im Main Einzugsgebiet. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 315 S., 8 Kt.; München.
- ANDRES, G. & MATTHESS, G.** (1978): Grundwasserhöflichkeit im Mittelmaingebiet. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 250-251; München.
- ANDRES, G. & WIRTH, H.** [Hrsg.] (1985): Grundwassergleichenkarte von Bayern 1:500.000. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **20**; München.
- ANGENHEISTER, G.** (1982): Landoldt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik; Neue Serie, Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung; **Band 1**: Physikalische Eigenschaften der Gesteine **Teilband b**, (Gesamtwerk: **LANDOLT, H., HELLWEGE, K.-H. & PREDEL, B.** [Hrsg.]); Berlin, Heidelberg, New York.
- ASCH, K.** (1999b): GIS-gestützte Standortsuche für Siedlungsabfalldeponien. - in **ASCH, K.** [Hrsg.]: GIS in Geowissenschaften und Umwelt: 63-72; Berlin, Heidelberg, New York.
- ASCH, K.** [Hrsg.] (1999a): GIS in Geowissenschaften und Umwelt. - 173 S.; Berlin, Heidelberg, New York.
- BACKHAUS, E.** [Hrsg.] (1967): Beiträge zur Geologie des Aschaffener Raumes. - Veröffentlichungen des Geschichts- und Kunstvereins Aschaffenburg, **10**: 259 S., 4 Beil.; Aschaffenburg.
- BAKEMA, G. & JELLEMA, I.** (1997): The HST3D program for solving 3-D-problems related to ATES. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 835-840; Sapporo.
- BAKEMA, G. & SNIJDERS, A.** (1997): Grundwassergekoppelte Wärmepumpe für die Spielfeldheizung und Raumkühlung des Mehrzweckstadions "Geldredöme", Arnheim. - IZW-Bericht **2/97**: 153-158; Karlsruhe.
- BAKEMA, G., SNIJDERS, A.L. & NORDELL, B.** (1995): Underground thermal energy storage: State of the art 1994. - 70 S., ISBN 90-802769-1-x; Arnhem, NL.
- BALKE, K.-D., BEIMS, U., HEERS, F. W., HÖLTING, B., HOMRIGHAUSEN, R. & MATTHESS, G.** (2000): Grundwassererschließung: Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht. - Lehrbuch der Hydrogeologie **Bd. 4**: 740 S., 398 Abb., 81 Tab.; Stuttgart.

- BARTELME, N.** (1995): Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen. - 414 S.; Berlin, Heidelberg, New York.
- BARTHEL, R.** (1993): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung im Maßstab 1:10.000 auf den Blättern 5625 Wildflecken und 5526 Gersfeld. – Diplom-Kartierung Universität Würzburg: 89 S., 58 Abb., 6 Tab., 4 Taf., 2 Beil.; Würzburg [unveröff.].
- BARTHEL, R.** (1995): Hydrogeologische und geophysikalische Untersuchungen im oberen Einzugsgebiet des Elsbachs, Hohe Rhön. - Diplomarbeit Universität Würzburg: 232 S., 138 Abb., 15 Tab., 2 Beil.; Würzburg [unveröff.].
- BAUER, W.** (2000): Geothermische Verhältnisse des Fränkisches Beckens (Nordbayern/Südthüringen). – Diss. Univ. Würzburg, in: Hydrogeologie & Umwelt, **Bd. 21**: 190S., umfangreicher Anhang; Würzburg [in Druckvorbereitung].
- BAYFORKLIM** - Bayerischer Klimaforschungsverbund [Hrsg.] (1996): Klimaatlas von Bayern, München.
- BAYGLA** - Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg.] (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. - 4. neubearbeitete Auflage: 329 S., 67 Abb., 21 Tab., 8 Beil.; München.
- BAYGLA** - Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg.] (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 500.000. - 2. Aufl.: 168 S., 29 Abb., 21 Tab., 6 Taf., 1 Beil.; München.
- BAYGLA** - Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg.] (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main - Hydrogeologie. - 138 S., 53 Abb., 19 Tab.; München.
- BAYLFW** - Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1996): Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdwärmesonden und Erdkollektoren, Merkblatt SigLfw, **Teil 4 Nr. 4.8-3** vom 7.11.1996; München.
- BAYWIMIN** - Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie [Hrsg.] (1997): Bayerischer Solar- und Windenergieatlas. – 60 S., 3 Karten; München.
- BECK, M., MÜLLER J., REUB, M., SCHULZ, H., WAGNER, B.** (1993): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben: „Untersuchungen zur saisonalen Speicherung von Niedertemperaturwärme im Erdboden - Erdwärmespeicher“ (BMFT 0328616A). - Landtechnik-Bericht, **Heft 7**: 430 S.; Weihenstephan.
- BEHR, F.J.** (1998): Strategisches GIS-Management – Grundlagen und Schritte zur Systemeinführung. – 389 S.; Heidelberg.
- BENHOLD, I., FALKENHAGEN, M. & WALOSSEK, W.** (1998): Zur Weiterentwicklung der Methodik zur Baulandpotentialermittlung am Beispiel der Stadt Halle (Saale) mit einem Geographischen Informationssystem (SPLIS). - Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg '98: 17-25; Heidelberg.
- BERDAT, F.** (1997): Übersichtskarte des Kantons Bern, Wärme aus Wasser und Boden. - IZW-Bericht **2/97**: 49-53; Karlsruhe.
- BERNHARDSEN, T.** (1999): Geographic information systems - an introduction. - 2. ed.: 372 S.; New York.
- BETSCHART, W., ZWEIFEL G. & WETTER M.** (1997): BEW-/INFEL-Projekt Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe ZTL-Kurzfassung Schlußbericht Projektphase 1. Internet (www.geothermal-energy.ch).
- BILL, R.** (1999a): Grundlagen der Geoinformationssysteme - Band 1: Hardware, Software und Daten. - 2. völlig neubearbeitete und erw. Aufl.: 454 S.; Heidelberg.
- BILL, R.** (1999b): Grundlagen der Geoinformationssysteme - Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. - 2., völlig neubearbeitete und erw. Aufl.: 475 S.; Heidelberg.
- BITTERSOHL, J.** (1980): Versickerung und Grundwasserneubildung in den Quartären Deckschichten der Bayerischen Rhön. - Diss. Tech. Univ. München: 234 S., 50 Abb., 46 Tab.; München.
- BLASCHKE, T.** [Hrsg.] (1999): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung – GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. – 278 S.; Heidelberg.
- BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FISCHER, W.R., FREDE, H.-G., HORN, R. & STAHR, K.** [Hrsg.] (1996): Handbuch der Bodenkunde. – Loseblattsammlung; 3. Ergänzungslieferung 11/97; Landsberg/Lech.
- BMW** – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.] (1999): Energie Daten 1999 – Nationale und internationale Entwicklung. – 72 S.; Bonn.
- BMW** – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.] (1996): Energie Daten 1996 – Datenbankversion; Internet (<http://www.bmwi.de/energiepolitik.html>).
- BMW** – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]. (2000): Zukunftsweisende Energieversorgung durch Aquiferspeicher. – Pressemitteilung BMWi 12.1.2000: Internet (<http://www.bmwi.de/innovation/000112inov1.html>).

- BOKHARI, A.** (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen des Mittelmaingebietes zwischen Bamberg und Schweinfurt unter besonderer Berücksichtigung der Chloridfracht des Mains. – Diss. Univ. Würzburg.: 113 S., 20 Tab.; Würzburg.
- BONHAM-CARTER, G.** (1994): Geographic information systems for geoscientists modeling with GIS. - Computer Methods in the Geosciences, **13**: 398 S.; Kidlington [u.a.].
- BOUMA, J., FANNINGER, G., KNOBLICH, K., REUß, M. & SANNER, B.** (1997): Zusammenfassung der Berichte und Diskussionen des 3. Symposiums Erdgekoppelte Wärmepumpen. – IZW-Berichte **2/97**: 1-6; Karlsruhe.
- BOYSEN, A.** [ed.] (1983): Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage. June 6- 8, 1983; Stockholm, Sweden.
- BREHM, D. & KNOBLICH, K.** (1989): TRADIKON-3D, ein Modell zur Berechnung des Wärmetransports in Porengrundwasserleitern. - Z. Angew. Geowiss., **Heft 8**: 29-60; Gießen.
- BREHM, D.R.** (1989): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines dreidimensionalen, strömungsgekoppelten Finite-Differenzen-Wärmetransportmodells. - Diss. Justus-Liebig-Universität: Gießener geologische Schriften **43**: 120 S; Gießen.
- BREITNER, M.**, (1986): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem NW-Quadranten des Blattes 6026 Werneck der topographischen Karte 1:25.000, Diplomarb. Univ. Würzburg: 141 S., 64 Abb., 7 Tab., 2 Beil.; Würzburg [unveröff.].
- BRUNNER M. & GORHAN H. L.**, (1999): Geothermie, die umweltschonende Energie. - Internet (www.geothermal-energy.ch).
- BURROUGH, P.A.** (1989): Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. - J. Soil Science, **40**: 477 – 492; Oxford.
- BUBMANN, W.** [Hrsg.] (1997): Geothermie - Energie der Zukunft. - Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 487 S., ISBN 3-932570-09-x, Geeste.
- BÜTTNER, D. DRACH, V., EBERT, H-P., FRICKE, J., RÖHLE, B., MARQUARDT, G., WEHRIG, K., BARTHEL, R. & UDLUFT, P.** (1998): Erdsondenwärmespeicher Greußenheim - Vorstudie. - Abschlußbericht, Report ZAE 2-0998-6 (1998), 76 S.; Würzburg.
- BÜTTNER, D., DRACH, V., EBERT, H-P., FRICKE, J., MARQUARDT, G., STEINHEIMER, A., PFEIFFER, J. & STORKA, T.** (2000): Optimierung von Erdwärmesonden. 1. Zwischenbericht, Report ZAE 2-0200-1 (2000): 34 S., Würzburg [unveröff.].
- BÜTTNER, G. & SCHWARZMEIER, J.** (1997): Der Mittlere Muschelkalk in der Bohrung Weyer aus lithologischer und stratigraphischer Sicht. - Naturw. Jahrbuch Schweinfurt, **15**: 47-76; Schweinfurt.
- BÜTTNER, G.** (1991): Verkarstung triassischer Gesteine in Unterfranken. - Laichinger Höhlenfreund **26 (2)**: 55-62, 3 Abb.; Laichingen.
- BÜTTNER, G.** (1997): Charakterisierung von Grundwässern aus dem Muschelkalk im Umfeld von Schweinfurt. – Naturw. Jahrbuch Schweinfurt **15**: 77-99; Schweinfurt.
- BUWAL** - Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994):Wegleitung für die Wärmenutzung mit geschlossenen Erdwärmesonden, Ausgabe 1994; Bern.
- BUZIEK, G.** (1995b): Kartographische Visualisierung von Geo-Daten unter Berücksichtigung moderner technischer Entwicklungen. – in: **BUZIEK, G.** [Hrsg.]: GIS in Forschung und Praxis: 234-250; Stuttgart.
- BUZIEK, G.** [Hrsg.] (1995a): GIS in Forschung und Praxis. – 334 S., Stuttgart.
- CLAESSON, J., EFTRING, B. & HELLSTRÖM, C.G.** (1994): Analysis of unintended convective heat losses from the Lyckebo rock cavern heat store. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland: 713-720; Helsinki.
- COOK, L.** (1998): Pre- Feasibility Study for Underground Thermal Energy Storage (UTES) at Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. – Honors Thesis, Dalhousie Univ., Halifax, NS, Canada: 97 S.; Halifax [unveröff.].
- CRUICKSHANKS, F. & MOROFSKY, E.** (1994): Das Anwendungspotential für Aquiferwärmespeichersysteme in Kanada. - Stutt. Ber. z. Siedlungswasserwirtschaft, **124**: 53-68; München.
- DALENBÄCK, J.-O.** (1990): Central solar heating plants with seasonal storage - Status report. - Document **D14**, Swedish Council for Building Research (BFR); ISBN 91-540-5201-7; Stockholm.
- DAVIS, J. D.** (1986): Statistics and Data Analysis in Geology (second edition). - 646 S.; New York.

- DE VRIES, D.A. (1987): The Theory of Heat and Moisture Transfer in Porous Media Revisited: - Int. J. Heat Mass Transfer **30/7**; Oxford, New York.
- DEMERS, M. N. (1997): Fundamentals of geographic information systems. - 486 S.; New York.
- DENNINGER, K. (1977): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem Nordwestteil des Blattes 6226 Kitzingen im Maßstab 1:25.000. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 71 S.; Würzburg [unveröff].
- DIEDERICH, G., FINKENWIRTH, A., HÖLTING, B., KAUFMANN, E., RAMBOW, D., SCHARPFF, H.-J., STENGEL-RUTKOWSKI, W. & WIEGAND, K. (1991): Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1:300.000. - Geologische Abhandlungen Hessen **Bd. 95**: 83 S., 3 Abb., 4 Tab., 5 Kt.; Wiesbaden.
- DIEDERICH, J. (1980): Wasserrechtliche Probleme beim Einsatz von Grundwasserwärmepumpen. – Klima-Kälte-Heizung **3/1980**: 133-136; Düsseldorf.
- DIN 4049 T1 bis T3 (1979-1994): Hydrogeologie. Begriffe. – Beuth-Verlag; Berlin-Köln.
- DJAHANGURI-KREMIANS, R. (1977): Sedimentuntersuchungen im Unteren und Mittleren Buntsandstein des Spessarts unter besonderer Berücksichtigung stratigraphischer Problemstellung. - Diss. Univ. Würzburg: 150 S.; Würzburg.
- DOBNER, A. & WEINELT, W. [Hrsg.] (1980): Wasserwirtschaftlichen Rahmenuntersuchungen Donau – Main (Hydrogeologie). - 44 S., 1 Abb., 1 Tab., 14 Beil.; München.
- DOBNER, A. (1975): Der Porenraum und die Permeabilität oberfränkischer Sandsteine. – Diss. Univ. München: 99S.; München.
- DOMENICO, P.A., SCHWARTZ, F.W. (1998): Physical and chemical hydrogeology. - 2. ed.: 506 S.; New York.
- DORHOFER, G. & SIEBERT, H. (1998): The search for landfill sites - Requirements and implementation in lower Saxony, Germany. - Environmental Geology 1998; **35(1)**: 55-65; New York-Berlin.
- DOSCH, K., JASPER, J & ROHM, M. (1998): Potentiale der oberflächennahen Geothermie im Raum Düren. - Tagungsband renergie'98: 163-170; Münster.
- DRACH, V., EBERT, H-P., HEMBERGER, F., OBERDORF, C., FRICKE, J., BARTHEL, R., UDLUFT, P., MARQUARDT G., WILKE, H., STEINHEIMER, A., PFEIFFER, J., SKORKA, T. & REUB, M. (2000): Optimierung von Erdwärmesonden - 2. Zwischenbericht, gefördert unter dem AZ 17013 von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt. - Report ZAE 2 - 0800 – 1(2000); Würzburg [in Druckvorbereitung].
- DRAGANOV, B, MOISEYKINA, I & SHYRCHKOV, A. (1994): Seasonal heat storages in aquifers. - CALOR-STOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage Espoo, Finland, Volume 1: 9-17; Helsinki.
- DRURY M. J. & JESSOP A. M. (1983): The estimation of rock thermal conductivity from mineral content - an assessment. - Zbl. Geol. Pal. **1/83**: 35-48; Stuttgart.
- EASTMAN, J.R. (1997): IDRISI Version 2.0 Tutorial Exercises. – Clark Labs; Worcester, MA, USA.
- EASTMAN, J.R. (1999): Multi-criteria evaluation and GIS. – In: LONGLEY ET AL. [ed.]: Geographical Information Systems, Volume 1 - Principles and technical issues. - 2. ed.: 493-502; New York.
- EBHARDT, G. (1971): Die Hydrogeologie des Raumes Würzburg. – Zeit. dt. geol. Ges., **121**: 41-43; Hannover.
- EBHARDT, G. (1978): Verkarstung und Hydrogeologie ausgesuchter Quellen des Muschelkalks im Mittelmaingebiet - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 205–218; München.
- ECKHARDT, G. (1997): Konzept für eine angewandte Kartierung oberflächennaher geothermischer Ressourcen in Brandenburg. - IZW-Bericht **2/97**: 55 - 56; Karlsruhe.
- EHRENBERG, K.-H., HANSEN, R., HICKETHIER H. & LAEMMLEN, M. (1994): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000 Blatt Nr. 5425 Kleinsassen. - 2., neu bearbeitete Auflage: 385 S., 55 Abb., 16 Tab., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- EHRMANN, W. (1981): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem Blatt 6323 Tauberbischofsheim der TK 1:25.000. – Diplomarbeit Univ. Würzburg, 241 S., 78 Abb., 12 Tab., 7 Taf., 2 Kt.; Würzburg, [unveröff.].
- EINSELE, G. & MERKLEIN, J. (1978): Aquiferdaten von Fest- und Lockergesteinen im Gebiet des Mittelmains und der Regnitz. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 240–250; München.
- ERBAS, K., HOTH, P., HUENGES, E., SCHALLENBERG, K. & SEIBT, A. (1997): Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 112-119; Geeste.

- EUGSTER, W.** (1991): Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. - Diss. ETH Zürich Nr. 9524: 108 S.; Zürich.
- EUGSTER, W.J. & RYBACH, L.** (1997): Langzeitverhalten von Erdwärmesonden – Messungen und Modellrechnungen am Beispiel einer Anlage in Elgg (ZH), Schweiz. - IZW-Bericht **2/97**: 65-69; Karlsruhe.
- EUGSTER, W.J., HESS, K. & HOPKIRK, R.J.** (1997): SERSO: Mit Sommer-Sonne gegen Winter-Glatteis. - Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 112-119; Geeste.
- EVANS, D.D. & NICHOLSON, T.J.** [ed.] (1987): Flow and transport through unsaturated fractured rocks. - Geophysical Monograph Series **42**: 187S; Washington.
- FANINGER, G.** (1997): Die Wärmepumpentechnik in Österreich, Marktsituation und Betriebserfahrungen, energetische und ökologische Bewertung. - IZW-Bericht **2/97**: 13-27; Karlsruhe.
- FANNINGER-LUND, H.** (1997): Possible water quality changes in ATES-systems and their effects on human health. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 91-96, Sapporo.
- FAROUKI, O.T.** (1986): Thermal Properties of soils. - Series on Rock and Soil Mechanics **Vol. 11**: 136 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- FIEDLER, K.** (1993): Felsmechanische Untersuchungen an Buntsandsteinvorkommen im östlichen Spessart im Rahmen des Mainausbaues. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 157 S., 102 Abb., 37 Tab., 17 Anl.; Würzburg [unveröff.].
- FISCH, N. & KÜBLER, R.** (1991): Wärmespeicher. - 80 S.; Köln.
- FIZ** - Fachinformationszentrum Karlsruhe [Hrsg.] (1998): Erneuerbare Energien in Deutschland. – 4 S.; Karlsruhe/Köln; Internet (<http://www.fiz-karlsruhe.de>).
- FRANKE, R. & HELLSTRÖM, G.** (1997): Optimization of solar heating systems with seasonal storage in the ground. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 527-532, Sapporo.
- FREHN, B.** (1997): Erdgekoppelte Wärmepumpen im Versorgungsgebiet der RWE Energie. - IZW-Bericht **2/97**: 41-47; Karlsruhe.
- FRICKE, J. & BORST, W.L.** (1984): Energie. - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen; Energiequellen, Energiespeicherung, Energietransport, Energiekonservierung. - 2. Aufl.: 616 S.; München.
- FRISCH, H., KAINZMAIER, B. & WOHNLICH, S.** [Hrsg.] (2000): Hydrogeologische Modelle - Beispiele aus dem Süddeutschen Raum. Beiträge zum FH-DGG - DVWK - Seminar, 21./22. Oktober 1999 München. - Münchner Geologische Abhandlungen **Heft B12**; München [in Druckvorbereitung].
- FROTEN, R., KELLY, W., KELLY, B., McDUGALL, S.** [SEDA] (1993): Suitability model for the development of groundwater source heat pump technology. - Delta Heat Pumps report; Amherst, NS, Canada.
- FZE** - Forum für Zukunftsenergien [Hrsg.] (1994): Geothermische Energie - Ein Leitfaden für Städte und Gemeinden. - 46 S., ISBN 3-930157-18-7; Bonn.
- GABRIELSON, A., LOVISA, M. & LEHTMETS, M.** (1997): Heat storage in soft clay at 35-90°C – Long term experience. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 31-36; Sapporo.
- GEHLIN, S. & NORDELL, B.** (1997): Thermal response test – mobile equipment for determining the thermal resistance of boreholes. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 103-108, Sapporo.
- GEHLIN, S. & NORDELL, B.** (1998): Thermal response tests of boreholes - results from in situ measurements. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).
- GEORGOTAS, N. & UDLUFT, P.** (1978): Inhaltsstoffe des oberflächennahen Grundwassers und des Oberflächenwassers – Anorganische Inhaltsstoffe. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 258–265; München.
- GEORGOTAS, N.** (1972): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Raum Bad Kissingen unter besonderer Berücksichtigung der dortigen Heil- und Mineralquellen.- Diss. TU München: 197 S., 4 Beil.; München.
- GEOTHERMISCHE VEREINIGUNG & STADTWERKE STRAUBING [HRSG.]** (1998): Geothermie: Forschung, Entwicklung, Markt. - Tagungsband 5. Geothermische Fachtagung, 12. - 15. Mai 1998 in Straubing: 587 S., ISBN 3-932570-14-6; Geeste.

