

**Grundwasserneubildungsdynamik im Buntsandstein
des Spessarts -
Ermittlung über die Durchströmung der
ungesättigten Zone**

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

vorgelegt von
Edgar Harzer

aus
Salzberg

Würzburg 2003

Eingereicht am:

1. Gutachter:
2. Gutachter:
der Dissertation

1. Prüfer:
2. Prüfer:
der mündlichen Prüfung

Tag der mündlichen Prüfung:

Doktorurkunde ausgehändigt am:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Auswahl des Untersuchungsgebietes	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Gesättigter und ungesättigter Fluss	3
2.2	Geohydraulische Kenngrößen	4
2.2.1	Porenraum	5
2.2.2	Kluftraum	6
2.3	Kombiniertes Fließverhalten in geklüfteten, porösen Medien	10
2.4	Poren-Kluft-Modellansatz	11
2.5	Numerischer Ansatz der Strömungsgleichung	12
3	Methodische Grundlagen	15
3.1	Geländemessungen	15
3.2	Labormessungen	16
4	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	17
4.1	Geographische Lage und Geomorphologie des Untersuchungsgebietes	17
4.2	Geologischer Überblick	17
4.3	Tektonik	19
4.3.1	Bisherige Beschreibungen	19
4.3.2	Eigene Untersuchungen	19
4.3.3	Orientierung der Kluftflächen	20
4.3.4	Kluftöffnungsweiten	22

4.3.5	Kluftfüllungen und Kluftbeläge	24
4.3.6	Kluftabstände	24
4.3.7	Terminationsverhalten	25
4.3.8	Oberflächenbeschaffenheit	28
4.3.9	Kontaktflächenanteil	28
4.3.10	Kluftanalyse	28
4.4	Hydrogeologie	30
4.4.1	Grundwasserleiter	30
4.4.2	Grundwasseroberfläche	30
4.4.3	Flurabstände	31
4.4.4	Einzugsgebiet der Hafenlohr	31
4.4.5	Abfluss der Hafenlohr	31
4.5	Bisher ermittelte Grundwasserneubildung	32
4.5.1	Berechnungen nach dem Abfluss an Vorflutern	33
4.5.2	Berechnungen aus Klimabilanzen	33
4.5.3	Gemischte Berechnungen und Schätzungen	34
5	Hydrogeologische Ausgangsdaten	35
5.1	Matrixeigenschaften	35
5.1.1	Porenraum	35
5.1.2	Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung	36
5.1.3	Gesteinsdurchlässigkeit	37
5.1.4	Ungesättigte Gesteinsdurchlässigkeit	39
5.2	Kluftraumeigenschaften	40
5.2.1	Kluftvolumen	40
5.2.2	Gebirgsdurchlässigkeit	41

5.2.3	Grundlagen für weitere Berechnungen	44
5.2.4	Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung	46
5.2.5	Ungesättigte Kluftraum-Durchlässigkeit	47
5.3	Bodenkennwerte	47
6	Klimatologische Ausgangsdaten	49
6.1	Untersuchungszeitraum	49
6.2	Niederschlag	49
6.3	Luftfeuchte und Temperatur	52
6.4	Potentielle Evapotranspiration	52
7	Modellbeschreibung	54
7.1	Hydrogeologisches Modell	54
7.2	Numerisches Modell	58
7.3	Regionalisierung der Daten	60
7.4	Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen	62
8	Ergebnisse	64
8.1	Evapotranspiration - Infiltration - Oberflächenabfluss	64
8.2	Saugspannungsverteilungen	67
8.2.1	Übergang Boden–Festgestein	67
8.2.2	Profiltiefe und Saugspannungsverteilung	69
8.2.3	Porenraum und Saugspannungsverteilung	70
8.2.4	Tektonik und Saugspannungsverteilung	71
8.3	Zwischenabflüsse	72
8.4	Grundwasserneubildung	75
8.4.1	Verlauf der Grundwasserneubildung	76

8.4.2	Porenraum und Grundwasserneubildung	80
8.4.3	Tektonische Beanspruchung und Grundwasserneubildung	81
8.4.4	Flurabstände und Grundwasserneubildung	82
8.4.5	Schichtfolgenwechsel und Grundwasserneubildung	83
8.4.6	Grundwasserneubildungshöhe im Untersuchungsgebiet	84
8.5	Vergleich mit dem Abfluss der Hafenlohr	87
8.6	Bilanzierung	89
8.7	Fehlerbetrachtung	90
8.7.1	Mögliche Fehlerquellen	90
8.7.2	Bilanzfehler	93
8.7.3	Verringerung der Fehler	95
9	Zusammenfassung	96
10	Ausblick	101
11	Literaturverzeichnis	103
12	Verwendete Abkürzungen	107
ANLAGEN		109
	Lageplan	110
	Geologische Karte (verändert nach BGLA, 1993)	111
	Grundwassergleichenplan (verändert nach SCHWARZMEIER, 1979, 1980, WITTMANN, 1972, IGI, 1988)	112
	Flurabstandskarte	113
	Klimakarte	114
	Aufschluß-Verzeichnis	115
	θ - ψ -Beziehung / Porenraum	116

Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit, bezogen auf geologische Formation	122
k_u - ψ -Beziehung / Porenraum	123
Θ - ψ -Beziehung / Kluftraum	124
k_u - ψ -Beziehung / Kluftraum	126
θ - ψ -Beziehung / Böden, bezogen auf geologische Formation	128
k_u - ψ -Beziehung / Böden, bezogen auf geologische Formation	129
Datenblätter Kluftekennwerte	130
Kennwerte der Teilflächen	136
Teilflächenkarte	137
Verteilungen der Grundwasserneubildung	138
Verteilungen der Zwischenabflüsse	140
Programmstruktur	144
Quellcode	148
Beispieldateien	178

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In jüngster Zeit zwingen zunehmende Probleme bei der Qualitätssicherung der Wasserversorgung die Wasserwirtschaft und die Wasserversorgungsunternehmen auf landwirtschaftlich und industriell wenig genutzte Gebiete auszuweichen. Den bewaldeten Mittelgebirgen kommt dabei eine tragende Rolle zu bei der Suche nach alternativen Erschließungsmöglichkeiten. Die langfristige Daseinsvorsorge erfordert die Kenntnis des Erschließungspotentials und somit eine hinreichend genaue Ermittlung der Grundwasserneubildung in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung. Die Methoden zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Abflussmessungen liefern nur ungenaue Werte. Diese Werte entsprechen meist eher einem Mindestwert für die Grundwasserneubildung. Ein weiteres Problem der Abflussmethode, vor allem in Einzugsgebieten mit ausgeprägter Morphologie, ist die Orientierung am oberirdischen Einzugsgebiet, das vom unterirdischen Einzugsgebiet erheblich abweichen kann. Angegliederte unterirdische Einzugsgebiete, die zeitlich und räumlich variieren können, werden mit der Abflussmethode nicht erfasst. Mit der Berechnung auf Basis bodenphysikalischer Kennwerte kann die gewünschte Genauigkeit erreicht werden.

Legt man als Input den Niederschlag und die Evapotranspiration fest, so gelangt man über verschiedene gesteins- und bodenphysikalische Kenngrößen zur Beschreibung der Sickervorgänge in der ungesättigten Zone. Wesentliche Steuergrößen sind dabei der Wassergehalt und die Saugspannungsverhältnisse sowie in deren Abhängigkeit die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins unter teilgesättigten Bedingungen. Mit Kenntnis der Sickerwasserbewegung läßt sich schließlich die Größe der Grundwasserneubildung als Output festlegen.

In Lockergesteinsbereichen lassen sich die Kenngrößen durch Messgeräte gut erfassen und dank der Homogenität relativ leicht berechnen. Die Beschreibung der Sickervorgänge in Festgesteinen gestaltet sich hingegen wesentlich schwieriger, da die Verteilung der Durchlässigkeiten aufgrund der eingeschalteten Diskontinuitäten (Klüfte) deutlich inhomogen ist. Messgeräte lassen sich in situ weder in die Matrixanteile noch in die Klüfte einbauen. Bei der Modellierung und Berechnung der gewünschten Kenngrößen ist die Inhomogenität des Felses zu berücksichtigen.

Die Beschreibung der Sickerwasserbewegung in Festgesteinen bildet auch die Grundlage zur Beantwortung von Fragen aus den Bereichen Deponiesicherung, Altlasten und Ausbreitung von Schadstoffen in der ungesättigten Zone von Festgesteinen.

1.2 Zielsetzung

Grundwasserneubildungsberechnungen nach UDLUFT (1992), die auf einem Speichermodell auf Basis von Wassergehalts-Saugspannungs-Durchlässigkeitsbeziehungen beruhen, liefern für Lockergesteine sehr gute Ergebnisse. Bei bekannter Größe des Einzugsgebietes läßt sich das Abflussverhalten eines Vorfluters bzw. die Schüttung einer Quelle wirklichkeitsgetreu simulieren. Auf die Festgesteine der Mittelgebirge ist

allerdings, aufgrund der unterschiedlichen bodenphysikalischen Ausgangsbedingungen für die Grundwasserneubildung, ein Lockergesteinsmodell nicht einfach übertragbar.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Modell erstellt werden, das es ermöglicht, Festgesteinskenngrößen in die Grundwasserneubildungsdynamik mit einzubinden. Das Modell soll das kombinierte Verhalten von Gesteinsmatrix und Kluftraum erfassen. Gleichzeitig sollen die Zwischenabflüsse in schwebenden Grundwasserstockwerken berücksichtigt werden, so dass schließlich eine Quantifizierung der Sickerwassermenge möglich wird, die das Hauptgrundwasserstockwerk erreicht. Dabei wird zurückgegriffen auf bereits existierende Modelle, die den ungesättigten Fluss sowohl in poröser Matrix als auch im Kluftraum beschreiben. Geeignete Modelle zur Kombination der hydraulischen Eigenschaften sollen in das Gesamtmodell eingebunden werden.

Besonderer Wert soll auf eine praktische Anwendung des Modells gelegt werden. Ziel ist es, Typkurven für geohydraulische Kennwerte zu erstellen, anhand derer eine rasche Umsetzung von Eingangsdaten in das Modell erfolgen kann. Die Eingangsdaten sollen dabei mit möglichst geringem Aufwand zu beschaffen sein.

1.3 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Grundvoraussetzung für die Auswahl des Untersuchungsgebietes war, dass es sich um ein Einzugsgebiet eines Fließgewässers in einem bewaldeten Mittelgebirge handelt. Für das Gewässer sollten Abflussmessungen über einen längeren Zeitraum vorliegen. Der geologische Rahmen des Untersuchungsgebietes sollte Gesteine umfassen, die sowohl geklüftet sind als auch ein gewisses Maß an Matrixdurchlässigkeit aufweisen. Die kristallinen Grundgebirge mit ihrer überwiegend nicht vorhandenen oder nur sehr geringen Matrixdurchlässigkeit sind für die Untersuchungen nicht geeignet. Weit verbreitete Gesteinstypen, die die notwendigen Kluft- und Matrixdurchlässigkeiten aufweisen, sind Sand- und Kalksteine. Kalksteine neigen jedoch zu Verkarstungen, welche wiederum ganz wesentlich das Fließverhalten bestimmen und aufgrund ihrer inhomogenen Verteilung nur schwer zu erfassen sind. In Sandsteinen ist dagegen die Verteilung des Kluftraumes mit wesentlich größerer Sicherheit zu erfassen.

Als Untersuchungsgebiet wurde daher ein Buntsandsteinareal im Spessart ausgewählt. Das Einzugsgebiet der Hafenlohr bietet sich dabei für die Untersuchungen an, da aufgrund der Vorerkundungen für eine Trinkwassertalsperre eine breitgefächerte Datenbasis vorhanden ist. Unter anderem liegen Bohrprofile, Ergebnisse hydraulischer Untersuchungen und Wasserstandsmessungen vor. Darüberhinaus kann auf amtliche geologische Karten zurückgegriffen werden (SCHWARZMEIER, 1979, 1980, 1984 und WITTMANN, 1972). Entscheidend für die Auswahl des Untersuchungsgebietes waren letztendlich auch langjährige Wasserstandsmessungen am Pegel Hafenlohr, wovon die Daten vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Gesättigter und ungesättigter Fluss

DARCY (1856) stellte aus Laborversuchen eine empirische Formel für den gesättigten eindimensionalen Fluss auf. Das nach ihm benannte Darcysche Gesetz lautet

$$Q = k_f \cdot I \cdot A. \quad (1)$$

Hierbei ist Q der Durchfluss, A der Durchflussquerschnitt, k_f der Durchlässigkeitsbeiwert und I der hydraulische Gradient. Für den ungesättigten Fluss muss die Gleichung dahingehend geändert werden, dass k_f eine Variable in Abhängigkeit vom Wassergehalt θ darstellt:

$$Q = k_f(\theta) \cdot I \cdot A. \quad (2)$$

Betrachtet man das Problem des Grundwasserflusses räumlich, so muss das Gesetz von der Erhaltung der Masse eingebunden werden. Die Masse der in ein Elementarvolumen einströmenden Flüssigkeit muss gleich der sein, die aus dem Volumen wieder herausströmt. Werden das Gesetz zur Erhaltung der Masse und das DARCY-Gesetz miteinander verknüpft, so ergibt sich unter stationären Bedingungen für den inhomogenen, anisotropen Fall der Ansatz

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{fx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{fy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{fz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0, \quad (3)$$

mit dem Strömungspotential h und den kartesischen Richtungskoordinaten x , y und z .

Unter nichtstationären Bedingungen ist die Gleichung (3) durch eine Funktion für die Speicheränderung zu erweitern. Es ergibt sich daher mit dem spezifischen Speicherkoeffizienten S_0 und der Zeit t die Formulierung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{fx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{fy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{fz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_0 \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (4)$$

Die Speicheränderung kann unter gesättigten Bedingungen in der Regel vernachlässigt werden. Übertragen auf ungesättigte Fließverhältnisse muss statt der Speicheränderung die Änderung des Wassergehaltes pro Zeit berücksichtigt werden. Unter Vernachlässigung der Änderung der Dichte des Wassers und der Porosität folgt die Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_f(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_f(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_f(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (5)$$

Das Strömungspotential h setzt sich für die vertikale z -Richtung aus der Ortshöhe z und der Druckhöhe ψ zusammen. Die Druckhöhe oder das Druckpotential ψ wird für ungesättigte Bedingungen häufig auch als Saugspannung oder Kapillarspannung bezeichnet. Wird die Saugspannung ψ als unabhängige Variable betrachtet und die spezifischen Feuchtekapazität (FREEZE, 1969) oder auch kapillare Speicherkapazität (BUSCH ET AL., 1993) $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ eingeführt, so lautet die Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_f(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_f(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_f(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (6)$$

Für die ungesättigte Strömung genügt in der Regel die Betrachtung des eindimensionalen Falles. Für den eindimensionalen, vertikalen Flusses reduziert sich die Formel zu

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k_f(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (7)$$

Die Gleichung (7) ist als RICHARDS-Gleichung bekannt (RICHARDS, 1931). Sie beschreibt vereinfacht, unter Vernachlässigung der Bodenluft-Bewegung, das Strömungsverhalten von Wasser in der ungesättigten Zone. Für eine exakte Beschreibung der Bodenwasser-Bewegung wäre theoretisch zumindest ein Zwei-Phasen-Modellansatz mit Wasser- und Gasphase erforderlich. In der vorliegenden Untersuchung interessiert jedoch weniger die genaue Beschreibung der Wasserbewegung in kleinem, räumlichem und zeitlichem Massstab, so dass die Vereinfachung hingenommen werden kann. Die zusätzliche Erfassung der Gasphase hätte zudem einem erheblichen mess- und rechentechnischen Mehraufwand erfordert, der in keinem Verhältnis zur Verbesserung der Ergebnisse gestanden hätte. Weitere Voraussetzungen für die Gültigkeit der RICHARDS-Gleichung sind die Berechnung der Fließbewegung nach dem Gesetz von DARCY, eine starre Matrix und isothermaler Fluss. Die analytische Lösung der Gleichung erfordert die Kenntnis der vollständigen $k_f(\psi)$ - und $C(\psi)$ - oder $\theta(\psi)$ -Beziehungen. Da diese in der Regel aber nicht oder nur unvollständig bekannt sind, muss zur Lösung der Gleichung auf numerische Verfahren zurückgegriffen werden.

2.2 Geohydraulische Kenngrößen

Nach der Potentialtheorie läßt sich die Wasserbewegung vereinfacht mit Hilfe des Druckpotentials und des Gravitationspotentials beschreiben. In der ungesättigten Zone entspricht das Druckpotential dem Matrixpotential, in der gesättigten Zone dem durch die überlagernde Wassersäule verursachten hydrostatischen Druck. Das Matrixpotential ist für die Beschreibung der Fließvorgänge in der ungesättigten Zone von entscheidender Bedeutung. Es setzt sich zusammen aus dem Kapillarpotential und dem in der Regel zu vernachlässigenden Adsorptions- und Hydratationspotential. Durch die Kapillarkräfte wird in Hohlräumen Wasser gebunden. In röhrenartigen Hohlräumen ist z.B. die Bindungskraft umso stärker, je kleiner der Durchmesser der Röhren ist.

Die wasserungesättigten Bereiche stellen ein Drei-Phasen-System aus Feststoff, Wasser und Gas (Luft) dar. Wasser wird gegenüber Luft bevorzugt an der Feststoffoberfläche adsorbiert und als benetzende Phase

bezeichnet. Der Kapillardruck ist als Differenz des Drucks in der benetzenden und der nichtbenetzenden Phase (Luft) definiert. Ist die nichtbenetzende Phase drucklos, so herrscht in der benetzenden Phase ein Unterdruck in der Größe des Kapillardrucks (BUSCH ET AL., 1993). Dieser Unterdruck wird als Saugspannung bezeichnet.

2.2.1 Porenraum

Aufbauend auf ältere Methoden nach KOZENY (1927), IRMAY (1954) und CHILDS & COLLIS-GEORGE (1950) hat MUALEM (1976) einen Ansatz zur Berechnung der relativen Durchlässigkeit k_{rel} poröser Gesteine eingeführt. k_{rel} ist dabei der Quotient aus ungesättigtem Durchlässigkeitsbeiwert k_{fu} und gesättigtem Durchlässigkeitsbeiwert k_{fs} .

Die effektive Sättigung Θ errechnet sich aus

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}. \quad (8)$$

Der Wassergehalt θ wird durch die Indizes r für den Restwassergehalt und s für den Wassergehalt bei Sättigung gekennzeichnet. MUALEM (1976) beschreibt die relative Durchlässigkeit k_{rel} in Abhängigkeit von Θ mit der Gleichung

$$k_{rel}(\Theta) = \Theta^\eta \cdot \left[\frac{\int_0^\Theta 1/\psi d\Theta}{\int_0^1 1/\psi d\Theta} \right]^2. \quad (9)$$

Nach der Analyse der Kennwerte von 45 Böden (Literaturdaten) gibt der Autor als besten empirischen Wert für $\eta = 1/2$ an.

Einen verbesserten Ansatz zur Berechnung der ungesättigten Durchlässigkeit auf der Basis der Wassergehalts-Wasserspannungskurve bietet VAN GENUCHTEN (1980). Danach ist es zunächst notwendig die Messwerte für Wassergehalt und Saugspannung als Funktion darzustellen. Die Ausgangsfunktion für ihn bildet die Formel von MUALEM (1976) mit $\eta = 1/2$

$$k_{rel}(\Theta) = \Theta^{1/2} \cdot \left[\frac{\int_0^\Theta 1/\psi(x) dx}{\int_0^1 1/\psi(x) dx} \right]^2. \quad (10)$$

Zur Lösung der Gleichung schlägt der Autor eine allgemeine Gleichung für $\Theta(\psi)$ -Funktionen mit

$$\Theta(\psi) = [1/(1 + (\alpha\psi)^n)]^m \quad (11)$$

vor, wobei α , n und m noch zu bestimmende Kenngrößen sind.

Aus den Gleichungen (8) und (11) errechnet sich dann der Wassergehalt bei einer gegebenen Saugspannung wie folgt:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s + \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}. \quad (12)$$

Aus dieser Gleichung und der Voraussetzung, dass

$$m = 1 - 1/n \quad (13)$$

$$(0 < m < 1) \quad (14)$$

erhält VAN GENUCHTEN

$$k_{rel}(\Theta) = \Theta^{1/2} \cdot [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (15)$$

und

$$k_{rel}(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}. \quad (16)$$

Die vier unabhängige Kenngrößen θ_s , θ_r , α und n aus den obigen Gleichungen können aus den Bodenwasserrückhaltdateen ermittelt werden. Der gesättigte Wassergehalt θ_s läßt sich praktisch immer bestimmen. Der Restwassergehalt θ_r kann experimentell nur unter hohem Aufwand ermittelt werden. Er kann allerdings auch durch Extrapolation der Wasserrückhaltkurve angenähert werden. Unter der Annahme, dass θ_s und θ_r hinreichend genau bekannt sind, lassen sich m und α aus der Steigung von Θ bezüglich $\log \psi$ ermitteln (VAN GENUCHTEN, 1980). Mit geringem Aufwand können die Kenngrößen mittels Kurvenanpassung der Messdaten an die Gleichung (12) berechnet werden. Dazu werden Algorithmen bzw. Computerprogramme benötigt, die Kurvenanpassungen mit frei wählbaren Gleichungen ermöglichen (s. z.B. LAHANN & RYBACZOK, 1993).

2.2.2 Klufttraum

Das Fließverhalten innerhalb einer Kluft wird im wesentlichen von den kluftspezifischen Faktoren Öffnungsweite, Fließwege und Kluftfüllungen bestimmt. Für den Klufttraum sind ferner die Kluftabstände von Bedeutung.

Die Öffnungsweiten innerhalb einer natürlichen Kluft variieren von einem Maximalwert bis zum Kontakt der benachbarten Kluftwände. Die Verteilungsfunktion der Kluftöffnungsweiten ähneln in der Regel einer

logarithmischen Verteilung (SHARP, 1970 in PETERS & KLAVETTER, 1988). Die Kluftöffnungsverteilung bewirkt eine deutliche Differenzierung der Fließwege innerhalb einer Kluft (s. Abb. 1). Unter gesättigten Bedingungen dominiert der Fluss in den Bereichen mit den größten Öffnungsweiten. Die Faktoren, die in die Öffnungsverteilung und die Verteilung der Fließwege eingehen, sind von der Entstehungsgeschichte des Kluftsystems abhängig. So ist u.a. zu berücksichtigen, ob es sich um Dehnungs- oder Versatzklüfte handelt oder ob durch spätere Ablagerung von Kluftbelägen die Öffnungsweiten verringert worden sind.

Auch für die Häufigkeitsverteilung der Öffnungsweiten der Gesamtheit aller Klüfte innerhalb eines Gesteinsblockes kann nach SNOW (1970) und LONG ET AL. (1982) eine Lognormal-Verteilung angenommen werden.

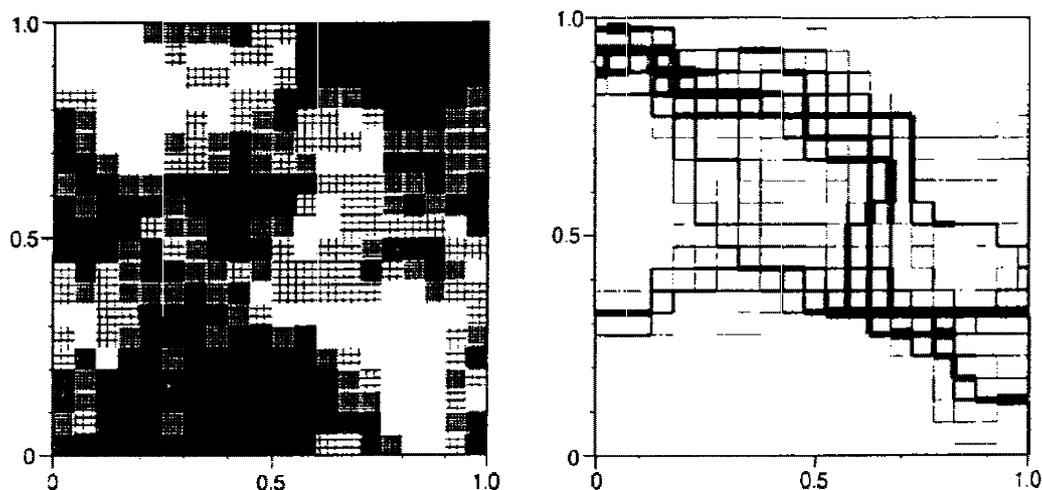


Abbildung 1: Öffnungsweiten und davon abhängige Fließwege in einer Kluft. Die Schattierungen kennzeichnen unterschiedliche Öffnungsweiten von kleinen Werten (dunkel) bis zu großen (hell) (aus: MORENO ET AL., 1988).

Durch Kluftfüllungen wird die Wasserwegsamkeit in Klüften reduziert. Die Abnahme der Wasserwegsamkeit ist dabei abhängig von der Art der Füllung. Es ist zu unterscheiden zwischen Kluftbestegen, wie sie durch Lösungsabscheidungen entstehen und Füllungen mit Lockermaterial.

Zur quantitativen Beschreibung der Strömungs- und Sickervorgänge im Klufttraum sind nach WANG & NARASIMHAN (1985) die Beziehungen Saugspannung–Kluftöffnung und Saugspannung–Kluftdurchlässigkeit sowie der wassergesättigte Anteil innerhalb der Klüfte von Bedeutung.

Nach der Kapillarthorie besteht für den Porenraum ein enger Zusammenhang zwischen der Porengröße und der Saugspannung unter Gleichgewichtsbedingungen. Im Vergleich dazu steht für Klüfte die Abhängigkeit zwischen Kluftöffnungsweite und Saugspannung. Ähnlich wie röhrenförmige Kanäle mit kleinen Durchmessern, erzeugen Klüfte mit geringen Öffnungsweiten höhere Kapillarkräfte als Klüfte mit großen Öffnungsweiten. Klüfte mit geringen Öffnungsweiten können also bei größeren Saugspannungen mehr Wasser zurückhalten. Die kapillare Steighöhe innerhalb einer Kluft ist von entscheidender Bedeutung für den Wassergehalt unter bestimmten Saugspannungsverhältnissen. Sie bestimmt die Saug-

spannung, bei der die Kluft entwässert wird. Die kapillare Steighöhe für eine idealisierte, parallel-plattige, glattwandige Kluft mit der Öffnungsweite b berechnet sich zu

$$h_{kap} = \frac{2\gamma \cos \lambda}{g\rho b}, \quad (17)$$

mit der Erdbeschleunigung g , der Dichte ρ , der Oberflächenspannung γ und dem Benetzungswinkel λ der Flüssigkeit. Der Benetzungswinkel beträgt für vollständig benetzende Flüssigkeiten $\lambda = 0^\circ$. Für Wasser kann dieser Wert als gute Näherung angenommen werden.

Diese idealisierten Bedingungen können für natürliche Klüfte nur unter Vorbehalt angewendet werden. Tatsächlich sind Klüfte im allgemeinen nicht parallel-plattig und glattwandig, sondern tektonischen Spannungen ausgesetzt und weisen unterschiedliche Öffnungsweiten, Unebenheiten sowie Kontaktstellen zwischen den Kluftflächen auf. Der Anteil der Kontaktfläche ω an der Gesamtfläche der Kluft unter beliebigem, tektonischem Stress beträgt nach WANG & NARASIMHAN (1985)

$$\omega = \int_0^{b_c} f(b_0) db_0. \quad (18)$$

Hierbei ist $f(b_0)$ die Verteilungsfunktion der Kluftöffnungen wenn kein tektonischer Stress vorliegt und b_c die Grenzkontakt-Öffnungsweite. Kluftflächenanteile mit Öffnungsweiten, die ohne tektonischen Stress bereits kleiner sind als b_c , sind dann unter tektonischen Spannungen in Kontakt. Folglich beträgt die Öffnungsweite der verbliebenen, offenen Anteile unter tektonischem Stress $b = b_0 - b_c$.

Innerhalb einer Kluft gibt es Bereiche, an denen sich die Kluftwände berühren. Dort, wo die Kluft offen ist, variieren die Öffnungsweiten. Bei steigenden Saugspannungen werden die Bereiche der größeren Öffnungsweiten zuerst entwässert. Somit entstehen Lufteinschlüsse, die zunächst inselartig in noch wassergesättigter Umgebung liegen. Sowohl die Kontaktstellen als auch die wasserungesättigten Bereiche bewirken eine Tortuosität der Fließwege.

Die Tortuosität sowie die Nichtparallelität der Fließwege haben wiederum eine Verringerung der Durchlässigkeit zur Folge. Für Klüfte mit hohem Kontaktanteil wird die Durchlässigkeit nach dem kubischen Fließgesetz zu hoch angesetzt (TSANG, 1984). Bei geringem Kontaktanteil kann das Gesetz jedoch als gute Näherung gelten, da Untersuchungen von TSANG (1984) erst ab Kontaktanteilen von 30% eine Verringerung der Flussmenge um zwei Größenordnungen zeigten. WANG & NARASIMHAN (1985) nehmen an, dass der Effekt der Tortuosität durch Lufteinschlüsse stärker ist als durch Kontaktflächenanteile. Im gesättigten Zustand genügt also das kubische Gesetz zur Beschreibung des Flusses.

Als Maß für die Fähigkeit der Flüssigkeit eine durchgehende Phase zwischen den Kontaktstellen der Kluft zu bilden, führen WANG & NARASIMHAN die Größe τ ein. Diese Kenngröße steht in direkter geometrischer Beziehung zu den Flächenanteilen σ einer Kluft, die von Wasser oder Kontaktflächen belegt sind.

$$\tau + (1 + \tau^2) \cdot \left[\frac{\pi}{4} - \tan^{-1}(\tau) \right] = \sigma \quad (19)$$

An diesen Stellen kann zwischen benachbarten Gesteinsblöcken über die Kluft Wassertransport stattfinden.

Nach diesen Überlegungen bieten WANG & NARASIMHAN Lösungsmöglichkeiten für die relative Durchlässigkeit k_{rel} , die Sättigung Θ sowie den effektive Flächenanteil σ für den Kluft-Matrix-Fluss in Abhängigkeit von der Saugspannung ψ . Für die Öffnungsverteilung der Gesamtheit der Klüfte nehmen die beiden Autoren eine logarithmische Verteilung (s. o. SNOW, 1970) mit der Kenngröße β an.

$$k_{rel}(\psi) = \tau \frac{1}{6(4 + \beta b_c)} \{ [24 - e^{-\beta b_s} (24 + 24\beta b_s + 12\beta^2 b_s^2 + 4\beta^3 b_s^3 + \beta^4 b_s^4)] + \beta b_c [6 - e^{\beta b_s} (6 + 6\beta b_s + 3\beta^2 b_s^2 + \beta^3 b_s^3)] \} \quad (20)$$

$$\Theta(\psi) = \frac{1}{2 + \beta b_c} \left\{ [2 - e^{-\beta b_s} (2 + 2\beta b_s + \beta^2 b_s^2)] + \beta b_c [1 - e^{-\beta b_s} (1 + \beta b_s)] \right\} \quad (21)$$

$$\sigma(\psi) = 1 - e^{-\beta b_c - \beta b_s} (1 + \beta b_c + \beta b_s) \quad (22)$$

Hierbei kann b_s als Entwässerungs-Öffnungsweite bezeichnet werden. Klüfte mit Öffnungsweiten größer als b_s sind bei einem Saugspannungspotential ψ entwässert. Durch Umformen der Gleichung (17) erhält man

$$b_s = - \frac{2\gamma \cos \lambda}{g\rho(\psi)}. \quad (23)$$

Für den Kontaktflächenanteil ω , d.h. ohne wassergesättigte Bereiche, gilt außerdem

$$\omega = 1 - e^{-\beta b_c} (1 + \beta b_c). \quad (24)$$

Gemäß den Gleichungen (20) bis (24) lassen sich die relative Durchlässigkeit, die Sättigung und der Wert ω für eine Kluftechar berechnen. Mit dem Kontaktflächenanteil ω gelangt man umgekehrt über Gleichung (24) zu βb_c und in der Folge mit

$$\beta^3 = \frac{(4 + \beta b_c) e^{-\beta b_c}}{dK_s}. \quad (25)$$

zu β , wobei d der Kluftabstand und K_s die gesättigte Kluftpermeabilität sind. Die Werte für σ und τ lassen sich dann aus Gleichung (22) und (19) berechnen.

Mit Kenntnis des Anteils der Kluftechar an der Gesamtdurchlässigkeit des Kluftraums und am Gesamtkluftraum lassen sich die Gleichungen auf ein Kluftechar übertragen, dass sich aus mehreren Kluftechar unterschiedlicher Charakteristik zusammensetzt.

Der Wassergehalt wird als relative Sättigung berechnet mit $\Theta = 1$ bei Vollsättigung und $\Theta = 0$ bei Restsättigung. Die Sättigung kann aber leicht in Absolutwerte für den Wassergehalt übertragen werden, da in einer Kluft ohne Füllung eine Sättigung von $\Theta = 1$ einem Wassergehalt von $\theta = 100\%$ und eine Sättigung von $\Theta = 0$ einem Wassergehalt von $\theta \approx 0\%$ entspricht.

2.3 Kombiniertes Fließverhalten in geklüfteten, porösen Medien

In geklüfteten, porösen Medien legen die Kapillarkräfte die Fließwege für die Wasserbewegung im Gestein fest; die Fließwege sind somit vom Gesamtwassergehalt abhängig.

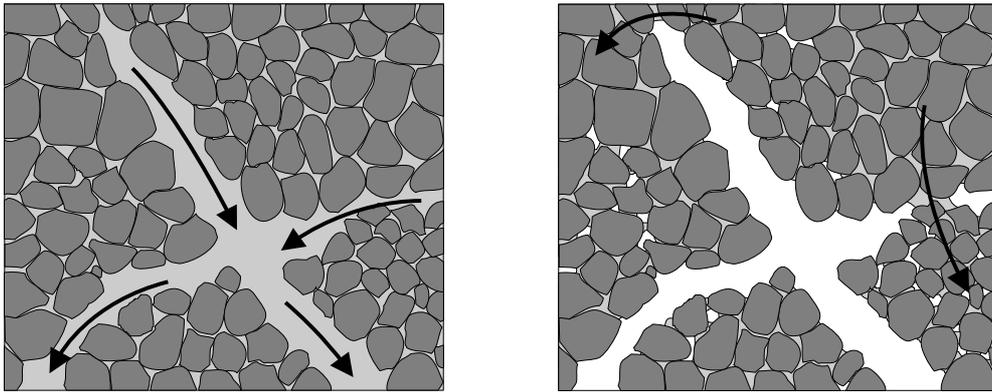


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Fließverhaltens in einem Festgesteinsblock bei Sättigung (links) und bei abnehmendem Wassergehalt (rechts).

Das Beispiel in Abbildung 2 zeigt eine poröse Gesteinsmatrix und ein offenes Klufsystem. Im gesättigten Zustand (Abbildung links) bewegt sich das Wasser aufgrund der sehr viel höheren Durchlässigkeit fast ausschließlich auf den Klüften. Sinkt der Wassergehalt des Gesteinsblockes, so werden zunächst die Klüfte mit größeren Öffnungsweiten entwässert. Die Kapillarspannung bedingt einen Rückhalt des Wassers in den kleinen Porenräumen und in den Kluftbereichen mit geringeren Öffnungsweiten. Nur in diesen noch gesättigten Bereichen kann es zum Wasserfluss kommen. Hingegen setzt die relativ kontinuierliche Gasphase in der Kluft dem Wasserfluss einen praktische unendlichen Widerstand parallel zur Kluft entgegen (Tortuosität der Lufteinschlüsse). Lediglich auf den Kluftwänden hält sich durch Adsorptionskräfte ein dünner Wasserfilm der bei entsprechender Dicke als Fließbahn dienen kann.

Die Durchlässigkeit der Klüfte fällt mit der Entwässerung sehr schnell ab und unterschreitet die Durchlässigkeit der Matrix, die durch die großen Kapillarspannungen im (teil-)gesättigten Zustand verbleibt. Das Wasser bewegt sich bei ungesättigten Verhältnissen weitgehend in der porösen Matrix. Die Vorgänge lassen sich gut mit der Wasserbewegung in Böden mit Micro- und Macroporen vergleichen. BEVEN & GERMANN (1982) belegen die Bedeutung von Macroporen für die Wasserbewegung im Boden. Bei geringen Niederschlagsraten wird das Wasser an der Oberfläche durch die Microporen absorbiert. Ein vertikaler Fluss in den Macroporen findet erst statt, wenn der Niederschlag die Infiltrationsrate der Matrix übersteigt.

Eine natürliche Kluft besitzt kaum konstante Öffnungsweiten über die gesamte Kluftfläche. Die Öffnungsweite variiert von einem Maximalwert bis zum Wert Null an Kontaktstellen. An derartigen Engstellen und Kontaktstellen der Klüfte können sich Wasserbrücken bilden, über die der Transport zwischen den Matrixblöcken über eine Kluft stattfindet.

2.4 Poren-Kluft-Modellansatz

Die Untersuchung des ungesättigten Fließverhaltens in geklüfteten, porösen Medien erfordert die Berücksichtigung sowohl des Kluft- als auch des Porenraumes. Für den hydrogeologischen Modellansatz stehen dabei mehrere Möglichkeiten für die Kombination von Kluft und Matrix zur Verfügung.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Matrix als Kontinuum zu behandeln und die Klüfte als diskrete Elemente in dieses Kontinuum einzubinden. Dieser Ansatz eignet sich jedoch nur für grundsätzliche Überlegungen im kleinen Maßstab. Die diskrete Beschreibung der Flächenelemente erfordert die Kenntnis von Lage und Ausdehnung aller Klüfte im Untersuchungsraum, was in der Praxis bei größeren Untersuchungsgebieten nicht zu bewerkstelligen ist. Bei der Anwendung numerischer Modelltechniken erfordert diese Methode einen nicht unerheblichen Aufwand an Rechen- und Speicherkapazität.

Eine weitere Methode besteht darin, den geklüfteten Fels analog zum Porenraum durch ein äquivalentes Kontinuum zu ersetzen. Dieser Vergleich des Klufttraumes mit einem Kontinuum läßt sich nach LONG ET AL. (1982) umso eher durchführen je dichter die Klüfte auftreten, je konstanter die Kluftöffnungsweiten sind, je willkürlicher die Klüfte orientiert sind und je größer das untersuchte Gebiet ist. Es muss gewährleistet sein, dass sich der Kluftraum als repräsentatives Elementarvolumen (REV) darstellen läßt. Nach KRÖHN & ZIELKE (1991) lassen sich Netzwerke, die aus Klüften vergleichbarer Größenordnung zusammengesetzt sind dann in ein Kontinuum überführen, wenn die Klüfte hinreichend miteinander verknüpft sind.

Die äquivalenten Kontinua der Gesteinsmatrix und des Klufttraumes können über Austauschfaktoren zu einem Zwei-Porositäts-Modell (double-porosity-model) gekoppelt werden. Dieses Modell wurde von BARENBLATT ET AL. (1960) entwickelt und fand zunächst in der Erdölindustrie Anwendung, u.a. für die Auswertung von Pumpversuchen (WARREN & ROOT, 1963). Nach BARENBLATT ET AL. ist die primäre Porosität der Gesteinsmatrix gekennzeichnet durch hohes Speichervermögen und geringe Durchlässigkeit, wogegen die sekundäre Porosität der Klüfte geringes Speichervermögen und eine hohe Durchlässigkeit aufweist. Eine zusammenfassende Darstellung der verschiedenen Modellvorstellungen geben KRÖHN & ZIELKE (1991).

Eine Kombination der Methode der diskreten Klüfte mit dem Zwei-Porositäts-Modell wird von HUBER (1992) angewendet. Er behandelt große Klüfte parallel zu kartierten Störungen als diskrete Elemente. Den Gesteinsblöcken zwischen den diskreten Klüften ordnet er jeweils eine Porosität für den Kluftraum und die Matrix zu.

In einem teilgesättigten, geklüfteten, porösen Medium liefert nach PRUESS ET AL. (1985) die Modellierung mit einem einzigen, aus Kluft- und Matrixporosität zusammengesetzten Kontinuum („equivalent single continuum model“) gute Ergebnisse. Bei hohen Durchflussraten werden allerdings die Fließgeschwindigkeiten in den Klüften unterschätzt. Außerdem liefert dieses Modell keine Aussagen über den Kluft-Matrix-Fluss. Das äquivalente Kontinuum des Klufttraums leiten die Autoren aus einem diskreten Kluftmodell ab. WANG & NARASIMHAN (1985) zeigen, dass bei vertikalem Fluss der Druck senkrecht zur Fließrichtung in der Matrix und in den vertikalen Klüften ungefähr gleich ist. Nach PETERS & KLAVETTER (1988) ist der Druck in Kluft und Matrix fast immer annähernd gleich. Nur bei hohem Fluss kommt es an der Sickerfront in der Kluft, dort wo das Wasser von der Kluft in die Matrix fließt, zu Diskontinuitäten. Wenn allerdings der Zeit- und Ortsmaßstab der Wasserbewegung an dieser Sickerfront klein ist im Vergleich zum Gesamtmaßstab des Untersuchungsraumes, dann kann dieser Vorgang als Schockwelle beschrieben werden, indem $\psi_K = \psi_M$ gesetzt wird. Auch WANG & NARASIMHAN (1986, zit. in NITAO & BUSCHECK, 1991) und KLAVETTER & PETERS (1988) wenden das „equivalent continuum modell“ (ECM) an. Die Autoren setzen dabei ein Gleichgewicht der Saugspannungen in Kluft und Matrix voraus, d.h. nennenswerte Mengen Wasser können nicht in der Kluft bleiben, solange die Matrix nicht annähernd gesättigt ist. Für die von ihnen untersuchten geklüfteten, porösen Tuffe haben WANG & NARASIMHAN festgestellt, dass ohne Berücksichtigung der Klüfte modelliert werden kann, wenn der Übergang von gesättigten zu teilgesättigten Bedingungen außer Betracht bleibt. Vor allem bei hohen Durchflussraten kann nach NITAO & BUSCHECK (1991) dennoch bereits ein weitgehender Fluss in der Kluft stattfinden, ohne dass die Bedingungen für ein ECM erfüllt sind.

2.5 Numerischer Ansatz der Strömungsgleichung

Die RICHARDS-Gleichung zur Beschreibung der ungesättigten, vertikalen Strömung (s. Kap. 2.1) gehört zum Typ der parabolischen, partiellen Differentialgleichungen (PDGL) und ist hochgradig nichtlinear. Die hochgradige Nichtlinearität ist vor allem in den Abhängigkeiten der Durchlässigkeit und der kapillaren Speicherkapazität von der Saugspannung, bzw. vom Wassergehalt begründet. Die Durchlässigkeit muss dabei aus noch nicht bekannten Werten für Saugspannung oder Wassergehalt berechnet werden. Analytische Lösungen der Gleichung sind erst mit einschneidenden Approximationen möglich (BUSCH ET AL., 1993). Eine Lösung soll daher auf dem numerischen Weg erreicht werden.

Für die Lösung der RICHARDS-Gleichung empfiehlt sich ein iteratives, numerisch formuliertes Lösungsschema. Iterative Techniken haben gegenüber direkten Lösungsverfahren den Vorteil, dass sie bei jeder Iteration eine Neuberechnung der Terme erlauben, die Funktionen der abhängigen Variablen sind.

Nach BUSCH ET AL. (1993) kann für die Strömungsgleichung folgender allgemeiner Ansatz formuliert werden:

$$\begin{aligned} (1 - \zeta) [\text{div}(CR\text{grad}\psi) + CW]^t + \zeta [\text{div}(CR\text{grad}\psi) + CW]^{t+\Delta t} \\ = \left[(1 - \zeta)CS^t + \zeta CS^{t+\Delta t} \right] (\psi^{t+\Delta t} - \psi^t) / \Delta t, \end{aligned} \quad (26)$$

wobei ζ den Gewichtungsfaktor für die Zeitebene symbolisiert. Je nach Wahl von ζ werden die Diskretisierungsschemata als explizit ($\zeta = 0$), CRANK-NICHOLSON ($\zeta = 1/2$) oder implizit ($\zeta = 1$) bezeichnet. *CR*, *CS* und *CW* stellen jeweils den Durchlässigkeits-, Speicher- und Quell- bzw. Senkenterm dar.

Wegen ihrer nichtlinearen Beziehung zur Saugspannung ψ müssen die Werte von k_f und C aus Gleichung (7) für $\zeta > 0$ iteriert oder entlang der Zeitachse extrapoliert werden. Um dies zu vermeiden, empfehlen BUSCH ET AL. (1993) den Ansatz von DOUGLAS & JONES (1963) zur Lösung des Gleichungssystems. Auch nach BABAJIMOPOULOS (1991) ist diese, auch Predictor-Corrector-Verfahren genannte Methode, bei der Simulation des eindimensionalen, ungesättigten Flusses sehr effektiv.

Der Ansatz erfordert einen Prognose- und einen Korrekturschritt. Im Prognoseschritt wird die Gleichung (26) implizit ($\zeta = 1$) für eine halben Zeitschritt $t + \Delta t/2$ gelöst. Die nichtlinearen Kenngrößen k_f und C werden aus dem Zeitschritt t abgeleitet. Das Ergebnis ist die Lösungsfunktion zum Zeitpunkt $t + \Delta t/2$, die nur für die Prognose der nichtlinearen Kenngrößen bei der Lösung des Korrekturschrittes verwendet wird. Aus dem Prognoseschritt folgt noch nicht die Lösungsfunktion für die Modellierung der Sickerwasserbewegung. Der Korrektur-Schritt wird nach dem CRANK-NICHOLSON-SCHEMA ($\zeta = 1/2$) für den vollen Zeitschritt $t + \Delta t$ gelöst. Der Kenngrößensatz zu k_f und C sowie der Quell-/Senkenterm werden aus dem Zeitschritt $t + \Delta t/2$ abgeleitet. Das Ergebnis ist die gesuchte Lösungsfunktion zum Zeitpunkt $t + \Delta t$.

Sowohl Prognose- als auch der Korrekturschritt bilden eine Matrix mit einem tridiagonalen Gleichungssystem, das mit Hilfe des THOMAS-Algorithmus sehr effizient gelöst werden kann (REMSON ET AL., 1971).

Für die RICHARDS-Gleichung kann die Durchlässigkeit k_f in Abhängigkeit vom Wassergehalt als $k_f(\theta)$ oder von der Saugspannung als $k_f(\psi)$ dargestellt werden. Die $k_f(\theta)$ -Formulierung hat den Vorteil, dass sie nicht hysteretisch ist; die Abhängigkeit $k_f(\psi)$ ist dagegen deutlich hysteretisch. Eine deutliche Hysterese zeigt auch die Beziehung $\psi(\theta)$. Die Hysterese hat ihre Ursache in dem unterschiedlichen Verlauf der Saugspannungskurve beim Be- und Entwässerungsvorgang. So kann es bei der Bewässerung zu Lufteinschlüssen kommen, die zunächst eine geringere Porosität vortäuschen können und die erst mit der Zeit ausgetrieben werden. Darüberhinaus haben die Wassermenisken gegenüber der festen Phase verschiedene Benetzungswinkel, je nachdem, ob die Wasserfront im Vorrücken oder im Rückzug ist. Dabei ist in der Regel der Vorrückwinkel größer als der Rückzugswinkel (WOLF, 1957 in HARTGE & HORN, 1991). Im allgemeinen ist die Saugspannungskurve für den Entwässerungsvorgang experimentell wesentlich leichter zu bestimmen als für den Bewässerungsvorgang.

In der Theorie wirkt sich die Hysterese stärker aus als in der praktischen Anwendung, da sich die Saugspannungen unter natürlichen Verhältnissen meist in einem relativ engen Schwankungsbereich bewegen und somit lediglich Teilbe- und Teilentwässerungen nach sich ziehen. Die Differenzen innerhalb der Hystereseschleifen sind dann geringer als bei vollständiger Be- und Entwässerung.

Die Formulierung der RICHARDS-Gleichung in Abhängigkeit von der Saugspannung bietet entscheidende Vorteile. Bei einer Zusammensetzung eines Bodenprofils aus unterschiedlichen Boden- und Gesteinstypen ist durch die Formulierung in Abhängigkeit von der Saugspannung ein kontinuierlicher Übergang der unabhängigen Variablen gewährleistet, da das Gesamtpotential und somit auch die Saugspannung bzw.

die hydraulische Druckhöhe bestrebt sind, ein Gleichgewicht einzustellen. Dagegen kann es bei den Wassergehalten zu erheblichen Diskontinuitäten kommen, die zu Problemen bei der Stabilität numerischer Berechnungen führen können. Auch der Übergang von gesättigten in teilgesättigte Bereiche ist nur mit der Formulierung in Abhängigkeit von der Saugspannung sinnvoll beschreibbar. Schließlich bietet diese Formulierung auch Vorteile bei der Vorgabe der oberen und unteren Randbedingung. So kann z.B. die untere Berandung dann auch unter dem Grundwasserspiegel liegen (s. BUSCH ET AL., 1993).

3 Methodische Grundlagen

Zur Berechnung der Wassergehalts-Saugspannungs-Durchlässigkeits-Beziehungen sind für den Poren- und den Kluftraum zunächst einige Ausgangskenngrößen zu ermitteln. Die Ansätze nach VAN GENUCHTEN (1980) für den Porenraum erfordern Werte für den Wassergehalt bei Sättigung θ_s , den Restwassergehalt θ_r , die gesättigte Porendurchlässigkeit k_{fs} sowie die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung. Für den Kluftraum wiederum sind nach WANG & NARASIMHAN (1985) Daten zum Abstand, Öffnungsweite und Kontaktflächenanteil der Klüfte sowie zur Durchlässigkeit des Klufttraumes notwendig. Die Kenngrößen für den Porenraum können im Labor bestimmt werden. Für den Kluftraum lassen sich die notwendigen Daten durch Aufnahme des Kluftinventars im Gelände ermitteln.

3.1 Geländemessungen

Die Geländemessungen beschränkten sich auf die Aufnahme des Kluftinventars in natürlichen und künstlichen Oberflächenaufschlüssen. Die **Kluftabstände** konnten entweder direkt eingemessen werden oder wurden aus der Kluftdichte entlang einer gedachten Messstrecke ermittelt. Sofern die Aufschlussverhältnisse es erlaubten, wurden die Messungen der Kluftabstände zumindest in zwei Richtungen durchgeführt, um möglichst alle Kluftsysteme zu erfassen. Die **Kluftöffnungsweiten** wurden mit einem Maßstab oder einer Fühlerlehre gemessen. Hier wurden ebenfalls, wenn vorhanden, mindestens zwei Aufschlusswände berücksichtigt. Die **Oberflächenbeschaffenheit** der Kluftflächen wurde visuell erfasst, wobei zwischen einer Unebenheit der Kluftfläche und einer Rauigkeit im Korngrößenmaßstab unterschieden wurde. Beide Kategorien der Oberflächenbeschaffenheit wurden jeweils in drei Stufen eingeteilt. **Kluftfüllung**, **Kluftbelag** und **Kontaktflächenanteil** wurden ebenfalls nach Augenschein beurteilt und geschätzt. Am schwierigsten ist dabei die Bestimmung des **Kontaktflächenanteils**. Der Anteil der Kontaktstellen auf einer Kluftfläche wird beeinflusst von der Öffnungsweite der Kluft, von einem eventuell vorhandenen Kluftbelag, der Oberflächenrauigkeit der Kluftflächen, dem Versatz der Gesteinsblöcke entlang der Kluft und dem Durchtrennungsgrad. Oftmals empfiehlt sich eine zusätzliche Erfassung der Kluftorientierung. Damit können durch tektonische Analysen Hinweise gewonnen werden, ob und inwieweit die an der Oberfläche ermittelten Kenngrößen in die Tiefe übertragbar sind. Für die tektonische Analyse wurden die **Streich- und Fallwerte** der Klüfte mit einem Gefügekompass gemessen. Die Anzahl der durchgeführten Messungen war abhängig von der Qualität und der Größe der Aufschlüsse.

Für die Aufnahme und Charakterisierung des **Terminationsverhaltens** (Durchtrennungsgrad) von Klüften findet sich in HUBER (1992) eine Beschreibung in Anlehnung an ISRM (1977). HUBER unterscheidet zwischen horizontalem und vertikalem Terminationsverhalten. Das horizontale Terminationsverhalten wird nach dem Typus der Kluftenden unterschieden, nämlich beidseitiges Auslaufen der Klüfte und Absetzen an einer oder an zwei Gegenklüften. Die Klassifikation des vertikalen Terminationsverhaltens unterscheidet nach der Durchtrennung einer Gesteinsbank, mehrerer Gesteinsbänke und der gesamten Steinbruchwand.

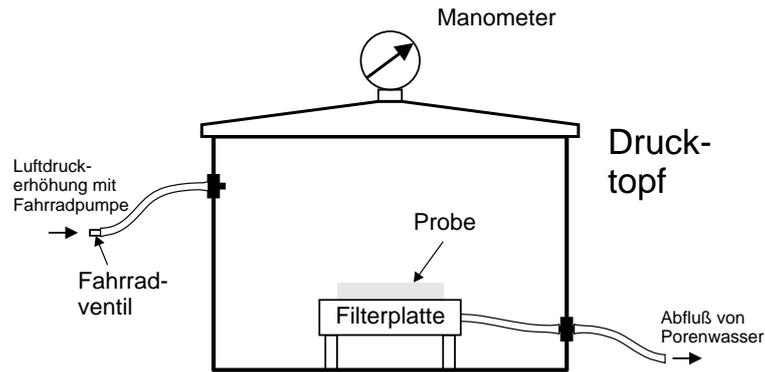


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung mittels eines Drucktopfes.

3.2 Labormessungen

Das Probenmaterial für die Labormessungen wurde in den gleichen Aufschlüssen gewonnen, in denen das Kluftinventar aufgenommen wurde.

Der **gesättigte Wassergehalt** der Gesteinsproben wurde gravimetrisch bestimmt. Zunächst wurden die Proben in gesättigtem Zustand gewogen, danach bei 105°C getrocknet und anschließend nochmals gewogen. Bei dem gegebenen Volumen der Proben und bekannter Dichte des Wassers läßt sich aus der Differenz der beiden Wägungen der effektive Porenanteil berechnen. Dieser kann näherungsweise dem gesättigten Wassergehalt gleichgesetzt werden.

Die **gesättigte Gesteinsdurchlässigkeit** wurde an Gesteinszylindern mit einer DARCY-Apparatur nach UDLUFT (1974) gemessen. Da im Untersuchungsgebiet die Schichtlagerung durchgehend fast horizontal ist und nur die vertikale Durchlässigkeit betrachtet werden muss, genügte es, die Gesteinsdurchlässigkeit senkrecht zur Schichtung zu messen. Die DARCY-Apparatur ermöglicht die Durchlässigkeit bei unterschiedlichen Durchströmungsdrücken zu messen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden Drücke zwischen 0,5 und 3,5 bar angelegt.

Für die Ermittlung der **Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung** sollten die Labormessungen stufenweise zumindest bis zu einem Saugspannungsbereich von 100 kPa möglich sein. Dazu wurde ein Drucktopf (Schnellkochtopf) zur Anwendung der Druckluftmethode nach HARTGE & HORN (1991) umgebaut (s. Abb. 3). Die Proben wurden in gesättigtem Zustand eingebaut und der Druck im Drucktopf mittels einer Fahrradpumpe stufenweise auf maximal 110 kPa (≈ 11 mWS) erhöht. Um Verdunstungseffekte so gering wie möglich zu halten, wurde die Messeinrichtung in einem Kühlraum mit konstant 10°C aufgebaut. Jede Druckstufe wurde solange beibehalten bis keine Veränderung im Wassergehalt der Probe mehr zu beobachten war. Der Wassergehalt wurde wegen der größeren Genauigkeit nicht volumetrisch sondern gravimetrisch, wie beim gesättigten Wassergehalt bestimmt. Der Restwassergehalt θ_r läßt sich auf diese Weise nicht direkt ermitteln, da die notwendig hohen Saugspannungen nicht mehr angelegt werden können. Aus den Ergebnisse der Wassergehalts-Saugspannungs-Kurve kann θ_r jedoch durch nichtlineare Regression auf Grundlage der Gleichung (12) mit recht guter Näherung angegeben werden.

4 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

4.1 Geographische Lage und Geomorphologie des Untersuchungsgebietes

Das oberirdische Einzugsgebiet der Hafenlohr (Messstelle Hafenlohr, Nr. 245620 00, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft) stellt das Untersuchungsgebiet dar (s. Anl. 1). Es wurde anhand morphologischer Kriterien abgegrenzt und umfasst eine Fläche von 146,52 km². Das Untersuchungsgebiet liegt an der Ostflanke des Spessarts. Die Hafenlohr entspringt bei Rothenbuch im zentralen Spessart und mündet bei der Ortschaft Hafenlohr, etwa 2,5 km nördlich von Marktheidenfeld, in den Main. Am Oberlauf wird das Einzugsgebiet der Hafenlohr durch den Zufluss des Steinbaches um ein Seitental nach Süden erweitert. Am Mittellauf fließen nur Bäche von den Hängen des Haupttales zu. Kurz vor der Einmündung in den Main erhält die Hafenlohr Zulauf aus Süden durch den Wagenbach. Der Wagenbach fasst die Zuflüsse von Heinrichsbach, Krebsbach und Esselbach zusammen. Die Einzugsgebiete dieser Bäche vergrößern somit das der Hafenlohr nach Südwesten bis etwa Bischbrunn.

Wie der gesamte Spessart weist das Hafenlohrtal ein deutliches Relief auf. Der Geiersberg an der oberirdischen Wasserscheide zum Haslochbach stellt mit 586 NN+m die höchste Erhebung und der Main mit etwa 142 NN+m die Tiefenlinie im Untersuchungsgebiet dar. Das Einzugsgebiet der Hafenlohr ist größtenteils bewaldet, nur Teile am Unterlauf und des Talgrundes selbst sowie ausgeholzte Areale um Weibersbrunn, Rothenbuch, Esselbach und Bischbrunn sind waldfrei.

4.2 Geologischer Überblick

Im Untersuchungsgebiet tritt die obere Hälfte des Unteren Buntsandsteins, der Mittlere und der Obere Buntsandstein zutage. Hinzu kommen noch geringmächtige, quartäre Ablagerungen aus überwiegend Löss, Lösslehm und Talaue. Den geologischen Rahmen für das Untersuchungsgebiet bildet die SE-Abdachung der Spessart-Rhön-Schwelle. Die großtektonische Lagerung bedingt, dass die an der Oberfläche austreichenden Gesteine von Nordwesten nach Südosten immer jünger werden. Die tiefste Schichtlagerung wird im Südosten in der Zellinger Mulde, bzw. einer Spezialmulde der Zellinger Mulde, dem Tiefenthaler Tief erreicht. Nach BGLA (1981) weist die Spessart-Rhön-Schwelle unter dem Buntsandstein tonig-mergelig und kalkig ausgebildeten Zechstein in reduzierter Mächtigkeit (0–100 m) auf. Unter dem Zechstein ist nach EINSELE ET AL. (1978) mit tonig-sandigem Rotliegenden über kristallinem Grundgebirge zu rechnen. Die Mächtigkeiten der im Untersuchungsgebiet anstehenden Schichtglieder des Buntsandsteins können der Tabelle 1 entnommen werden.

Die Gesteinsbeschreibungen im folgenden Text sind aus SCHWARZMEIER (1979, 1980, 1984) und WITTMANN (1972) zusammengefasst. Die geologische Übersichtskarte (s. Anl. 2) wurde von BGLA (1993) übernommen. Im Untersuchungsgebiet streicht der Untere Buntsandstein erst ab dem Dickbanksandstein (oberstes Schichtglied der Gelnhausen - Folge) aus. Ältere Schichtfolgen sind an der Oberfläche nicht abgeschlossen. Die Gesteine des Unteren Buntsandsteins treten vor allem im NW-Teil des Arbeitsgebietes

Tabelle 1: Mittlere Mächtigkeiten im Buntsandstein des Spessarts nach SCHWARZMEIER (1979, 1980, 1984) und WITTMANN (1972)

Oberer Buntsandstein	so	85–90 m
Oberer Röttonstein	so4T	28–34 m
Rötquarzit	so4Q	7–9 m
Unterer Röttonstein	so3	17–21 m
Plattensandstein	so2	26–30 m
Chirotherienschiefer	so1	1–3 m
Mittlerer Buntsandstein	sm	175–190 m
Solling - Folge	smS	3–7 m
Hardeggen - Folge	smH	60–68 m
Detfurth - Folge	smD	34–44 m
Volpriehausen - Folge	smV	73–85 m
Unterer Buntsandstein	su	115 m
Salmünster - Folge	suS	51–56 m
Gelnhausen - Folge	suG	60 m

zutage, greifen aber im Talgrund der Hafenlohr weit nach Südosten aus. Die plattigen bis dickbankigen Sandsteine sind fein- bis mittelkörnig ausgebildet mit tonig-eisenschüssigem Bindemittel. Gelegentlich können wenige dm-mächtige Tonsteinlagen eingeschaltet sein. Zum Hangenden (Tonlagensandstein, *suST*) werden die Sandsteine grobkörniger und die Bankmächtigkeit nimmt ab.

Der Mittlere Buntsandstein dominiert die Hochlagen am Mittellauf der Hafenlohr sowie die tieferen Lagen am Unterlauf und zum Main. Im Untersuchungsgebiet treten alle Schichtfolgen des Mittleren Buntsandsteins zutage. Die Sandsteine sind fein- bis grobkörnig ausgebildet und tonig-eisenschüssig, teilweise quarzitisches gebunden. In einigen Abschnitten treten Tonsteinlagen auf, die bis zu 15% der Mächtigkeit umfassen können. Einzelne, grobkörnige Horizonte, in denen Quarzgerölle bis 25 mm Durchmesser auftreten können, gestatten eine lithostratigraphische Dreiteilung in Volpriehausen-, Detfurth- und Hardeggen-Folge.

Gesteine des Oberen Buntsandsteins finden sich auf den Hochlagen am Unterlauf der Hafenlohr und des Heinrichsbaches sowie im Einzugsgebiet des Krebsbaches. Im SE-Teil des Arbeitsgebietes um Glasofen und Marienbrunn sowie bei Rothenfels treten mit dem Rötquarzit auch die obersten Schichtfolgen des Oberen Buntsandsteins an die Oberfläche. Die Basis des Oberen Buntsandsteins bildet der durchgehende, tonige Horizont der Chirotherienschiefer. Über ihnen folgen feinkörnige, mittel- bis dickbankige Sandsteine des Plattensandsteins. Die Sandsteine sind überwiegend tonig-eisenschüssig gebunden und führen bis zu 2 m mächtige Tonsteinlagen. Den Abschluss bilden die schluffigen Unteren und Oberen Röttonsteine, die von geringmächtigen, feinkörnigen, quarzitisches gebundenen Sandsteinen des Rötquarzites getrennt werden.

4.3 Tektonik

4.3.1 Bisherige Beschreibungen

Eine übersichtliche Darstellung über den großtektonischen Rahmen Nordostbayerns sowie eine Analyse des Spannungsfeldes im weiteren Umfeld von Erlach a. Main gibt HUBER (1992) auf der Basis eigener Untersuchungen sowie der Arbeiten von SCHUBUTH (1973), AHORNER (1975), SCHWARZMEIER (1980) und VOSSMERBÄUMER (1985). Demnach lassen sich die Klüftungsverhältnisse im Raum Erlach a. Main als ein Klüftsystem in gefalteten Schichtfolgen mit **Längs-, Quer- und Diagonalklüften** beschreiben. Die gemittelten **Streichrichtungen** der Quer- und Längsklüfttrichtung liegen bei 125° bzw. 35° . Die mittleren Diagonalklüfttrichtungen streichen um 175° (NS) und 75° (EW). Quer- und Längsklüftsystem sind im Unteren und Mittleren Buntsandstein als Dehnungsklüfte ausgebildet und weisen gegenüber den durch Scherbewegung charakterisierten Diagonalklüften erhöhte Öffnungsweiten auf. Die Querklüfte liegen parallel der größten Hauptnormalspannung und dürften zu einem nicht unbeträchtlichen Teil ebenfalls durch Scherbewegung charakterisiert sein. Dies erklärt auch den vollkommeneren horizontalen und vertikalen Durchtrennungsgrad der Quer- und Diagonalklüfte gegenüber den Längsklüften (HUBER, 1992:219). Aufgrund des einheitlichen tektonischen Baus an der Südostflanke des Spessart-Schildes (SCHUBUTH, 1973), können die Interpretationen auch auf den tektonischen Rahmen des Hafenlohrtales übertragen werden.

Kluftöffnungsweiten für Aufschlüsse im Buntsandstein wurden von HUBER (1992) im östlichen Spessart gemessen. Er legte dabei weniger Gewicht auf die absoluten Öffnungsweiten als auf die Differenzierung zwischen Quer-, Längs- und Diagonalklüften. Der Autor erkennt Tendenzen zu größeren Kluftöffnungsweiten in Richtung der Quer- und Längsklüfte gegenüber den Diagonalklüften. Zum Vergleich können Daten von SEILER (1972) aus Buntsandsteinaufschlüssen im Saarland aufgeführt werden. SEILER gibt Öffnungsweiten von 0,3 - 4,0 mm an, wobei 80% zwischen 0,05 und 2,0 mm liegen.

Für **Kluftabstände** im Unteren und Mittleren Buntsandstein gibt HUBER (1992) Werte zwischen 1,13 und 1,34 m für Querklüfte und zwischen 0,85 und 2,14 m für Längsklüfte an. Im Mainviereck ermittelte SCHUBUTH (1973:79) unter Berücksichtigung der jeweiligen Bankmächtigkeit Kluftabstände zwischen 0,25 und 4,88 m. Der mittlere Kluftabstand betrug bei 514 untersuchten Klüften 0,98 m.

4.3.2 Eigene Untersuchungen

Im Rahmen tektonischer Untersuchungen wurde im Sommer 1993 das Kluftinventar von sechs aufgelassenen Steinbrüchen und zwei Aufschlüssen an Straßenböschungen aufgenommen. Die Aufschlüsse wurden alle bereits von SCHUBUTH (1973) sowie zwei von HUBER (1992) bearbeitet. Eine tektonische Neuaufnahme der Aufschlüsse war notwendig, da die zu ermittelnden, erforderlichen Kennwerte i.d.R. nicht alle zu Verfügung standen bzw. die Zuordnung von Eigenschaften zu einzelnen Klüften nicht bekannt war. Die Kluftaufnahme umfasste die Orientierung der Klüfte, Öffnungsweiten, Kluftabstände und Bankmächtigkeiten sowie die Beschreibung der Kluftfüllungen, des Terminationsverhaltens und der Oberflächenbeschaffenheit der Kluftwände. Die Aufschlüsse wurden von H1 bis H8 durchnummeriert. Die Anlagen 2

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Einfallswinkel.

Aufschluss	Einfallswinkel						Anzahl der Messungen
	90° – 81°	80° – 71°	70° – 61°	60° – 51°	50° – 41°	< 41°	
H1	58,9%	33,6%	4,7%	1,9%	0,9%	–	107
H2	60,9%	26,1%	8,7%	2,9%	1,4%	–	69
H3	79,4%	16,2%	4,4%	–	–	–	68
H4	66,7%	25,9%	7,4%	–	–	–	27
H5	59,7%	10,5%	15,8%	10,5%	3,5%	–	57
H6	63,9%	18,0%	6,6%	4,9%	1,6%	4,9%	61
H7	70,5%	17,9%	11,6%	–	–	–	95
H8	95,7%	4,3%	–	–	–	–	23

und 6 geben einen Überblick über Lage, stratigraphische Zuordnung und Zustand der aufgenommenen Aufschlüsse.

Zahlreiche weitere Steinbrüche im Untersuchungsgebiet sind heute aufgelassen und verfüllt, teilweise verstürzt oder stark verwachsen, wurden aber ebenfalls bereits von SCHUBUTH (1973) beschrieben. Die Richtungsdaten aus diesen Steinbrüchen können für eine Gesamtbeschreibung mitverwendet werden.