- GEYER, G. (2000): Geologie von Unterfranken. – Justus Perthes Verlag, Gotha [unveröff. Manuskript; im Druck].
- GIEBE, R. (1989): Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie. - Diss. Univ. Stuttgart, Fakultät 5 – Energietechnik: 169 S.; Stuttgart.
- GORHAN, H.L., KAPP, H., KAPP, C., SCHÄRLI, U., KÄMPFEN, E., HADORN, J.-C. & RYBACH, L. (1993): Energiepfähle und neue Entwicklungen in der Geothermie, Frühjahrstagung 1993, St. Gallen: Mittlg. der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik; Internet (www.geothermal-energy.ch).
- GRÜNREICH, D. (1995): Aufgabe und Bedeutung der kartographischen Visualisierung in Geo-Informationssystemen (GIS) – In: BUZIEK, G. [Hrsg.]: GIS in Forschung und Praxis: 225-223; Stuttgart.
- GRÜNREICH, D. [Hrsg.] (1997): GIS und Kartographie im multimedialen Umfeld – Grundlagen, Anwendungen und Entwicklungstrends. – 138S.; Bonn.
- GTV - Geothermische Vereinigung [Hrsg.] (1999): Wo bleibt die Energieforschung? Interview mit Hans-Josef Fell, forschungspolitischer Sprecher der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen. - Geothermische Energie 24/25, 7. Jahrgang/Heft 1/2, März/September 1999; Geeste.
- GUDDEN, H. & HAUNSCHILD, H. (1993): Die Trias in der Forschungsbohrung Abenberg 1001. - Geologica Bavaria 97: 47 – 66, 5 Abb., 1 Tab., 1 Beil.; München.
- GUERNSEY, E.N., BETZ, P.L. & SKAN, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. - ASHVE Trans, 55: 321-344.
- HADORN, J.-C. & SAUGY, B. (1994): U- and SAILLON 1MW solar: Seasonal storage of solar energy in aquifers. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 2: 657-665; Helsinki.
- HADORN, J.-C. (1994): A simple design method to predict the efficiency of an underground heat storage with or without natural groundwater flow. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 1: 187-194; Helsinki.
- HADORN, J.-C. (1997): Status of Seasonal Heat Storage in Switzerland. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 976 – 972; Sapporo.
- HADORN, J.-C., CHUARD, D., JABOYEDOFF, P. & CUARD, P. (1989): Wegleitung zur saisonalen Wärmespeicherung. – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA): 308 S.; Zürich.
- HALLAM, C.A. & SALISBURY, J.M. (1996): GIS and watershed analysis - not just for mapping anymore. In: American Water resources Association Technical Publication Series TPS, 96/3: 317-326; Reston, VA, United States.
- HALTENHOF, M. (1962): Lithologische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk von Unterfranken (Stratonomie und Geochemie). - Abh. Naturwiss. Ver. Würzburg, Bd. 3, 1: 1-124, 26 Abb., 15 Tab., 2 Taf.; Würzburg.
- HAMADA, Y., OCHIFUJI, K., NAGANO, K. & NAKAMURA, M. (1997): Study on the heating and cooling by long-term heat storage with underground vertical U-tubes. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 37-42; Sapporo.
- HART, D.P., & COUVILLION, R. (1986): Earth coupled heat transfer. - NGWA National Ground Water Association: 192S.; Dublin, OH.
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. - 3. Auflage: 304 S., 159 Abb., 19 Tab.; Stuttgart.
- HASHIN Z. & SHTRIKMAN S. (1962): - J. Appl. Phys. Bd. 33/10, 3125-3131; Amsterdam.
- HAUNSCHILD, H. (1986): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6326 Ochsenfurt. - 152 S., 19 Abb., 7 Tab., 5 Beil.; München.
- HEILAND, J. (1997): Genehmigungsverfahren im Zusammenhang mit Erdwärmennutzung. - In: Symposium Geothermie Erdwärme, Stuttgart 25.11.97, vorläufiger Tagungsband: ohne Seitenzahlen; Stuttgart.
- HEINRICH, U. (1999): Die Verfügbarkeit von Geodaten als limitierender Faktor in der ökologisch orientierten Planung. - in BLASCHKE, T. [Hrsg.]: Umweltmonitoring und Umweltmodellierung Gis und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung: 121-130; Heidelberg.
- HEITZMANN, P. & PHILLIPP, R. (1999): Digitale geologische Karte als Grundlage für die Umweltplanung. – in ASCH, K. [Hrsg.]: GIS in Geowissenschaften und Umwelt: 3–24; Berlin, Heidelberg, New York.

- HELLSTRÖM, G.** (1991): Ground heat storage - Thermal analysis of duct storage systems, Theory. - PhD-Thesis Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology; Lund, Sweden.
- HELLSTRÖM, G.** (1994): Fluid-to-ground thermal resistance in duct ground heat storage. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 1: 373-380; Helsinki.
- HELLSTRÖM, G.** (1996): Principles of Underground Thermal Energy Storage. – In: Underground Thermal Energy Storage Event #5 Seminar June 17, 1996, Proceedings, Dartmouth: 25-33; Dartmouth, NS, CA.
- HELLSTRÖM, G., SANNER, B., KLUGESCHIED, M., GONKA, T. & MARTENSSON, S.** (1997): Experiences with the borehole heat exchanger software EED. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 247–252; Sapporo.
- HELLSTRÖM, G., TSANG, C.F. & CLAESSION, J.** (1979): Heat storage in aquifers: Buoyancy flow and thermal stratification problems. - University of Lund, Department of Mathematical Physics; Lund, Sweden.
- HERTLE, H., DUSCHA, M., EISENMANN, L., WIEDEMANN, F. & ZIPF, J.** (1999): Untersuchung von Möglichkeiten zur Förderung der Wärmepumpentechnik durch das Umweltzeichen. – Forschungsbericht 221 01 001 UBA-FB 99-056, Texte Veröffentlichung **44/99**: 98 S.; Berlin.
- HOBLER, M.** (1971): Hydrogeologische Untersuchungen in der quartären Maintalfüllung im Raum Ochsenfurt, Unterfranken. - Dissertation Univ. Würzburg: 100 S.; Würzburg.
- HOFFMANN, U.** (1962): Zur Geologie des Maintals bei Marktbreit. - Abh. Naturwiss. Verein Würzburg **3(2)**: 205-217; Würzburg.
- HOFFMANN, U.** (1967a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000. Blatt Nr. 6225 Würzburg Süd. - 134 S., 17 Abb., 2 Tab.; München.
- HOFFMANN, U.** (1967b): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern Blatt 6125 Würzburg Nord. – 94S., 21 Abb., 1 Tab., 4 Beil.; München.
- HOFMANN, K.** (1986): Die lithostratigraphische Gliederung der Myophorienschichten des Mittleren Keupers in der tonigen Beckenfazies des nördlichen Süddeutschlands. - *Geologica Bavarica* **89**: 179-188; München.
- HOFMANN, M., UDLUFT, P. & KRZEMIN, H.-C.** (1991): Hydrogeologische Untersuchungen zur Einzugsgebietsbestimmung der Mittelstreuwer Quellen. - Veröff. d. Lehr- u. Forschungsbereiches Ang. Geol. u. Hydrogeol. d. Univ. Würzburg: 31 S., 16 Abb.; Würzburg.
- HOH, J.** (1989): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem SE-Quadranten des Blattes 6226 Kitzingen der TK 1:25.000. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 107 S., 29 Abb., 6 Tab., 2 Beil.; Würzburg [unveröff.].
- HÖLTING, B.** (1996): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 5. Aufl.: 440 S., 114 Abb., 46 Tab.; Stuttgart.
- HONARMAND, H. & LIMBERG, A.** (1998): Geothermische Erkundungen an fünf Lokationen im Berliner Stadtgebiet. – GEO-BERLIN'98 – Gemeinsame Jahrestagung DGG, DMG, GGW & Pal. Ges. – Tagungsband: V143; Berlin.
- HUBER, A. & SCHULER O.** (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. - Forschungsprogramm UAW, Amt für Energiewirtschaft, Bern. ENET Nr. 9658807; Bern.
- HURTER, S.J.** (1997): Atlas der geothermischen Ressourcen in Europa. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: S. 83; Geeste.
- HUWE, B.** (1998): SOHE - A numerical model for the simulation of heat flux in soils. – Internet (<http://btgyx2.geo.uni-bayreuth.de/bodenphysik/>).
- IEA** (1998): IEA ANNEX 8, Implementing Underground Thermal Energy Storage 9th Experts' Meeting 17-19 November National Energy Conservation Agency (KAPE) Warsaw, Poland; Internet (<http://cevre.cu.edu.tr/eces/>).
- IGI** – Niedermeyer Consult (1998): Kooperation Wasserversorgung Würzburg - Estenfeld; Erschließung des Grundwassers im Bereich Lengfeld - Estenfeld; Erarbeitung der Unterlagen für wasserrechtliche Genehmigungen - Ergebnisbericht - Teilbericht 3: Geologisch-tektonische, hydrogeologische und wirtschaftliche Verhältnisse im Betrachtungsgebiet für die Erschließung des Grundwassers im Bereich Lengfeld – Estenfeld. Gutachten des Ingenieur-Geologischen Institutes Niedermeyer [unveröff.].
- INGERSOLL, L.R. ZOBEL, O.J. & INGERSOLL, A.C.** (1948): Heat conduction with engineering and geological application. – 278 S.; New York.

- ISMAIL, K.A.R. & CARROCCI L.R.** (1988): Performance and economic analysis of stratified storage tanks. - Proceedings of the JIGASTOCK 88, 4th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Versailles, France: 753-756; Paris.
- IZW** - Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik [Hrsg.] (1997): Wärmepumpeninstallation. – 60 S.; Köln.
- JESSELL, M.** (2000): Three-dimensional geological modelling of potential-field data. – Internet (<http://www.earth.monash.edu.au/~mark/strgps/>).
- JIGASTOCK** (1988): Proceedings of the JIGASTOCK 88, 4th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Volume 1, Versailles, France; Paris.
- JOST, P.** (1995): Bodenphysikalische, geochemische und tonmineralogische Untersuchungen an ausgewählten nordbayerischen Tonlagerstätten. - Diplomarbeit Universität Würzburg: 146 S., 25 Abb., 22 Tab., 11 Anlagen; Würzburg [unveröff.].
- KABUS, F.** (1998): Underground thermal energy storage with absorption heat pumps. - IEA Heat Pump Centre Newsletter **Vol. 16 – No. 2** (1998); Sittard.
- KABUS, F.** (1999): Geothermie im Reichstag: Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen, - Anlagen der Wärme- und Kälteversorgung, Speicherung von Wärme und Kälte in Aquiferen – Internet (<http://www.geothermie.de>).
- KALTSCHMITT, M. & WIESE, A.** [Hrsg.] (1997): Erneuerbare Energien. - 2. Aufl.: 540 S.; Berlin, Heidelberg, New York.
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E. & WOLFF, M.** (1999): Energie aus Erdwärme. – 265 S., 77 Abb., 45 Tab.; Stuttgart.
- KANGAS, M.T. & LUND, P.D.** [ed.] (1994): Calorstock '94 – Proceedings of the 6th international conference on thermal energy storage, August 22-25, 1994, Espoo, Finland. - Volume 1 & 2: 880 S., ISBN 951-22-222, Cosmoprint Oy; Helsinki.
- KANTON ZÜRICH** (1996) : Erdwärmesondenkarte 1:25.000 - Blatt Albis; Zürich.
- KANZ, W.** (1977): Das Talgrundwasser des Maintals im Grenzbereich Muschelkalk-Buntsandstein Hydrogeologie und Beschaffenheit. – Dissertation Univ. Tübingen: 118 S.; Tübingen.
- KANZ, W.** (1978): Die Uferfiltrationsanlage von Karlstadt a.M. – eine Modelluntersuchung. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 174–182; München.
- KATZENBACH, R., KNOBLICH, K., MANDS, E., RÜCKERT, A. & SANNER, B.** (1997): Energiepfähle - Verbindung von Geotechnik und Geothermie. - IZW-Bericht **2/97**: 91-98; Karlsruhe.
- KAYSER, M. & KALTSCHMITT, M.** (1997): Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen – Energie und Umweltanalyse. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 356-364; Geeste.
- KEMNITZER, B.** (1993): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Oberen Muschelkalk und Unteren Keuper bei Gramschatz, 15 km nördlich von Würzburg.- Diplomarbeit Univ. Würzburg: 134 S.; Würzburg [unveröff.].
- KJELLSSON E. & HELLSTRÖM G.** (1994): Economy of Heat Storage in Rock Caverns. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 2: 721-727; Helsinki.
- KLEIN, S. ET AL.** (1996): TRNSYS 14.2. A Transient System Simulation Program. - Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin; Madison, USA.
- KLUGESCHIED, M.** (1997): Thermohydraulische Berechnungen zur energetischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes am Beispiel zweier Standorte in Lomma (Südschweden) und Berlin. - Diss. Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießener geologische Schriften **60**: 169 S.; Gießen.
- KLUGESCHIED, M., SANNER, B. & KNOBLICH, K.** (1994): Strömungsgekoppelte Simulation der Untergrundtemperaturen bei Erdwärmesonden und unterirdischer thermischer Energiespeicherung. Ber. Symp. Erdgek. Wärmepumpen 1994, IZW-Bericht **1/94**: 351-360; Karlsruhe.
- KNOBLICH, K., SANNER, B. & KLUGESCHIED, M.** (1993): Erdgekoppelte Wärmepumpen, energetische, hydrogeologische und geologische Untersuchungen zum Entzug von Wärme aus dem Erdreich an der Forschungsanlage Schöffengrund Schwalbach und anderen Standorten. - Gieß. Geol. Schrift. **49**: 192 S.; Gießen.
- KOLDITZ, O.** (1997): Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluffgestein. – 263 S.; Berlin-Stuttgart.
- KÖPKE, R.** (1999): Beim Umweltengel abgeblitzt. - Die Tageszeitung, Sonderbeilage „Erneuerbare Energie“ 4./5.9.1999; Berlin.

- KÖRBER, H.** (1962): Die Entwicklung des Maintals. – Würzburger Geographische Arbeiten **10**: 170S.; Würzburg.
- KRUSE, H. & HEIDELCK, R.** (1997): Heizen mit Wärmepumpen. – 2. Auflage: 87 S.; Köln.
- KUCHENBROD, F.** (1996): Thermische Charakterisierung eines Aquiferwärmespeichers. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 61 S., Würzburg [unveröff.].
- KUS, G. & BARTHEL, R.** (2000): GIS-gestützte Analyse von Georisiken und -potentialen unter Verwendung geologischer 3D-Untergrundmodelle. – Zeitschrift für Angewandte Geologie (ZAG), **46/2**, Juni 2000 [im Druck.]
- KUS, G.** (1995): Felsmechanische Untersuchungen am Mittleren und Oberen Muschelkalk im Maintal zwischen Goßmannsdorf und Kitzingen. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 87 S., 62 Abb., 16 Tab., 2 Taf., 4 Anlagen; Würzburg [unveröff.].
- LANDBERG J.** (1988): Effects of horizontal fractures on thermal break-through in a limestone aquifer - A case study of a groundwater/heatpump system in Southern Sweden. - Proceedings of the JIGASTOCK 88, 4th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling Versailles, France, Volume 1: 383-388; Paris.
- LAWA** (1980): Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. – zitiert in **HÖLTING, B.** (1996), ZfGW Verlag; Frankfurt.
- LEGE, T., KOLDITZ, O. & ZIELKE, W.** (1996): Strömungs- und Transportmodellierung. - Methodenhandbuch zur Erkundung des Untergrunds von Deponien und Altlasten, **Band 2**: 418 S., 169 Abb., 109 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York.
- LEPPER, J.** [Hrsg.] (1993): Beschlüsse zur Festlegung der lithostratigraphischen Grenzen Zechstein/Buntsandstein/Muschelkalk und zu Neubenenennungen im Unteren Buntsandstein in der Bundesrepublik Deutschland. - N. Jb. Geol. Paläont., **1993 (11)**: 687-692; Stuttgart.
- LEU, W., KELLER, B., MATTER, A., SCHÄRLI, U. & RYBACH, L.** (1999): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500 m) – Datenbank Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität. – Bericht Bundesamt für Energie (ENET-Nr. 9723719): 79 S.; Bern.
- LIEBIG, W.** (1999): Desktop-GIS mit ArcView-GIS - Leitfaden für Anwender. - 2. Aufl.: 425 S.; Heidelberg.
- LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. & RHIND, D.W.** (1999a): Geographical Information Systems, Volume 1 - Principles and technical issues. - 2. ed.: 580 S.; New York.
- LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. & RHIND, D.W.** (1999b): Geographical Information Systems, Volume 2 - Management issues and applications. - 2. ed.: 520 S.; New York.
- LOTTNER, V.** (1994): Saisonale Wärmespeicherung: Bedeutung und Stand der Entwicklung in Deutschland. - Stutt. Ber. z. Siedlungswasserwirtschaft, **Bd. 124**: 13-23; München.
- LUND P.D.** (1997): Finding new solutions for long-term solar heat storage. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 955-966; Sapporo.
- MAHADJER, D.** (1978): Sedimentologische Untersuchungen im Heigenbrücker- und Felssandstein unter besonderer Berücksichtigung der Paläogeographie. – Diss. Univ. Würzburg: 133 S.; Würzburg.
- MAI, T.H., LACHI, M., ABGRALL, M. & PADET, J.** (1994): Seasonal heat storage in an unsaturated ground: A parametric study. CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 1: 227-235; Helsinki.
- MARTINI, E.** (1992): Fossilien, Sedimentmarken und Paläoökologie im Oberen Buntsandstein (Röt) der Rhön. - Natur und Museum, **122 (3)**: 90-98, 18 Abb.; Frankfurt a. M.
- MÄRZ, K.** (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns. – Hydrochemische und hydrogeologische Mitteilungen **2**: 1-170; München.
- MATHEY, B.** (1994): Thermal balance of an heliogeothermal heating plant for an administrative building with vertical boreholes and seasonal recharge. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 1: 121-131; Helsinki.
- MATHEY, B., PAHUD, D. & BUCHI, J.** (1997): Améliorer la productivité des sondes en terre. Calculs et mesures in situ. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 278-290; Geeste.
- MATTHES, S. & OKRUSCH, M.** (1965): Spessart. - Sammlung geologischer Führer **Bd. 44**: 220 S., 14 Abb., 3 Beil., 1 Karte; Stuttgart.

- MATTHESS, G. & UBELL, K.** (1983): Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie, **Bd. 1:** 438 S., 214 Abb., 75 Tab.; Berlin; Stuttgart.
- MATTHESS, G.** (1970): Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. – Abh. hess. Landesamt für Bodenforsch. **58:** 105 S., 20 Abb., 18 Tab., 4 Taf.; Wiesbaden.
- MATTHESS, G.** (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers - Lehrbuch der Hydrogeologie, **Bd. 2:** 498 S., 139 Abb., 116 Tab.; Berlin, Stuttgart.
- MCCRAY, K.** [ed.] (1997): Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed Loop Heat Pump Systems. - 3rd Printing: 43S.; NGWA National Ground Water Association Westerville, Ohio, USA.
- MIDDENDORF, E.** (1982): Erläuterungen zu einer Geologischen Kartierung auf dem Blatt Nr. 6025 Arnstein (SW-Quadrant) der topographischen Karte 1:25.000 mit speziellen Untersuchungen der Tektonik. - Diplomarbeit Univ. Würzburg: 120 S. ; Würzburg [unveröff.].
- MOROFSKY E. & CRUICKSHANKS, F.** (1997): Underground thermal energy storage procedures for environmental impact assessment. - Working Report May 1997 in collaboration with Annex 8 of the International Energy Agency, Energy Conservation Through Energy Storage Implementing Agreement; Internet (<http://cevre.cu.edu.tr/eces/>).
- MOROFSKY, E. & MIRZA, C.** (1983): Geotechnical aspects of thermal storage in aquifers. - Subsurface heat storage in theory and practice; proceedings of the international conference; Vol. 2: 708-717; Swed. Counc. Build. Res., Stockholm.
- MOROFSKY, E.** (1997): Seasonal cold storage building and process applications: a standard design option? – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 1009-1016; Sapporo.
- MOROFSKY, E.** [ed.] (1985): Proceedings of the ENERSTOCK 85, 3rd International conference on energy storage for building heating and cooling, Toronto, Canada, 1985; Ottawa.
- MÜLLER, J. & REUB, M.** (1997): Modellierung des Wärme- und Stofftransportes in einem Hochtemperatur-Erdsondenwärmespeicher. - IZW-Berichte **97/2:** 225-230; Karlsruhe.
- MÜLLER, J.** (1996): Grundzüge der Naturgeographie von Unterfranken. – 232 S., 63 Abb., 17 Tab.; Gotha.
- MUND, J.** (1994): Wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Aspekte der Wärmespeicherung im Aquifer. - Stutt. Ber. z. Siedlungswasserwirtschaft, **Bd. 124:** 127-136; München.
- MUVBW - Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg [Hrsg.]** (1998): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. – 12 S., Stuttgart.
- MVBAUMIN – Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern [Hrsg.]** (1997): Erneuerbare Energien 1996. – 28. S.; Schwerin.
- NANI, M., STALDER, M., SCHWEIZER, A. & BAUMGARTNER, T.** (1994): Wpcalc - Rechenprogramm zur Auslegung von WP-Anlagen. - Bundesamt für Energiewirtschaft; Bern; Internet (<http://www.admin.ch/bew/d/index.htm>).
- NASSAR, I.N., BENJAMIN, J.G & HORTON, R.** (1996): Thermally induced water movement in uniform clayey soil. - Soil Science **161, 8:** 471-479; Baltimore.
- NAST, K.** (1997): Erdwärme – Rechtsgrundlagen der Erkundung und Gewinnung.. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 436-444; Geeste.
- NATURAL RESOURCES CANADA [ed.]** (1996): Heating and cooling with a heat pump. – Energy Publications: 52 S., ISBN 0-662-22865-0; Ottawa.
- NEISS, J.** (1982): Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. - Fortschr.-Ber. VDI-Z., **Reihe 3, Nr. 73:** 293 S.; Düsseldorf.
- NNANI, M.** (1984): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem Blatt 6224 Helmstadt (NE) der topographischen Karte 1:25.000. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: VII + 122 S., 65 Abb., 10 Tab., 2 Beil.; Würzburg [unveröff.].
- NORDELL, B. & DIKICI, D.** (1998): Winter air as a source for cold storage injection. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).
- NORDELL, B.** (1994): Borehole heat storage design optimization. - Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden 137D: 194 S.; Lund.