4.3.3 Orientierung der Klufflächen

Die Darstellung der Richtungshäufigkeit der Trennflächen wird auf Kluffrosen beschränkt, da etwa 90% der Flächen Einfallswinkel größer 70° aufweisen und auf eine Lagenkugelprojektion der Flächenpole verzichtet werden kann. Die Verteilung der Einfallswinkel innerhalb der einzelnen Aufschlüsse ist aus Tabelle 2 ersichtlich. In Abbildung 4 sind die Kluffrosen der Aufschlüsse dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommen wurden.

Die Richtungsrosen lassen vier Hauptkluftrichtungen erkennen, die sich dem tektonischen Spannungsfeld (HUBER, 1992) zuordnen lassen. Neben der ESE bis SE streichenden Querkluftrichtung existiert eine NNE bis NE streichende Längskluftrichtung. Diagonalklüfte pendeln um N-S und E-W. Nach den Kluffrosen treten diese Richtungen in den meisten Aufschlüssen deutlich hervor.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes deuten sich regionale Unterschiede im Hinblick auf die Verteilung der Richtungsmaxima an. Besonders auffällig sind die Bereiche des Unteren Buntsandsteins im Gebiet um Rothenbuch und Weibersbrunn, die durch H7 und H8 repräsentiert werden. Hier dominieren die E-W- und N-S-streichenden Diagonalkluffscharen. Das gleiche Bild zeigen die von SCHUBUTH (1973) in diesem Gebiet aufgenommenen Aufschlüsse. Andere Kluftrichtungen sind nur vereinzelt angedeutet.

Die Aufschlüsse H1, H2 und H3 erfassen den Oberen Buntsandstein. Sie liegen am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes und repräsentieren den Bereich einer markanten Störungszone zwischen Rechtenbach und Marktheidenfeld. Die Störungen unterteilen das Gebiet hier in schmale Schollenstreifen, wobei die drei Aufschlüsse auf unterschiedlichen Schollen liegen. H1 und H3 werden von Quer- und Längskluffscharen

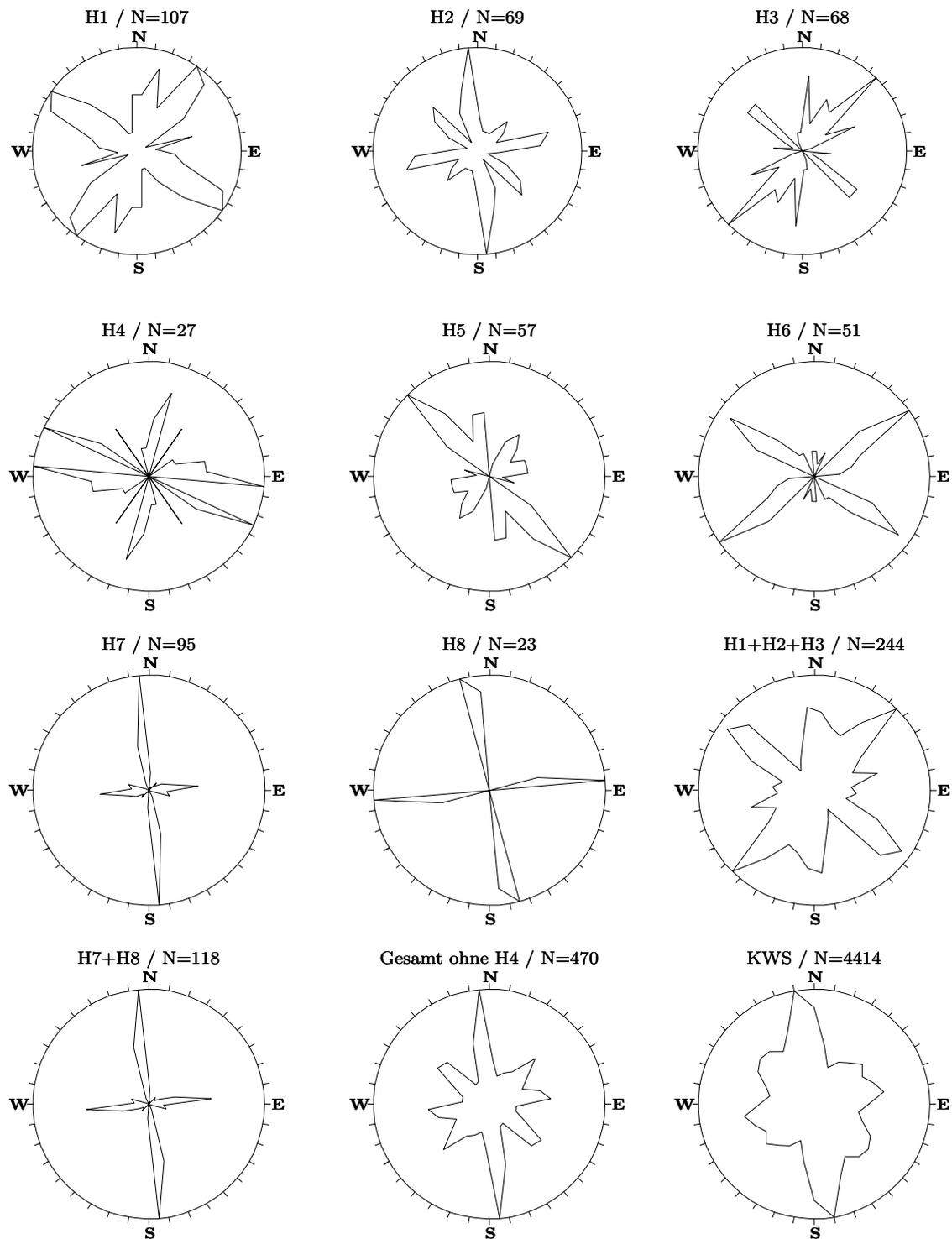


Abbildung 4: Kluftorientierung der Aufschlüsse im Untersuchungsgebiet - zum Vergleich rechts unten Sammelkluftrose aus dem Bereich der Karlstadt-Würzburger-Störungszone (KWS, aus SCHUBUTH, 1973).

dominiert, wobei in H3 die Längskluftrichtung noch deutlicher ausgeprägt ist. Diese beiden Kluftscharen sind im Aufschluss H2 als Nebenmaxima vertreten. Die Diagonalkluftrichtungen, insbesondere die N-S-Richtung, stellen hier Hauptmaxima dar. Möglicherweise kam es beim Absacken dieser Scholle zu stärkeren Scherbewegungen als auf den anderen Schollen. Die Diagonalkluftrichtungen sind in den Aufschlüssen H1 und H3 zwar auch ausgeprägt, treten aber gegenüber den Quer- und Längskluftrichtungen in den Hintergrund.

Im Aufschluss H4 scheinen die Dehnungskluftrichtungen um etwa 20° gegen den Uhrzeigersinn rotiert zu sein. Bei diesem Aufschluss, der insgesamt in einem schlechten Zustand ist, fallen die Abweichung der gemessenen Kluftrichtungen von den Ergebnissen von SCHUBUTH (1973) auf. Für diesen Aufschluss läßt sich vermuten, dass im Laufe der Jahre durch Verwitterung und Hangbewegungen die Gesteinsblöcke gekippt sind. Aufgrund dieser Umstände können die Ergebnisse der Kluftaufnahme aus diesem Aufschluss nicht oder nur unter Vorbehalt verwendet werden. Im Aufschluss H5, südwestlich außerhalb des Untersuchungsgebietes, streicht das Richtungsmaximum in Querklufttrichtung. Dies entspricht auch der in diesem Gebiet vorherrschenden Richtung der Seitentäler zum Dammbach. In ihrer Ausprägung ähnlich sind die Längs- und die beiden Diagonalkluftrichtungen. Für den Aufschluss H6 lassen sich zwei Richtungsmaxima der Quer- und der Längsklufttrichtung zuordnen, die Diagonalkluftrichtungen treten nur untergeordnet auf.

Zusammenfassend läßt sich für das Untersuchungsgebiet dem Querkluftsystem eine mittlere Streichrichtung von $100\text{--}150^\circ$ und dem Längskluftsystem von $20\text{--}70^\circ$ zuordnen. Die Diagonalkluftscharen streichen im Mittel um $160\text{--}190^\circ$ (NS-Kluftsystem) bzw. $70\text{--}120^\circ$ (EW-Kluftsystem). In den folgenden Kapiteln werden für die Kluftscharen in den Tabellen mit Indizes bezeichnet. Dabei erhalten die Querklüfte den Index Q , Längsklüfte L und die Diagonalklüfte $D1$ für die Nord-Süd-streichenden und $D2$ für die Ost-West-streichenden Klüfte.

4.3.4 Kluftöffnungsweiten

Die Kluftöffnungsweite beeinflusst wesentlich die Durchlässigkeit des Klufttraumes. Um so mehr muss in Betracht gezogen werden, dass die Kluftöffnungsweiten mit der Tiefe abnehmen. Größere Öffnungsweiten können durch verwitterungsbedingte Auflockerungen, Sprengbetrieb in Steinbrüchen oder Hangzerreibungen vorgetäuscht werden. An der Oberfläche gemessene Öffnungsweiten sind folglich nur in beschränktem Maße auf den gesamten Grundwasserleiter übertragbar. Dennoch soll versucht werden über oberflächennah ermittelte Werte zu einer Abschätzung des Fließverhaltens in Klüften zu gelangen.

In Tabelle 3 sind die Mittelwerte der gemessenen Kluftöffnungsweiten der Hauptkluftscharen aufgeführt. Schlechte Aufschlussverhältnisse bzw. die Lage der Aufschlusswand zu den Kluftrichtungen ließen oft nur eine unzureichende Zahl von Messungen zu. Zur Beurteilung der Qualität der Mittelwerte wird die Anzahl der Messungen in Klammern angegeben. Wegen der schwierigen Zuordnung der gemessenen Kluftmaxima von Aufschluss H4 zu den Hauptkluftrichtungen (s. a. Kap. 4.3.3), wurde dieser Aufschluss bei der Bewertung der Öffnungsweiten nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Mittlere Kluftöffnungsweiten b der Hauptkluftscharen, Anzahl der Messwerte in Klammern, Indizes s. Kapitel 4.3.3.

Aufschluss	Querklüfte	Längsklüfte	Diagonalklüfte N-S	Diagonalklüfte E-W
H1	$b_Q = 48,20$ mm (14)	$b_L = 60,45$ mm (14)	$b_{D1} = 14,41$ mm (8)	$b_{D2} = 45,57$ mm (7)
H2	$b_Q = 3,68$ mm (3)	$b_L = 35,75$ mm (4)	$b_{D1} = 6,01$ mm (3)	$b_{D2} = 40,80$ mm (15)
H3	$b_Q = 6,88$ mm (12)	$b_L = 0,71$ mm (3)	$b_{D1} = 0,52$ mm (2)	$b_{D2} = 0,36$ mm (3)
H5	kein Wert (0)	$b_L = 14,70$ mm (5)	$b_{D1} = 32,50$ mm (2)	$b_{D2} = 0,52$ (2)
H6	$b_Q = 124,75$ mm (8)	$b_L = 9,75$ mm (9)	$b_{D1} = 10,50$ mm (2)	kein Wert (0)
H7	kein Wert (0)	kein Wert (0)	$b_{D1} = 9,10$ mm (5)	$b_{D2} = 11,81$ mm (34)
H8	kein Wert (0)	kein Wert (0)	kein Wert (0)	$b_{D2} = 29,80$ mm (10)
H1+H2 +H3	$b_Q = 26,50$ mm (29)	$b_L = 47,21$ mm (21)	$b_{D1} = 10,33$ mm (13)	$b_{D2} = 37,29$ mm (25)
H5+H6	kein Wert (0)	$b_L = 11,40$ mm (14)	$b_{D1} = 21,50$ mm (4)	$b_{D2} = 0,52$ mm (2)
H7+H8	kein Wert (0)	kein Wert (0)	$b_{D1} = 9,10$ mm (5)	$b_{D2} = 15,90$ mm (44)
H1+H2+H3+ H5+H6+H7+H8	$b_Q = 26,50$ mm (29)	$b_L = 40,96$ mm (26)	$b_{D1} = 12,24$ mm (20)	$b_{D2} = 23,00$ mm (71)

Die durchschnittlichen Öffnungsweiten betragen je nach Klufrichtung etwa 20 bis 30 mm. Die Werte können jedoch zwischen den einzelnen Aufschlüssen stark variieren. Besonders auffällig sind die niedrigen Werte bei Aufschluss H3. Es handelt sich hierbei, ebenso wie bei H8, um einen Straßenaufschluss, wobei die Baumaßnahmen vermutlich ohne Sprengungen durchgeführt wurden. Die anderen Aufschlüsse sind dagegen ehemalige Steinbrüche, vermutlich mit Sprengbetrieb. Deutlich größere Öffnungsweiten als in den übrigen Aufschlüssen wurden in Aufschluss H6 für die Querklüfte gemessen. Die Querklüfte verlaufen hier parallel zur Talrichtung. Die großen Öffnungsweiten sind vermutlich auf Hangzerreißungsvorgänge zurückzuführen. Um die Ergebnisse durch diese Extremwerte nicht zu verfälschen, wird die Querkluftrichtung von H6 nicht berücksichtigt.

Für die Aufschlüsse H5, H6, H7 und H8 konnten nicht für alle Hauptkluftrichtungen die Öffnungsweiten gemessen werden. Dies lag zu einen an den schlechten Aufschlussverhältnissen (H5 und H6), zu anderen an dem Fehlen oder sehr deutlichen Zurücktreten der Klufrichtungen (H7 und H8).

Aufgrund ihrer Charakteristik werden für die weitere Auswertung Quer- und Längsklüfte (überwiegend Dehnungscharakter) sowie die beiden Diagonalklufrichtungen (überwiegend Schercharakter) jeweils gemeinsam betrachtet.

In den Aufschlüssen H5 und H6 konnten aufgrund der schlechten Aufschlussverhältnisse nur wenige Messungen durchgeführt werden. Die zuverlässigsten Messwerte für diese beiden Aufschlüsse konnten für die Längsklüfte gewonnen werden.

Es zeigt sich, dass im Bereich der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld (Aufschlüsse H1, H2 und H3) die Quer- und Längsklüfte (Dehnungsklüfte) zu etwas größeren Öffnungsweiten tendieren als die Diagonalklüfte (Scherklüfte). Wobei allerdings im Aufschluss H2, wo die Diagonalklufrichtungen dominant vertreten sind, auch die Öffnungsweiten der Diagonalklüfte im Verhältnis zu den Quer- und Längsklüften größer sind, als dies in H1 und H3 der Fall ist. Aufgrund der geringen Anzahl der Messwerte lässt sich eine gesicherte Aussage über das Verhältnis der Öffnungsverteilungen zueinander im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Aufschlüsse H5 bis H8) nicht machen. Insgesamt lässt sich beobachten, dass die Kluftöffnungsweiten im Bereich der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld etwas größere Werte aufweisen. Dies ist vermutlich unmittelbare Folge der stärkeren tektonischen Zerrüttung im Ostteil des Untersuchungsgebietes.

4.3.5 Kluftfüllungen und Kluftbeläge

Kluftfüllungen oder Kluftbeläge waren in den untersuchten Aufschüssen nur sehr selten festzustellen. Eine Beeinträchtigung der Kluftdurchlässigkeit durch Kluftfüllungen ist nach SCHUBUTH (1973) und HUBER (1992) in den von ihnen untersuchten Gebieten nicht gegeben.

4.3.6 Kluftabstände

Ebenso wie die Kluftöffnungsweite beeinflusst der Abstand zwischen den Klüften die Durchlässigkeit des Gebirges. Vertikale Klüfte spielen dabei für den eindimensionalen vertikalen Sickerungsvorgang die wesentliche Rolle.

Die Kluftabstände wurden jeweils direkt gemessen oder die Kluftdichte entlang einer Messstrecke bestimmt. Beide Ergebnisse wurden in einem Mittelwert für den Kluftabstand zusammengefasst. Dabei wurde darauf geachtet, jeweils nur die Klüfte einer Kluftschar zu erfassen. Dies war in der Regel aufgrund der klaren Richtungsverhältnisse leicht zu bewerkstelligen. Eine gleichmässige Erfassung der Kluftabstände aller relevanten Richtungen war in keinem Fall möglich, da qualitativ gleichwertige Aufschlussverhältnisse in zwei Richtungen innerhalb eines Steinbruches nicht gegeben waren. Demnach sind die Ergebnisse verschiedener Kluftscharen mit unterschiedlichen Unsicherheitsfaktoren behaftet.

Wegen schlechter Aufschlussverhältnisse waren Kluftabstandsmessungen an den Aufschlüssen H3 und H4 nicht möglich. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Kluftabstände zusammengefasst. Die Qualität der Werte kann anhand der Anzahl der Messwerte beurteilt werden.

Ein signifikanter Unterschied der Kluftabstände in Abhängigkeit von der Klufrichtung lässt sich nicht erkennen. Das Fehlen der Messwerte für Quer- und Längsklufrichtung in den Aufschlüssen H7 und H8

Tabelle 4: Mittlere Kluftabstände d und Kluftdichten k der Hauptkluftscharen, Anzahl der Messwerte in Klammern, Indizes s. Kapitel 4.3.3.

Aufschluss	Querklüfte	Längsklüfte	Diagonalklüfte N-S	Diagonalklüfte E-W
H1	$d_Q = 1,25$ m $k_Q = 0,80$ m ⁻¹ (8)	keine Werte	$d_{D1} = 1,67$ m $k_{D1} = 0,60$ m ⁻¹ (18)	keine Werte
H2	$d_Q = 0,85$ m $k_Q = 1,18$ m ⁻¹ (13)	keine Werte	$d_{D1} = 1,39$ m $k_{D1} = 0,72$ m ⁻¹ (13)	$d_{D2} = 0,71$ m $k_{D2} = 1,41$ m ⁻¹ (10)
H5	$d_Q = 0,80$ m $k_Q = 1,25$ m ⁻¹ (5)	keine Werte	$d_{D1} = 1,15$ m $k_{D1} = 0,87$ m ⁻¹ (3)	keine Werte
H6	$d_Q = 0,58$ m $k_Q = 1,72$ m ⁻¹ (9)	$d_L = 0,70$ m $k_L = 1,43$ m ⁻¹ (5)	$d_{D1} = 0,60$ m $k_{D1} = 1,67$ m ⁻¹ (4)	keine Werte
H7	keine Werte	keine Werte	$d_{D1} = 1,25$ m $k_{D1} = 0,8$ m ⁻¹ (44)	$d_{D2} = 0,88$ m $k_{D2} = 1,14$ m ⁻¹ (7)
H8	keine Werte	keine Werte	$d_{D1} = 0,71$ m $k_{D1} = 1,41$ m ⁻¹ (8)	$d_{D2} = 0,43$ m $k_{D2} = 2,33$ m ⁻¹ (3)

ist in erster Linie auf das deutliche Zurücktreten dieser Kluftrichtungen zurückzuführen und nicht so sehr auf schlechte Aufschlussverhältnisse.

Es können die Beobachtungen von SCHUBUTH (1973) bestätigt werden, dass die Kluftabstände mit der Bankmächtigkeit zunehmen. Die Zunahme der Abstände mit der Bankmächtigkeit fällt nach den vorliegenden Untersuchungen etwas stärker aus als nach SCHUBUTH (1973). So betragen die mittleren Kluftabstände bis 0,5 m Bankmächtigkeit etwa 0,29 m und wachsen rasch auf 1,00 m bei Bankmächtigkeiten zwischen 0,5 und 1,2 m. Bei Bankmächtigkeiten über 1,2 m ergeben sich Kluftabstände von durchschnittlich 2,26 m.

4.3.7 Terminationsverhalten

Für die Klassifikation des Terminationsverhaltens wird der Vorschlag von HUBER (1992) übernommen. Das horizontale Terminationsverhalten unterteilt er in Anlehnung an ISRM (1977) in Klüfte, die ein- oder beidseitig an Gegenklüften abgesetzt sind. Das **vertikale Terminationsverhalten** wird unterschieden nach Klüften, die eine Gesteinsbank, mehrere Bänke oder die gesamte Steinbruchwand durchtrennen. Die Darstellung erfolgt als richtungsabhängiger Prozentanteil der Durchtrennungsfaktoren (Tab. 5).

Die Ermittlung der **horizontalen Termination** ist mit zahlreichen Unsicherheitsfaktoren behaftet. Besonders gravierend wirkt sich aus, dass die meisten messbaren Klüfte ins Gebirgsinnere verlaufen und

Tabelle 5: Prozentanteile unterschiedlichen vertikalen Terminationsverhaltens an den Kluftrichtungen. Index: 1 = nicht definiert / 2 = Kluft durchtrennt eine Bank / 3 = Kluft durchtrennt mehrere Bänke / 4 = Kluft durchtrennt Steinbruchwand. Anzahl der Messwerte in Klammern.

Aufschluss	Quer	Längs	Diagonal N – S	Diagonal E – W	Index	Quer	Längs	Diagonal N – S	Diagonal E – W	Aufschluss
H1	6	9	15	27	1	6	13	4	15	H2
	70	42	59	27	2	44	25	84	8	
	24	48	26	46	3	50	49	12	69	
	0	0	0	0	4	0	13	0	8	
	(34)	(33)	(27)	(11)		(16)	(16)	(25)	(13)	
H3	6	14	16	0	1	13	0	0	0	H4
	25	69	37	50	2	74	75	75	63	
	63	17	42	50	3	13	25	25	37	
	6	0	5	0	4	0	0	0	0	
	(16)	(29)	(19)	(4)		(8)	(4)	(8)	(8)	
H5	15	0	6	12	1	0	6	10	40	H6
	70	23	60	44	2	47	47	29	20	
	15	62	35	44	3	42	47	42	20	
	0	15	9	0	4	11	0	19	20	
	(20)	(13)	(17)	(9)		(19)	(15)	(21)	(5)	
H7	0	10	0	19	1	0	0	0	22	H8
	100	50	91	30	2	0	100	100	11	
	0	40	9	47	3	0	0	0	45	
	0	0	0	4	4	0	0	0	22	
	(1)	(10)	(54)	(26)		(0)	(1)	(14)	(9)	
H1+H2 + H3+H4	7	11	9	14	1	7	5	3	20	H5+H6 + H7+H8
	56	50	64	31	2	60	41	75	28	
	36	37	26	52	3	28	49	18	44	
	1	2	1	3	4	5	5	4	8	
	(74)	(82)	(76)	(36)		(40)	(39)	(104)	(50)	
Gesamt	7	9	6	17	1					
	57	48	69	29	2					
	33	40	22	48	3					
	3	3	3	6	4					
	(115)	(121)	(180)	(86)						

somit ein Absetzen an einer Gegenkluft von vornherein nicht zu beobachten ist. Diese Klüfte werden der Kategorie der nicht abgesetzten Klüfte zugeordnet. Die Aufschlussverhältnisse bedingen darüber hinaus einen geringen Anteil an beidseitig abgesetzten Klüften. In der Konsequenz überwiegen in allen Aufschlüssen die nicht abgesetzten Klüfte bei weitem. Die Ergebnisse der Zuordnung der horizontalen Termination sind aus Tabelle 6 ersichtlich.

Deutliche Unterschiede des Terminationsverhaltens in Abhängigkeit von der Richtung können nicht festgestellt werden. In den Aufschlüssen H1 und H2 zeigen die Längs- und die E-W-Diagonalkluftrichtung gegenüber den beiden anderen Kluftrichtungen ein etwas ausgeprägteres Terminationsverhalten. In H3 weisen dagegen die Quer- und die N-S-Diagonalkluftrichtung einen höheren Durchtrennungsgrad auf. Nur geringe, richtungsabhängige Unterschiede im Terminationsverhalten treten im Aufschluss H4 auf. Hier sind jedoch auch die geringe Anzahl der Messwerte sowie der schlechte Gesamtzustand des Aufschlusses zu berücksichtigen. Ein uneinheitliches Bild geben die Aufschlüsse H5 und H6 ab. In H5 scheinen die Querklüfte am wenigsten durchtrennt, in H6 die Quer- und Längsklüfte. Fasst man die Aufschlüsse H7

Tabelle 6: Prozentanteile unterschiedlichen horizontalen Terminationsverhaltens an den Kluftrichtungen. Index: 1 = nicht definiert / 2 = zweimal abgesetzt / 3 = einmal abgesetzt / 4 = nicht abgesetzt. Anzahl der Messwerte in Klammern.

Aufschluss	Quer	Längs	Diagonal N – S	Diagonal E – W	Index	Quer	Längs	Diagonal N – S	Diagonal E – W	Aufschluss
H1	0	0	4	0	1	0	13	0	0	H2
	3	3	0	0	2	0	12	20	0	
	15	6	19	0	3	13	50	32	0	
	82	91	77	100	4	87	25	48	100	
	(34)	(33)	(27)	(11)		(16)	(16)	(25)	(13)	
H3	0	0	0	0	1	0	0	13	0	H4
	0	10	0	0	2	0	0	0	0	
	13	14	21	50	3	12	25	0	0	
	87	76	79	50	4	88	75	87	100	
	(16)	(29)	(19)	(4)		(8)	(4)	(8)	(8)	
H5	0	0	0	0	1	0	6	19	0	H6
	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	25	0	29	11	3	42	47	14	0	
	75	100	71	89	4	58	47	67	100	
	(20)	(13)	(17)	(9)		(19)	(15)	(21)	(5)	
H7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	H8
	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	0	30	30	41	3	0	0	7	0	
	100	70	70	59	4	0	100	93	100	
	(1)	(10)	(54)	(26)		(0)	(1)	(14)	(9)	
H1+H2 + H3+H4	0	0	0	0	1	0	5	4	0	H5+H6 + H7+H8
	1	6	7	0	2	0	5	0	0	
	14	7	22	6	3	33	49	23	24	
	85	87	71	94	4	67	41	73	76	
	(74)	(82)	(76)	(36)		(40)	(39)	(104)	(50)	
Gesamt	1	1	2	0	1					
	1	4	3	0	2					
	20	12	23	16	3					
	78	83	72	84	4					
	(115)	(121)	(180)	(86)						

und H8 zusammen und betrachtet die dominierenden Diagonalkluftrichtungen, so tendieren die E-W-Diagonalklüfte zu einem etwas höheren Durchtrennungsgrad.

Betrachtet man die Quer- und Längskluftrichtungen zusammen, so weisen für H1, H2, H3 die Kluftrichtungen mit den größeren Öffnungsweiten auch den höheren Durchtrennungsgrad auf. Dies ist in H1 und H2 die Längs- und in H3 die Querkluftichtung. Wegen der geringen Anzahl bzw. der schlechten Qualität der Daten läßt sich diese Betrachtung für die anderen Aufschlüsse nicht durchführen. Für die Diagonalkluftrichtungen trifft diese Beobachtung in den Aufschlüssen H1, H2, H3, H7 und H8 ebenfalls zu. Die Kluftrichtungen mit den größeren Öffnungsweiten zeigen auch hier das deutlichere Terminationsverhalten. Für H5 und H6 liegen zu wenige oder keine Daten vor.

4.3.8 Oberflächenbeschaffenheit

Die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit der Kluftflächen sollte weitere Hinweise auf die Wasserwegsamkeit der Klüfte geben. Bei der Beschreibung der Oberflächen wird zwischen Unebenheiten der Kluftfläche im cm- bis dm-Bereich und der Rauigkeit im mm- bis cm-Bereich unterschieden. Beide Größenstufen wurden jeweils in drei Klassen unterschieden. Für den cm- bis dm-Bereich waren dies die Klassen glatt, wellig und uneben; für den mm- bis cm-Bereich die Klassen glatt, rau und uneben rau.

Die Ergebnisse der Beobachtungen zeigen nur unwesentliche Unterschiede der Unebenheit und Rauigkeit. Dies gilt sowohl für den Vergleich der Kluftrichtungen als auch der Aufschlüsse untereinander. Im Großen und Ganzen können die Kluftflächen als glatt bis wellig beschrieben werden. Größere Unebenheiten sollten aufgrund der Kluftcharakteristik eigentlich bei den Dehnungsklüften (Quer- und Längsklüfte) stärker ausgeprägt sein als bei den Scherklüften (Diagonalklüfte). Dies war jedoch bei den untersuchten Aufschlüssen nicht auffällig. Ursache dafür mag die geringe Anzahl genügend großer Kluftflächen gewesen sein. Die Beobachtungen sind wegen der geringen Anzahl derartiger Kluftflächen mit relativ großen Unsicherheiten behaftet.

Auch die visuelle Beurteilung der Rauigkeit im mm- bis cm-Bereich ergab keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Kluftrichtungen oder den Aufschlüssen. Die Rauigkeit bewegt sich fast ausschließlich im Korngrößenbereich. Insgesamt unterscheiden sich die untersuchten Kluftoberflächen in ihrer Oberflächenbeschaffenheit kaum.

4.3.9 Kontaktflächenanteil

Der Kontaktflächenanteil wird als der prozentuale Anteil der Kluftfläche bezeichnet, an dem sich die beiden Kluftwände berühren. Der Anteil wurde im Gelände nach visueller Beurteilung geschätzt. In den bearbeiteten Aufschlüssen waren die Kluftwände fast durchweg kontaktfrei. Dies spricht für geringe Versatzbeträge an den Klüften.

4.3.10 Kluftanalyse

Von den vier Hauptkluftrichtungen sind die Diagonalkluftrichtungen nach HUBER (1992) durch Scherbewegungen charakterisiert und weisen gegenüber den Quer- und Längskluftrichtungen geringere relative Kluftöffnungsweiten auf. Aufgrund der Schercharakteristik sind für die Diagonalklüfte auch mit zunehmender Tiefe sehr geringe Kluftöffnungsweiten zu erwarten. Quer- und Längsklüfte sind dagegen nach HUBER als Dehnungsklüfte einzustufen. Die Querklüfte sollten dank ihrer zusätzlichen Scherbewegung mit zunehmender Tiefe den größten Beitrag zum gesamten Kluftraum beitragen. Die Längsklüfte haben dagegen nach HUBER (1992) keine zusätzliche Scherbewegung erfahren.

Die Aufschlüsse H1, H2 und H3 sind deutlich von Quer- und Längskluftrichtungen beeinflusst, wenn auch im Aufschluss H2 noch die Diagonalkluftrichtungen dominieren. Trotz dieser Unterschiede, werden

die Aufschlüsse H1, H2 und H3 aufgrund ihrer lokalen Beziehung und der Ähnlichkeit des Kluftbildes zusammengefasst. Die Aufschlüsse werden dem durch tektonische Störungen stärker beanspruchten östlichen Teil des Untersuchungsgebietes zugeordnet. Hier deckt sich die Querklufrichtung mit den zwischen Marktheidenfeld und Rechtenbach gehäuft auftretenden, NNW-SSE-streichenden Störungen (Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld). Die Dominanz von Klüften mit Dehnungscharakter legt in diesem Bereich auch unterhalb der oberflächennahen Auflockerungszone das Vorhandensein größerer Kluftöffnungsweiten nahe.

Die Kluftöffnungsweiten im Bereich der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld weisen im Vergleich zum westlichen Teil des Untersuchungsgebietes etwas größere Werte auf. Innerhalb dieser Störungszone tendieren die Längs- und Querklüfte gegenüber den Diagonalklüften zu geringfügig größeren Öffnungsweiten. Die größeren Öffnungsweiten korrespondieren hier mit dem etwas vollkommenerem Durchtrennungsgrad. Die Kluftabstände unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Klufrichtungen nur gering.

Ebenfalls von den Quer- und Längsklufrichtungen geprägt ist der Bereich im Krausenbacher und Altenbacher Forst, südwestlich des Untersuchungsgebietes. Die Querklufrichtung stimmt in diesem Bereich sehr gut mit der Orientierung der Seitentäler des Dammbaches überein. Aufgrund der relativ schlechten Aufschlussverhältnisse (H5 und H6) sind die Ergebnisse der Kluftöffnungsweiten und Kluftabstände mit Vorsicht zu bewerten.

Der westliche Teil des Untersuchungsgebietes kann klufttektonisch anhand der Aufschlüsse H7 und H8, beschrieben werden. In diesem Teilgebiet dominieren Diagonal- über Quer- und Längsklüfte. Die Kluftöffnungsweiten sind hier etwas geringer als im Bereich der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld. Öffnungsweiten der Quer- und Längsklüfte konnten nicht gemessen werden. Zieht man allerdings die südlich gelegenen Aufschlüsse H5 und H6 zum Vergleich heran, so dürften die Öffnungsweiten für alle Klufrichtungen ähnlich sein. Quer- und Längsklüfte treten allerdings in den Aufschlüssen H7 und H8 nur untergeordnet auf; hier sind daher auch sehr viel größere Kluftabstände zu vermuten.

Am Ost- und Südostrand des Untersuchungsgebietes sind sowohl die Klufrichtungen, wie sie in den Aufschlüssen H5, H6 und unter Vorbehalt H4 zu beobachten waren, anzutreffen als auch solche entsprechend den Aufschlüssen H7 und H8 (s. SCHUBUTH, 1973).

Die Kontaktflächenanteile betragen oberflächennah fast durchwegs 0%. Ursache dafür sind u.a. die relativ geringen Unebenheiten der Kluftflächen. Mit zunehmender Tiefe sollte der Kontaktflächenanteil, aufgrund der geringer werdenden Öffnungsweiten, zunehmen. Der Dehnungscharakter der Quer- und Längsklüfte dürfte zur Folge haben, dass der Kontaktanteil geringer ist als bei den durch überwiegend Scherbewegung entstandenen Diagonalklüften.

4.4 Hydrogeologie

4.4.1 Grundwasserleiter

Nach SCHWARZMEIER (1980) weisen die Sandsteine des Buntsandsteinspessarts aufgrund ihrer häufig tonig-eisenschüssigen oder quarzitären Bindung keine nennenswerte Porendurchlässigkeit auf und sind somit als Kluftgrundwasserleiter anzusprechen. Auch THEWS (1967) schätzt die Porengrundwasserbewegung gegenüber der Kluftgrundwasserbewegung als zu vernachlässigen ein. Der Anteil der Gesteinsdurchlässigkeit an der Gebirgsdurchlässigkeit bewegt sich im Mittleren Buntsandstein Thüringens um 3 bis 5% (HAUTHAL, 1967).

Nach UDLUFT (1971) ist der Porenraum im Buntsandstein der Südrhön als sehr schlecht wasserwegsam, bzw. als wasserstauend zu betrachten, so dass Wasserbewegungen im größeren Maße nur auf den Klüften stattfinden können. In den Sandsteinen der Gelnhausen-Folge erfolgt nach UDLUFT (1971) der Wassertransport zu 99% auf den Klüften.

Im Spessart bilden Unterer und Mittlerer Buntsandstein großräumig ein zusammenhängendes Grundwasserstockwerk mit den Bröckelschiefern als Grundwassersohlschicht. Nur der Tonlagensandstein (*suST*) kann innerhalb dieser Serie durch seine Häufung von Tonsteinlagen zusätzlich Staufunktion ausüben. Andere Tonsteinlagen können wegen ihrer geringen Mächtigkeit und Lückenhaftigkeit nur räumlich eng begrenzte, schwebende Grundwasserstockwerke ausbilden. Stärker schüttende Quellen innerhalb des Mittleren und Unteren Buntsandsteins treten im Spessart fast immer im Niveau der Täler auf, wo Querschnittsverengungen das Grundwasser zutage treten lassen (THEWS, 1967).

Das Grundwasserstockwerk des Oberen Buntsandsteins wird durch die Chirotherienschiefer von den darunterliegenden Stockwerken abgetrennt. Grundwasserleiter sind der Plattensandstein und der Rötquarzit. Den Abschluss der Buntsandsteinserie im Spessart bilden die Oberen Röttonsteine (*so4T*) als Grundwassersohlschicht des Muschelkalkaquifers.

4.4.2 Grundwasseroberfläche

Die Darstellung der Grundwasserhöhengleichen für das Untersuchungsgebiet (s. Anl. 3) basiert auf den Grundwassergleichenplänen aus den amtlichen Geologischen Karten 1:25.000 (SCHWARZMEIER, 1979 und 1980 und WITTMANN, 1972). Weiterhin stehen für den Bereich etwa zwischen Erlenfurt und der Einmündung des Wagenbaches Untersuchungen von IGI (1988) zur Verfügung. Zwischen den Grundwassergleichenplänen aus den amtlichen geologischen Karten bestehen z.T. erhebliche Unterschiede der Grundwasserhöhen. Die Grundwassergleichenpläne der Blätter Marktheidenfeld und Lohr a. Main stimmen gut überein, wogegen große Abweichungen zum Blatt Rothenbuch festzustellen sind. Die beiden erstgenannten Blätter sind neueren Datums und gründen auf einer breiteren Datenbasis; sie wurden daher übernommen. Die Grundwasserhöhen aus diesen beiden Kartenblättern wurden, so weit möglich und unter Verwendung der Grundwassergleichenpläne aus IGI (1988), auf den benachbarten Kartenblättern Rothenbuch und Bischbrunn fortgesetzt. Weiterhin wurden die Grundwasserhöhen unter Berücksichtigung

der Vorfluter, der Grundwasseraustritte und allgemeiner hydrogeologischer Kriterien (z.B. Grundwassergefälle, Morphologie) konstruiert. In den Bereichen mit Überdeckung durch Oberen Buntsandstein weisen die Grundwassergleichenpläne der Kartenblätter Lücken auf, die unter Beachtung der hydrogeologischen Gegebenheiten interpoliert wurden.

Die Grundwasseroberfläche wird im Untersuchungsgebiet deutlich von der Morphologie der Geländeoberfläche und der Hafenlohr als Vorfluter beeinflusst. An den Hängen des Hafenlohrtales steigt das Grundwassergefälle auf Werte bis über 25%, verflacht sich aber rasch im Tal und in den Hochgebieten auf Werte zwischen 1% und 5%.

4.4.3 Flurabstände

Die Flurabstände (s. Anl. 4) wurden mit Hilfe eines Computerprogramms aus Daten der Gelände- und der Grundwasserhöhen berechnet. Im Untersuchungsgebiet sind aufgrund der ausgeprägten Morphologie der Geländeoberfläche beachtliche Unterschiede der Flurabstände festzustellen. Die geringsten Flurabstände sind erwartungsgemäß in den Talbereichen anzutreffen. Die Grundwasseroberfläche liegt hier nur wenige Dezimeter bis wenige Meter unter der Geländeoberfläche. Den größten Flächenanteil machen Gebiete mit Flurabständen zwischen 20 m und 60 m aus. Dies sind in erster Linie die Hangbereiche sowie Gebiete mit flacheren Höhenrücken, wie etwa die Eselshöhe im Nordwesten. Unter den topographischen Hochgebieten sind mit Tiefen bis über 100 m die größten Flurabstände zu beobachten. Hier sind vor allem der Geiersberg im Südwesten zu nennen sowie das Gebiet um die Klosterkuppel und der gesamte Höhenrücken an der nordöstlichen Begrenzung des Untersuchungsgebietes.

4.4.4 Einzugsgebiet der Hafenlohr

Das oberirdische Einzugsgebiet der Hafenlohr läßt sich anhand der oberirdischen Wasserscheide abgrenzen (s. Anl. 1). Die Fläche beträgt nach eigenen Berechnungen 146,52 km² und stimmt sehr gut mit der Angabe nach ROTHASCHER (1987) von 146,80 km² überein. Nach der Konstruktion des Grundwassergleichenplanes wurde das unterirdische Einzugsgebiet entsprechend den unterirdischen Wasserscheiden abgegrenzt (s. Anl. 3). Es stimmt in seiner Form und Fläche (143,55 km²) weitgehend mit dem oberirdischen Einzugsgebiet überein. An der nordöstlichen Begrenzung ist das unterirdische Einzugsgebiet etwas größer als das oberirdische, an der nordwestlichen Begrenzung etwas kleiner.

4.4.5 Abfluss der Hafenlohr

Vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft wurden freundlicherweise die Tageswerte der Abflüsse an den Pegeln Hafenlohr (Messstelle Nr. 245620 00) und Breitfurt (Messstelle Nr. 245613 03) zur Verfügung gestellt. Der Pegel Breitfurt liegt etwa 6,5 km stromaufwärts vom Pegel Hafenlohr (s. Anl. 1). Die Abflussganglinien der beiden Pegel vom 01.01.1980 bis 31.10.1990 sind in der Abbildung 5 dargestellt. Auffällig hohe Abflussspitzen waren jeweils in den ersten Monaten der Jahre 1982, 1984, 1987 und

1988 zu verzeichnen. Relativ niedrige Abflussspitzen traten im Frühjahr 1985 auf. Der Maximalwert für den Tagesabfluss lag im genannten Zeitraum am Pegel Hafenlohr bei 25,7 und 25,6 m³/s (Frühjahr 1982 bzw. 1988) und am Pegel Breitfurt bei 15,4 m³/s (Frühjahr 1982). Der Minimalwert am Pegel Hafenlohr betrug etwa 0,19 m³/s (Winter 1985/1986) und am Pegel Breitfurt etwa 0,15 m³/s (Herbst 1983, 1989 und 1990).

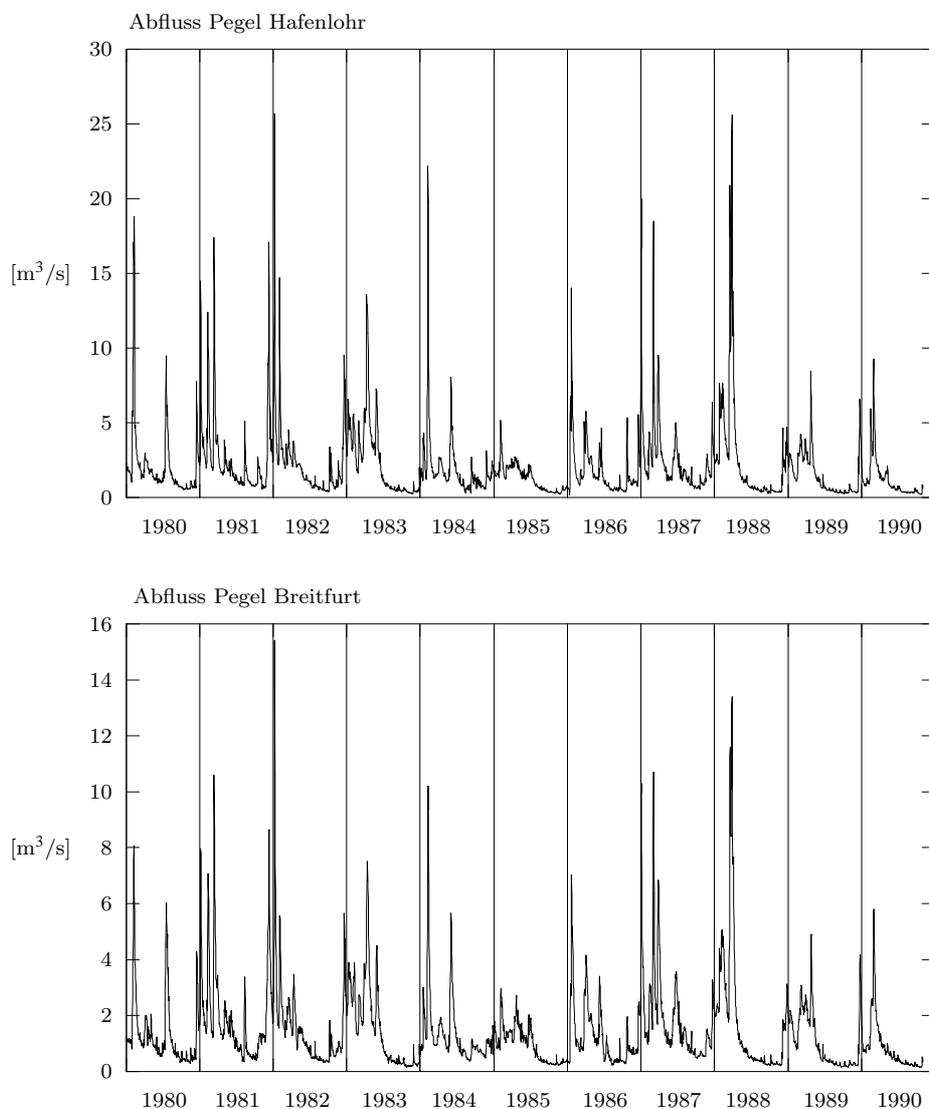


Abbildung 5: Abflussganglinie an den Pegeln Hafenlohr und Breitfurt.

4.5 Bisher ermittelte Grundwasserneubildung

Für benachbarte oder vergleichbare Untersuchungsgebiete finden sich in der Literatur zahlreiche Angaben zu Grundwasserneubildungsmengen, die nach verschiedenen Methoden ermittelt wurden (s. Tab. 7).

4.5.1 Berechnungen nach dem Abfluss an Vorflutern

Nach der Methode von ROTHASCHER (1987) beträgt die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Hafenlohr für den Zeitraum 1971–1984 im Mittel 122 mm und mindestens 49 mm. Die Berechnungen stützen sich auf Abflussmessungen des Pegels Hafenlohr.

MATTHESS & MURAWSKI (1978) berücksichtigen in ihren Berechnungen ebenfalls Direktzuflüsse zum Main sowie den Beitrag von Teilniederschlagsgebieten ohne oberirdischen Abfluss. Sie erhalten für den Buntsandstein-Spessart eine mittlere kleinste Grundwasserspense $minq_B$ von 3,5–4,2 l/(s·km²) (110–132 mm) und eine mittlere Grundwasserspense q_B von 6,5–7,8 l/(s·km²) (205–246 mm). Nach Abflussmessungen, die im Herbst 1969 im nördlichen Buntsandstein-Spessart (KEIWANLUNEJAD, 1973) und im Herbst 1971 im südlichen Buntsandstein-Spessart (SCHUBUTH, 1973) durchgeführt wurden, beträgt der Gesamtabfluss der 26 Wasserläufe rund 1.600 l/s und die mittlere Gebietsspense 2,4 l/(s·km²) (75,5 mm, MATTHESS & MURAWSKI, 1978).

Aus Abflussmessungen aus den Jahren 1970–1973 berechnet AL-AZAWI (1976) für das Einzugsgebiet des Rechtenbaches eine mittlere, jährliche, unterirdische Abflussspense von 4,1 l/(s·km²) (129,6 mm). Der Rechtenbach fließt nördlich der Hafenlohr und mündet bei Lohr in den Main. Die Ausgangsbedingungen für die Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Abflussmessungen können als vergleichbar betrachtet werden.

Für den Oberen Buntsandstein, den ein hoher Tonanteil kennzeichnet, können die Abflussmessungen am Krebsbach bei Erlach a. Main (nicht zu verwechseln mit dem Krebsbach bei Steinmark) als repräsentativ betrachtet werden. AL-AZAWI (1976) gibt dafür eine unterirdische Abflussspense von 1,5 l/(s·km²) (47,3 mm) an. Mögliche Abflüsse zum Vorfluter Main und gemäß dem Schichtfallen nach SE (entgegen der Fließrichtung des Krebsbaches) werden dabei nicht berücksichtigt.

Für das Main-Viereck gibt THEWS (1967) eine Mindestmenge der Grundwasserabflussspense von 2,3 l/(s·km²) (72,4 mm) an. Er stützt sich dabei auf von KALWEIT (1963) durchgeführte Abflussmessungen aus dem ausgeprägtem Trockenjahr 1962. THEWS (1967) rechnet aber mit einer beachtlichen Grundwassermenge die dem Main unmittelbar aus dem Grundwasserleiter zutritt, so dass er eine Grundwasserspense von 2,88 l/(s·km²) (90,6 mm) erhält.

4.5.2 Berechnungen aus Klimabilanzen

Aus der Klimabilanz für das Kartenblatt Lohr a. Main ermittelte SCHWARZMEIER (1980) eine mittlere Grundwasserspense von 2,26 l/(s·km²) (71,3 mm). AL-AZAWI (1976) errechnete aus Klimadaten der Messstation Steinbach (2 km ostnordöstlich Lohr a. Main) für die Jahre 1971–1973 eine mittlere Grundwasserneubildung von 86 mm (2,73 l/(s·km²)). Die Werte für die einzelnen Jahre sind jedoch starken Schwankungen unterworfen und geben nur den maximal für die Versickerung zur Verfügung stehenden Niederschlagsanteil an.

Tabelle 7: Zusammenstellung der Literaturwerte für die Grundwasserneubildung: A = Abflussmessungen / K = Klimabilanz.

Autoren	Methode	Stratigraphische Einheit	Zeitraum	Grundwasserneubildung		
					[l/(s·km ²)]	[mm]
Rothascher (1987)	A	s	1971/84	mind.	1,55	49
	A	s	1971/84	mitt.	3,87	122
IGI (1981)	?	su+sm	?	?	6,5	200
	?	so	?	?	1,0	31,5
Schwarzmeier (1980)	K	?	?	mitt.	2,26	71,3
Matthess & Murawski (1978)	A	s	1975	mind.	3,5–4,2	110–132
	A	s	1975	mitt.	6,5–7,8	205–246
Al-Azawi (1976)	K	?	1971/73	mitt.	2,73	86
	A	sm+so	1970/73	mitt.	4,1	129,6
	A	so	1970/73	mind.	1,5	47,3
Udluft (1971)	A/K	su+sm	?	mitt.	6,7–8,7	210–280
Thews (1967)	A	s	1962	mind.	2,3	72,4
	A	s	1962	mitt.	2,88	90,6

4.5.3 Gemischte Berechnungen und Schätzungen

Für den Bereich des Unteren und Mittleren Buntsandsteins des Mühlberges (Blatt 5923 Rieneck) schätzt IGI (1981, Quelle: HUBER, 1992) für die Grundwasserneubildung einen Wert von 200 mm (6,5 l/(s·km²)). Auf der Hochfläche des Mühlberges östlich Lohr a. Main nimmt IGI (1981, Quelle: HUBER, 1992) für das Hauptgrundwasserstockwerk eine Grundwasserspense von 1 l/(s·km²) aus dem Oberen Buntsandstein an.

Aus Abflussmessungen an der Sinn und Quellschüttungsmessungen sowie Klimadaten berechnet UDLUFT (1971) für den Mittleren und Unteren Buntsandstein des oberen Sinntales eine Grundwasserneubildung von 6,7–8,7 l/(s·km²) (210–280 mm). Für den Oberen Buntsandstein ergibt sich lediglich eine mittlere Flächenspense von 0,5 l/(s·km²) (15 mm), da nach UDLUFT (1971) der Plattensandstein im oberen Sinntal nicht als Wasserleiter anzusehen ist. Dagegen kann der Plattensandstein im östlichen Spessart als Grundwasserleiter fungieren. Folglich kann dieser Wert nach UDLUFT (1971) nicht auf das Untersuchungsgebiet übertragen werden.

5 Hydrogeologische Ausgangsdaten

5.1 Matrixeigenschaften

Zur Ermittlung der hydrogeologisch relevanten Matrixkenngrößen sollten aus jeder im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteinseinheit an mindestens einer Probe Porenraum, Wassergehalts–Saugspannungsbeziehung und Gesteinsdurchlässigkeit gemessen werden. Dies war nicht in allen Fällen möglich. Die schlechten Aufschlussverhältnisse erlaubten keine Probennahme für die Solling–Folge, Chirotherienschiefer und Röttonsteine. Sandsteine der Solling–Folge wurden bei der Modellierung als Teil der Hardeggen–Folge berücksichtigt. Röttonsteine kommen im Untersuchungsgebiet nur untergeordnet vor und wurden daher nicht für die Modellierung verwendet. Gleiches gilt für den Rötquarzit, von dem zwar Proben untersucht wurden, die Ergebnisse aber nicht weiter verwendet wurden. Für den Chirotherienschiefer wurden Daten der Unteren Röttone verwendet, die freundlicherweise von Herrn DR. PÖTZL zur Verfügung gestellt wurden und teilweise in PÖTZL (1998) dokumentiert sind. Bei den Chirotherienschiefern und den Unteren Röttonen handelt es sich jeweils um schluffige, teils sandige Tonsteine, die unter ähnlichen Bedingungen abgelagert wurden. Allerdings sind die Chirotherienschiefer feinblättrig ausgebildet im Gegensatz zu den schlecht geschichteten Röttonsteinen. Aus dem Mittleren Buntsandstein wurde für die Hardeggen– und Volpriehausen–Folge jeweils mindestens eine Probe für die Sandsteinfolgen und die Wechselfolgen untersucht.

5.1.1 Porenraum

Bisher existieren, speziell für das Untersuchungsgebiet und vergleichbare stratigraphische Abfolgen, nur wenige Untersuchungen über den Porenraum. MEISL (1965, Quelle: MATTHESS, 1970) ermittelte anhand von Dünnschliffen für Sandsteine aus dem Mittleren Buntsandstein Hessens Porositäten von 2,3–7,5% und für die mehr feinkörnigen, schluffigen Sandsteine des Unteren Buntsandsteins 6,1–15,4%. Gesteinsproben aus dem Einzugsgebiet der Fränkischen Saale liefern nach MÄRZ (1977) Durchschnittswerte von 12% für den Mittleren Buntsandstein, 13% für den Sollingsandstein, 15% für den Plattensandstein und 15% für den Rötquarzit. Für ungeklüftete Gesteinsproben aus dem Buntsandstein der Südrhön ermittelte UDLUFT (1971) die effektive Porosität n_e . Die Ergebnisse lagen zwischen 14% und 16% für den Unteren Buntsandstein, zwischen 8% und 19% für den Mittleren Buntsandstein und zwischen 13% und 26% für den Oberen Buntsandstein. Trotz dieses hohen Wasserspeichervermögens ist der Porenraum nach UDLUFT (1971) als schlecht wasserwegsam bzw. wasserstauend zu bezeichnen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde von 15 Proben der Porenraum nach der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode bestimmt (s. Tab. 8). Von einigen stratigraphischen Einheiten wurden zwei Proben untersucht; in diesem Fall sind die Proben jeweils nummeriert. In der Tabelle sind auch die Werte angegeben, die schließlich in das Rechenmodell übernommen wurden. Die Porositäten schwanken zwischen 10% (*smHS* und *smVW*) und 17% (*suSB/ST* und *suGD*). Im Gegensatz zu den Werten von UDLUFT (1971) sind in den untersuchten Proben die Porositäten im Unteren Buntsandstein etwas höher als im Mittleren und Oberen Buntsandstein.

Tabelle 8: Porositäten von Buntsandsteinproben aus dem Spessart.

Strati- graphische Einheit	ermittelte Porosität [%]	im Modell übernommene Werte
so4Q	11	- - -*
so2-1	13	14
so2-2	14	
smHF-1	12	12
smHF-2	12	
smHW	14	
smHS-1	10	
smHS-2	9	
smDS	15	15
smVW	10	11
smVS	13	
suSB/ST-1	17	17
suSB/ST-2	17	
suGD-1	17	17
suGD-2	17	

*Kommt in der Modellierung nicht vor.

PÖTZL (1998) gibt für die Unteren Röttone Porositäten zwischen 21 und 39% an. Für die Chirotherien-schiefer (so1) wurde eine Wert von 30% übertragen.

5.1.2 Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung

Die Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung der Sandsteinproben wurde anhand von 15 Proben ermittelt. Das Probenmaterial ist identisch mit dem aus der Porositätsbestimmung. Zunächst wurden die Wassergehalte bei verschiedenen Saugspannungen nach der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methode bestimmt und anschließend durch Kurvenanpassung die Kenngrößen nach VAN GENUCHTEN (1980), α , n und θ_r berechnet (s. Kap. 2.2.1). Die gemessenen Werte sowie die angepassten Kurven sind in den Anlagen 7 bis 11 graphisch dargestellt. Die Entwässerung bei steigenden Saugspannungen verläuft unterschiedlich. In den Proben aus dem Oberen und Unteren Buntsandstein findet die Entwässerung jeweils innerhalb einer relativ geringen Saugspannungsänderung statt. Die Entwässerungskurven fallen daher steil ab. Ähnlich verhalten sich aus dem Mittleren Buntsandstein nur die Proben *smHW*, *smVS* und *smVW*. Die übrigen Proben zeigen eine flache Entwässerungskurve; besonders flach sind die Kurven der beiden Proben *smHF-1* und *smHF-2*. Bei diesen beiden Proben setzte auch die Entwässerung am frühesten ein. Bei einer angelegten Saugspannung entsprechend etwa 3 m Wassersäule (mWS) behalten die meisten Proben Sättigungswerte zwischen 50% und 100%. Nur bei den Proben *smVW*, *smVS*, *smHF-2* und *so2-1* ist dann die Sättigung bereits auf 30% bis 40% gesunken. In Tabelle 9 sind die Werte für α , n und θ_r zusammengefasst.

Tabelle 9: α -, n - und θ_r -Werte für Buntsandsteinproben aus dem Spessart.

Strati- graphische Einheit	ermittelte Werte			im Modell übernommene Werte		
	α [N]	n [N]	θ_r [%]	α [N]	n [N]	θ_r [%]
so4Q	0,34	3,19	2	---*	---*	---*
so2-1	0,10	34,59	13	0,09	4,25	6
so2-2	0,09	4,25	6			
smHF-1	0,87	1,36	7	0,51	2,25	5
smHF-2	3,18	1,26	11			
smHW	0,33	3,74	5			
smHS-1	0,33	1,64	1			
smHS-2	5,49	1,31	2	0,31	1,40	3
smDS	0,31	1,40	3			
smVW	0,68	2,34	5			
smVS	0,60	2,54	6	0,64	2,44	5
suSB/ST-1	0,29	3,46	6	0,29	3,46	6
suSB/ST-2	0,75	1,77	4			
suGD-1	0,30	2,19	6	0,25	2,21	5
suGD-2	0,25	2,21	5			

*Kommt in der Modellierung nicht vor.

In den rechten Spalten der Tabelle 9 sind die Werte angegeben, die für die Modellrechnungen verwendet werden. Die daraus berechneten Wassergehalts-Saugspannungskurven sind in der Anlage 12 dargestellt. Wurden aus einer Schichtfolge zwei Proben gemessen, so wird die Probe berücksichtigt, für die die bessere Kurvenanpassung möglich war. Für die zur Berechnung zusammengefassten Schichtfolgen wird jeweils der Mittelwert verwendet. Den Chirotherienschiefern werden Werte zugeordnet, die denen der Unteren Röttone entsprechen. Sie betragen nach PÖTZL (freundl. mündl. Mitteilung) für $\alpha=0,152$ 1/m und $n=1,17$.

5.1.3 Gesteinsdurchlässigkeit

Anhand von Buntsandsteinproben aus dem nordhessischen Buntsandsteinbecken ermittelte MATTHESS (1970: Tab. 3) mittlere k_f -Werte von $7,0 \cdot 10^{-9}$ m/s bis $9,6 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Solling-Folge, $5,0 \cdot 10^{-9}$ m/s bis $4,1 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Hardegsen-Folge und $9,2 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Detfurth-Folge. Größere Durchlässigkeiten kennzeichnen dabei die sandigere (mittelkörnige) Fazies des Beckenrandes, während die geringeren Durchlässigkeiten von den zunehmenden tonig-schluffigen Lagen zum Beckeninneren geprägt werden. MATTHESS (1970: 31) kommt damit auf einen Anteil der Porenwasserbewegung an der gesamten Grundwasserbewegung von bis zu 20%. Derartig hohe Anteile sind nach Ansicht von HUBER (1992: 172) „petrofaziell durch relative Bindemittelarmut und gröbere Kornschüttung begründet“. Diese Bedingungen lassen sich seiner Meinung nach nicht auf sein Arbeitsgebiet bei Erlach a. Main übertragen.

Umfangreiche Untersuchungen zur Quantifizierung der Gesteinsdurchlässigkeit an 27 Proben aus dem Buntsandstein der Südrhön wurden von UDLUFT (1971: Tab. 2) durchgeführt. Der k_f -Wert wurde dabei

Tabelle 10: k_f -Werte für Buntsandsteinproben der Rhön und südlich angrenzender Gebiete nach UDLUFT (1971) und MÄRZ (1977).

Autoren	Stratigraphische Einheit	Anzahl der Proben	k_f -Wert zur Schichtung [m/s]	
			parallel	senkrecht
UDLUFT	so	2	$3,2 \cdot 10^{-11}$	
MÄRZ	so4Q	1	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
MÄRZ	so2	1	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
UDLUFT	smS	8	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$7,0 \cdot 10^{-10}$
			bis $1,2 \cdot 10^{-7}$	bis $4,6 \cdot 10^{-8}$
MÄRZ	smS	1	$5,0 \cdot 10^{-8}$	
			bis $4,2 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$
UDLUFT	smV–smH	14	$8,0 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$
			bis $4,8 \cdot 10^{-8}$	bis $3,2 \cdot 10^{-9}$
UDLUFT	su	3	$6,0 \cdot 10^{-8}$	
			bis $9,0 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-9}$

sowohl schichtparallel als auch senkrecht zur Schichtung angegeben. In gleicher Art und Weise präsentiert MÄRZ (1977) seine Daten aus dem Einzugsgebiet der Fränkischen Saale. Die Ergebnisse von UDLUFT und MÄRZ sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Demnach ist die Durchlässigkeit parallel zur Schichtung etwa 1 bis 2 Zehnerpotenzen höher als senkrecht zur Schichtung. Diese Anisotropie gilt nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978) sicherlich für den gesamten Buntsandstein der Südrhön.

Gut vergleichbar mit dem Einzugsgebiet der Hafenlohr sind Permeabilitätsmessungen von MATTHESS & MURAWSKI (1978) an Proben aus der Bohrung Dorfprozelten DS 2 am Südrand des Spessarts. Die Werte liegen zwischen $1 \cdot 10^{-9}$ und $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Die niedrigen Gesteinsdurchlässigkeiten lassen den Schluß zu, dass im Bereich der Bohrung quantitativ bedeutsame Grundwasserbewegung nur auf den Trennfugen der Buntsandsteinschichten stattfindet (MATTHESS & MURAWSKI 1978). Aufgrund der petrographisch einheitlichen Ausbildung und der gleichen tektonischen Lage kann diese Aussage auch auf das Einzugsgebiet der Hafenlohr übertragen werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden für 10 Proben die k_f -Werte senkrecht zur Schichtung bestimmt. Im Spessart ist die Schichtlagerung etwa horizontal und da für die Versickerung im wesentlichen die vertikale Durchlässigkeit ausschlaggebend ist, ist in erster Linie die Durchlässigkeit senkrecht zu Schichtung von Bedeutung. Die k_f -Werte der Proben wurden entsprechend der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode bei verschiedenen hohen Durchströmungsdrücken senkrecht zur Schichtung gemessen. Ähnlich wie bei UDLUFT (1974) steigt im Mittel der Durchfluss überproportional mit dem angelegten Druck an. Folglich ergeben sich bei höheren Durchströmungsdrücken größere k_f -Werte. Dieser Zusammenhang ist in der Anlage 13 dargestellt. Die Messungen der Proben aus dem Einzugsgebiet der Hafenlohr (s. Tab. 11) ergaben

Tabelle 11: Gesteinsdurchlässigkeiten von Buntsandsteinproben aus dem Spessart.

Stratigraphische Einheit	gemessene k_f -Werte [m/s]		im Modell übernommene Werte
	min.	max.	
so4Q	$7,5 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	- - -*
so2	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
smHF	$2,9 \cdot 10^{-10}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
smHW	$9,8 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$	
smHS	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	
smDS	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
smVW	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
smVS	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$	
suSB/ST	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
suGD	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$

* Kommt in der Modellierung nicht vor.

vergleichbare Werte zu den Ergebnissen von UDLUFT (1971) und MÄRZ (1977). Vergleichsweise hohe Durchlässigkeiten weisen die Proben aus dem Unteren Buntsandstein auf; relativ gering durchlässig sind dagegen die Proben aus dem Oberen Buntsandstein. Die Durchlässigkeiten der Proben aus dem Oberen Buntsandstein liegen etwa um den Faktor 5 bis 10 unter denen aus dem Unteren Buntsandstein.

Für die in das Strömungsmodell übernommenen Werte wurden die k_f -Werte herangezogen, die beim niedrigsten angelegten Druck (0,5 bar) ermittelt wurden. Die niedrigsten Druckstufen entsprechen am besten den natürlichen Bedingungen. Für die zusammengefassten Schichtfolgen wurde der daraus folgende Mittelwert berechnet. Die gesättigte Durchlässigkeit für die Chirotherienschiefer (*so1*) wird mit $9,0 \cdot 10^{-10}$ m/s angesetzt. Dieser Wert entspricht einem Durchschnittswert, wie er von PÖTZL (freundl. mündl. Mitt.) für die Unteren Röttone ermittelt wurde.

5.1.4 Ungesättigte Gesteinsdurchlässigkeit

Die ungesättigte Durchlässigkeit k_{fu} wurde mit der Gleichung (12) nach VAN GENUCHTEN (1980) berechnet. Die Berechnungen stützen sich auf die ermittelten Kenngrößen für den k_f -Wert sowie die Werte für α , n und θ_r .

Bei den untersuchten Proben ändert sich im allgemeinen die ungesättigte Durchlässigkeit k_{fu} bei steigenden Saugspannungen, d.h. bei sinkenden Wassergehalten zunächst nicht oder nur sehr geringfügig (s. Anl. 14). Hat die Saugspannung dann allerdings einen bestimmten Wert erreicht, so sinkt die Durchlässigkeit rasch und kontinuierlich auf einen sehr kleinen Wert; der Porenraum wird dann praktisch wasserundurchlässig. Im speziellen Fall unterschieden sich die Durchlässigkeitsverhalten der Gesteine allerdings z.T. erheblich. Zunächst kann der Beginn des Abfalls der Durchlässigkeit für die Beschreibung herangezogen werden. Bei den meisten Proben setzt das Absinken der Durchlässigkeit bei Saugspannungen von 0,5 bis 2 mWS ein. Eine Ausnahme bilden die Proben *so1*, *so2* und *smD*. Während bei der Probe *so2* die

ungesättigte Durchlässigkeit erst bei einer angelegten Saugspannung von etwa 5 mWS sinkt, ist dies bei *so1* und *smD* bereits bei einem Wert von etwa 0,1 mWS der Fall. Für beide Horizonte *so1* und *smH* wurde annähernd die gleiche gesättigte Durchlässigkeit ermittelt (s. Tab. 11). Bei sinkenden Wassergehalten, also steigender Saugspannung, behält aber der Plattensandstein (*so2*) viel länger diese Durchlässigkeit bei als die Sandsteine der Hardeggen-Folge (*smH*). Ursache hierfür ist die in der Hardeggen-Folge schon bei Saugspannungen ab etwa 0,9 bis 1,0 mWS einsetzenden Entwässerung. Durch einen höheren Anteil kleiner Porendurchmesser kann im Plattensandstein die Sättigung bis zu Saugspannungen von über 2 mWS aufrecht erhalten werden. Bei der Beurteilung der Versickerungsvorgänge im Untergrund ist also neben der gesättigten Durchlässigkeit auch das Verhalten der ungesättigten Durchlässigkeit bei steigenden Saugspannungen zu beachten.

5.2 Kluftraumeigenschaften

Die Grundlage für die Festlegung der Kenngrößen für den Kluftraum bilden die Ergebnisse der Untersuchungen nach Kapitel 4.3 sowie Literaturwerte und die Auswertung vorliegender Daten für die Gebirgsdurchlässigkeit.

5.2.1 Kluftvolumen

Kluftvolumina wurden von SCHUBUTH (1973) in Oberflächenaufschlüssen im Buntsandstein des Mainvierecks zwischen Lohr und Aschaffenburg zu 0,1 bis 5,2% ermittelt. In den Auflockerungszonen ergaben sich Kluftvolumina zwischen 2 und 5%.

UDLUFT (1971) berechnete das Kluftvolumen im Mittleren Buntsandstein der Südrhön zu 0,2 bis 0,6% und nimmt an, dass ab einer bestimmten Tiefe (80 bis 100 m) die geomechanische Entspannungszone unterschritten wird, wodurch sich in Bereichen unter dieser Tiefe nutzbare Kluftvolumen-Werte um und unter 0,1% einstellen.

Für den Mittleren Buntsandstein des Nagoldtales im Schwarzwald gibt EISSELE (1966) aus Übertagemessungen ein Kluftvolumen von 0,65% an, während er für größere Gebirgskomplexe mit einem hydrologisch nutzbarem Hohlraumanteil in der Größenordnung um 0,1% rechnet.

Mit Hilfe des Austrocknungskoeffizienten nach Maillet ermittelte UDLUFT (1972) in der Gelnhausen-Folge des Unteren Buntsandsteins im Einzugsgebiet der Lohr einen Wert von 0,13% innerhalb einer Fehlergrenze von 0,07% bis 0,18%. Wesentlich niedriger liegt das Kluftvolumen für den höheren Mittleren und den Oberen Buntsandstein, das MÄRZ (1977) mit 0,02% angibt. Dieser Wert kann durchaus als unterster Grenzwert und ein Kluftvolumen von 0,60% als oberster Grenzwert für den Buntsandstein aus dem Sinn-Saale-Gebiet angenommen werden (GEORGOTAS & UDLUFT 1978: Tab. 14).

HUBER (1992) gibt nach Messungen an Oberflächenaufschlüssen für den Mittleren Buntsandstein Kluftvolumen von 1,6% und für den Unteren Buntsandstein von 3,6% an. Auch er vermutet eine Verringerung des Kluftvolumens durch Schließung der Trennfugen zur Tiefe hin.

Tabelle 12: Ergebnisse der Berechnung des entwässerbaren Kluftraumes nach UDLUFT (1972).

		Abflusszeitraum		
		27.03.1988 bis 12.10.1988	23.04.1989 bis 11.12.1989	01.03.1990 bis 28.10.1990
Q_0	$[m^3/s]$	0,75	0,40	0,45
Q_t	$[m^3/s]$	0,38	0,26	0,29
Δt	[d]	200	200	200
α_M	$[s^{-1}]$	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$
V_e	$[m^3]$	$2034 \cdot 10^7$	$2034 \cdot 10^7$	$2034 \cdot 10^7$
n_K	[%]	0,09	0,08	0,09

Für das Einzugsgebiet der Hafenlohr kann anhand der Abflussmessungen am Pegel Hafenlohr mit der Methoden nach UDLUFT (1972) der entwässerbare Kluftraumanteil n_K bestimmt werden. Oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet unterscheiden sich nur geringfügig; auch eine merkliche Variation des Einzugsgebietes mit wechselnden Grundwasserstände ist nicht anzunehmen (s. Kap. 4.4.2). Eine differenzierte Betrachtung für verschiedene Auffüllungszustände ist daher nicht notwendig. Basis des Grundwasserleiters ist der Bröckelschiefer. Auf Grundlage des konstruierten Grundwassergleichenplanes (s. Anl. 3) errechnet sich das wassererfüllte Gesteinsvolumen V_e zu $2034 \cdot 10^7 m^3$. Für den Zeitraum zwischen 1980 und 1990 kann für drei Zeitabschnitte, die genügend lang unbeeinflusst von Sickerwasser waren, der Austrocknungskoeffizient α_M ermittelt werden. Die fraglichen Abflusskurven erfassen die Zeitspannen vom 27.03. bis 12.10.1988, 23.04. bis 11.12.1989 und 01.03. bis 28.10.1990. Aus ihnen werden die erforderlichen Werte für Q_0 (maximale Schüttung zur Zeit t_0) und für Q_t (Schüttung nach Δt Tagen) ermittelt. Für Δt wurde ein Zeitraum von 200 Tagen angesetzt. Bei Austrocknungskoeffizienten zwischen $1,60 \cdot 10^3$ und $3,40 \cdot 10^3$ 1/s errechnet sich das Kluftvolumen zu 0,08% bis 0,09% (s. Tab. 12). Diese Werte dienen als Rahmengrößen für die weiteren geohydraulischen Berechnungen unterhalb der oberflächennahen Auflockerungszone.

5.2.2 Gebirgsdurchlässigkeit

Die Auswertung von Pumpversuchen im Mittleren Buntsandstein der Merseburger Buntsandsteinplatte (HAUTHAL, 1967) lieferte Gebirgsdurchlässigkeitswerte von gemittelt $k_f=4,5 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Hardegsen-Folge und $k_f=3,2 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Detfurth-Folge und den oberen Teil der Volpriehausen-Folge.

Zahlreiche Veröffentlichungen über Gebirgsdurchlässigkeiten liegen aus hessischen Buntsandsteingebieten vor. Die Ergebnisse von SCHRAFT & RAMBOW (1984) bewegen sich für den Unteren Buntsandstein um $k_f=3,2 \cdot 10^{-6}$ m/s und für den Mittleren Buntsandstein zwischen $k_f=1 \cdot 10^{-7}$ und $3 \cdot 10^{-5}$ m/s mit einem Maximum bei $k_f=3,3 \cdot 10^{-6}$ m/s. Für das nordhessische Buntsandsteinbecken liefern Pumpversuche Transmissivitätswerte von $1,6 \cdot 10^{-4}$ bis $2,1 \cdot 10^{-3}$ m²/s (DÜRBAUM ET AL. 1969: Tab. 2), wobei die Transmissivität im Beckenrand zu größeren Werten tendiert.

Tabelle 13: k_f -Werte und Transmissivitäten aus Pumpversuchen im Sinn-Saale-Gebiet nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978) und im östlichen Rhön-Vorland nach PLÖTHNER (1979).

Stratigraphische Einheit	Autoren	k_f -Wert [m/s]	Transmissivität [m ² /s]
so	GEORGOTAS & UDLUFT	$7,38 \cdot 10^{-6}$	$8,08 \cdot 10^{-4}$
sm	GEORGOTAS & UDLUFT	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$7,20 \cdot 10^{-4}$
smH(+smS)	PLÖTHNER	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
smD+smH	PLÖTHNER	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$
smD	PLÖTHNER	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$
smV+smD	PLÖTHNER	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$

Nach der Auswertung von Literaturangaben und Pumpversuchen geben EINSELE & MERKLEIN (1978: 243) für den Buntsandstein Gebirgsdurchlässigkeits-Werte in einem Schwankungsbereich von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/s an. Die meisten Werte liegen jedoch zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ und $5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Aus zahlreichen Unterlagen zu Pumpversuchen im Sinn-Saale-Gebiet erstellten GEORGOTAS & UDLUFT (1978) eine Zusammenfassung der dort vorherrschenden k_f -Werte und Transmissivitäten für den Oberen und Mittleren Buntsandstein (s. Tab. 13).

Im Rahmen von hydrogeologischen Untersuchungen für die Bundesbahnneubaustrecke Hannover - Würzburg wurden zwischen Fulda und Gemünden a. Main Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit und zum Wasseraufnahmevermögen im Unteren und Mittleren Buntsandstein durchgeführt (KRIELE & MÄRZ 1981, IGI 1981: in: HUBER 1992). Die Autoren können daraus drei Bereiche unterschiedlicher Wasseraufnahme Q_{WD} differenzieren. Bohrungen mit einer Entfernung von mehr als 550 m vom Hangfuß weisen niedrige Q_{WD} -Werte auf. Dagegen zeigen Bohrungen, die innerhalb der 550 m abgeteuft wurden, wesentlich höhere Werte an. Die hohen Werte haben ihre Ursache in Hangzerreißungsklüften in den Talflanken, welche beim Auffahren der Bundesbahntunnel als Spalten mit Klaffweiten im dm-Bereich angetroffen wurden. Ein dritter Bereich mit niedrigen Q_{WD} -Werten umfasst Bohrungen, die zwar innerhalb von 550 m vom Hangfuß liegen, jedoch keine Hangzerreißungsklüfte angefahren haben.

Kurz- und Dauerpumpversuche lieferten nach KRIELE & MÄRZ (1981) Durchlässigkeitsbeiwerte für den hangfernen Bereich von $k_f=1 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s und im hangnahen Bereich von $k_f=5 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Im Buntsandstein des oberen Sinntales liegen die Transmissivitäten nach UDLUFT (1971: 372) in der Größenordnung von 10^{-3} m²/s, die in weniger kluffreiechen Zonen auf Werte um 10^{-4} m²/s absinken können. Transmissivitäten um oder kleiner 10^{-5} m²/s sind nicht bekannt, erscheinen aber nach UDLUFT (1971) außerhalb von Störungs- und Entspannungszonen möglich. Die Transmissivitäten im Buntsandstein des Bad Kissiger Raumes erreichen nach GEORGOTAS (1976: 12) Werte von $1,1 \cdot 10^{-4}$ bis $1,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Postuliert man eine Grundwassermächtigkeit von 100 m, so entsprechen die k_f -Werte der Buntsandsteinareale um die bayerische Rhön etwa 10^{-5} bis 10^{-7} m/s.

Im Rahmen seiner Untersuchungen über die Hydrogeologie des Buntsandsteins im östliche Rhön-Vorland wertete PLÖTHNER (1979) die Ergebnisse von Pumpversuchen an mehreren Versuchbohrungen und Brunnen aus. Vom Buntsandstein standen nur Daten aus der Hardeggen-, Detfurth- und Volpriehausen-Folge zu Verfügung. Die k_f -Werte liegen zwischen $2,3 \cdot 10^{-7}$ und $8,6 \cdot 10^{-6}$ m/s (s. Tab. 13).

Von IGI (1988) sind die Ergebnisse von Kurzpumpversuchen und Bohrlochtests aus dem Bereich des unteren Hafenlohrtals dokumentiert. Die k_f -Werte schwanken für den Bezugshorizont *suST* zwischen $4,35 \cdot 10^{-5}$ und $7,26 \cdot 10^{-5}$ m/s und für die Abfolge *suST-smVS* zwischen $1,13 \cdot 10^{-4}$ und $3,20 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Von vier Brunnen im Untersuchungsgebiet liegen Pumpversuchsaufzeichnungen vor. Der Brunnen der Gemeinde Bergrothenfels zwischen Windheim und Hafenlohr, erschließt überwiegend Sandsteine der Detfurth-Folge. Nach den Aufzeichnungen von BLWG (1961) läßt sich der k_f -Wert zu $3,20 \cdot 10^{-4}$ m/s berechnen. Vom Zweckverband zur Wasserversorgung Marktheidenfelder Gruppe wurden freundlicherweise die Aufzeichnung von drei Brunnen im Weihergrund (Heinrichsbachtal) zur Verfügung gestellt. Die Brunnen erschließen die Volpriehausenfolge und sind durch einen k_f -Wert von durchschnittlich $8,4 \cdot 10^{-5}$ m/s gekennzeichnet.

Neben Pumpversuchen bieten Wasserabpressversuche (WD-Versuche) die Möglichkeit zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Untergrundes (s. HUBER, 1992). Daten von WD-Versuchen, die im Rahmen der Untersuchungen zu einer Trinkwassertalsperre im Hafenlohrtal durchgeführt wurden, wurden freundlicherweise vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft überlassen. Die WD-Versuche wurden an 14 Bohrungen durchgeführt, die entlang eines Querprofils durch das Hafenlohrtal etwa 1,7 km nordwestlich der Einmündung des Wagenbaches in die Hafenlohr liegen (s. Anl. 3).

Aus den Ergebnisse eines Wasserabpressversuches läßt sich der k_f -Wert nach der Gleichung

$$k_f = \frac{Q_{WD}}{2\pi h L} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (27)$$

berechnen (PRINZ, 1982). Hierbei stellt L die Verpresslänge dar, h die Druckhöhe, r den wirksamen Brunnenradius und R die Reichweite des Wasserabpressversuchs. Der Wert für R ist eine empirische Größe und wird von PRINZ für Sandstein mit ca. 100 m angegeben. Angaben über die Bohrlochdurchmesser bei den WD-Versuchen liegen nicht vor; der Durchmesser dürfte sich aber in der Größenordnung üblicher Grundwassermessstellen bewegt haben und wird überschlägig mit 0,3 m angesetzt. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in der Tabelle 14 nach stratigraphischen Einheiten und Tiefen bis und über 50 m zusammengefasst. Prinzipiell bestehen bei der Durchführung des Wasserabpressversuches, der Deutung des Verpressvorganges und der Reichweite des Versuches „enorme Unsicherheiten“ (HUBER, 1992: 98). Die Berechnung des k_f -Wertes beruht darüberhinaus auf empirischen Werten für verschiedenen Festgesteine (s. dazu auch: HEITFELD, 1965 und SCHRAFT & RAMBOW, 1984). Die Ergebnisse der Auswertungen sind daher mit Vorsicht zu werten. Nach den Ergebnissen der WD-Versuche sind die Durchlässigkeiten in den Tiefen bis 50 m im Schnitt etwa um den Faktor 5 größer als unterhalb von 50 m.

Tabelle 14: k_f -Werte aus der Umrechnung von WD-Versuchen im Hafenlohrtal.

Stratigraphische Einheit	Tiefe	k_f -Werte [m/s]	
		von	bis
smD	über 50 m	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$
smVW	bis 50 m	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
smVW	über 50 m	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
smVS	bis 50 m	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
smVS	über 50 m	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
suST	bis 50 m	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$
suST	über 50 m	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$
suSB	über 50 m	$2,4 \cdot 10^{-8}$	

5.2.3 Grundlagen für weitere Berechnungen

Eine Ermittlung der Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung und der ungesättigten Durchlässigkeit des Klufttraumes durch Messungen im Gelände oder im Labor ist nicht möglich. Zum einen läßt sich die Saugspannung in einer Kluft nicht messen, zum anderen müßten für Labormessungen sehr große Gesteinsblöcke verwendet werden, um ein halbwegs repräsentatives Elementarvolumen zu erhalten. Nach WANG & NARASIMHAN (1985) können mit den Gleichungen (20) und (21) die ungesättigte Durchlässigkeit bzw. die Sättigung des Klufttraumes in Abhängigkeit von der Saugspannung berechnet werden. Grundlage der Berechnungen sind die im Gelände zu ermittelnden Kenngrößen **Kluftabstand**, **Kluftöffnungsweite** und **Kontaktflächenanteil** sowie die **gesättigte Durchlässigkeit** und der **Kluftraumanteil**. Unmittelbar Eingang in die Formeln nach WANG & NARASIMHAN (1985) finden nur Kluftabstand, Kontaktflächenanteil und gesättigte Durchlässigkeit. Kluftöffnungsweite und Kluftraumanteil ermöglichen eine gegenseitige Absicherung der ermittelten Werte für Kluftabstand und gesättigte Durchlässigkeit. Aufgrund der Inhomogenitäten des Klufttraumes werden Kontrollrechnungen auf zwei voneinander unabhängigen Wegen durchgeführt. Hierfür bieten sich die Abhängigkeiten des Kluftraumanteils und der Durchlässigkeit des Klufttraumes von Kluftabstand und -öffnungsweite an.

Der durchflusswirksame Hohlraumanteil n_{Ki} einer Kluftschar ist nach SEILER (1977) der Quotient aus mittlerer Öffnungsweite $2b_i$ und mittlerem Kluftabstand d_i .

$$n_{Ki} = \frac{2b_i}{d_i} \quad (28)$$

Der gesamte nutzbare Kluftraumanteil n_K errechnet sich aus der Summation der Anteile der einzelnen Kluftscharen.

$$n_K = \sum_{i=1}^n n_{Ki} \quad (29)$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f kann für laminare Strömung parallel in Klufttrichtung i unter hydraulisch glatten Bedingungen nach der Gleichung

$$k_{fi} = \frac{g}{12\nu} \frac{(2b_i)^3}{d_i} \quad (30)$$

berechnet werden (LOUIS, 1967). Hierbei ist g die Erdbeschleunigung und ν die kinematische Viskosität. Im vorliegenden Fall werden nur vertikale Kluftscharen berücksichtigt, die sich lediglich in ihrer Streichrichtung unterscheiden. Unter dieser Voraussetzung und unter Vernachlässigung der Schnittlinien zwischen den Kluftflächen können wiederum für die Durchlässigkeit des gesamten Kluft Hohlräum die einzelnen Durchlässigkeitsbeiwerte addiert werden.

$$k_f = \sum_{i=1}^n k_{fi} \quad (31)$$

Mit den Gleichungen (28) bis (31) können auf Grundlage vorgegebener Werte für die Durchlässigkeit des Klufttraumes k_f und den Klufttraumanteil n_K repräsentative Werte für Kluftöffnungsweiten und -abstände berechnet werden. Die nach den Kapiteln 4.3.4 und 4.3.6 gewonnenen Daten für Kluftöffnungsweiten und -abstände dienen dabei als Orientierungsgrößen.

Jeder stratigraphischen Einheit können somit die entsprechenden Kenngrößen für Durchlässigkeit, Kluftabstände und Kluftöffnungsweiten zugeordnet werden. Die Eigenschaften der Gesteinseinheiten werden zusätzlich entsprechend den beiden ermittelten tektonischen Zonen (s. Kap. 4.3.10) nach Ostteil und Westteil unterschieden (für folgende Beschreibungen kurz Ost und West). Außerdem wurde den oberflächennahen Auflockerungszonen ein höherer Zerrüttungsgrad und eine größere Gebirgsdurchlässigkeit zugeordnet. Die oberflächennahe Auflockerungszone erreicht nach KRAUSE (1966, zit. in MATTHESS, 1970) in Sedimentgesteinen Baden-Württembergs Mächtigkeiten zwischen 40 und 70 m. Für Buntsandsteingebiete geben EISSELE (1966) im Nordschwarzwald 20 - 30 m und SCHWARZMEIER (1980) im Spessart 50 - 90 m an. Nach den Ergebnisse der Wasserabpressversuche (s. Kap. 5.2.2) wird die Mächtigkeit der oberflächennahe Auflockerungszone im Untersuchungsgebiet auf 50 m festgelegt. Im folgenden und in den Anlagen wird der Bereich oberflächennaher Auflockerung auch mit „Hoch“ und der Bereich darunter mit „Tief“ bezeichnet.

Der Klufttraumanteil bewegt sich unterhalb der oberflächennahen Auflockerungszone um 0,09% (s. Kap. 4.3.10). Unter Annahme einer stärkeren tektonischen Zerrüttung im Bereich der Störungszone Rechtenbach-Marktheidenfeld (Ostteil des Untersuchungsgebietes) wird hier der Klufttraumanteil etwas höher und im übrigen Teil des Arbeitsgebietes etwas niedriger angesetzt. Innerhalb der Auflockerungszone sind sehr viel größere Klufttraumanteile zu erwarten. Sie können jedoch nur unter Berücksichtigung der Durchlässigkeiten geschätzt werden. Der Klufttraumanteil dürfte hier um 0,2% betragen.

Ausgangswerte für die Durchlässigkeiten des Klufttraumes sind die Gebirgsdurchlässigkeiten nach Kapitel 5.2.2. Die Durchlässigkeit des Klufttraumes kann im allgemeinen auch bei kombinierten Poren-Kluft-Grundwasserleitern der Gebirgsdurchlässigkeit gleichgesetzt werden. So geht MATTHESS (1970) davon

aus, dass die Gebirgsdurchlässigkeit bei allen Festgesteinen in der Regel von der Trennfugendurchlässigkeit bestimmt wird. Nach den Untersuchungen von UDLUFT (1971) erfolgt die Wasserbewegung im Buntsandstein der Südröhn in größerem Maße nur auf Klüften. Auch in den Sandsteinen des Spessarts findet nach MATTHESS & MURAWSKI (1978: 111) „eine quantitativ bedeutsame Wasserbewegung nur auf den Trennfugen der Buntsandsteinschichten“ statt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte aus Kapitel 5.2.2 für die jeweiligen stratigraphischen Einheiten wurden in folgender absteigender Reihenfolge gewichtet:

- Werte aus Pumpversuchen im Arbeitsgebiet,
- Werte aus WD-Versuchen im Arbeitsgebiet und/oder Pumpversuchen aus der Region für gleiche stratigraphische Einheiten,
- Werte aus Pumpversuchen und allgemeine Werte aus weiter entfernten Gebieten für gleiche stratigraphische Einheiten.

Es wird ebenfalls wieder davon ausgegangen, dass die Durchlässigkeit im Bereich der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld etwas größer ist als im übrigen Teil des Untersuchungsgebietes. In der oberflächennahen Auflockerungszone sind die Durchlässigkeiten wiederum deutlich größer anzusetzen als in tiefer liegenden Horizonten. Anhaltspunkte geben die Ergebnisse der WD-Versuche mit Durchlässigkeiten von maximal annähernd $8,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Wegen gleicher Charakteristik werden jeweils die Quer- und Längsklüfte sowie die beiden Diagonalkluftrichtungen zu einem Kluftsystem zusammengefasst.

In den Anlagen 21 bis 26 sind die nach diesen Vorgaben ermittelten Ausgangsdaten für die weiteren Berechnungen zusammengefasst. Die Unterscheidung nach oberflächennaher Auflockerung und tektonischer Zone hat größere Auswirkungen als die Unterscheidung nach stratigraphischen Einheiten. Dies liegt daran, dass die Auflockerung und die tektonische Zerrüttung mehr Einfluss auf die Kluftcharakteristik haben. Im tektonisch stärker beanspruchten Ostteil des Untersuchungsgebietes sind bei gleichen Kluftabständen die Kluftöffnungsweiten der Quer- und Längsklüfte in den tieferen Bereichen mindestens doppelt so groß wie die der Diagonalklüfte. Für den Westteil ergeben sich dagegen bei verschiedenen Kluftabständen geringere Differenzen der Kluftöffnungsweiten. Der Prozentanteil an der Gesamtdurchlässigkeit jedes Kluftsystems errechnet sich nach Gleichung (30) entsprechend den ermittelten Kenngrößen.

5.2.4 Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung

Die Wassergehalts–Saugspannungs–Beziehung für den Kluftraum läßt sich nach Gleichung (21) berechnen. Jede stratigraphische Einheit wird zusätzlich nach den tektonischen Zonen und nach oberflächennaher Auflockerung unterschieden. Die Kurzbezeichnungen dazu sind in Kapitel 5.2.3 beschrieben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Anlagen 15 und 16 dargestellt.

Die Kurvenverläufe sind sehr ähnlich und können in der Form mit denen der Matrix verglichen werden (s. Kap. 5.1.2). Im Gegensatz zur Matrix setzt die Entwässerung im Kluftraum allerdings schon bei Saugspannungen zwischen 0,01 und 0,1 mWS ein. Wie zu erwarten, beginnt die Entwässerung in der

oberflächennahen Auflockerungszone bei geringeren Saugspannungswerten als in den tieferen Bereichen. Die größeren Kluftöffnungsweiten entwässern wegen des geringeren kapillaren Rückhaltvermögens zuerst.

5.2.5 Ungesättigte Klufttraum-Durchlässigkeit

Die Berechnung der ungesättigten Durchlässigkeit erfolgt nach Gleichung (20). Die ungesättigte Durchlässigkeit sinkt sehr rasch auf Werte unter $1 \cdot 10^{-20}$ m/s ab (s. Abb. 6), wenn die Kluft bei zunehmender Saugspannung rasch entwässert wird und nur noch an den Kontaktstellen innerhalb der Kluft Wassersättigung vorhanden ist.

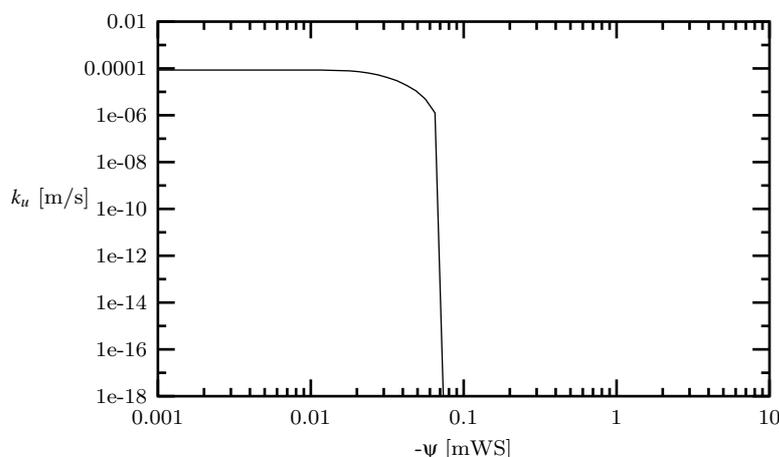


Abbildung 6: Beispielhafter Verlauf der ungesättigten Kluftdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung.

Die Ergebnisse der Berechnungen für das Untersuchungsgebiet sind in den Anlagen 17 und 18 dargestellt. Das rasche Absinken der ungesättigten Durchlässigkeit ist hier in tieferen Bereichen spätestens ab einer Saugspannung von etwa 0,3 mWS zu beobachten. In der oberflächennahen Auflockerungszone werden diese Durchlässigkeitswerte bereits bei geringeren Saugspannungen erreicht. Bei einigen Kurvenverläufen sind leichte Abstufungen zu erkennen (z.B. *smH*, Ost, hoch und tief). Diese treten ein, wenn sich die Kluftöffnungsweiten zwischen Quer- und Längsklüften einerseits und Diagonalklüften andererseits deutlich unterscheiden. Die Kluftscharen mit den größeren Öffnungsweiten sind dann bereits entwässert, die Durchlässigkeit sinkt praktisch auf null. Dagegen können die Kluftscharen mit den geringeren Öffnungsweiten noch Kapillarwasser zurückhalten, es verbleibt somit auch noch eine ungesättigte Restdurchlässigkeit. Aus den bezüglich der Saugspannung versetzten Entwässerungen resultieren dann die Abstufungen beim Verlauf der ungesättigten Durchlässigkeit des Klufttraums.

Tabelle 15: Kenngrößen der für die Modellrechnungen verwendeten Böden.

Strati- graphische Einheit	k_f -Wert [m/s]	α [1/m]	n []	θ_s [%/100]	θ_r [%/100]
so	$2,5 \cdot 10^{-5}$	1,33	1,35	0,48	0,04
smH	$8,1 \cdot 10^{-4}$	4,79	1,77	0,43	0,02
smD	$2,4 \cdot 10^{-5}$	8,08	1,36	0,46	0,04
smV	$5,4 \cdot 10^{-4}$	4,37	1,65	0,44	0,03
suS	$4,8 \cdot 10^{-4}$	2,89	1,66	0,44	0,02
suG	$8,9 \cdot 10^{-5}$	1,62	1,51	0,46	0,03

5.3 Bodenkennwerte

Kenngrößen für typische, im Untersuchungsgebiet vorkommende Böden sind in SCHWARZMEIER (1979) und WITTMANN (1967) veröffentlicht. Demnach sind im Untersuchungsgebiet im wesentlichen Braunerden mittlerer Entwicklungstiefen anzutreffen. Andere Böden kommen nur untergeordnet vor. Die Braunerden werden in der vorliegenden Arbeit nach dem Ausgangssubstrat, d.h. nach unterlagernder stratigraphischer Einheit unterschieden. Hierfür liefern die beiden genannten Veröffentlichungen genügend Daten. Die Daten liegen als Korngrößenzusammensetzungen des Feinbodens (<2 mm) vor. Aus diesen Daten wurden mit dem Programm „SOILPROP“ die gesättigte Durchlässigkeit, der Restwassergehalt und die VAN GENUCHTEN-Kenngrößen α und n berechnet. Der Sättigungswassergehalt wurden geschätzt. In der Regel sind die Unterschiede der Korngrößenzusammensetzungen zwischen den A-, B- und C-Horizonten der einzelnen Bodenprofile nur gering. Die Bodenkennwerte wurden daher jeweils über alle drei Horizonte gemittelt. Die Ergebnisse der Berechnungen, die gleichzeitig die Ausgangsdaten für die Modellrechnungen im Bodenhorizont darstellen, sind in der Tabelle 15 zusammengefasst. Für die Chirotherienschiefer wurden keine Bodenkennwerte erhoben, da aufgrund der geringen Schichtmächtigkeit die Ausbissbreiten nur sehr gering sind.

In den Anlagen 19 und 20 sind die berechneten Werte für den Wassergehalt θ und die ungesättigte Durchlässigkeit k_u der sechs Bodentypen, in Abhängigkeit von der Saugspannung dargestellt. Bei relativ hohen Saugspannungen und mit einer flachen Kurve setzt die Entwässerung beim Bodentyp *so2* ein. Im Gegensatz dazu steht der Bodentyp *smH*, dessen Entwässerungsvorgang bei geringeren Saugspannungen beginnt und auch wesentlich früher abgeschlossen ist. Bei einer Saugspannung von 10 mWS beträgt der Wassergehalt beim Bodentyp *so2* noch knapp weniger als die Hälfte des Sättigungswassergehaltes, während beim Typ *smH* fast schon der Restwassergehalt erreicht ist. Auch beim Verlauf der ungesättigten Durchlässigkeit lassen sich die verschiedenen Böden gut unterscheiden. Die Böden über *smH*-, *smV*- und *suS*-Horizonten zeichnen sich zwar durch vergleichsweise hohe gesättigte Durchlässigkeiten aus, die ungesättigte Durchlässigkeit k_u fällt in diesen Bodenprofilen jedoch rascher ab als in den anderen. Die beiden Bodentypen *so2* und *suG* weisen ähnliche Kurvenverläufe auf. Trotz der niedrigeren, gesättigten Durchlässigkeiten lassen sich für diese Typen ab Saugspannungswerten von etwa 3 mWS höhere k_u -Werte errechnen als für die drei erstgenannten Böden. Bei Saugspannungswerten um 3 mWS beträgt beispiels-

weise die Differenz zwischen den k_u -Werten vom *smV*- und *suG*-Bodentyp etwa 1 Zehnerpotenz. Einen flachen Kurvenverlauf zeigt auch der Bodentyp *smD*, allerdings ist hier die gesättigte Durchlässigkeit sehr gering und der Rückgang der Durchlässigkeit setzt schon bei niedrigen Saugspannungen ein. Der Schnittpunkt mit den Kurven anderen Bodentypen liegt daher erst bei Saugspannungen über 50 mWS.

6 Klimatologische Ausgangsdaten

6.1 Untersuchungszeitraum

Der Untersuchungszeitraum wurde von 01.10.1980 bis 31.12.1990 festgelegt. Er beträgt somit 11 Jahre oder 4018 Tage. Die Dauer von 11 Jahren sollte auch bei langsamen Sickergeschwindigkeiten und großen Flurabständen eine möglichst naturgetreue Modellierung der Sickerwasserbewegung und der Grundwasserneubildung ermöglichen. Über den Untersuchungszeitraum wurden Daten zu Niederschlag, Luftfeuchte und Temperatur erhoben. Die Daten wurden freundlicherweise vom Deutschen Wetterdienst, Wetteramt Nürnberg/Flughafen zu Verfügung gestellt.

6.2 Niederschlag

Für die Ermittlung der Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet standen die Tageswerte von vier Niederschlagsstationen zur Verfügung (s. Tab. 16). Die Stationen Rothenbuch und Einsiedel wurden während des Meßzeitraums von Anfang 1980 bis Ende 1990 verändert. Die Station Rothenbuch wurde am 01.01.1983 auf eine Stationshöhe von 360 m verlegt. Die Station Einsiedel wurde am 01.10.1987 verlegt und in Rothenbuch–Erlenfurt umbenannt. Für die weitere Benennung im Text wird die Bezeichnung „Einsiedel“ beibehalten. Die Veränderungen der beiden Stationen sind in Tabelle 16 dokumentiert.

Tabelle 16: Für das Einzugsgebiet der Hafenlohr relevante Niederschlagsstationen.

Stationsnummer	Stationsname	Stationshöhe [m+NN]	Gauß-Krüger-Koordinaten	
			Rechts	Hoch
73828	Rothenbuch	350	5536550	3528800
	ab 01.01.1983	360		
73832	Einsiedel	210	5532900	3536000
	ab 01.10.1987 Rothenbuch– Erlenfurt	248		
73833	Rohrbrunn	470	5529200	3528800
73836	Bischbrunn	411	5525500	3534800

Das Untersuchungsgebiet wurde mit der Methode der THIESSEN–Polygone in vier Niederschlagsgebiete aufgeteilt (s. Anl. 5). Damit während des Modellierungszeitraums die Aufteilung der Niederschlagsgebiete nicht geändert werden muß, wird für die Konstruktion der THIESSEN–Polygone die geographische Mitte der Koordinaten der Station 73832 verwendet. Die so vorgenommene Aufteilung bildet die Grundlage für sämtliche, klimatologisch relevanten Daten im Modellraum. Den höchsten Durchschnitt der jährlichen Niederschlagshöhen für die Jahre 1980 bis 1990 weist die Station Rothenbuch mit ca. 1094 mm

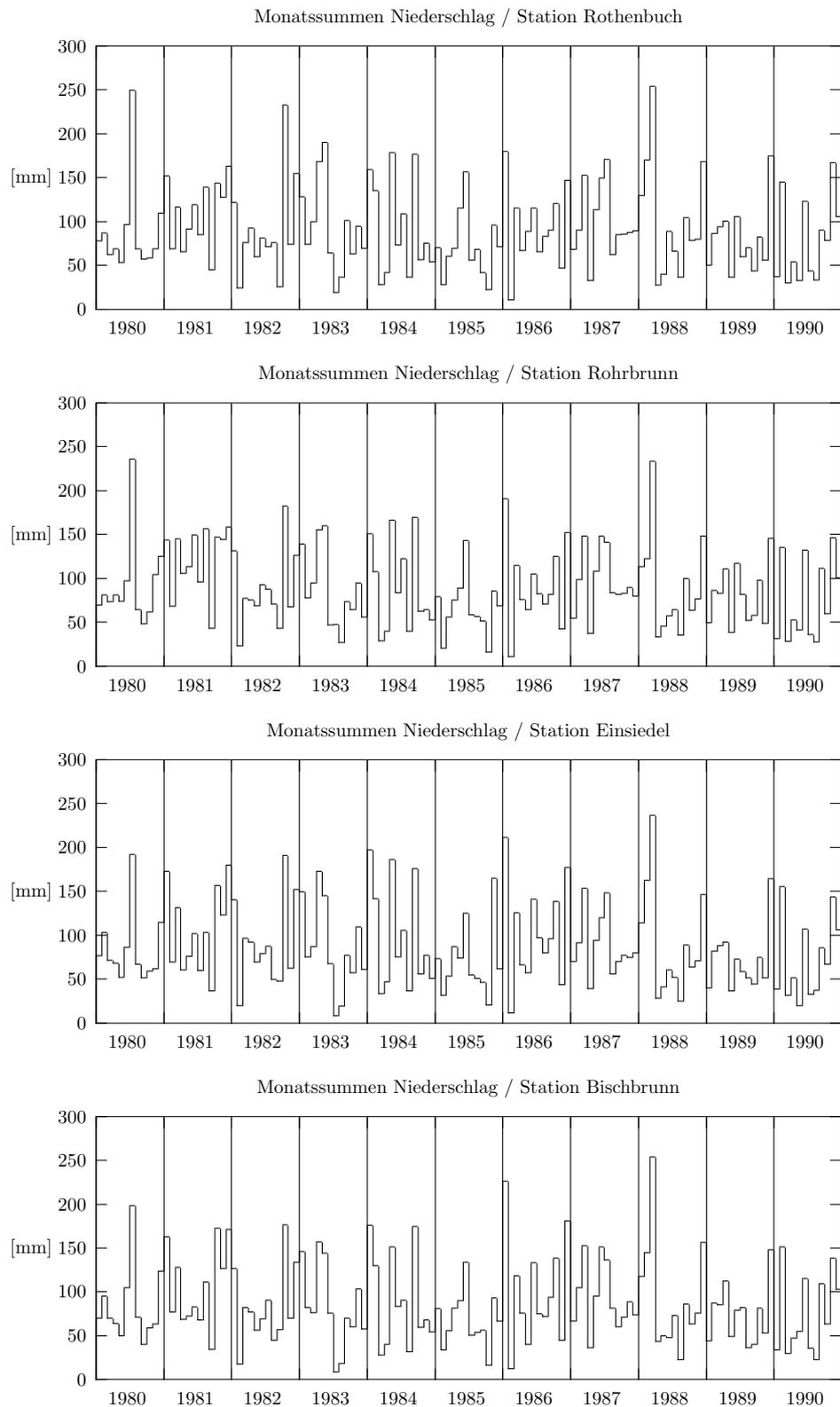


Abbildung 7: Monatliche Niederschlagshöhen zwischen 1980 und 1990 an den Stationen Rothenbuch, Rohrbrunn, Einsiedel und Bischbrunn.

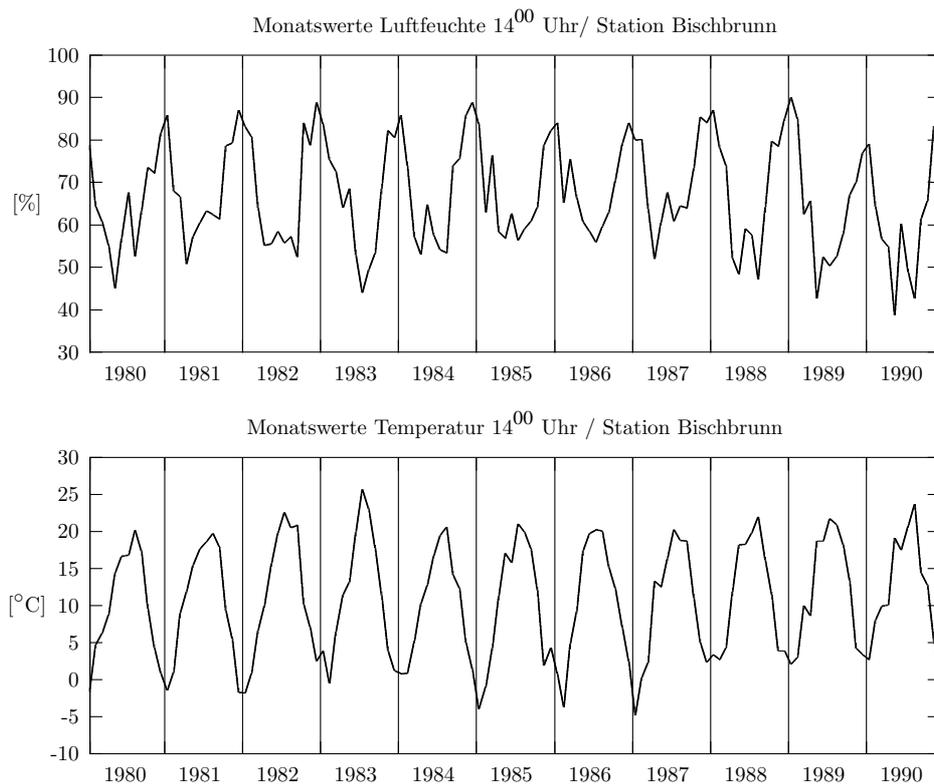


Abbildung 8: Monatsdurchschnittswerte für Temperatur und Luftfeuchte um 14⁰⁰ Uhr zwischen 1980 und 1990 an der Station Bischbrunn.

auf (s. Tab. 17). Die durchschnittliche Niederschlagshöhe liegt hier somit 54 mm über der der Station Bischbrunn, welche die geringsten Niederschlagshöhen aufweist. Insgesamt läßt sich feststellen, dass die Niederschlagshöhen an den vier Stationen von Nordwesten nach Südosten abnehmen.

Das Jahr 1981 war das niederschlagsreichste im untersuchten Zeitraum. Die Niederschlagshöhen lagen in diesem Jahr bei 121% (Rothenbuch) bis 137% (Rohrbrunn) des Durchschnitts von 1980 bis 1990. Weitere niederschlagsreiche Jahre waren 1984, 1986, 1987 und 1988. Das niederschlagsärmste Jahr war 1985 mit 75% (Rohrbrunn) bis 80% (Einsiedel) des durchschnittlichen Stationsniederschlages. Die Station Einsiedel weist die geringsten Schwankungen im Niederschlag auf und die Station Rohrbrunn die größten.

Der Vergleich der monatlichen Niederschlagshöhen (s. Abb. 7) zeigt eine gute zeitliche Übereinstimmung der Niederschlagsspitzen, wenn auch innerhalb der zeitlichen Deckungen noch Unterschiede von über 50 mm zwischen den Stationen auftreten können (z.B. Juli 1980, Rothenbuch und Einsiedel). Besonders hohe Winter- und Frühjahrsniederschläge waren in den Winterhalbjahren 1982/1983 und 1987/1988 zu verzeichnen. Besonders niederschlagsarm war das Winterhalbjahr 1984/1985.

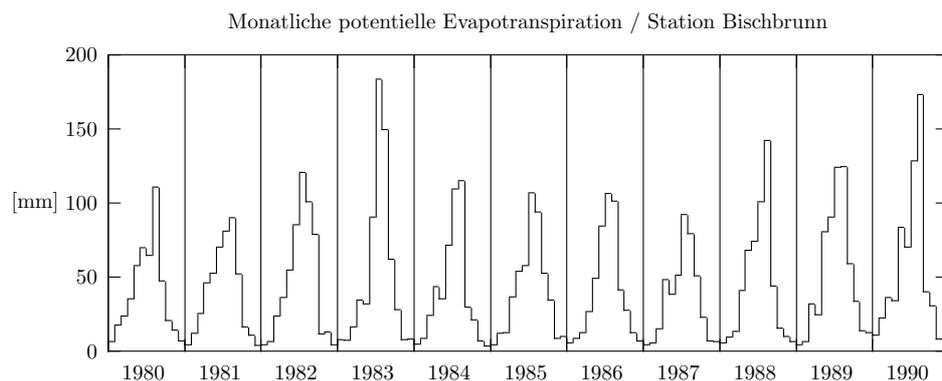


Abbildung 9: Monatliche potentielle Evapotranspiration zwischen 1980 und 1990 für das Niederschlagsgebiet der Station Bischbrunn.

6.3 Luftfeuchte und Temperatur

Tageswerte für die Luftfeuchtigkeit und Temperatur um 14 Uhr liegen für das Untersuchungsgebiet und dessen nähere Umgebung nur von der Station Bischbrunn vor. Auffällig bei den monatlichen Durchschnittswerten dieser beiden Größen (s. Abb. 8) sind vor allem die Jahre 1983 und 1990. In beiden Jahren lag die relative Luftfeuchte in den Sommermonaten deutlich unter den Werten der sonstigen Jahre.

Besonders im Sommer 1983 war die durchschnittliche, relative Luftfeuchte mit Werten unter 55 % über den Zeitraum von vier Monaten relativ niedrig. Gleichzeitig waren für die Jahre 1983 und 1990 hohe Durchschnittstemperaturen von bis zu 25°C (1983) zu verzeichnen. Unter den Winterhalbjahren ist 1988/1989 mit relativ hohen Luftfechtigkeiten und Durchschnittstemperaturen auffällig. Die weiteren Berechnungen für das gesamte Untersuchungsgebiet wurden alle mit den Werten der Station Bischbrunn durchgeführt.

6.4 Potentielle Evapotranspiration

Die potentielle Evapotranspiration ET_p stellt als Maximalwert für die Verdunstung neben dem Niederschlag eine wichtige Eingangsgröße für die Modellierung der Grundwasserneubildung dar. Die Berechnung der ET_p erfolgt mit dem Programm MODBIL (UDLUFT, 1992) auf der Grundlage von HAUDE (1952, 1958). Der Höhenfaktor wurde mit 0,6°C/100 m festgelegt. Entsprechend ihrem Einzugsgebiet wurden den Niederschlagsstationen folgende Gebietshöhen zugeordnet:

Rothenbuch	390 m+NN
Einsiedel	370 m+NN
Rohrbrunn	420 m+NN
Bischbrunn	330 m+NN

Da für die Berechnung der ET_p nur die Temperatur- und Luftfeuchtwerte einer Station (Bischbrunn) vorlagen, unterscheiden sich die errechneten Werte für die vier Stationen nur geringfügig voneinander (s.

Tabelle 17: Jahreshöhen für Niederschlag und potentielle Verdunstung der Stationen Bischbrunn, Einsiedel, Rohrbrunn und Rothenbuch.

Jahr	Bischbrunn		Einsiedel		Rohrbrunn		Rothenbuch	
	N [mm]	ET_p [mm]	N [mm]	ET_p [mm]	N [mm]	ET_p [mm]	N [mm]	ET_p [mm]
1980	1009	475	1006	471	1119	463	1060	467
1981	1275	464	1273	467	1472	452	1319	459
1982	1001	540	1090	539	1048	526	1093	533
1983	999	627	1031	617	1039	609	1110	614
1984	1087	474	1185	471	1091	461	1126	469
1985	811	483	846	483	802	470	857	477
1986	1211	483	1247	485	1117	471	1132	479
1987	1117	421	1077	426	1157	411	1189	420
1988	1134	531	1092	528	1096	519	1246	524
1989	898	606	859	595	972	588	963	593
1990	903	643	878	627	905	624	943	626
Schnitt	1041	523	1053	519	1074	509	1095	515

Tab. 17). In der Abbildung 9 werden daher nur die Monatssummen der potentiellen Verdunstung bezogen auf die Station Bischbrunn dargestellt.

Die höchste ET_p läßt sich für das Jahr 1990 berechnen, welches gleichzeitig eines der niederschlagsarmen Jahre war. Die potentiellen Verdunstungshöhen lagen in diesem Jahr bei 121% bis 123% des Durchschnitts von 1980 bis 1990. Für das relativ niederschlagsreichen Jahr 1987 läßt sich die niedrigste ET_p berechnen. Sie lag in diesem Jahr bei 81% bis 82% des Durchschnittswertes. Bei der Betrachtung der Monatswerte der ET_p fällt auf, dass der absolut höchste Wert im Juli 1983 auftrat, wobei im August ebenfalls noch hohe Werte für die potentielle Verdunstung zu verzeichnen waren. Die hohen Verdunstungen fallen mit sehr geringen Niederschlägen zusammen. Ähnliches läßt sich für den Sommer des Jahres 1990 beobachten, allerdings nicht so stark ausgeprägt.

7 Modellbeschreibung

7.1 Hydrogeologisches Modell

Anhand des hydrogeologischen Modells soll versucht werden, die geohydraulischen Kenngrößen, Quellen- und Senkenterme sowie die Rand- und Anfangsbedingungen so gut wie möglich quantitativ zu erfassen und zu schematisieren.

Die Geometrie des Modellraumes, in diesem Fall der ungesättigten Zone, läßt sich aus einem Standardprofil des Buntsandsteins im Spessart ableiten. Im Untersuchungsgebiet ist ein Hauptgrundwasserleiter ausgebildet, sowie zwei schwebende Grundwasserstockwerke. Unterer und Mittlerer Buntsandstein bilden das Hauptgrundwasserstockwerk mit den Bröckelschiefern als Grundwassersohlschicht. Getrennt durch die grundwasserstauenden Chirotherienschiefer ist über dem Hauptgrundwasserstockwerk das schwebende Grundwasserstockwerk des Plattensandsteins ausgebildet. Darüber folgt noch, mit den stauenden Unteren Röttonsteinen, der Grundwasserleiter des Rötquarzits. Die schwebenden Grundwasserstockwerke des Oberen Buntsandsteins sind im Untersuchungsgebiet nur im Südosten ausgebildet. Der Rötquarzit nimmt sogar nur einen schmalen Streifen im Süden um Oberndorf, Esselbach und bei Marienbrunn ein. Eine untergeordnete Rolle spielt der Porengrundwasserleiter der Talfüllungen der Hafenlohr. Dieser Porengrundwasserleiter korrespondiert weitgehend mit dem Hauptgrundwasserleiter. Im Untersuchungsgebiet entwässert der Hauptgrundwasserleiter gemäß dem Grundwassergleichenplan zur Hafenlohr. Entsprechend dem Schichteinfallen entwässert der Rötquarzit nach Südosten, also außerhalb des Untersuchungsgebietes. Der Plattensandstein wird weitgehend durch Krebsbach, Esselbach, Heinrichsbach und die Hafenlohr entwässert. Nur ein schmaler Streifen parallel zum Wagenbach hat keinen Anschluss an diese Vorfluter und entwässert ebenfalls gemäß dem Schichtfallen nach Südwesten.

Die Schichtfolgen werden nach den Untersuchungsergebnissen und entsprechend der stratigraphischen Einteilung in sieben Einheiten zusammengefasst. Aufgrund des geringen Flächenanteils mit Rötquarzit und Röttonen werden diese beiden Einheiten nicht berücksichtigt. Der Obere Buntsandstein wird in zwei Einheiten, den Plattensandstein und die Chirotherienschiefer, aufgeteilt. Das Hauptgrundwasserstockwerk umfasst die Einheiten des Mittleren und Unteren Buntsandsteins. Der Mittlere Buntsandstein wird in Hardeggen-, Detfurth- und Volpriehausen-Folge unterteilt und der Untere Buntsandstein in Salmünster- und Gelnhausen-Folge. Darunterliegende Einheiten treten im Untersuchungsgebiet nicht mehr in der ungesättigten Zone auf. In diesen fünf Einheiten des Mittleren und Unteren Buntsandsteins sind Sandsteinabfolgen und Sand-Tonstein-Wechselfolgen jeweils zusammengefasst. Die Tonhorizonte in den Wechselfolgen sind wenig ausgeprägt und lateral nicht aushaltend, woraus auch nur ein geringer Einfluss auf das Sickerverhalten resultiert, zumal bei dünnen und sandigen Tonlagen ein Verschmieren und Abdichten der Klüfte schon bei geringen Kluftversätzen praktisch nicht mehr möglich ist. Eine oberflächennahe Auflockerungszone wird entsprechend Kapitel 5.2.3 bis in eine Tiefe von 50 m vorgegeben.

Die Bodenkennwerte (s. Kap. 5.3) werden entsprechend den unterlagernden Gesteinseinheiten, d. h. dem Ausgangssubstrat zugeordnet. Neben den vorherrschenden Braunerden sind im äußersten Südosten des Untersuchungsgebietes Deckschichten aus Lösslehm anzutreffen. Diese sind aber im Vergleich zur Gesamt-

Tabelle 18: Jahreshöhen der Grundwasserneubildung für ein 10 m mächtiges Profil der Gelnhausen-Folge bei unterschiedlich mächtiger Bodenüberdeckung.

Boden- mächtigkeit [m]	Grundwasserneubildungshöhe pro Jahr [mm]					
	1980	1981	1982	1983	1984	1985
0,8	176,3	176,4	173,0	165,8	161,4	174,0
1,0	176,7	176,5	173,6	166,0	164,4	175,0
	1986	1987	1988	1989	1990	
0,8	173,4	175,2	170,3	168,3	164,4	
1,0	175,0	176,4	172,5	168,7	166,2	

fläche zu vernachlässigen. Für die Mächtigkeit des Bodens wurden einheitlich 0,8 m angenommen. Nach den Daten von WITTMANN (1967) und SCHWARZMEIER (1979) betragen die Mächtigkeiten in Mulden- und Hangfußlagen zwar bis über 1 m, Vergleichsrechnungen haben aber gezeigt, dass zusätzliche 0,2 m Boden kaum Auswirkungen auf die Grundwasserneubildungsmenge haben. Für ein 10 m mächtiges Profil der Gelnhausen-Folge sind die Jahressummen der Grundwasserneubildung als Ergebnis der Vergleichsrechnung in der Tabelle 18 dargestellt. Die Neubildungsmengen unterscheiden sich nur geringfügig, wobei die Werte bei einer Bodenmächtigkeit von 1,0 m etwas größer sind als bei 0,8 m. Ursache hierfür ist die Dämpfung der Infiltrationsspitzen bis zum Auftreffen auf das geringer durchlässige Festgestein. Dadurch fallen die Zwischenabflüsse im Bodenhorizont geringer aus und die Tiefenversickerung und in der Folge die Grundwasserneubildung werden größer.

Der Aufbau der ungesättigten Zone, wie er im Untersuchungsgebiet beispielhaft vorkommt, ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Die Mächtigkeit der ungesättigten Zone wurde aus der Differenz von Geländeoberfläche und Höhe des Grundwasserspiegels berechnet (s. Anl. 4 und Kap. 4.4.3). Dort wo das Sickerwasser auf geringer durchlässige Schichten trifft, kommt es zu einem Aufstau. Die größten Durchlässigkeitsunterschiede sind an der Grenze Boden – Festgestein zu verzeichnen, wo es dann bei Sättigung zu einem oberflächennahen Zwischenabfluss (Interflow, Q_{Z1}) kommt. Aber auch innerhalb der Festgesteinsabfolge können an den Grenzen der stratigraphischen Einheiten sowie am Übergang in Bereiche ohne oberflächennahe Auflockerung größere Durchlässigkeitsunterschiede auftreten. Hier kann es ebenfalls zu einem Aufstau des Sickerwassers und, zumindest zeitweise, zur Ausbildung schwebender Grundwasserstockwerke kommen. Unter diesen Bedingungen fließt dann das aufgestaute Sickerwasser ebenfalls lateral ab (Q_{Zi}).

Im Untersuchungsgebiet setzt sich die ungesättigte Zone unter dem Bodenhorizont aus geklüfteten Sand- oder Tonsteinen zusammen. Der Kluftraum läßt sich als Grundwasserleiter mit hoher gesättigter Durchlässigkeit und geringem Speichervermögen beschreiben. Dagegen stellt der Porenraum der Sand- und Tonsteine einen Grundwasserleiter mit geringer gesättigter Durchlässigkeit und hohem Speichervermögen dar. Den grundlegenden Unterschieden zwischen dem Poren- und dem Klufgrundwasserleiter wird durch getrennte Betrachtung in einem Zwei-Positivitätsmodell (s. Kap. 2.4) Rechnung getragen. Der Kluftraum wird dabei einem zweiten Porenraum mit sehr viel größeren Poren gleichgesetzt (Porenäquivalent).

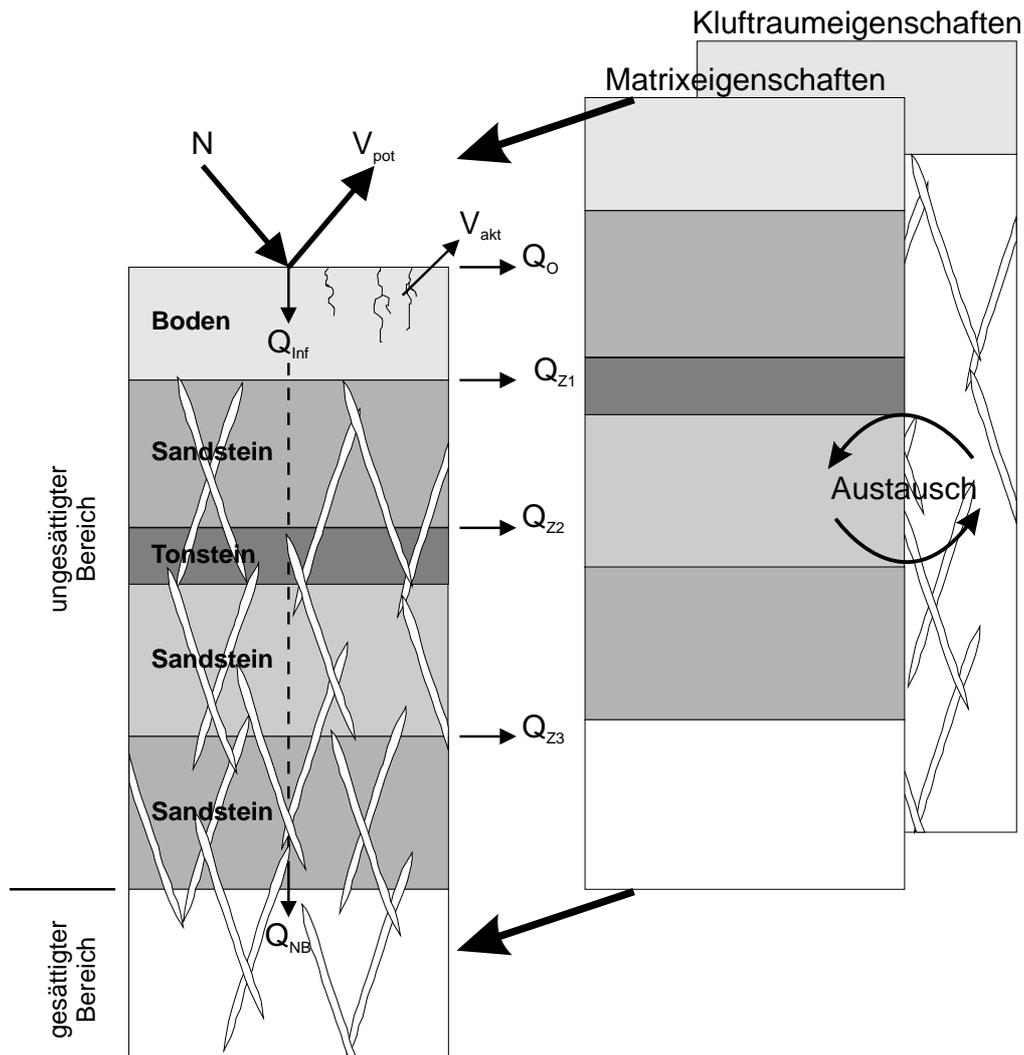


Abbildung 10: Hydrogeologisches Modell.

Die Festgesteinsmatrix sowie das Porenäquivalent des Klufttraums werden getrennt betrachtet und über noch zu ermittelnde Austauschfaktoren miteinander verknüpft. Der Ansatz nach dem „equivalent continuum modell“ (s. Kap. 2.4) wird nicht verwendet. Die Voraussetzung für ein ECM wie sie von WANG & NARASIMHAN (1985) für eine Modellierung ohne Berücksichtigung der Klüfte festgestellt wurde, nämlich dass der Übergang von teilgesättigten zu gesättigten Bedingungen außer Betracht bleiben kann, ist für den vorliegenden Fall nicht gegeben. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass hohe Durchflussraten auftreten und somit die Bedingungen für ein ECM nicht mehr erfüllt sind. Entsprechend der Voraussetzung, dass die Saugspannungen im Poren- und Kluftraum praktisch immer gleich sein sollen (s. Kap. 2.4), werden mittels des Austauschfaktors gleiche Saugspannungsverhältnisse angestrebt. Für die geohydraulischen Kenngrößen von Kluft- und Porenraum wurden jeweils die in den Kapiteln 5.1 und 5.2 ermittelten Werte angesetzt.

Die Wasserhaushaltsgleichung für das in Abbildung 10 vorgestellte Modell läßt sich wie folgt formulieren:

$$N = ET_a + Q_O + \sum_{i=1}^n Q_{Zi} + Q_{NB} + \Delta S, \quad (32)$$

wobei ΔS die Speicheränderung im System darstellt und ET_a die tatsächliche Evapotranspiration. Der Input in das System setzt sich aus dem Niederschlag abzüglich eines Teils der potentiellen Evapotranspiration zusammen. Die Evapotranspiration wird dabei, in Abhängigkeit von den Bedingungen, zu unterschiedlichen Teilen aus dem Niederschlag und durch Wurzelentzug aus dem Bodenwassergehalt gedeckt. Wesentlicher Faktor ist dabei die relative Höhe der Niederschläge gegenüber der Evapotranspiration (s. Tab. 19).

Tabelle 19: Aufteilung der Evapotranspiration in Abhängigkeit von der relativen Niederschlagshöhe.

Bedingung	Deckung der ET_a aus	
	Niederschlag	Bodenwasser
$N \geq ET_p$	50%	50%
$N < ET_p$	in Höhe von N	in Höhe $ET_p - N$
$N = 0$	0%	100%

Die tatsächliche Evapotranspiration ET_a errechnet sich aus den Anteilen der ET_p , die aus dem Niederschlag (Evaporation) und dem Bodenwasser (Transpiration über Pflanzen) gedeckt werden. Fällt genügend Niederschlag, so werden automatisch 50% der ET_p daraus gedeckt. Ist die Niederschlagsmenge kleiner als 50% der ET_p , so muss der verbleibende Anteil der ET_p aus dem Bodenwassergehalt gedeckt werden. Stellt der Boden bis zu einer Grenzsaugspannung nicht genügend Wasser zu Verfügung, so fällt ET_a kleiner aus als ET_p . Die Grenzsaugspannung entspricht dem permanenten Welkepunkt (PWP) als Untergrenze der nutzbaren Feldkapazität bei einem pF-Wert von etwa 4,2. Für die Tiefe, bis zu der die Transpiration wirken kann, werden für gesamte Untersuchungsgebiet als Durchschnittswert 0,4 m angesetzt. Bis etwa in diese Tiefe reichen nach Beobachtungen im Gelände durchschnittlich die Wurzeln der Bäume. Da der überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes bewaldet ist, wurde dieser Wert insgesamt übernommen. Der Wert entspricht nicht der effektiven Durchwurzelungstiefe, die die Untergrenze für die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität darstellt. Die effektive Durchwurzelungstiefe ist in der Regel größer als der verwendete Wert. Die zusätzliche Tiefe wird aber im Modell durch den kapillaren Aufstieg in den Wurzelraum erfasst.

In der vorliegenden Arbeit wird als Grundwasserneubildung Q_{NB} die Wassermenge bezeichnet, die dem gesättigten Bereich des Hauptgrundwasserstockwerkes zutritt. Die Zwischenabflüsse Q_{Zi} an den Schichtgrenzen, sowohl im Bodenhorizont als auch innerhalb der Festgesteinsabfolge, werden getrennt davon betrachtet. Entsprechend der DIN 4049 (1994) ist jedoch Grundwasserneubildung als Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser definiert, wobei wiederum Grundwasser als unterirdisches Wasser definiert ist, das Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. Demnach müßten die Zwischenabflüsse der Grund-

wasserneubildung zugeschlagen werden, da sie unter gesättigten Bedingungen, d. h. wenn die Hohlräume zusammenhängend gefüllt sind, auftreten. HÖLTING & REICHMANN (1996) merken dazu an, dass die Definition nach DIN 4049 nichts über eine Mindestausdehnung des Grundwasservorkommens aussagt oder über die Dauer der Auffüllung der Hohlräume. Das an den Schichtgrenzen aufgestaute Sickerwasser tritt in der Regel lokal und/oder zeitlich begrenzt als schwebendes Grundwasserstockwerk auf. Die Zwischenabflüsse gelangen direkt zu den Vorflutern oder ergänzen das Hauptgrundwasserstockwerk erst kurz vor Erreichen des Vorfluters. Insbesondere der Zwischenabfluss im Bodenhorizont setzt bereits nach kurzer Bodenpassage ein und fließt, an die Verwitterungszone gebunden, rasch dem Vorfluter zu. Da die Verwitterungszonen oberflächennah und der Geländemorphologie folgend ausgebildet sind, treten hier potentiell sehr hohe Fließgefälle auf. Dieser Zwischenabfluss (auch Interflow) erreicht, zusammen mit dem Oberflächenabfluss, den Vorfluter als Direktabfluss. Die Zwischenabflüsse in tiefer gelegenen Schichtgrenzen werden als Zwischenform des Interflows und der Grundwasserneubildung eingeordnet. Sie erreichen den Vorfluter ebenfalls schneller als die Zusickerung in das Hauptgrundwasserstockwerk und folgen bei der geringmächtigen Ausbildung der schwebenden Grundwasserstockwerke vorwiegend dem Einfallen des stauenden Horizonts, im Untersuchungsgebiet Hafenlohr also überwiegend Südosten. Der Interflow im Bodenhorizont und die Zwischenabflüsse an den Schichtgrenzen im Festgestein werden also der Grundwasserneubildung im Hauptgrundwasserstockwerk nicht zugeschlagen, da sie zeitlich und lokal nur begrenzt auftreten und dem Vorfluter schneller zufließen als die Neubildungsmengen aus dem Hauptgrundwasserstockwerk. Die getrennte Betrachtung der Zwischenabflüsse ermöglicht jedoch bei der Ergebnisinterpretation auch eine der DIN entsprechende Darstellung der Grundwasserneubildung.

7.2 Numerisches Modell

Aufgabe des numerischen Modells ist es, die Anforderungen aus dem hydrogeologischen Modell durch Schematisierung für die numerischen Berechnungen umzusetzen. Die Schematisierung ist dabei so vorzunehmen, dass sie leicht überschaubar und überprüfbar bleibt, um Fehler so gering wie möglich zu halten.

Die Umsetzung des numerischen Modells erfolgt durch ein eindimensionales, vertikales Strömungsmodell auf Grundlage der Finite-Differenzen-Methode. Die ungesättigte Zone wird dafür in Zellen aufgeteilt, wobei sich eine Gesteinseinheit bzw. der Bodenhorizont immer aus mehreren Zellen zusammensetzt. Die Höhe der Zellen Δz ist variabel und an den Schichtgrenzen und am oberen Rand verringert, um zu große Saugspannungsgradienten zu vermeiden. Der Input ist der Niederschlag, abzüglich des in Kapitel 7.1 beschriebenen Anteils der Evapotranspiration. Untere Begrenzung des Modellraumes ist der Grundwasserspiegel in der Tiefe der nach Kapitel 4.4.3 ermittelten Flurabstände. Die Grundwasserneubildung ist dann die Sickerwassermenge, welche, abzüglich des kapillar angestiegenen Grundwassers, in die unterste, gesättigte Zelle eintritt. Es kann vorkommen, dass sich die Zellen über der untersten, gesättigten Zelle ebenfalls bis zur Sättigung mit Wasser füllen. Dies entspricht einem Anstieg des Grundwasserspiegels. In diesem Fall wird ein lateraler Abfluss erzeugt, genau wie bei den Zwischenabflüssen an den Gesteinshorizonten, der der Grundwasserneubildung zugeschlagen wird.

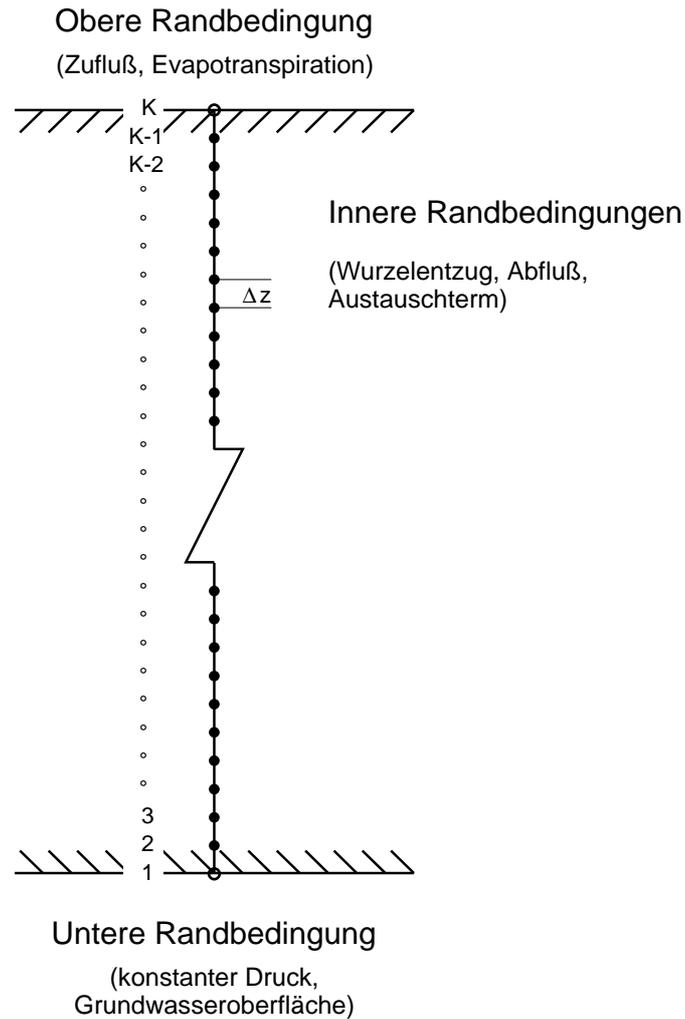


Abbildung 11: Numerisches Modell.

Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, basiert das verwendete Modell auf einem Zwei-Porosität-Ansatz. Für die Umsetzung werden Kluft- und Porenraum getrennt modelliert und über einen Austauschfaktor miteinander verbunden. Die Saugspannungen im Kluft- und im Porenraum sind stets bemüht sich auszugleichen (s. Kap. 2.4). Die Formulierung des Flusses von der Kluft in die Matrix basiert auf Untersuchungen von NITAO & BUSCHECK (1991). Die Autoren gehen davon aus, dass bei niedrigen Durchflussraten zunächst ein Einsickern aus der Kluft in die Matrix stattfindet, bevor der Fluss in der Kluft eine nennenswerte Tiefe erreicht hat. Bei hohen Durchflussraten kann allerdings vorübergehend auch ein starker Fluss in der Kluft stattfinden. In dem Ansatz nach NITAO & BUSCHECK kann der Austauschfaktor so formuliert werden, dass er die Größe des Durchflusses von der Kluft in die Matrix steuert. Ähnlich wird im vorliegenden Modell beim Austausch von der Matrix in den Kluftraum verfahren, allerdings wird die Gleichung für den Fluss einfacher nach dem Darcyschen Gesetz mit einem Austauschfaktor formuliert. Diese Terme werden für die vorliegenden Berechnungen so gewichtet, dass sich die Angleichung der beiden Saugspannungen möglichst rasch einstellt. Bei den Modellrechnungen hat sich allerdings gezeigt, dass der Austausch temporär einen hohen Fluss hervorrufen kann, wodurch es zu numerischen Oszillationen

kommt. Dies kann durch Verringerung des Flusses über den Austauschfaktor verhindert werden, wodurch allerdings wiederum die Angleichung der Saugspannungen verzögert wird. Je nachdem, ob der betrachtete (äquivalente) Porenraum Wasser an den zweiten (äquivalenten) Porenraum abgibt oder empfängt, geht der Austauschfluss in die numerischen Berechnungen als Senken- oder Quellenterm ein.