- NORDELL, B.** [ed.] (1999): International Energy Agency Energy R&D Program 46th Executive Committee Meeting (XC46) Energy Conservation through Energy Storage Venue: Luleå Stadshotell Luleå, Sweden 14-15 June 1999. - Pro Memoria: 51 S.; Internet (<http://cevre.cu.edu.tr/eces/>).
- NORDELL, B., BJARNHOLT, G., STEPHANSSON, O. & TORIKKA, A.** (1986): Fracturing of a pilot plant for borehole heat storage in rock. - Tunneling and under-ground space technology, **Vol.1, No 2**: 195-205; Minneapolis, USA.
- NORDELL, B., HALLBERG, R.O. & SJÖBERG, L.** (1988): Leaching of Rock Fractures, laboratory and field tests for borehole heat stores. - Swed. Coun. Build. Res., **D4: 1988**; Stockholm.
- OCHIFUJI, K. & NAGANO, K.** [ed.] (1997): Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan, 1028 S.; Sapporo.
- OKRUSCH, M., STREIT, R. & WEINELT, W.** (1967): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5920 Alzenau i. Ufr. - 336 S., 48 Abb., 25 Tab., 5 Beil.; München.
- PAKSOY, H.**, (1996): Underground Thermal Energy Storage Potential in Turkey. - Underground Thermal Energy Storage Event #5 Seminar June 17, 1996, Proceedings, Dartmouth: 97-106; Dartmouth, NS, CA.
- PAKSOY, H., EVLIYA, Z. & ABACI, S.** (1997): Underground Thermal Energy Storage Potential in Turkey. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 949-954; Sapporo.
- PERRIER, J. & RAIGA-CLEMENCEAU, J.** (1983): Temperature Measurements in Boreholes. In: **DURAND, B.**: Thermal Phenomena in Sedimentary Basins. - Collection Colloques et Seminaires, **41**; IFP, Paris.
- POPPEI, J. & FISCHER, D.** (1997): Theoretische und praktische Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmesonden im Lockergestein unter besonderer Berücksichtigung der geologisch-hydrogeologischen Gegebenheiten Nord-Ost-Deutschlands. - IZW-Berichte **2/97**: 57-64; Karlsruhe.
- PÖTZL, D.** (1997): Durchfluß- und Sorptionsverhalten ausgewählter geologischer Einheiten gegenüber organischen und anorganischer Modellsubstanzen. - Diss. Univ. Würzburg: 192 S.; Würzburg.
- PRIBNOW, D.** (1994): Ein Vergleich von Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. - Fortschr.-Ber. **Reihe 19** Wärmetechnik/Kältetechnik **Heft 75**: 118 S., 56 Bilder, 15 Tab.; Düsseldorf.
- PRIEBE, H.** (1980): Geologische Karte auf dem Nord-Ost-Quadranten des Kartenblattes Nr. 6226 Kitzingen der topographischen Karte 1:25.000 mit Erläuterungen. - Diplomarbeit Univ. Würzburg: VII + 128 S., 31 Abb., 6 Tab., 4 Taf., 1 geol. Karte; Würzburg [unveröff.].
- PRINZ, H.** (1991): Abriß der Ingenieurgeologie. - 2. Aufl.: 466 S., 352 Abb., 74 Tab.; Stuttgart.
- PROBERT, T. CLAESSON, J. & HELLSTRÖM, G.** (1997): Simulation for ATES using the conformal flow technique. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 685-690; Sapporo.
- PRUESS, K. & WANG, J.S.Y.** (1987): Numerical modeling of isothermal and nonisothermal flow in unsaturated fractured rock - a review. - Geophysical Monograph Series **42**: 11-21; ISBN 0-87590-069-0, Washington.
- RAUCH, W.** (1992): Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. - Veröffentlichungen der Universität Innsbruck, **188**: 135 S., 23 Beil.; Innsbruck.
- REUB, M., MÜLLER J.P., ROEHLE B., WECKLER M. & SCHOELKOPF W.** (1998): A new concept of a hybrid storage system for seasonal thermal energy storage in solar district heating. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).
- REYNOLDS, J.M.** (1997): An introduction to Applied and Environmental Geophysics. - 796S.; New York.
- RICHTER-BERNBURG, G.** (1974): Stratigraphische Gliederung des deutschen Buntsandsteins. - Geol. Jb. **A 25**: 127-132, 1 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- RÖHLE, B., DALLMAYER, W. & SCHÖLKOPF, W.** (1997): Solar gestütztes Nahwärmesystem für die 20 Niedrigenergiehäuser in Arnstein. - Bericht Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) München; München.
- RUHLAND J.** (1997): Energetische und balneologische Anwendungen der Geothermie. - Hydrogeologie und Umwelt, **Heft 13 - 2+3**. Würzburger Hydrogeologisches Kolloquium 1996: 87-94; Würzburg.
- RUTTE, E. & WILCZEWSKI, N.** (1983): Mainfranken und Rhön. - Sammlung geologischer Führer, **74**: 217 S., 64 Abb., 2 Tab., 4 Taf.; Berlin, Stuttgart.
- RWE [Hrsg.]** (1995): Energie-Bau-Handbuch, 11. Ausgabe, 2. Auflage. - Energieverlag, Heidelberg.

- RYBACH, L. & EUGSTER, W.J.** (1998): Reliable long-term performance of BHE systems and market penetration - the Swiss success story. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).
- RYBACH, L., EUGSTER, W. & HOPKIRK, J.** (1992): Untiefe, dezentrale Erdwärmennutzung: Betriebsverhalten von Erdwärmesondenheizsystemen. - In **SCHULZ, R.** [Hrsg.]: Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland: 150-162; Karlsruhe.
- SALGER, M. & SCHWARZMEIER, J.** (1985): Tonmineralogische Untersuchungen im Buntsandstein des Ostspessarts. – *Geologica Bavarica* **87**: 91-96, 1 Abb., 2 Tab.; München.
- SANNER, B. & HELLSTRÖM, G.** (1998): Examples for Underground Thermal Energy Storage with Borehole Heat Exchangers in Central and Northern Europe. - IEA Heat Pump Centre Newsletter **16/2**: 25-27; Sittard.
- SANNER, B. & KNOBLICH, K.** (1990): Geochemical and geotechnical aspects of high temperature thermal energy in soil. - *Z. Angew., Geowiss.* **Heft 9**: 93-108; Gießen.
- SANNER, B. & KNOBLICH, K.** (1991): Umweltverträglichkeit der Wärmeträgermedien und Kältemittel verschiedener erdgekoppelter Wärmepumpensysteme. - *Z. Angew. Geowiss.* **Heft 10**: 67-90; Gießen.
- SANNER, B. & KNOBLICH, K.** (1993): Standortparameter für die Nutzung des Erdreichs zur saisonalen thermischen Energiespeicherung. - *Z. Angew. Geowiss.*, **Heft 12**: 49-68; Gießen.
- SANNER, B. & KNOBLICH, K.** (1994): Hydrogeologische und geotechnische Aspekte der Wärmespeicherung im Aquifer - potentielle Standorte. - *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, **Bd. 124**: 79-89; München.
- SANNER, B. & REUB, M.** (2000): Auslegung von Wärmequellenanlagen erdgekoppelter Wärmepumpen. – *Heizung-Lüftung-Haustechnik*, **Bd. 51 (2000) Nr. 4 – April**: 50–58; Düsseldorf.
- SANNER, B. & STILES, L.** (1997): Status of seasonal cold storage in ground source heat pumps. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 13-17; Sapporo.
- SANNER, B.** (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. - *IZW-Berichte* **2/92**: 328S., Karlsruhe.
- SANNER, B.** (1994): Schweden: Unterirdische Thermische Energiespeicherung. - *Geothermische Energie* Nr. 9: 2-15; Geeste.
- SANNER, B.** (1995): Energiepfähle. - *Geothermische Energie* **Nr. 12**: 5-7; Geeste.
- SANNER, B.** (1996): Zwei ungewöhnliche thermische Energiespeicher in den Niederlanden und der Schweiz. - *Geothermische Energie* **Nr. 16**; Geeste.
- SANNER, B.** (1999): Neue Entwicklungen bei der Genehmigung von Erdwärmesonden. - *Geothermische Energie* **24/25**, 7. Jahrgang/Heft 1/2; Geeste.
- SANNER, B.** (2000): Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen? – Internet (<http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/erdwaermesonde/>).
- SANNER, B., BOISSAVY, C., EUGSTER W. J., RITTER, W. & VAN ECK, H.** (1999): Stand der Nutzung oberflächennaher Geothermie in Mitteleuropa; Internet (<http://www.geothermie.de>).
- SANNER, B., BREHM, D. & KNOBLICH, K.** (1986): Erstes Betriebsjahr der Erdsonden-Forschungsanlage Schwalbach (1985/86). - *Z. Angew. Geowiss.* **7**: 43-60; Gießen.
- SANNER, B., HAHNE, E. & KONSTANTINIDOU, E.** (1997): VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“. - *IZW-Bericht* **2/97**: 7-12; Karlsruhe.
- SANNER, B., PHETTEPLACE, G. & HELLSTRÖM G.** (2000): Introduction to Computer Models for Geothermal Heat Pumps. – Internet: http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/ItCMfGHP/ItCMfGHP_index.htm.
- SANNER, B., REUB, M. & MANDS, E.** (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - *Geothermische Energie* **24/25**, 7. Jahrgang, Heft 1/2, März/September 1999; Geeste.
- SANNER, B., RYBACH, L. & EUGSTER, W.J.** (1997): Erdwärmesonden Burgdorf - ein Programm und viele Mißverständnisse. - *Geothermie CH* **1/97**: 4-6; Zürich.
- SAURER, H. & BEHR, F.J.** (1997) : Geographische Informationssysteme - Eine Einführung. - 235 S.; Darmstadt.

- SCHARBERG, A., KRAUSE, H. & PÖTKE, W.** (1997): Speicherung von Wärme in Grubenräumen – Messung und Simulation. - Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 404 – 411; Geeste.
- SCHEFFER, P. & SCHACHTSCHNABEL P.** (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. - 14. Aufl.: 494 S.; Stuttgart.
- SCHENK, P.-F.** (1981): Wärmegewinnung aus dem Grundwasser in Schleswig-Holstein. - Z. dt. geol. Ges. **132**: 745-749; Hannover.
- SCHIRMER, W.** (1978): Talgrundwasser von Main und Regnitz – Aufbau und Genese der Talau. - Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 145–154; München.
- SCHMITT, P.** (1982): Herkunft und Beschaffenheit oberflächennaher Grundwässer und mineralstoffreicher Tiefenwässer im Muschelkalk-Keupergebiet des Grabfeldgäues (Ufr.). - Diss. Univ. München: 235S.; München.
- SCHÖN, J.** (1983): Petrophysik, physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. – 405 S., 194 Abb., 70 Tab.; Stuttgart.
- SCHRÖDER, B.** (1970): Fränkische Schweiz und Vorland. - Sammlung geologischer Führer **Bd. 50**: 86 S., 20 Abb., 4 Beil.; Stuttgart.
- SCHULZ, R., WERNER, R., RUHLAND, J. & BUßMANN, W.** [Hrsg.] (1992): Geothermische Energie - Forschung und Anwendung in Deutschland. – 216 S.; Karlsruhe.
- SCHWARZ, H. U.** (1970): Zur Sedimentologie und Fazies des Unteren Muschelkalks in Südwestdeutschland und angrenzenden Gebieten. - Diss. Univ. Tübingen: 229 S., 63 Abb., 14 Taf., 136 Bild.; Tübingen.
- SCHWARZMEIER, J.** (1977): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6024 Karlstadt und zum Blatt Nr. 6124 Remlingen. - 155 S., 34 Abb., 11 Tab., 5 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1979): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern Blatt 6123 Markt Heidenfeld. – 174S., 31 Abb., 9 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1980): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6023 Lohr a. Main. - 159 S., 23 Abb., 5 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1981): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6027 Grettstadt. - 126 S., 18 Abb., 2 Tab., 4 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1982): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 5927 Schweinfurt. - 139 S., 23 Abb., 1 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1984): Über den Buntsandstein an unterer Saale und Sinn. – *Geologica Bavarica* **89**: 95-115; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1985): Der Mittlere Buntsandstein in Kernbohrungen des Ostspessarts. - *Geologica Bavarica* **87**: 61-90, 15 Abb., 3 Tab.; München.
- SCHWILLE, F. & ZAUTER, S.** (1981): Grundwassertemperaturmessungen im Einflußbereich von Oberflächen-gewässern. - Z. dt. geol. Ges. **132**: 751-765; Hannover.
- SEIBT, P & KABUS, F.** (1997): A large scale aquifer heat and cold storage system right in the middle of Berlin. – Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 455–460; Sapporo.
- SEIBT, P.** (1995): Abschlußbericht (Kurzfassung) zum Forschungsvorhaben 0329332A (BMFT): „Die Möglichkeiten der Speicherung von Abwärme in Aquiferen an ausgewählten Standorten in Nordostdeutschland“. - BMFT-Bericht 0329332A: 75 S.; Neubrandenburg.
- SEIBT, P. ET AL.** (1990): Langzeitwärmespeicherung in Aquiferen. - Z. geol. Wiss., **18/8**; Berlin.
- SEIWALD, H. & HAHNE, E.** (1994): Sensitivity analysis of a central solar heating system with high temperature duct seasonal storage. – CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage Espoo, Finland, Volume 2: 705-712; Helsinki.
- SEIWALD, H., KÜBLER, R., M., FISCH, N. & HAHNE, E.** (1994) Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben „Saisonale Wärmespeicherung mit vertikalen Erdsonden im Temperaturbereich von 40 - 80 Grad C“. ITW, Inst. f. Thermodynamik und Wärmetechnik: 67 S.; Stuttgart.
- SEUBERT, B.W.** (1979): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem SW-Teil des Blattes 6226 Kitzingen der TK 1:25.000. Mit einem Kapitel zu Untersuchungen an Gesteinsfarben. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 90 S.; Würzburg, [unveröff.].
- SHONDER, J.A. & HUGHES P.J.** (1998): Increasing confidence in geothermal heat pump design methods. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).

- SIA** (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. - SIA-Dokumentation **D 0136**, Serie „Planung, Energie und Gebäude“: 142 S.; Zürich.
- SIPILA, K. & RITOLA, J.** (1988): Storing industrial waste heat in an old oil rock cavern storage. - Proceedings of the JIGASTOCK 88, 4th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Volume 1; Paris.
- SNIJDERS A.L.** (1991): IEA energy storage program – Annex VI: „Environmental and chemical aspects of ATES and research and development of water treatment methods“. - Proceedings of the THERMASTOCK 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen NL, May 1991: 4.13-1–4.13-7; Utrecht.
- SØRENSEN, S.N., REFFSTRUP, J.** (1994): Single-well aquifer thermal energy storage (ATES). Design and simulation principles. - CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Volume 1: 271-279; Helsinki.
- STREIT, R. & WEINELT, W.** (1971): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6020 Aschaffenburg. - 398 S., 52 Abb., 14 Tab., 5 Beil.; München.
- STROBL, J. & DOLLINGER, F.** (1998): Angewandte geographische Informationsverarbeitung – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg '98. - 409S.; Heidelberg.
- TARNAWSKI, V.R., LEONG, W.H., WAGNER, B., REUB, M. & SCHULZ, H.** (1990): Heat and moisture interactions in high temperature ground heat storage. - Zeitschr. f. angew. Geowiss., **Heft 9**: 131-151; Gießen.
- TERHALLE, U.M.** (1983): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem Blatt 6224 Helmstadt der topographischen Karte 1:25.000. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: VIII + 130 S., 61 Abb., 9. Tab., 2 Taf., 3 Kartenbeil.; Würzburg [unveröff.].
- TROEDSSON, T.** (1983): Ecological Effects of Soil-Heat Extraction in Soil and Vegetation. - Subsurface heat storage in theory and practice; proceedings of the international conference; Vol. 2, Swed. Counc. Build. Res.: 685-689; Stockholm.
- TROSCHKE, B. & BURKHARDT, H.** (1997): Ermittlung der Gesteinswärmeleitfähigkeit von Sedimentgesteinen aus Messungen am Bohrklein. – Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG, 18.-20. September 1996 in Konstanz: 217-223; Geeste.
- TRUSHEIM, F.** (1964): Über den Untergrund Frankens. Ergebnisse von Tiefbohrungen in Franken und Nachbargebieten 1953 - 1960. - Geol. Bavarica, **54**: 92 S., 11 Abb., 13 Beil.; München.
- TURCOTTE D. L. & SCHUBERT G.** (1982): Geodynamics - Applications of Continuum Physics to Geological Problems. - 450 S.; John Wiley & Sons; New York [u.a.].
- UDLUFT P. ET AL.** (1995-1999): Anleitung zum hydrophysikalischen Praktikum an der Universität Würzburg. Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt; Würzburg [unveröff.].
- UDLUFT, P.** (1969): Hydrogeologie und Hydrochemie der Südrhön unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen im Brückenauer Raum. - Diss. Univ. München: 240 S.; München.
- UDLUFT, P.** (1972): Bestimmung des entwässerbaren Kluftraumes mit Hilfe des Austrocknungskoeffizienten nach Mailliet, dargestellt am Einzugsgebiet der Lohr (Nordost-Spessart). - Z. dt. geol. Ges., **123**: 53-63; Hannover.
- UDLUFT, P.** (1979): Das Grundwasser Frankens und angrenzender Gebiete.- Steir. Beitr. z. Hydrogeol., **31**: 5-128; Graz.
- VAN LOON, L.J.M.** (1991): Relevant characteristics for open (ATES) storage. - IEA ECES Annex 7, Proc. Workshop on Generic Config. of Seasonal Cold Storage Applications, Pres. 12; Utrecht.
- VAN MOURIK,** (1991): Proceedings of the THERMASTOCK 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen NL, May 1991. – NOVEM; Utrecht.
- VDI** (1998): Thermische Nutzung des Untergrundes . – VDI-Richtlinie 4640, Blatt 1 und 2: Beuth-Verlag; Berlin.
- WAGNER, B.** (1991): Bodenphysikalische, ingenieur- und hydrogeologische Untersuchungen zur Speicherung und zum Entzug von Niedertemperaturwärme in der wasserungesättigten Bodenzone mit vertikalen Wärmetauschern. - Dissertation Lud.-Max.-Univ. München: 164S.; München.
- WAGNER, R., RUCK, W., ADINOLFI, M., KOCH, M., NORDSIECK, H., STEIN, M. & WEBER, W.** (1991): Untersuchungen zum Projekt „Environmental and chemical aspects of thermal energy storage“. - Abschlußbericht BMFT-Projekt Nr. 0328745B, Inst. f. Siedlungswasserwirtschaft: 232 S.; Stuttgart.
- WALSH, J.B. & DECKER, E.R.** (1966): Effect of pressure and saturating fluid on the thermal Conductivity of Compact Rock. – J. Geophys. Res., **71/12**: 3053-3061; Washington, DC.