Der Bodenhorizont ist für beide Modellräume gleich und wird parallel berechnet. Wie Poren- und Kluftraum werden die parallel berechneten Bodenhorizonte über einen Austauschfaktor miteinander verknüpft.

An den Gesteinsgrenzen auftretende Zwischenabflüsse werden als Senkenterme in den Gleichungen berücksichtigt. Ebenfalls als Senkenterm geht der Anteil der Evapotranspiration in die Gleichung ein, der aus den oberen Bodenhorizonten gedeckt wird. Die Formulierung des Modells erfolgt unter Vernachlässigung von Dampftransport, Filmfluss an den Oberflächen der Klüfte, Löslichkeit von Luft in Wasser und Trocknungsprozessen isolierter flüssiger Phasen.

7.3 Regionalisierung der Daten

Die Sickerwasserbewegung wird für die vorliegende Modellbetrachtung durch die Rahmengrößen Input, Flurabstand und hydraulische Eigenschaften des durchsickerten Gesteins bestimmt. Diese Größen wurden regionalisiert, um ihrer Verteilung im Untersuchungsgebiet gerecht zu werden.

Die Inputgrößen Niederschlag N und potentielle Verdunstung ET_{pot} wurden nach den in Kapitel 6 festgelegten **Niederschlagsgebieten** zugeordnet.

Die **Flurabstände** werden in Intervallen von je 20 m zusammengefasst, wobei sich die Intervallgrenzen verschieben können. Der Flurabstand entspricht dann jeweils dem Mittelwert des Intervalls. Flurabstände über 100 m werden nicht weiter unterschieden und zusammengefasst. Sie werden dem Intervall 80–100 m zugeschlagen. Diese Generalisierung hat nur geringe Auswirkungen auf die Genauigkeit der Berechnungen, da der Flächenanteil mit Flurabständen über 100 m gering ist.

Eine weitere Eigenschaft für die räumliche Unterteilung des Untersuchungsgebietes ist das zu erwartende geologische Profil bis zur Grundwasseroberfläche. Zuordnungskriterium ist dabei die an der Oberfläche **anstehende Gesteinseinheit**. Die Zusammensetzung der ungesättigten Zone basiert auf den Schichtmächtigkeiten gemäß Kapitel 4.2. Die Reduzierung der Mächtigkeiten der obersten Schichtfolgen durch oberflächennahe Verwitterung und Abtragung wird ebenfalls berücksichtigt und die verbleibende Mächtigkeit der obersten Schichtfolge als **Restmächtigkeit** bezeichnet.

Aus der Kombination der Kriterien **anstehende Gesteinseinheit**, **Restmächtigkeit** und **Flurabstand** ergibt sich somit eine überschaubare Anzahl an geologischen Standardprofilen für das Untersuchungsgebiet. Ein Standardprofil, das z. B. durch **anstehende Gesteinseinheit** = smD , **Restmächtigkeit** = 30 m und **Flurabstand** = 70 m beschrieben werden kann, setzt sich zusammen aus 30 m smD (reduzierte Schichtmächtigkeit) und 40 smV (verbleibende Mächtigkeiten bis zur Grundwasseroberfläche).

Die **tektonische Beanspruchung** stellt einen weiteren Faktor für die Unterteilung des Untersuchungsgebietes dar. Nach Kapitel 5.2 kann das Untersuchungsgebiet in einen stärker tektonisch beanspruchten Ostteil und einen weniger beanspruchten Westteil unterteilt werden. Die Trennlinie zwischen den beiden Teilgebieten orientiert sich an dem Übergangsbereich von der Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld in den tektonisch weniger beanspruchten Westteil des Untersuchungsgebietes (s. Anh. 2). Grundlage für die Ziehung der Trennlinie ist die geologische Karte (BGLA, 1993).

Die durchschnittliche Hangneigung im Untersuchungsgebiet beträgt nach Berechnungen mit Hilfe eines Geoinformationssystems etwa $7,5^\circ$. Dieser Wert wird für die Berechnungen dem gesamten Untersuchungsgebiet zugeordnet. Eine differenzierte Regionalisierung dieser Kenngröße wird nicht durchgeführt, da dies zu einer deutlich größeren Zahl von zu untersuchenden Flächen geführt hätte, zumal sich bei den Berechnungen zeigte, dass auch bei starken Niederschlägen das Wasser meist rasch und vollständig versickern kann.

Folgende regionalisierbare Eigenschaften bilden folglich die Grundlage für die Gesamtregionalisierung:

- tektonische Beanspruchung
- Niederschlagsgebiet
- Flurabstand
- anstehende Gesteinseinheit
- Restmächtigkeit des anstehenden Gesteins

Diesen fünf Eigenschaften werden mit Hilfe eines Geoinformationssystems verschnitten, woraus sich für das Untersuchungsgebiet insgesamt 50 Teilflächen ergeben (s. Anl. 27 und 28). Eine Teilfläche entspricht hierbei einem durch die fünf Eigenschaften charakterisierten Flächenanteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes. Die Teilfläche kann sich aus mehreren kleineren Flächen zusammensetzen, zwischen denen durchaus auch größere Entfernungen liegen können. Teilflächen mit weniger als $0,6 \text{ km}^2$ werden Flächen mit gleicher Gesteinszusammensetzung und Niederschlagsgebiet, aber unterschiedlichen Flurabständen zugeschlagen. Bei Teilflächen zwischen $0,6$ und etwa 1 km^2 wird ebenso verfahren, jedoch werden die Flurabstände dieser Flächen durch Gewichtung mit der Flächengröße berücksichtigt. In der Regel werden in solchen Fällen etwa gleichgroße Flächenanteile zusammengelegt und die Flurabstände gemittelt.

Die Kennzeichnung der Teilflächen erfolgt durch Zahlen von 1 bis 50. Der Teilfläche mit der Nummer 10 lassen sich beispielsweise folgende Eigenschaften zuordnen:

Teilfläche	Tektonisches Gebiet	Niederschlagsgebiet	Flurabstand	anstehende Gesteinseinheit	Restmächtigkeit
10	West	Rothenbuch	30 m	suS	25 m

Die Größe der Teilflächen schwankt zwischen etwa 1,1 und 6,6 km². Die Zahl von 50 Teilflächen stellt einen annehmbaren Kompromiss dar, zwischen dem Anspruch alle Einflussgrößen möglichst genau zu erfassen und der Begrenzung des Datenumfangs durch Rechen- und Auswertekapazität.

7.4 Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen

Die Richards-Gleichung als nicht lineare, parabolische, partielle Differentialgleichung benötigt für eine eindeutigen Lösung nach BUSCH ET AL. (1993) die Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen. Anfangsbedingung für die Profile ist eine Saugspannungsverteilungen, die natürlichen Bedingungen entsprechen könnte. Von natürlichen Bedingungen wird ausgegangen, wenn über den Berechnungszeitraum von 4018 Tagen sich die Tageswerte für die Grundwasserneubildung um nicht mehr als um 0,0005 mm bei monoton fallendem oder steigendem Kurvenverlauf ändern. Dies kann allerdings oft erst nach mehreren Rechenläufen über den Gesamtzeitraum erreicht werden, wobei die Ergebnisse der Berechnungen jeweils für den nächsten Rechenlauf die Anfangsbedingungen vorgeben.

Für den Modellraum werden obere und innere Randbedingungen formuliert. Üblicherweise können drei Arten von Randbedingungen unterschieden werden:

1. Die Randbedingung 1. Art (Dirichlet-Typ) gibt ein definiertes Potential vor (Festpotential).
2. Die Randbedingung 2. Art (Neumann-Typ) beschreibt den Zu- und Abstrom als Funktion des Ortes und der Zeit. Ein Spezialfall wäre ein undurchlässiger Modellrand oder eine Symmetrieffläche.
3. Eine Kombination der 1. und 2. Randbedingung stellt die Randbedingung 3. Art (Cauchy-Typ) dar. Sie beschreibt einen halbdurchlässigen Rand, also z.B. Kolmationsschichten von Oberflächen-gewässern.

Im allgemeinen wird für die vertikale, eindimensionale Sickerwasserbewegung als obere Begrenzung die Bodenoberfläche gewählt. Als Randbedingung kommen theoretisch alle drei vorgestellten Arten in Frage. Die Randbedingung 2. Art ist für die obere Begrenzung bei Niederschlagsinfiltration als typisch anzusehen. Sie beschreibt die Speisungsgröße an der Bodenoberfläche als Differenz von Niederschlag und Verdunstung. Bei starken Niederschlägen kann es zu einem Überstau des Niederschlagswassers kommen. In diesem Fall wird der Bodenoberfläche eine Randbedingung 1. Art zugeschrieben. Der Überstau wird in Form eines bestimmten Potentials vorgegeben. Eine Randbedingung 3. Art an der Bodenoberfläche beschreibt eine Kolmationsschicht, die die Infiltration steuert.

Für die Modellierung der ungesättigten Zone in den untersuchten Buntsandsteinprofilen mit Bodenüberdeckung genügt es, die Randbedingungen 1. und 2. Art zu berücksichtigen, da Kolmationsschichten hier nur von untergeordneter Bedeutung sind. Der Regelfall ist die Randbedingung 2. Art, wobei die Speisung durch Niederschlag und Evapotranspiration gesteuert wird. Der Anteil der Evapotranspiration, der für den oberen Rand angesetzt wird, läßt sich nach der Beschreibung in Kapitel 7.1 berechnen.

Ein Überstau gemäß einer Randbedingung 1. Art wird bei den Berechnungen für das Einzugsgebiet des Pegels Hafenlohr nicht zugelassen. Aufgrund der ausgeprägten Morphologie ist diese Vorgabe gerechtfertigt, da bei den steilen Hanglagen kaum Möglichkeiten für einen Überstau bestehen. Nicht infiltriertes Niederschlagswasser kann sich praktisch nicht ansammeln und fließt rasch als Oberflächenabfluss ab. Bereiche mit Bodensenken, in denen sich dennoch Niederschlagswasser ansammeln könnte, kommen im Untersuchungsgebiet lediglich vereinzelt in den Flussniederungen und im hinteren Heinrichsbachtal vor. Der Flächenanteil ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Am unteren Rand gilt eine Randbedingung 1. Art mit vorgegebenem Druckpotential $h=0$.

Innere Randbedingungen als Quell- oder Senkenterme werden als Randbedingung der 2. Art formuliert. Im Modell können drei Formen der Quell- oder Senkenterme unterschieden werden. In den obersten Bodenhorizonten ist dies der Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln, der bis in eine Tiefe von 40 cm zugelassen wird. Die Größe des Wasserentzugs ist abhängig vom Niederschlag und der potentiellen Evapotranspiration. Pflanzenentzug wird aber nur bis Saugspannungen entsprechend dem permanenten Welkepunkt (PWP) zugelassen. Ein weiteres Senkenglied ist der laterale Abfluss, der in jeder Zelle eingesetzt wird, sobald diese wassergesättigt ist. Schließlich findet als Quell- und Senkenterm der Fluss zwischen Kluftraum und Matrix Eingang in das Modell (s. Kap. 7.1).

8 Ergebnisse

Die Modellierung der Grundwasserneubildung als Tageswerte über 11 Jahre und 50 Teilgebiete liefert eine sehr große Menge an Daten. Die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse beschränkt sich daher teilweise auf Fallbeispiele. Dies betrifft in erster Linie die errechneten Tageswerte und Saugspannungsverhältnisse. Auch Monats- und Jahreswerte der Bilanzgrößen werden entsprechend den Fragestellungen zusammengefasst oder nicht einzeln erläutert. So werden beispielsweise nicht alle Monatswerte der aktuellen Evapotranspiration aller 50 Teilgebiete dargestellt. Die Interpretation einzelner Beispiele soll hier genügen.

In der Ergebnisinterpretation bedeutet ein Anstieg bzw. eine Erhöhung der Saugspannung, dass sich das Druckpotential erniedrigt. Ein **Anstieg der Saugspannung** von 0,1 auf 0,5 mWS entspricht also einer **Erniedrigung des Druckpotentials** von -0,1 auf -0,5 mWS (s. a. Erläuterung im Kap. 2.1). Unter gesättigten Bedingungen (positives Potential) bedeutet dagegen ein Anstieg des Druckpotentials auch eine Erhöhung des Drucks.

Die Angaben der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Profillängen beziehen sich auf das Festgestein. Für die Gesamtprofillänge sind jeweils 0,80 m Bodenhorizont zu addieren.

8.1 Evapotranspiration - Infiltration - Oberflächenabfluss

Da im Untersuchungsgebiet nur eine Messstation (Bischbrunn) für Luftfeuchte und Temperatur liegt, unterscheiden sich die Werte der potentiellen Evapotranspiration ET_p zwischen den Niederschlagsgebieten nur geringfügig (s. a. Kap. 6.4). Größere Unterschiede der tatsächlichen Evapotranspiration ET_a sind dagegen aufgrund unterschiedlicher Bodenverhältnisse zu erwarten. Im folgenden werden die ET_p der Niederschlagsgebiete Bischbrunn und Einsiedel mit der ET_a für die verschiedenen Bodentypen verglichen, um die Auswirkungen der verschiedenen Bodenbedeckungen beurteilen zu können. Es mußten zwei Stationen zum Vergleich herangezogen werden, da eine Station nicht alle Bodentypen abdeckt.

In der Tabelle 20 sind die Monatsmittelwerte der Evapotranspiration für die verschiedenen Bodentypen aufgelistet. Oben ist die ET_p für die Stationen Bischbrunn und Einsiedel aufgeführt, darunter folgt die ET_a für die verschiedenen Bodentypen. Im Niederschlagsgebiet der Station Bischbrunn kommen nur Böden der Typen *so*, *smH* und *smD* vor, während im Niederschlagsgebiet der Station Einsiedel die Bodentypen *smH*, *smD*, *smV*, *suS* und *suG* anzutreffen sind.

In den Wintermonaten sind die Unterschiede der tatsächlichen Evapotranspirationen nur gering, in den Sommermonaten, vor allem im Juli und August, sind dagegen, in Abhängigkeit vom Bodentyp, deutliche Unterschiede zu verzeichnen. Die geringste ET_a ist beim Bodentyp *smD* zu beobachten, relativ hoch liegen die Werte bei den Bodentypen *so* und *suG*. Die anderen Bodentypen weisen auch in den Sommermonaten ähnliche ET_a auf. Das wesentliche Element zu Steuerung der ET_a ist die Saugspannungskurve des Bodens. In den Sommermonaten werden durch die hohe Evapotranspiration in den obersten Bodenhorizonten hohe Saugspannungen hervorgerufen, die sich im Bereich zwischen 1 und über 100 mWS bewegen. Wie

Tabelle 20: Monatssummen der potentiellen Evapotranspiration ET_p für die Niederschlagsstationen Bischbrunn und Einsiedel sowie der tatsächlichen Evapotranspiration ET_a für sechs Bodentypen.

Station	ET_p												
	Monatsmittelwerte 1980 - 1990 [mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Bisch	5,7	10,6	21,3	37,0	55,1	74,2	110,8	116,4	50,7	23,8	10,2	6,8	
Einsd	7,2	11,1	21,5	35,9	53,5	73,1	108,1	113,4	50,3	25,1	11,6	8,3	

Station	Bodentyp	Profil Nr.	ET_a											
			Monatsmittelwerte 1980 - 1990 [mm]											
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Bisch	so	46	5,7	10,6	21,3	37,0	55,1	74,2	110,2	108,7	50,4	23,8	10,2	6,8
	smH	38	5,7	10,6	21,3	37,0	55,1	74,2	106,8	92,0	47,9	23,8	10,2	6,8
	smD	35	5,7	10,5	21,3	37,0	53,3	66,8	67,3	49,5	31,5	18,0	10,2	6,8
Einsd	smH	43	7,2	11,1	21,4	35,9	53,4	73,1	105,8	96,7	43,9	23,2	11,6	8,3
	smD	36	7,2	11,1	21,4	35,9	50,6	66,6	65,2	47,1	32,8	20,2	11,0	8,1
	smV	26	7,2	11,1	21,4	35,9	53,4	73,1	104,7	89,6	48,9	22,1	11,6	8,3
	suS	13	7,2	11,1	21,5	35,9	53,4	73,1	106,0	87,3	49,0	25,1	11,6	8,3
	suG	8	7,2	11,1	21,5	35,9	53,4	73,1	108,1	108,2	49,8	25,1	11,6	8,3

aus Anlage 19 zu erkennen, ist in diesem Saugspannungsbereich die Spanne der Wassergehalte bei den Bodentypen *so* und *suG* am größten, d.h. bei diesen Böden steht in diesem Saugspannungsbereich am meisten Wasser zur Evapotranspiration zur Verfügung. Im Vergleich dazu verläuft die Saugspannungskurve beim Typ *smD* in dem genannten Saugspannungsbereich relativ flach, d.h. die Wassergehaltsänderung ist gering und weniger Wasser steht für die Evapotranspiration zur Verfügung.

In der Abbildung 12 sind die Monatswerte der ET_p und ET_a für das Niederschlagsgebiet Bischbrunn und Böden des Typs *smD* grafisch dargestellt. In den Sommermonaten ist die Differenz zwischen potentieller und tatsächlicher Evapotranspiration am größten. Zu dieser Zeit sind die Niederschlagsmengen gering und der Bodenwassergehalt reicht nicht aus, um die Verdunstungsmenge zu decken. Das Verdunstungsdefizit der Monatsmittelwerte beträgt von den Beispielen in Tabelle 20 maximal 66,9 mm (August, Niederschlagsgebiet Einsiedel und Bodentyp *smD*).

Im Gegensatz zur Evapotranspiration sind Oberflächenabfluss und Infiltration stärker von der ungesättigten Durchlässigkeit des Bodens abhängig. Der Oberflächenabfluss ist dann größer, wenn der Boden, aufgrund geringerer Durchlässigkeit auch nur eine geringe Infiltration zulässt. Die Monatsmittelwerte des Oberflächenabflusses liegen überwiegend unter 1 mm. Wesentlich höher sind die Abflusswerte beim Typ *smD*, der die geringsten ungesättigten Durchlässigkeiten aufweist (s. Anl. 20). Ausschlaggebend ist dabei die tatsächliche, d.h. die sich im Moment der Infiltration aus der Saugspannung ergebende, ungesättigte Durchlässigkeit.

Das gesamte Untersuchungsgebiet ist durch relativ starke Hangneigungen von durchschnittlich 7,5% gekennzeichnet (s. Kap. 7.3). Die starken Hangneigungen wird bei der Modellierung berücksichtigt, indem kein Überstau an der Geländeoberfläche zugelassen wird. Dies bewirkt einen sofortigen Oberflächenabfluss, falls der Niederschlag größer sein sollte als das Infiltrationsvermögen. Dennoch sind die Oberflächenabflüsse in den meisten Monaten und bei den meisten Bodentypen sehr gering, was auf die hohen Durchlässigkeiten dieser Böden zurückzuführen ist. Da keine genauere zeitliche Auflösung der Nieder-

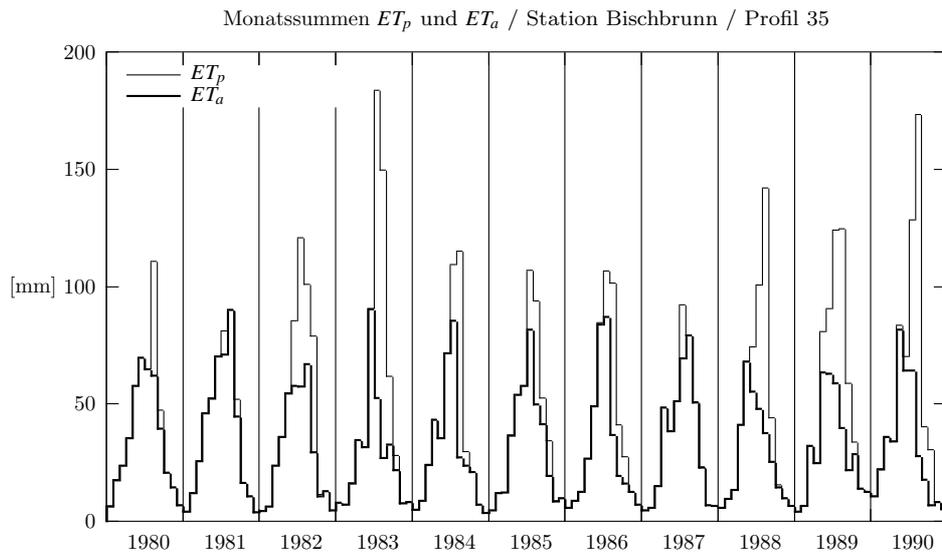


Abbildung 12: Monatsmittelwerte der potentiellen und tatsächlichen Evapotranspiration im Niederschlagsgebiet Bischbrunn und beim Bodentyp *smH*.

Tabelle 21: Monatsmittelwerte der Oberflächenabflüsse für die Niederschlagsstationen Bischbrunn und Einsiedel sowie sechs Bodentypen.

Station	Bodentyp	Profil Nr.	Oberflächenabfluss											
			Monatsmittelwerte 1980 - 1990 [mm]											
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Bisch	so	46	0,54	0,43	0,24	0,17	0,15	0,23	0,16	0,27	0,82	0,29	0,21	0,30
	smH	38	0,18	0,14	0,15	0,12	0,12	0,20	0,18	0,33	1,08	0,17	0,10	0,16
	smD	35	1,29	0,91	0,98	0,74	4,64	10,27	23,16	18,45	27,25	18,53	3,28	1,18
Einsd	smH	43	0,17	0,10	0,15	0,12	0,13	0,20	0,18	3,23	11,46	2,31	0,11	0,14
	smD	36	2,18	0,78	1,04	0,80	1,96	7,07	20,14	28,30	24,03	25,22	24,05	10,83
	smV	26	0,17	0,11	0,16	0,13	0,13	0,20	0,18	0,68	1,90	0,17	0,11	0,16
	suS	13	0,12	0,09	0,13	0,10	0,11	0,17	0,16	0,49	1,01	0,13	0,09	0,11
	suG	8	0,20	0,14	0,17	0,13	0,12	0,17	0,16	0,19	0,72	0,16	0,11	0,17

schlagsdaten vorliegt, werden die Tagessummen der Niederschläge auf den ganzen Tag verteilt, was im allgemeinen nicht der Realität entspricht. Kurzzeitige Niederschlagsspitzen im Stunden- oder gar Minutenbereich, die die maximalen Infiltrationsraten auch bei hohen Durchlässigkeiten überschreiten und somit zu Oberflächenabflüssen führen, werden geglättet und verstärkte Abflüsse gehen verloren.

Der Infiltrationsvorgang läßt sich äquivalent zum Oberflächenabfluss beschreiben. Beim Bodentyp *smD*, mit den geringsten ungesättigten Durchlässigkeiten sind die geringsten Infiltrationsmengen feststellbar. Die Monatsmittelwerte der Infiltrationshöhen sind für die verschiedenen Bodentypen in der Tabelle 22 zusammengefasst. Auch hier sind, abgesehen vom Bodentyp *smD*, die Unterschiede sehr gering, da die Infiltrationsraten i.d.R. niedriger sind als die ungesättigten Durchlässigkeiten und somit fast immer das gesamte zur Verfügung stehende Wasser infiltrieren kann.

Tabelle 22: Monatsmittelwerte der Infiltration für die Niederschlagsstationen Bischbrunn und Einsiedel sowie sechs Bodentypen.

Station	Bodentyp	Profil Nr.	Infiltration											
			Monatsmittelwerte 1980 - 1990 [mm]											
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Bisch	so	46	111,3	82,7	93,9	67,9	69,6	84,9	70,2	41,3	67,2	83,5	81,8	113,2
	smH	38	111,6	83,0	94,0	67,9	69,6	84,9	70,1	41,2	66,9	83,7	81,9	113,3
	smD	35	110,5	82,2	93,2	67,3	65,1	74,8	47,2	23,1	40,8	65,3	78,7	112,3
Einsd	smH	43	114,7	83,8	96,5	68,0	70,0	81,2	68,7	39,0	56,5	81,4	87,2	115,4
	smD	36	112,7	83,1	95,6	67,3	68,2	74,3	48,7	13,9	43,9	58,5	63,3	104,7
	smV	26	114,7	83,7	96,5	68,0	70,0	81,2	68,7	41,5	66,1	83,5	87,2	115,3
	suS	13	114,7	83,8	96,5	68,0	70,1	81,2	68,7	41,7	66,9	83,6	87,3	115,4
	suG	8	114,6	83,7	96,4	68,0	70,0	81,2	68,7	42,0	67,2	83,6	87,2	115,3

8.2 Saugspannungsverteilungen

Wie bereits in den Kapiteln 7.1 und 7.2 erläutert, werden Kluft- und Porenraum mit den darüber liegenden Bodenhorizonten getrennt modelliert und über einen Austauschfaktor miteinander verbunden. Die Bedingungen für den Wasseraustausch sollen gewährleisten, dass stets eine möglichst rasche Angleichung der Saugspannungsverhältnisse stattfindet. Deutliche Unterschiede der Saugspannungen zwischen Kluftraum und Matrix sind daher nur dann zu erwarten, wenn trotz der Vorgaben eine Angleichung der Saugspannungsverhältnisse nicht erreicht werden kann. Dies ist der Fall bei hohen Durchflussraten und bei Übergängen von höher durchlässigen in geringer durchlässige Schichten. Letzteres ist vor allem für den Übergang Boden – Festgestein sowie in den darunter liegenden Profilabschnitten bei deutlich verschiedenen Matrixdurchlässigkeiten von Bedeutung.

Einzelne Spitzen der Saugspannungswerte im Kluftraum sind auf numerische Fehler zurückzuführen. Diese sind im Übergangsbereich Boden – Kluftraum, mit Durchlässigkeitsunterschieden von bis zu $1 \cdot 10^{-12}$ m/s, trotz verfeinerter Orts- und Zeitdiskretisierung nicht zu beseitigen. Der numerische Fehler kann aber zumindest verringert werden, indem unmittelbar unter dem Bodenhorizont der Kluftraum die hydraulischen Eigenschaften des Bodens zugeordnet bekommt. Dadurch wird der Gradient der Durchlässigkeiten von der Gesteinsmatrix zum Kluftraum und vom Boden zum Kluftraum verflacht. Diese Massnahme entspricht auch etwa den natürlichen Bedingungen, wenn sich Lockermaterial vom Bodenhorizont in die Klüfte verlagert.

8.2.1 Übergang Boden–Festgestein

Die größten Unterschiede der Saugspannungen zwischen Kluftraum und Gesteinsmatrix sind unmittelbar unter dem Boden festzustellen. Im Bodenhorizont ist der Saugspannungsverlauf immer kontinuierlich und stetig. Auch der Übergang von Boden in die Matrix erfolgt im allgemeinen ohne große Sprünge bei den Saugspannungswerten. Am Übergang vom Boden in den Kluftraum können dagegen deutliche Schwankungen der Saugspannungen auftreten. Ursache hierfür sind die, auch bei geringeren Wassergehalten, noch relativ hohen Durchlässigkeiten im Boden, die auf einen dann fast undurchlässigen Kluftraum treffen.

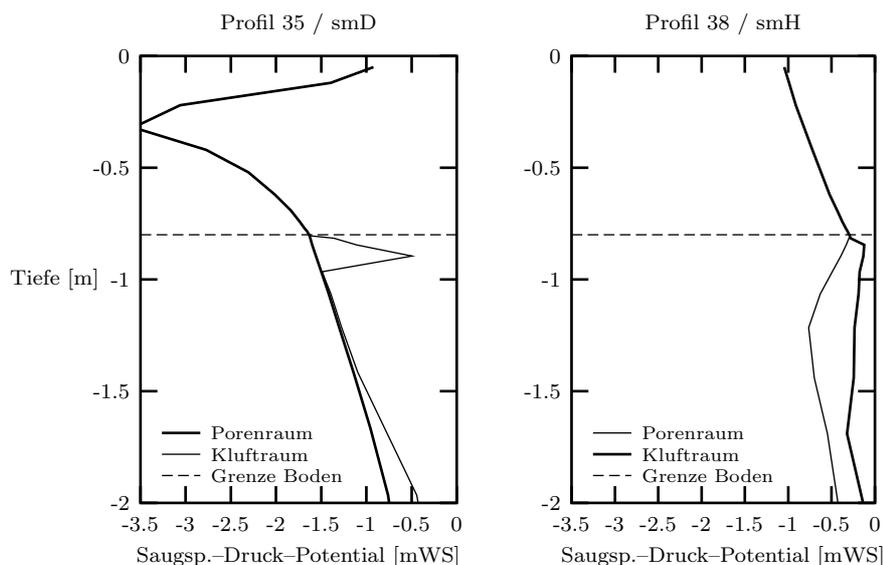


Abbildung 13: Saugspannungen am Übergang Boden – Festgestein der Profile 35 und 38 vom 08.11.1989.

Wie die Durchlässigkeitsunterschiede zwischen Boden und Gesteinsmatrix den Übergang zwischen diesen beiden Medien prägen, ist aus der Abbildung 13 ersichtlich. Bei den dargestellten Beispielprofilen 35 (*smD*) und 38 (*smH*) sind die Unterschiede der Durchlässigkeiten zwischen Boden und Matrix relativ groß (*smH*) und relativ klein (*smD*). Im Profil 38 (*smH*) betragen die gesättigten Durchlässigkeiten im Boden $8,1 \cdot 10^{-4}$ und in der Matrix $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, im Profil 35 (*smD*) liegen sie im Boden bei $2,4 \cdot 10^{-5}$ und in der Matrix bei $2,3 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Die beiden Beispiele zeigen die Saugspannungsverteilungen in den obersten 2 Profilm Metern am 08.11.1989. Zu diesem Zeitpunkt herrschten, nach einem niederschlagsarmen Sommer mit hoher Verdunstung, hohe Saugspannungen im Bodenhorizont vor. Es fielen jedoch in den letzten zehn Tagen vor dem 08.11. etwa 80 mm Niederschlag. Zu beachten ist, dass im Profil *smD* bei den vorherrschenden Saugspannungen von etwa 1,5 mWS die ungesättigte Durchlässigkeit im Boden bereits geringer ist als in der Festgesteinsmatrix (s. Anl. 14 und 20). Die Situation stellt sich somit anders dar als in den meisten anderen Fällen, wo die ungesättigte Durchlässigkeit im Boden deutlich größer ist als in der Matrix. Aufgrund der geringen Bodendurchlässigkeit hat die Sickerwasserfronten den Übergang zum Festgestein noch nicht erreicht. Am Übergang selbst betragen die Saugspannungen noch etwa 1,5 mWS. Unter diesen Bedingungen wird herangeführtes Sickerwasser von der Festgesteinsmatrix sofort weitergeleitet, da die Durchlässigkeit in der Matrix höher ist als in dem überlagernden Bodenhorizont. Eine weiteres Kriterium für das langsame Fortschreiten der Sickerfront im Profil 35 ist, neben der geringen Durchlässigkeit, das relative große Wasseraufnahmevermögen des Bodens im Saugspannungsbereich von etwa 1 mWS (s. Anl. 19). Dadurch muss mehr Wasser zugeführt werden, um eine nennenswerte Sickerfront auszubilden.

Im Profil 38 ist nur eine wenig ausgeprägte Welle zu erkennen, die am Übergang zum Festgestein einen kleinen Sickerwasseraufstau verursacht. Die Welle ist den Niederschlägen in den zehn Tagen vor dem 08.11. zuzuordnen. Da die Durchlässigkeit in der Matrix im Vergleich zum Boden geringer ist, bildet

sich ein Sickerwasseraufstau. Im Gegensatz zu Profil 35 ist der unmittelbare Übergang vom Boden zum Festgestein konvex in Richtung positiven Druckpotentials ausgebildet.

Die Saugspannungen zwischen Poren- und Kluftraum unmittelbar unter dem Bodenhorizont sind bei dem Beispiel nicht ausgeglichen. Bei Extremwerten der Saugspannung, und als solche sind die Saugspannungswerte nach dem trockenen Sommer einzuordnen, benötigt der Kluftraum eine längere Zeit, um die Saugspannung an den Porenraum anzugleichen. Erschwert wird die Angleichung durch numerische Oszillationen, die an der Grenze Boden – Kluftraum auftreten können aber auch bei zu großen Austauschflüssen zwischen Poren- und Kluftraum. Auf die Problematik des Austausches zwischen Poren- und Kluftraum wird in den folgenden Kapiteln noch eingegangen.

8.2.2 Profiltiefe und Saugspannungsverteilung

Im Bodenhorizont sind zeitweise über kleine Tiefenänderungen große Saugspannungsänderungen festzustellen. Am größten sind die Änderungen, wenn in der obersten Bodenzelle durch Verdunstung Saugspannungen von über 100 mWS hervorgerufen werden. Da die Verdunstung nicht unmittelbar bis in die untersten Bodenhorizonte wirkt, steigt dort die Saugspannung selten über 5 mWS.

Im Poren- und Kluftraum sind die Saugspannungsänderungen über die Tiefe bereits wesentlich geringer und erreichen selten mehr als 3 mWS und dies i.d.R. auch nur in den obersten 5 bis 10 Metern. Bei den Profilen vom 26.09.1983 in Abbildung 14 handelt es sich bereits um Beispiele, wo durch langanhaltende Trockenheit sich die ansteigenden Saugspannungen bis in größere Tiefen ausgewirkt haben. Dennoch betragen die Saugspannungsunterschiede ab einer Tiefe von etwa 10 m, abgesehen von den untersten Zellen, wo sich auch der Kapillaranstieg bemerkbar macht, nur wenige cmWS.

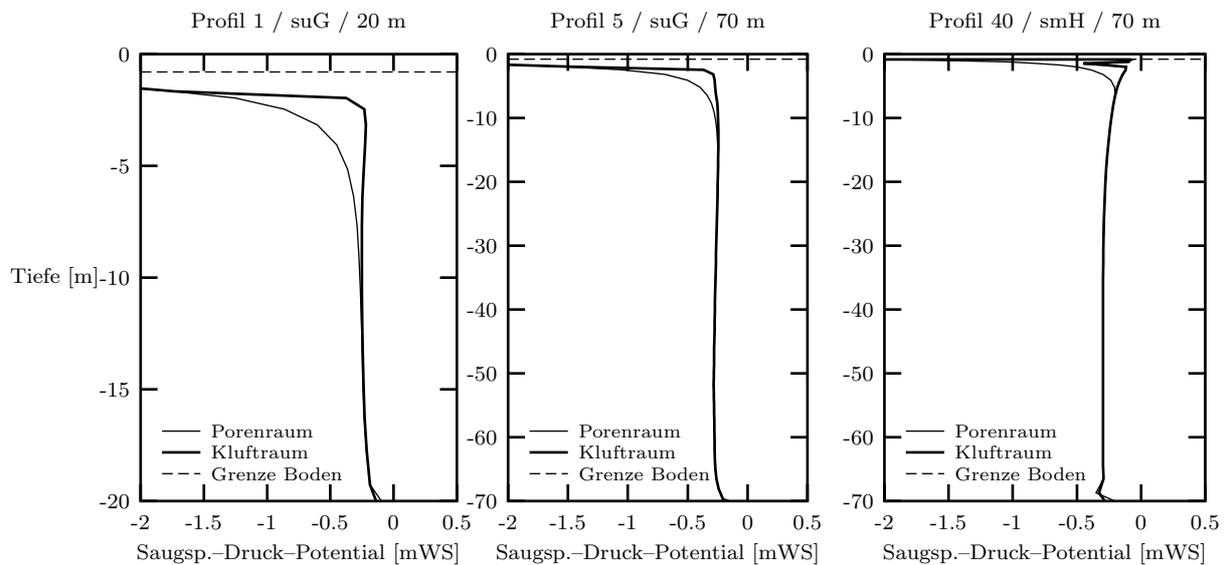


Abbildung 14: Saugspannungen Profile 1, 5 und 40 am 26.09.1983.

Mit zunehmender Tiefe nehmen mit den Änderungen der Saugspannungen auch die Unterschiede der Saugspannungen zwischen Kluftraum und Matrix ab. Die Schübe der Sickerwasserfronten sind hier soweit geglättet, dass bei weitem geringere Saugspannungsunterschiede zwischen Matrix und Kluftraum ausgeglichen werden müssen. In der Regel können dann die Saugspannungen innerhalb weniger Tage ausgeglichen werden.

8.2.3 Porenraum und Saugspannungsverteilung

Die Auswirkungen verschiedener Porendurchlässigkeiten auf die Saugspannungsverhältnisse sollen anhand der Profil 35 und 42 beschrieben werden. Diese beiden Profile repräsentieren die stratigraphischen Einheiten *smD* (35) und *smH* (42) und somit auch die maximale und minimale gesättigte Porendurchlässigkeit (s. Kap. 5.1.4). Auch unter ungesättigten Bedingungen ist die k_u der Matrix in der Einheit *smD* stets größer als in der Einheit *smH* (s. Anl. 14). Beide Profile liegen im gleichen Niederschlagsgebiet und in der gleichen tektonischen Zone, und haben die gleiche Profillänge. In der Abbildung 15 ist jeweils ein Tagesprofil aus einer niederschlagsarmen (Spätsommer 1983, oben) und einer niederschlagsreichen (Winter 1987, unten) Periode dargestellt.

Bei längerer Trockenheit steigen die Saugspannungen in den obersten Metern der Matrix des Profils 35 (*smD*) deutlicher an als im Profil 42 (*smH*). Die größere Durchlässigkeit (*smD*) sorgt auch dafür, dass die Matrix schneller entwässert wird. Daher sinkt der Wassergehalt (steigt die Saugspannung) in den obersten Metern des Profils 35 schneller, wogegen im unteren Teil des Profils die Saugspannungen noch niedrig bleiben. Eine deutliche Entwässerung der tieferen Profilschnitte ist auch bei hoher Durchlässigkeit erst nach sehr langer Trockenheit zu erwarten. Einige niederschlagsarme Monate reichen noch nicht aus, um im betrachteten Profil für eine Entwässerung der tieferen Profilschnitte zu sorgen. Im Profil 42 setzt sich die Entwässerung dagegen langsamer in die Tiefe fort. Bei beiden Profilen folgt die Saugspannung im Kluftraum mit Verzögerung der Saugspannung in der Matrix.

Während der niederschlagsreichen Periode stellt sich beim Profil 35 (*smD*) in der Matrix eine relativ niedrige Saugspannung ein, die von gesättigten Bedingungen im oberen Profilschnitt bis zum Profiltiefsten geringfügig auf etwa 0,2 mWS ansteigt. Die gute Durchlässigkeit der Matrix sorgt hier für einen guten und gleichmäßigen Durchfluss des Sickerwassers. Beim Profil 42 (*smH*), mit der geringeren Matrixdurchlässigkeit, stellen sich dagegen über das gesamte Profil höhere Saugspannungen in der Matrix ein.

Beim Beispiel aus der niederschlagsreichen Periode ist eine größere Abweichung der Saugspannungen zwischen Matrix und Kluft im Profil 35 zu erkennen. In diesem Fall hat die Bewässerungsdauer nach einer vorhergehenden Entwässerung zwar für eine annähernde Sättigung der Matrix ausgereicht, aber nicht für den Kluftraum. Dass im Profil 42 die Saugspannungen besser übereinstimmen liegt daran, dass bei der vorhergehenden Entwässerung die Saugspannungen im Profil 35 stärker angestiegen waren als im Profil 42 (vgl. Saugspannungsverteilung vom 26.09.1983). Die Angleichung der Saugspannungen im Kluftraum dauert daher beim Profil 35 auch länger.

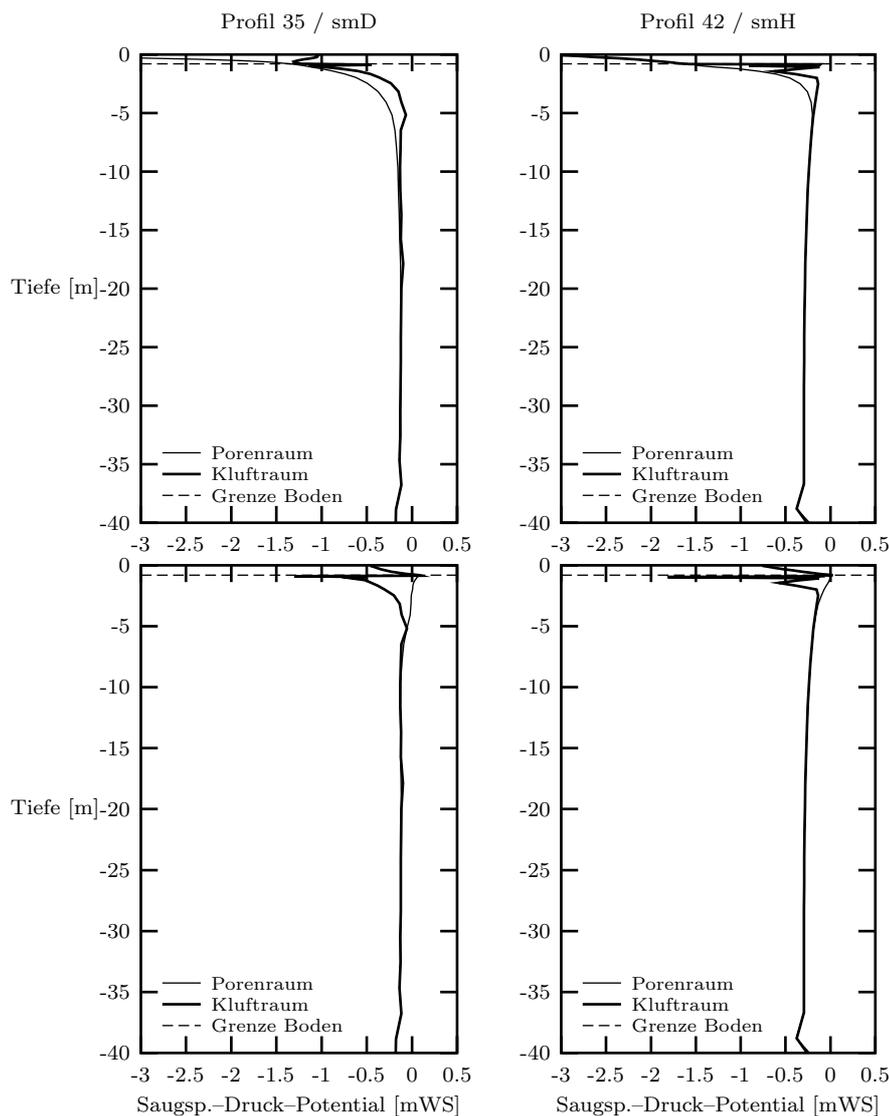


Abbildung 15: Saugspannungen Profile 35 und 42 am 26.09.1983 (oben) und 21.12.1987 (unten).

8.2.4 Tektonik und Saugspannungsverteilung

Die tektonische Beanspruchung hat nur geringen Einfluss auf den Verlauf der Saugspannung im Profil. Stärkere tektonische Beanspruchung wird im Modell durch höhere Künftigkeit berücksichtigt. Dies bewirkt vor allem eine stärkere Angleichung der Saugspannungen zwischen Matrix und Kluftraum, da mehr Kontaktflächen zur Verfügung stehen, über die das Sickerwasser ausgetauscht werden kann. Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, differieren am 26.12.1983 im Profil 8 (*suG*, Tektonik Ost), das aus dem tektonisch stärker beanspruchten Gebiet stammt, die Saugspannungen zwischen Poren- und Kluftraum weniger stark als im Profil 6 (*suG*, Tektonik West). Der verbesserte Austausch macht sich bis in Tiefen von etwa 10 m bemerkbar. Bei den gewählten Beispielen sind die Unterschiede der Saugspannungen im Profil allerdings schon relativ ausgeprägt. Die meiste Zeit hat die unterschiedliche tektonische Beanspruchung nur geringe Auswirkung auf die Saugspannungsverhältnisse.

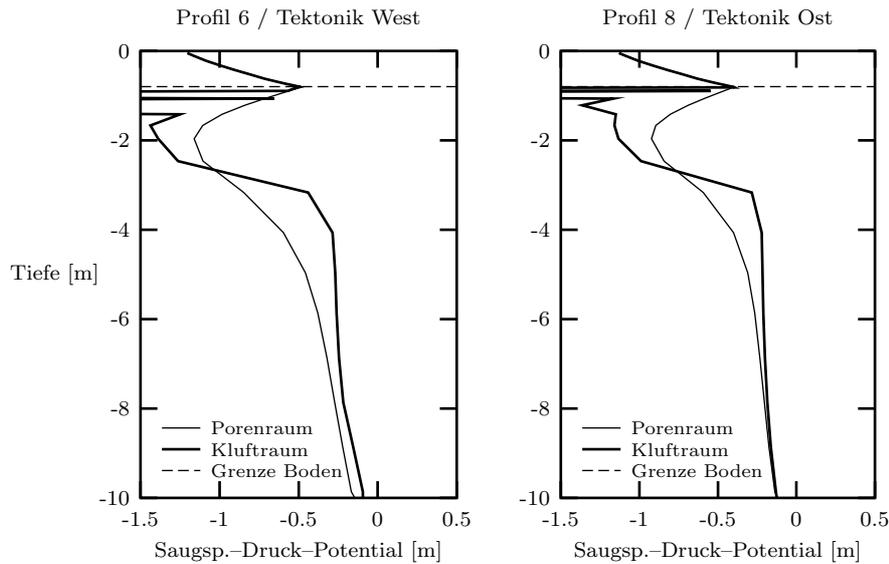


Abbildung 16: Saugspannungen bei verschiedener tektonischer Beanspruchung am Beispiel der Profile 6 und 8 am 26.12.1983.

8.3 Zwischenabflüsse

Zwischenabflüsse (Q_{Zi} , s. Kap. 7.1) treten überall dort auf, wo es an Schichtgrenzen aufgrund geringerer werdender Durchlässigkeit zu einem Aufstau des Sickerwassers und in der Folge zu einem lateralen, gesättigten Abfluss kommt. Bei den untersuchten Profilen gibt es insgesamt 12 Schichthorizonte, in denen theoretisch Zwischenabflüsse auftreten können (s. Tab. 23). Mit berücksichtigt sind dabei auch die Übergänge von oberflächennaher Auflockerung in kompaktere Schichtfolgen (Tiefe bei 50 m angesetzt, s. Kap. 7.1).

Tabelle 23: Jahresdurchschnittswerte der Zwischenabflüsse nach Schichthorizonten für den Zeitraum von 1980 bis 1990.

Jahresdurchschnittswerte der Zwischenabflüsse 1980 - 1990 [mm]												
Boden	so2h	so1h	smHh	smHt	smDh	smDt	smVh	smVt	suSh	suSt	suGh	
463,5	0,2	0,0	0,7	0,0	7,6	0,0	3,3	0,0	15,6	0,0	6,5	

Die mit Abstand höchsten Zwischenabflüsse sind für den Bodenhorizont zu verzeichnen. Hier treten zu den darunterliegenden Schichtfolgen die größten Durchlässigkeitsunterschiede auf. Die Infiltrationsspitzen sind im Bodenhorizont stark ausgeprägt, so dass kurzfristig auftretende große Sickerwassermengen häufig zu einem Aufstau führen. Die Zwischenabflüsse in den übrigen Horizonten sind dagegen bereits deutlich geringer, da für Zwischenabflüsse in tieferen Horizonten nur noch geringe Wassermengen zur Verfügung stehen. Am größten sind sie noch in der Detfurth- und Salmünster-Folge, die auch die höchsten Matrixdurchlässigkeiten aufweisen. Im Plattensandstein sind die Zwischenabflüsse, trotz der unterlagernden, geringdurchlässigen Chirotherienschiefer, dagegen niedrig. Dies hat vor allem zwei Ursachen. Zunächst ist der Zwischenabfluss im Bodenhorizont (Interflow) aufgrund der geringen Porendurchlässigkeit des Plat-

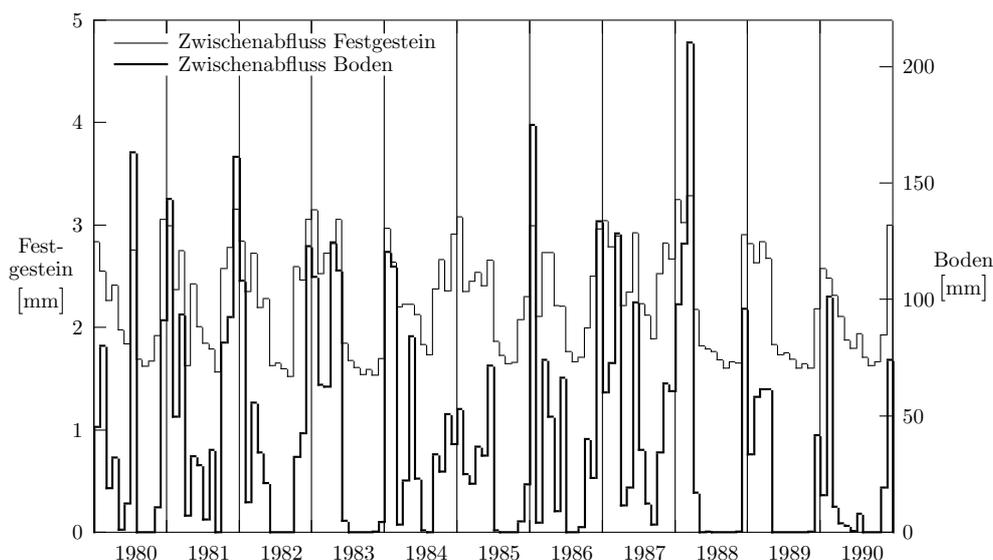


Abbildung 17: Monatssummen der Zwischenabflüsse im Bodenhorizont und obersten Festgesteins-horizont für das gesamte Untersuchungsgebiet.

tensandsteins so hoch, dass für die Weiterversickerung geringere Wassermengen zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, dass die Chirotherienschiefer in den Profilen in mindestens 20 m Tiefe liegen und durch den langen Sickerweg mögliche Infiltrationsspitzen bereits weitgehend geglättet sind. Der Aufstau durch Sickerwasserwellen ist daher nur noch gering. Wie beim Plattensandstein wird in allen Fällen die Höhe der Zwischenabflüsse neben den hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes auch von der Tiefenlage der Schichtgrenzen beeinflusst. Daher sind auch unterhalb der Auflockerungszone keine Zwischenabflüsse mehr zu verzeichnen, da die Tiefen dann mindestens 50 m betragen.

Die Monatssummen des Interflows und des Zwischenabflusses im jeweils obersten Festgesteins-horizont zeigen relative Minimalwerte in den Sommermonaten (s. Abb. 17, verschiedene y-Achsen beachten). Bedingt durch die hohe Evapotranspiration in den Sommermonaten sind die Sickerwassermengen, die den Bodenhorizont durchdringen, gering. In der Folge verringern sich auch die Zwischenabflüsse gegenüber dem Winterhalbjahr. Der Rückgang der Sickerwassermengen wirkt sich auch noch auf die Zwischenabflüsse im obersten Festgesteins-horizont aus. Die Minimas der Zwischenabflüsse korrespondieren zeitlich etwa mit den Maximas der Evapotranspiration (s. Abb. 12).

Interessant ist der Vergleich des Interflows unter Berücksichtigung des unterlagernden Festgesteins und der tektonischen Beanspruchung. Wie Tabelle 24 zeigt, unterscheiden sich die Monatsmittelwerte um bis zu 40 mm (*smH*, West und *suS*, Ost im Dezember). Verantwortlich für die relativ große Differenz sind die unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Festgesteinsmatrix und des Klufttraums. So weist die Salmünster-Folge (*suS*) eine relativ hohe Matrixdurchlässigkeit auf, wogegen in der Hardeggen-Folge (*smH*) von allen untersuchten Sandsteinhorizonten die geringste, gesättigte Matrixdurchlässigkeit zu verzeichnen ist. Auch die tektonische Beanspruchung spielt für Zwischenabfluss und Versickerung eine Rolle. Der Zwischenabfluss im Boden ist bei geringerer tektonischer Beanspruchung (tektonisches Gebiet West) überwiegend höher ist, d.h. die Versickerung vom Boden in das Festgestein ist geringer. Dies ist wiederum bedingt durch

die geringeren Kluftdurchlässigkeiten bei geringerer tektonischer Beanspruchung. Bei der Beurteilung der Versickerung vom Boden ins Festgestein müssen die Durchlässigkeiten des Kluftraums berücksichtigt werden, da bei einem Aufstau im Bodenhorizont auch im darunterliegenden Festgestein zumindest annähernd gesättigte Bedingungen vorherrschen. Die gesättigte Durchlässigkeit des Kluftraum spielt daher für die Versickerung auch eine wesentliche Rolle. Ein weiterer Grund für die größeren Zwischenabflüsse kann die etwas höhere, gesättigte Durchlässigkeit dieses Bodentyps sein (z.B. *smH*). Niederschlagsspitzen werden dadurch weniger gedämpft und es kommt eher zu einem Aufstau an einem geringer durchlässigen Horizont und somit zu einem verstärkten Zwischenabfluss. Die Versickerung vom Boden ins Festgestein ist demnach umso höher, je größer die Durchlässigkeiten von Kluftraum und Matrix sind und je kleiner die Durchlässigkeit des Bodens ist.

Tabelle 24: Monatsmittelwerte der Zwischenabflüsse für sechs Bodentypen und tektonische Gebiete Ost und West.

Bodentyp	Profil Nr.	Tekton. Gebiet	Interflow (Zwischenabfluss im Bodenhorizont)											
			Monatsmittelwerte 1980 - 1990 [mm]											
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
so	46	e	101,3	74,7	76,8	43,9	29,5	31,8	19,8	4,8	4,2	28,0	35,3	88,7
so	49	w	92,9	68,7	69,3	38,0	25,7	26,7	17,4	4,0	3,0	21,8	29,7	77,8
smh	38	e	108,4	76,4	78,9	43,8	29,4	30,5	19,9	4,6	4,0	26,0	38,3	97,3
smh	39	w	103,2	74,1	75,8	42,2	28,4	29,4	19,0	4,2	3,8	24,8	37,0	93,1
smd	36	e	55,0	47,2	48,0	27,9	12,2	14,3	8,8	0,0	2,1	6,4	17,7	50,1
smd	34	w	67,8	50,5	50,4	29,4	13,0	15,5	9,4	0,0	0,4	2,7	6,3	52,5
smv	26	e	103,4	74,5	74,7	42,7	29,4	27,7	17,4	2,3	5,8	25,6	34,3	89,3
smv	25	w	97,6	67,6	72,0	38,8	28,7	26,1	16,9	2,0	5,1	24,5	28,1	76,3
sus	13	e	85,6	61,8	62,9	32,2	20,4	20,9	13,7	0,6	0,1	10,5	20,2	59,6
sus	17	w	78,7	57,0	59,4	30,3	19,0	19,4	12,9	0,6	0,1	9,6	19,3	55,5
sug	8	e	90,1	64,5	66,3	35,1	24,7	23,1	15,6	1,5	3,4	20,5	24,6	71,5
sug	7	w	79,6	61,0	63,9	32,7	34,7	28,6	23,6	5,7	3,5	19,6	27,9	80,5

Bei der Betrachtung der regionale Verteilung des Interflows (s. Anl. 31 bis 33) sind Abhängigkeiten von der Matrixdurchlässigkeit des anstehenden Gesteins, der tektonischen Beanspruchung und dem Niederschlagsgebiet zu erkennen. Die Zwischenabflüsse sind in Gebieten mit geringer Matrixdurchlässigkeit der Sandsteine (*smV*, *smH* und *so*) relativ hoch, aber auch im Westteil des Untersuchungsgebietes, wo die tektonische Beanspruchung schwächer ist. Im Niederschlagsgebiet der Station Rothenbuch, die im Schnitt die höchsten Niederschlagsmengen aufweist, sind ebenfalls etwas höhere Zwischenabflüsse zu beobachten. Deutliche Mengenunterschiede sind zwischen dem Sommer- und Winterhalbjahr festzustellen. Die Verteilung der Abflüsse innerhalb des Untersuchungsgebietes unterscheidet sich saisonal dagegen nur geringfügig. Kleinere, relative Änderungen sind überwiegend zwischen den Niederschlagsgebieten festzustellen. Als Ursache für die geringfügigen Änderungen in der Abflussverteilung kommt daher vor allem die unterschiedliche Niederschlagsverteilung im Sommer- und Winterhalbjahr in Frage.

Auch bei der regionalen Verteilung der Zwischenabflüsse im Festgestein (s. Anl. 34) kommt die Matrixdurchlässigkeit des anstehenden Gesteins noch zum Tragen. Hier wirkt sich vor allem aus, wieviel vom infiltrierten Niederschlagswasser bereits im Bodenhorizont abgeführt wird, da dieses für Versickerungen in größere Tiefen nicht mehr zur Verfügung steht. So ist im Bereich des Plattensandsteins und der Hardeggen-Folge der Zwischenabfluss im Festgestein gering, da hier bereits im Bodenhorizont viel

Sickerwasser durch den Interflow abgeführt wird. Ein weiterer Faktor ist der Flurabstand, da bei geringen Flurabständen keine oder zumindest nur wenige Schichtgrenzen vorkommen, an denen Zwischenabflüsse auftreten können. Daher sind die Zwischenabflüsse im Talgrund der Hafental auch durchwegs gering. Dass teilweise trotz der geringen Flurabstände Zwischenabflüsse auftreten (z.B. unteres Hafental), liegt daran, dass bei einem Aufstau im Bodenhorizont auch die obersten Abschnitte im Festgestein gesättigt sind und es somit in diesen Bereichen zu einem Zwischenabfluss kommt. Bei geringen Flurabständen kann auch hier das Niederschlagsgebiet noch eine Rolle spielen (z. B. Übergang zwischen den Niederschlagsgebieten Rohrbrunn und Bischbrunn im oberen Talgrund des Heinrichsbaches).

In der Verteilungskarte zeichnet sich auch die Grenze zwischen den Gebieten verschiedener tektonischer Beanspruchung ab. Auf den ersten Blick erstaunt die Tatsache, dass im tektonisch stärker beanspruchten Ostteil die Zwischenabflüsse im Festgestein teilweise höher sind. Es ist hier allerdings zu berücksichtigen, dass der Interflow im Ostteil des Untersuchungsgebietes geringer ist und die Versickerung ins Festgestein höher. Für Zwischenabflüsse in tieferen Horizonten steht also potentiell mehr Wasser zu Verfügung.

8.4 Grundwasserneubildung

Wie in Kapitel 7.1 erläutert, wird die Höhe der Grundwasserneubildung Q_{NB} in der vorliegenden Arbeit als die Wassermenge beschrieben, die nach der Passage der ungesättigten Zone dem ständig gesättigten Bereich Zutritt. Die in Kapitel 7.1 beschriebenen Zwischenabflüsse, auch in den schwebenden Grundwasserstockwerken, werden nicht als Beitrag zur Grundwasserneubildung betrachtet, da sie im allgemeinen nur temporär auftreten. Abgesehen vom Interflow im Bodenhorizont und an der Schichtgrenze zum Chirotherienschiefer sind die Abflussmengen der Zwischenabflüsse allerdings auch sehr gering.

Die errechneten Grundwasserneubildungsmengen sollen unter folgenden Gesichtspunkten verglichen und interpretiert werden:

- Wie kann der Verlauf der Grundwasserneubildung über den Untersuchungszeitraum interpretiert werden?
- Welchen Einfluss hat die unterschiedliche Zusammensetzung des Porenraums auf die Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik?
- Wie wirkt sich die unterschiedliche tektonische Beanspruchung auf die Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik aus?
- Wie verändert sich die Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik mit zunehmendem Flurabstand?
- Welchen Einfluss haben Wechsel in den Schichtabfolgen auf Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik?
- Wie lassen sich die Jahres- und Monatswerte der Grundwasserneubildung und der Zwischenabflüsse zeitlich und regional miteinander vergleichen?

8.4.1 Verlauf der Grundwasserneubildung

Bei Profillängen über 20 m ändert sich die Grundwasserneubildung auch über längere Zeiträume nur geringfügig (s. Abb. 18). Bemerkenswert ist dagegen der Verlauf der täglichen Grundwasserneubildungshöhen, wie er sich für kürzere Profile, also z.B. 10 m, darstellt. Niederschlagsreiche Perioden treten nicht durch Spitzen mit erhöhter Grundwasserneubildung hervor. Statt dessen ist ein zeitweises, deutliches Abfallen der Grundwasserneubildung von einem sonst relativ konstanten Wert zu beobachten.

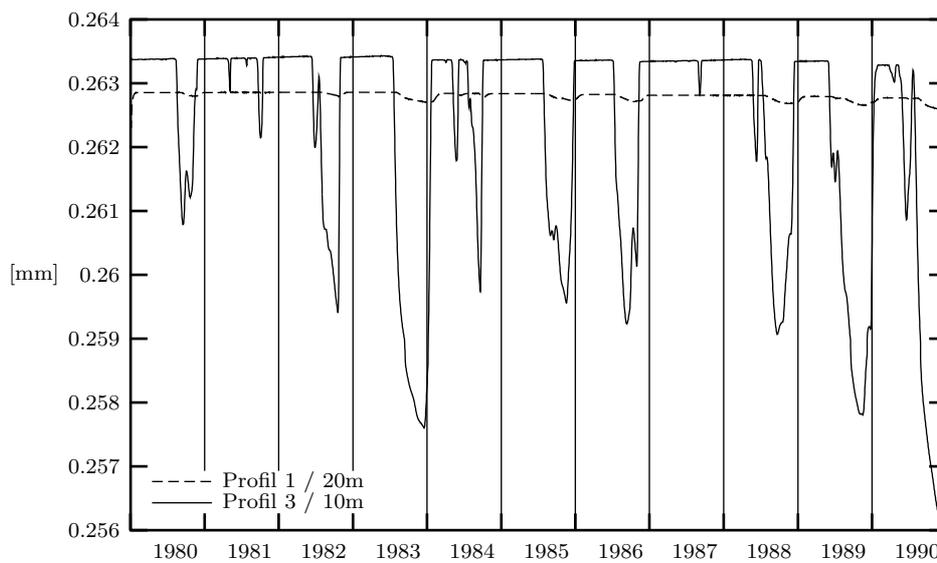


Abbildung 18: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildungshöhen für die Profile 1 und 3 unter natürlichen Bedingungen.

Zur näheren Erläuterung eines solchen Kurvenverlaufs wurden vom Profil 3 (*suG*, 10 m mächtig) die Saugspannungsverteilungen im Profil tageweise erfasst. Genauer betrachtet werden soll der Kurvenverlauf zwischen Sommer 1983 und Ende 1983. Die Grundwasserneubildung sinkt etwa ab Ende Juli 1983 deutlich und beginnt zum Ende des Jahres wieder stark zu steigen. Ein Blick auf die klimatologischen Ausgangsdaten zeigt, dass Sommer und Herbst 1983 durch relativ geringe Niederschläge bei gleichzeitig hoher potentieller Evapotranspiration gekennzeichnet waren. So stand im Zeitraum vom 02.07. bis 23.11.1983 Niederschlägen von 205,2 mm eine potentielle Evapotranspiration von 412,9 mm gegenüber. Die hohe Evapotranspiration bei ausbleibenden Niederschlägen wirkt sich im Bodenhorizont ab etwa 04.07. in einem deutlichen Anstieg der Saugspannung aus.

Sechs Profile sollen einen Überblick über den Verlauf der Saugspannungen im oben genannten Zeitraum geben (s. Abb. 19). Das Profil vom 04.07.1983 stellt die Ausgangssituation dar, bevor die Trockenperiode einsetzt. Bereits nach 19 Tagen ist ein deutlicher Anstieg der Saugspannung im Bodenhorizont und in den obersten Metern der Gesteinsmatrix festzustellen. Ab einer Tiefe von etwa 8 m sind dagegen im Kluftraum und in der Matrix noch keine oder nur geringe Reaktionen feststellbar. Die Grundwasserneubildung geht ab dem 20.07. deutlich zurück. Ein Anstieg der Saugspannung in den untersten Metern ist jedoch sogar bis 08.09. im dargestellten Maßstab kaum erkennbar. An diesem Tag war der Wassergehalt im gesamten

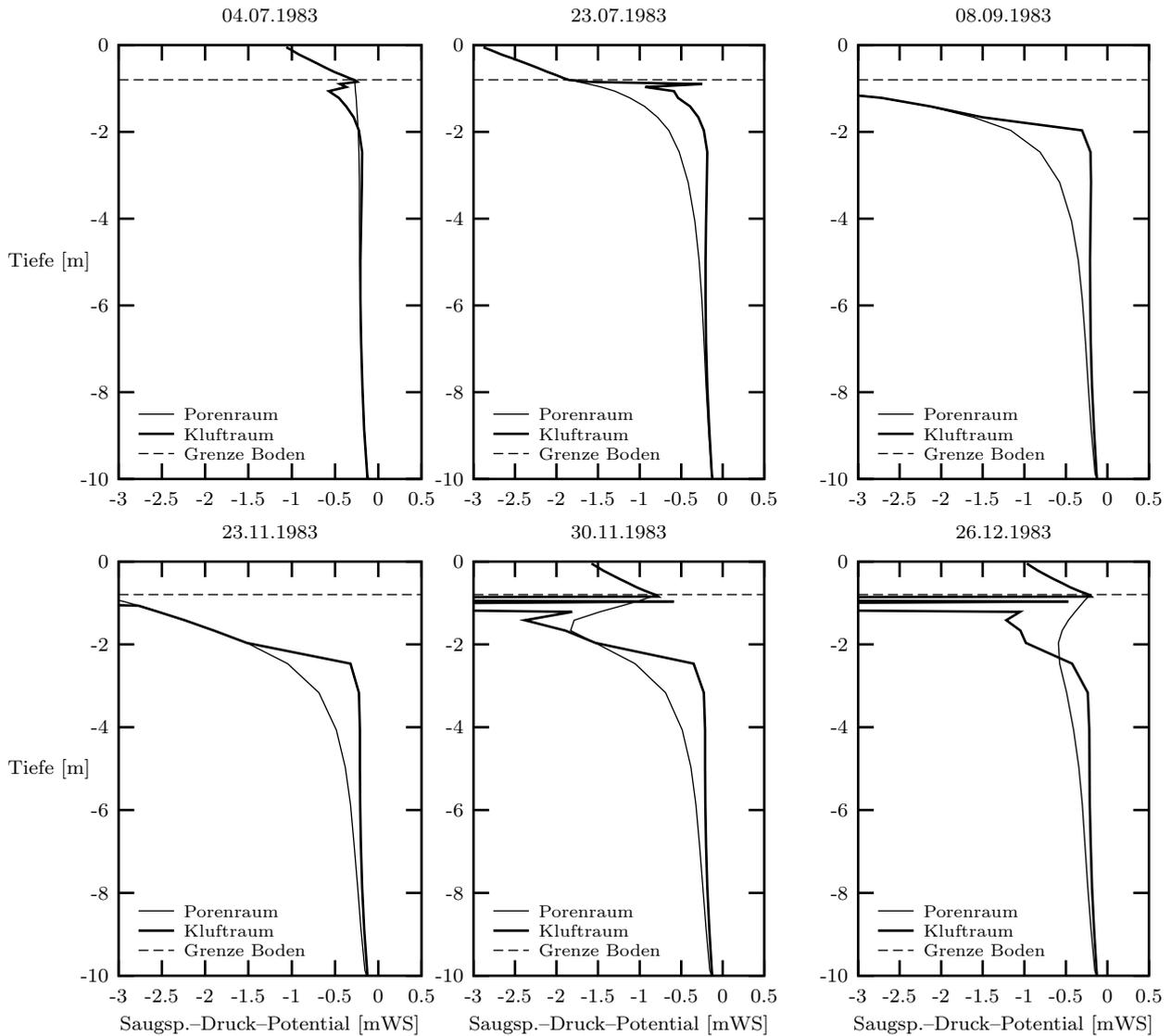


Abbildung 19: Saugspannungen im Profil 3 (*suG*, 10 m mächtig) zwischen Anfang Juli und Ende Dezember 1983.

Profil in dem Zeitraum Sommer bis Ende 1983 am geringsten. Eine Veränderung der Saugspannungen im Kluftraum erfolgt nur sehr langsam. Bis zum 23.11. ist auch hier zumindest ein deutlicher Anstieg der Saugspannung im obersten Meter zu erkennen. Letztendlich wirkt sich der Austausch mit der Matrix aus, in der über einen längeren Zeitraum hohe Saugspannungen vorherrschten. Der 23.11. ist auch der letzte Tag der Periode großer Trockenheit, ab 24.11. setzt eine Niederschlagsperiode ein, in der innerhalb von 6 Tagen 93,3 mm Niederschlag fallen, bei einer potentiellen Verdunstung von 1,6 mm. Erst dieses Niederschlagsereignis wirkt sich merklich auf die Saugspannungsverhältnisse aus. Bis zum 30.11. verringern sich die Saugspannungen im Boden wieder auf Werte zwischen etwa -1,6 und -0,8 mWS. Am 26.12. hatte die Grundwasserneubildung bereits wieder annähernd einen Wert, wie vor dem starken Abfall im Juli erreicht.

Zwischenzeitliche, stärkere Niederschlagsereignisse hatten nur geringe Auswirkungen auf die Saugspannungsverhältnisse. So führt ein Niederschlagsereignis ab 09.09., als innerhalb von 7 Tagen 71,3 mm Regen

fielen, bei einer potentiellen Verdunstung von 8,5 mm nur zu einem kurzzeitigen Rückgang der Saugspannungen im Bodenhorizont.

Spitzen erhöhter Grundwasserneubildung nach niederschlagsreichen Perioden sind, wie bereits erwähnt, nicht zu beobachten. Im niederschlagsreichen und verdunstungsarmen Jahr 1987, kommt es im Gegensatz zu trockenen Jahren zwar zu keinem Rückgang der Grundwasserneubildung im Sommer und Herbst, ein Anstieg ist allerdings gleichfalls nicht zu beobachten. Um die Vorgänge in niederschlagsreichen Zeiten näher zu untersuchen, wurden mit dem Profil 3 zwei weitere Rechenläufe, abweichend von den tatsächlichen Niederschlagsbedingungen durchgeführt. Im ersten zusätzlichen Rechenlauf wurde im Sommer 1983 ein langanhaltendes Niederschlagsereignis simuliert, mit einer Niederschlagsmenge von insgesamt 1371 mm in einem Zeitraum von 100 Tagen (Fall A). Für den zweiten Rechenlauf wurden ebenfalls diese Niederschlagsmengen angenommen. Zusätzlich wurden die Austauschfaktoren für Matrix und Kluftraum herabgesetzt, so dass es zu einer deutlich verzögerten Angleichung der Saugspannungsverhältnisse zwischen Matrix und Kluftraum kommt (Fall B). In der Abbildung 20 sind für beide Bedingungen die Verläufe der Grundwasserneubildung dargestellt.

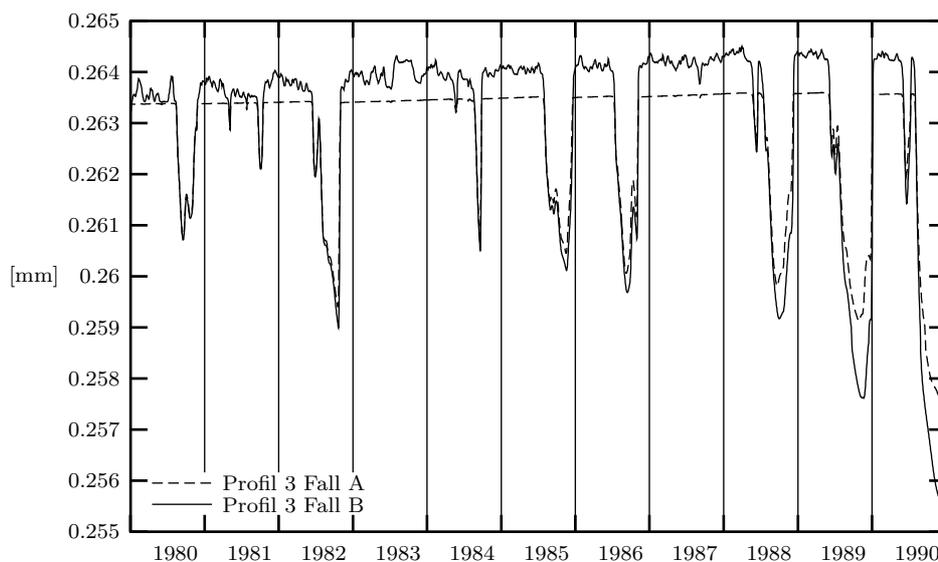


Abbildung 20: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung für das Profil 3, Fälle A und B.

Zwischen dem Verlauf der Grundwasserneubildung unter Standardbedingungen (s. Abb. 18) und dem Verlauf bei Fall A sind keine großen Unterschiede zu erkennen, außer dass es im Sommer/Herbst 1983 zu keinem Rückgang der Grundwasserneubildung kommt. Anders sieht das Bild für den Fall B aus. Zunächst ist eine deutlich stärkere Schwankung der Grundwasserneubildung zu erkennen. Auch das simulierte Niederschlagsereignis im Sommer/Herbst 1983 zeichnet sich als leichter Anstieg der Grundwasserneubildung ab.

Deutliche Unterschiede zeigen auch die Saugspannungsverhältnisse in den Profilen (s. Abb. 21). Der 04.07. und 26.12. stellen jeweils Anfangs- und Endpunkt des Vergleichszeitraumes mit den Standardbedingun-

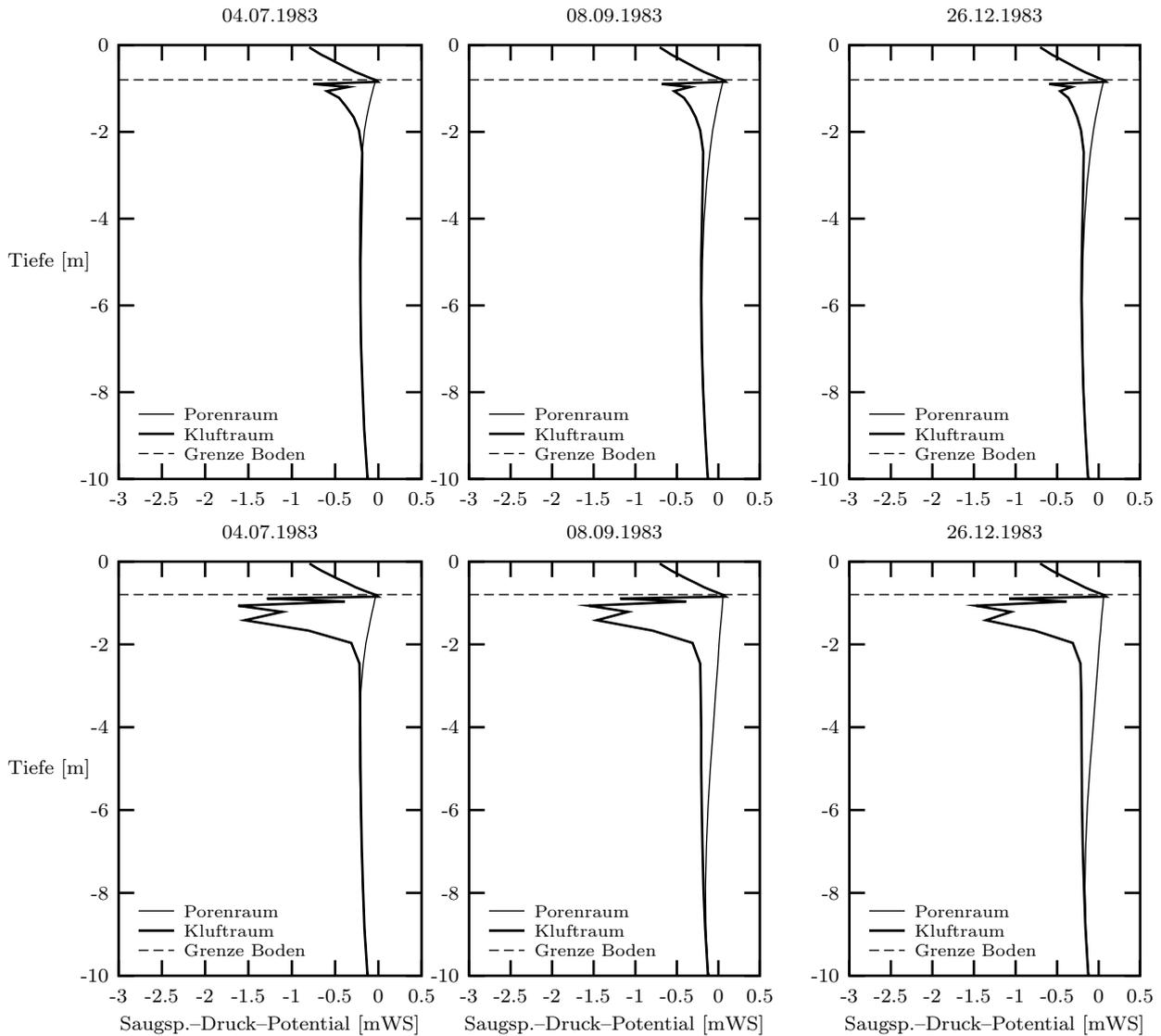


Abbildung 21: Saugspannungen im Profil 3 (*suG*, 10 m mächtig) zwischen Anfang Juli und Ende Dezember 1983 für die Fälle A (oben) und B (unten).

gen (s. Abb. 19) dar. Im Fall A sind die Bedingungen bis zum 04.07 gleich wie im Standardfall. Das Saugspannungsprofil ist daher identisch. Das Profil von Fall B zeigt dagegen bis in Tiefen von etwa 3 m bereits Auswirkungen der verringerten Austauschfaktoren. Am 08.09. sind die Saugspannungen in den Vergleichsprofilen Fall A und B deutlich niedriger als im Standardprofil, am Übergang Boden–Matrix herrschen sogar gesättigte Bedingungen vor. Die Sättigung in der Matrix reicht im Fall B bis in eine Tiefe von etwa 2 m. Die Saugspannungen zwischen Gesteinsmatrix und Kluftraum differieren im Fall A weniger stark als im Fall B. Die Matrix reagiert vor allem im Fall B aufgrund der niedrigeren Saugspannung und der dadurch bedingten größeren, ungesättigten Durchlässigkeit schneller als der Kluftraum und kann die Niederschläge rascher an tiefer liegende Horizonte weiterleiten. Es ist daher in diesem Fall ein durch die erhöhten Niederschläge bedingter Anstieg der Grundwasserneubildung zu beobachten. Dennoch reicht der Anstieg der Grundwasserneubildung auch im Fall B nicht, um die zusätzlichen Niederschlagsmengen zu

decken. Eine entscheidende Rolle spielen in den beiden Fällen A und B die gesättigten Bedingungen am Übergang Boden–Matrix. Dadurch kommt es zu einem ständigen, horizontalen Zwischenabfluss sowohl im Boden (Interflow) als auch in geringem Maße in der Matrix. Die größten Niederschlagsmengen werden über diesen Abfluss aus dem Profil abgeführt. Am Ende des Jahres 1983 sind die Profile A und B gegenüber dem Standardprofil durch einen größeren Wassergehalt gekennzeichnet. Beispielsweise herrschen am 26.12. in den Profilen der Fälle A und B am Übergang Boden–Matrix knapp gesättigte Bedingungen vor. Im Standardprofil werden dagegen zu diesem Zeitpunkt Saugspannungen von etwa $-0,2$ mWS erreicht.

Beim Profil von Fall B sind am 26.12. noch gut die Folgen des geringeren Austausches zwischen Matrix und Klufttraum zu erkennen. Im Gegensatz zu Fall A bestehen fast über das gesamte Profil deutliche Unterschiede zwischen den Saugspannungen in der Matrix und im Klufttraum. Eine erhöhte Grundwasserneubildung im Profil B ist bereits aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 20 zu erkennen. Die höheren Wassergehalte aufgrund der größeren Niederschlagsmengen, haben aber auch im Profil A Auswirkungen. Obwohl der Kurvenverlauf der Grundwasserneubildung, abgesehen vom Rückgang im Sommer 1983, beim Standardprofil und dem Profil A sehr ähnlich ist, wirken sich die verstärkten Niederschläge im Profil von Fall A durch eine geringfügig, aber lang anhaltend erhöhte Grundwasserneubildung aus.

Die untersuchten Beispiele zeigen, dass erhöhte Niederschläge bei hohem Austausch zwischen Matrix und Klufttraum und einer Profiltiefe von 10 m keine Grundwasserneubildungsspitzen zur Folge haben. Große Mengen der infiltrierten Niederschläge werden über Zwischenabflüsse am Übergang Boden–Matrix abgeführt. Zusätzlich werden die Spitzen durch den Austausch zwischen Matrix und Klufttraum gepuffert. Die erhöhten Niederschläge haben allerdings einen Anstieg des Wassergehaltes im Profil zur Folge, der zu einer lange anhaltenden, aber geringen Erhöhung der Grundwasserneubildung führt. Spitzen erhöhter Grundwasserneubildung ergeben sich erst bei geringeren Austauschraten zwischen Matrix und Klufttraum oder bei geringeren Profiltiefen (etwa 3 m), da hier nicht genug Zeit für einen Austausch zur Verfügung steht.

8.4.2 Porenraum und Grundwasserneubildung

In der Abbildung 22 ist der Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung über den gesamten Untersuchungszeitraum an sechs Beispielprofilen mit unterschiedlicher Gesteinszusammensetzung dargestellt. Die Profillänge beträgt einheitlich 10 m. Die Profile sind unterhalb des Bodenhorizontes jeweils durchgehend aus einer Gesteinsabfolge zusammengesetzt. Schichtgrenzen kommen also, abgesehen vom Boden zum Festgestein, nicht vor. Niederschlagsgebiet ist in allen Fällen das der Station Einsiedel. Die tektonische Beanspruchung entspricht der im Ostteil des Untersuchungsgebietes. Profile mit diesen Randbedingungen kommen von der Detfurth– und Hardeggen–Folge und dem Plattensandstein bei den 50 Teilflächen des Untersuchungsgebietes nicht vor. Diese drei Beispielprofile wurden, um die Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen, zusätzlich berechnet.

Die Höhe der Grundwasserneubildung ist abhängig von der Durchlässigkeit des Porenraums. Sandsteine mit hoher Porendurchlässigkeit (vgl. Tab. 11 und Anl. 14) bewirken auch die höchsten Grundwas-

erneubildungen, was sich durch die stärkere Versickerung am Übergang Boden – Festgestein erklären läßt. Die Verhältnisse der Neubildungshöhen stimmen dabei etwa mit den Verhältnissen der gesättigten Durchlässigkeiten des Porenraums überein. Die Schwankungen der Grundwasserneubildung sind bei den hoch durchlässigen Sandsteinen (*smD* und *suS*) am größten. Hier wirkt sich der schnellere Durchfluss und die daraus resultierende, schnellere Reaktion auf Niederschlags- und Evapotranspirationsschwankungen aus. Beim Plattensandstein (*so*) sind die Schwankungen ebenfalls relativ hoch. Ursache könnte die im Vergleich zu den anderen Sandsteinen rasche Entwässerung der Poren sein (s. Wassergehalts-Saugspannungs-Kurve, Anl. 12). Dadurch wird der Puffer verringert, der Schwankungen der Niederschlagshöhen ausgleichen kann.

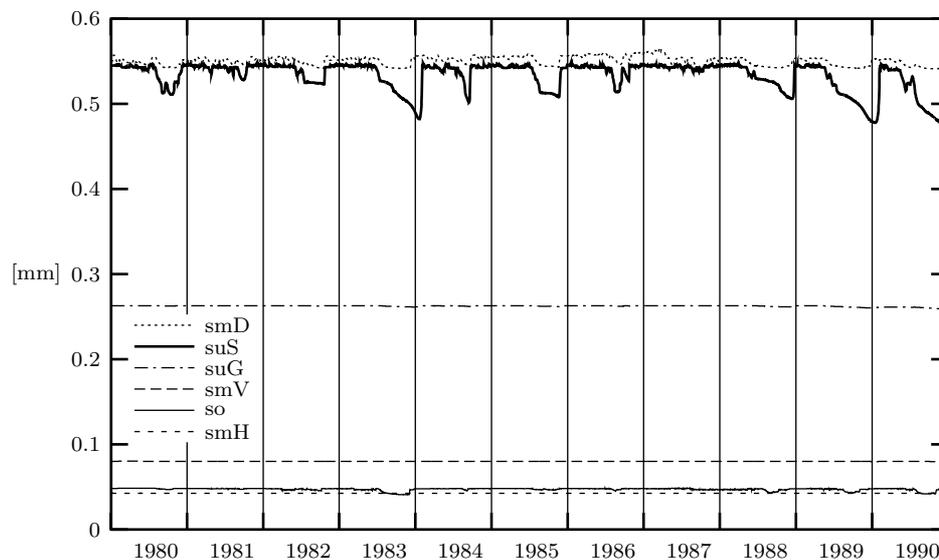


Abbildung 22: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung für alle Gesteinstypen und Profillängen von 10 m.

8.4.3 Tektonische Beanspruchung und Grundwasserneubildung

Wie in Kapitel 4.3.10 erläutert, weist der Ostteil des Untersuchungsgebietes (Störungszone Rechtenbach-Marktheidenfeld) eine tektonisch stärkere Beanspruchung auf als der Westteil. Für den Ostteil wird daher eine stärkere Zerklüftung angenommen, sowohl in Form geringerer Kluftabstände als auch größerer Kluftvolumina. Geringere Kluftabstände und größere Kluftvolumina haben eine höhere Durchlässigkeit des Klufttraumes zur Folge. Durch verringerte Kluftabstände wird die Fläche vergrößert, die für den Austausch von Sickerwasser mit der Matrix zur Verfügung steht. Der erhöhte Austausch bewirkt, dass Wellen zunehmender oder abnehmender Wassergehalte, wie sie vor allem in der Matrix vorkommen können, geglättet werden. Dies bewirkt letztendlich eine Pufferung positiver oder negativer Grundwasserneubildungsspitzen. Am Grundwasserneubildungsverlauf der Profile 6 und 8 läßt sich dieser Zusammenhang gut erkennen (s. Abb. 23). Beide Profile erschließen die Gelnhausen-Folge (*suG*) und unterscheiden sich

lediglich in ihrer tektonischen Beanspruchung. Profil 6 repräsentiert den westlichen, tektonisch weniger beanspruchten Teil des Untersuchungsgebietes, Profil 8 die Störungszone Rechtenbach–Marktheidenfeld im Ostteil des Untersuchungsgebietes. Die negativen Spitzen, wie sie in Kapitel 8.4.1 beschrieben wurden sind beim Profil 6 stärker ausgeprägt als beim Profil 8.

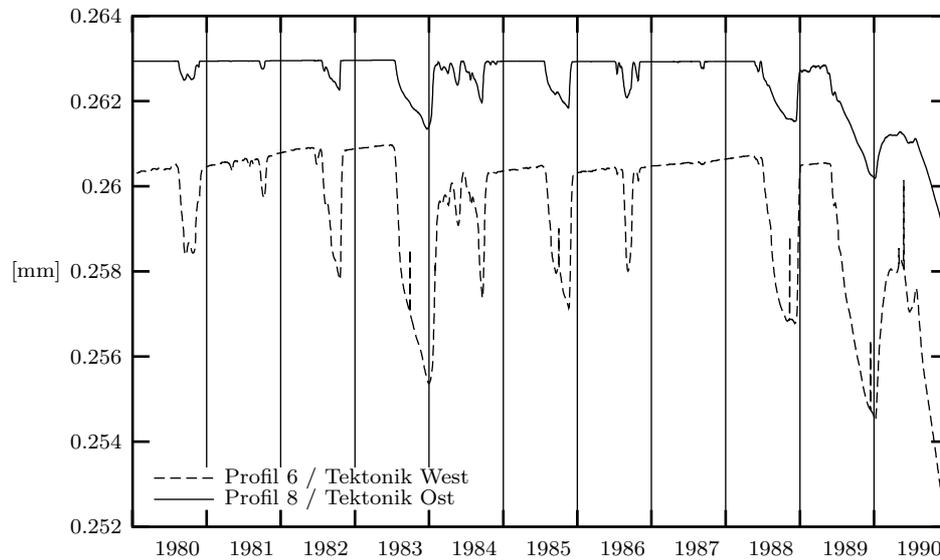


Abbildung 23: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von der tektonischen Beanspruchung.

Die Jahreswerte der Grundwasserneubildung der beiden Profile unterscheiden sich nur geringfügig. Die größere Kluftdurchlässigkeit im Profil 8 hat also keine nennenswerte Erhöhung der Grundwasserneubildung zur Folge.

8.4.4 Flurabstände und Grundwasserneubildung

Wie sich der Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung mit zunehmenden Flurabständen verändert, ist aus der Abbildung 24 ersichtlich. Hier werden Profile unterschiedlicher Mächtigkeit aus der Gelnhausen–Folge miteinander verglichen. Die Schwankungen der Grundwasserneubildung gehen mit zunehmendem Flurabstand deutlich zurück. Bei Tiefen ab 30 m bleibt die Grundwasserneubildungshöhe auch über einen langen Zeitraum konstant, unabhängig von einzelnen Trocken- oder Nassjahren. Hier findet eine ausreichende Dämpfung von Saugspannungsschwankungen statt. Bei geringeren Tiefen ist dagegen nach Trockenjahren ein deutlicher Rückgang der Grundwasserneubildung zu beobachten.

Die Grundwasserneubildungshöhe bis Profiltiefen von 50 m ist etwa gleich hoch, während sie bei Profil 5, das bis in eine Tiefe von 70 m reicht, etwas geringer ist. Bei dieser Profiltiefe kommt der Übergang von der oberflächennahen Zerrüttungszone in die kompakteren Gesteinshorizonte ab 50 m Tiefe zum Tragen (s. Kap. 5.2.3). An diesem Übergang kommt es kurzfristig zu einem Aufstau des Sickerwassers und in der

Folge zu einem lateralen Zwischenabfluss. Dieser Zwischenabfluss geht wiederum der Grundwasserneubildung verloren.

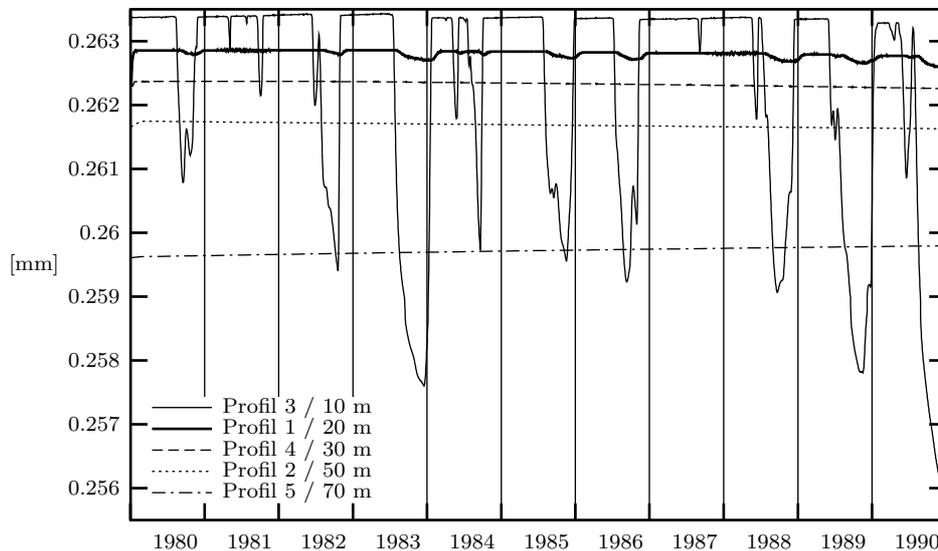


Abbildung 24: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit vom Flurabstand.

An dem vorliegenden Beispiel ist gut die zeitliche Verzögerung der Rückgangs und des Wiederanstiegs der Grundwasserneubildung mit zunehmender Tiefe zu erkennen. Dazu sollen die Profile 3 (10 m tief) und 1 (20 m tief) verglichen werden. Der Rückgang der Grundwasserneubildung im Sommer 1983 setzt im Profil 1 etwa 10 Tage später ein als im Profil 3. Bis zum Ende des Wiederanstiegs der Grundwasserneubildung zum Ausgangswert vor der Trockenperiode vergehen im Profil 3 etwa 165 Tage. Für den gleichen Vorgang sind im Profil 1 über 200 Tage erforderlich. Die Erholung vom Rückgang der Grundwasserneubildung geschieht also in dem 10-m-Profil wesentlich schneller als in dem Profil mit 20 m Tiefe. Die zeitliche Verzögerung zwischen den beiden Profilen ist beim Bewässerungsvorgang größer als beim Entwässerungsvorgang, da beim Bewässerungsvorgang die ungesättigten Durchlässigkeiten geringer sind als beim Entwässerungsvorgang und dieser Faktor mit zunehmender Profillänge an Bedeutung gewinnt.

8.4.5 Schichtfolgenwechsel und Grundwasserneubildung

Folgt unter einer Gesteinsschicht eine Schicht mit geringerer Durchlässigkeit, so hat dies unmittelbare Folgen auf die Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik. An den jeweils 30 m langen Beispielprofilen 9 und 18 soll dies erläutert werden. Profil 18 ist, abgesehen vom Bodenhorizont, über die gesamte Länge aus Gesteinen der Salmünster-Folge zusammengesetzt, wogegen im Profil 9 die untersten 20 m bereits in der Gelnhausen-Folge stehen. Die Sandsteine der Gelnhausen-Folge haben über einen weiten Saugspannungsbereich eine geringere Porendurchlässigkeit (s. Anl. 14). Erst ab Saugspannungen von etwa 5 mWS

sinkt die Matrixdurchlässigkeit der Salmünster-Folge unter die der Gelnhausen-Folge ab. Derart hohe Saugspannungen werden aber im Festgesteinsbereich dieser Profile nicht erreicht.

Wie in der Abbildung 25 zu erkennen ist, wird die Grundwasserneubildungshöhe durch die geringer durchlässige Schicht im Profil 9 um etwa die Hälfte gegenüber Profil 18 verringert (verschiedene y-Achsen beachten). Entsprechend vergrößert sich im Profil 9 der Zwischenabfluss. Im Profil 9 beträgt der zusätzliche Zwischenabfluss an der Schichtgrenze *suS* zu *suG* im Jahresmittel etwa 57 mm. Folgt dagegen unter einer gering durchlässigen eine höher durchlässige Schicht, so ist die geringdurchlässige Schicht ausschlaggebend für die Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik.

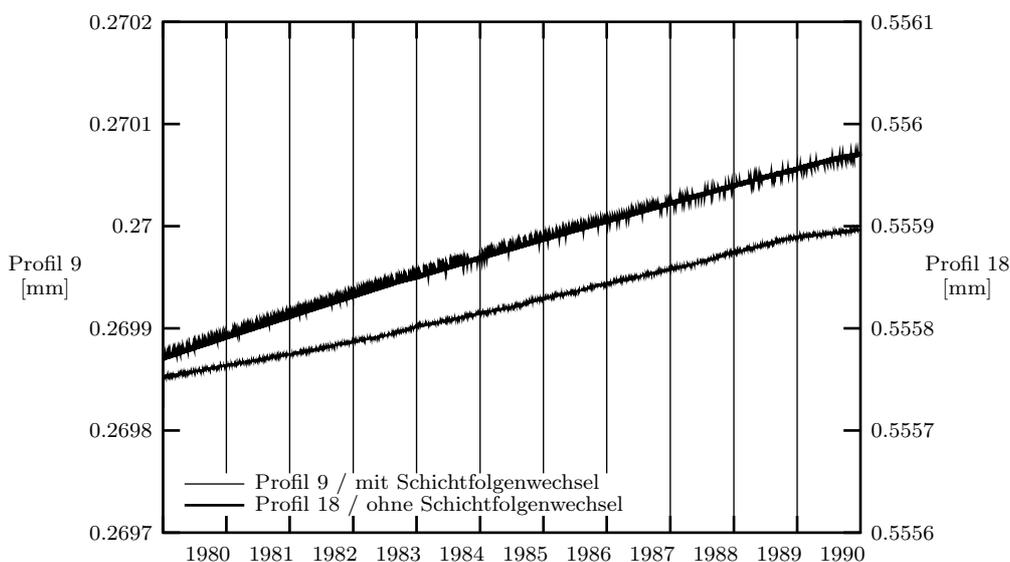


Abbildung 25: Verlauf der Tageswerte der Grundwasserneubildung in den Profilen 9 und 18.

8.4.6 Grundwasserneubildungshöhe im Untersuchungsgebiet

In der Tabelle 25 sind die Jahreswerte der Grundwasserneubildungshöhen nach verschiedenen Unterscheidungskriterien getrennt aufgeführt. Bei allen Werten ist zu erkennen, dass sie im Untersuchungszeitraum 1980 bis 1990 nur geringfügig schwanken. Wird als Grundwasserneubildungsmenge nur die Sickerwassermenge betrachtet, die den gesättigten Bereich des Hauptgrundwasserstockwerkes im Unteren und Mittleren Buntsandstein erreicht, so beträgt die Neubildungshöhe etwa 66 mm pro Jahr. Werden die Zwischenabflüsse an den Schichtgrenzen, ausgenommen dem Interflow im Bodenhorizont, mit berücksichtigt, so errechnet sich eine jährliche Grundwasserneubildungshöhe von durchschnittlich etwa 91 mm.

Deutliche Unterschiede sind zu erkennen, wenn die Neubildungshöhen nach dem anstehenden Gestein verglichen werden. Sehr geringe Neubildungshöhen ergeben sich für die Bereiche mit Plattensandstein und Hardeggen-Folge mit Werten von 12 bis 14 mm, sowie für die Volpriehausen-Folge mit etwa 28 mm. Bei diesen drei Schichthorizonten ist der Interflow am größten (s. Tab. 24). Nach dem hohen Zwi-

schenabfluss verbleiben, beispielsweise im Vergleich zur Salmünster-Folge, geringere Wassermengen zur Weiterversickerung. Bei der Salmünster-Folge ist, neben der Detfurth-Folge, der Interflow am geringsten. Obwohl der Interflow bei *suS* etwas höher sind als bei *smD*, ist die Neubildung unter dem *suS*-Horizont um etwa die Hälfte größer. Ursache hierfür sind relativ hohe Zwischenabflüsse, die am Übergang Detfurth-Volpriehausen-Folge auftreten. Hier treffen Horizonte mit sehr hoher (*smD*) und relativ geringer (*smV*) Matrixdurchlässigkeit aufeinander (s. Tab. 11 und Anl. 14). Dagegen folgen unter der Salmünster-Folge höchstens noch Sandsteine der Gelnhausen-Folge mit einer noch relativ hohen Matrixdurchlässigkeit.

Wenig Aussagekraft hat der Vergleich der jährlichen Neubildungshöhe im gesamten Untersuchungsgebiet nach tektonischer Beanspruchung. Zu erwarten wäre eine höhere Grundwasserneubildung bei stärkerer, tektonischer Beanspruchung. Nach den vorliegenden Zahlen ist es aber so, dass in dem tektonisch weniger beanspruchten Westteil des Untersuchungsgebietes die Grundwasserneubildung höher ist als im Ostteil, der innerhalb der Störungszone Rechtenbach-Marktheidenfeld liegt. Das Ergebnis dieses Vergleichs wird allerdings durch die Verteilung der anstehenden Gesteine beeinflusst. Im Ostteil besitzen Plattensandstein und Hardegsen-Folge einen deutlich größeren Flächenanteil als im Westteil. Mit ihren geringen Neubildungshöhen aufgrund der geringdurchlässigen Matrix, werden potentiell höhere Neubildungsmengen durch stärkere tektonische Beanspruchung mehr als ausgeglichen. Das in Kapitel 8.4.3 vorgestellte Beispiel zeigt allerdings, dass sich auch unter verschiedener tektonischer Beanspruchung und sonst gleichen Bedingungen die Neubildungshöhen nur geringfügig unterscheiden.

Tabelle 25: Jahreswerte der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Hafenlohr.

	Jahreswerte der Grundwasserneubildung 1980 - 1990 [mm]										
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
	Gesamtgebiet										
ohne Zwischenabflüsse	66,7	66,6	66,6	66,6	66,8	66,6	66,7	66,7	66,7	66,4	66,3
mit Zwischenabflüssen	100,1	101,1	100,1	99,0	102,0	100,0	101,0	104,0	100,4	98,6	98,4
	unterschieden nach geologischer Einheit (ohne Zwischenabflüsse)										
so	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,3	12,3	12,2	12,3	12,2	12,1
smH	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2
smD	83,2	83,0	83,0	83,0	83,3	83,0	83,1	83,1	83,3	83,0	82,9
smV	28,1	28,0	28,0	28,0	28,1	28,0	28,0	28,0	28,1	28,0	28,0
suS	122,4	122,2	122,1	122,3	122,6	122,2	122,5	122,7	122,5	121,9	121,5
suG	95,8	95,6	95,6	95,4	95,8	95,5	95,5	95,6	95,7	95,4	95,2
	unterschieden nach tektonischer Beanspruchung (ohne Zwischenabflüsse)										
Ost	61,6	61,7	61,5	61,1	61,5	61,3	61,6	61,8	61,4	60,8	60,2
West	68,2	68,0	68,0	68,2	68,3	68,1	68,1	68,2	68,3	68,1	68,0

Ähnlich wie die Jahreshöhen unterscheiden sich auch die Monatshöhen der Grundwasserneubildung innerhalb des betrachteten Zeitraums nur geringfügig (s. Abb. 26). Bei den Werten ohne Zwischenabfluss ist kaum ein Unterschied erkennbar. Es zeichnen sich lediglich die unterschiedlichen Monatslängen ab. Die geringsten Monatswerte sind daher in diesem Fall im Februar festzustellen. Etwas größere Schwankungen sind zu beobachten, wenn die Zwischenabflüsse in den Festgesteinshorizonten berücksichtigt werden. Dann ergibt sich eine geringfügig höhere Grundwasserneubildung in den Wintermonaten, wobei auch hier der Februar mit geringeren Werten auffällt.

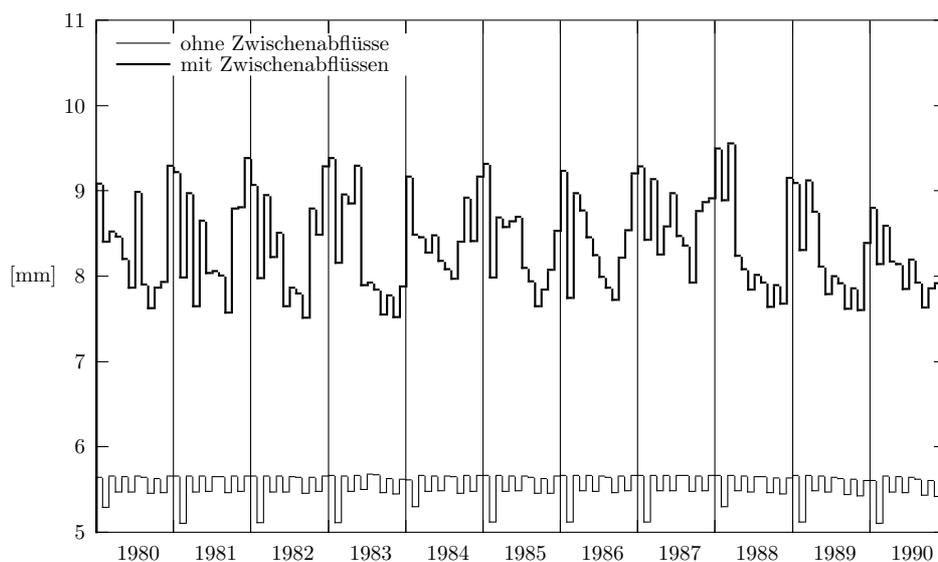


Abbildung 26: Monatssummen der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Hafenlohr ohne und mit Zwischenabflüssen in den Festgesteinshorizonten.

Die Ergebnisse der Neubildungsbetrachtungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Grundwasserneubildungshöhe vom anstehenden Gestein. Wie bereits in Kapitel 8.4.2 festgestellt, steuert das unter dem Bodenhorizont folgenden Gestein in hohem Maße die Weiterversickerung und in der Folge die Grundwasserneubildung. Allerdings können bei großen Durchlässigkeitsunterschieden auch Schichtgrenzen im Festgestein, solange sie nicht zu tief liegen, die weitere Versickerung beeinflussen. Die tektonische Beanspruchung, also Merkmale, die in erster Linie den Kluftraum betreffen, treten demgegenüber zurück. Die zeitliche Schwankung der Grundwasserneubildungshöhen ist sehr gering. Niederschlagsarme (1985) oder -reiche (1981) Jahre spiegeln sich kaum in der Neubildungshöhe wider.

Durch Berücksichtigung der Zwischenabflüsse in den Festgesteinshorizonten vergrößert sich die Grundwasserneubildungshöhe im Untersuchungsgebiet um knapp 40%. Es bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass aufgrund der kürzeren Sickerwege, die Zwischenabflüsse den Vorfluter schneller erreichen. Teile dieser Zwischenabflüsse versickern auf dem Weg zum Vorfluter, andere Teile kommen dem Hauptgrundwasserstockwerk allerdings erst kurz vor Erreichen des Vorfluters oder eventuell auch gar nicht mehr zugute.

Eine gute Übereinstimmung der im Modell errechneten Werte ergibt sich mit den, mit Hilfe konventioneller Methoden (Abflussmengen, Klimabilanzen, s. Kap. 4.5) ermittelten Werten von THEWS (1967), SCHWARZMEIER (1980) und AL-AZAWI (1976). Gleiches gilt für in MATTHESS & MURAWSKI (1978) zitierte Abflussmessungen durch SCHUBUTH (1973) und KEIWANLUNEJAD (1973), die eine Neubildungshöhe von umgerechnet 75,7 mm ergaben. Die von den bisher genannten Autoren ermittelten Werte stammen aus dem Buntsandsteinspessart. Die von ROTHASCHER (1987) veröffentlichten Werte für die mittlere Grundwasserneubildung aus Abflussmessungen am Pegel Hafenlohr, sind im Vergleich zu den im Modell ermittelten Werten zu hoch. Berücksichtigt man allerdings auch den Minimalwert nach ROTHASCHER, so kann der aus beiden Werten gewonnene, gemittelte Wert von etwa 85 mm recht gut mit den vorliegenden Ergebnissen verglichen werden, wenn die Zwischenabflüsse im Festgestein berücksichtigt werden.

Zum Teil deutliche Unterschiede zeigen sich im Vergleich zu den Neubildungswerten von UDLUFT (1971), IGI (1981) und MATTHESS & MURAWSKI (1978). Allerdings wurden die Werte von UDLUFT und IGI im Buntsandstein der Rhön ermittelt, und können daher nicht unmittelbar mit dem Untersuchungsgebiet verglichen werden. Die Werte von MATTHESS & MURAWSKI (1978) wurden im Buntsandsteinspessart gewonnen. Legt man die Tabelle 36 ihrer Veröffentlichung zugrunde, so ergibt sich für das Einzugsgebiet der Hafenlohr eine Grundwasserneubildungshöhe von umgerechnet 146,6 mm. Dies ist noch deutlich mehr, als sich anhand der vorliegenden Untersuchungen, auch unter Berücksichtigung der Zwischenabflüsse im Festgestein ergibt. Die Werte von MATTHESS & MURAWSKI sind allerdings auch im Vergleich zu denen anderer Autoren relativ hoch (s. Tab. 7).

Wie die Anlagen 29 und 30 zeigen, findet die Grundwasserneubildung überwiegend im Oberlauf der Hafenlohr, also im Westteil des Untersuchungsgebietes statt. Hier, wo die relativ gut durchlässigen Abfolgen der Salmünster- und Gelnhausen-Folge anstehen, sind die besten Bedingungen für hohe Neubildungsraten gegeben. Im Südostteil, wo überwiegend die Schichtfolgen des Plattensandsteins und der Hardeggen-Folge ausbeissen und wo das Einzugsgebiet des Wagenbaches liegt, sind die Neubildungsraten deutlich geringer. Inselartige Bereiche höherer oder niedrigerer Neubildung sind ebenfalls an die Petrographie gebunden. Auch die von Nordwesten nach Südosten abnehmenden Niederschläge (s. Kap. 6.2) kommen als weitere Ursache für höhere Grundwasserneubildung im Westteil in Frage. Bei Berücksichtigung der Zwischenabflüsse im Festgestein ergibt sich ein differenzierteres Bild der Neubildungsverteilung. Die geologischen Grenzen zeichnen sich dann noch klarer in der Verteilungskarte ab. Vor allem in Bereichen mit geringen Flurabständen, also beispielsweise im Nordwestteil des Untersuchungsgebietes, ist dies zu beobachten. Hier sind die Flurabstände gering und unter der Salmünster-Folge liegen die geringer durchlässigen Sandsteine der Gelnhausen-Folge. Unter diesen Bedingungen, geringe Flurabstände und unterlagernde, geringer durchlässige Schicht, haben auch die Zwischenabflüsse im Festgestein, im Vergleich zur Grundwasserneubildung, eine relevante Größe. Bei großen Tiefen der Schichtgrenzen, sind dagegen schon aufgrund der Glättung der Sickerwasserspitzen mit zunehmender Tiefe, die Zwischenabflüsse geringer. Zwischen Winter- und Sommerhalbjahr unterscheiden sich die Verteilungen der Grundwasserneubildung kaum. Auf Verteilungskarten der Halbjahre wird daher verzichtet.

8.5 Vergleich mit dem Abfluss der Hafenlohr

Neben der Bilanzierung besteht mit dem Pegel Hafenlohr (s. Kap. 4.4.5) die Möglichkeit die Ergebnisse der Modellrechnungen über den Abfluss im Vorfluter auf Plausibilität hin zu überprüfen. Ausgehend von dem Modellansatz (s. Kap. 7.1) setzt sich der Abfluss im Vorfluter zusammen aus dem Oberflächenabfluss Q_O , den Zwischenabflüssen Q_{Zi} (inklusive dem Interflow im Bodenhorizont) und der Grundwasserneubildung Q_{NB} . Abhängig von den Sickergeschwindigkeiten und von der Fliessdauer bis zum Pegel des Vorfluters, treffen diese Abflusskomponenten mit unterschiedlicher zeitlicher Verzögerung am Pegel ein und bestimmen somit die Abflusscharakteristik.

Zur Simulation des Abflusses wird eine einfache Methode verwendet, die sich auf die Fliesszeiten bis zum Vorfluter stützt. Dazu werden mit Hilfe eines GIS stufenweise die Entfernungen bis zu den Bächen und

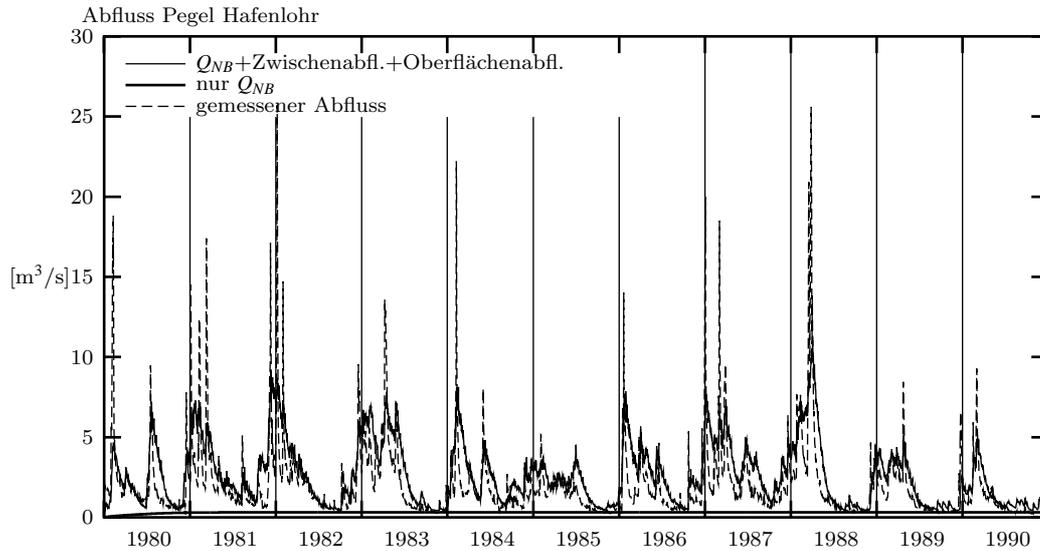


Abbildung 27: Gemessener und berechneter Abfluss am Pegel Hafenlohr (s. Kap. 4.4.5).

Flüssen berechnet und die Ergebnisse der Entfernungsmessungen mit den Teilflächen verschnitten. Entsprechend den Entfernungen und den Fließzeiten werden den Zwischenabflüssen und der Grundwasserneubildung Verzögerungen in Tagesschritten zugeordnet. Von den Oberflächenabflüssen wird angenommen, dass sie innerhalb eines Tages den Pegel Hafenlohr erreichen. Das Ergebnis der Berechnungen ist in der Abbildung 27 dem gemessenen Abfluss am Pegel Hafenlohr zum Vergleich gegenübergestellt. Dargestellt sind neben der Abflussmessung die Summe aus Oberflächenabfluss, Zwischenabflüssen und Grundwasserneubildung, sowie die Grundwasserneubildungshöhe allein. Die einfache und grobe Berechnungsmethode liefert, gestützt auf die Ergebnisse der Sickerwasserberechnung, bereits eine gute Übereinstimmung mit dem Verlauf der gemessenen Abflusswerte. Die Ausschläge der Abflusshöhen werden praktisch vollständig durch den Interflow verursacht. Zwischenabflüsse im Festgestein können mengenmäßig vernachlässigt werden. Die Grundwasserneubildungshöhe ist etwa so hoch wie der minimale Abfluss.

Die Spitzen des gemessenen Abflusses sind wesentlich höher als bei den gerechneten Werten. Dies liegt vermutlich in erster Linie an der geringen zeitlichen Auflösung der Niederschlagsdaten. Die hohen Abflussspitzen werden durch Oberflächenabflüsse verursacht. Diese fallen jedoch im Modell zu niedrig aus, da nur Tageswerte der Niederschläge zur Verfügung standen. Kurzzeitige Starkregenereignisse, die zu hohen Oberflächenabflüssen führen, wenn die maximalen Infiltrationsraten überschritten werden, werden dadurch zeitlich gestreckt und liegen dann häufig unter den maximalen Infiltrationsraten.

Die berechneten Abflussmengen sind um etwa 30% höher als die gemessenen Abflüsse. Diese Abweichungen lassen sich nicht durch Modellfehler erklären. Auch eine im Modell zu niedrig berechnete, tatsächliche Evapotranspiration kommt in dieser Größenordnung nicht in Frage. Die potentielle Evapotranspiration stimmt gut mit den Werten von KERN (1974) überein. Vermutlich ist die Abweichung zwischen oberirdischem und unterirdischem Einzugsgebiet größer als angenommen. Demnach wären die Grundwasser gleichenpläne, auf denen die Abgrenzung des unterirdischen Einzugsgebietes beruht (s. Kap. 4.4.4), zu

überarbeiten. In Kapitel 4.4.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass zwischen den Grundwassergleichplänen der amtlichen Geologischen Karten 1:25.000 (SCHWARZMEIER, 1979 und 1980 und WITTMANN, 1972) teilweise große Abweichungen festzustellen sind.

8.6 Bilanzierung

Die Bilanzierung des Wasserhaushaltes dient zum Einen dazu, die Qualität des Modells zu beurteilen, zum Anderen wird ein Einblick gegeben, wie sich die Wassermengen bei unterschiedlichen Bedingungen aufteilen. In der Tabelle 26 wird die Wasserbilanz des gesamten Untersuchungsgebietes für die Jahre 1981 und 1985 jeweils quartalsweise betrachtet. Das Jahr 1981 war niederschlagsreich und das Jahr 1985 niederschlagsarm. In der Tabelle 27 sind für diese beiden Jahre die im Boden und in den verschiedenen Gesteinseinheiten gespeicherten Wassermengen aufgelistet. Für die meisten Teilflächen werden die Ergebnisprofile quartalsweise (genauer alle 91 Tage) gespeichert. Wassergehaltsbetrachtungen über alle Gesteinseinheiten für das gesamte Untersuchungsgebiet sind daher nur quartalsweise möglich.

Tabelle 26: Wasserhaushaltsbilanzen für das Einzugsgebiet der Hafenlohr und die Jahre 1981 und 1985.

Quartal	Bilanzgrößen für die Jahre 1981 und 1985 (Quartalswerte) [m ³]							Bilanzfehler
	N	E_a	Q_O	Q_Z	Q_{NB}	Q_K	ΔS	
1/81	$5,28 \cdot 10^7$	$= 6,05 \cdot 10^6$	$+ 1,24 \cdot 10^5$	$+ 4,35 \cdot 10^7$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -2,49 \cdot 10^1$	$+ 7,80 \cdot 10^5$	$1,49 \cdot 10^6$
2/81	$3,87 \cdot 10^7$	$= 2,39 \cdot 10^7$	$+ 8,24 \cdot 10^4$	$+ 1,11 \cdot 10^7$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -2,38 \cdot 10^1$	$+ -1,11 \cdot 10^6$	$1,29 \cdot 10^5$
3/81	$3,50 \cdot 10^7$	$= 3,19 \cdot 10^7$	$+ 3,33 \cdot 10^5$	$+ 7,14 \cdot 10^6$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -2,62 \cdot 10^1$	$+ 6,46 \cdot 10^6$	$-2,85 \cdot 10^5$
4/81	$6,47 \cdot 10^7$	$= 4,99 \cdot 10^6$	$+ 2,28 \cdot 10^5$	$+ 4,92 \cdot 10^7$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -1,42 \cdot 10^1$	$+ -6,29 \cdot 10^6$	$1,61 \cdot 10^6$
1/85	$2,11 \cdot 10^7$	$= 3,99 \cdot 10^6$	$+ 3,70 \cdot 10^4$	$+ 1,44 \cdot 10^7$	$+ 2,44 \cdot 10^6$	$+ -1,75 \cdot 10^1$	$+ 4,04 \cdot 10^5$	$5,89 \cdot 10^5$
2/85	$4,47 \cdot 10^7$	$= 2,08 \cdot 10^7$	$+ 8,35 \cdot 10^4$	$+ 2,03 \cdot 10^7$	$+ 2,44 \cdot 10^6$	$+ -2,66 \cdot 10^1$	$+ -7,02 \cdot 10^5$	$4,07 \cdot 10^5$
3/85	$2,77 \cdot 10^7$	$= 3,45 \cdot 10^7$	$+ 5,19 \cdot 10^5$	$+ 4,60 \cdot 10^6$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -1,70 \cdot 10^1$	$+ 1,33 \cdot 10^7$	$-9,78 \cdot 10^5$
4/85	$2,53 \cdot 10^7$	$= 9,61 \cdot 10^6$	$+ 7,49 \cdot 10^5$	$+ 2,74 \cdot 10^6$	$+ 2,43 \cdot 10^6$	$+ -2,30 \cdot 10^1$	$+ -1,08 \cdot 10^7$	$-1,10 \cdot 10^6$

Aus Tabelle 26 ist ersichtlich, dass in den Quartalen 2 und 3, also von April bis September, die tatsächliche Evapotranspiration zum Teil deutlich steigt. Im Vergleich der beiden Jahre 1981 und 1985 liegen die Quartalswerte etwa in der gleichen Größenordnung. Sehr konstant ist die Grundwasserneubildungshöhe unabhängig von Jahren oder Quartalen. Mengenmäßig zu vernachlässigen sind Oberflächenabfluss und Kapillaraufstieg. Einen engen Zusammenhang mit der Niederschlagshöhe zeigt die Höhe der Zwischenabflüsse. Sie spielen für die Wasserhaushaltsbilanz eine wesentliche Rolle, wobei der Zwischenabfluss im Bodenhorizont (Interflow) maßgeblich ist. Zeitweise von größerer Bedeutung für die Wasserbilanz ist die Speicheränderung im Poren- und Klufttraum. Aus Tabelle 27 ist ersichtlich, dass die Speicheränderung insgesamt im wesentlichen vom Verhalten im Bodenspeicher abhängt. Die Speicheränderung im Boden ist wiederum überwiegend von Niederschlag und Evapotranspiration abhängig. So nimmt beispielsweise der Speicherinhalt im Boden im 3. Quartal 1981 aufgrund der geringen Niederschläge und der anhaltend hohen Evapotranspiration deutlich ab und steigt im 4. Quartal mit Zunahme der Niederschläge und dem Rückgang der Evapotranspiration wieder an. Der Bilanzfehler ist mit Quartalswerten zwischen absolut

1,22 und $5,38 \cdot 10^5$ m³ gering. Umgerechnet entspricht dies zwischen 0,8 und 3,7 mm innerhalb von 91 Tagen.

Tabelle 27: Wasserspeicherung im Boden und den Festgesteinshorizonten in den Jahren 1981 und 1985 (Quartalswerte).

Quartals- ende	Wasserspeicherung im Boden und Festgestein (Quartalswerte) [m ³]							
	Boden	so2	so1	smH	smD	smV	suS	suG
1/81	$39,31 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,61 \cdot 10^6$	$134,89 \cdot 10^6$	$55,59 \cdot 10^6$	$118,25 \cdot 10^6$	$256,59 \cdot 10^6$	$252,62 \cdot 10^6$
2/81	$40,41 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,62 \cdot 10^6$	$134,88 \cdot 10^6$	$55,59 \cdot 10^6$	$118,25 \cdot 10^6$	$256,59 \cdot 10^6$	$252,62 \cdot 10^6$
3/81	$34,22 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,62 \cdot 10^6$	$134,86 \cdot 10^6$	$55,50 \cdot 10^6$	$118,24 \cdot 10^6$	$256,59 \cdot 10^6$	$252,60 \cdot 10^6$
4/81	$40,24 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,61 \cdot 10^6$	$134,86 \cdot 10^6$	$55,60 \cdot 10^6$	$118,25 \cdot 10^6$	$256,60 \cdot 10^6$	$252,62 \cdot 10^6$
1/85	$39,61 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,62 \cdot 10^6$	$134,72 \cdot 10^6$	$55,60 \cdot 10^6$	$118,28 \cdot 10^6$	$256,62 \cdot 10^6$	$252,61 \cdot 10^6$
2/85	$40,29 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,61 \cdot 10^6$	$134,72 \cdot 10^6$	$55,62 \cdot 10^6$	$118,28 \cdot 10^6$	$256,63 \cdot 10^6$	$252,61 \cdot 10^6$
3/85	$27,57 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,61 \cdot 10^6$	$134,69 \cdot 10^6$	$55,49 \cdot 10^6$	$118,24 \cdot 10^6$	$256,60 \cdot 10^6$	$252,55 \cdot 10^6$
4/85	$37,98 \cdot 10^6$	$112,07 \cdot 10^6$	$14,61 \cdot 10^6$	$134,69 \cdot 10^6$	$55,51 \cdot 10^6$	$118,27 \cdot 10^6$	$256,63 \cdot 10^6$	$252,61 \cdot 10^6$

8.7 Fehlerbetrachtung

Zur Eichung des numerischen Modells liegen keine direkten Messergebnisse vor. Für eine grobe Eichung der Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik können lediglich die Abflussdaten an den Pegeln der Vorfluter herangezogen werden (s. Kap. 8.5). Demnach läßt sich die Summe aus Oberflächenabfluss, Zwischenabflüssen und Grundwasserneubildung gut mit dem Abfluss am Pegel Hafenlohr vergleichen. Allerdings ist der errechnete Abfluss etwa höher als der am Pegel gemessene. Dies kann unter anderem an Fehlern bei der Datenerhebung, Umsetzung der Daten und Berechnung liegen.

Im den folgenden Kapiteln werden, da eine genaue Eichung nicht durchgeführt werden kann, mögliche systematische Fehler und Messfehler nur beschrieben. Numerische Fehler können dank der Bilanzierung quantifiziert werden. Abschließend werden Maßnahmen zur Reduzierung der systematischen und numerischen Fehler vorgeschlagen, wobei u.a. auf die Erfahrungen bei den zahlreichen Rechenläufen zurückgegriffen wird.

8.7.1 Mögliche Fehlerquellen

Fehler bei der Datenerhebung

Zur Ermittlung der Modellgrößen wurden zahlreiche Daten erhoben, die mit unterschiedlich großen Messfehlern behaftet sein können und wobei die Messfehler verschieden starke Auswirkungen auf das Modell haben können.

Mit geringen Fehlern dürften die klimatologischen Daten behaftet sein. Die Abweichungen der gemessenen Niederschlagsmengen, Luftfeuchte und Temperatur von den tatsächlichen Werten sollten so gering sein, dass aufgrund dieser Abweichungen keine nennenswerten Fehler im Modell auftreten sollten.

Bei der Datenerhebung der Kluftkenngrößen stellt sich vor allem die Frage, inwieweit die erhobenen Daten bereits für den jeweiligen Aufschluss repräsentativ sind. Die Daten der Klufttrichtungen und -neigungen lassen sich gut mit den Ergebnissen bisheriger Arbeiten (SCHUBUTH, 1973 und HUBER, 1992) vergleichen. Auch zeigen die ermittelten Daten, nach Teilgebieten getrennt, ähnliche Ergebnisse, so dass bei der Frage der Klufttrichtungen und -neigungen von einer weitgehend repräsentativen Erhebung ausgegangen werden kann. Die Messungen der Kluftöffnungsweiten sind mit einem relativ großen Fehler behaftet, da bei i.d.R. schlechten Aufschlussverhältnissen die Öffnungsweiten bereits innerhalb einer Kluft stark variieren. Ähnliches gilt für die Messung der Kluftabstände, die z.T. aufgrund von Verstärkungen und Bewegungen von Gesteinsblöcken schwierig zu erfassen waren. Wie sich bei der Modellierung gezeigt hat, haben die Kluftkenngrößen bei den ungesättigten Strömungsverhältnissen allerdings nur einen geringen Einfluss auf die Grundwasserneubildungshöhe. Einen größeren Einfluss haben sie bei relativ kurzen Profilen auf die Wechselwirkung mit dem Porenraum und somit in erster Linie auf die Neubildungsdynamik. Dieser Faktor spielt jedoch bei Profilen über 10 m Länge nur noch eine geringe Rolle.

Die Erfassung der Mächtigkeit des Bodenhorizontes gestaltete sich durch den oft fließenden Übergang zum Festgestein in Verbindung mit z.T. dichtem Bewuchs in den häufig sehr alten Steinbrüchen als schwierig. Der Fehler kann dadurch bereits im Dezimeterbereich liegen. Wie Probeläufe gezeigt haben, haben Abweichungen in dieser Größenordnung allerdings nur geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse der Neubildungsberechnungen (s. Kap. 7.1). Der schwierig zu erfassende, hydraulische Übergang vom Boden zum Festgestein kann dadurch angenähert werden, indem dem Klufttraum der obersten 1,5 cm die hydraulischen Kenngrößen des überlagernden Bodens zugeordnet werden.

Die im Labor gemessenen hydraulischen Werte des Porenraums sind plausibel und gut vergleichbar mit Literaturwerten. Messfehler können auch aufgrund der bewährten Methodik gering angesetzt werden.

Die ermittelte Fläche des oberirdischen Einzugsgebietes der Hafenlohr stimmt sehr gut überein mit dem Wert von ROTHASCHER (1987, s. a. Kap. 4.4.4). Der Fehler bei der Ermittlung der Fläche kann als gering eingestuft werden. Bei den Abflussmessungen handelt es sich um amtliche Daten des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft. Die Messfehler sind vermutlich ebenfalls gering.

Einige Modellgrößen stützen sich auf Literaturdaten. Hier sind vor allem zu nennen Gebirgsdurchlässigkeit, Kluftvolumen (Ermittlung über Abflussmessungen nach Maillet), Bodenkenngrößen, Grundwasserhöhen und tektonische Beanspruchung. Diese Literaturwerte wurden auf ihre Plausibilität überprüft.

Fehler beim Modellansatz

Neben der Datenerhebung treten Fehler bei der Umsetzung der Daten bzw. bei der weitergehenden Berechnung für das Modell auf. Bei den klimatologischen Daten ist hier vor allem die Auflösung der Niederschlagswerte als Tageswerte zu nennen. Kurzzeitige Starkregenereignisse werden dadurch geglättet, was vor allem eine Verminderung möglicher Oberflächenabflüsse zur Folge hat.

Die ungesättigten Durchlässigkeiten im Kluft- und Porenraum wurden nicht direkt gemessen, sondern indirekt über Ergebnisse von Labor- und Geländemessungen ermittelt. Die Berechnungsmethoden beruhen auf Literaturangaben. Systematische Fehler der Methoden sind nicht anzunehmen; die Ergebnisse der Berechnungen sind plausibel. Dagegen kann es jedoch zu Rundungs- und Approximationsfehlern kommen. Approximationsfehler können auch bei der Umsetzung der Messergebnisse in Modellgrößen, also z.B. α - und n -Werte des Porenraums nach VAN GENUCHTEN (1980) kommen, da diese Kenngrößen durch nichtlineare Kurvenanpassung aus den Messwerten ermittelt wurden.

Sand-Ton-Wechselagerungen innerhalb größerer Sandsteinfohlen wurden nicht gesondert berücksichtigt. Wie bereits in Kapitel 7.1 angemerkt, sind diese Abfolgen jedoch nur geringmächtig und lateral nicht aushaltend. Diese Generalisierung sollte daher keine großen Auswirkungen auf die Ergebnisse der Simulationen haben.

Die Klüfte wurden für den Modellansatz nicht als diskrete Elemente erfasst und behandelt, sondern der gesamte Kluftraum in ein Porenäquivalent umgesetzt. Ein Porenäquivalent stellt nur eine Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse dar. Je ungleichmäßiger die Klüfte verteilt sind, desto größer wird die Abweichung des Äquivalents gegenüber den tatsächlichen Bedingungen. Unter ungesättigten Bedingungen, die bei der vertikalen Sickerwasserströmung überwiegen, stellen sich die Abweichungen allerdings nicht so problematisch dar, da die Wasserbewegungen zum größten Teil in der Matrix stattfindet. Bedeutender wirkt sich in diesem Zusammenhang der Einfluss der Klufttraumeigenschaften auf die Wechselwirkung mit der Matrix aus. Der Austausch zwischen Kluftraum und Matrix bewirkt eine Glättung der Saugspannungsspitzen und ist abhängig von den Kluftflächen, die für den Austausch zur Verfügung stehen sowie von einem Austauschfaktor. Zwar wird im Modell angestrebt, über den Austauschfaktor immer so rasch wie möglich ein Saugspannungsgleichgewicht zwischen Kluft- und Porenraum zu erreichen, doch ist dies in einigen Fällen nur bedingt möglich, da zu große Austauschfaktoren teilweise numerische Oszillation zur Folge haben.

Wie bereits in Kapitel 2.5 erläutert, wird der Hystereseeffekt der Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung nicht berücksichtigt. Die Saugspannungen überschreiten jedoch ganz selten Werte von 10 mWS. Die Hystereseschleife kommt daher nicht voll zu Ausbildung und die resultierenden Fehler bleiben gering. Lediglich in den obersten Zentimetern des Bodenhorizontes können die Saugspannungen von Sättigung bis praktisch Restwassergehalt schwanken. Der Fehler bei der Wassermenge fällt allerdings schon im Vergleich zum restlichen Bodenprofil kaum ins Gewicht.

Fehler bei der Regionalisierung der Daten

Fehler bei der Regionalisierung sind durch die Generalisierung der Daten bedingt. Eine Generalisierung war notwendig, da sonst die große Zahl unterschiedlicher Teilflächen einen zu hohen Rechenaufwand verursacht hätte. Auch die Zellgröße von 50·50 m muss als Kompromiss gesehen werden zwischen den Wünschen, möglichst genaue und differenzierte Ergebnisse zu erhalten und den Rechenaufwand in Grenzen zu halten.

Fehler bei der Generalisierung entstehen durch zu geringe Auflösung von Eigenschaften oder durch Verschiebung von Eigenschaftsgrenzen gegenüber den tatsächlichen Bedingungen. Im Untersuchungsgebiet betrifft dies die Eigenschaften Niederschlag, Geologie, Tektonik, Flurabstand und Hangneigung.

Numerische Fehler

Einen Überblick über häufig auftretende numerische Fehler geben BUSCH ET AL. (1993). Das im vorliegenden Modell verwendete Douglas-Jones-Verfahren ist nach den Autoren als anfällig für numerische Oszillation zu betrachten. Die Anfälligkeit hat sich bei den Rechenläufen bestätigt. Zu Oszillation kommt es bei hohen Fließraten, wobei dies im vorliegenden Modell sowohl bei Wasserzufuhr als auch -entzug der Fall sein kann. Vor allem unter gesättigten Bedingungen ist dies zu beobachten, wenn es gleichzeitig zu einem lateralen Abfluss kommt (Zwischenabfluss) und ein Austausch z.B. vom Porenraum in den Kluftraum stattfindet. Konkret kommt dies häufig vor, wenn es am Übergang von einer gut durchlässigen in eine schlechter durchlässige Schicht zu einem Aufstau und gesättigten Bedingungen kommt. Der Aufstau tritt wegen der günstigeren Durchlässigkeiten zuerst im Porenraum auf. Es setzt dann der laterale Abfluss ein und gleichzeitig wird Wasser an den Kluftraum abgegeben. In der Regel verursacht dann der hohe Wasserentzug aus dem Porenraum die numerische Oszillation, was sich durch ungewöhnlich hohe oder niedrige Zwischenabflüsse und einem großen absoluten Tagesbilanzfehler äußert.

Stabilitätsfehler können im vorliegenden Modell ebenfalls auftreten. „Ein numerisches geohydraulisches Modell wird dabei als unbedingt stabil bezeichnet, wenn eine Störung bzw. ein verursachter Fehler von Zeitschritt zu Zeitschritt bzw. mit zunehmendem Abstand vom Ortspunkt seines Auftretens gedämpft wird. Bei bedingt stabilen Schemata tritt dagegen die Dämpfung nur unter bestimmten Bedingungen auf“ (BUSCH ET AL., 1993, S.403). Bei der Lösung numerischer Aufgabe ist das implizite Lösungsschema nach BUSCH ET AL. unbedingt stabil, wogegen das explizite Lösungsschema nur bedingt stabil ist. Das explizite Lösungsschema kommt zwar im vorliegenden Modell nicht zur Anwendung, mit dem Crank-Nicholson-Schema jedoch eine Übergangsform zwischen implizitem und explizitem Schema. Vermutlich haben die Stabilitätsfehler ihre Ursachen im Crank-Nicholson-Schema, das zur Lösung des Korrekturschrittes (Corrector) verwendet wird. Stabilitätsfehler werden im allgemeinen geringer bei kleiner werdenden Zeit-, größer werdenden Ortsschrittweiten und kleiner werdenden Durchlässigkeiten.

Schließlich können nach BUSCH ET AL. (1993) numerische Fehler auch durch Rundungsfehler auftreten, die u.a. bei extremen Sprüngen der Kenngrößen auftreten. Die ist im vorliegenden Modell besonders beim Übergang vom Boden in den ungesättigten Kluftraum der Fall. Rundungsfehler können auch bei der Approximation von Kenngrößen auftreten, die für die Berechnung der ungesättigten Kluftdurchlässigkeit benötigt werden.

8.7.2 Bilanzfehler

Die vierteljährlichen Fehler der Wasserhaushaltsbilanz sind gering und betragen in den beiden Jahren 1981 und 1985 zwischen 0,8 und 3,7 mm in 91 Tagen (s. Kap. 8.6). Innerhalb eines Quartals treten allerdings negative und positive Bilanzfehler bei den Tageswerten auf, die sich gegenseitig aufheben können.