- WALTER, R. & DORN, P.** (1995): Geologie von Mitteleuropa. - 6. Aufl.: 566 S.; Stuttgart.
- WEA/GSA** - Wasser- und Energiewirtschaftsamt– Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern [Hrsg.] (1996): Übersichtskarte des Kantons Bern Wärme aus Wasser und Boden. - Ausgabe 1996; Bern.
- WEINELT, W.** (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000. Blatt Nr. 6021 Haibach. - 246 S., 41 Abb., 4 Tab., 2 Beil.; München.
- WEINELT, W., OKRUSCH, M. & RICHTER, P.** (1985): Das kristalline Grundgebirge im nördlichen Hochspessart auf Grund der Ergebnisse neuer Tiefbohrungen. – *Geologica Bavarica* **87**: 39–60, 4 Abb., 3 Tab., 2 Beil.; München.
- WENDEL, P.** (2000): Der Einsatz erd- oder grundwassergekoppelter Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. – IV. Würzburger Kolloquium 1998, Hydrogeologie und Umwelt **Heft 20**; Würzburg [im Druck].
- WENDT, O.** (1998): Hydrogeologische Grundlagen und Rahmenkriterien für die Erstellung von Erdwärmesondenanlagen - Vereinfachung und Vereinheitlichung von Genehmigungsverfahren. – In: Tagungsband 5. Geothermische Fachtagung, 12. - 15. Mai 1998 in Straubing: 587 S., ISBN 3-932570-14-6; Geeste.
- WERNER, A., BIGLER, R., NIEDERHAUSER, A. ET. AL.** (1996): Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. - Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. - Schlußbericht: 119 S.; Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kanton Bern (WEA), Bern.
- WERNER, J.** (1990): Geological aspects and application potential for temperature duct storage in south Germany. - *Zeitschr. f. Angew. Geowiss.*, **Heft 9**: 109-117; Gießen.
- WETTER, M. & HUBER A.** (1997): TRNSYS Type Vertical Borehole Heat Exchanger EWS Model. Zentralschweizerisches Technikum ZTL, Luzern; Internet (<http://www.igjzh.com/huber/bericht1/bericht1.htm>).
- WILKE, T.** (1995): Qualitätsaspekte bei der Nutzung von Geo-Informationssystemen. – in: **BUZIEK, G.** [Hrsg.]: GIS in Forschung und Praxis: 141–154; Stuttgart.
- WILLEMSSEN, G.** (1998): Open-Loop geothermal heat pump systems in the USA and aquifer cold storage in the Netherlands – similarities and differences. - Proceedings of the Second Stockton GHPC Conference at Richard Stockton College, Pomona NJ (1998), Stockton; Internet (<http://www.geo-journal.stockton.edu/directory.html>).
- WINTERS, A.L.** (1992): Summary of research on microbiological processes-IEA (International Energy Agency) Annex VI Subtask D Final report, PNL-7980, Pacific Northwest Lab. Richland, Wash. USA.; Richland.
- WITTEK, M.** (1998): Wärmepumpen – Eine GIS-gestützte Standortanalyse für erdgekoppelte Wärmetauscher. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 116 S.; Würzburg [unveröff.].
- WITTMANN, O.** (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6022 Rothenbuch: 102 S., 11 Abb., 4 Tab., 1 Tab., 2 Beil.; München.
- WRABEL, J.** (1993): Felsmechanische Untersuchungen an Buntsandsteinvorkommen im östlichen Spessart im Rahmen des Mainausbaues: Main-km 175,000 – 219,400. – Diplomarbeit Univ. Würzburg: 107 S., 76 Abb., 29 Tab., 8 Anlagen; Würzburg, [unveröff.].
- YONG, R.N., MOHAMED, A.M.O., SHOOSH PASHA, I. & ONOFREI, C.** (1997): Hydro-thermal performance of unsaturated bentonite-sand buffer material. - In: **SELVADURAI A.P.S.** [ed.]: Hydro-thermo-mechanics of engineered clay barriers and geological barriers. - *Engineering Geology* **47, 4**: 351-365; Amsterdam.
- ZOGG, M.** (1998): Regeneration von Erdwärmesonden für Wärmepumpen. – *Wärmepumpe* **4/98**: S. 2, ISSN 0943-9617; Karlsruhe.
- ZWEIFEL, G. & WETTER, M.** (1997): Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen für Heiz- und Warmwasserbetrieb Zentralschweizerisches Technikum Luzern Ingenieurschule HTL; Internet (<http://ztxw300.hta.fhz.ch/>).

A-1.1 Digitale Rasterkarten – Rasterdaten Topographischer Karten

- ◆ TK25: GISCAD CD Atlas Bayer), GISCAD Computersysteme GmbH.
- ◆ TK 200 digital: Digitale Rasterkarte auf Basis der TK200 in sieben Ebenen, Bayerische Vermessungsverwaltung; München.
- ◆ TOP 50: Topographische Karten 1:50.000 für Bayern auf 2 CD-ROMs, Bayern (Nord); Bayerische Vermessungsverwaltung, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (1997-1999).
- ◆ TOP 200: Topographische Karten 1:200.000 auf CD (Bayerische Vermessungsverwaltung, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (1999).

A-1.2 ATKIS; Amtliches Topographisches Karten Informationssystem

- ◆ ATKIS 25: Ausschnitte, ATKIS 25 mit Informationsgehalt der topographischen Karte 1:25.000; Objektbereiche Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer, Relief, Gebiete.
- ◆ ATKIS 500: Digitale topographische Vektordaten ATKIS 500-Bayern; digitalisierte Übersichtskarte von Bayern 1:500 000 in den verschiedenen Ebenen des DXF-Formats.
- ◆ Digitales Geländemodell DGM 25 (Höhenpunkte in 50m Maschenweite)
(jeweils Bayerische Vermessungsverwaltung, München)

A-2 Geologische Karten

A-2.1 Karten herausgegeben von der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

- Geologische Übersichtskarte 1:200.000 der Bundesrepublik Deutschland (GÜK200):
 - Blatt CC6326 Bamberg (1994), digital (ArcInfo Coverages),
 - Blatt Erfurt (1999), digital (ArcInfo Coverages),
 - Blatt Frankfurt Ost (1985),
 - Blatt Fulda (1985),
 - Blatt Nürnberg (1977),
 - Blatt Stuttgart Nord (1983).
- Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (1993), digital (ArcInfo Coverages).

A-2.2 Karten herausgegeben vom Bayerischen Geologischen Landesamt und vom GLA Baden-Württemberg

- ◆ Geologische Karte von Bayern 1:500.000 (4. Aufl. 1996), digital (1998, ArcView Shape Files, ArcInfo Coverages).
- ◆ Geologische Karte von Bayern 1:25.000 GK25 (ohne explizite Zitate aus den zugehörigen Erläuterungen):
6426 Aub (1994); 6428 Bad Windsheim (1969); 6122 Bischbrunn (1984); 5931 Ebensfeld (1970); 6128 Ebrach (1985); 5922 Frammersbach (1978); 5926 Geldersheim (1969); 5924 Gemünden a. Main (1990); 6021 Haibach (1962); 6230 Höchstadt a.d. Aisch (1964); 5829 Hofheim i. Ufr. (1976); 6227 Iphofen (1964); 6226 Kitzingen (1995); 6327 Markt Einersheim (1976); 5928 Obertheres (1989); 6425 Röttingen (1994); 6328 Scheinfeld (1968); 6229 Schlüsselfeld (1969); 5921 Schöllkrippen (1965); 5919 Seligenstadt; 5831 Seßlach (1970); 6427 Uffenheim (1976); 6127 Volkach (1983); 6228 Wiesentheid (1965).

B Datenbanken öffentlicher Institutionen

A-1.1 Digitale Rasterkarten – Rasterdaten Topographischer Karten

- ◆ TK25: GISCAD CD Atlas Bayer), GISCAD Computersysteme GmbH.
- ◆ TK 200 digital: Digitale Rasterkarte auf Basis der TK200 in sieben Ebenen, Bayerische Vermessungsverwaltung; München.
- ◆ TOP 50: Topographische Karten 1:50.000 für Bayern auf 2 CD-ROMs, Bayern (Nord); Bayerische Vermessungsverwaltung, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (1997-1999).
- ◆ TOP 200: Topographische Karten 1:200.000 auf CD (Bayerische Vermessungsverwaltung, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (1999).

A-1.2 ATKIS; Amtliches Topographisches Karten Informationssystem

- ◆ ATKIS 25: Ausschnitte, ATKIS 25 mit Informationsgehalt der topographischen Karte 1:25.000; Objektbereiche Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer, Relief, Gebiete.
- ◆ ATKIS 500: Digitale topographische Vektordaten ATKIS 500-Bayern; digitalisierte Übersichtskarte von Bayern 1:500 000 in den verschiedenen Ebenen des DXF-Formats.
- ◆ Digitales Geländemodell DGM 25 (Höhenpunkte in 50m Maschenweite)
(jeweils Bayerische Vermessungsverwaltung, München)

A-2 Geologische Karten

A-2.1 Karten herausgegeben von der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

- Geologische Übersichtskarte 1:200.000 der Bundesrepublik Deutschland (GÜK200):
 - Blatt CC6326 Bamberg (1994), digital (ArcInfo Coverages),
 - Blatt Erfurt (1999), digital (ArcInfo Coverages),
 - Blatt Frankfurt Ost (1985),
 - Blatt Fulda (1985),
 - Blatt Nürnberg (1977),
 - Blatt Stuttgart Nord (1983).
- Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (1993), digital (ArcInfo Coverages).

A-2.2 Karten herausgegeben vom Bayerischen Geologischen Landesamt und vom GLA Baden-Württemberg

- ◆ Geologische Karte von Bayern 1:500.000 (4. Aufl. 1996), digital (1998, ArcView Shape Files, ArcInfo Coverages).
- ◆ Geologische Karte von Bayern 1:25.000 GK25 (ohne explizite Zitate aus den zugehörigen Erläuterungen):
6426 Aub (1994); 6428 Bad Windsheim (1969); 6122 Bischbrunn (1984); 5931 Ebensfeld (1970); 6128 Ebrach (1985); 5922 Frammersbach (1978); 5926 Geldersheim (1969); 5924 Gemünden a. Main (1990); 6021 Haibach (1962); 6230 Höchstadt a.d. Aisch (1964); 5829 Hofheim i. Ufr. (1976); 6227 Iphofen (1964); 6226 Kitzingen (1995); 6327 Markt Einersheim (1976); 5928 Obertheres (1989); 6425 Röttingen (1994); 6328 Scheinfeld (1968); 6229 Schlüsselfeld (1969); 5921 Schöllkrippen (1965); 5919 Seligenstadt; 5831 Seßlach (1970); 6427 Uffenheim (1976); 6127 Volkach (1983); 6228 Wiesentheid (1965).

B Datenbanken öffentlicher Institutionen

- ◆ **GISWaWi (GIS Wasserwirtschaft):** Datenbank des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Auszüge (digital). Themenbereiche: Wasserschutzgebiete, Gruppe WV Maßstab PR5; Abfluß, Gruppe -, Maßstab UE500; Niederschlag, Gruppe AG, Maßstab UE500; Verdunstung, Gruppe AG, Maßstab UE500; vereinfachte Geologie, Gruppe AG, Maßstab UE500; Bohrungen, sonstige, Gruppe GK, Maßstab MU; Meßstellen GW, Beschaffenheit, Gruppe GK, Maßstab MU; Meßstellen GW, Wasserstand, Gruppe GK, Maßstab MU.
- ◆ **Fachdatei Hydrogeologie:** Datenbank des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft; Auszüge (Ausdrucke). Lagekoordinaten, Objektbeschreibung, Schichtenverzeichnisse (teilweise).
- ◆ **Bohrungsdatenbank des Wasserwirtschaftsamts Würzburg:** Auszüge aus der Datenbank (digital; Gedin).

C Internet-Datenquellen

C-1 Digitale Geländemodelle

- ◆ GTOPO30: Global Arc 30 second elevation data set U.S. Geological Survey's EROS Data Center (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>).
- ◆ DTED: Digital Terrain Elevation Data (DTED®) Level 0 National Imaging and Mapping Agency (NIMA) (<http://164.214.2.59/index.htm>).

C-2 Basisinformationen zu Karten und Verwaltung

- ◆ Gauß-Krüger-Blattecken der topographischen Karten: Bayerische Vermessungsverwaltung (<http://212.34.74.183/blatdeck.html>).
- ◆ Gemarkungs- und Gemeindeverzeichnis: Vermessungsamtskennzahl, Gemarkungsschlüssel, Gemarkungsname, Gemeindegemeinschaft, Gemeindegemeinschaft, Gemeindegemeinschaft und Amtsgerichtsname, Bayerische Vermessungsverwaltung (<http://212.34.74.183/gmkgdverz.html>).

C-3 Statistische Informationen

- ◆ Unterfranken in Zahlen (1994, 1997, 1998, 1999): EIWiS - Elektronische Fachinformation WirtschaftsStatistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Würzburg (<http://www.wifak.uni-wuerzburg.de/elwis/regwbg/ufr/regufr/>).

C-4 Klimatische Informationen, Bodentemperaturen

- ◆ Agrarmeteorologisches Meßnetz Bayern – Wetterdatenabruf: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten ([http://www.stmelf.bayern.de/ ... \[cgi-bin\]](http://www.stmelf.bayern.de/... [cgi-bin])).

D Andere

- ◆ ArcData Europe, Beispieldaten: Installations-CD ArcView 3.1 (ESRI).

2. Programmoberfläche

Die folgenden Abbildungen zeigen die Programmoberfläche während der Ausführung und die zu ihrer Realisierung erforderlichen Komponenten und Steuerelemente. Diese werden mit dem „Dialog Designer“ (dialog.avx) erstellt.

1 Button ("Schalter") zum Start des Bewertungsprogramms

2 Hauptdialog (Oberfläche für interaktive Steuerelemente) für die Flächenbewertung

3 Datensätze (Themen), die im Verlauf der Berechnung ausgewertet werden.

ridthemen (Raster): z.B. SM (Digitales Strukturmodell), WGL50, Grundwasserleichenplan im 50m-Raster.

ektortemen: Z.B. TK_Blatt Informationen zu topographischen und geologischen arten), WWA (zuständiges asserrwirtschaftsamt).

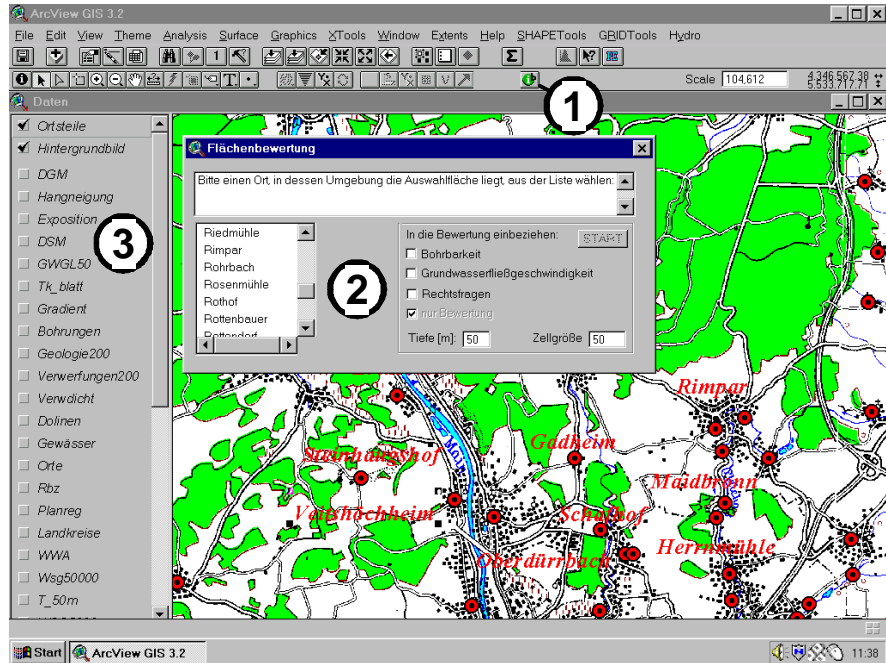


Abbildung A-1: Benutzeroberfläche (Momentausschnitt) der Avenue-Anwendung in ArcView 3.2.

Startdialog und Dialog für die Einzelpunktbewertung - Name: Start_Dialog, wird aktiviert durch EP_Dialog_Laden (ausführbar über ein tool in der View-Toolleiste)

1 Text Line: Zur Anzeige von Erklärungen und Kommentaren, **Name:** Erklärungen

2 Text Line: Benutzereingabe, Ausgabedatei, **Name:** Datei

3 Text Line: Benutzereingabe, Zusatzinformationen zum gewählten Standort, **Name:** Infos

5 List Box: Für die Auswahl einer Ortschaft, in deren Bereich der Standort liegt. **Name:** Ortsliste, **Aktion:** Select - EPF_Ortsliste_Wahl

6 Control Panel: Auswahl **Name:** T_M

7 Radion Button(s): Auswahl Eingabe per Tastatur oder Maus, **Name(n):** per_tast; per_maus, **Aktion:** Click - EP_per_tastatur

8 Radion Button(s): Auswahl Einzelpunkt- oder Flächenbewertung, **Name(n):** Punkt; Fläche, **Aktion:** Click - EP_Programmoptionen

7 Control Panel: Auswahl **Name:** P_od_F

9 Text Line(s): Benutzereingabe, Rechts- und Hochwert bei Tastatureingabe, **Name(n):** RW_Text, HW_Text, **Aktion:** Apply - EP_RW_HW

4 Label Button: Fortsetzen nach Eingabe, **Name:** weiter1, **Aktion:** Click - EP_Einzelpunktbewertung

12 Tool: Initialisiert die Wahl eines Punktes auf dem Bildschirm, **Name:** Start_expert, **Aktion:** Apply - EP_Ausgabefileangaben

11 Radio Button(s): Auswahl Erdsonden-WP Erdsondenspeicher, **Name(n):** EWS; ESWSP, **Aktion:** Click - EP_Verfahren_Auswahl

10 Control Panel: Auswahl des Verfahrens, **Name:** SP_EWS

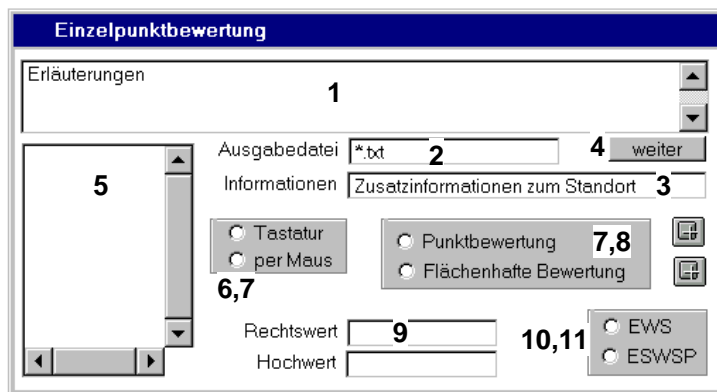


Abbildung A-2: Dialoge und Kontrollelemente zur Steuerung des Bewertungsablaufs für Einzelpunktbewertungen durch den Benutzer. Der Name des Steuerelementes und die Aktion, die seine Veränderung durch den Benutzer hervorruft, sind jeweils angegeben (Aktion – z.B. Click = Anklicken mit der Maus – Script, das durch die Aktion aufgerufen wird).

Dialog für die Flächenbewertung - Name: Flaechendialog, wird aktiviert durch 2_Flaeche_Start

1 Text Line: Zur Anzeige von Erklärungen und Kommentaren.
Name: Erklaerungen

2 Control Panel: Einstellung der Bewertungsoptionen,
Name:SP_EWS

4 Label Button: Fortsetzen nach Eingabe, **Name:** weiter_2,
Aktion: Click - F_Flaechen_bewertung

3 Check Box(es): Einstellung der Bewertungsoptionen,
Name(n): Bohr, GWFL, RECHT, KEINE,
Aktion: Click - F_Options_Update

6 List Box: Für die Auswahl einer Ortschaft, in deren Umgebung die zu bewertende Fläche liegt. **Name:** Ortsliste_Flaeche,
Aktion: Select - EPF_Ortsliste_Wahl

7 List Box: Für die Auswahl des Views in das das Ergebnis eingefügt werden soll. **Name:** View_Liste,
Aktion: Select - F_Flaeche_Wahl

5 Text Line(s): Benutzereingabe, zu bewertende Tiefe; Zellgröße (Analysis Properties, **Name(n):** Tiefe, Zelle, **Aktion:** Click -

12 Tool: Initialisiert die Wahl einer Fläche auf dem Bildschirm, **Name:** Flaechen_Wahl, **Aktion:** Apply - F_Flaeche_Options

8 Control Panel: Auswahl des Berechnungstyps
Name:Berechnung

9 Check Box(es): Einstellung des Berechnungstyps **Name(n):** Bew; Param; Recht_gr, **Aktion:** Click - F_Options_Update

10 Control Panel: Ausschnitt wählen oder gesamte Fläche,
Name:Flaechen_Modus

11 Radio Button(s): Auswahl Gesamte Fläche oder Ausschnitt, **Name(n):** Ausschnitt; Alles, **Aktion:** Click - F_Flaeche_gewaehlt

Abbildung A-3: Dialoge und Kontrollelemente zur Steuerung des Ablaufs der flächenhaften Bewertung durch den Benutzer (Erläuterungen vgl. Abbildung A-2).

3. Avenue-Scripten

Die Scripten sind hier etwa in der Reihenfolge aufgelistet, in der sie im Programmablauf aufgerufen werden (vgl. dazu Abbildung A-4). Scripten, die bei Einzelpunktbewertungen benötigt werden, sind mit dem Präfix "EP_", solche, die für die flächenhafte Bewertung verwendet werden, mit "F_" gekennzeichnet. Die wesentlichen Scripten für die Bewertungsberechnung sind die Scripten **EP_Einzelpunkt_Bewertung** (Seite 334 bis 341) und **F_Flaechen_Bewertung** (Seite 348 bis 353). Von Bedeutung für die Berechnung und Erstellung der Ausgabeergebnisse sind zusätzlich die Scripten EP_Bohrprofil (Berechnung es theoretischen Bohrprofils; Seite 341) und EP_Themen_Abfrage (Auslesen von Informationen aller Art zum gewählten Standort; Seite 342). Alle anderen Scripten dienen i.W. dazu Einstellungen für die Programmoberfläche und die Benutzeroptionen vorzunehmen (Sichtbarmachen von Steuerelementen, Füllen von Auswahllisten mit Werten etc.). Das Zusammenwirken von Scripten und Steuerelementen wird in den Abbildungen A-2 bis A-4 erläutert.