Zur Beurteilung der absoluten Bilanzfehler werden daher auch die Tageswerte herangezogen. In allen 50 Profilen und über den Zeitraum von jeweils 4018 Tagen betragen die negativen und positiven Bilanzfehler maximal -8,40 und 9,18 mm pro Tag. Diese Fehler sind extrem hoch, stellen aber ausgesprochene Einzelfälle dar. Lediglich in 14 Profilen überschreitet der maximale absolute Tagesfehler 3 mm. Die durchschnittlichen, absoluten Tagesfehler in allen Profilen bewegen sich zwischen 0,08 und 0,40 mm, wobei in 27 Profilen der Wert unter 0,15 mm liegt. Besonders hohe Fehler weisen die Profile 33 bis 36 auf, die alle in der Detfurth-Folge ansetzen. Nur in diesen Profilen beträgt der durchschnittliche Tagesfehler über 0,3 mm. Hier besteht offensichtlich ein Zusammenhang mit der relativ hohen Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix. Die hohe Durchlässigkeit hat teilweise hohe Fließgeschwindigkeiten und einen hohen Durchfluss zur Folge, was sich negativ auf das numerische Verhalten des Modells auswirkt, wie bereits oben erläutert. Eine Zunahme des durchschnittlichen Fehlers mit der Profillänge ist nicht festzustellen. Da bei längeren Profilen zumindest mehr Austausch zwischen Gesteinsmatrix und Kluftraum stattfindet, wären größere Fehler z.B. durch Rundungsfehler bei den Austauschberechnungen möglich gewesen. Geringe, numerische Fehler in den tieferen Profilabschnitten haben ihre Ursache in den geringen Fließgeschwindigkeiten und Flussmengen und den geringen und langsamen Änderungen der Saugspannungverhältnisse.

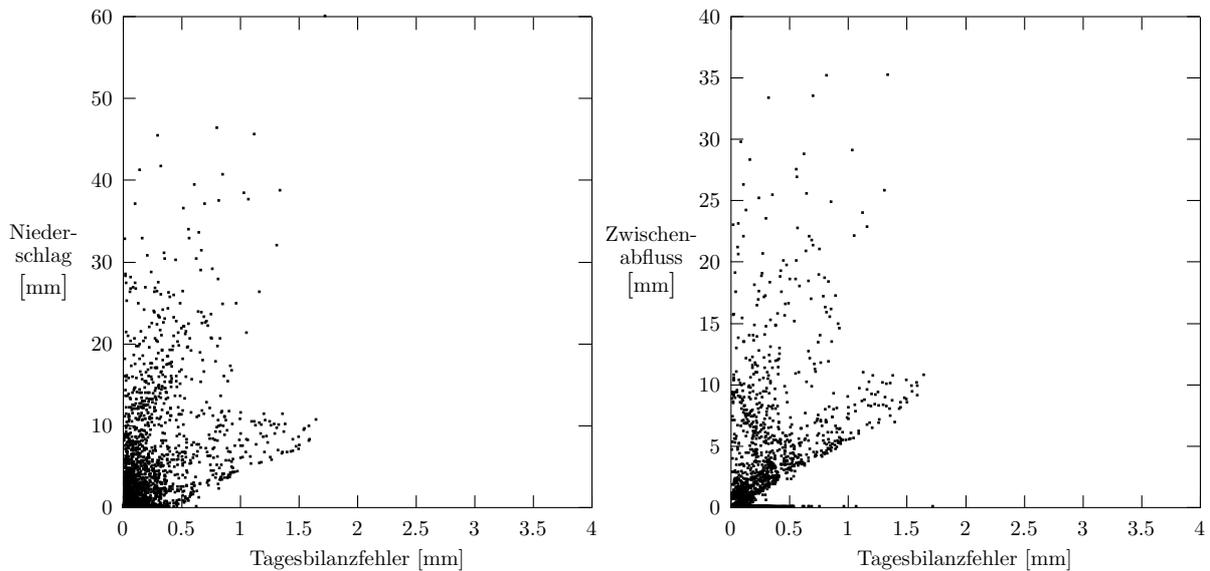


Abbildung 28: Tagesbilanzfehler aufgetragen gegen die Niederschlagshöhe und die Höhe der Zwischenabflüsse am Beispiel des Profils 42.

Trägt man die Tagesbilanzfehler gegen Ergebnis- und Rechengrößen auf, so ist leicht ein Zusammenhang mit der Niederschlagshöhe und dem Zwischenabfluss zu erkennen (s. Abb. 28). Bei dem gewählten Beispielprofil 42 sind die Zusammenhänge besonders gut zu erkennen. Je höher der Niederschlag bzw. der Zwischenabfluss, desto größer ist tendenziell der Bilanzfehler. Dieses Ergebnis entspricht den obigen Erläuterungen über numerische Fehler. Mit Wasserzufuhr und/oder -entzug steigt nämlich die Anfälligkeit für numerische Oszillation und somit für Bilanzfehler. Abgesehen von der Infiltrationsmenge bestehen sonst keine engen Zusammenhänge zwischen Ergebnis- und Rechengrößen.

Unter Berücksichtigung der Abflusssimulation (s. Kap. 8.5) und diesen Bilanzbetrachtungen können die Ergebnisse der Modellrechnungen als plausibel und mit relativ geringem Fehler behaftet eingestuft werden. Auch im Vergleich mit konventionellen Neubildungsberechnungen fallen die Ergebnisse gut aus. So schwanken für Einzugsgebiete des Spessart die mit Abflussmessungen und Klimabilanzen ermittelten mittleren Grundwasserneubildungsmengen zwischen 71,3 und 246 mm (s. Tab. 7). Je nach Teilgebiet differieren die Neubildungshöhen nach den Berechnungen mit dem vorliegenden Modell ebenfalls von wenigen mm bis etwa 160 bzw. 230 mm. Allerdings können mit Hilfe des Modells und anhand der Eingangsdaten, die verschiedenen Neubildungshöhen unmittelbar den geologisch-hydrologischen Ausgangsbedingungen zugeordnet werden.

8.7.3 Verringerung der Fehler

Zur Verringerung des Gesamtfehlers ist es zunächst möglich die Datengrundlage zu verbessern. Dies kann erfolgen durch ein dichteres Messnetz und mehr Messungen im Labor und Gelände. Dabei ist jeweils die Verbesserung der Datengrundlage gegen den erhöhten Aufwand abzuwägen. Weiterhin kann das Modell durch ein verfeinertes Datennetz verbessert werden, im vorliegenden Fall z.B. ein Netz von 20·20 m. Dadurch können Fehler bei der Regionalisierung der Daten verringert werden.

Numerische Fehler lassen sich teilweise durch günstigere Wahl der Rechengrößen, wie z.B. Austauschfaktoren, oder Verfeinerung der Zeit- und/oder Ortsdiskretisierung verringern. Dafür müssen aber Einschränkungen bei der Rechengeschwindigkeit oder -genauigkeit hingenommen werden. Eine Verkleinerung der Zeitdiskretisierung verbessert die Stabilität, dafür wird aber vor allem bei längeren Profilen die Rechendauer deutlich länger. Eine Stabilitätsverbesserung kann auch durch eine Vergrößerung der Ortsdiskretisierung erzielt werden. Bei großen Sprüngen der Kenngrößen, wie beispielsweise Durchlässigkeit, sind allerdings wiederum kleine Zellabstände notwendig, um Rundungsfehler zu minimieren. An der Grenze Boden-Kluftgestein lassen sich derartige Sprünge verringern, indem dem Kluftraum in den obersten Zentimetern die hydraulischen Eigenschaften des Bodenmaterials zugeordnet werden.

Zur Verringerung der Anfälligkeit für numerische Oszillation können der Zwischenabfluss und/oder der Austausch zwischen Matrix und Kluftraum verringert werden. Beim Zwischenabfluss erfolgt dies durch Herabsetzen des Abflussgradienten und beim Austausch durch Anpassung des Austauschfaktors. Eine Verringerung des Zwischenabflusses hat jedoch einen verstärkten und verlängerten Aufstau zur Folge. Eine Verringerung des Austauschfaktors bewirkt wiederum, dass die angestrebte, möglichst rasche Angleichung der Saugspannungen in Kluftraum und Matrix langsamer erreicht wird. Die Faktoren für Zwischenabfluss und Austausch sind also so auszutarieren, dass eine numerische Oszillation vermieden wird und zugleich der Zwischenabfluss und Austausch in optimalem Mass gewährleistet ist.

Numerische Fehler deuten sich während eines Rechenlaufes beispielsweise daurch an, dass bei zu hohen Abflussgradienten aufgrund der Oszillation ein rechnerischer Zwischenabfluss von null errechnet wird, extreme Saugspannungssprünge auftreten oder die Tagesbilanzfehler zu groß werden.

9 Zusammenfassung

Eine differenzierte räumliche und zeitliche Auflösung der Grundwasserneubildung in Festgesteinsgrundwasserleitern ist erforderlich, sobald mit der Trinkwasserversorgung zunehmend auf die landwirtschaftlich und industriell wenig genutzten, bewaldeten Mittelgebirge ausgewichen wird. In der vorliegenden Arbeit wird versucht auf Grundlage der geologisch-hydrogeologischen Rahmenbedingungen mittels der Modellierung der ungesättigten Strömung am Beispiel eines geklüfteten Buntsandsteins, die gewünschte Auflösung zu erreichen.

Bei dem betreffenden Strömungsmodell handelt es sich um eine eindimensionales Finite-Differenzen-Modell, wobei die Beschreibung der ungesättigten Strömung auf der RICHARDS-Gleichung beruht. Grundlage des Modells ist die getrennte Erfassung und Modellierung der Sickerwasserströmung in der porösen Matrix und im Kluftraum. Voraussetzung für die Kenntnis der ungesättigten Strömung sind die hydraulischen Durchlässigkeiten und die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehungen. Die regionale Auflösung der Modellgrößen erfolgt in einem Gitter mit Abständen von 50-50 m.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die erforderlichen Daten für den Porenraum durch Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit und der Entwässerungskurve gewonnen. Die für die Modellierung erforderlichen Werte der ungesättigten Durchlässigkeit lassen sich anhand der gewonnenen Labordaten berechnen. Der Kluftraum wird in ein Porenäquivalent überführt. Die hydraulischen Kenngrößen basieren auf Literaturwerten und auf Geländemessungen. Wassergehalts-Saugspannungsbeziehungen des Kluftraums werden auf der Grundlage charakteristischer Kluftkenngrößen berechnet. Auf vergleichbare Weise wird die ungesättigte Durchlässigkeit des Kluftraums berechnet, deren Ausgangsgröße die Gebirgsdurchlässigkeit ist. Die Gebirgsdurchlässigkeit kann für die Berechnungen herangezogen werden, da in den untersuchten geklüfteten Sandsteinen unter gesättigten Bedingungen die Wasserbewegung ganz überwiegend an die Klüfte gebunden ist und deshalb die Gebirgsdurchlässigkeit annähernd der Durchlässigkeit des Kluftraums entspricht. Die Sickerwasserbewegung wird für den Poren- und den Kluftraum parallel modelliert und die Parallelmodelle über Austauschgrößen miteinander verknüpft.

Für die beispielhafte Anwendung des Modelles wurde das Einzugsgebiet des Pegels Hafenlohr ausgewählt. Das Untersuchungsgebiet liegt im Buntsandsteinspessart. Der Pegel Hafenlohr erfaßt den Abfluß der Hafenlohr kurz vor ihrer Mündung in den Main, nahe der Ortschaft Hafenlohr am östlichen Rand des Spessarts. Das oberirdische Einzugsgebiet des Pegels Hafenlohr hat eine Fläche von 146,50 km². Im Untersuchungsgebiet sind Sandsteine und untergeordnet Tonsteine des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandsteins vertreten. Die Schichten fallen leicht nach Südosten ein. Im Westteil des Untersuchungsgebietes treten kaum größere Störungen auf, wogegen der Ostteil von der südsüdost-nordnordwest-streichenden Störungszone Rechtenbach-Marktheidenfeld erfaßt wird. Der Untere und Mittlere Buntsandstein bilden großräumig ein zusammenhängendes Grundwasserstockwerk mit den Bröckelschiefern als Grundwassersohlschicht. Das Grundwasserstockwerk des Oberen Buntsandsteins wird durch die Chirotherienschiefer vom darunterliegenden Stockwerk getrennt. An stärker tonhaltigen Horizonten und sonstigen, deutlichen Wechseln der Durchlässigkeit können sich lokal und zeitlich variierende, schwebende Grundwasserstockwerke ausbilden. Bei den Grundwasserleitern handelt es sich um Kluftgrundwasserleiter, wobei sich das

Grundwasser unter gesättigten Bedingungen ganz überwiegend im Klufttraum bewegt. Der Kluftgrundwasserleiter wird vom Bodenhorizont als Porengrundwasserleiter überlagert.

Die für den Modellraum zugrunde gelegte Grundwasseroberfläche basiert auf Grundwassergleichenplänen amtlicher geologischer Karten sowie auf allgemeinen hydrogeologischen Kriterien wie Grundwassergefälle und Morphologie. Die Flurabstände leiten sich aus der Differenz zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche ab. Klimadaten stehen in Form von Tageswerten für Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchte zur Verfügung.

Bei den im Untersuchungsgebiet anzutreffenden Grundwasserflurabständen sind für die Modellierung der ungesättigten Zone die Schichtfolgen von Plattensandstein (*so2*) bis zur Gelnhausen-Folge (*suG*) relevant. Die Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit ergaben für die Sandsteine dieser Schichtfolgen Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen $1,0 \cdot 10^{-9}$ und $2,3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Die Entwässerung der untersuchten Sandsteinproben setzt bei Saugspannungswerten etwa zwischen 0,2 und 5 mWS ein. In dem gleichen Saugspannungsbereich beginnt auch der Rückgang der ungesättigten Durchlässigkeiten. Die ungesättigten Durchlässigkeiten verringern sich bei Saugspannungen von 100 mWS auf Werte etwa zwischen $1,0 \cdot 10^{-13}$ und $5,0 \cdot 10^{-21}$ m/s.

Die Kluftigenschaften werden nach stratigraphischer Einheit, Zugehörigkeit zur tektonischen Störungszone und Tiefenlage unterschieden. Bei einer Tiefe von 50 m wird die Untergrenze für oberflächennahe Auflockerung angenommen. Aus den Kluftigenschaften lassen sich die Saugspannungskurven und die ungesättigten Durchlässigkeiten berechnen. Grundlage dafür sind die Kenngrößen Kluftabstand, Kluftöffnungsweite, Kontaktflächenanteil, Klufttraumanteil und gesättigte Durchlässigkeit. Demnach setzt, je nach Eigenschaften des Klufttraums, die Entwässerung bei Saugspannungswerten etwa zwischen 0,01 und 0,03 mWS ein. Innerhalb dieser Saugspannungen tritt auch ein markanter Abfall der Durchlässigkeit von Anfangswerten um $1,0 \cdot 10^{-4}$ bis $4,2 \cdot 10^{-5}$ m/s ein, so dass rasch Bedingungen erreicht werden, bei denen der Klufttraum hydraulisch praktisch undurchlässig ist.

Grundlage der hydraulischen Kennwerte der Böden sind Literaturwerte der Kornsummenkurven. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Böden liegen mit Werten zwischen $8,1 \cdot 10^{-4}$ und $2,4 \cdot 10^{-5}$ m/s deutlich über denen der Festgesteinsmatrix. Die Entwässerung und der Rückgang der ungesättigten Durchlässigkeit setzen bei Saugspannungswerten etwa zwischen 0,03 und 0,3 mWS ein.

Die zu berechnenden Profile haben Tiefen entsprechend den Flurabständen und sind gemäß der geologischen Schichtabfolge und der Mächtigkeit der Schichten zusammengesetzt. Die Profile werden nach oben durch einen einheitlich 0,80 m mächtigen Bodenhorizont abgeschlossen. Neben dem schwebenden Grundwasserstockwerk des Plattensandsteins können sich auch an tiefer liegenden Schichtgrenzen schwebende Grundwasserstockwerke ausbilden. Dort auftretende Zwischenabflüsse werden einzeln erfasst. Der Grundwasserneubildung im Hauptgrundwasserstockwerk des Unteren und Mittleren Buntsandsteins wird die Sickerwassermenge zugeschlagen, die den Grundwasserspiegel dieses Stockwerks erreicht. Die getrennte Erfassung der Zwischenabflüsse erlaubt es, gegebenenfalls einzelne Zwischenabflüsse in die Neubildungsbetrachtungen mit einzubeziehen. Das hydrogeologische Modell setzt sich aus zwei getrennten Profilen für

den Poren- und den Kluftraum zusammen, die parallel modelliert wurden. Diese beiden Profile werden im Modell über Austauschfaktoren miteinander verbunden.

Zur Umsetzung in das numerische Modell werden die Profile in Zellen unterschiedlicher Höhe aufgeteilt. Zwischenabfluss, Austauschmengen und Wurzelentzug werden als Quell- bzw. Senkenterm behandelt. Die Berechnung der beiden Profile erfolgt für jeden Zeitschritt getrennt. Obere Randbedingung ist eine Speisungsgröße, die durch Niederschlag und potentielle Evapotranspiration gesteuert wird. Zusätzlich ist am oberen Rand ein Überstau des Niederschlagswasser möglich. Als untere Randbedingung wird der Grundwasserspiegel als Festpotential festgelegt.

Die Eigenschaften tektonische Beanspruchung, Niederschlagsgebiet, Flurabstand, anstehendes Gestein und verbleibende Restmächtigkeit des anstehenden Gesteins werden generalisiert und regionalisiert und miteinander verschnitten, so dass sich schließlich für das Untersuchungsgebiet 50 Teilflächen ergeben.

Die Modellrechnungen liefert für 50 Teilflächen als Ergebnis unter anderem Tageswerte für Niederschlag, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Infiltration, Zwischenabflüsse, Kapillaraufstieg, Grundwasserneubildung, Gesamtwassergehalt im Profil sowie Bilanzfehler für das Profil. Darüberhinaus stehen für die Interpretation Saugspannungsverteilungen im Kluftraum und der Matrix im Regelfall im 3-Monatsabstand und für einige Profile als Tageswerte zur Verfügung.

Die Bodeneigenschaften haben durch unterschiedliche Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehungen steuernden Einfluss auf die tatsächliche Evapotranspiration. Böden, die im Sommer in einem Saugspannungsbereich zwischen 1 und 100 mWS am meisten Wasser zur Verfügung stellen können, können die potentielle Evapotranspirationsmenge am weitestgehenden decken. Größere Unterschiede der tatsächlichen Evapotranspiration zwischen den Bodentypen sind nur in den Sommermonaten gegeben. Der Oberflächenabfluss ist aufgrund der hohen Durchlässigkeit der Böden gering, obwohl wegen der intensiven Geländemorphologie im Untersuchungsgebiet kein Überstau zugelassen wurde.

Große Saugspannungsschwankungen und -sprünge treten am Übergang vom Bodenhorizont zum Festgestein auf. Aufgrund der geringen Durchlässigkeitsunterschiede, sind die Saugspannungssprünge zwischen Boden und Matrix weniger stark als zwischen Boden und Kluftraum. Da unterhalb des Bodenhorizontes auch in der Matrix starke Schwankungen der Saugspannungen auftreten, ist bis in Tiefen von etwa 10 bis 15 m eine rasche Angleichung der Saugspannungen zwischen Kluftraum und Matrix nicht immer möglich. Die stärksten Ausschläge der Saugspannungen sind nach Perioden mit hoher Verdunstung festzustellen. Mit zunehmender Profiltiefe nehmen sowohl die Schwankungen der Saugspannungen als auch die Abweichungen zwischen Kluftraum und Matrix ab. Eine gut durchlässige Matrix bewirkt eine ausgeprägte und schnelle Reaktion in den obersten Profilmeter auf Evapotranspiration und große Niederschlagsmengen. Auch der Austausch mit dem Kluftraum verbessert sich mit zunehmender Durchlässigkeit der Festgesteinsmatrix. Die tektonische Beanspruchung hat dagegen nur geringen Einfluss auf die Saugspannungsverhältnisse. Eine größere Klüftigkeit verbessert allerdings den Austausch zwischen Kluftraum und Matrix, wenn auch überwiegend die Matrixdurchlässigkeit den Austausch bestimmt.

Die Zwischenabflüsse sind im Bodenhorizont bei einem Durchschnitt der Jahreswerte von etwa 506 mm mit Abstand am größten. Ursache hierfür sind große Durchlässigkeitsunterschiede am Übergang vom Boden zum Festgestein und eine geringe Dämpfung von Sickerwasserspitzen aufgrund des kurzen Sickerweges. In den übrigen Horizonten sind die Zwischenabflüsse mit Werten unter 10 mm bereits deutlich geringer, wobei sie innerhalb der Detfurth- und Salmünster-Folge noch am größten sind. Mit zunehmender Tiefe verringern sich die Zwischenabflüsse aufgrund der Glättung der Infiltrationsspitzen. Die Zwischenabflüsse sind in den Sommermonaten am geringsten. Die Minimalwerte korrespondieren gut mit den Maximas der Evapotranspiration. Die Versickerung vom Boden ins Festgestein ist umso höher, je größer die Durchlässigkeiten von Kluftraum und Matrix sind und je kleiner die Durchlässigkeit des Bodens ist. Der Interflow ist in den Gebieten hoch, wo Sandsteine mit geringen Porendurchlässigkeiten anstehen, wo die tektonische Beanspruchung gering ist und wo die Niederschläge hoch sind. Die Höhe der Zwischenabflüsse im Boden wechselt im Untersuchungsgebiet engräumig. Die Zwischenabflüsse in den Festgesteinshorizonten werden vom Flurabstand gesteuert und von der Wassermenge, die nach dem Interflow noch in tiefere Schichten versickern kann. Sie sind im Südosten des Untersuchungsgebietes und im Talgrund der Hafenlohr am geringsten.

Der Verlauf der Grundwasserneubildung zeigt bei Profiltiefen bis etwa 20 m ausgeprägte negative Spitzen, die ihre Ursachen in Perioden mit hoher Evapotranspiration bei geringen Niederschlägen haben. Positive Spitzen aufgrund hoher Niederschläge treten dagegen bei den untersuchten Profiltiefen über 10 m nicht auf. Hohe Niederschläge können allerdings eine langanhaltende, geringfügige Erhöhung der Grundwasserneubildung bewirken. Mit zunehmender Tiefe und mit zunehmender tektonischer Beanspruchung verkleinern sich die negativen Spitzen der Grundwasserneubildung. An tiefer liegenden Horizonten mit geringerer Durchlässigkeit kann es zu geringen Zwischenabflüssen kommen, wodurch sich die Grundwasserneubildung verringert.

Die Grundwasserneubildung zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der Festgesteinsmatrix. Eine gut durchlässige Festgesteinsmatrix erlaubt eine höhere Versickerung an der Grenze Boden-Festgestein und bewirkt somit eine höhere Grundwasserneubildung. Am höchsten ist die Neubildung in Gebieten, wo Gesteine der Detfurth-Folge anstehen und am geringsten dort wo Plattensandstein oder Hardeggen-Folge anstehen. Die tektonische Beanspruchung hat dagegen bei den untersuchten Beispielen nur geringe Auswirkungen auf die Neubildungshöhe. Bei Flurabständen über 50 m verringert sich die Neubildungshöhe etwas, da es an der Grenze von der oberflächennahen Auflockerungszone zu kompakteren Schichtfolgen zu geringfügigen Zwischenabflüssen kommen kann. Ebenso können unterlagernde, geringdurchlässige Horizonte die Neubildungshöhe verringern.

Die jährliche Grundwasserneubildungshöhe im Untersuchungsgebiet beträgt im Schnitt etwa 66 mm pro Jahr, wenn die Zwischenabflüsse im Festgestein und im Bodenhorizont nicht berücksichtigt werden. Werden die Zwischenabflüsse im Festgestein der Neubildung zugeschlagen, so erhöht sich die Neubildung auf etwa 91 mm. Der Zwischenabfluß im Bodenhorizont (Interflow) wird auch in diesem Fall nicht berücksichtigt, da er zeitlich und lokal begrenzt auftritt und dem Vorfluter deutlich schneller zufließt, als die Neubildungsmengen aus dem Hauptgrundwasserstockwerk. Die Schwankungen der Jahreswerte der Grundwasserneubildung sind gering und bewegen sich etwa zwischen 1 und 3,5 mm. Die höchsten

Grundwasserneubildungen sind am Oberlauf der Hafenlohr, also im Westteil des Untersuchungsgebietes zu verzeichnen. Hier sind die Durchlässigkeiten im Festgestein am größten und die Niederschläge fallen etwas höher aus als im Ostteil.

Zum Vergleich mit dem Abfluss am Pegel Hafenlohr werden Oberflächenabfluss, Interflow, die Zwischenabflüsse und die Grundwasserneubildung addiert, nachdem den Komponenten verschiedene Verzögerungszeiten bis zum Pegel zugeordnet wurden. Diese relativ einfache Methode liefert bereits eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Abflussverlauf. Die gemessenen Abflussspitzen werden nicht erreicht, wobei die Ursache dafür vor allem in der zu groben Auflösung der Niederschlagsdaten liegen dürfte. Bei den Tageswerten für Niederschlag werden kurzzeitige Starkregenereignisse, die die Infiltrationsrate des Bodens überschreiten würden, auf den ganzen Tag verteilt. Dadurch fällt der Oberflächenabfluss, der einen Großteil der Abflussspitzen verursacht, zu gering aus. Die berechnete Abflussmenge ist um etwa 30% größer als der gemessene Abfluss. Vermutlich ist das unterirdische Einzugsgebiet größer, als es sich anhand vorliegender Grundwassergleichenpläne abgrenzen lässt.

Wesentliche Bilanzgrößen bei der Wasserhaushaltsbetrachtung sind Niederschlag, Evapotranspiration, Zwischenabflüsse und Speicherung. Diese Faktoren machen die größten Mengen aus und zeigen auch die stärksten Schwankungen. Die Grundwasserneubildung ändert sich dagegen kaum und hat auch mengenmäßig wenig Einfluss auf die Bilanz.

Mögliche Fehlerquellen der Simulation lassen sich aufteilen in Fehler bei der Datenerhebung, beim Modellansatz, bei der Regionalisierung der Daten sowie numerische Fehler. Direkte Messergebnisse zur Eichung des Modells liegen nicht vor. Dennoch kann der Fehler anhand von Bilanzbetrachtungen, des Vergleichs mit Ergebnissen konventioneller Neubildungsberechnungen und des Vergleichs mit dem Abfluss am Pegel Hafenlohr als gering eingestuft werden. Die Bilanzfehler innerhalb 91 Tagen betragen für die beiden Beispieljahre 1981 und 1985 0,8 bis 3,7 mm. Die durchschnittlichen, absoluten Tagesfehler für alle 50 Profile und alle 11 Jahre belaufen sich auf 0,08 bis 0,40 mm. Die deutlichsten Zusammenhänge zu den Tagesbilanzfehlern zeigen Niederschlag und Zwischenabfluss. Eine Verbesserung der Qualität des Modells kann durch Verbreiterung der Datenbasis, größere Differenzierung der Daten und Erhöhung des Rechenaufwandes (Zeit- und Ortsdiskretisierung) erreicht werden.

10 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass der Übergang vom Boden zum Festgestein, neben der Transpiration eine überragende Funktion bei der Steuerung der Grundwasserneubildung nach der Bodeninfiltration einnimmt. Bei geringen Sickerwegen spielen auch tiefer liegende Übergänge von gering in höher durchlässige Schichten eine Rolle. Orientiert man sich an der Definition der Grundwasserneubildung nach DIN 4049, so spielen diese Übergänge für die Neubildungshöhe keine Rolle, da ja die Grundwasserneubildung hiernach nicht nach Stockwerksbau unterschieden wird, bzw. an Schichtgrenzen auftretende Zwischenabflüsse der Grundwasserneubildung zugeschlagen werden. In der Praxis kann es jedoch durchaus von Bedeutung sein, in welchem Umfang Grundwasser von hangenden Stockwerken in das von einer Wasserfassung genutzte Grundwasserstockwerk infiltriert oder in welchen Mengen infiltrierte Niederschläge im hangenden Stockwerk abfließen, ohne im Einzugsbereich der Wasserfassung in das Hauptgrundwasserstockwerk zu versickern.

Derartige Fragestellungen können mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Ansatzes bewältigt werden. Die regionale Differenzierung der Grundwasserneubildungshöhe in Festgesteinen wird dadurch möglich. Eine weitere Einsatzmöglichkeit des Modells ist die Vorhersage der Grundwasserneubildungshöhe und -dynamik bei hypothetischen Klimabedingungen. Einzelne Nass- oder Trockenjahre haben, unter den Bedingungen wie sie im Spessart vorliegen, noch keine merklichen Auswirkungen auf die Neubildungshöhe. Dies kann sich aber bei veränderten gesteinshydraulischen Bedingungen rasch ändern. Ebenso können globale Klimaveränderungen zu einer Erhöhung oder Verringerung der Grundwasserneubildung führen, wobei mit Hilfe des Modells eine Prognose der Veränderungen möglich wird. Aber auch die langfristige Bewirtschaftung großer Einzugsgebiete kann durchgeführt werden. Schließlich können die erhobenen Messdaten, vor allem die im Labor gewonnenen Kenngrößen für den Porenraum, in einem Datenpool gesammelt werden. Dieser ermöglicht dann, in vergleichbaren Einzugsgebieten Neubildungsberechnungen mit deutlich reduziertem Arbeits- und Kostenaufwand. Die Kluftparameter müßten jedoch in jedem Fall erhoben werden, da sie abhängig von der tektonischen Beanspruchung sind und diese bereits in kleinräumigem Maßstab sehr unterschiedlich sein kann.

Besonders geeignet ist das Modell für Festgesteine, in denen noch eine merkliche Porendurchlässigkeit vorliegt, bei nicht zu hoher Kluftdurchlässigkeit. Die Kluftdurchlässigkeit läßt sich umso besser berechnen, je gleichmäßiger die Klüfte verteilt sind. Unter diesen beiden Gesichtspunkten stellt der Buntsandstein des Spessarts gute Modellbedingungen dar. Deutlich schwieriger wird sich die Modellierung beispielsweise in einem unregelmäßig verkarsteten Kalkstein darstellen.

Zur Weiterentwicklung bietet sich sowohl das eigentliche Modell an, als auch eine Verfeinerung der Datenerfassung und -umsetzung. Modelltechnisch läßt sich das Modell sicherlich hinsichtlich Geschwindigkeit und Stabilität verbessern. Diese Verbesserungen würden auch genauere Zeit- und Ortsdiskretisierungen bei einem vertretbaren Rechenaufwand ermöglichen. Bei der Modellierung hat sich gezeigt, dass eine genauere Kenntniss der Fließvorgänge am Übergang Boden – Festgestein sinnvoll wäre. Grundsätzliche Untersuchungen auf diesem Gebiet könnten die Datenerfassung und -umsetzung erleichtern und verbessern. Schließlich kann das Modell 2- und 3-dimensional entwickelt werden, wobei selbst bei den heute

möglichen Rechenleistungen regelmäßige Anwendungen aufgrund des hohen Rechenaufwandes (noch) nicht praktikabel erscheinen.

Weniger zur Verbesserung des Modells, als zur Verifizierung wären langjährige, engmaschige Abflußmessungen in einem Modellgebiet sinnvoll. Ein oder zwei Abflusspegel in einem Einzugsgebiet lassen nur beschränkte Aussagen über die Qualität der Modellergebnisse zu. Das Einzugsgebiet der Hafenoehr bietet sich für solche Messungen allein schon wegen seiner guten Zugänglichkeit an.

11 Literaturverzeichnis

- AHORNER L. (1975): Present-day stress field and seismotectonic blockmovements along major fault zones in Central Europe. - *Tectonophysics*, (29):233-249.
- AL-AZAWI A. (1976): Grundwasserverhältnisse im Raum Lohr a. Main (Ostspessart) unter besonderer Berücksichtigung der Hydrochemie. - Diss. Univ. Tübingen, 140 S.
- BABAJIMOPOULOS C. (1991): A Douglas-Jones predictor-corrector program for simulating one-dimensional unsaturated flow in soil. - *Ground Water*, 29(2):267-270.
- BARENBLATT G. E., J. P. ZHELTOV & J. N. KOCHINA (1960): Basic concepts in the theory of homogenous liquids in fissured rocks. - *J. Appl. Math. Mech.*, 24(5):1286-1303.
- BEVEN K. & P. GERMANN (1982): Macropores and water flow in soils. - *Water Resour. Res.*, 18:1311-1325.
- BGLA - BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. - 29 Abb., 21 Tab., 6 Taf., 1 Beil., München (BGLA).
- BGLA - BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993): Geologische Karte 1:100.000 - Naturpark Spessart, München (BGLA).
- BLWG - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERVERSORGUNG UND GEWÄSSERSCHUTZ (1961): Schlussgutachten über die durchgeführte Grundwassererschließung für die Gemeinde Bergrothenfels, Landkreis Lohr am Main., 24.01.1961 (München).
- BUSCH K.-F., L. LUCKNER & K. TIEMER (1993): Geohydraulik. - 238 Abb., 50 Tab., Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- CHILDS E. C. & N. COLLIS-GEORGE (1950): The permeability of porous materials. - *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, (201):392-405.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1994): DIN 4049-3, Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - Berlin.
- DARCY H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon. - Atlas mit 28 Taf., Paris (Dalmont).
- DOUGLAS J. & B. F. JONES (1963): On predictor-corrector methods for nonlinear parabolic differential equations. - *Jour. of the Society for Ind. and Appl. Math.*, 11:125-149.
- DÜRBAUM H. J., G. MATTHESS & D. RAMBOW (1969): Untersuchungen der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit des Buntsandsteins in Nordhessen. - *Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch.*, 97:258-274.
- EINSELE G. & J. MERKLEIN (1978): Aquiferdaten von Fest- und Lockergesteinen im Gebiet des Mittelmain und der Regnitz. - *Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch.*, 7:240-250.
- EINSELE G., W. RAUERT & B. STAY (1978): Zusammenhang zwischen Hydraulik, Chemismus und Isotopengehalt an Tiefengrundwasser aus dem Buntsandstein des mittleren Maintals bei Erlach/Lohr. - *Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch.*, 7:182-190.
- EISSELE K. (1966): Über Grundwasserbewegung in klüftigem Sandstein. - *Jh. Geol. L.-Amt Baden-Württemberg*, 8:105-111.
- FREEZE R. A. (1969): The mechanism of natural ground-water recharge and discharge: 1. One-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging ground-water flow system. - *Water Resour. Res.*, 5(1):153-171.

- GEORGOTAS N. (1976): Die hydrogeologischen Verhältnisse im Bad Kissinger Raum. - Wasser u. Boden, 1/1976:-11-13.
- GEORGOTAS N. & P. UDLUFT (1978): Sinn und Fränkische Saale. - Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., 7:65-84.
- HARTGE K.-H. & R. HORN (1991): Einführung in die Bodenphysik. - 156 Abb., 19 Tab., Stuttgart (Enke).
- HAUDE W. (1952): Verdunstungsmenge und Evapotranspiration eines Klimas. - Ber. Dt. Wett., 42:225-229.
- HAUDE W. (1958): Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung potentieller Evaporation und Evapotranspiration. - Meteorol. Rdsch., (11):96-99.
- HAUTHAL U. (1967): Zum Wasserleitvermögen von Gesteinen des Mittleren Buntsandsteins. - Z. angew. Geol., 13(8):405-407.
- HEITFELD K.-H. (1965): Hydro- und baugelogeologische Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Untergrundes an Talsperren des Sauerlandes. - Geol. Mitt., 5(1-2):210.
- HÖLTING B. & H. REICHMANN (1996): Grundwasser – Grundwasserneubildung. - Wasser und Boden, 48(10):22-24.
- HUBER B. (1992): Der Einfluß des Trennflächengefüges auf die Grundwasserströmung in Kluftgrundwasserleitern. - Hydrogeologie und Umwelt, (5):293.
- IGI - INGENIEUR-GEOLOGISCHES INSTITUT DIPL.-ING. S. NIEDERMEYER (1981): DB-Neubaustrecke Hannover - Würzburg. Streckenabschnitt Gemünden - Würzburg, Planfeststellung: Hydrogeologische Stellungnahme Abschnitte km 275,217-281,115 (Mühlbergtunnel), Westheim (21.12.1981) (IGI).
- IGI - INGENIEUR-GEOLOGISCHES INSTITUT DIPL.-ING. S. NIEDERMEYER (1988): Trinkwassertalsperre Hafenlohr - Untergrundhydraulisches Modell. Teil 1: Untergrundhydraulische Untersuchungen des Stauraumes und der angrenzenden Bergrücken, Westheim (IGI).
- IRMAJ S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. - Eos Trans. AGU, 35:463-467.
- ISRM - COMMISSION ON STANDARDISATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS (1977): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15:319-368.
- KALWEIT H. (1963): Niedrigwassermessungen 1962 im Spessart, Auswertung der Messergebnisse. - Koblenz.
- KEIWANLUNEJAD E. (1973): Tektonischer Bau und Grundwasserführung im Nördlichen Hochspessart. - Diss. Univ. Frankfurt a. Main, 97 S.
- KERN H. (1975): Mittlere jährliche Verdunstungshöhen 1931–1960. Karte von Bayern im Maßstab 1:500.000 mit Erläuterungen. - Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., 2, 12 S.
- KLAVETTER E. A. & R. R. PETERS (1988): A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass. - Water Resour. Res., 24(3):416-430.
- KOZENY J. (1927): Über Grundwasserbewegung. - Z. des D.W.W.V. 7, 22:67-70, 86-88, 103-104, 120-122, 264-277.
- KRAUSE H. (1966): Oberflächennahe Auflockerungserscheinungen in Sedimentgesteinen Baden-Württembergs. - Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemberg, (8):269-323.
- KRIELE W. & M. MÄRZ (1981): Durchlässigkeitsuntersuchungen und ihre Vergleichbarkeit im Buntsandstein von Rhön und Spessart. - 3. Nat. Tagung Ing.-Geol., Ber., :101-108.
- KRÖHN K.-P. & W. ZIELKE (1991): FE-Simulation von Transportvorgängen im klüftigen Gestein. - Dtsch. gewässerkd. Mitt., 35(3-4):82-88.

- LAHANN H.-J. & P. RYBACZOK (1993): Approx-2 - ein Programm zum Anpassen benutzereigener Funktionen an einen Satz von Meßwerten. - GKSS, (93/E/76):36.
- LONG J. C. S., J. S. REMER, C. R. WILSON & P. A. WITHERSPOON (1982): Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. - *Water Resour. Res.*, 18 (3):645-658.
- LOUIS C. (1967): Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. - *Veröff. Inst. f. Bodenmech. u. Felsmech. Univ.-Fridericiana Karlsruhe*, 30:121.
- MÄRZ K. (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns. - *Hydrochem. hydrogeol. Mitt.*, 2:1-170.
- MATTHESS G. (1970): Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. - *Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch.*, (58):1-105.
- MATTHESS G. & H. MURAWSKI (1978): Zuflüsse aus Spessart und Odenwald. - *Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch.*, 7:108-121.
- MEISL S. (1965): Zur Petrographie der Buntsandsteinsedimente - *Erl. geol. Kte. Hessen 1:25.000*, Bl. 5124 Bad Hersfeld. - 2 Abb., 4 Tab., 4 Diagr. (Wiesbaden).
- MORENO L., I. NERETNIEKS, F. V. HALE, C. F. TSANG & Y. W. TSANG (1988): Flow and tracer transport in a single fracture - A stochastic-model and its relation to some field observations. - *Water Resour. Res.*, 24(12):2033-2048.
- MUALEM Y. A. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. - *Water Resour. Res.*, 12(3):513-522.
- NITAO J. J. & T. A. BUSCHECK (1991): Infiltration of a liquid front in an unsaturated fractured porous medium. - *Water Resour. Res.*, 27(8):2099-2112.
- PETERS R. R. & E. A. KLAFFETTER (1988): A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass. - *Water Resour. Res.*, 24(3):416-430.
- PLÖTHNER D. (1979): Hydrogeologie des Buntsandsteins im östlichen Rhön-Vorland (Sulz-Tal, N-Bayern) - *Geologie, Hydrochemie, Wasserhaushalt, Aquifer-Kennziffern*. - *Berliner geowiss. Abh.*, (A)16:1-139.
- PÖTZL D. (1998): Durchfluß- und Sorptionsverhalten ausgewählter geologischer Einheiten. - *Hydrogeologie und Umwelt*, (15):130.
- PRINZ H. (1982): Abriß der Ingenieurgeologie. - 252 Abb., 50 Tab., Stuttgart (Enke).
- PRUESS K., Y. W. TSANG & J. S. Y. WANG (1985): Modeling of strongly heat driven flow in partially saturated fractured porous media. - *International Association of Hydrogeologists (ed.), Memoires*, 17:486-497.
- REMSON I., G. M. HORNBERGER & F. J. MOLZ (1971): *Numerical methods in subsurface hydrology*, New York (Wiley-Interscience).
- RICHARDS L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. - *Physics*, 1(5):318-333.
- ROTHASCHER A. (1987): Die Grundwasserneubildung in Bayern - Berechnet aus den Niedrigwasserabflüssen der oberirdischen Gewässer. - *Informationsber. Bayer. L.-Amt f. Wasserwirt.*, 3/87:1-86.
- SCHRAFT A. & D. RAMBOW (1984): Vergleichende Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit im Buntsandstein Ost Hessens. - *Geol. Jb. Hessen*, 112:235-261.
- SCHUBUTH H. (1973): Beziehungen zwischen Grundwasserabfluß und tektonischem Bau im Buntsandstein des Mainvierecks zwischen Lohr und Aschaffenburg im Spessart. - *Diss. Univ. Frankfurt a. Main*, 179 S.

- SCHWARZMEIER J. (1979): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt 6123 Marktheidenfeld. - 31 Abb., 9 Tab., 6 Beil., 1 Kte..
- SCHWARZMEIER J. (1980): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt 6023 Lohr a. Main. - 23 Abb., 5 Tab., 6 Beil., 1 Kte..
- SCHWARZMEIER J. (1984): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt 6122 Bischbrunn.
- SEILER K.-P. (1972): Ein Versuch zur Bestimmung der Strömungsart in Klüften des saarländischen Mittleren Buntsandsteins. - Z. dt. geol. Ges., 123:45-52.
- SEILER K.-P. (1977): Hydrogeologie glazial übertiefter Täler der Bayerischen Alpen zwischen Lech und Wössener Tal. - Steir. Beitr. z. Hydrogeol., (29):5-118.
- SHARP J. C. (1970): Fluid flow through fissured media. - Diss. Imperial Coll., Univ. of London.
- SNOW D. T. (1970): The frequency and apertures of fractures in rock. - Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., 7(1):23-40.
- THEWS J. D. (1967): Die Wassergewinnungsmöglichkeiten im bayerischen Buntsandstein-Spessart. - Veröff. Geschichts- u. Kunstverein Aschaffenburg, 10:135-163.
- TSANG Y. W. (1984): The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture. - Water Resour. Res., 20(8):1209-1215.
- UDLUFT P. (1971): Hydrogeologie des Oberen Sinntales. - Geologica Bavarica, 64:365-384.
- UDLUFT P. (1972): Bestimmung des entwässerbaren Kluftraumes mit Hilfe des Austrocknungskoeffizienten nach Maillet, dargestellt am Einzugsgebiet der Lohr (Nordost Spessart). - Z. dt. geol. Ges., 123:53-63.
- UDLUFT P. (1974): Bestimmung der Durchlässigkeit von Festgesteinen mit Hilfe einer DARCY-Apparatur. - bbr, 25:162-164.
- UDLUFT P. (1992, unveröffentl.): MODBIL - Grundwasserneubildungsmodell.
- VAN GENUCHTEN M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. - Soil Sci. Soc. Amer. J., 44:892-898.
- VOSSMERBÄUMER H. (1985): Strukturgeologische Untersuchungen in Mainfranken, Bestandsaufnahme und Versuch einer Interpretation. - Z. dt. geol. Ges., 136:69-92.
- WANG J. S. Y. & T. N. NARASIMHAN (1985): Hydrologic mechanism governing fluid flow in a partially saturated, fractured, porous medium. - Water Resour. Res., 21(12):1861-1874.
- WANG J. S. Y. & T. N. NARASIMHAN (1986): Hydrologic mechanisms governing partially saturated fluid flow in fractured welded units and porous non-welded units at Yucca Mountains., Albuquerque (Sandia Natl. Lab.).
- WARREN J. E. & P. J. ROOT (1963): Behavior of naturally fractured reservoirs. - Soc. Petrol. Engineers J., 9:245-255.
- WITTMANN O. (1967): Erläuterungen zur Bodenkarte von Bayern 1:25.000, Blatt 6022 Rothenbuch - 4 Abb., 3 Tab., 4 Taf..
- WITTMANN O. (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt 6022 Rothenbuch. - 11 Abb., 1 Tab., 2 Beil., 1 Kte..
- WOLF K. L. (1957): Physik und Chemie der Grenzflächen. - Berlin-Göttingen-Heidelberg (Springer).

12 Verwendete Abkürzungen

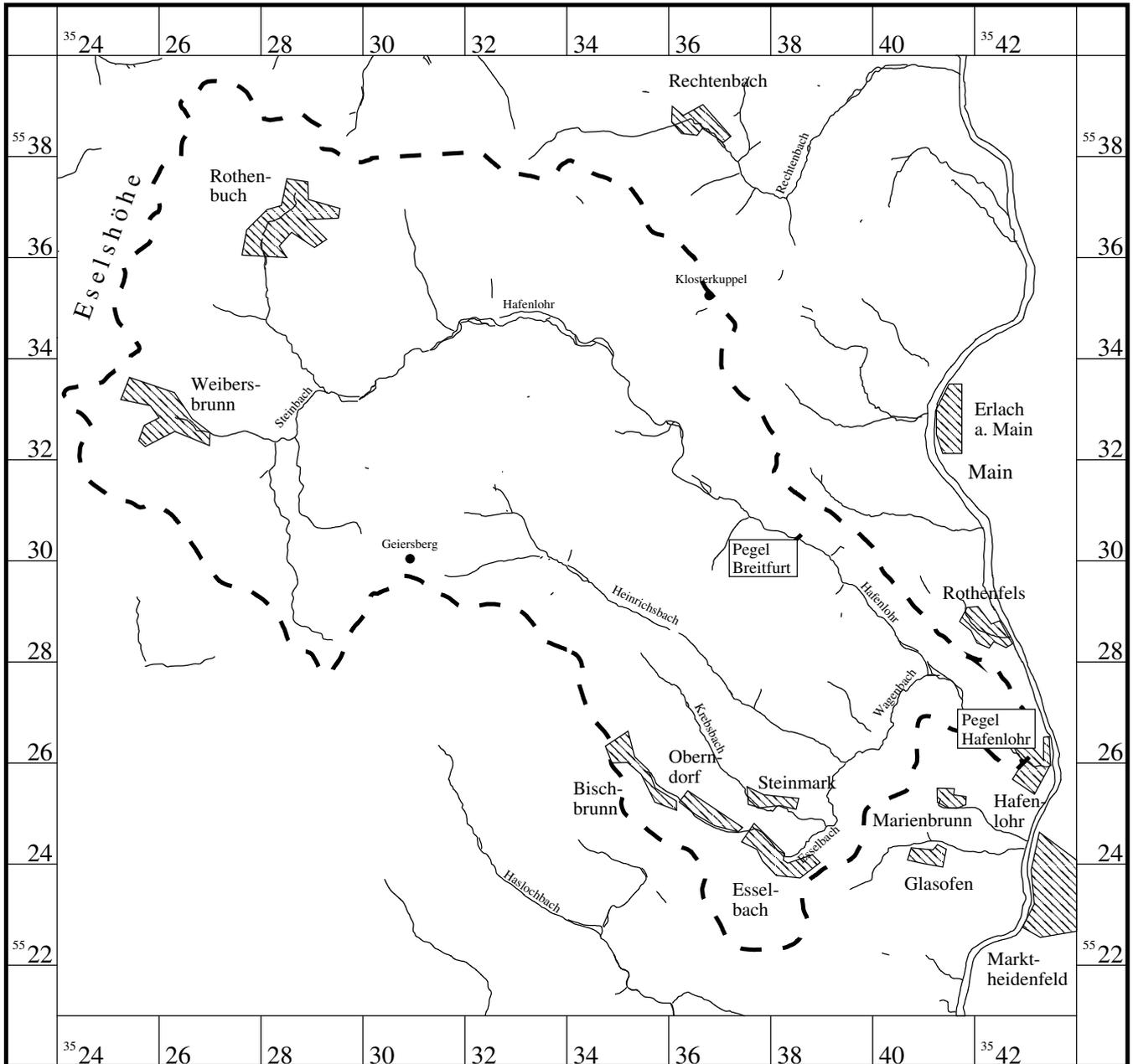
Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche, Querschnitt	[m ²]
b	Kluftöffnungsweite	[m]
C	kapillare Speicherkapazität	[1/m]
d	Kluftabstand	[m]
ET	Evapotranspiration(shöhe)	[mm]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Strömungspotential, Höhe	[mWS]
I	hydraulischer Gradient	[/]
K	Permeabilität	[m ²]
k	Kluftdichte	[1/m]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
k_{rel}	relative Durchlässigkeit	[/]
L	Länge	[m]
N	Niederschlag(shöhe)	[mm]
n	Porosität, Hohlraumanteil	[/]
Q	Durchfluss / Abfluss	[m ³ /s]
q	(Abfluss-)Spende	[l/(s·km ²)]
R	Reichweite	[m]
r	Radius	[m]
S	Speicherkoefizient	[/]
t	Zeit	[s]
V	Volumen	[m ³]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
x, y, z	Richtungen	[/]
α_M	Austrocknungskoeffizient nach Maillet	[1/s]
γ	Oberflächenspannung	[N/m]
ζ	Gewichtungsfaktor	[/]
η	Exponent für Durchlässigkeitsberechnung	[/]
Θ	Sättigung	[/]
θ	Wassergehalt	[/]
λ	Benetzungswinkel	[/]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ψ	Druck, Saugspannung	[mWS]

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
Kenngrößen nach WANG & NARASIMHAN (1985)		
b_c	Grenzkontakt-Öffnungsweite	[m]
b_s	Entwässerungs-Öffnungsweite	[m]
β	Kenngrößen für Öffnungsverteilung	[1/m]
σ	Maß für Fähigkeit durchgehende Flüssigkeitsphasen zu bilden	[/]
τ	Flächenanteil, von Wasser oder Kontaktflächen belegt	[/]
ω	Kontaktflächenanteil	[/]
Kenngrößen nach VAN GENUCHTEN (1980)		
m		[/]
n		[/]
α		[1/m]
Indizes		
a	tatsächlich, aktuell	
B	Basis	
D	Diagonal	
e	Gestein	
eff	effektiv	
G	Gebirgs-, Gebirge	
i	Zählindex	
K	Kluft(raum)	
kap	kapillar	
L	Längs	
M	Matrix	
p	potentiell	
Q	Quer	
r	Rest	
rel	relativ	
s	Sättigung, gesättigt	
u	ungesättigt	
WD	Wasserabpressversuch	
x, y, z	Richtungskoordinaten	

ANLAGEN

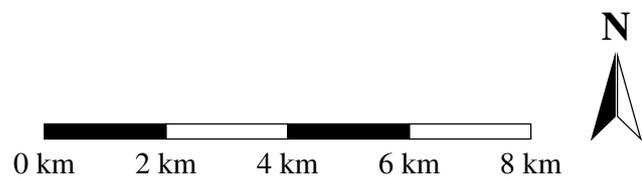
Anlage 1

Lageplan



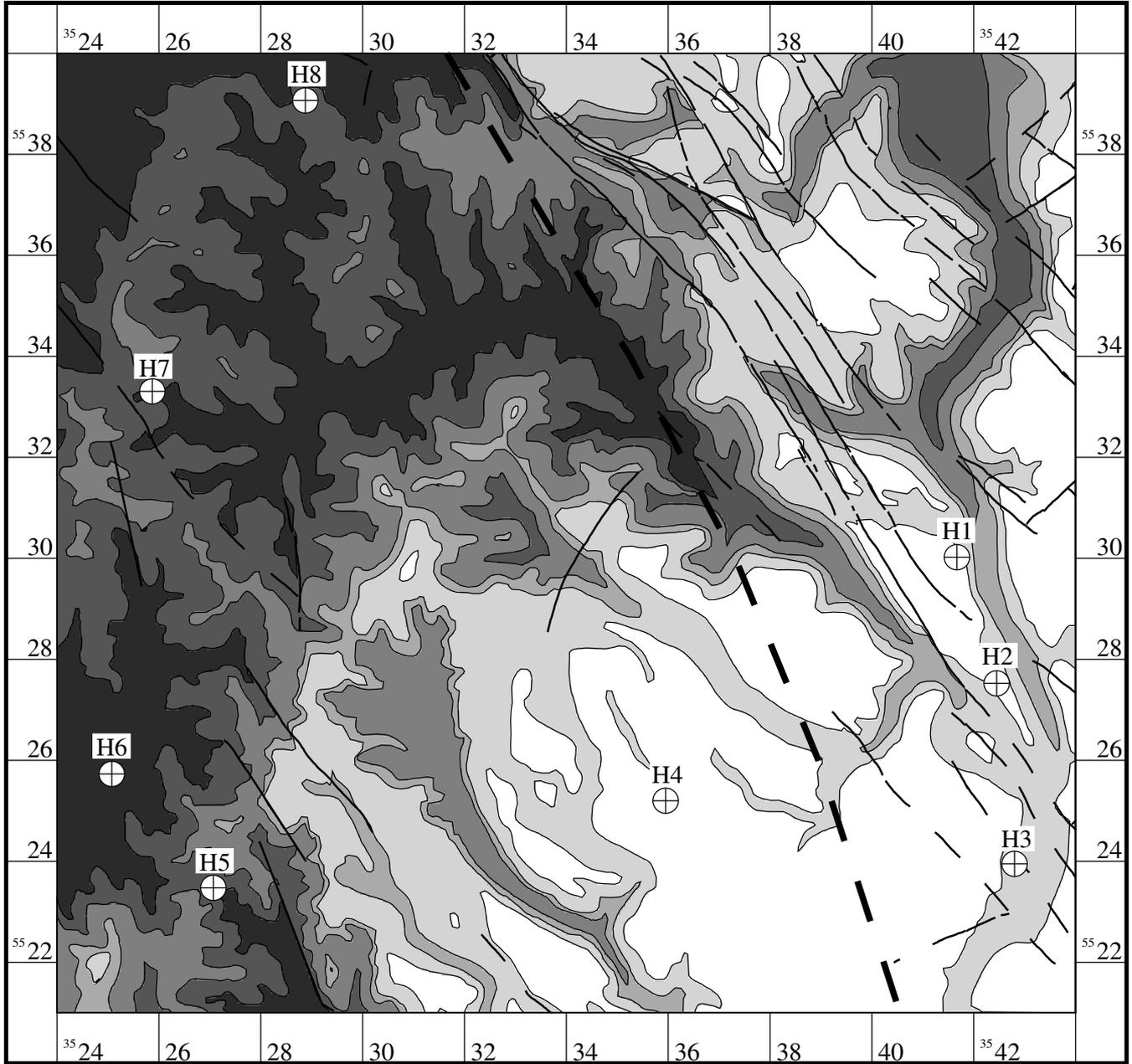
Edgar Harzer, 2003

--- Oberirdisches Einzugsgebiet
Pegel Hafenlohr



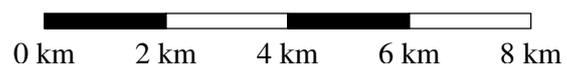
Anlage 2

Geologische Karte (verändert nach BGLA, 1993)



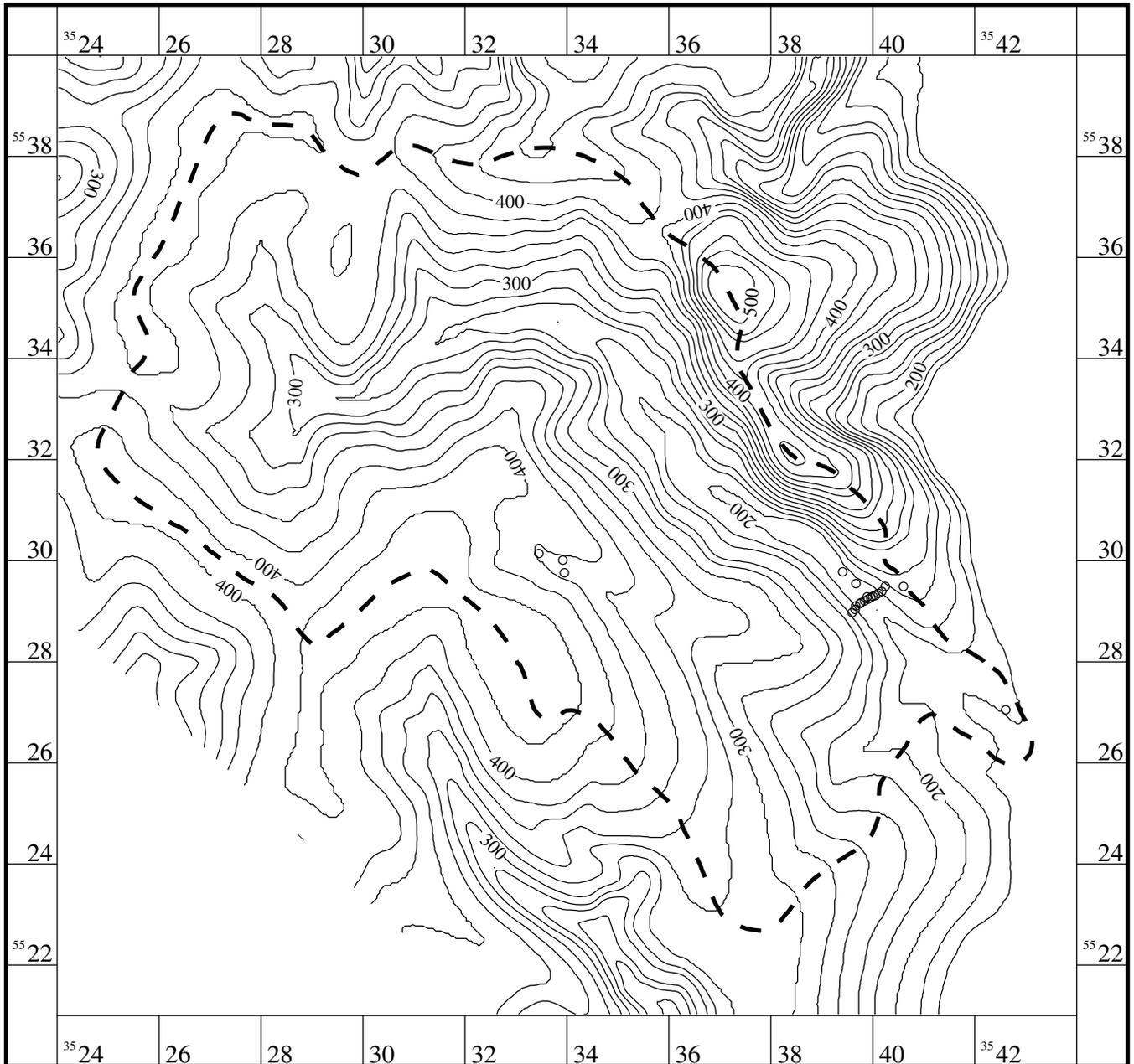
Edgar Harzer, 2003

- | | | | |
|---|----------------------|---|---------------------|
|  | Gelnhausen-Folge |  | Tektonische Grenze |
|  | Salmünster-Folge |  | Störungen gesichert |
|  | Volpriehausen-Folge |  | Störungen vermutet |
|  | Detfurth-Folge |  | Aufschlüsse |
|  | Hardegsen-Folge | | |
|  | Oberer Buntsandstein | | |



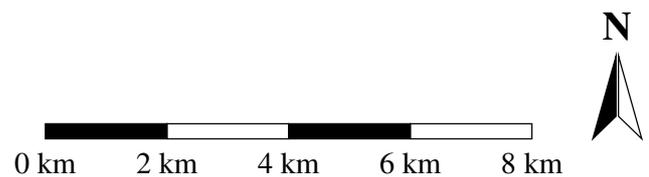
Anlage 3

Grundwassergleichenplan (verändert nach SCHWARZMEIER, 1979, 1980, WITTMANN, 1972, IGI, 1988)



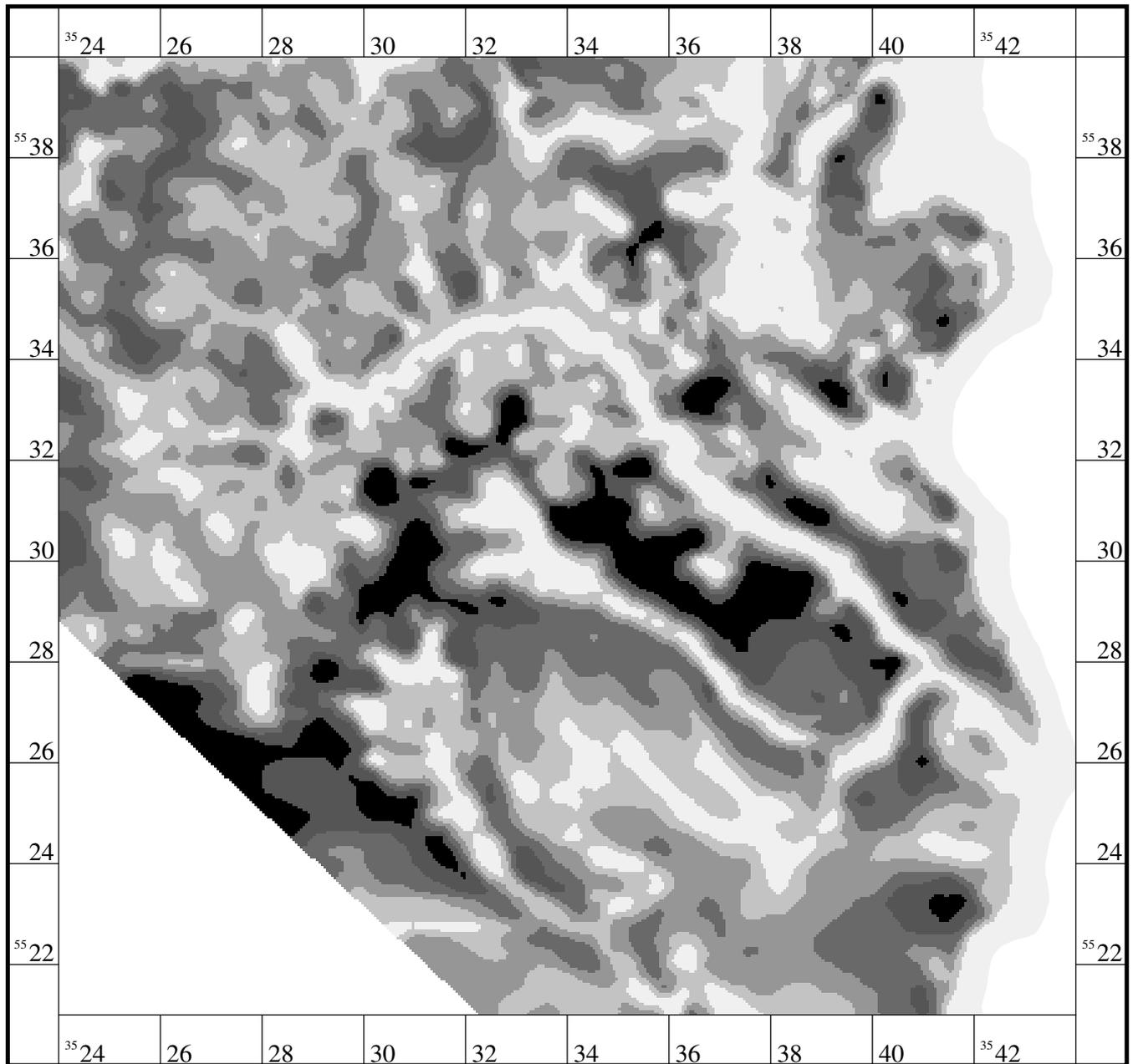
Edgar Harzer, 2003

- — — — — Unterirdisches Einzugsgebiet
Pegel Hafenlohr
- — — — — Grundwassershöhengleichen
[m ü. NN]
- Brunnen und Bohrungen
mit WD- oder Pumpversuchen



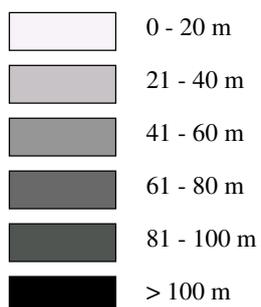
Anlage 4

Flurabstandskarte



Edgar Harzer, 2003

Flurabstände

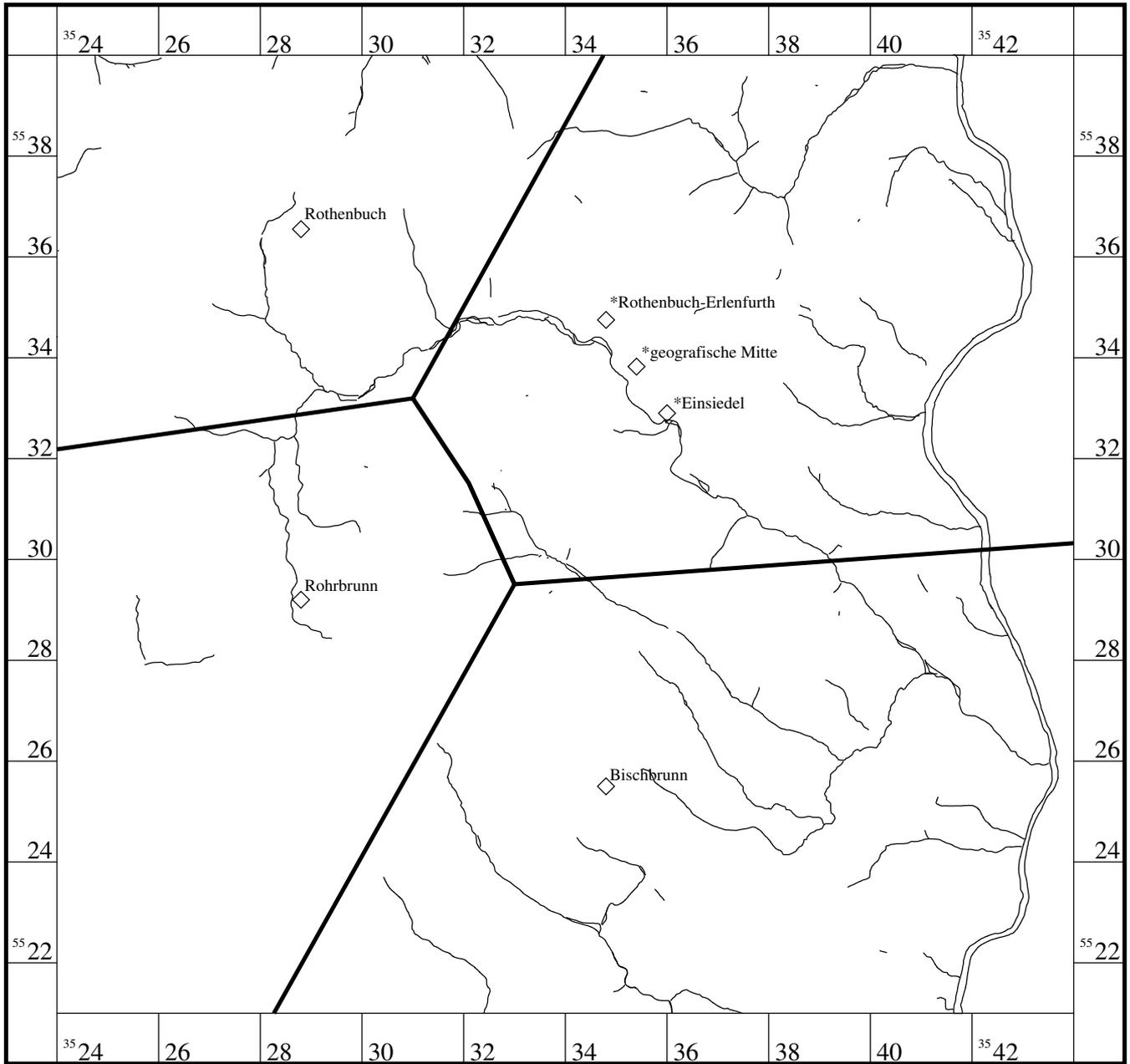



0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



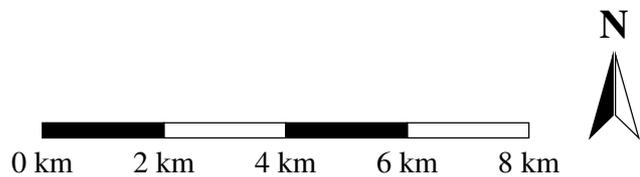
Anlage 5

Klimakarte



◇ Niederschlagsstationen

Edgar Harzer, 2003



Anlage 6

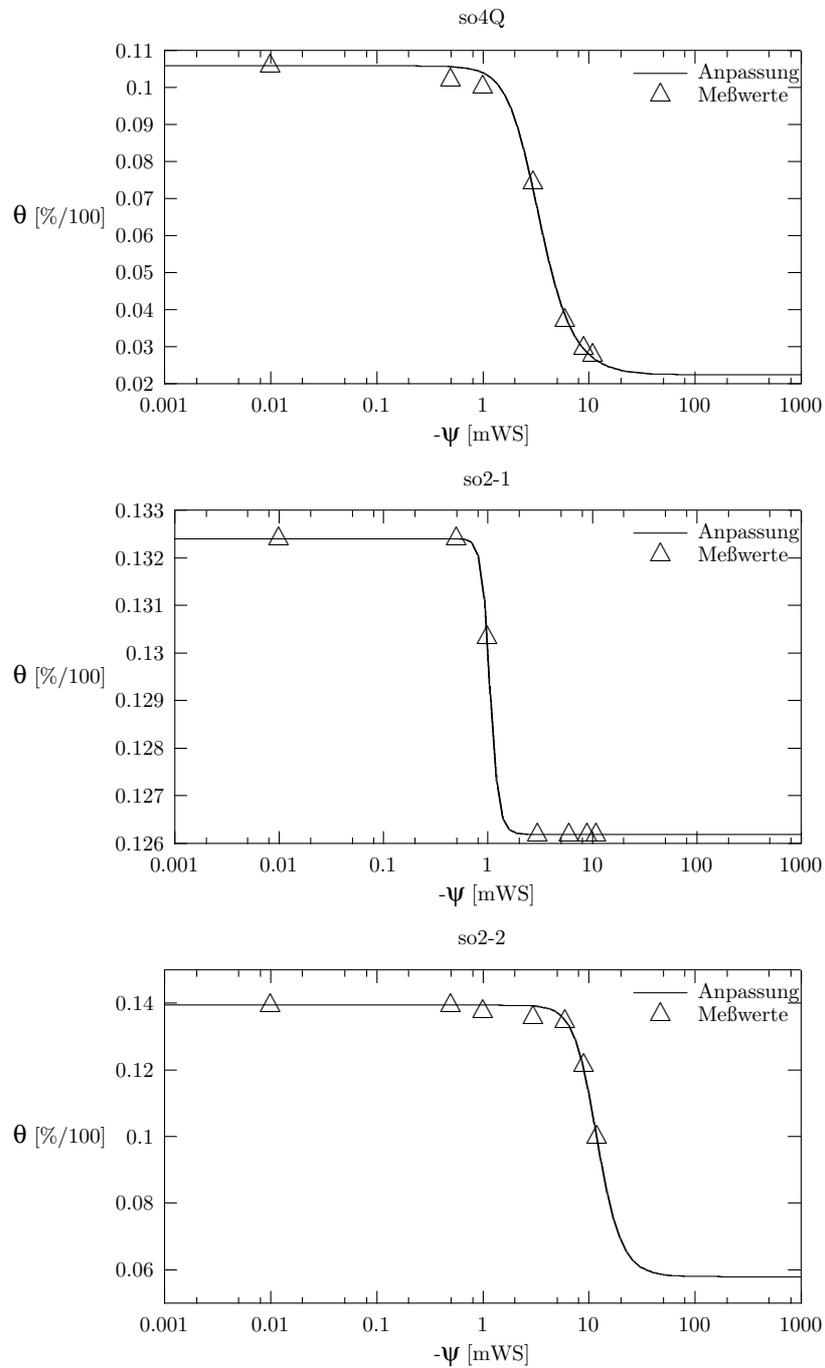
Aufschluß-Verzeichnis

Bearbeitete Aufschlüsse im Untersuchungsgebiet.

Aufschluß	Nr.	Koordinaten	Stratigraphie	Zustand
Rotbild	H1	R 3541670 H 5530020	so2	z. T. verfüllt, verwachsen, gute Aufschlußverhältnisse
Galgen-Berg	H2	R 3542450 H 5527525	so2	z. T. verfüllt, verwachsen, gute Aufschlußverhältnisse
Marktheiden- feld (B8)	H3	R 3542800 H 5523950	so2	kein Sprengbetrieb, verwachsen, gute Aufschlußverhältnisse
Oberndorf	H4	R 3535950 H 5525200	so2	stark verwachsen, mäßige Aufschlußverhältnisse
Kreuzstein- Grund	H5	R 3527070 H 5523475	suSB	z. T. verfüllt, verwachsen, gute Aufschlußverhältnisse
Selser- Grund	H6	R 3525075 H 5525730	suGH	verstürzt, verwachsen, mäßige Aufschlußverhältnisse
Weibersbrunn	H7	R 3525870 H 5533305	suGD	verwachsen, sehr gute Aufschlußverhältnisse
Haid-Berg	H8	R 3528875 H 5539065	suST	kein Sprengbetrieb, wenige Klüfte aufgeschlossen

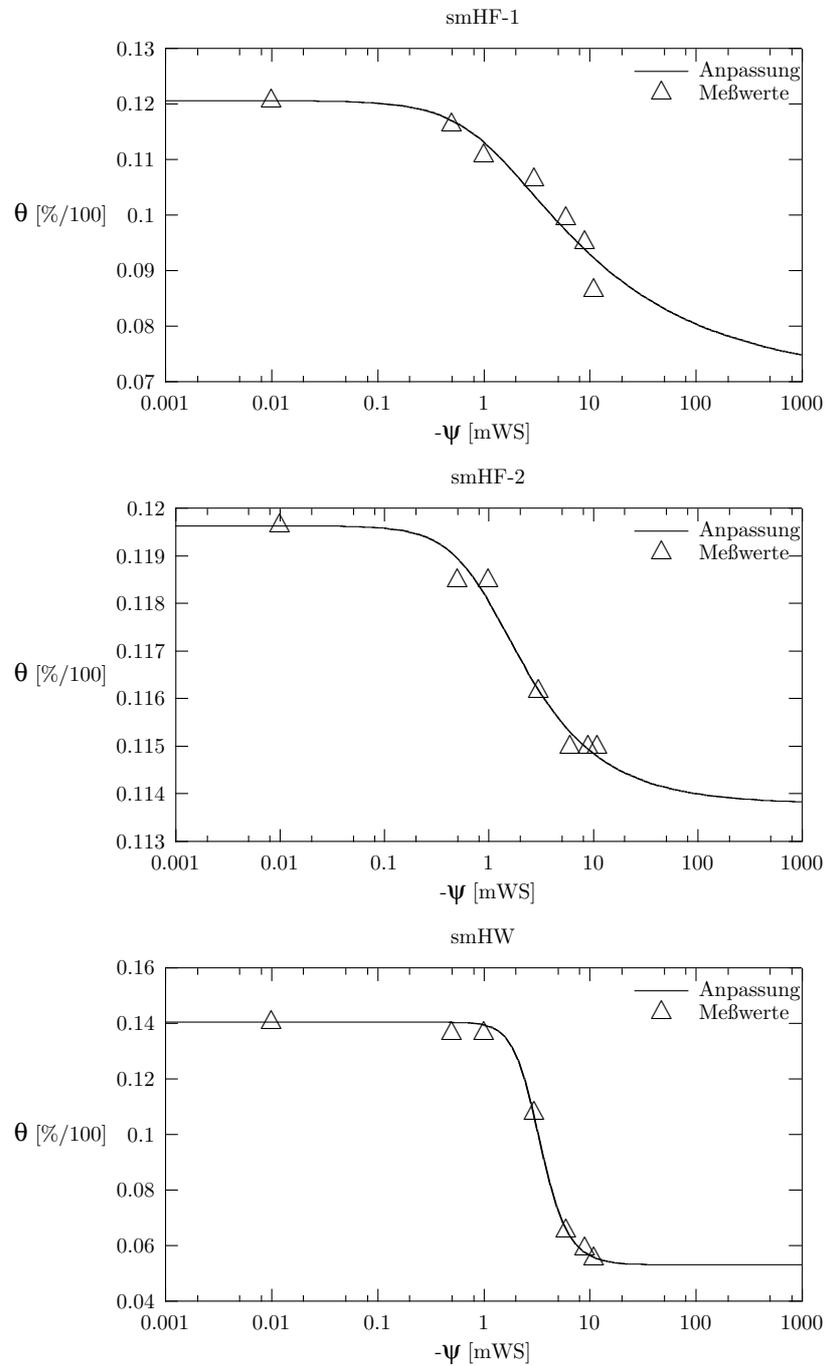
Anlage 7

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / Meßwerte und angepaßte Kurven, bezogen auf geologische Formation



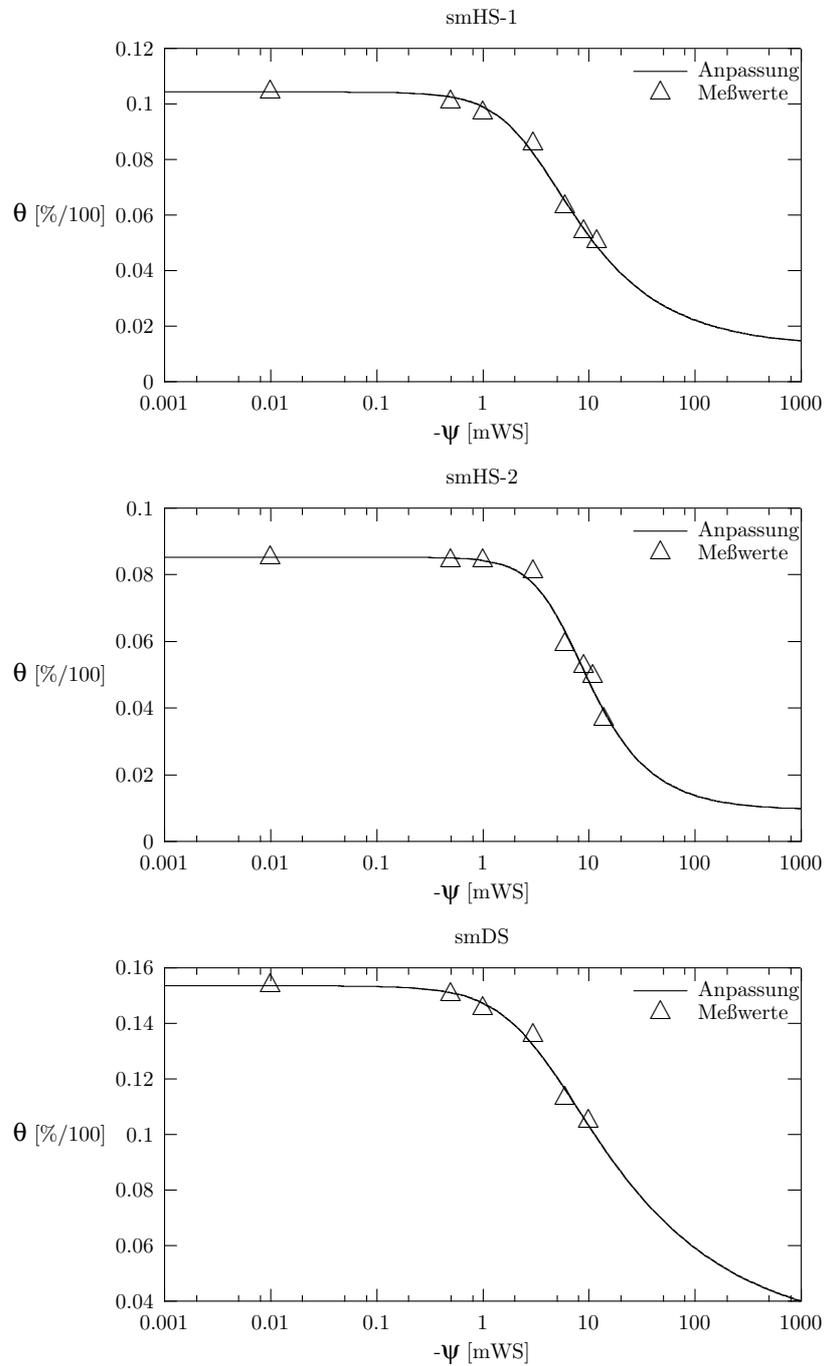
Anlage 8

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / Meßwerte und angepaßte Kurven, bezogen auf geologische Formation



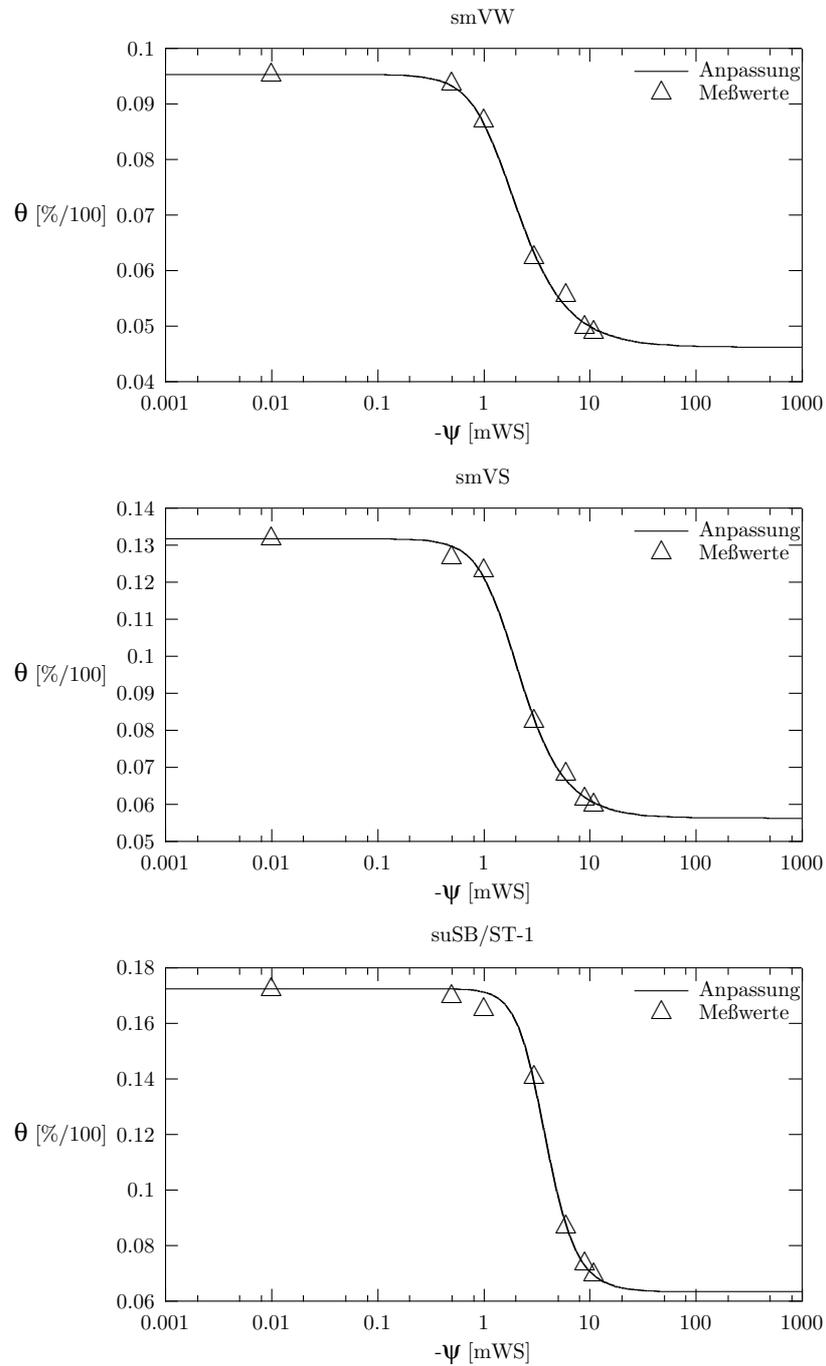
Anlage 9

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / Meßwerte und angepaßte Kurven, bezogen auf geologische Formation



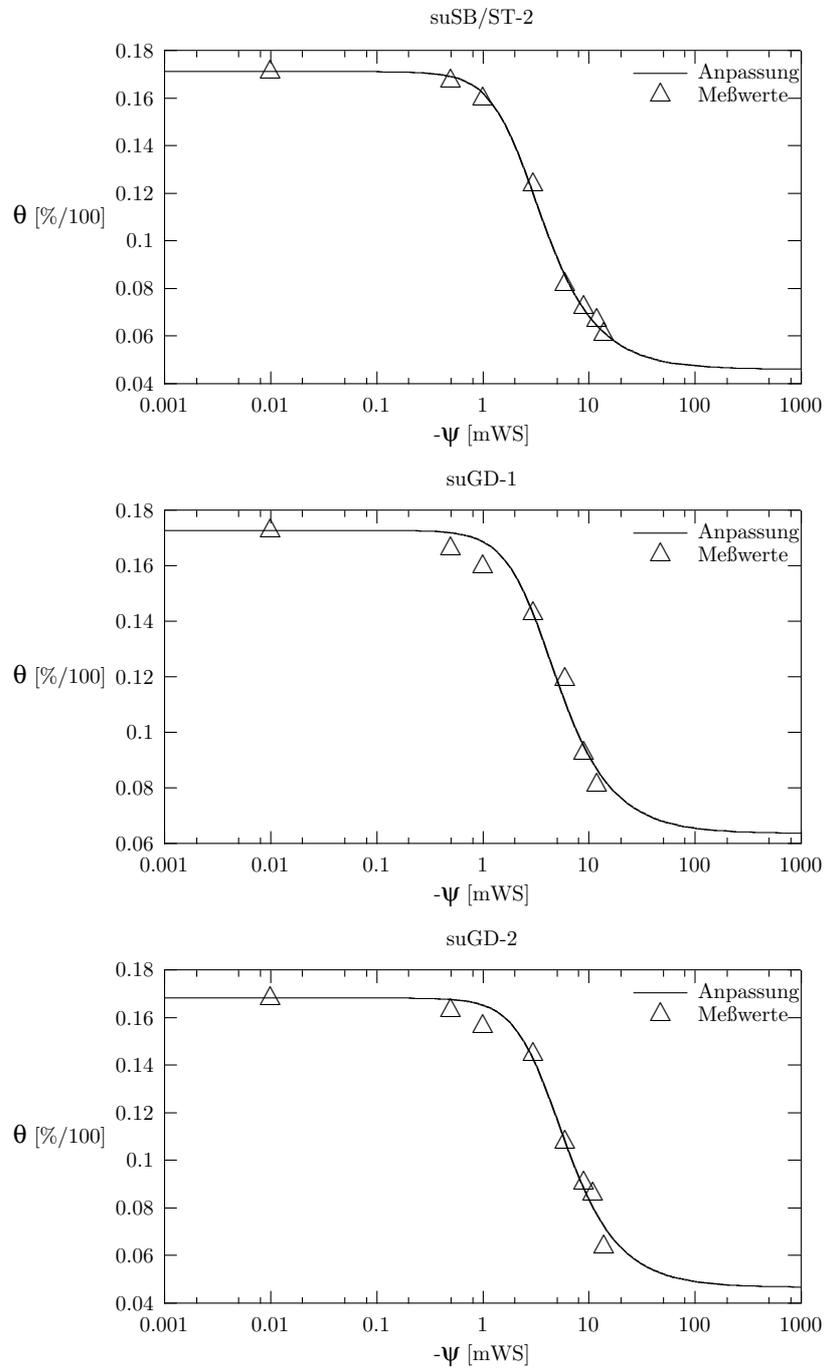
Anlage 10

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / Meßwerte und angepaßte Kurven, bezogen auf geologische Formation



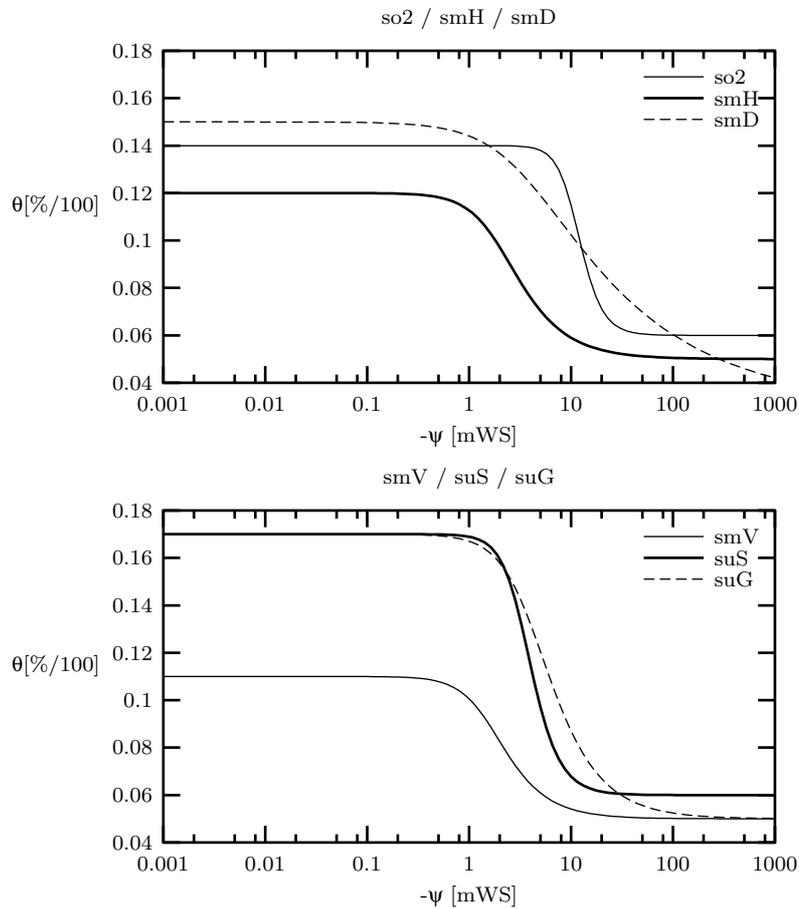
Anlage 11

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / Meßwerte und angepaßte Kurven, bezogen auf geologische Formation



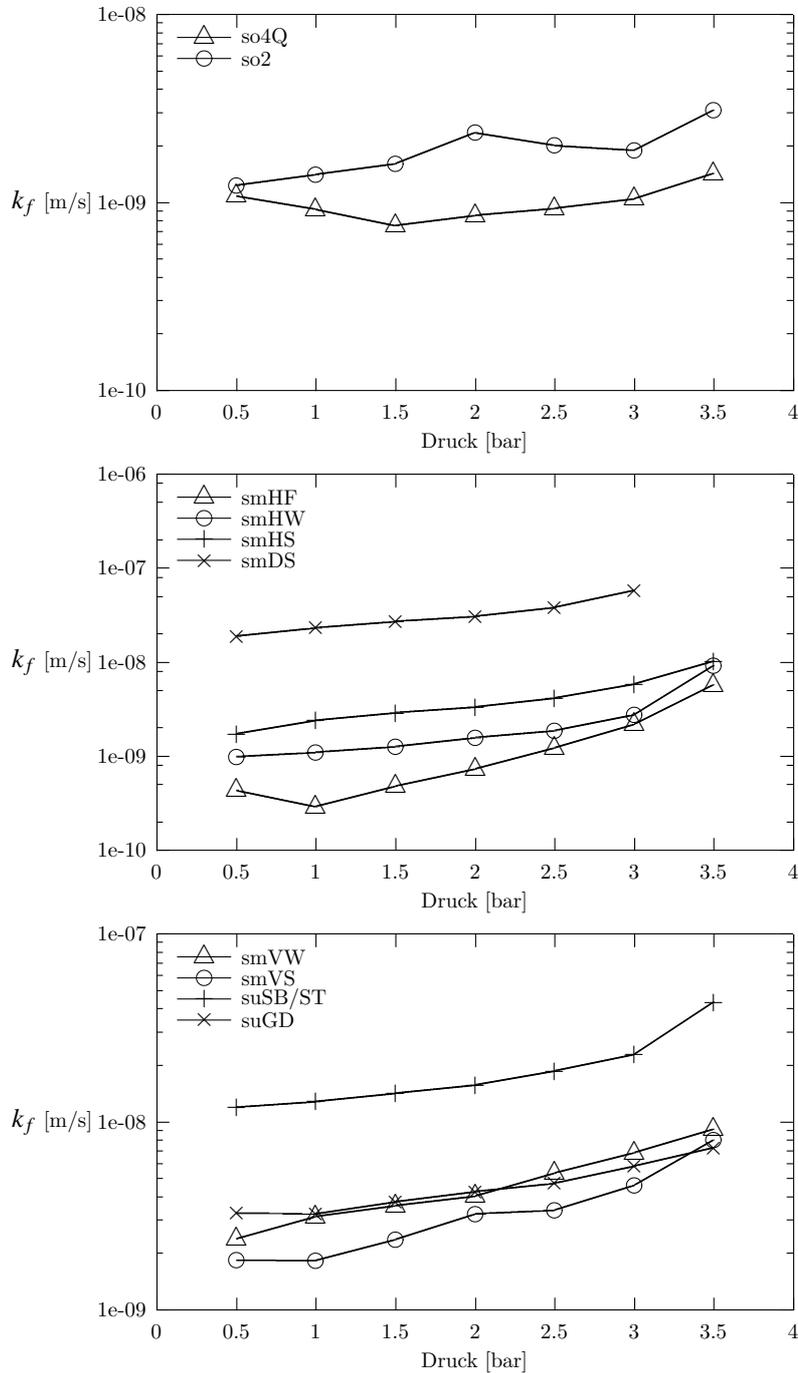
Anlage 12

θ - ψ -Beziehung / Porenraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation



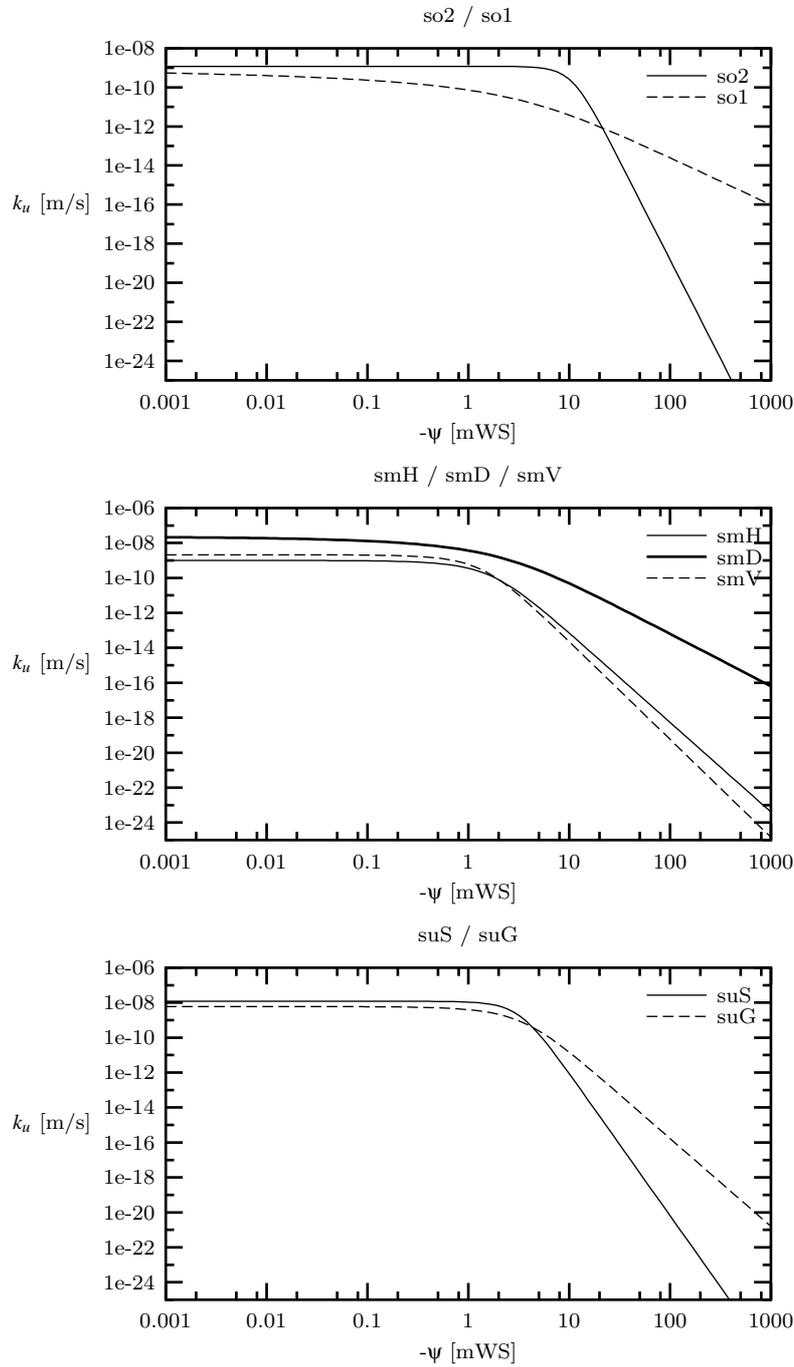
Anlage 13

Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit, bezogen auf geologische Formation

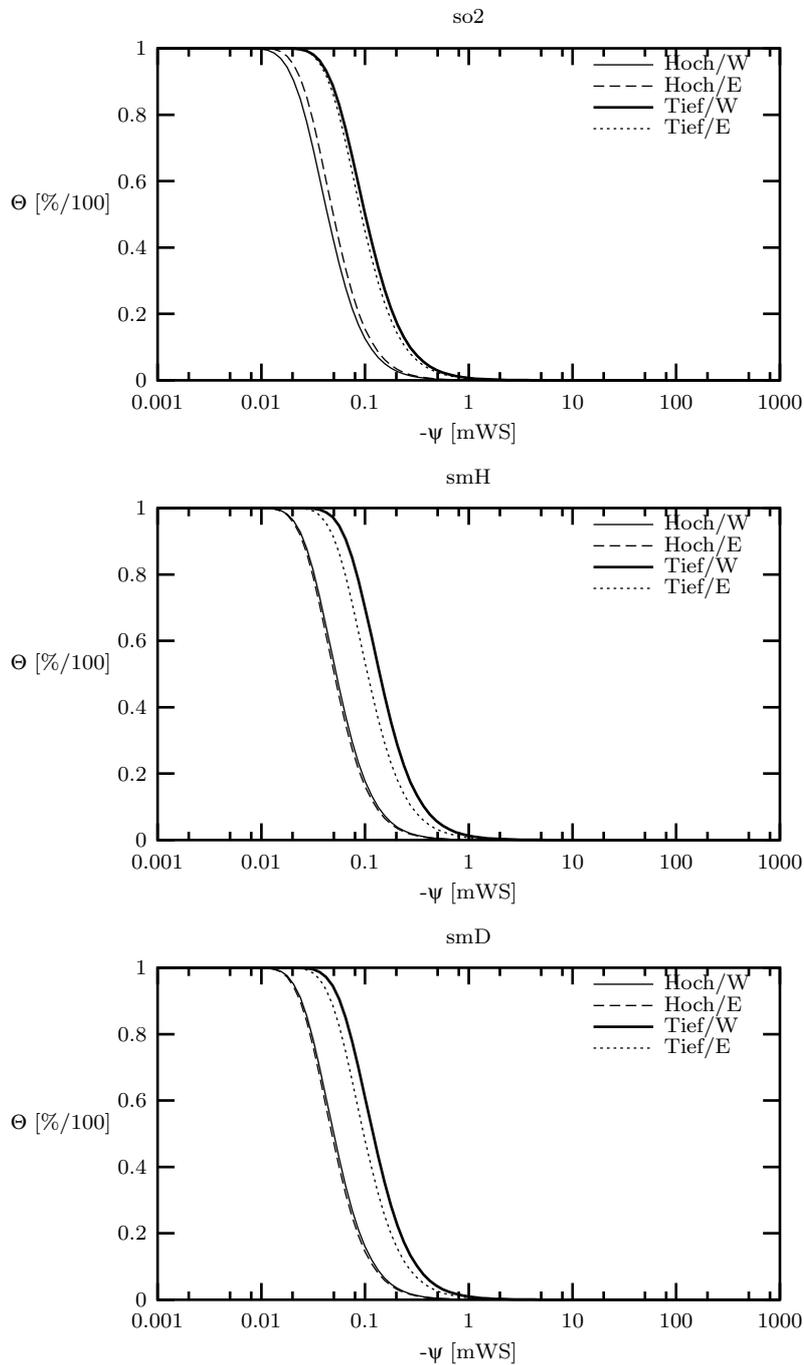


Anlage 14

k_u - ψ -Beziehung / Porenraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation

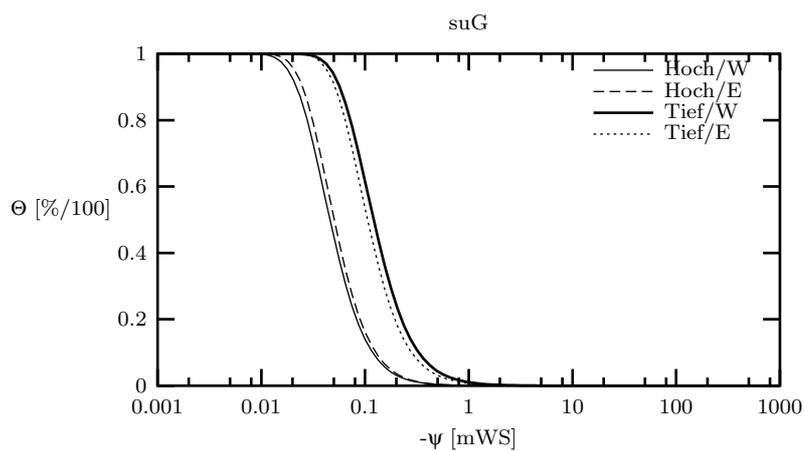
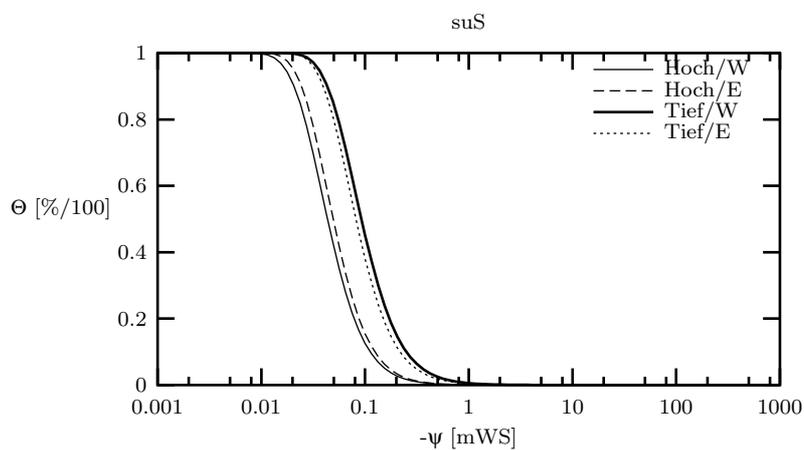
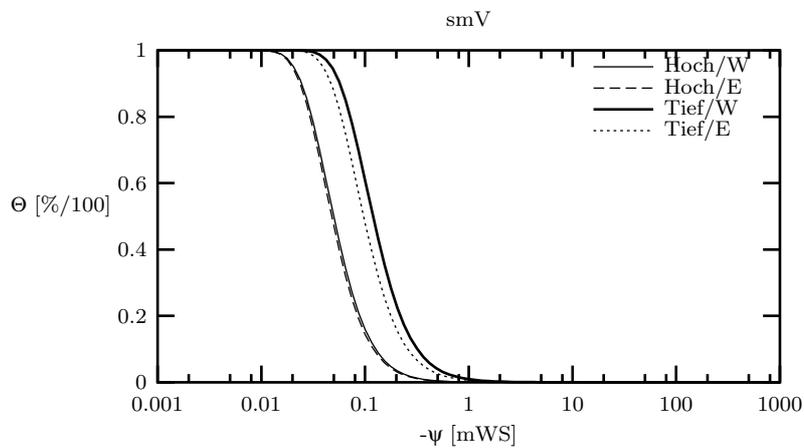


Anlage 15

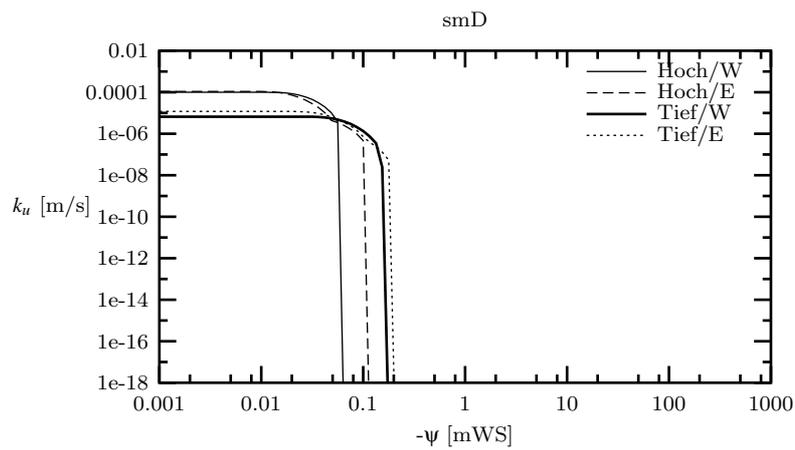
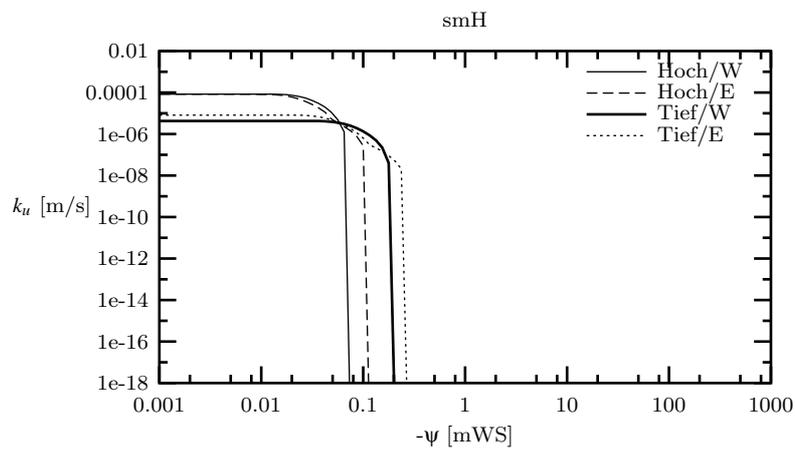
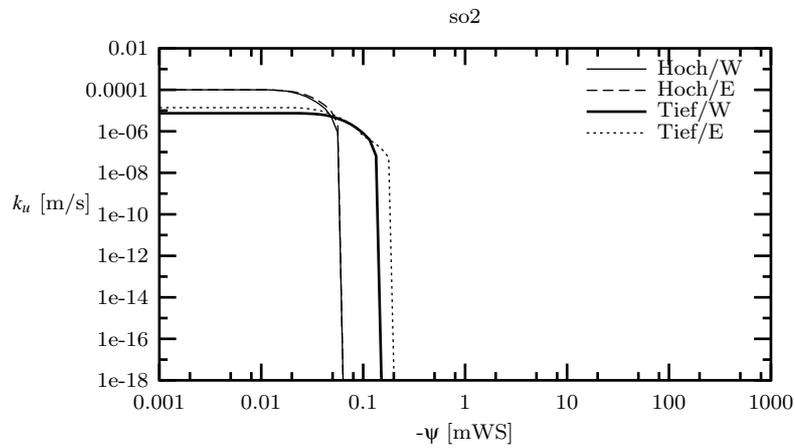
 Θ - ψ -Beziehung / Kluftraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation

Anlage 16

Θ - ψ -Beziehung / Kluftraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation

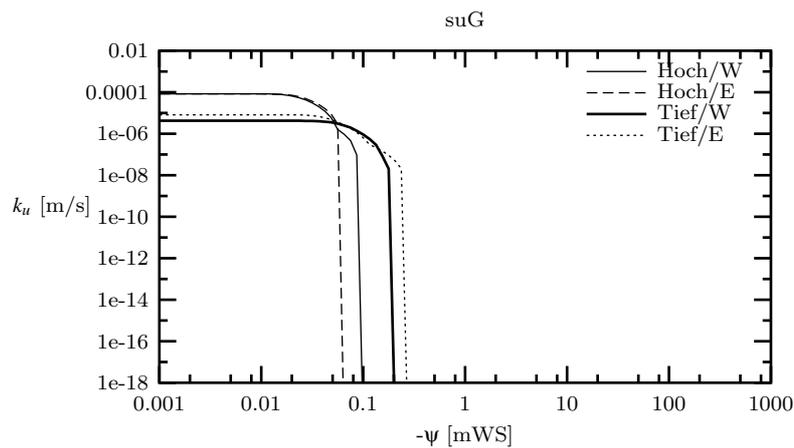
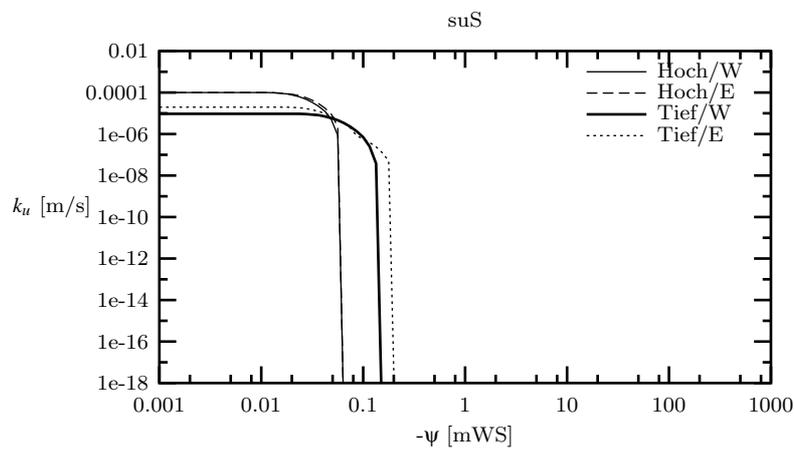
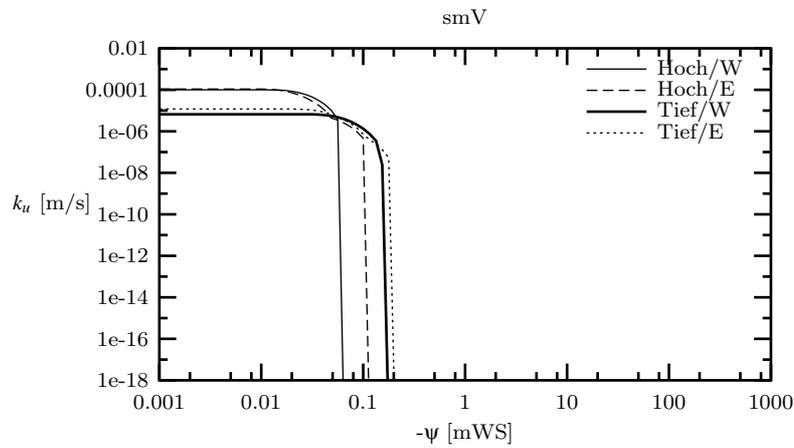


Anlage 17

 k_u - ψ -Beziehung / Kluftraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation

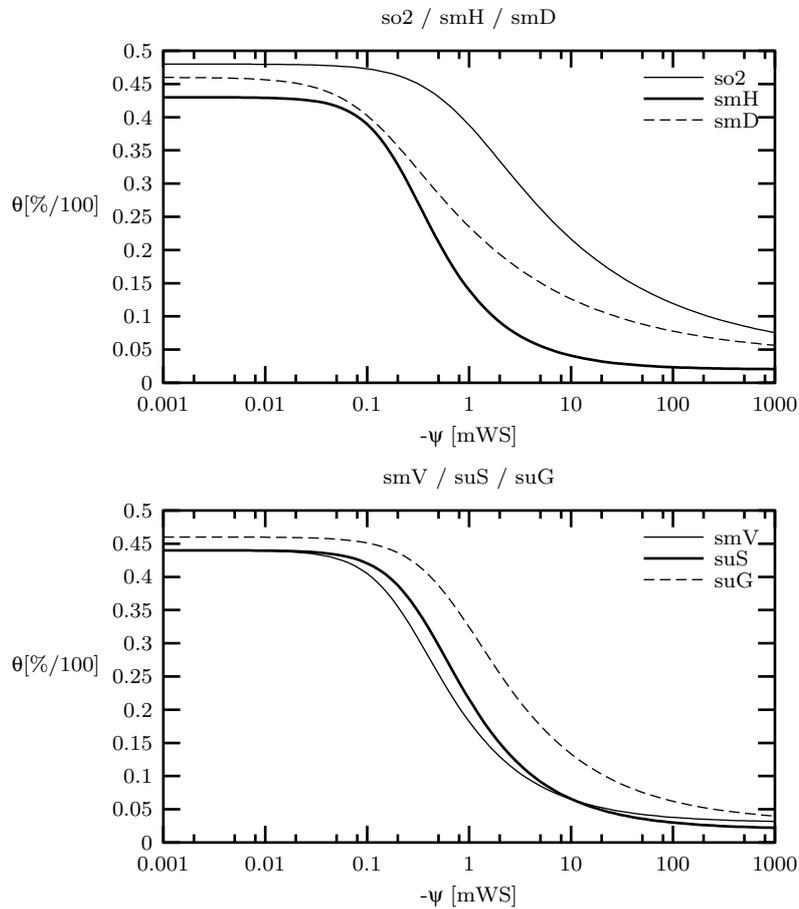
Anlage 18

k_u - ψ -Beziehung / Kluftraum / berechnete Kurven, bezogen auf geologische Formation



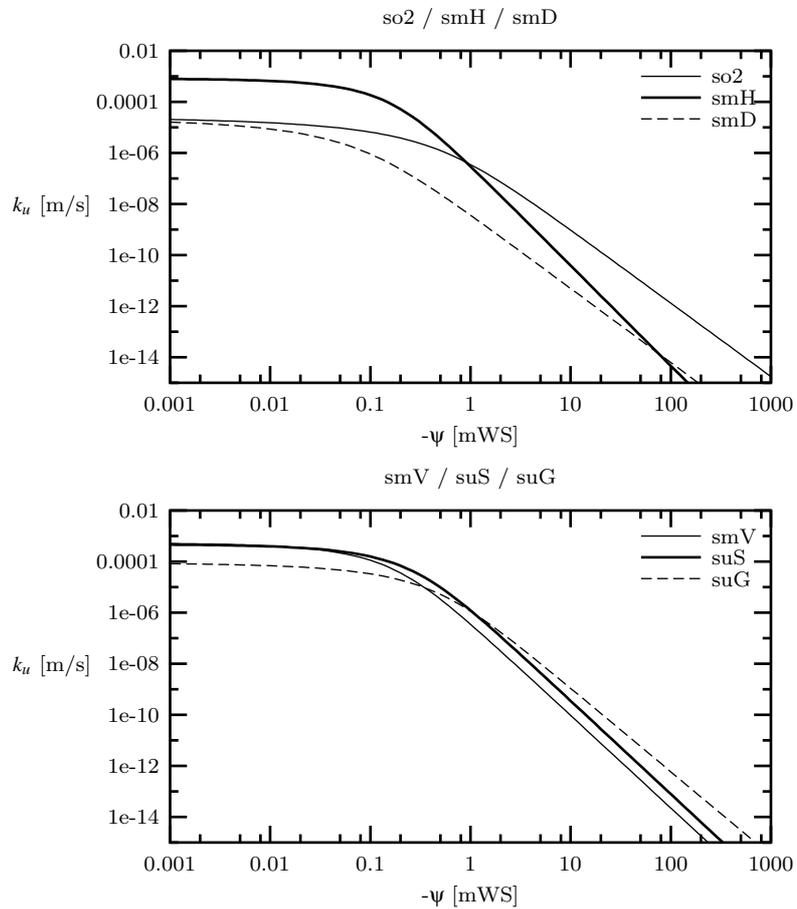
Anlage 19

θ - ψ -Beziehung / Böden, bezogen auf geologische Formation



Anlage 20

k_u - ψ -Beziehung / Böden, bezogen auf geologische Formation



Anlage 21

Datenblatt: Oberer Buntsandstein (so)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächen-nah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
			Westteil	gesamt	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Klufttraumanteil	n_{kl}	[%]	Ostteil	gesamt	0,12	0,26
			Westteil	gesamt	0,09	0,21
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,40	0,40
				DD	0,40	0,40
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,16	0,27
				DD	0,08	0,24
			Westteil	QL	0,10	0,24
				DD	0,12	0,29
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	89	59
				DD	11	41
			Westteil	QL	17	17
				DD	83	83

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

Anlage 22

Datenblatt: Hardeggen–Folge (smH)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächen-nah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
			Westteil	gesamt	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$
Klufttraumanteil	n_{kl}	[%]	Ostteil	gesamt	0,09	0,22
			Westteil	gesamt	0,07	0,20
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,45	0,45
				DD	0,45	0,45
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,14	0,26
				DD	0,06	0,23
			Westteil	QL	0,08	0,21
				DD	0,10	0,27
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	93	59
				DD	7	41
			Westteil	QL	15	14
				DD	85	86

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

Anlage 23

Datenblatt: Detfurth-Folge (smD)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächennah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
			Westteil	gesamt	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$
Klufttraumanteil	n_{kl}	[%]	Ostteil	gesamt	0,09	0,22
			Westteil	gesamt	0,08	0,20
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,45	0,45
				DD	0,45	0,45
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,14	0,26
				DD	0,07	0,23
			Westteil	QL	0,08	0,21
				DD	0,11	0,27
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	89	59
				DD	11	41
			Westteil	QL	12	14
				DD	88	86

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

Anlage 24

Datenblatt: Volpriehausen–Folge (smV)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächennah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
			Westteil	gesamt	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Klufttraumanteil	n_{kt}	[%]	Ostteil	gesamt	0,11	0,26
			Westteil	gesamt	0,08	0,21
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,40	0,40
				DD	0,40	0,40
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,15	0,27
				DD	0,07	0,24
			Westteil	QL	0,08	0,24
				DD	0,12	0,29
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	91	59
				DD	9	41
			Westteil	QL	9	17
				DD	91	83

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

Anlage 25

Datenblatt: Salmünster-Folge (suS)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächen-nah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
			Westteil	gesamt	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Klufttraumanteil	n_{kl}	[%]	Ostteil	gesamt	0,13	0,26
			Westteil	gesamt	0,10	0,21
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,40	0,40
				DD	0,40	0,40
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,18	0,27
				DD	0,08	0,24
			Westteil	QL	0,11	0,24
				DD	0,13	0,29
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	92	59
				DD	8	41
			Westteil	QL	17	17
				DD	83	83

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

Anlage 26

Datenblatt: Gelnhausen–Folge (suG)

			Tektonisches Gebiet	Kluftsystem	tief	oberflächen-nah
Gebirgsdurchlässigkeit	k_{fG}	[m/s]	Ostteil	gesamt	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
			Westteil	gesamt	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Klufttraumanteil	n_{kt}	[%]	Ostteil	gesamt	0,09	0,22
			Westteil	gesamt	0,07	0,19
Kluftabstand	d	[m]	Ostteil	QL	0,45	0,45
				DD	0,45	0,45
			Westteil	QL	1,00	1,00
				DD	0,35	0,35
Kluftöffnungsweiten	b	[m]	Ostteil	QL	0,14	0,26
				DD	0,06	0,23
			Westteil	QL	0,08	0,17
				DD	0,10	0,28
Kontaktflächenanteil		[%]	Ostteil	QL	5	1
				DD	10	1
			Westteil	QL	5	1
				DD	10	1
Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit		[%]	Ostteil	QL	93	59
				DD	7	41
			Westteil	QL	15	7
				DD	85	93

QL: Quer- und Längsklüfte

DD: beide Diagonalkluftrichtungen

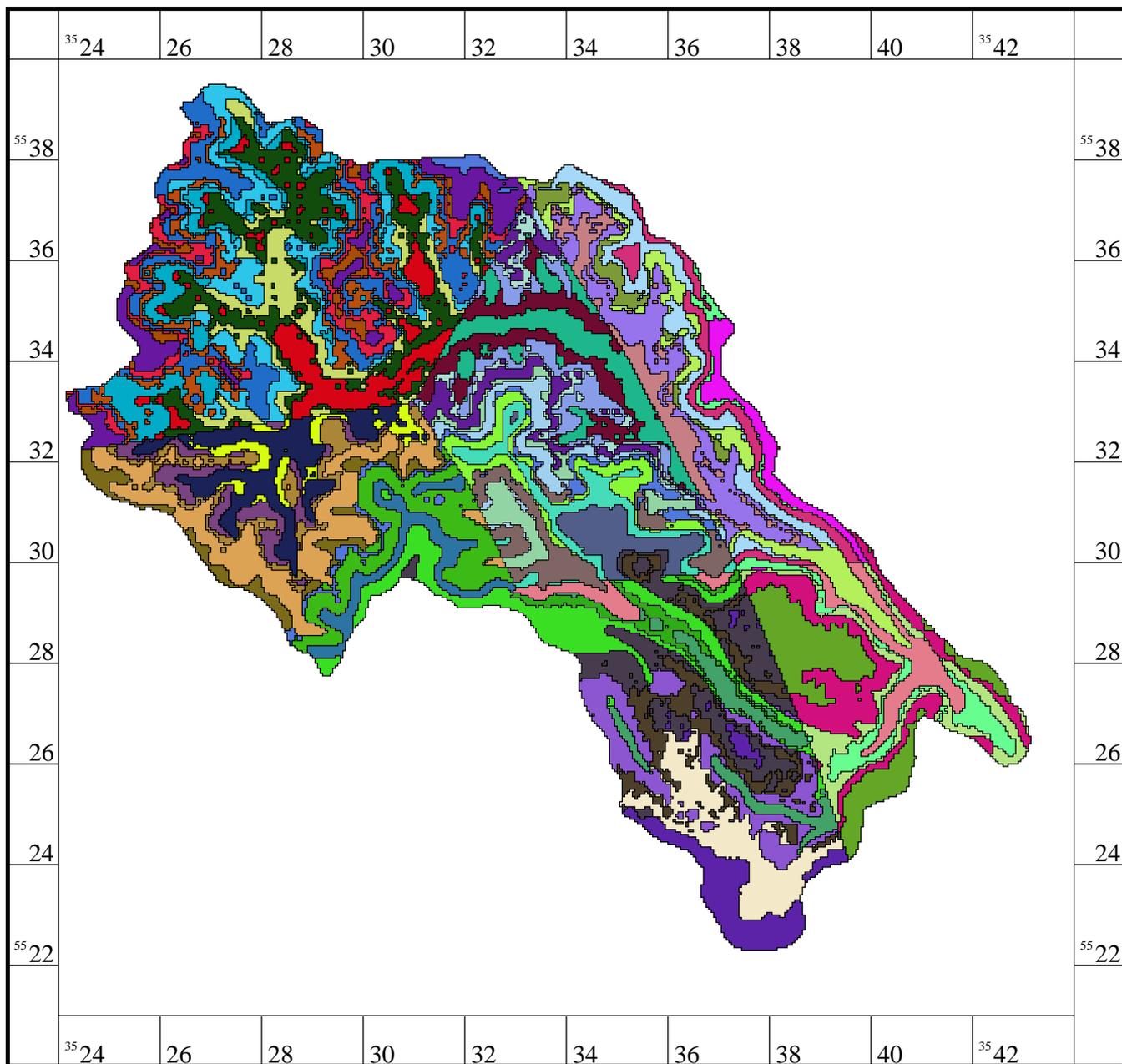
Anlage 27

Kennwerte der Teilflächen

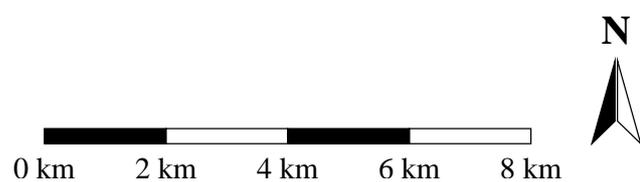
Teilfläche	Tekt. Gebiet	Niederschlagsgebiet	Flurabstand [m]	anstehende Gesteins-einheit	Rest-mächtigkeit [m]	Flächen-größe	
						[km ²]	[%-Anteil]
1	West	Rohrbrunn	20	suG	20	3,6225	2,47
2	West	Rohrbrunn	50	suG	50	1,2100	0,83
3	West	Rothenbuch	10	suG	10	3,4700	2,37
4	West	Rothenbuch	30	suG	30	6,5625	4,48
5	West	Rothenbuch	70	suG	70	3,6900	2,52
6	West	Einsiedel	10	suG	10	3,6925	2,52
7	West	Einsiedel	30	suG	30	3,0500	2,08
8	Ost	Einsiedel	10	suG	10	2,3000	1,57
9	West	Rohrbrunn	30	suS	10	1,9575	1,34
10	West	Rothenbuch	30	suS	25	4,1675	2,84
11	West	Rothenbuch	50	suS	10	4,7650	3,25
12	West	Einsiedel	30	suS	25	2,2400	1,53
13	Ost	Einsiedel	10	suS	10	3,9975	2,73
14	West	Rohrbrunn	40	suS	35	2,0350	1,39
15	West	Rothenbuch	50	suS	35	3,1475	2,15
16	West	Rothenbuch	65	suS	25	5,5000	3,75
17	West	Einsiedel	40	suS	20	1,1275	0,77
18	West	Rohrbrunn	30	suS	30	5,1575	3,52
19	West	Einsiedel	50	suS	35	2,0275	1,38
20	West	Rothenbuch	70	suS	35	2,8000	1,91
21	West	Rothenbuch	50	suS	50	1,1225	0,77
22	West	Einsiedel	40	suS	35	1,7600	1,20
23	West	Rohrbrunn	60	smV	5	1,8400	1,26
24	West	Rothenbuch	60	smV	5	2,9975	2,05
25	West	Einsiedel	40	smV	5	1,7150	1,17
26	Ost	Einsiedel	10	smV	10	2,7425	1,87
27	Ost	Einsiedel	70	smV	5	1,1175	0,76
28	West	Einsiedel	80	smV	65	1,8925	1,29
29	Ost	Einsiedel	70	smV	50	2,9875	2,04
30	West	Rohrbrunn	80	smV	65	3,8825	2,65
31	West	Einsiedel	10	smV	10	2,5400	1,73
32	West	Einsiedel	90	smV	80	1,9075	1,30
33	West	Rohrbrunn	70	smD	30	2,1575	1,47
34	West	Einsiedel	80	smD	30	2,2525	1,54
35	Ost	Einsiedel	40	smD	40	2,8575	1,95
36	Ost	Einsiedel	70	smD	30	2,0925	1,43
37	West	Bischbrunn	50	smH	35	1,2725	0,87
38	Ost	Bischbrunn	30	smH	30	2,3400	1,60
39	West	Bischbrunn	10	smH	10	2,2700	1,55
40	West	Bischbrunn	70	smH	70	4,4850	3,06
41	West	Einsiedel	90	smH	70	1,9025	1,30
42	Ost	Bischbrunn	40	smH	40	2,5950	1,77
43	Ost	Einsiedel	70	smH	70	1,4725	1,01
44	West	Bischbrunn	30	so	25	3,8200	2,61
45	West	Bischbrunn	70	so	30	4,8575	3,32
46	Ost	Bischbrunn	70	so	20	4,1000	2,80
47	West	Bischbrunn	50	so	30	3,4225	2,34
48	Ost	Bischbrunn	80	so	50	4,5250	3,09
49	West	Bischbrunn	20	so	20	4,0075	2,74
50	West	Bischbrunn	50	so	50	3,0600	2,09
Summe:						145,5150	100,00

Anlage 28

Teilflächenkarte – Farbgebung zufällig

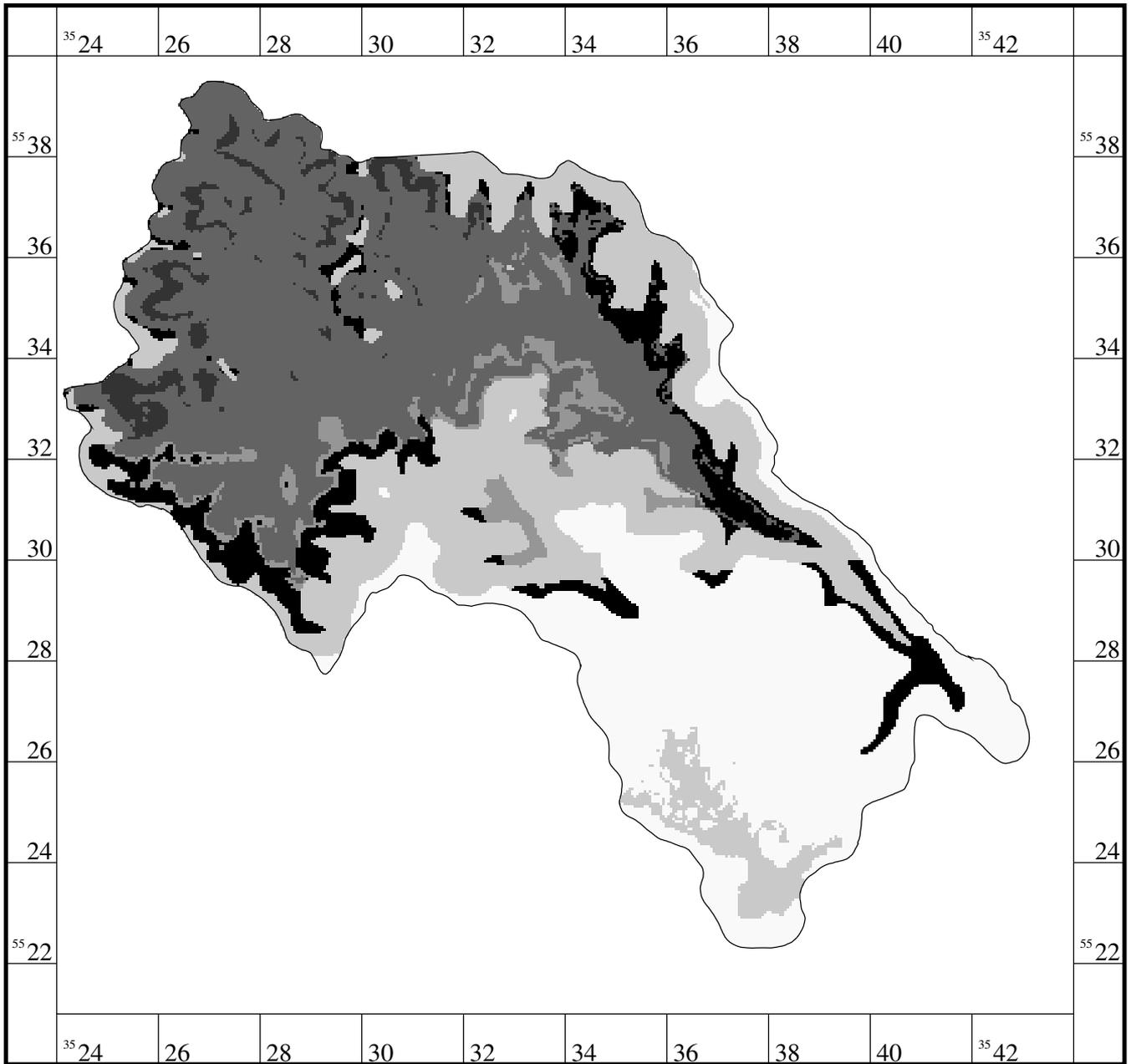


Edgar Harzer, 2003



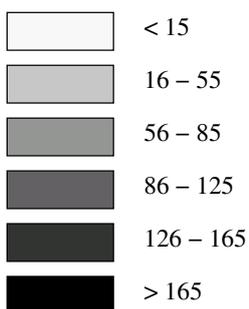
Anlage 29

Grundwasserneubildung ohne Berücksichtigung der Zwischenabflüsse im Festgestein



Edgar Harzer, 2003

Grundwasserneubildungshöhen [mm]

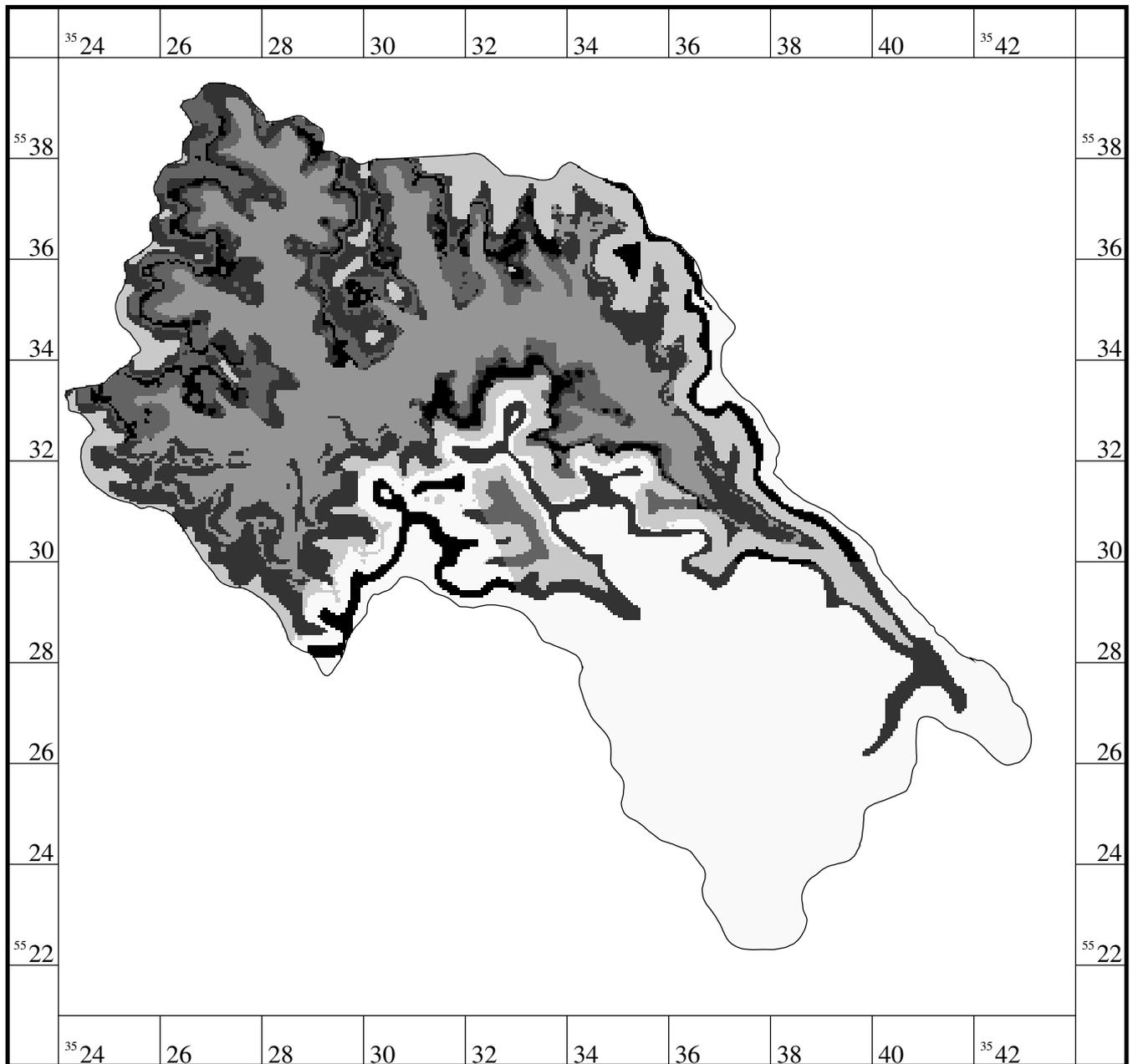


0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



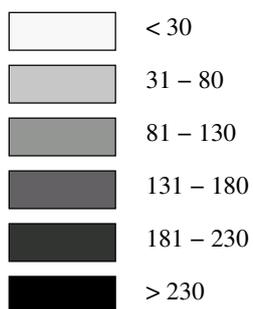
Anlage 30

Grundwasserneubildung mit Berücksichtigung der Zwischenabflüsse im Festgestein



Edgar Harzer, 2003

Grundwasserneubildungshöhen [mm]