Die Ausführung der Programme erfordert, daß das Zusatzmodul „Spatial Analyst“ (Extension spatial.avx) sowie der „Dialog Designer“ (dialog.avx) geladen ist.

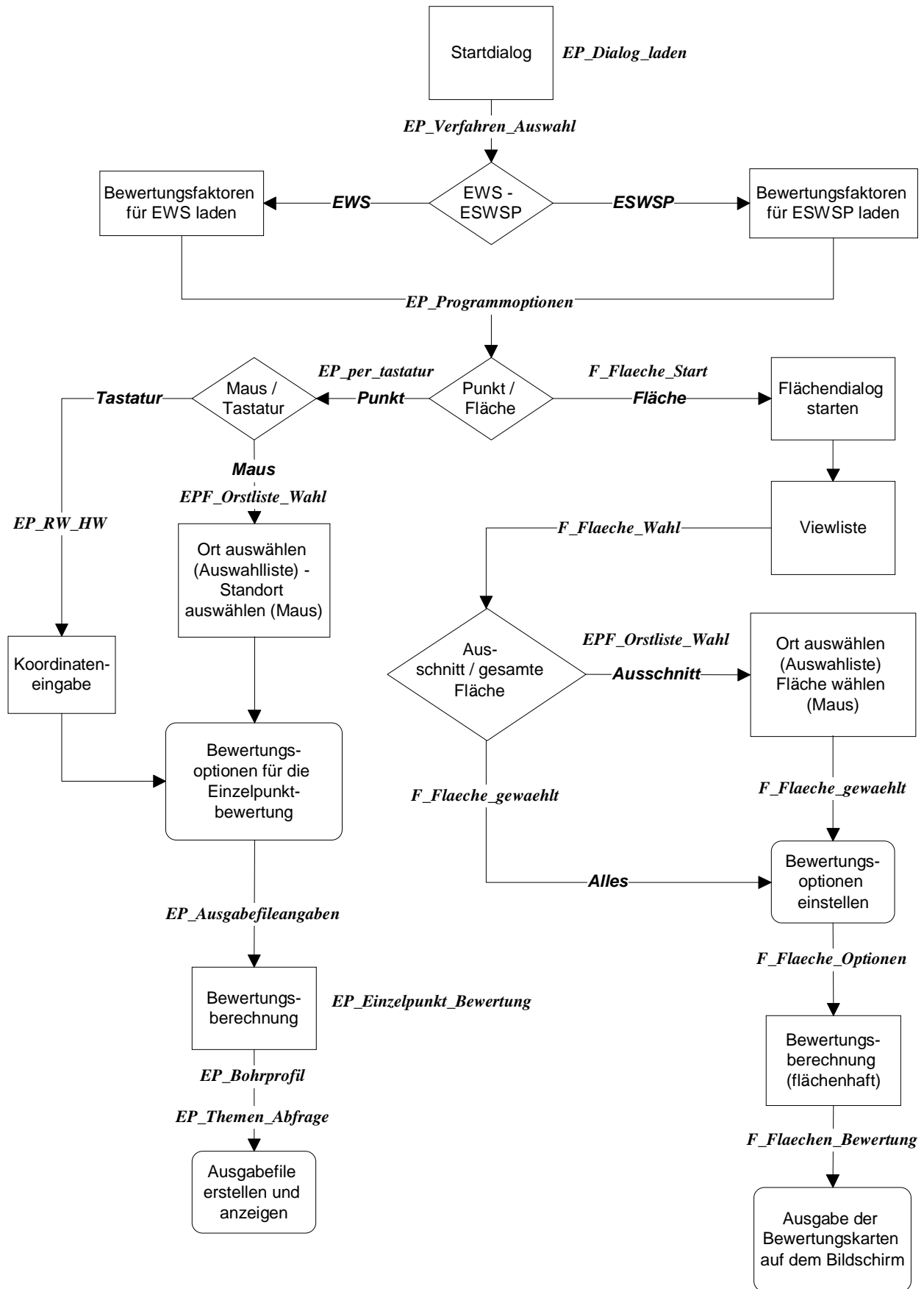


Abbildung A-4: Flußdiagramm zur Veranschaulichung des Programmablaufs und des Zusammenwirkens von Steuerelementen und Scripten. Scripten, die an einer bestimmten Stelle des Ablaufs aufgeführt werden, sind durch die Auszeichnung *fett kursiv Times* gekennzeichnet, Verzweigungsoptionen durch *fett kursiv Arial*.

Listings - Inhaltsübersicht:

Script 1: EP_Dialog_laden.....	328
Script 2: EP_Verfahren_Auswahl.....	330
Script 3: EP_Programmoptionen	330
Script 4: EP_per_tastatur	331
Script 5: EP_RW_HW	331
Script 6: EPF_Ortsliste_Wahl	332
Script 7: EP_Blinken	333
Script 8: EP_Ausgabefileangaben	333
Script 9: EP_Einzelpunkt_Bewertung	334
Script 10: EP_Bohrprofil	341
Script 11: EP_Themen_Abfrage	342
Script 12: F_Flaeche_Start.....	345
Script 13: F_Flaeche_Wahl	346
Script 14: F_Flaeche_gewaehlt	347
Script 15: F_Flaeche_Optionen	347
Script 16: F_Optionen_Update	348
Script 17: F_Flaechen_Bewertung	348

Definitionen der wichtigsten globalen Variablen (i.W. Steuerelemente, vgl. Abbildungen A-2 und A-3):

```

_AL = _FD.FindByName("Alles")
_AS = _FD.FindByName("Ausschnitt")
_AW = _FD.FindByName("Ausschnitt_Wahl")
_BER = _FD.FindByName("Berechnungen")
_BO = _FD.FindByName("BOHR")
_datei = _SD.FindByName("Datei")
_Daten = av.GetProject.FindDoc("Daten")
_DatenListe = av.FindDoc("schichtdaten_bewertung.dbf")
_er1 = _SD.FindByName("Erklaerungen")
_erl2 = _FD.FindByName("Er1_Flaeche")
_ESWSP = _SD.FindByName("ESWSP")
_EWS = _SD.FindByName("EWS")
_F = _SD.FindByName("Flaeche")
_FD = av.GetProject.FindDialog("FlaechenDialog")
_FLO = _FD.FindByName("Flaechen_Optionen")
_FM = _FD.FindByName("Flaeche_Modus")
_GW = _FD.FindByName("GWFL")
_infos = _SD.FindByName("Infos")
_KE = _FD.FindByName("KEINE")
_OL = _SD.FindByName("Ortsliste")
_OLF = _FD.FindByName("Ortsliste_Flaeche")
_OP = _Daten.FindTheme("Ortsteile")
_OPTabelle = _OP.GetFTab
_OrtHW = _OPTabelle.FindField("y-coord")
_OrtRW = _OPTabelle.FindField("x-coord")
_OrtsName = _OPTabelle.FindField("Namegt")
_P = _SD.FindByName("Punkt")
_PAR = _FD.FindByName("Param")
_PF = _SD.FindByName("P_od_F")
_pm = _SD.FindByName("per_maus")
_pt = _SD.FindByName("per_tast")
_Punkt = _Daten.GetDisplay.ReturnUserPoint
_punkt = Point.Make(x.AsNumber,y.AsNumber)
_RE = _FD.FindByName("RECHT")
_RG = _FD.FindByName("Recht_gr")
_SD = av.GetProject.FindDialog("Start_Dialog")
_SE = _SD.FindByName("Start_expert")
_SP_EWS = _SD.FindByName("SP_EWS")
_T_M = _SD.FindByName("T_M")

```

```

_THW = _SD.FindByName("HW_Text")
_TI = _FD.FindByName("Tiefe")
_TM = _SD.FindByName("T_M")
_TRW = _SD.FindByName("RW_Text")
_VL.DefineFromList(neuliste)
_VL = _FD.FindByName("View_Liste")
_w1 = _SD.FindByName("weiter1")
_w2 = _FD.FindByName("weiter_2")
_x = _Punkt.GetX
_y = _Punkt.GetY
_ZE = _FD.FindByName("Zelle")

```

Script 1: EP_Dialog_laden

' „EP_Dialog_laden“ startet den Hauptdialog des Bewertungsprogramms. Wird durch einen Button in der View-Buttonleiste (wahlweise über Menüs, bzw. andere Optionen Dialoge zu laden) gestartet. ' Ein entsprechender Button muß dem View hinzugefügt und mit dem Script verbunden werden.

***** *Einstellung verschiedener Parameter:*

```

_Flaeche = 0
_today = Date.Now
_today.SetFormat( "dd.MMMM.yy" )
_Daten = av.GetProject.FindDoc("Daten")
_DatenListe = av.FindDoc("schichtdaten_bewertung.dbf")
_click = 0

```

***** *Öffnen und Positionieren des „Startdialogs“:*

```

_SD = av.GetProject.FindDialog("Start_Dialog")
_SD.ReSize(500,300)
_SD.MoveTo(200,200)
_SD.open

```

***** *Alle Steuerelemente unsichtbar machen:*

```

all_controls = _SD.GetControlPanel
for each contr in all_controls
    cont = contr.GetName
    xy = _SD.FindByName(cont)
    xy.SetVisible(false)
end

```

end

***** *Zuweisen der Steuerelemente an Variablen und Sichtbarmachen der ersten Optionen:*

```

_SP_EWS = _SD.FindByName("SP_EWS")
_EWS = _SD.FindByName("EWS")
_ESWSP = _SD.FindByName("ESWSP")
_OL = _SD.FindByName("Ortsliste")
_P = _SD.FindByName("Punkt")
_F = _SD.FindByName("Flaeche")
_PF = _SD.FindByName("P_od_F")
_erl = _SD.FindByName("Erklaerungen")
_erl.SetVisible(true)
_erl.SetText("Bitte das zu bewertende Verfahren auswählen")
_TM = _SD.FindByName("T_M")
_pt = _SD.FindByName("per_tast")
_pm = _SD.FindByName("per_maus")
_SP_EWS.SetVisible(true)
_EWS.SetVisible(true)
_ESWSP.SetVisible(true)
_TRW = _SD.FindByName("RW_Text")
_THW = _SD.FindByName("HW_Text")
_TRW.SetText("4350000")      *** Voreinstellung des Rechts- und Hochwerts, wenn über Tastatur eingegeben
wird
_THW.SetText("5525000")

```

```

_SE = _SD.FindByName("Start_expert")
***** Die Auswahlliste für die Ortschaften mit den Tabelleneinträgen des Themas „Ortsteile“ füllen:
_OP = _Daten.FindTheme("Ortsteile")
_OPTabelle = _OP.GetFTab
_OrtsName = _OPTabelle.FindField("Nameegt")
_OrtRW = _OPTabelle.FindField("x-coord")
_OrtHW = _OPTabelle.FindField("y-coord")
_orteListe = List.Make
for each rec in _OPTabelle
    Ort = _OPTabelle.ReturnValue(_Ortsname,rec)
    _orteListe.add(ort)
end
_OL.DefineFromList(_OrteListe)
_OL.SortAscending(true)
theWin = _Daten.GetWin
theWin.Activate

```

Script 2: EP_Verfahren_Auswahl

' „EP_Verfahren_Auswahl“: Wurde das zu bewertende Verfahren ausgewählt (Erdsondenwärmespeicherung oder erdgekoppelte Wärmepumpen mit Erdsonden), wird hier die jeweils geltende Bewertungstabelle geladen.

```

_erl.SetVisible(true)
_PF.SetVisible(true)
_P.SetVisible(true)
_F.SetVisible(true)
_P.IsSelected.Not
_F.IsSelected.Not
_SP_EWS.SetVisible(false)
_erl.SetText("Bewertung für einen Einzelpunkt oder Berechnung einer Bewertungskarte?")
if (_EWS.IsSelected = true) then
    _DatenListe = av.FindDoc("schichtdaten_bewertung.dbf")
end
if (_ESWSP.IsSelected = true) then
    _DatenListe = av.FindDoc("ews_schichtdaten_bewertung.dbf")
end

```

Script 3: EP_Programmoptionen

' „EP_Programmoptionen“ leitet das Programm zur Einzelpunktbewertung ein: Punkteingabe „per Maus“ oder „per Tastatur“ werden sichtbar gemacht.

```

_erl.SetVisible(true)
_SD.SetTitle("Einzelpunktbewertung")
if (_P.IsSelected = true) then
    _PF.SetVisible(false)
    _TM.SetVisible(true)
    _erl.SetText("Eingabe des zu bewertenden Punktes über Tastatur oder Bildschirm?")
    _pt.SetVisible(true)
    _pm.SetVisible(true)
end

```


Script 4: EP_per_tastatur

' „EP_per_tastatur“: Wenn Einzelpunktbewertung gewählt wurde, werden hier die Steuerelemente für Eingabe per Maus oder per Tastatur sichtbar gemacht.

```

_erl.SetVisible(true)
_T_M.SetVisible(false)
if (_pt.IsSelected = true) then
    _TRW.SetVisible(true)
    _THW.SetVisible(true)
    _erl.SetText("Bitte beide Koordinaten eingeben und erst dann mit Return bestätigen")
end
if (_pm.IsSelected = true) then
    _OL.SetVisible(true)
    _erl.SetText("Aus der Liste den Ort auswählen in dessen Umgebung der zu bewertende Punkt liegt")
end

```

Script 5: EP_RW_HW

' „EP_RW_HW“: Für den Fall, daß der zu bewertende Punkt per Tastatur eingegeben werden soll: Auslesen der Benutzereingaben aus den entsprechenden Steuerelementen.

```

_x = _TRW.GetText
_y = _THW.GetText
_tast=1
***** Um zu gewährleisten, daß RW und HW eingegeben worden sind:
if ((_x = "") or (_y = "")) then
    'msgbox.info(_x,_y)
    av.run("EP_per_tastatur",{ })
    _tast = "leer"
    _erl2.SetText("Bitte B E I D E Koordinaten eingeben und erst dann mit Return bestätigen")
else
    _punkt = Point.Make(_x.AsNumber,_y.AsNumber)
    _x=_x.asNumber
    _y=_y.asNumber
    av.run("EP_ausgabefileangaben",{ })
end

```

Script 6: EPF_Ortsliste_Wahl

' Das Script „EPF_Ortsliste_Wahl“ zoomt nach der Auswahl einer Ortschaft aus der Auswahlliste auf den gewählten Ort, läßt den Ort kurz „Aufblinken“ und beschriftet die Ortschaft und die Orte in der Nähe. Wurde zu Beginn die Option „Einzelpunktbewertung“ gewählt, wird der Benutzer aufgefordert den zu bewertenden Punkt mit der Maus anzuklicken. Wurde „Flächenbewertung“ gewählt, kann der Benutzer ein Rechteck in der Umgebung der Ortschaft mit der Maus aufziehen, um so die zu bewertenden Fläche zu bestimmen.

```

***** Einstellen der sichtbaren Fester, Themen und Steuerelemente:
_Daten.SetTOCWidth (0)
Bild = _Daten.FindTheme("Hintergrundbild")
bild.SetVisible(true)
_OP.SetVisible(true)
_OP.SetActive(true)
***** Dialog verkleinern und an den oberen Bildschirmrand verschieben:
_SD.ReSize (500,100)
_SD.MoveTo(20,20)
_erl.SetVisible(true)
***** Fallunterscheidung Flächen- oder Einzelpunktbewertung:
if (_flaeche = 1) then      *** Einstellungen für Flächenbewertung:
    wert = 5000           *** Größe des Zoombereichs
    _AW.Select
    _gesucht = _OLF.GetCurrentValue *** Ort der in der Ortsliste gewählt wurde
else *** Einstellungen für Einzelpunktbewertung:
    wert = 3500
    _erl.SetText("Bitte den zu bewertenden Punkt anklicken")
    _SE.Select
    _gesucht = _OL.GetCurrentValue
end
***** Den gewählten Ort in der Attributtabelle suchen:
for each rec in _OPTabelle
    Ort = _OPTabelle.Return Value(_Ortsname,rec)
    if (ort = _gesucht) then
        RW = _OPTabelle.Return Value(_OrtRW,rec) *** Lagekoordinaten des gewählten Ortes (für
        HW = _OPTabelle.Return Value(_OrtHW,rec) *** Beschriftung und Markierung und Zoomfenster)
        _p = Point.Make(RW,HW)
    end
end
***** Zoomfenster mit gewählten Ort im Zentrum festlegen:
x_lu = RW-(wert)
y_lu = HW-(wert)
x_ro = RW + (wert)
y_ro = HW + (wert)
umrecht = Rect.MakeXY(x_lu,y_lu,x_ro,y_ro)
d = av.GetActiveDoc.GetDisplay
d.ZoomToRect (umrecht)
theWin = _Daten.GetWin
theWin.Activate
***** Alle existierenden Beschriftungen im View „Daten“ löschen:
for each t in _Daten.GetVisibleThemes
    if (t.IsActive) then
        if (t.GetGraphics.HasLabels) then
            t.GetGraphics.SelectLabels
            t.GetGraphics.Invalidate
        end
    end
end
end
_Daten.GetGraphics.SelectAll
_Daten.GetGraphics.ClearSelected
***** Ortschaften im Umkreis von 3000m beschriften:
_OPTabelle.SelectByPoint (_p, 3000, #VTAB_SELTYPE_NEW)
aTextSym = TextSymbol.Make
aTextSym.SetFont(Font.Make("Times","Bold"))

```

```

aTextSym.SetSize(24)
aTextSym.SetColor(Color.GetBlue)
_OP.SetLabelTextSym(aTextSym)
_OP.SetActive(true)
aExt = _Daten.GetDisplay.ReturnVisExtent
aLabeler = Labeler.Make(aExt)
aLabeler.Load(_OP)
_Daten.GetAutoLabels(aLabeler, false)
***** Gewählten Ort selektieren und Aufblinken lassen:
_OPTabelle.SelectByPoint (_p, 100, #VTAB_SELTYPE_NEW)
av.delayedrun("EP_Blinken",{ },1) *** Script „EP_Blinken“ aufrufen mit einer Sekunde Verzögerung
***** Dialog neu positionieren:
if (_flaeche = 1) then
    _FD.ReSize (525,100)
    _FD.MoveTo(200,100)
    _erl2.SetVisible(true)
    _erl2.SetText("Bitte eine Fläche durch Ziehen mit der Maus wählen")
end
theWin = _Daten.GetWin
theWin.Activate

```

Script 7: EP_Blinken

' Das Script „EP_Blinken“ läßt den aus der Ortsliste ausgewählten Punkt dreimal aufblinken.
 ' Es wird aus dem Script „EPF_Ortsliste_Wahl“ mit 1 Sekunde Verzögerung aufgerufen, damit das Display
 ' korrekt aufgebaut werden kann.

```

ObjektListe = _OP.FindByPoint( _p )
for each f in ObjektListe
    for each i in 0..3
        _OP.BlinkRecord( f )
    end
end
end

```

Script 8: EP_Ausgabefileangaben

' Im Script „EP_Ausgabefileangaben“ werden Informationen für die Erstellung des Ausgabefiles abgefragt

```

***** Nach der Selektion des Tools „Start_Expert“ im Script „EPF_Ortsliste_Wahl“
***** gibt ein Klick auf den Bildschirm die Koordinaten des zu bewertenden Punktes zurück:
_Punkt = _Daten.GetDisplay.ReturnUserPoint
if (_tast<>1) then      *** den Punkt nur aus dem Mausclick bestimmen wenn nicht über Tastatur eingegeben
                        *** werden soll
    _Punkt = _Daten.GetDisplay.ReturnUserPoint
    _x=_Punkt.GetX
    _y =_Punkt.GetY
end
theGraphics = _daten.GetGraphics  *** Punkt auf das Display zeichnen
d = av.GetActiveDoc.GetDisplay
gPoint = GraphicShape.Make(_Punkt)
theSymbol = gPoint.GetSymbol
theSymbol.SetColor(Color.GetRed)
theSymbol.SetSize(12)
theGraphics.Add(gPoint)
***** Die Steuerelemente für die Ausgabefile-Einstellungen sichtbar machen und die Default-Werte einstellen:
_erl.SetVisible(true)
_erl.SetText("Bitte den Namen der Ausgabedatei und zusätzliche Informationen zu diesem Punkt eingeben. Dann mit
Taste weiter fortfahren")

```

```

_w1 = _SD.FindByName("weiter1")
_w1.SetVisible(true)
T_M = _SD.FindByName("T_M")
T_M.SetVisible(false)
_OL.SetVisible(false)
_SD.ReSize (500,150)
_SD.MoveTo(40,100)
_datei = _SD.FindByName("Datei")
_datei.SetVisible(true)
datvorh=0
for each dn in 1..100      *** Prüfen ob eine Datei mit dem gewählten Ortsnamen bereits vorhanden ist und
  if (datvorh=0) then    *** ggf. den Index erhöhen (Ortsname + _2 .... _n etc.)
    dateitext=_gesucht.AsString+"_"+dn.AsString
    theFile=dateitext+".txt"
    theFile=theFile.AsFileName
    if (theFile.IsFile.Not) then
      datvorh=1
      datnum=dn
    end
  end
end
_datei.SetText(_gesucht.asstring+"_"+datnum.asstring)      *** Ausgabefiledateiname: gewählte Ortschaft_1(.txt)
_infos = _SD.FindByName("Infos")
_infos.SetVisible(true)
_infos.SetText("Bewertung für " + _gesucht.AsString + " am " + _today.AsString)

```

Script 9: EP_Einzelpunkt_Bewertung

' Script zur Berechnung der Bewertungszahl und zur Zusammenfassung der Ausgabeparameter in einem Textfile.

```

_SE.Select *** tool, das nach Klicken auf den Bildschirm den Bewertungsablauf startet und den Klickpunkt zurückgibt.
theWin = _Daten.GetWin
theWin.Activate
_SD.ReSize (500,100)
_SD.MoveTo(200,200)
_w1.SetVisible(false)
_datei.SetVisible(false)
_infos.SetVisible(false)
_erl.SetText( "Einzelwert: Die Bewertungsberechnung wird für eine Tiefe durchgeführt " +
  "Liste abarbeiten: Es werden Berechnungen für 10,20,40 ...200m berechnet")
***** Die zu bewertende Tiefe bestimmen (kann auch in den Dialog integriert werden):
ergebnis_Liste = List.Make
Liste_ja = MsgBox.MinYesNo( "Liste abarbeiten oder Einzelwert (= NO) rechnen:",false)
if ( Liste_ja = true) then
  Arbeitsliste = { 10,15,20,25,30,40,50,60,75,100,150,200}
else
  tiefe = MsgBox.Input( "Tiefe eingeben:", "Bewertung", "50" )
  if (tiefe = NIL) then
    exit      *** Abbruch, wenn bei Tiefe Cancel gewählt wurde.
  end
  tiefe = tiefe.AsNumber
  arbeitsliste = {tiefe}
end
***** Werte, die als mögliche Optionen vorgesehen sind, auf „true“ setzen:
gwf_ja = true
bohr_ja = true
alle_ja = false
***** Werte am gewählten Punkt, die für die Berechnung bzw. Ausgabe relevant sind, einlesen:
vprj = _Daten.GetProjection
_DGM = _Daten.FindTheme("DGM").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
_ref = _Daten.FindTheme("DSM").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)

```

```

gwgl = _Daten.FindTheme("GWGL50").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
recht = _Daten.FindTheme("RECHT").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
grad = _Daten.FindTheme("GRADIENT").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
VD = _Daten.FindTheme("Verwdicht").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
t25 = _Daten.FindTheme("T_25m").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
t50 = _Daten.FindTheme("T_50m").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
t100 = _Daten.FindTheme("T_100m").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
t200 = _Daten.FindTheme("T_200m").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
***** Klassifizierung von Parametern, die noch keine Klassifikationen (Text) in den entsprechenden Attributtabelle
***** enthalten. Ist vor allem dann hilfreich, wenn die Klassifikation individuell angepaßt werden soll.
***** Verwerfungsichte klassifizieren:
if (vd = 1) then
    vdklas = "sehr gering"
elseif (vd = 2) then
    vdklas = "gering"
elseif (vd = 3) then
    vdklas = "hoch"
elseif (vd = 4) then
    vdklas = "sehr hoch"
elseif (vd = 5) then
    vdklas = "extrem hoch"
end

***** Auslesen der relevanten Werte und Faktoren für die einzelnen Schichten aus der Schichtdatentabelle.
***** Zuweisen der Tabellenfelder an Variablen:
SchichtVTab = _DatenListe.GetVTab
Schichten = SchichtVTab.GetNumRecords
dieAnzahl = 0
Nummer = SchichtVTab.FindField("Index")
Top_Sch = SchichtVTab.FindField("TOP")
Bas_Sch = SchichtVTab.FindField("BASIS")
SchichtName = SchichtVTab.FindField("SCHICHT")
Maecht_Sch = SchichtVTab.FindField("MAECHT")
Lith_sch = SchichtVTab.FindField("LITH_WERT")
Aqu_Sch = SchichtVTab.FindField("AQU_WERT")
kf_Sch = SchichtVTab.FindField("KF")
Typ_Sch = SchichtVTab.FindField("Aquifer")
Bohr_Sch = SchichtVTab.FindField("BOHR")
L_Sch = SchichtVTab.FindField("L_ohne_GW")
LGW_Sch = SchichtVTab.FindField("L_GW")
C_Sch = SchichtVTab.FindField("CohneGW")
CGW_Sch = SchichtVTab.FindField("CmitGW")

***** Beginn der Schleife für die Berechnung der Bewertung für mehrere Tiefen:
for each i in arbeitsliste
    tiefe = i
    dieAnzahl = 0 *** Grids, Variablen und Listen, die durch Addition etc. mit sich selber entstehen, zurücksetzen:
    profilliste = { }
    g1 = 0
    Trans_GW = 0
    Trans_ges = 0
    Lamda = 0
    WC = 0
    ergebnis = 0
    _beteiligt = 0
    bwertgw = 0
    bwertBW = 0
    T = _DGM-Tiefe
    stop = 1
    maxgeschwin = 0
    a_gespannt = 0
    tiefer_gwl = 0
    aqu_vorh = 0

```

```

for each rec in SchichtVTab   *** Bearbeitung aller Schichten, die in der Tabelle verzeichnet sind:
    gw = 0                   *** Für Fälle in denen die Schicht nicht vorkommt (bed1) , damit
    m = 0                   *** auch dort den Variablen ein Wert zugewiesen wird.
    dieAnzahl = dieAnzahl + 1
    Schicht = SchichtVTab.ReturnValue(Schichtname, rec)
    Top = SchichtVTab.ReturnValue(Top_Sch, rec)
    T_Sch = _Ref + Top
    Bas = SchichtVTab.ReturnValue(Bas_Sch, rec)
    B_Sch = _Ref + Bas
    FW = SchichtVTab.ReturnValue(Lith_Sch, rec)
    AW = SchichtVTab.ReturnValue(Aqu_Sch, rec)
    kf = SchichtVTab.ReturnValue(KF_Sch, rec)
    Typ = SchichtVTab.ReturnValue(Typ_Sch, rec)
    BW = SchichtVTab.ReturnValue(Bohr_Sch, rec)
    if (bohr_ja = false) then
        BW = 1
    end
    L = SchichtVTab.ReturnValue(L_Sch, rec)
    LGW = SchichtVTab.ReturnValue(LGW_Sch, rec)
    C = SchichtVTab.ReturnValue(C_Sch, rec)
    CGW = SchichtVTab.ReturnValue(CGW_Sch, rec)
    ***** Berechnung der Rechtsgrenze, tieferliegender Aquifer:
    if ((AW<0) and (b_sch<_DGM)) then   *** Ein Aquifer ist vorhanden.
        aqu_vorh = aqu_vorh + 1
        if ((gwgl>b_sch) and (aqu_vorh>1)) then   *** Mindestens ein über dem aktuellen
            *** liegender Aquifer und der aktuelle selbst sind (teilweise) grundwassererfüllt
                if ((AW<0) and (tiefer_gwl < 1 ))then
                    tiefer_gwl = 1   *** Der oberste grundwassererfüllte Aquifer
                    maximale_bohrtiefe_zweiter = _DGM-t_sch
                end   *** bricht ab, wenn der 2. Aquifer ermittelt ist (die darunter interessieren nicht)
            end
        end
    end
    ***** Ermittlung gespannter Grundwasserleiter:
    if (AW<0)then
        if (gwgl >t_sch) then
            if ((AW<0) and (a_gespannt <> 1 ))then
                a_gespannt = 1   *** Aktuelle Schicht ist der oberste gespannte Aquifer.
                maximale_bohrtiefe = _DGM-t_sch
            end   *** bricht ab, sobald ein gespannter Aquifer ermittelt wurde.
        end
    end
    ***** Berechnung der anteiligen Schichtmächtigkeiten:
    if ((b_sch<_DGM) and(t_sch>t)) then   *** bed 1
        if (b_sch>T) then   *** bed11
            if (T_sch<_DGM) then   *** bedxx1
                if (gwgl<= B_sch) then   *** Fall 1
                    gw = 0
                    m = T_sch-B_sch
                elseif (gwgl>T_sch) then   *** Fall 2
                    gw = T_sch-B_sch
                    m = 0
                elseif ((gwgl>B_sch) and (GWGL <= T_Sch)) then   *** Fall 3
                    gw = T_sch-gwgl
                    m = (T_sch-B_sch)-gw
                end
            elseif(T_Sch>= _DGM) then   *** bedxx2
                if (gwgl<= B_sch) then   *** Fall 4
                    gw = 0
                    m = _DGM-B_sch
                elseif ((gwgl>B_sch) and (GWGL <= T_Sch)) then   *** Fall 5
                    gw = gwgl-B_sch
                    m = (_DGM-B_sch)-gw
                end
            end
        end
    end

```

```

    end
elseif (B_sch<= T) then          **** bed12
  if (T_sch<_DGM) then          **** bedxx1
    if (gwgl>T_sch) then        **** Fall 6
      gw = T_Sch-T
      m = 0
    elseif ((gwgl>B_sch) and (GWGL <= T_Sch)) then **** Fall 7
      gw = GWGL-T
      m = (T_sch-T)-gw
    elseif ((GWGL<= B_Sch) OR (GWGL<= T)) then **** Fall 8
      gw = 0
      m = T_Sch-T
    end
  elseif(T_Sch>=_DGM) then      **** bedxx2
    if ((gwgl > B_sch)and(GWGL<= T_Sch)) then **** Fall 9
      gw = GWGL-T
      m = Tiefe-GW
    elseif ((gwgl<= B_sch) and (GWGL <= T)) then **** Fall 10
      gw = 0
      m = Tiefe
    end
  end
end
end
end
***** Bestimmung in welcher Schicht die maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit auftritt:
geschwin = (GRAD*kf*86400*365*0.05) **** ne pauschal auf 0.05 gesetzt
if (gwgl>T) then
  if (geschwin>maxgeschwin) then
    maxgeschwin = geschwin
    maxschicht = schicht
  end
else
  maxschicht = ""
end
***** Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit (Erläuterungen wie im Script
***** F_Flaechen_Bewertung.
if (AW<0) then **** (nur für Aquifere)
  if (geschwin <= 5) then
    gwflies = -1
  elseif ((geschwin>5) and (geschwin <= 10)) then
    gwflies = 1/AW
  else
    gwflies = 1
  end
else
  gwflies = 1
end
end
***** Berechnung der Bewertungszahlen:
e1 = m/Tiefe **** Der grundwasserfreie Anteil einer Schicht bis Tiefe T am gewählten Punkt.
e2 = e1*FW **** multipliziert mit dem Formationsfaktor FW
e2BW = e1*BW*FW **** multipliziert mit dem Bohrbarkeitsfaktor BW
g1 = gw/Tiefe **** Der grundwassererfüllte Anteil einer Schicht bis Tiefe T am gewählten Punkt.
g2 = g1*FW*AW **** multipliziert mit dem Formationsfaktor FW und dem Aquiferfaktor AW
g2gwfl = g1*FW*gwflies*AW **** Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit
if (AW>0) then **** Einbeziehung der Bohrbarkeit im grundwassererfüllten Anteil
  g2BW = g1*FW*AW*BW
else
  g2BW = g1*FW*AW*(BW*(-1))
end
end
***** Zusammenfassen aller Schichten:
ergebnis = (ergebnis + g2 + e2)
bewertgwfl = (bewertgwfl + g2gwfl + e2)
bewertbw = (bewertbw + g2BW + e2BW)

```

```

        ***** Berechnung von abgeleiteten Parametern:
        Trans_GW = Trans_GW + (m*kf)           *** Transmissivität
        Lamda = Lamda + ((e1*L) + (g1*LGW))   *** Wärmeleitfähigkeit
        WC = WC + ((e1*C) + (g1*CGW))        *** Wärmekapazität
    end *** Ende der Schleife für alle Schichten in der Tabelle
        lamda.SetFormatPrecision(1)
        wc.SetFormatPrecision(1)
        paramtxt1 = "Transmissivität: " + trans_ges.AsString + "m2/s"
        paramtxt2 = "Mittlere Wärmeleitfähigkeit: " + Lamda.AsString + "W/m*K"
        paramtxt3 = "Mittlere volumetrische Wärmekapazität: " + WC.AsString + "MJ/m3*K"
        ergebnis = ergebnis*100
        bwertgwf = bwertgwf*100
        bwertbw = bwertbw*100
        ***** Klassifikation der Ergebnisse (hier nur Bewertung) in Kategorien („sehr gut“ bis „ungeeignet“)
        if(ergebnis <= (-100)) then
            bwert = "nicht geeignet"
        elseif ((ergebnis >(-100)) and (ergebnis <= 0)) then
            bwert = "schlecht geeignet"
        elseif ((ergebnis >0) and (ergebnis <= 100)) then
            bwert = "bedingt geeignet"
        elseif ((ergebnis >100) and (ergebnis <= 200)) then
            bwert = "gut geeignet"
        elseif (ergebnis >200) then
            bwert = "sehr gut geeignet"
        end
        ergebnis_liste.add(ergebnis.AsString + ", d.h. " + bwert.AsString)
    end *** Ende der Schleife für alle Tiefenwerte in Arbeitsliste
    ***** Aufrufen der Scripten zur Berechnung des Bohrprofils (stratigraphisch) und zur
    ***** Abfrage relevanter Informationen:
    av.run("EP_Bohrprofil",{ })
    av.run("EP_Themen_Abfragen",{ })

    ***** Ausgabe der Ergebnisse in ein Textfile:
    ***** Ausgabefile vorbereiten:
    ausgabe=_datei.GetText
    theInfo=_infos.GetText
    theFile=ausgabe+".txt"
    theFile=theFile.AsFileName
    lf = LineFile.Make(theFile,#File_PERM_WRITE)
    datum="Ausgabe erstellt am: "+_today.AsString

    ***** Schreiben der Texte in die Ausgabedatei:
    lf.WriteElt("Zusammenfassung der Bewertungsberechnung")
    lf.WriteElt("")
    if (theInfo="Zusatzinformationen") then
        theInfo= ("keine Zusatzinformationen angegeben")
    end
    lf.WriteElt ("Bewertung für "+_gesucht.AsString+" am "+_today.AsString+ "; "+theInfo)

    ***** Textblock 1 : Zusammenfassung, Datum, Verfahren
    text0a="Verfahren: "+_verfahren
    lf.WriteElt(text0a)
    if (liste_ja=true) then
        text0="Betrachtete Tiefe: LISTE"
    else
        text0="Betrachtete Tiefe: "+ tiefe.AsString+ "m"
    end
    lf.WriteElt(text0)

    ***** Textblock 2: Allgemeine Informationen
    lf.WriteElt("")
    lf.WriteElt("***** Allgemeine Informationen zum gewählten Standort")
    lf.WriteElt("")

```



```

_x.SetFormatPrecision( 0)
_y.SetFormatPrecision( 0 )
text1 = "Lagekoordinaten: RW= "+_x.AsString+"; HW= "+_y.AsString+"; Höhe über NN: "+ _DGM.AsString
If.WriteElt(text1)      *** Lagekoordinaten
If.WriteElt(_slp_text)  *** Hangneigung
If.WriteElt(_exp_text)  *** Exposition
***** Texte erstellt in 1_Themen_Abfrage
If.WriteElt(_tktext1)  *** Kartenblätter ...:
If.WriteElt(_tktext2)  *** Kartenblätter ...:
If.WriteElt(_tktext3)  *** Kartenblätter ...:
if (_tkgk="ja") then   *** Kartenblätter ...:
    If.WriteElt(_tktext4) *** Kartenblätter ...:
end
_dist_ort.SetFormatPrecision(0)
text6 = "Entfernung zur nächsten Ortschaft ("+_ort+) beträgt: " + _dist_ort.AsString+"m"
If.WriteElt(text6)      *** Ortschaft
***** Texte erstellt in 1_Themen_Abfrage
If.WriteElt(_wsgtext)   *** WSG
If.WriteElt(_wwa_text)  *** Zuständiges WWA
If.WriteELt(_lkr_text)  *** Landkreis

***** Textblock 3: Bewertungsergebnisse
If.Writeelt("")
If.Writeelt("*** Bewertungsergebnisse")
If.Writeelt("")
ergebnis.SetFormatPrecision(0)
text3 = "Bewertungszahl: "+ergebnis.AsString + ", d.h. "+bewert
maxgeschwin.SetFormatPrecision(2)
if (maxgeschwin=0) then
    maxgeschwin="keine Grundwasserbewegung zu erwarten"
    maxschicht="keine"
end
text3b= "Maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit: "+maxgeschwin.AsString+" (m/a) in Schicht: "+maxschicht
bewertgwf.SetFormatPrecision(0)
text3c = "Bewertungszahl mit GW-Fließbewegung: "+bewertgwf.AsString
bewertbw.SetFormatPrecision(0)
text3a = "Bewertungszahl mit Bohrbarkeit: "+bewertbw.AsString
rechtNN=_DGM-recht
recht.SetFormatPrecision(0)
if (liste_ja = false) then   *** Wenn nur eine Tiefe bewertet wird
    If.WriteElt(text3)
    If.WriteElt(text3a)
    If.WriteElt(text3b)
    If.WriteElt(text3c)
end
***** Wenn die Bewertung für verschiedenen Tiefen berechnet wurde,
***** werden hier die Ausgabeteixe für die einzelnen Tiefen erstellt:
i=0
if ( Liste_ja= true) then
    for each twert in arbeitsliste
        ergebnis=ergebnis_liste.Get(i)
        tiefe=arbeitsliste.Get(i)
        text3x="Bewertung für "+ tiefe.AsString+ "m Tiefe: "+ergebnis.AsString
        If.WriteElt(text3x)
        i=i+1
    end
end
end

***** Textblock 4: Geologie und Hydrogeologie
If.Writeelt("")
If.Writeelt("*** Geologie und Hydrogeologie")
If.Writeelt("")
If.WriteElt(_geol_text)   *** Geologie nach GÜK200

```

```

_dist_dol.SetFormatPrecision(0)
if (_dist_dol < 1000) then      *** Doline nur anzeigen, wenn Abstand kleiner 1 km
    text5a= "Achtung, in "+_dist_dol.AsString +"m Abstand zum Standort befindet sich eine Doline"
else
    text5a=""
end
if (text5a<>"" ) then
    lf.WriteElt(text5a)      *** Dolinen
end
***** Bohrungen
_dist_bohr.SetFormatPrecision(0)
text5b = "Entfernung zur nächsten Bohrung ("+_bohr+"; "+_bohrcode+"; "+_bohreigent+) beträgt: " +
_dist_bohr.AsString+"m"
text5c1=""      *** zurücksetzen bzw. initialisieren
_5_bohrung.sort(false)
for each bl in 0..3      *** Liest die nächsten 4 Bohrungen aus einer Liste (erstellt in 1_Themen_Abfragen
    b5=_5_bohrung.Get(bl)
    b5.SetFormatPrecision(0)
    b5=b5.AsString
    text5c1=b5 + "m; "+text5c1
end
text5c="Entfernungen zu den 4 nächsten Bohrungen: "+ text5c1
lf.WriteElt(text5b)      *** Bohrung
lf.WriteElt(text5c)      *** Vier Bohrungen
text5 = "Verwerfungsdichte (klassifiziert): "+vdklas +", "+vd.AsString
_dist_verwerf.SetFormatPrecision(0)
text8 = "Entfernung zur nächsten Verwerfung beträgt: " + _dist_verwerf.AsString+"m"
lf.WriteElt(text8)      *** Verwerfung
lf.WriteElt(text5)      *** Verwerfungsdichte
lf.WriteElt("")

***** Textblock 5 Ausgabe des Bohrprofils
lf.WriteElt("Zu erwartendes Bohrprofil ("+_prof_wie+) bei einer Bohrtiefe von "+Tiefe.AsString+ "m:")'*** Bohrpro-
fil
for each j in 0..(_beteiligt-1)
    profilschicht=_profilliste.Get(j)
    lf.WriteElt(profilschicht)
end
lf.WriteElt("")

***** Textblock 6: Temperatur und andere Parameter
t25.SetFormatPrecision(1)
t50.SetFormatPrecision(1)
t100.SetFormatPrecision(1)
t200.SetFormatPrecision(1)
text8a= "Temperaturprofil 25, 50, 100, 200m: "+t25.AsString +"; "
        +t50.AsString +"; "+t100.AsString+"; "+t200.AsString+" Grad C"
lf.WriteElt(text8a)      *** Temperaturprofil
if (liste_ja=false) then      *** nur schreiben, wenn ein Einzelwert gerechnete wurde
    lf.WriteElt(paramtxt1)      *** Transmissivität
    lf.WriteElt(paramtxt2)      *** Lamda
    lf.WriteElt(paramtxt3)      *** C
end
lf.WriteElt("")

***** Textblock: Ruhewasserspiegel und "Rechtsgrenzen"
flurabstand =_DGM-gwgl
text10= "Ruhewasserspiegel zu erwarten bei: "+gwgl.AsString+"m/NN bzw. " +flurabstand.AsString+"m unter GOK"
lf.WriteElt(text10) ***** Ruhewasserspiegel
text11=""
text12=""
if (a_gespannt=1) then
    text11="Bohrtiefe bis zum obersten gespannt Grundwasserstockwerk: "+maximale_bohrtiefe.AsString+ "m "

```

```

end
if (tiefer_gwl=1) then
    text12="Bohrtiefe bis zum zweiten (tieferen) Grundwasserstockwerk: "+maximale_bohrtiefe_zweiter.AsString +
    "m"
end
if (text11<>"") then
    lf.WriteElt(text11)
    lf.WriteElt("Der oberste gespannte Aquifer")
end
if (text12<>"") then
    lf.WriteElt(text12)
    lf.WriteElt("(d.h., der erste potentielle Aquifer, der nicht das erste Stockwerk darstellt;")
    lf.WriteElt("die Grundwasserführung bleibt dabei unberücksichtigt!")
end
***** Ende der Textausgabe
lf.close
anzeigen= "c:\windows\notepad.exe "+theFile.AsString  **** Anzeigen der Ausgabedatei im Editor
System.Execute(anzeigen)
atool = _SD.FindByName("nichts_tun_tool")  **** Auf ein anderes tool umschalten um zu verhindern, das ein neuer
**** Bewertungsvorgang getriggert wird.

atool.select
_SD.close
theWin=_Daten.GetWin
theWin.Activate
_Daten.SetTOCWidth (220)

```

Script 10: EP_Bohrprofil

' Das Script „EP_Bohrprofil“ dient zur Berechnung eines Bohrprofils mit „echten“ Schichten. Es liest die Angaben ' zu den Schichten nicht aus der Bewertungstabelle, sondern aus der „Stratigraphischen Tabelle“, die sich im ' Gegensatz zu Bewertungstabelle an die stratigraphische Konvention hält.

```

bohrListe = av.FindDoc("schichtdaten_stratigraphisch.dbf")
BohrVTab = BohrListe.GetVTab
Top_Sch = BohrVTab.FindField("TOP")
Bas_Sch = BohrVTab.FindField("BASIS")
SchichtName = BohrVTab.FindField("SCHICHT")
Maecht_Sch = BohrVTab.FindField("MAECHT")
BSchichten = BohrVTab.GetNumRecords
BdieAnzahl = 0
_Profilliste = {}
_beteiligt = 0
Tiefe = 200          **** Wird immer für 200m Tiefe berechnet
T = _DGM-Tiefe
for each rec in BohrVTab      **** Schleife für alle Schichten in der stratigraphischen Tabelle
    BdieAnzahl = BdieAnzahl + 1
    Schicht = BohrVTab.ReturnValue(Schichtname, rec)
    Top = BohrVTab.ReturnValue(Top_Sch, rec)
    T_Sch = _Ref + Top
    Bas = BohrVTab.ReturnValue(Bas_Sch, rec)
    B_Sch = _Ref + Bas
    bm = 0
    **** Abfrage der Fälle. Da nicht zwischen „gesättigt“ und „ungesättigt“ unterschieden muß,
    **** reduziert sich die Anzahl der Fälle auf 4
    if ((b_sch<_DGM) and(t_sch>t)) then          **** bed 1
        if (b_sch>T) then                      **** bed11
            if (T_sch<_DGM) then                **** bedxx1
                bm = T_sch-B_sch                **** Fall 1
            elseif(T_Sch>= _DGM) then           **** bedxx2

```

```

        bm = _DGM-B_Sch          *** Fall 2
    end
elseif (B_sch<= T) then      *** bed12
    if (T_sch<_DGM) then     *** bedxx1
        bm = T_sch-T        *** Fall 3
    elseif(T_Sch>= _DGM) then *** bedxx2
        bm = Tiefe          *** Fall4
    end
end
end
end
***** Alle Schichten die am Standort angetroffen werden, werden mit ihrer Mächtigkeit in eine Liste
geschrieben
if (bm>0) then
    Profil = Schicht + ": " + bm.AsString
    _profilliste.add(profil)
    _beteiligt = _beteiligt + 1
end
end
end

```

Script 11: EP_Themen_Abfrage

' Dieses Script dient zur Abfrage von „bewertungsrelevanten“ Informationen aus verschiedenen Themen.
' Abgefragt werden Grids (GThemes) und Vektorthemen (FThemes). Bei den Vektorthemen werden 2 verschiedene
' Methoden angewandt:
' + Ermittlung von Attributen einer Fläche, in der der gewählte Standort liegt (z.B. welche Gemeinde).
' + Ermittlung des Abstands von Punktobjekten, Linienobjekten (senkrecht) und Polygonen (zum Rand oder Zentrum).
' Das Script wird aus dem Script EP_Einzelpunkt_Bewertung heraus durch den Befehl
' av.run(„EP_Themen_Abfrage“, { }) aufgerufen und kehrt wieder dorthin zurück. Die ermittelten Werte
' werden deshalb als globale Variablen übergeben (_ underscore). In diesem Listing werden nicht alle
' Themen-Abfragen wiedergegeben, das Prinzip ist immer das Selbe.

```

***** Zahlenformat für verschiedene Variablen der Ausgabe setzen
_x.SetFormat( "d" )
_y.SetFormat( "d" )
***** Tabelleneinträge eines Fthemes (Vektorthemas) am Punkt (x,y) abfragen:
***** Thema 1 Landkreis:
landkreis = _Daten.FindTheme("Landkreise")
lk_tabelle = landkreis.GetFTab
recs = landkreis.FindByPoint(_Punkt)
Feldname = lk_tabelle.FindField("Name")
for each eintrag in recs
    pwert = lk_tabelle.ReturnValue(Feldname, Eintrag)
end
***** Tabelleneinträge eines Fthemes (Vektorthemas) aus verschiedenen Tabellenfeldern abfragen:
***** Thema Informationen zu Blättern der TK25 und GK25
tk_tabelle = _Daten.FindTheme("Tk_blatt").GetFTab
recs = _Daten.FindTheme("Tk_blatt").FindByPoint(_Punkt)
Blattname = tk_tabelle.FindField("Blatt_Name")    *** Blattname
Blattnummer = tk_tabelle.FindField("Blaetter_i") *** Blattnummer
gk = tk_tabelle.FindField("GK_vorh")             *** Geologische Karte vorhanden?
erl = tk_tabelle.FindField("Erl_vorh")           *** Erläuterungen dazu vorhanden?
jahr = tk_tabelle.FindField("GK_Jahr")           *** Erscheinungsjahr
inst = tk_tabelle.FindField("GK_Inst")           *** In der Bibliothek des geol. Instituts vorhanden?
ausl = tk_tabelle.FindField("Standort_Inst")     *** ausgeliehen von wem?
for each eintrag in recs
    tkn = tk_tabelle.ReturnValue(blattname, Eintrag)
    tknr = tk_tabelle.ReturnValue(blattnummer, Eintrag)
    tkgk = tk_tabelle.ReturnValue(gk, Eintrag)
    tkerl = tk_tabelle.ReturnValue(erl, Eintrag)
    tkjahr = tk_tabelle.ReturnValue(jahr, Eintrag)
    tkinst = tk_tabelle.ReturnValue(inst, Eintrag)

```

```

        ausleih = tk_tabelle.ReturnValue(ausl, Eintrag)
    end
    ***** Die Texte für die Ausgabe erstellen:
    _tktext1 = "Blatt TK25: " + tknr.AsString + " " + tkn
    if (tkgk = "ja") then
        wennja = "; Erscheinungsjahr: " + tkjahr.AsString
    else
        wennja = ""
    end
    _tktext2 = "Geologische Karte vorhanden: " + tkgk + wennja
    _tktext3 = "Erläuterungen vorhanden: " + tkerl
    _tktext4 = "In der Institutsbibliothek vorhanden: " + tkinst + "; Ausgeliehen von: " + ausleih
    ***** Nächstes Fthema - Oberflächengeloge nach GÜK200 abfragen:
    geo200 = _Daten.FindTheme("Geologie200")
    geo_tabelle = geo200.GetFTab
    recs = geo200.FindByPoint(_Punkt)
    geol = geo_tabelle.FindField("text")
    for each eintrag in recs
        geo = geo_tabelle.ReturnValue(geol, Eintrag)
    end
    geol_text = "Geologie nach GÜK200: " + geo
    ***** Entfernung zur nächsten Ortschaft bestimmen:
    Orte = _Daten.FindTheme("Orte")
    featuresToCheck = orten.GetFTab
    total = orten.GetFTab.GetNumRecords
    minRecord = 0
    shpFld = orten.GetFTab.FindField("Shape")
    Ortsname = orten.GetFTab.FindField("Name")
    mindistance = 100000
    mindistance.SetFormatPrecision(0)
    vprj = _Daten.GetProjection
    for each rec in featuresToCheck
        shpCurrent = orten.GetFTab.ReturnValue(shpFld,rec)
        OrtCurrent = orten.GetFTab.ReturnValue(Ortsname,rec)
        _dist_ort = shpCurrent.Distance(_Punkt)
        if (_dist_ort < mindistance) then
            mindistance = _dist_ort
            _ort = ortcurrent
            minRecord = rec.Clone
        end
        _dist_ort = mindistance
    end
    ***** Thema Bohrungen bearbeiten (Entfernung zu, Name, Besitzer . . . .):
    bohrung = _Daten.FindTheme("Bohrungen")
    featuresToCheck = bohrung.GetFTab
    total = bohrung.GetFTab.GetNumRecords
    minRecord = 0
    shpFld = bohrung.GetFTab.FindField("Shape")
    Bohrcode = bohrung.GetFTab.FindField("Code")
    Bohrname = bohrung.GetFTab.FindField("Bezeichnung")
    Bohreigent = bohrung.GetFTab.FindField("Eigent")
    mindistance = 100000
    Bohrungsliste=list.make      *** Eine Liste, um die 5 nächstgelegenen Bohrungen zu ermitteln
    _5_bohrung=list.make
    for each rec in featuresToCheck
        shpCurrent = bohrung.GetFTab.ReturnValue(shpFld,rec)
        BohrCurrent = bohrung.GetFTab.ReturnValue(bohrcode,rec)
        codecurrent = bohrung.GetFTab.ReturnValue(bohrname,rec)
        eigentcurrent = bohrung.GetFTab.ReturnValue(bohreigent,rec)
        _dist_bohr = shpCurrent.Distance(_Punkt)
        Bohrungsliste.add(_dist_bohr)
        if (_dist_bohr < mindistance) then
            mindistance = _dist_bohr
        end
    end

```

```

        _Bohr = Bohrcurrent
        _bohrcode = codecurrent
        _bohreigent = eigentcurrent
        minRecord = rec.Clone
    end
    _dist_bohr = mindistance
end
Bohrungsliste.sort(true)
for each bl in 0..4      *** Die 5 nächstgelegenen Bohrungen werden in die Liste _5_bohrung geschrieben
    b5=Bohrungsliste.Get(bl)
    _5_bohrung.add(b5)
end

***** Thema WSG bearbeiten
wsg = _Daten.FindTheme("WSG5000")
featuresToCheck = wsg.GetFTab
total = wsg.GetFTab.GetNumRecords
minRecord = 0
shpFld = wsg.GetFTab.FindField("Shape")
wsgzone = wsg.GetFTab.FindField("Zone")
mindistance = 100000
for each rec in featuresToCheck
    shpCurrent = wsg.GetFTab.ReturnValue(shpFld,rec)
    wsgCurrent = wsg.GetFTab.ReturnValue(wsgzone,rec)
    dist_wsg = shpCurrent.Distance(_Punkt)
    if (dist_wsg < minDistance) then
        minDistance = dist_wsg
        minRecord = rec.Clone
        wsg1 = wsgCurrent
    end
end
_dist_wsg = mindistance
if (_dist_wsg = 0) then
    _wsgtext = "Punkt liegt innerhalb eines Wasserschutzgebietes der Zone: " + wsg1
else
    _wsgtext = "Entfernung zum nächsten WSG (Zone " + wsg1 + ") beträgt: " + _dist_wsg.AsString + "m"
end
***** Verwerfungen bearbeiten:
verwerfungen = _Daten.FindTheme("verwerfungen200")
featuresToCheck = verwerfungen.GetFTab
total = verwerfungen.GetFTab.GetNumRecords
minRecord = 0
shpFld = verwerfungen.GetFTab.FindField("Shape")
mindistance = 100000
for each rec in featuresToCheck
    shpCurrent = verwerfungen.GetFTab.ReturnValue(shpFld,rec)
    _dist_verwerf = shpCurrent.Distance(_Punkt)
    if (_dist_verwerf < minDistance) then
        minDistance = _dist_verwerf
        minRecord = rec.Clone
    end
end
_dist_verwerf = mindistance
if (minRecord = 0) then
    MsgBox.Info("No features found within minimum search distance.",
        "Find Nearest Feature")
    exit
end
mindistance.SetFormat("d.d")

***** Abfrage der Zellwerte von Gridthemen (Rastern) am gewählten Punkt:
***** Gridthema abfragen: Hangneigung
slope = _Daten.FindTheme("Hangneigung").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)

```

```

slope.SetFormatPrecision (1)
_slp_text="Hangneigung: "+slope.AsString+ " Grad"      *** Ausgabertext erstellen

**** Gridthema abfragen: Exposition (in Grad und klassifiziert nach Tabelleneintrag aus reklassifiziertem Grid)
**** Methode zur Abfrage eines Interger-Grids mit mehreren Feldern in der VTab.
exp_grad = _Daten.FindTheme("Exposition").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
exp_grad.SetFormatPrecision (0)
expkl = _Daten.FindTheme("Expos_klass")
exp = _Daten.FindTheme("Expos_klass").GetGrid.CellValue(_Punkt,vprj)
exp_tab =expkl.Getvtab
exp_wert=exp_tab.FindField("Value")
richt=exp_tab.FindField("Richtung")
for each ew in -1..8
    if (exp=ew) then      *** Entsprechenden Tabelleneintrag aus dem Feld "Richtung" (Text) holen
        exp_r = exp_tab.ReturnValue(richt, ew).AsString
    end
end
if (exp_r="flach") then
    _exp_text="Exposition: Kein Gefälle, Richtung nicht ermittelbar"
else
    _exp_text="Exposition: "+exp_grad.AsString+" Grad ("+exp_r.AsString+)"
end

' **** Alle weiteren Abfragen laufen nach den gleichen Mustern ab und werden hier nicht weiter aufgelistet.
.....

```

Script 12:

```

' Das Script „F_Flaeche_Start“ startet den Dialog für die Flächenbewertung. Einstellungen und laden von
' Steuerelementen.
_zelle = 50
_Flaeche = 1      *** Teilt allen Scripten, in denen das relevant ist, mit, daß eine flächenhafte Bewertung durchgeführt
wird
_SD = av.GetProject.FindDialog("Start_Dialog")
_sdopen = (_SD.IsOpen)
if (_sdopen = true) then      *** Schließt den Startdialog und setzt _start auf 1 um anderen Scripten mitzuteilen,
    _start = 1                *** daß der Ablauf ursprünglich von dort aus gestartet wurde (Testzwecke).
    _SD.close
end
_Daten = av.GetProject.FindDoc("Daten")
_FD = av.GetProject.FindDialog("FlaechenDialog")
_FD.ReSize (550,275)
_FD.MoveTo(200,200)
_FD.open
_BER = _FD.FindByName("Berechnungen")
_BER.SetVisible(false)
_PAR = _FD.FindByName("Param")
_PAR.SetSelected(false)
_RG = _FD.FindByName("Recht_gr")
_RG.SetSelected(false)
_FLO = _FD.FindByName("Flaechen_Optionen")
_FLO.SetVisible(true)
_ZE = _FD.FindByName("Zelle")
_TI = _FD.FindByName("Tiefe")
_BO = _FD.FindByName("BOHR")
_RE = _FD.FindByName("RECHT")
_GW = _FD.FindByName("GWFL")
_KE = _FD.FindByName("KEINE")
_BO.SetSelected(false)
_RE.SetSelected(false)
_GW.SetSelected(false)

```

```

_ZE.SetEnabled(false)
_TI.SetEnabled(false)
_BO.SetEnabled(false)
_RE.SetEnabled(false)
_GW.SetEnabled(false)
_KE.SetEnabled(false)
_AW = _FD.FindByName("Ausschnitt_Wahl")
_AW.SetVisible(false)
_FM = _FD.FindByName("Flaeche_Modus")
_FM.SetVisible(false)
_OLF = _FD.FindByName("Ortsliste_Flaeche")
_OLF.SetVisible(false)
_erl2 = _FD.FindByName("Erl_Flaeche")
_erl2.SetText("Soll für die Ausgabe eine neues View erstellt werden oder ein existierendes View verwendet werden?")
_w2 = _FD.FindByName("weiter_2")
_w2.SetEnabled(false)
***** Erstellung einer Liste aller vorhandenen Views. Der Benutzer kann auswählen in welches der
***** bestehenden Views seine Ergebniskarte eingefügt werden soll oder ob ein neues View erstellen.
_VL = _FD.FindByName("View_Liste")
_VL.SetVisible(true)
neuliste = List.Make
neuliste.add("Neues View")
viewListe = av.GetProject.GetDocs
for each yx in viewliste
    abc = yx.GetClass.GetClassName
    if (abc = "View") then
        neuliste.add(yx)
    end
end
_VL.DefineFromList(neuliste)

```

Script 13: Script F_Flaeche_Wahl

' Das „Script F_Flaeche_Wahl“ dient zur Einstellung der nächsten Optionen nach Auswahl eines Views, in das das Ergebnis geschrieben werden soll.

```

_VL.SetVisible(false)
_FM.SetVisible(true)
_AS = _FD.FindByName("Ausschnitt")
_AL = _FD.FindByName("Alles")
_FM.SetVisible(true)
_erl2.SetText("Die Berechnung kann für die ganze Fläche (ca. 2h) oder für einen wählbaren Ausschnitt erfolgen")

```


Script 14: F_Flaeche_gewaehlt

' „F_Flaeche_gewaehlt“ dient zur Fallunterscheidung: Ausschnitt auswählen oder ganze Fläche rechnen.

```

_FM.SetVisible(false)
***** Wenn „Flächenausschnitt wählen“ gewählt wurde:
if (_AS.IsSelected = true) then
  _erl2.SetText("Bitte einen Ort, in dessen Umgebung die Auswahlfläche liegt, aus der Liste wählen:")
  _OLF.SetVisible(true)
  _OLF.DefineFromList(_OrteListe)
  _OLF.SortAscending (true)
end
***** Wenn „gesamte Fläche rechnen“ gewählt wurde:
if (_AL.IsSelected = true) then
  _erl2.SetText("Text für alles selected")
  _FD.ReSize (525,300)
  _FD.MoveTo(200,200)
  _FLO.SetVisible(true)
  arect = Rect.Make   *** Analysis extend auf die Ausdehnung der kleinsten beteiligten Datengrundlage
                      *** (hier DSM) setzen
  Grid.SetAnalysisExtent (#GRID_ENVTYPE_MINOF, arect)
end

```

Script 15: F_Flaeche_Optionen

' „F_Flaeche_Optionen“: Wurde in der Ortsliste ein Ort gewählt, wird durch Aufziehen eines Rechtecks auf dem Bildschirm mit der Maus die zu berechnende Fläche festgelegt. Anschließend können die Berechnungsoptionen eingestellt und das Berechnungsprogramm gestartet werden.

```

_Ausschnitt = _Daten.ReturnUserRect
gr = GraphicShape.Make(_Ausschnitt)
_Daten.GetGraphics.UnselectAll
gr.SetSelected(true)
_Daten.GetGraphics.Add(gr)
shp = gr.GetShape
av.GetProject.SetModified(true)
_d1 = _FD.FindByName("Dummy1")   *** Auf ein anderes Tool umschalten, um zu verhindern, daß beim nächsten
                                  *** Mausklick ein erneuter (unsinniger) Berechnungsablauf gestartet wird.

_d1.Select
Grid.SetAnalysisExtent (#GRID_ENVTYPE_VALUE, _Ausschnitt)
***** Steuerelemente im Optionen-Feld aktiv machen etc.:
_erl2.SetText("Hier können verschiedenen Bearbeitungsoptionen eingestellt werden")
_OLF.SetVisible(false)
_ZE.SetEnabled(true)
_TI.SetEnabled(true)
_BO.SetEnabled(true)
_RE.SetEnabled(true)
_GW.SetEnabled(true)
_KE.SetEnabled(true)
_FD.ReSize (550,300)
_FD.MoveTo(200,200)
_FM.SetVisible(false)
_VL.SetVisible(false)
_FLO.SetVisible(true)
_TI.SetVisible(true)
_BER.SetVisible(true)

```

Script 16: F_Optionen_Update

' Der „START“ Button wird aktiviert sobald im Bewertungsoptionenfeld Änderungen vorgenommen werden.

```
_w2.SetEnabled(true)
```

Script 17: F_Flaechen_Bewertung

' Im Script „F_Flaechen_Bewertung“ wird die flächenhafte Berechnung der Bewertungszahl durchgeführt.

' Auslesen und Einstellen der Berechnungsoptionen, Positionieren usw.:

```
dauer = 0
_FD.ReSize (525,100)
_FD.MoveTo(200,200)
_FLO.SetVisible(false)
_Zelle = _ZE.GetText.AsNumber
_Tiefe = _TI.GetText.AsNumber
if (_PAR.IsSelected = true) then      *** wenn alle Parameter gerechnet werden sollen
    par_ja = true
else
    par_ja = false
end
if (_RG.IsSelected = true) then      *** wenn die Rechtsgrenzen berechnet werden sollen
    rg_ja = true
else
    rg_ja = false
end
if (_BO.IsSelected = true) then
    bohr_ja = true
    bohrtext = "BW "      *** Dieser Text wird in den Namen des Ergebnisthemas eingefügt, um anzuzeigen welche
else                          *** Parameter berücksichtigt wurden.
    bohr_ja = false
    bohrtext = ""
end
if (_RE.IsSelected = true) then
    recht_ja = true
    rechtext = "recht "
else
    recht_ja = false
    rechtext = ""
end
if (_GW.IsSelected = true) then
    gwf_ja = true
    gwftext = "gwf"
else
    gwf_ja = false
    gwftext = ""
end
Grid.SetAnalysisCellSize (#GRID_ENVTYPE_VALUE, _Zelle)
***** Festlegen des Views, in das das Ergebnis eingefügt wird:
_auswahlview = _VL.GetCurrentValue
if (_auswahlview = "Neues View") then
    ViewName = MsgBox.Input("", "Neues View : ", "Bewertung")
    neuesView = View.Make
    neuesView.SetName(Viewname)
else
    neuesView = _auswahlview
end
***** Soll eine Liste abgearbeitet werden? Die Liste ist hier bereits vorgegeben, es kann
***** natürlich auch eine entsprechende Eingabemöglichkeit im Programmfenster erstellt werden.
```

```

_erl2.SetText("Liste abarbeiten: Wenn diese Option gewählt wird werden Bewertungskarten " +
    "für verschiedene Tiefen erstellt. Achtung: sehr lange Bearbeitungszeit")
Liste_ja = MsgBox.YesNo("Liste abarbeiten oder Einzelwert (" + _Tiefe.AsString + "m) rechnen (NO):", "",false)
if ( Liste_ja = true) then
    Arbeitsliste = { 10,15,20,25,30,40,50,60,75,100,150,200}
else
    arbeitsliste = { _Tiefe}          *** Keine Liste, sondern die eingestellte Tiefe berechnen.
end
listen = arbeitsliste.count
***** Warnmeldung. Grund: Die Berechnung der gesamten Fläche für eine Tiefe dauert ca. 2h (1999; Pentium 400)
_erl2.SetText("Weitermachen: Die Berechnung dauert ca. 15 Minuten für einen 10km2 großen Ausschnitt!")
Fortsetzen = MsgBox.MiniYesNo("Weitermachen?",false)
if (Fortsetzen = false) then
    _FD.close      *** Man kann auch einen Neustart, z.B. ab Wahl des Ausschnitts, hervorrufen. Werte
    exit          *** zurücksetzen usw.
end
_erl2.SetVisible(false)
_FD.close
***** Die Eingabethemen „DGM“ und „DSM“ etc. werden geholt:
Dgm = _Daten.FindTheme("DGM").GetGrid
DSM = _Daten.FindTheme("DSM").GetGrid
GWGL = _Daten.FindTheme("GWGL50").GetGrid
RECHT = _Daten.FindTheme("RECHT").GetGrid
Grad = _Daten.FindTheme("Gradient").GetGrid
VD = _Daten.FindTheme("Verwdicht").GetGrid
R = DGM-RECHT *** Das ist die bereits vorab berechnete und im Gridthema „RECHT“ abgelegte
               *** „Rechtsgrenze“. Die Rechtsgrenze kann wahlweise aber auch neu berechnet werden (s.u.),
               *** was aber in Anbetracht dessen, daß die Rechtsgrenze eine weitgehend feststehender
               *** Parameter ist, nicht sehr sinnvoll ist.
***** Die Schichtdatentabelle wird eingelesen:
SchichtVTab = _DatenListe.GetVTab
Nummer = SchichtVTab.FindField("Index")
Top_Sch = SchichtVTab.FindField("TOP")
Bas_Sch = SchichtVTab.FindField("BASIS")
SchichtName = SchichtVTab.FindField("SCHICHT")
Maecht_Sch = SchichtVTab.FindField("MAECHT")
Lith_sch = SchichtVTab.FindField("LITH_WERT")
Aqu_Sch = SchichtVTab.FindField("AQU_WERT")
kf_Sch = SchichtVTab.FindField("KF")
Typ_Sch = SchichtVTab.FindField("Aquifer")
Bohr_Sch = SchichtVTab.FindField("BOHR")
L_Sch = SchichtVTab.FindField("L_ohne_GW")
LGW_Sch = SchichtVTab.FindField("L_GW")
C_Sch = SchichtVTab.FindField("CohneGW")
CGW_Sch = SchichtVTab.FindField("CmitGW")
Schichten = SchichtVTab.GetNumRecords
dieAnzahl = 0
for each i in arbeitsliste *** Sofern eine Bearbeitung verschiedener Tiefen gewünscht wurde: Schleife für die
    _Tiefe = i             *** Abarbeitung der in der „{Arbeitsliste}“ angegebenen Werte.
    T = DGM-_Tiefe.AsGrid
    ***** Grids und Variablen, die durch Addition mit sich selbst entstehen zurücksetzen:
    schon_berechnet = 1.AsGrid
    schon_berechnet_stockwerk = 1.AsGrid
    gw1_schon_vorhanden = 0.AsGrid
    gw2 = 0.AsGrid
    gw1 = 0.AsGrid
    oberst_gespannt = 0.AsGrid *** aus dem Bereich „Rechtsgrenzen“
    gw2_tiefe = 0.AsGrid      *** „Rechtsgrenzen“
    gw1_vorh = 0.AsGrid
    dieAnzahl = 0           *** Anzahl der Schichten in der Schichtdatentabelle
    g1 = 0.AsGrid          *** grundwassererfüllter Anteil einer Schicht
    Trans_GW = 0.AsGrid    *** Transmissivität
    Lamda = 0.AsGrid       *** Wärmeleitfähigkeit

```

```

WC = 0.AsGrid          *** Wärmekapazität
ergebnis = 0.AsGrid
**** Alle Bereiche, in denen die gewünschte Bohrtiefe unter der „Rechtsgrenze“ liegt, werden auf -999 gesetzt
if (recht_ja = true) then
    bed_recht = (T <= R)
    recht = bed_recht * (-999)
    bed_recht_ok = (T > R)
else
    bed_recht = 1.AsGrid
end
for each rec in SchichtVTab  *** Schleife für alle Schichten in der Bewertungstabelle
    dauer = (((dauer + 1) / schichten) / listen) * 100
    av.SetStatus(dauer)
    gesp = 0
    dieAnzahl = dieAnzahl + 1
    Schicht = SchichtVTab.ReturnValue(Schichtname, rec)
    Top = SchichtVTab.ReturnValue(Top_Sch, rec).AsGrid
    T_Sch = DSM + Top
    Bas = SchichtVTab.ReturnValue(Bas_Sch, rec).AsGrid
    B_Sch = DSM + Bas
    M = SchichtVTab.ReturnValue(Maecht_Sch, rec)
    FW = SchichtVTab.ReturnValue(Lith_Sch, rec)
    AW = SchichtVTab.ReturnValue(Aqu_Sch, rec)
    kf = SchichtVTab.ReturnValue(KF_Sch, rec)
    Typ = SchichtVTab.ReturnValue(Typ_Sch, rec)
    BW = SchichtVTab.ReturnValue(Bohr_Sch, rec)
    if (bohr_ja = false) then
        BW = 1
    end
    L = SchichtVTab.ReturnValue(L_Sch, rec)
    LGW = SchichtVTab.ReturnValue(LGW_Sch, rec)
    C = SchichtVTab.ReturnValue(C_Sch, rec)
    CGW = SchichtVTab.ReturnValue(CGW_Sch, rec)
    **** Festlegung der Bedingungsgrids:
    bed1 = (B_Sch < DGM) * (T_Sch > T)
    bed11 = B_Sch > T
    bedxx1 = T_Sch < DGM
    bedxx2 = T_Sch >= DGM
    bed12 = B_Sch <= T
    bedxxx1 = GWGL <= B_sch
    bedxxx2 = GWGL > T_Sch
    bedxxx3 = (GWGL > B_Sch) * (GWGL <= T_Sch)
    bedxxx4 = ((GWGL <= T) + (GWGL <= B_Sch)) > 0
    bed_gwt = GWGL > T
    gwgl_t = (GWGL - T) * (bed_gwt)
    **** Einbeziehung der Fließgeschwindigkeit: GWFL > 5m pro Jahr = schlecht
    **** Es wird ein Multiplikationsgrid gebildet, das sich aus allen Bereichen zusammensetzt.
    **** Fließgeschwindigkeiten < 5m pro Jahr führen insgesamt zu einer Verbesserung usw.
    geschwin = (GRAD * kf * 0.05 * 86400 * 365)
    if (AW < 0) then
        gwfl_gut = (-1.AsGrid)  *** geringe GWFL: Anwesenheit von Grundwasser führt zu einer
                                *** Verbesserung.
        gwfl_mittel = ((geschwin > 5) * (geschwin <= 10)) * (1 / AW)
        *** Der grundwassererfüllte Bereich wird wie der grundwasserfrei behandelt (AW * 1 / AW = 1),
        *** Anwesenheit von GW hat keine Konsequenzen.
        gwfl_schlecht = (geschwin > 10)  *** AW bleibt gleich, Anwesenheit von Grundwasser führt
                                        *** zu einer Verschlechterung
        gwflies = gwfl_gut + gwfl_mittel + gwfl_schlecht
        if (gwfl_ja = false) then
            gwflies = 1
        end
    else
        gwflies = 1
    end

```

```

end
***** Berechnung des grundwasserfreien und grundwassererfüllten Anteils jeder einzelnen Schicht
***** an jedem Punkt der gewählten Fläche in dem die jeweiligen Bedingungen (bed...) bzw. ihre
***** Kombinationen gültig sind:
F_1 = (T_Sch-B_Sch)*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx1
GW_1 = 0.AsGrid
F_2 = 0.AsGrid
GW_2 = (T_Sch-B_Sch)*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx2
F_3 = ((T_Sch-B_Sch)-(T_Sch-GWGL))*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx3
GW_3 = (T_Sch-GWGL)*bed1*bed11*bedxx1*bedxxx3
F_4 = (DGM-B_Sch)*bed1*bed11*bedxx2*bedxxx1
GW_4 = 0.AsGrid
F_5 = ((DGM-B_Sch)-(GWGL-B_Sch))*bed1*bed11*bedxx2*bedxxx3
GW_5 = (GWGL-B_Sch)*bed1*bed11*bedxx2*bedxxx3
F_6 = 0.AsGrid
GW_6 = (T_Sch-T)*bed1*bed12*bedxx1*bedxxx2
*** In allen Berechnungen, in denen der Term (GWGL-T) vorkommt, muß eine Bedingung
*** „bed_gwt = T> = GWGL“ eingeführt werden, da dieser Fall sonst nicht geklärt ist
F_7 = ((T_Sch-T)-gwgl_t)*bed1*bed12*bedxx1*bedxxx3*bed_gwt
GW_7 = gwgl_t*bed1*bed12*bedxx1*bedxxx3
F_8 = (T_Sch-T)*bed1*bed12*bedxx1*bedxxx4
GW_8 = 0.AsGrid
F_9 = (_Tiefe.AsGrid-gwgl_t)*bed1*bed12*bedxx2*bedxxx3*bed_gwt
GW_9 = gwgl_t*bed1*bed12*bedxx2*bedxxx3*bed_gwt
F_10 = (_Tiefe.AsGrid)*bed1*bed12*bedxx2*bedxxx4
GW_10 = 0.AsGrid
***** Addition aller Fälle, Anteilsberechnung, Multiplikation mit Bewertungsfaktoren:
e1 = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_10)
e2 = e1.float
e3 = e2/_Tiefe      *** anteilige Mächtigkeit der Schicht
e4 = e3*FW*100     *** Bewertungszahl (nur „Formationsfaktor“ für die Schicht,
                  ' *** grundwasserfreier Anteil
e5 = e4*BW        *** Einbeziehung der Bohrbarkeit (falls gewählt)
g1 = (GW_1 + GW_2 + GW_3 + GW_4 + GW_5 + GW_6 + GW_7 + GW_8 + GW_9 + GW_10)
g2 = g1.float
g3 = g2/_Tiefe     *** anteilige Mächtigkeit, grundwassererfüllter Anteil, usw. ...
g4 = g3*FW*AW*gwflies*100   *** Einbeziehung der Grundwasserfließgeschwindigkeit,
                          *** Erläuterungen in Kapitel 8.2
g4_neg = g4<0 *** Im grundwassererfüllten Bereich können negative Bewertungszahlen auftreten,
              *** Fallunterscheidung erforderlich
g4_pos = g4>=0
g5_neg = g4 *g4_neg *(BW*(-1))
g5_pos = g4*g4_pos*BW
g5 = g5_pos + g5_neg
***** Zusammenfassung aller Schichten. „ergebnis“ ist die Gesamtbewertungszahl für alle Schichten
***** mit grundwassererfülltem und grundwasserfreiem Anteil. Nach jedem Schleifendurchlauf wird
***** die Bewertungszahl der einzelnen Schichten hinzuaddiert.
ergebnis = ((ergebnis + g5 + e5))
ergebnis_theme = Gtheme.Make(ergebnis)
if (par_ja = true) then      *** wenn die Berechnung der folgenden Parameter gewünscht wurde:
    Trans_GW = Trans_GW + (g2*kf) *** Transmissivität
    Lamda = Lamda + ((e3*L) + (g3*LGW)) *** mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit
    WC = WC + ((e3*C) + (g3*CGW)) *** mittlere volumetrische Wärmekapazität
end      *** Ende Berechnung Parameter
***** Sind alle Schichten abgearbeitet, wird das Gesamtergebnis in ein GTheme umgewandelt und
***** dem zuvor gewählten View zugefügt. Wenn gewünscht kann es noch mit verschiedenen
***** „Besonderheiten“ multipliziert werden. Hier z.B. die Verwerfungsichte (denkbar auch
***** Karstgebiete, Steillagen etc.).
if (dianzahl = schichten) then
    ***** Einbeziehung der Verwerfungsichte (die verwendete Beziehung stellt nur eine
    ***** Beispiel dar, ihre Signifikanz wurde nicht untersucht:
    erg_neg = ergebnis < 0 *** damit bei negativer Bewertung im Bereich von
    erg_pos = ergebnis >= 0 *** Verwerfungen nicht die Bewertung verbessert wird

```

```

erg_verw_pos = ((ergebnis)/(vd.pow(1/3))      *** positive Bewertungen werden geteilt
erg_verw_neg = ((ergebnis)*(vd.pow(1/3))      *** negative Bewertungen werden multipliziert
erg_verwerf = ((ergebnis)/(vd.pow(1/3))
**** Erzeugung des Ausgabethemas, Zuweisung einer Legende
ergebnis_theme = Gtheme.Make(ergebnis)
Ergebnis_Name = "Bew. bis " + _Tiefe.AsString + "m mit " + gwftext + rechttext + bohrtext ' + " _
AW*" + AW_aender.AsString
ergebnis_theme.SetName(ergebnis_Name)
neuesView.addtheme(ergebnis_theme)
leg = ergebnis_theme.Getlegend
legende = ("H:\AUSCHN\Bewertung\bewert.avl").AsFileName
dielegende = leg.load(legende,#LEGEND_LOADTYPE_ALL)
**** Rechtsgrenzen bestimmen, wenn gewünscht:
**** Anmerkung: Die Rechtsgrenze kann jedesmal neu gerechnet werden, muß sie aber
**** nicht, da sich dieser Parameter eigentlich nur verändert, wenn das Untergrundmodell
**** geändert wird.
if (rg_ja = true) then
  gesp = 0
  **** Tiefenlage von gespanntem Grundwasserleiter bestimmen:
  if (AW<0) then      *** Schicht ist ein Aquifer
    a_gespannt = T_sch*(gwgl>t_sch)*schon_berechnet
  end
  **** Tiefenlage von zweitem Grundwasserleiter bestimmen:
  if (AW<0) then
    bereich1 = gw1      *** weist bereich1 den Bereich zu, in dem der vorherige
                        *** Aquifer der oberste war (mit oder ohne Wasser)
    gw1 = (b_sch<dgm)    *** der Bereich, in dem der aktuelle Aquifer
                        *** vorkommt (muß kein Wasser haben)
    gw2 = (gwgl>b_sch)*(dgm-t_sch)*schon_berechnet_stockwerk*bereich1
  end
  if (AW<0) then
    oberst_gespannt = oberst_gespannt + a_gespannt
    gw2_tiefe = gw2_tiefe + gw2
    gw1_vorh = gw1_vorh + gw1
  end
  schon_berechnet = (oberst_gespannt = 0)
  schon_berechnet_stockwerk = (gw2_tiefe = 0)
  gw1_schon_vorhanden = (gw1_vorh>0)
  bohrtiefe_gespannt = dgm-oberst_gespannt
  bohrtiefe_zweites = gw2_tiefe
  rechtsgrenze = 1.AsGrid
  rechtsgrenze = rechtsgrenze*((bohrtiefe_gespannt<= bohrtiefe_zweites)* __
bohrtiefe_gespannt) rechtsgrenze*((bohrtiefe_gespannt>bohrtiefe_zweites)* __
bohrtiefe_zweites)
  if (recht_ja = true) then
    bed_recht = T<= rechtsgrenze
    recht = bed_recht*(-999)
    bed_recht_ok = (T>R)
  else
    bed_recht = 1.AsGrid
  end
  oberst_theme = Gtheme.Make (bohrtiefe_gespannt)
  oberst_name = "Rechtsgrenze gespannt"
  oberst_theme.SetName(oberst_Name)
  neuesView.addtheme(oberst_theme)
  zweites_theme = Gtheme.Make (bohrtiefe_zweites)
  zweites_name = "Rechtsgrenze zweites Stockwerk"
  zweites_theme.SetName(zweites_Name)
  neuesView.addtheme(zweites_theme)
end      *** Ende Rechtsgrenzen
**** Einbeziehung der rechtlichen Bewertung (wenn gewünscht):
if (recht_ja = true) then
  ergebnis = ((ergebnis*bed_recht).Int) + ((ergebnis*bed_recht_ok).int) + recht

```

```

end
**** Berechnung der abgeleiteten Parameter, sofern gewünscht:
if (par_ja = true) then      *** wenn die Berechnung der folgenden Parameter gewünscht wurde:
    Trans_GW_theme = Gtheme.Make(trans_GW)
    trans_GW_Name = "Transmissivität" + _Tiefe.AsString + " m"
    trans_GW_theme.SetName(trans_GW_Name)
    neuesView.addtheme(trans_GW_theme)
    leg = trans_GW_theme.Getlegend
    legende = ("H:\AUSCHN\Bewertung\trans.avl").AsFileName
    dielegende = leg.load(legende,#LEGEND_LOADTYPE_ALL)
    Lamda_theme = Gtheme.Make(Lamda)
    Lamda_Name = "Lamda " + _Tiefe.AsString + "m"
    Lamda_theme.SetName(Lamda_Name)
    neuesView.addtheme(Lamda_theme)
    leg = Lamda_theme.Getlegend
    legende = ("D:\avenue\lamda.avl").AsFileName
    dielegende = leg.load(legende,#LEGEND_LOADTYPE_ALL)
    WC_theme = Gtheme.Make(WC)
    WC_Name = "C " + _Tiefe.AsString + "m"
    WC_theme.SetName(WC_Name)
    neuesView.addtheme(WC_theme)
    leg = WC_theme.Getlegend
    legende = ("H:\AUSCHN\Bewertung\WC.avl").AsFileName
    dielegende = leg.load(legende,#LEGEND_LOADTYPE_ALL)
end      *** Ende Bedingung Parameter ja
end      *** Ende Bedingung Anzahl = Schichten
end      *** Ende Abarbeitung aller Schichten
end      *** Ende Abarbeitung der Liste mit verschiedenen Tiefen
theWin = neuesView.GetWin
theWin.Activate
av.GetProject.SetModified(true)
r = ergebnis_theme.ReturnExtent      *** Auf die neu erstellte Bewertungskarte zoomen:
NeuesView.GetDisplay.SetExtent(r.Scale(1.1))
_FD.Close

```

Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name: **Karl Roland Barthel**
Geburtsdatum: 12.07.1967
Geburtsort: Memmingen
Adresse: Lendnerstr. 2, 97074 Würzburg, Tel. 0931/81542

Schulbildung:

Sept. 73 bis Juli 77: Theodor-Heuss-Grundschule in Memmingen.
Sept. 77 bis Juni 87: Bernhard-Strigel-Gymnasium in Memmingen, Abitur.

Zivildienst:

Dez. 87 bis Juli 89: Zivildienst in den Unterallgäuer Werkstätten für Behinderte (Lebenshilfe e.V.) in Memmingen.

Studium:

WS 89/90 bis SS 95: Studium der Geologie-Paläontologie an der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg. Abschluß (Diplom) 9/95.
März 96: Beginn der Promotion am Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt der Universität Würzburg bei Herrn Prof. Dr. P. Udluft. Studium der Geologie-Paläontologie (Promotion) an der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg.
März 96 - April 96: Promotionsstipendium der Universität Würzburg.
Mai 96 – Sept. 99: Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).
Aug. 97 - Dez. 97: Forschungsaufenthalt an der Dalhousie University in Halifax, Nova Scotia, Kanada, gefördert durch ein Stipendium des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD). Mitarbeit an einem GIS-Projekt zur Erkundung des Potentials für die thermische Untergrundspeicherung in Nova Scotia.

Praktische Tätigkeiten:

Sept. 91 – Okt. 91: Praktikum im Ingenieurbüro für Geotechnik, Hans-Peter Türk, Würzburg.
Dez. 95 - Feb. 96: Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, geodätische und gravimetrische Vermessung von Maarvulkanen in der Eifel.
Seit Sept. 94: Tätigkeit als freier Mitarbeiter bei Dr. Dr. habil. K. Ernstson, beratender Geophysiker und Geologe, Würzburg. Selbständige Durchführung und Auswertung geophysikalischer Messungen (Grundwasser-, Lagerstätten-, Baugrund- und Altlastenerkundung).

Würzburg, den 28.07.2000