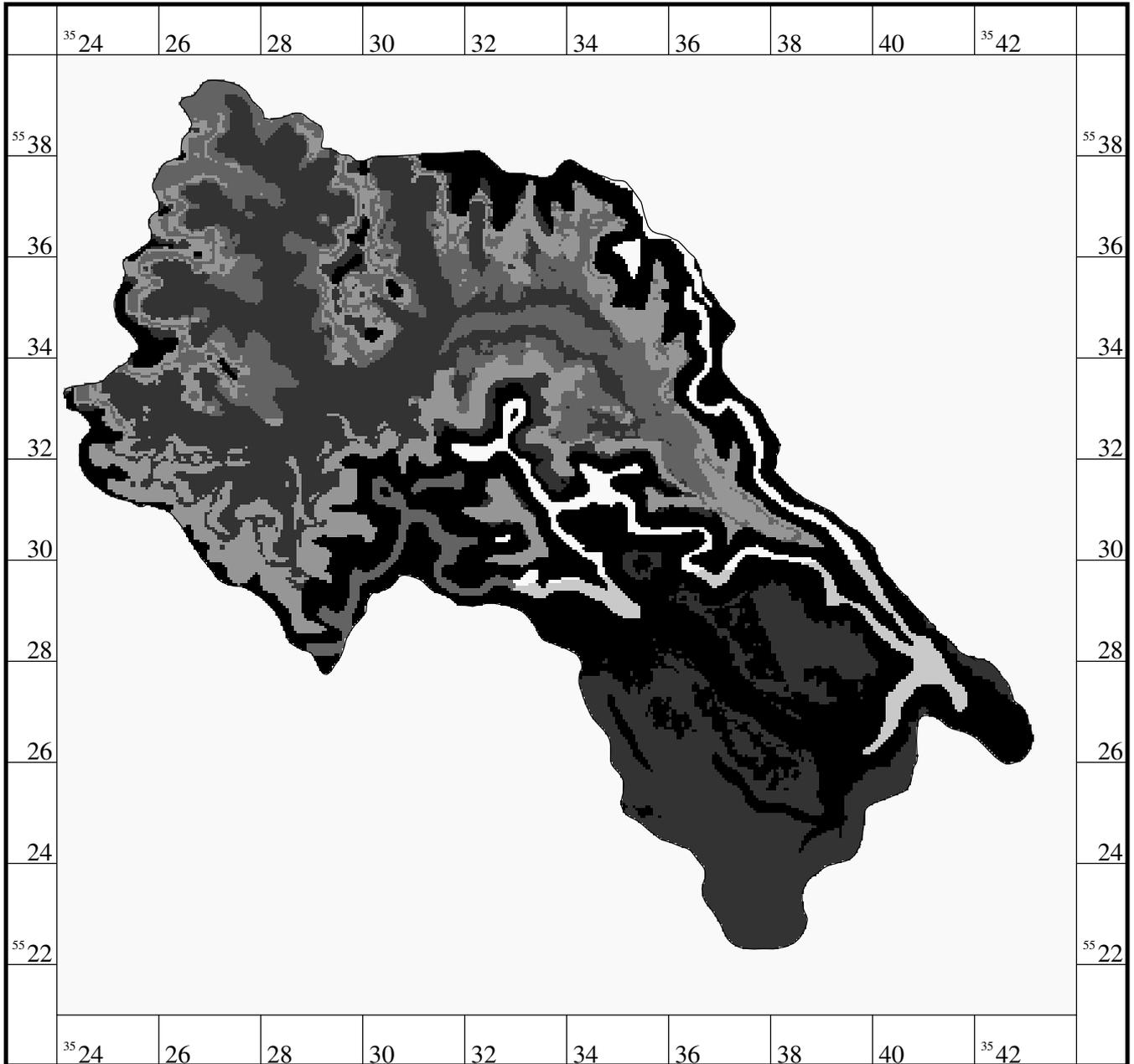


0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



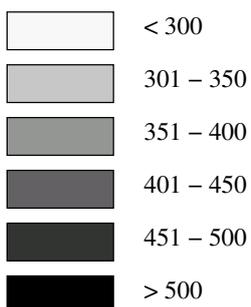
Anlage 31

Zwischenabfluss im Bodenhorizont (Interflow)



Edgar Harzer, 2003

Zwischenabflusshöhen [mm]

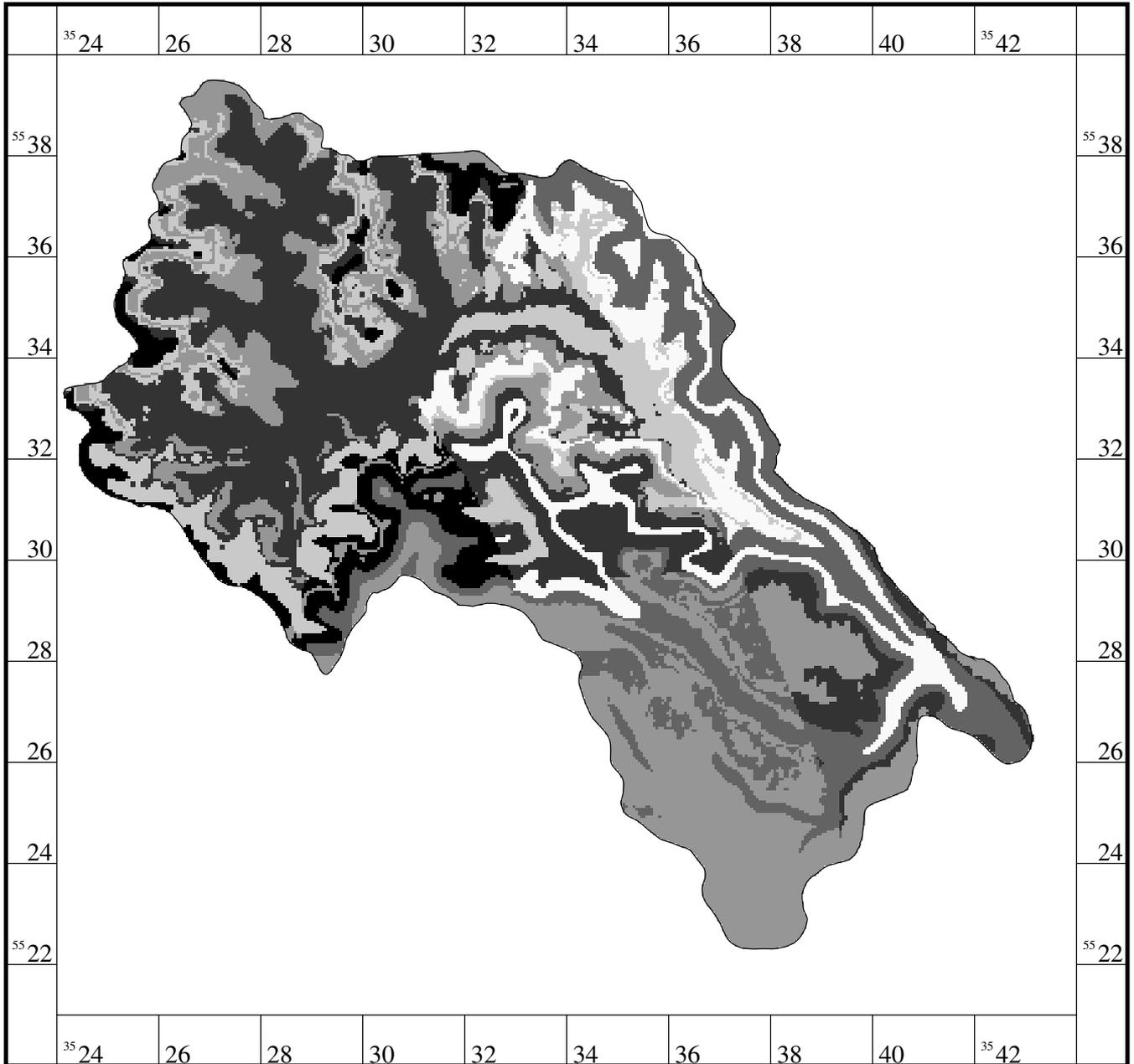


0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



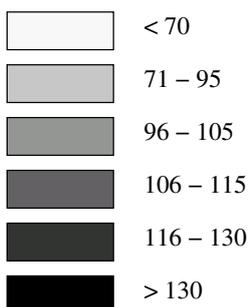
Anlage 32

Zwischenabfluss im Bodenhorizont (Interflow) im Sommerhalbjahr



Edgar Harzer, 2003

Zwischenabflusshöhen [mm]

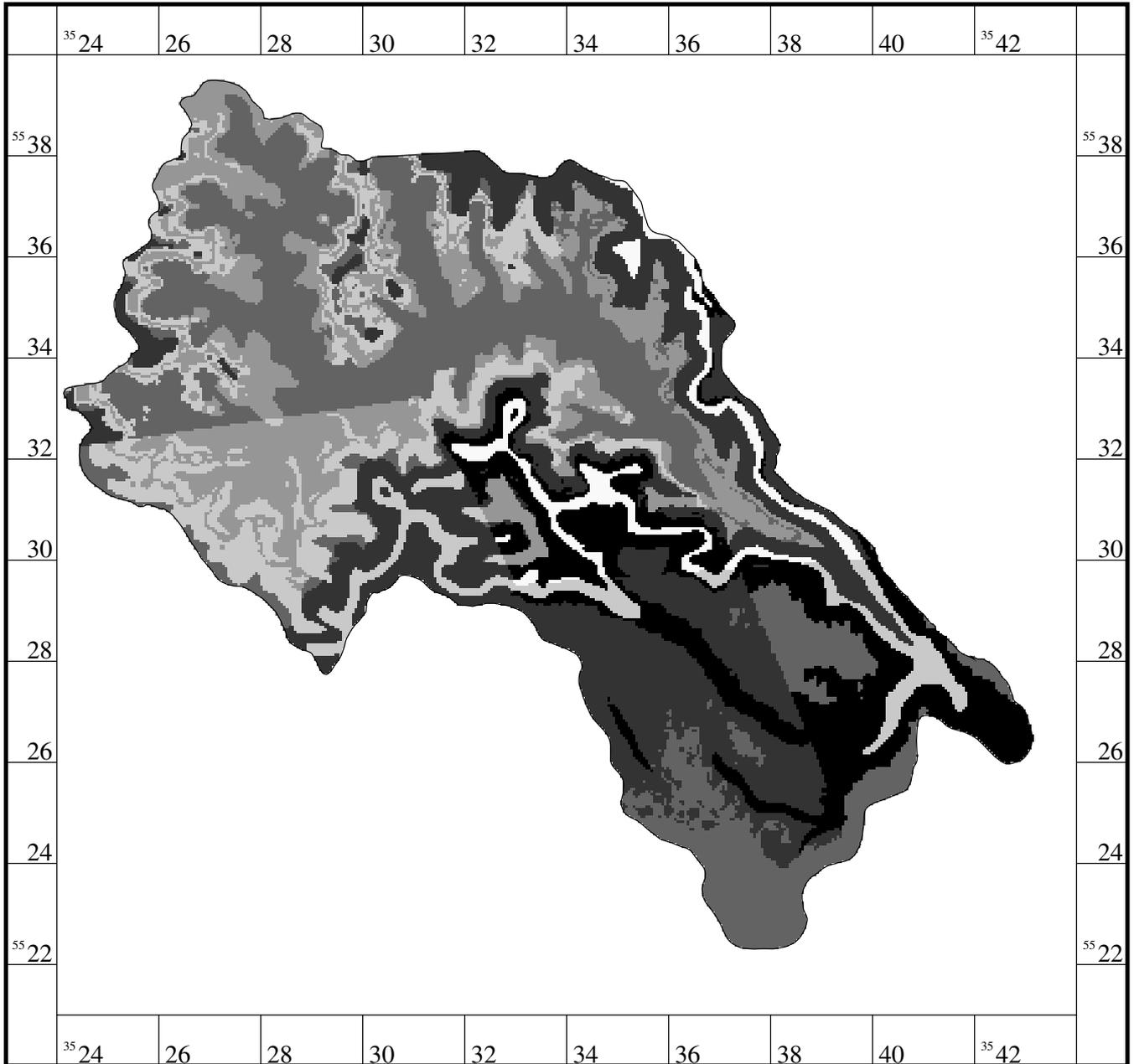


0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



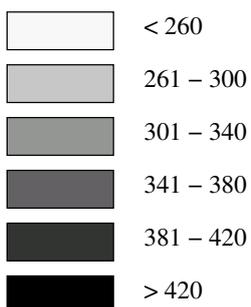
Anlage 33

Zwischenabfluss im Bodenhorizont (Interflow) im Winterhalbjahr



Edgar Harzer, 2003

Zwischenabflusshöhen [mm]

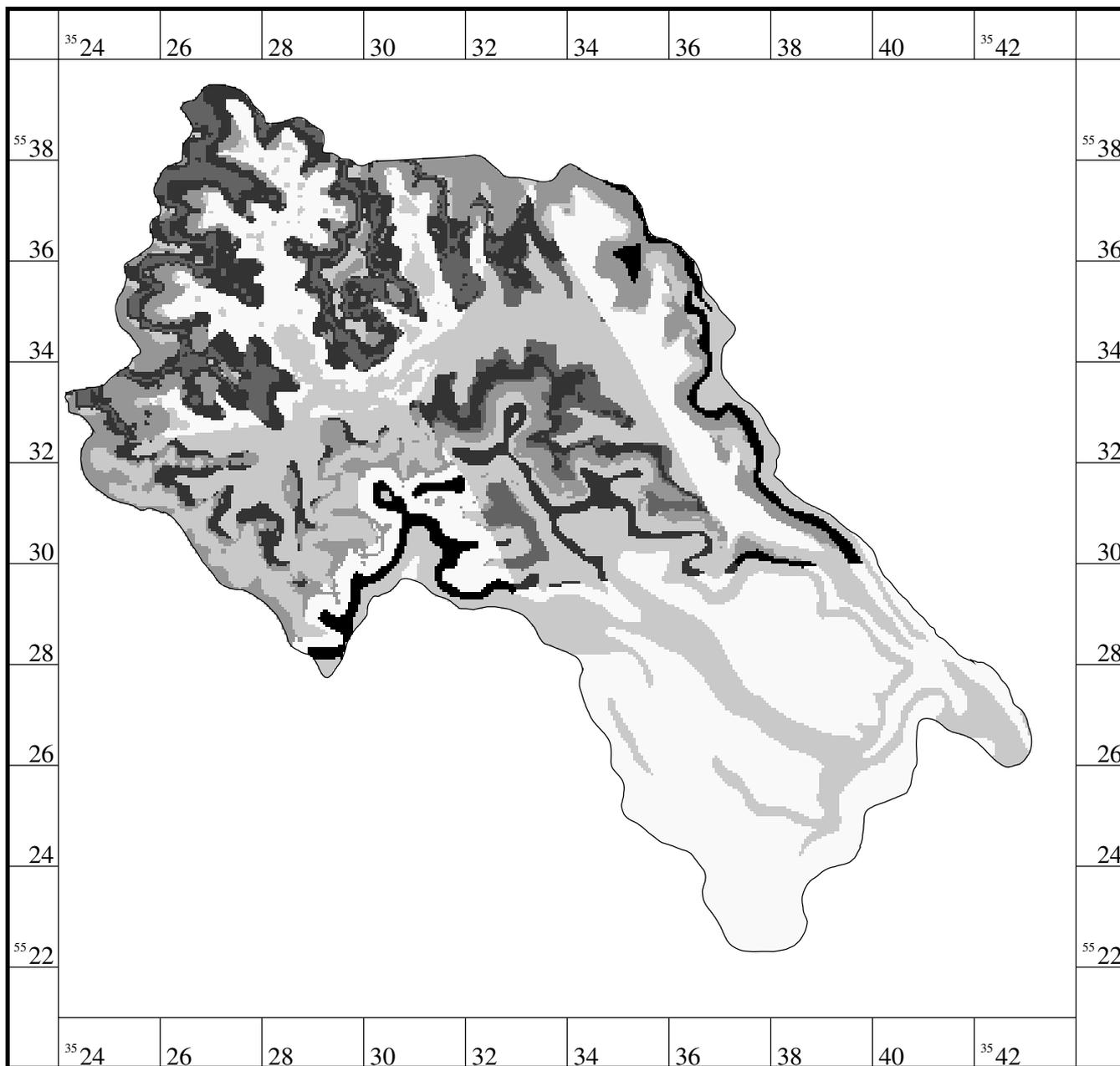


0 km 2 km 4 km 6 km 8 km



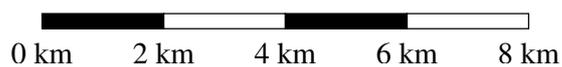
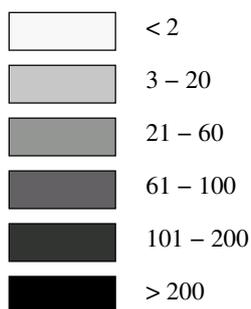
Anlage 34

Zwischenabfluss im Festgestein



Edgar Harzer, 2003

Zwischenabflusshöhen [mm]



Anlage 35

Programmstruktur

Das Programm ist entsprechend dem Flussdiagramm (s. folgende Seiten) strukturiert. Das Flussdiagramm stellt den Programmverlauf im Hauptprogramm **siwamo.p** dar. Auf der rechten Seite des Diagramms sind die Unterprogramme aufgelistet, auf die von den Programmschritten des Hauptprogramms zugegriffen wird. Die Programmschritte und die dazugehörigen Unterprogramme stehen im Flussdiagramm jeweils etwa auf einer Linie. Der Quellcode ist in der Anlage 36 angefügt. Die Eingabe der erforderlichen Modellierungsdaten erfolgt über fünf Dateien sowie über eine Randwertdatei mit den Niederschlags- und Verdunstungswerten. Die Ergebnisse werden in vier Dateien abgespeichert.

In der **Initialisierungsdatei (*.ini)** sind grundlegende Modelldaten festgelegt, wie Anzahl der Kompartimente, Wurzeltiefe und maximale Rechentage. Außerdem sind hier die Faktoren für die dynamische Zeitschrittweitensteuerung vorgegeben, also maximale und minimale Fehlerschranken und maximale und minimale Zeitschrittweiten. Zusätzlich werden die Randwertdatei und das Intervall für die Speicherung der Profilwerte vorgegeben. Die Anfangswerte der Saugspannungen, der Starttag, sowie Kenngrößen der Kompartimente sind in der **Zelldatei (*.awg)** enthalten. Die Kenngrößen umfassen Typbezeichnungen für Matrix und Klufttraum, Zellhöhen, Kluftabstände und die unteren Saugspannungsgrenzwerte. Die **Austauschdatei (*.imb)** und die **Zwischenabflussdatei (*.zwi)** enthalten die Faktoren für Austausch zwischen Matrix und Klufttraum sowie Zwischenabflüsse und Interflow. In der Datei mit **allgemeinen Daten (*.alg)** werden die maximalen Saugspannungen sowie die mittleren Kluftabstände festgelegt. Die oberen Randwerte des Modells, die Niederschlags- und Verdunstungsdaten, sind als Tageswerte in der **Randwertdatei (*.rnd)** abgelegt.

Nach dem Einlesen der Initialisierungsdatei, der Zelldaten sowie der Austausch- und Zwischenabflussfaktoren wird die Tagesschleife gestartet. Die Startwerte (h_{acorm} und h_{acork}) werden dabei aus der Zelldatendatei ausgelesen. Anschließend erfolgt das tageweise einlesen von Niederschlags- und Verdunstungsdaten. Die Verdunstungswerte werden dann, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, aufgeteilt.

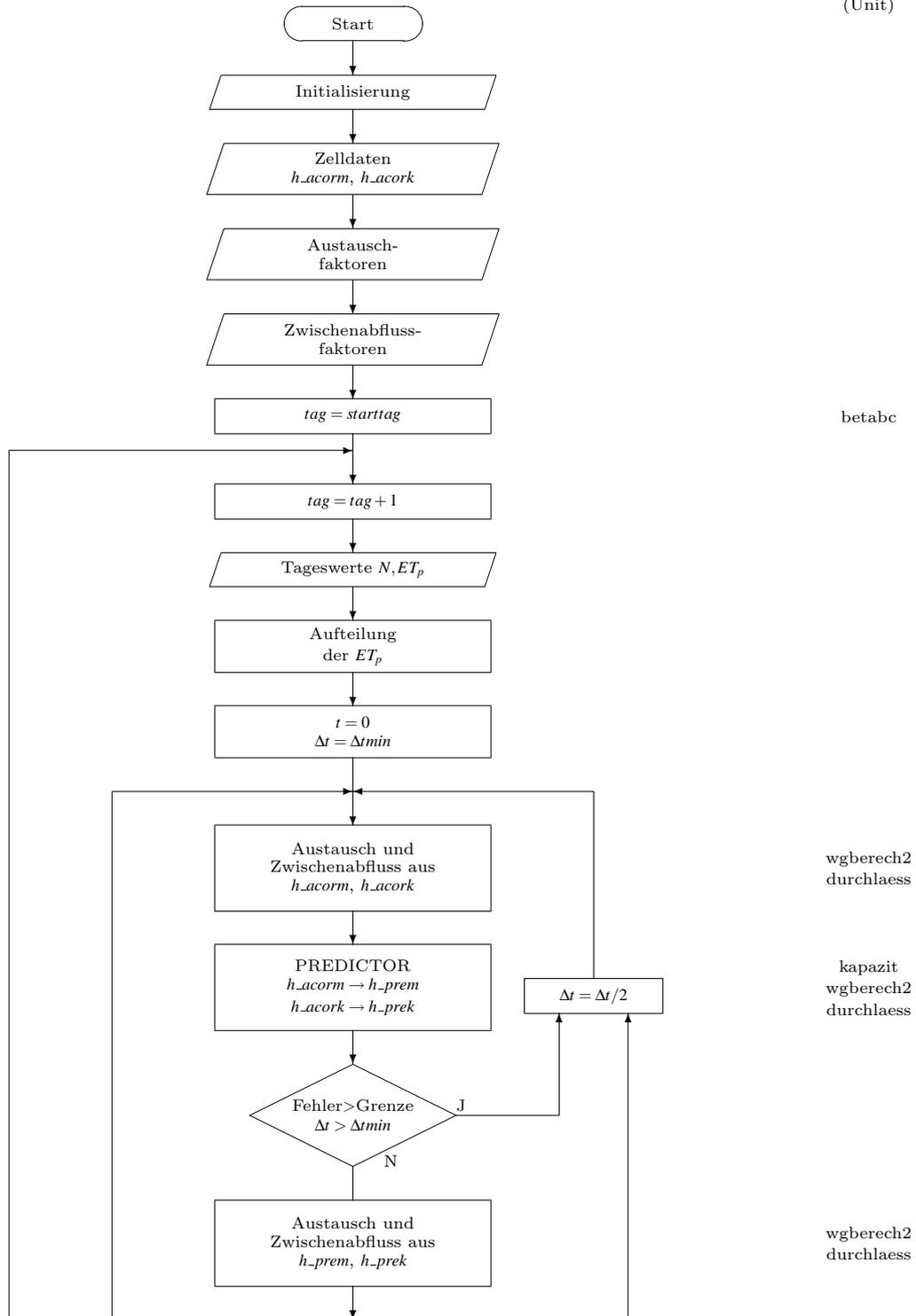
Die neuen Saugspannungswerte werden nach dem Predictor-Corrector-Verfahren berechnet und die Ergebnisse entsprechend als $h_{prem}(k)$ - und $h_{corm}(k)$ -Werte zwischengespeichert. Die Messung der Zeitschrittweiten erfolgt in Sekunden. Jeweils vor dem Predictor- bzw. Correctorschritt werden die entsprechenden Austausch- und Zwischenabflusswerte berechnet. Bei Überschreitung der Fehlergrenzen wird die Zeitschrittweite reduziert. Nach dem Predictor-Corrector-Schritt werden die Durchflüsse in den obersten (Infiltration, Evaporation) und untersten Kompartimenten (Neubildung, kapillarer Aufstieg) berechnet. Liegt der nach dem Corrector-Schritt errechnete Fehler unter dem Minimalfehler, so erhöht sich die Zeitschrittweite. Am Ende einer Tagesschleife wird für das Gesamtprofil die Bilanz berechnet und es erfolgt

die Ausgabe der Profildaten (Tagesabstand entsprechend den Vorgaben) und der sonstige bilanzrelevanten Daten.

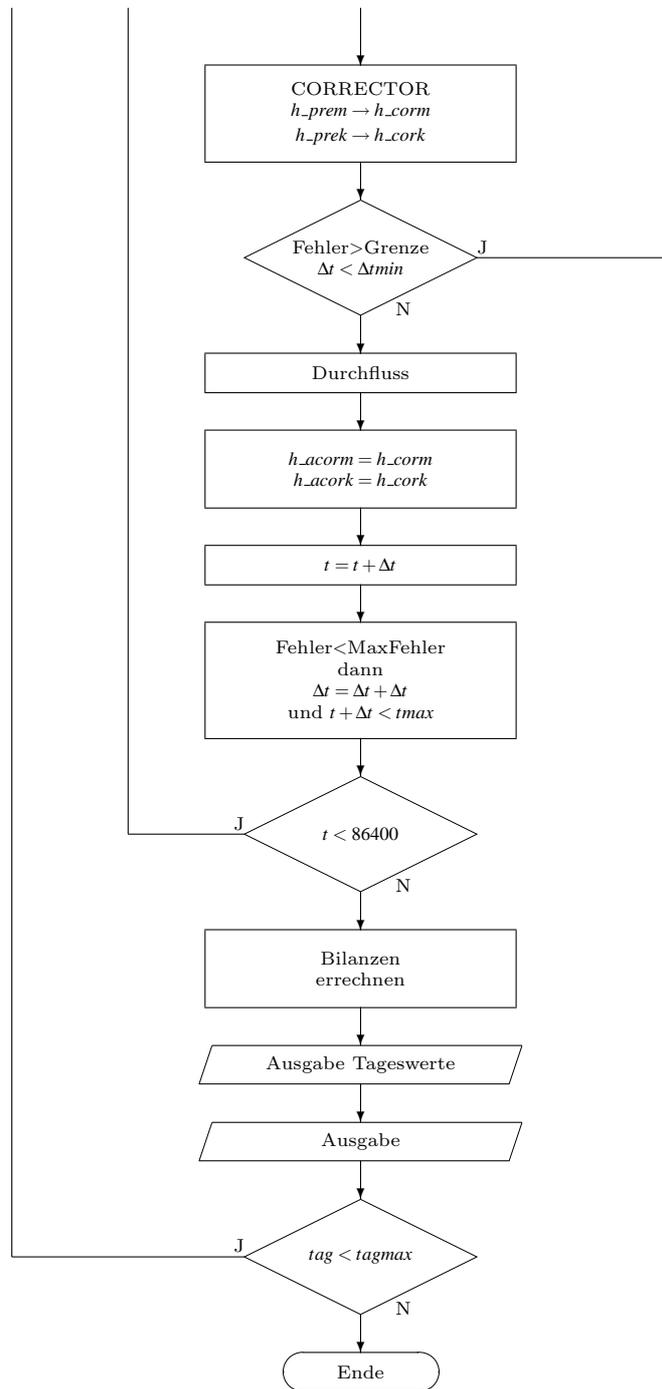
Es werden vier Ergebnisdateien erzeugt. Die Hauptdatei enthält die **Tageswerte** (***.twerte**) der Wasserhaushaltsgrößen und der Bilanz. In einer zweiten Datei werden die Tageswerte aller **Zwischenabflüsse** (***.zwiabf**) im Profil gespeichert. Eine **Profildatei** (***.profil2**) enthält die Saugspannungswerte im Profil sowie aufsummierte Tageswerte der wichtigsten Wasserhaushaltsgrößen. In dieser Datei werden die Ergebnisse in dem Tagesrhythmus abgespeichert, wie er in der ini-Datei vorgegeben wird. Schließlich wird nach jedem Tagesschritt diese Profildatei nochmals unter dem Namen ***.profil** abgespeichert, wobei das Ergebnis vom Vortag überschrieben wird. Diese Datei hat das gleiche Format wie die Datei mit den Anfangswerten (***.awg**) und kann somit nach Umbenennung der Erweiterung als Anfangsdatei verwendet werden.

Der Aufbau der Dateien mit kurzer Erläuterung der Kenngrößen ist in der Anlage 37 dargestellt. Von den beiden Profildateien (***.profil** und ***.profil2**) ist nur ein Beispiel aufgeführt.

Bei Programmstufe
aufgerufene
Unterprogramme
(Unit)



Bei Programmstufe
aufgerufene
Unterprogramme
(Unit)



kapazit
wgberech2
durchlaess

kapazit
wgberech2
durchlaess

wgberech2

Anlage 36

Quellcode

```

program siwamo (input,output);

uses durchlaess,wgberech2,kapazit,betabc;

type hcor          = array[0..200] of real;
   dz              = array[0..200] of real;
   tt              = array[0..200] of integer;

var  imb           : hcor;
     h_corm,h_cork : hcor;
     h_prem,h_prek : hcor;
     h_acorm,h_acork : hcor;
     grenz_m, grenz_k : hcor;
     z_grad_m, z_grad_k : hcor;
     z_grenz_m, z_grenz_k : hcor;
     atf_m, atf_k : hcor;
     atl_u_m, atl_u_k : hcor;
     atl_g_m, atl_g_k : hcor;
     q_zm, q_zk : dz;
     d_z : dz;
     typm, typk : tt;
     para : tt;
     gws, merker, sst, k, komp, n2, tag : integer;
     zeit_max, zaehler : integer;
     minfehler_1, maxfehler_1 : real;
     bilanzg, bilanzg_alt : real;
     inp_ms, input_ms : real;
     wgende, wgstart, neb, eva, kap : real;
     nie, inf, abf : real;
     dt : real;
     abfl, zwi_abflm, zwi_abflk : real;
     hgw, vhaud, evabil, zwabm, zwabk : real;
     g_evabil, g_zwab : real;
     g_abf, g_eva, g_inf, g_kap, g_neb : real;
     eps, t : real;
     dtmax, dtmin : real;
     minfehler, maxfehler : real;
     sumnie : real;
     du, kp : array [0..200] of real;
     q_zm_tag, q_zk_tag : array [0..200] of real;
     betabc1, betabc2 : array [0..200] of real;
     e, z, klab : array [0..200] of real;
     t_0, t_alt : array [0..200] of real;
     eim, eik : array [0..200] of real;
     theta, q, te : array [0..200] of real;
     zem, zek : array [0..200] of real;
     qm, qk : array [0..200] of real;

const tz : integer=86400;

procedure assign (var T:text; protected name :string);
(*-----
   Standardprozedur - wird fuer Dateiausgabe benoetigt
   -----*)
var b : BindingType;

begin
  unbind(t);
  b:=binding(t);
  b.name:=name;
  bind (t,b);
  b:=binding(t);
end;

```

```

procedure zwischenabfluss(k,typz:integer;gradz,grenzz,hz,imz,q0:real;
                        var qq:real);
(*-----
  Berechnung der Zwischenabflüsse unter gesättigten Bedingungen
  Aufgerufen von          : austausch
  Uebernahme: k          : Zellenindex
                    typz   : Typkennziffer
                    gradz  : Gradient fuer Zwischenabfluss
                    grenzz : zulaessige Grenzsaugspannung nach Zwischenabfluss
                    hz     : Druck/Saugsp.
                    imz    : Austauschkomponente Matrix/Kluftraum
                    q0     : Zu-/Abflusskomponente fuer oberste Zelle
  Uebergabe : qq         : Zwischenabfluss
-----*)
var dd,wg1,wg2,temp      : real;

begin
(*----- Zwischenabfluss kommt nur vor, wenn zunaechst gesaettigte Bedingungen vorliegen -----*)
  if (hz>0) then begin
    durchlaessigkeit(k,hz,typz,dd,kluftraum);
(*----- Gradient fuer den Zwischenabfluss festlegen -----*)
    if grenzz=1 then gradz:=hz;
      temp:=d_z[k];
      if hz<d_z[k] then temp:=hz;
(*----- Einfache Berechnung des Flusses -----*)
      qq:=dd*gradz*1*temp*dt;
(*----- Grenzwert fuer Saugspannung -----*)
      if grenzz=0 then grenzz:=-10;
        if grenzz=1 then grenzz:=-d_z[k]*2;
          WgBerechnen(k,hz,typz,wg1,kluftraum);
          WgBerechnen(k,grenzz,typz,wg2,kluftraum);
(*----- Wenn Saugspannung nach Zwischenabfluss zu gross, dann wird der
  Zwischenabfluss der Saugspannung angepasst -----*)
          if qq>(wg1-wg2)*d_z[k]-imz*dt*d_z[k] then
            qq:=(wg1-wg2)*d_z[k]-imz*dt*d_z[k];
          if k=1 then begin
            if qq>(wg1-wg2)*d_z[k]-imz*dt*d_z[k]-q0/dt then
              qq:=(wg1-wg2)*d_z[k]-imz*dt*d_z[k]-q0/dt;
            end;
          end else qq:=0;
            if qq<0 then qq:=0;
          end;
end;
end;

```

```

procedure imbibition(hm,hk,zeit:real;j:integer);
(*-----
  Berechnung des Austausches zwischen Kluftraum und Matrix
  Aufgerufen von          : austausch
  Uebernahme: hm,hk      : Druck/Saugsp. Matrix und Kluftraum
                    zeit  : verbleibende Zeit im Tagesabschnitt
                    j     : Zellenindex
-----*)
var faktor,eta,temp,z    : real;

begin
(*----- Berechnung eines Zeitfaktors t_0 fuer den Austausch Kluft nach Matrix
  (Zeit, die seit Beginn des Berechnungsschrittes verstrichen ist) -----*)
  if (hk>0) and (para[j]<>1) then begin
    t_0[j]:=zeit-1;
    para[j]:=1;
  end else if (hk>0) and (para[j]=1) then begin
    t_0[j]:=t_0[j];
    para[j]:=1;
  end else if (hk<0) then begin
    para[j]:=0;
  end;
end;

(*----- Wenn Klluft und Matrix gesaettigt, dann kein Austausch -----*)
  if (hk>0) and (hm>0) then begin

```

```

    imb[j]:=0;
  end else begin
(*----- Austausch von Matrix nach Kluft -----*)
    if (hm>hk) then begin
      durchlaessigkeit(j,hm,typm[j],du[j],kluftraum);
      temp:=du[j]/(1-kluftraum);
      durchlaessigkeit(j,hk,typk[j],du[j],kluftraum);
      du[j]:=sqrt(temp*du[j]);
(*----- Einfache Berechnung des Flusses mit Gewichtungsfaktor (empirisch) -----*)
      imb[j]:=-du[j]*(hm-hk)*d_z[j]*(1/klab[j]*2*100000);
(*----- max. Austauschmenge -----*)
      if hm<0 then begin
        faktor:=at1_u_m[j];
      end else faktor:=at1_g_m[j];
      if imb[j]<-faktor*d_z[j] then imb[j]:=-faktor*d_z[j];
(*----- Austausch von Kluft nach Matrix -----*)
      end else if (hm<hk) then begin
        wgberechnen(j,hm,typm[j],theta[j],kluftraum);
        theta[j]:=theta[j]/(1-kluftraum);
        durchlaessigkeit(j,hm,typm[j],du[j],kluftraum);
        du[j]:=du[j]/(1-kluftraum);
(*----- Berechnung des Flusses vereinfacht nach XY
        sowie mit Gewichtungsfaktor (empirisch) -----*)
        temp:=alpha*(1-thetar/thetas)*klab[j]*klab[j]/(du[j]*(zeit-t_0[j]));
        eta:=sqrt(temp);
        eta:=-2*eta*du[j]*(zeit-t_0[j])/(1-thetar/thetas)/(klab[j])/(klab[j])*hm;
        z:=exp((nn-1)*ln(-alpha*hm))/(1+exp((nn-1)*ln(-alpha*hm)));
        temp:=(du[j]*(nn-1)*thetas*(1-thetar/thetas)*z)/(alpha*(zeit-t_0[j]));
        imb[j]:=-alpha/2*(hm-hk)*eta*sqrt(temp)/klab[j]*atf_k[j];
(*----- max. Austauschmenge -----*)
        if hk<0 then begin
          faktor:=at1_u_k[j];
        end else faktor:=at1_g_k[j];
        if imb[j]>faktor*d_z[j] then imb[j]:=faktor*d_z[j];
      end;
    end;
  end;

end;

procedure imbibition2(hm,hk:real;j:integer);
(*-----
  Berechnung des Austausches im Bodenhorizont ueber Kluft- und Matrixteil
  Aufgerufen von          : austausch
  Uebernahme: hm,hk      : Druck/Saugsp. Matrix und Kluftraum
                   j      : Zellenindex
-----*)
var temp                : real;

begin
  durchlaessigkeit(j,hm,typm[j],temp,kluftraum);
  durchlaessigkeit(j,hk,typk[j],du[j],kluftraum);
  du[j]:=sqrt(temp*du[j]);
(*----- Einfache Berechnung des Flusses mit Gewichtungsfaktor (empirisch) -----*)
  imb[j]:=-du[j]*(hm-hk)*d_z[j]/atf_m[j];
  if (hm>=0) and (hk>=0) then begin
(*----- Verringerung des Austausches unter gesaettigten Bedingungen
    zur Stabilitaetsverbesserung -----*)
    imb[j]:=-du[j]*(hm-hk)*d_z[j]/(atf_m[j]*100000);
  end;
end;

procedure austausch(hhm,hhk:hcor);
(*-----
  Aufruf der Zwischenabflussberechnung und Austauschberechnung.
  Aufgerufen von          : predictor, corrector
  Uebernahme: hhm,hhk    : Druck/Saugsp. Matrix und Kluftraum
-----*)

```

```

begin
(*----- Verschiedene Berechnungsmethoden des Austausches zwischen Matrix- und Klufftmodellraum:
      imbibition2 fuer Bodenhorizont
      imbibition fuer Festgestein -----*)
  for k:=sst+1 to komp do begin
    imbibition2(hhm[k],hhk[k],k);
  end;
  for k:=1 to sst do begin
    t_alt[k]:=t_0[k];
    imbibition(hhm[k],hhk[k],t,k);
  end;
(*----- Zwischenabfluesse fuer Matrix und Klufftraum -----*)
  for k:=1 to komp do begin
    zwischenabfluss(k,typk[k],z_grad_k[k],z_grenz_k[k],hhk[k],imb[k],qk[0],q_zk[k]);
    zwischenabfluss(k,typm[k],z_grad_m[k],z_grenz_m[k],hhm[k],-imb[k],qm[0],q_zm[k]);
  end;
(*----- Umrechnung von m3 in m/s (Einheitsflaeche 1 m2!) -----*)
  for k:=1 to komp do begin
    zem[k]:=q_zm[k]/dt/d_z[k];
    zek[k]:=q_zk[k]/dt/d_z[k];
  end;
(*----- Fuer Bodenhorizont muss der Zwischenabfluss durch 2 geteilt werden, da es hier keine
      2 verschiedenen Modellraeume (Kluft und Matrix) gibt. -----*)
  for k:=sst+1 to komp do begin
    q_zk[k]:=q_zk[k]/2;
    q_zm[k]:=q_zm[k]/2;
  end;
(*----- Zuteilung der Evapotranspiration -----*)
  for k:=zaehler to komp-1 do begin
    e[k]:=te[k];
  end;
(*----- Wenn Saugspannung in den obersten Horizonten zu hoch, dann
      wird Evapotranspiration auf 0 gesetzt (merker = 1) -----*)
  if merker=1 then begin
    for k:=zaehler to komp-1 do begin
      e[k]:=0;
    end;
  end;
end;

```

```

procedure tridiag(aa,bb,dd,ff:hcor;var h:hcor);
(*-----
      Thomas-Algorithmus (Standardloesung)
      Aufgerufen von           : predictor, corrector
      Uebernahme: aa,bb,dd,ff  : Komponenten fuer Gleichungsmatrix
      Uebergabe : h           : Druck/Saugsp.
-----*)
var beta
    k
    : array[1..200] of real;
    : integer;

begin
  beta[1]:=bb[1]/dd[1];
  h[1]:=ff[1]/dd[1];
  for k:=2 to komp do begin
    dd[k]:=dd[k]-aa[k]*beta[k-1];
    beta[k]:=bb[k]/dd[k];
    h[k]:=(ff[k]-aa[k]*h[k-1])/dd[k];
  end;
  for k:=komp-1 downto 1 do begin
    h[k]:=h[k]-beta[k]*h[k+1];
    if abs(h[k])<1e-30 then h[k]:=0;
  end;
end;

```

```

procedure predictor;
(*-----
      Berechnung der Predictor-Stufe (Predictor-Corrector-Methode nach Douglas-Jones)
      Aufgerufen von           : iteration, durchfluss_berechnen
-----*)

```

```

-----*)
var  a,b,d,f                : hcor;
      inpmax,wgvor,wgnach,duminus,duplus : real;
      ztemp,etempm,etempk    : real;
      hgwm,hgwk             : real;

begin
  austausch(h_acorm,h_acork);
  (*----- Zuweisung des moeglichen Wasserentzuges, basierend auf Saugspannungen
    des vorherigen Zeitschrittes -----*)
  for k:=1 to komp do begin
    eim[k]:=e[k]-imb[k];
    eik[k]:=e[k]+imb[k];
  end;
  eim[1]:=eim[1]+qm[0]/d_z[1];
  eik[1]:=eik[1]+qk[0]/d_z[1];
  (*----- Druckverhaeltnisse im untersten Kompartiment:
    unges. Bed.: hgw:= z[0]/2,
    ges. Bed.: plus Erhoehung durch ges. Wassersaeule -----*)
  hgwk:=hgw;
  hgwm:=hgw;

  (*----- Kapazitaet fuer Predictor / Matrix -----*)
  for k:=0 to komp do begin
    kapazitaet(h_acorm[k],typm[k],kp[k]);
    durchlaessigkeit(k,h_acorm[k],typm[k],du[k],kluftraum);
  end;

  (*----- Predictor / Matrix -----*)
  inpmax:=inp_ms;
  if inpmax>du[komp]*10000 then inpmax:=du[komp]*10000;
  (*----- Vorbelegung fuer Thomas-Algorithmus -----*)
  for k:=2 to komp-1 do begin
    ztemp:=zem[k-1]+4*zem[k]+zem[k+1];
    if zem[k]<=0 then ztemp:=0;
    duplus:=sqrt(du[k]*du[k+1]);
    duminus:=sqrt(du[k]*du[k-1]);
    a[k]:=duminus/z[k-1]-kp[k-1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
    b[k]:=duplus/z[k]-kp[k+1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
    d[k]:=-duplus/z[k]-duminus/z[k-1]-kp[k]*4/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
    f[k]:=(z[k]+z[k-1])/dt/6*(-kp[k-1]*h_acorm[k-1]-4*kp[k]*h_acorm[k]
      -kp[k+1]*h_acorm[k+1]+(eim[k-1]+4*eim[k]+eim[k+1]+ztemp)*dt/2)+duminus-duplus;
  end;
  ztemp:=zem[komp-1]+5*zem[komp];
  if zem[komp]<=0 then ztemp:=0;
  duminus:=sqrt(du[komp]*du[komp-1]);
  a[komp]:=duminus/z[komp-1]-kp[komp-1]*(z[komp]+z[komp-1])/dt/6;
  d[komp]:=-duminus/z[komp-1]-kp[komp]*5/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
  f[komp]:=-inpmax+(z[komp]+z[komp-1])/dt/6*(-kp[komp-1]*h_acorm[komp-1]
    -5*kp[komp]*h_acorm[komp]+(eim[komp-1]+5*eim[komp]+ztemp)*dt/2)+duminus;
  ztemp:=zem[2]+4*zem[1];
  if zem[1]<=0 then ztemp:=0;
  duplus:=sqrt(du[1]*du[2]);
  duminus:=sqrt(du[0]*du[1]);
  b[1]:=duplus/z[1]-kp[2]*(z[1]+z[0])/dt/6;
  d[1]:=-duplus/z[1]-duminus/z[0]-kp[1]*4/6*(z[1]+z[0])/dt;
  f[1]:=(z[1]+z[0])/dt/6*(-kp[2]*h_acorm[2]-4*kp[1]*h_acorm[1]+(eim[2]+4*eim[1]+ztemp)
    *dt/2)-duplus+duminus-duminus/z[0]*hgwm;
  (*----- Thomas-Algorithmus -----*)
  tridiag(a,b,d,f,h_prem);

  (*----- Kapazitaet fuer Predictor / Kluftraum -----*)
  for k:=0 to komp do begin
    kapazitaet(h_acork[k],typk[k],kp[k]);
    durchlaessigkeit(k,h_acork[k],typk[k],du[k],kluftraum);
  end;

  (*----- Predictor / Kluftraum -----*)
  inpmax:=inp_ms;
  if inpmax>du[komp]*10000 then inpmax:=du[komp]*10000;
  (*----- Vorbelegung fuer Thomas-Algorithmus -----*)
  for k:=2 to komp-1 do begin

```

```

ztemp:=zek[k-1]+4*zek[k]+zek[k+1];
if zek[k]<=0 then ztemp:=0;
duplus:=sqrt(du[k]*du[k+1]);
duminus:=sqrt(du[k]*du[k-1]);
a[k]:=duminus/z[k-1]-kp[k-1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
b[k]:=duplus/z[k]-kp[k+1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
d[k]:=-duplus/z[k]-duminus/z[k-1]-kp[k]*4/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
f[k]:=(z[k]+z[k-1])/dt/6*(-kp[k-1]*h_acork[k-1]-4*kp[k]*h_acork[k]
-kp[k+1]*h_acork[k+1]+(eik[k-1]+4*eik[k]+eik[k+1]+ztemp)*dt/2)+duminus-duplus;
end;
ztemp:=zek[komp-1]+5*zek[komp];
if zek[komp]<=0 then ztemp:=0;
duminus:=sqrt(du[komp]*du[komp-1]);
a[komp]:=duminus/z[komp-1]-kp[komp-1]*(z[komp]+z[komp-1])/dt/6;
d[komp]:=-duminus/z[komp-1]-kp[komp]*5/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
f[komp]:=-inpmax+(z[komp]+z[komp-1])/dt/6*(-kp[komp-1]*h_acork[komp-1]
-5*kp[komp]*h_acork[komp]+(eik[komp-1]+5*eik[komp]+ztemp)*dt/2)+duminus;
ztemp:=zek[2]+4*zek[1];
if zek[1]<=0 then ztemp:=0;
duplus:=sqrt(du[1]*du[2]);
duminus:=sqrt(du[0]*du[1]);
b[1]:=duplus/z[1]-kp[2]*(z[1]+z[0])/dt/6;
d[1]:=-duplus/z[1]-duminus/z[0]-kp[1]*4/6*(z[1]+z[0])/dt;
f[1]:=(z[1]+z[0])/dt/6*(-kp[2]*h_acork[2]-4*kp[1]*h_acork[1]+(eik[2]+4*eik[1]+ztemp)
*dt/2)-duplus+duminus-duminus/z[0]*hgwk;
(*----- Thomas-Algorithmus -----*)
tridiag(a,b,d,f,h_prek);

(*----- Saugspannung darf nur bis zu einem festgelegten Grenzwert sinken. -----*)
for k:=1 to komp-5 do begin
  if h_prek[k]<grenz_k[k] then h_prek[k]:=grenz_k[k];
  if h_prem[k]<grenz_m[k] then h_prem[k]:=grenz_m[k];
end;

(*----- Saugspannung in den obersten Zellen darf nur bis zu einem festgelegten Grenzwert
sinken. Wir der Grenzwert unterschritten, so wird ein merker auf 1 gesetzt. Dies hat
zur Folge, dass der Input (in diesem Fall Evapotranspiration) auf Null gesetzt und
der Rechenschritt wiederholt wird (in diesem Fall predictor). -----*)
merker:=0;
for k:=komp-4 to komp do begin
  if inp_ms<0 then begin
    if h_prem[k]<grenz_m[k] then merker:=1;
    if h_prek[k]<grenz_k[k] then merker:=1;
  end else begin
    if h_prek[k]<grenz_k[k] then h_prek[k]:=grenz_k[k];
    if h_prem[k]<grenz_m[k] then h_prem[k]:=grenz_m[k];
  end;
end;

if merker=1 then begin
  inp_ms:=0;
  q[komp]:=0;
  predictor;
end;

(*----- Dynamische Zeitschrittwertensteuerung. Zwei Fehlerrechnungen:
1. Aenderung der Saugspannung darf nicht zu gross sein (dient vor allem dazu numerische
Oszillationen abzufangen). Festlegung einer Fehlerschranke notwendig.
2. Aenderung des Wassergehaltes darf nicht zu gross sein (kann ebenfalls bei numeri-
scher Oszillation auftreten). Zu starke Aenderungen des Wassergehaltes fuehren leichter
zu Abweichungen bei der Bilanzierung).
Sind die Fehler zu gross, so wird der Zeitschritt verringert und der
Rechenschritt wiederholt (in diesem Fall predictor). -----*)
eps:=0;
for k:=1 to komp do begin
  etemp:=200/abs(ln(abs(h_acorm[k])))*abs(ln(abs(h_prem[k]))-ln(abs(h_acorm[k])));
  if etemp>eps then eps:=etemp;
  etempk:=200/abs(ln(abs(h_acork[k])))*abs(ln(abs(h_prek[k]))-ln(abs(h_acork[k])));
  if etempk>eps then eps:=etempk;
end;

for k:=1 to komp do begin

```

```

    WgBerechnen(k,h_acorm[k],typm[k],wgvor,kluftraum);
    WgBerechnen(k,h_prem[k],typm[k],wgnach,kluftraum);
    if abs(wgvor-wgnach)>abs(wgvor/20) then eps:=maxfehler+1;
    WgBerechnen(k,h_acork[k],typk[k],wgvor,kluftraum);
    WgBerechnen(k,h_prek[k],typk[k],wgnach,kluftraum);
    if abs(wgvor-wgnach)>abs(wgvor/20) then eps:=maxfehler+1;
end;

if (eps>maxfehler) and (dt>dtmin) then begin
    dt:=dt/2;
    t:=t-dt;
    for k:=1 to sst do begin
        t_0[k]:=t_alt[k]-dt;
    end;
    predictor;
end;

end;

procedure corrector;
(*-----
   Berechnung der Corrector-Stufe (Predictor-Corrector-Methode nach Douglas-Jones)
   Aufgerufen von          : iteration, durchfluss_berechnen
   -----*)
var  a,b,d,f                : hcor;
      inpmax,wgvor,wgnach,duminus,duplus : real;
      ztemp,etempm,etempk   : real;
      hgwm,hgwk             : real;

begin
    austausch(h_prem,h_prek);
    (*----- Zuweisung des moeglichen Wassererntzuges, basierend auf Saugspannungen
      des vorherigen Zeitschrittes -----*)
    for k:=1 to komp do begin
        eim[k]:=e[k]-imb[k];
        eik[k]:=e[k]+imb[k];
    end;
    eim[1]:=eim[1]+qm[0]/d_z[1];
    eik[1]:=eik[1]+qk[0]/d_z[1];
    (*----- Druckverhaeltnisse im untersten Kompartiment:
      unges. Bed.: hgw:= z[0]/2,
      ges. Bed.: plus Erhoehung durch ges. Wassersaeule -----*)
    hgwk:=hgw;
    hgwm:=hgw;

    (*----- Kapazitaet fuer Corrector / Matrix -----*)
    for k:=0 to komp do begin
        kapazitaet(h_prem[k],typm[k],kp[k]);
        durchlaessigkeit(k,h_prem[k],typm[k],du[k],kluftraum);
    end;

    (*----- Corrector / Matrix -----*)
    inpmax:=inp_ms;
    if inpmax>du[komp]*10000 then inpmax:=du[komp]*10000;
    (*----- Vorbelegung fuer Thomas-Algorithmus -----*)
    for k:=2 to komp-1 do begin
        ztemp:=zem[k-1]+4*zem[k]+zem[k+1];
        if zem[k]<=0 then ztemp:=0;
        duplus:=sqrt(du[k]*du[k+1]);
        duminus:=sqrt(du[k]*du[k-1]);
        a[k]:=duminus/z[k-1]-kp[k-1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
        b[k]:=duplus/z[k]-kp[k+1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
        d[k]:=-duplus/z[k]-duminus/z[k-1]-kp[k]*4/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
        f[k]:=(z[k]+z[k-1])/dt/6*(-kp[k-1]*h_acorm[k-1]-4*kp[k]*h_acorm[k]-kp[k+1]
            *h_acorm[k+1]+(eim[k-1]+4*eim[k]+eim[k+1]+ztemp)*dt)+duplus/z[k]*(-h_acorm[k+1]
            +h_acorm[k])+duminus/z[k-1]*(h_acorm[k]-h_acorm[k-1])+2*(duminus-duplus);
    end;
    ztemp:=zem[komp-1]+5*zem[komp];
    if zem[komp]<=0 then ztemp:=0;
    duminus:=sqrt(du[komp]*du[komp-1]);

```

```

a[komp]:=dminusus/z[komp-1]-kp[komp-1]*1/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
d[komp]:=-dminusus/z[komp-1]-kp[komp]*5/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
f[komp]:=-2*inpmax+(z[komp]+z[komp-1])/dt/6*(-kp[komp-1]*h_acorm[komp-1]
-5*kp[komp]*h_acorm[komp]+(eim[komp-1]+5*eim[komp]+ztemp)*dt)
+dminusus/z[komp-1]*(h_acorm[komp]-h_acorm[komp-1])+2*dminusus;
ztemp:=zem[2]+4*zem[1];
if zem[1]<=0 then ztemp:=0;
duplus:=sqrt(du[1]*du[2]);
dminusus:=sqrt(du[0]*du[1]);
b[1]:=duplus/z[1]-kp[2]*1/6*(z[1]+z[0])/dt;
d[1]:=-duplus/z[1]-dminusus/z[0]-kp[1]*4/6*(z[1]+z[0])/dt;
f[1]:=(z[1]+z[0])/dt/6*(-kp[2]*h_acorm[2]-4*kp[1]*h_acorm[1]+(eim[2]+4*eim[1]+ztemp)*dt)
+duplus/z[1]*(h_acorm[1]-h_acorm[2])+dminusus/z[0]*(h_acorm[1]-hgw)
+2*(dminusus-duplus)-dminusus/z[0]*hgwm;
(*----- Thomas-Algorithmus -----*)
tridiag(a,b,d,f,h_corm);

(*----- Kapazitaet fuer / Kluftraum -----*)
for k:=0 to komp do begin
  kapazitaet(h_prek[k],typk[k],kp[k]);
  durchlaessigkeit(k,h_prek[k],typk[k],du[k],kluftraum);
end;

(*----- Corrector / Kluftraum -----*)
inpmax:=inp_ms;
if inpmax>du[komp]*10000 then inpmax:=du[komp]*10000;
(*----- Vorbelegung fuer Thomas-Algorithmus -----*)
for k:=2 to komp-1 do begin
  ztemp:=zek[k-1]+4*zek[k]+zek[k+1];
  if zek[k]<=0 then ztemp:=0;
  duplus:=sqrt(du[k]*du[k+1]);
  dminusus:=sqrt(du[k]*du[k-1]);
  a[k]:=dminusus/z[k-1]-kp[k-1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
  b[k]:=duplus/z[k]-kp[k+1]*1/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
  d[k]:=-duplus/z[k]-dminusus/z[k-1]-kp[k]*4/6*(z[k]+z[k-1])/dt;
  f[k]:=(z[k]+z[k-1])/dt/6*(-kp[k-1]*h_acork[k-1]-4*kp[k]*h_acork[k]-kp[k+1]
*h_acork[k+1]+(eik[k-1]+4*eik[k]+eik[k+1]+ztemp)*dt)+duplus/z[k]*(-h_acork[k+1]
+h_acork[k])+dminusus/z[k-1]*(h_acork[k]-h_acork[k-1])+2*(dminusus-duplus);
end;
ztemp:=zek[komp-1]+5*zek[komp];
if zek[komp]<=0 then ztemp:=0;
dminusus:=sqrt(du[komp]*du[komp-1]);
a[komp]:=dminusus/z[komp-1]-kp[komp-1]*1/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
d[komp]:=-dminusus/z[komp-1]-kp[komp]*5/6*(z[komp]+z[komp-1])/dt;
f[komp]:=-2*inpmax+(z[komp]+z[komp-1])/dt/6*(-kp[komp-1]*h_acork[komp-1]
-5*kp[komp]*h_acork[komp]+(eik[komp-1]+5*eik[komp]+ztemp)*dt)
+dminusus/z[komp-1]*(h_acork[komp]-h_acork[komp-1])+2*dminusus;
ztemp:=zek[2]+4*zek[1];
if zek[1]<=0 then ztemp:=0;
duplus:=sqrt(du[1]*du[2]);
dminusus:=sqrt(du[0]*du[1]);
b[1]:=duplus/z[1]-kp[2]*1/6*(z[1]+z[0])/dt;
d[1]:=-duplus/z[1]-dminusus/z[0]-kp[1]*4/6*(z[1]+z[0])/dt;
f[1]:=(z[1]+z[0])/dt/6*(-kp[2]*h_acork[2]-4*kp[1]*h_acork[1]+(eik[2]+4*eik[1]+ztemp)*dt)
+duplus/z[1]*(h_acork[1]-h_acork[2])+dminusus/z[0]*(h_acork[1]-hgw)
+2*(dminusus-duplus)-dminusus/z[0]*hgwk;
(*----- Thomas-Algorithmus -----*)
tridiag(a,b,d,f,h_cork);

(*----- Saugspannung darf nur bis zu einem festgelegten Grenzwert sinken. -----*)
for k:=1 to komp-5 do begin
  if h_cork[k]>grenz_k[k] then h_cork[k]:=grenz_k[k];
  if h_corm[k]<grenz_m[k] then h_corm[k]:=grenz_m[k];
end;

(*----- Saugspannung in den obersten Zellen darf nur bis zu einem festgelegten Grenzwert
sinken. Wir der Grenzwert unterschritten, so wird ein merker auf 1 gesetzt. Dies hat
zur Folge, dass der Input (in diesem Fall Evapotranspiration) auf Null gesetzt und
der Rechenschritt wiederholt wird (in diesem Fall predictor). -----*)
merker:=0;
for k:=komp-4 to komp do begin
  if inp_ms<0 then begin

```

```

        if h_corm[k]<grenz_m[k] then merker:=1;
        if h_cork[k]<grenz_k[k] then merker:=1;
    end else begin
        if h_cork[k]<grenz_k[k] then h_cork[k]:=grenz_k[k];
        if h_corm[k]<grenz_m[k] then h_corm[k]:=grenz_m[k];
    end;
end;

if merker=1 then begin
    inp_ms:=0;
    q[komp]:=0;
    predictor;
    corrector;
end;

(*----- Dynamische Zeitschrittweitensteuerung. Zwei Fehlerrechnungen:
    1. Aenderung der Saugspannung darf nicht zu gross sein (dient vor allem dazu numerische
    Oszillationen abzufangen). Festlegung einer Fehlerschranke notwendig.
    2. Aenderung des Wassergehaltes darf nicht zu gross sein (kann ebenfalls bei numeri-
    scher Oszillation auftreten). Zu starke Aenderungen des Wassergehaltes fuehren leichter
    zu Abweichungen bei der Bilanzierung).
    Sind die Fehler zu gross, so wird der Zeitschritt verringert und der
    Rechenschritt wiederholt (in diesem Fall predictor). -----*)
eps:=0;
for k:=1 to komp do begin
    etempm:=200/abs(ln(abs(h_acorm[k])))*abs(ln(abs(h_corm[k]))-ln(abs(h_acorm[k])));
    if etempm>eps then eps:=etempm;
    etempk:=200/abs(ln(abs(h_acork[k])))*abs(ln(abs(h_cork[k]))-ln(abs(h_acork[k])));
    if etempk>eps then eps:=etempk;
end;

for k:=1 to komp do begin
    WgBerechnen(k,h_acorm[k],typm[k],wgvor,kluftraum);
    WgBerechnen(k,h_corm[k],typm[k],wgnach,kluftraum);
    if abs(wgvor-wgnach)>abs(wgvor/20) then eps:=maxfehler+1;
    WgBerechnen(k,h_acork[k],typk[k],wgvor,kluftraum);
    WgBerechnen(k,h_cork[k],typk[k],wgnach,kluftraum);
    if abs(wgvor-wgnach)>abs(wgvor/20) then eps:=maxfehler+1;
end;

if (eps>maxfehler) and (dt>dtmin) then begin
    dt:=dt/2;
    t:=t-dt;
    for k:=1 to sst do begin
        t_0[k]:=t_alt[k]-dt;
    end;
    predictor;
    corrector;
end;

end;

procedure Durchfluss_Berechnen;
(*-----
    Berechnung der Durchfluesse in den obersten und untersten Zellen
    Aufgerufen von          : iteration
    -----*)
var  thetan,thetaa,a1          : real;
     dua,dup,temp,temp1       : real;
     dum0,duk0,dum1,duk1,qm0,qk0,qm1,qk1 : real;
     kpm0,kpk0,kpml,kpk1      : real;

begin
    (*----- Berechnung der Durchfluesse qk und qm am Uebergang zu gesaettigten
    Bereich (unterer Rand) -----*)
    durchlaessigkeit(1,h_prek[1],typk[1],dup,kluftraum);
    durchlaessigkeit(1,h_acork[1],typk[1],dua,kluftraum);
    durchlaessigkeit(1,h_cork[1],typk[1],du[1],kluftraum);
    temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[1]));
    durchlaessigkeit(0,hgw,typk[1],du[0],kluftraum);

```

```

temp:=du[0];
qk[0]:=(1+((h_acork[1]+4*h_prek[1]+h_cork[1])/6-hgw)/z[0])*sqrt(temp*temp1);

durchlaessigkeit(1,h_prem[1],typm[1],dup,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_acorm[1],typm[1],dua,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_corm[1],typm[1],du[1],kluftraum);
temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[1]));
durchlaessigkeit(0,hgw,typm[1],du[0],kluftraum);
temp:=du[0];
qm[0]:=(1+((h_acorm[1]+4*h_prem[1]+h_corm[1])/6-hgw)/z[0])*sqrt(temp*temp1);

(*----- Vorbereitung von Durchlaessigkeiten und Kapazitäten der obersten beiden Zellen fuer
      die Durchflussberechnungen an der Erdoberflaeche (oberer Rand). -----*)
durchlaessigkeit(komp,h_corm[komp],typm[komp],dum0,kluftraum);
durchlaessigkeit(komp,h_cork[komp],typk[komp],duk0,kluftraum);
du[komp]:=sqrt(dum0+duk0);
durchlaessigkeit(komp-1,h_corm[komp-1],typm[komp-1],dum1,kluftraum);
durchlaessigkeit(komp-1,h_cork[komp-1],typk[komp-1],duk1,kluftraum);
du[komp-1]:=sqrt(dum1+duk1);
kapazitaet(h_corm[komp],typm[komp],kpm0);
kapazitaet(h_cork[komp],typk[komp],kpk0);
kp[komp]:=sqrt(kpm0*kpk0);
kapazitaet(h_corm[komp-1],typm[komp-1],kpm1);
kapazitaet(h_cork[komp-1],typk[komp-1],kpk1);
kp[komp-1]:=sqrt(kpm1*kpk1);
(*----- Durchflussberechnung oberer Rand: ungesaettigt - Niederschlag -----*)
if (h_corm[komp]<=0) and (inp_ms>0) then begin

  durchlaessigkeit(1,h_prek[komp-1],typk[komp-1],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acork[komp-1],typk[komp-1],dua,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_cork[komp-1],typk[komp-1],du[komp-1],kluftraum);
  temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp-1]));
  durchlaessigkeit(1,h_prek[komp],typk[komp],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acork[komp],typk[komp],dua,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_cork[komp],typk[komp],du[komp],kluftraum);
  temp:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp]));
  qk1:=(1+((h_acork[komp]+4*h_prek[komp]+h_cork[komp])/6-(h_acork[komp-1]+4*h_prek[komp-1]
+h_cork[komp-1])/6)/z[komp-1])*sqrt(temp*temp1)*dt;
  wgberechnen(komp,h_cork[komp],typk[komp],thetan,kluftraum);
  wgberechnen(komp,h_acork[komp],typk[komp],thetaa,kluftraum);
  qk0:=-((thetaa-thetan)*d_z[komp]-qk1-q_zk[komp])/dt;

  durchlaessigkeit(1,h_prem[komp-1],typm[komp-1],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acorm[komp-1],typm[komp-1],dua,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_corm[komp-1],typm[komp-1],du[komp-1],kluftraum);
  temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp-1]));
  durchlaessigkeit(1,h_prem[komp],typm[komp],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acorm[komp],typm[komp],dua,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_corm[komp],typm[komp],du[komp],kluftraum);
  temp:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp]));
  qm1:=(1+((h_acorm[komp]+4*h_prem[komp]+h_corm[komp])/6-(h_acorm[komp-1]+4*h_prem[komp-1]
+h_corm[komp-1])/6)/z[komp-1])*sqrt(temp*temp1)*dt;
  wgberechnen(komp,h_corm[komp],typm[komp],thetan,kluftraum);
  wgberechnen(komp,h_acorm[komp],typm[komp],thetaa,kluftraum);
  qm0:=-((thetaa-thetan)*d_z[komp]-qm1-q_zm[komp])/dt;

  q[komp]:=(qm0+qk0)/2;
  if q[komp]<0 then q[komp]:=0;
  if inp_ms<=q[komp] then begin
    q[komp]:=inp_ms;
  end;
(*----- Ende ungesaettigt - Niederschlag -----*)

(*----- Durchflussberechnung oberer Rand: ungesaettigt - Verdunstung -----*)
end else if (h_corm[komp]<=0) and (inp_ms<0) then begin

  durchlaessigkeit(1,h_prek[komp-1],typk[komp-1],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acork[komp-1],typk[komp-1],dua,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_cork[komp-1],typk[komp-1],du[komp-1],kluftraum);
  temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp-1]));
  durchlaessigkeit(1,h_prek[komp],typk[komp],dup,kluftraum);
  durchlaessigkeit(1,h_acork[komp],typk[komp],dua,kluftraum);

```

```

durchlaessigkeit(1,h_cork[komp],typk[komp],du[komp],kluftraum);
temp:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp]));
qk1:=(1+((h_acork[komp]+4*h_prek[komp]+h_cork[komp])/6-(h_acork[komp-1]+4*h_prek[komp-1]
+h_cork[komp-1])/6)/z[komp-1])*sqrt(temp*temp1)*dt;
wgberechnen(komp,h_cork[komp],typk[komp],thetan,kluftraum);
wgberechnen(komp,h_acork[komp],typk[komp],thetaa,kluftraum);
qk0:=-(thetaa-thetan)*d_z[komp]-qk1-q_zk[komp])/dt;

durchlaessigkeit(1,h_prem[komp-1],typm[komp-1],dup,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_acorm[komp-1],typm[komp-1],dua,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_corm[komp-1],typm[komp-1],du[komp-1],kluftraum);
temp1:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp-1]));
durchlaessigkeit(1,h_prem[komp],typm[komp],dup,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_acorm[komp],typm[komp],dua,kluftraum);
durchlaessigkeit(1,h_corm[komp],typm[komp],du[komp],kluftraum);
temp:=exp(1/6*ln(dua*dup*dup*dup*dup*du[komp]));
qm1:=(1+((h_acorm[komp]+4*h_prem[komp]+h_corm[komp])/6-(h_acorm[komp-1]+4*h_prem[komp-1]
+h_corm[komp-1])/6)/z[komp-1])*sqrt(temp*temp1)*dt;
wgberechnen(komp,h_corm[komp],typm[komp],thetan,kluftraum);
wgberechnen(komp,h_acorm[komp],typm[komp],thetaa,kluftraum);
qm0:=-(thetaa-thetan)*d_z[komp]-qm1-q_zm[komp])/dt;

q[komp]:=(qm0+qk0)/2;
if q[komp]>=0 then q[komp]:=0;
if inp_ms>q[komp] then begin
  q[komp]:=inp_ms;
end;
(*----- Ende ungesaettigt - Verdunstung -----*)

(*----- Durchflussberechnung oberer Rand: gesaettigt - Niederschlag -----*)
end else if (h_corm[komp]>0) and (inp_ms>0) then begin

  a1:=inp_ms*dt+h_corm[komp];
  if a1>0.00 then begin (*Ueberstau erlaubt?*)
    if n2<=5 then begin
      n2:=n2+1;
      inp_ms:=inp_ms*0.5;
      predictor;
      corrector;
      Durchfluss_Berechnen;
    end else q[komp]:=inp_ms;
  end else if a1<=0.00 then begin
    q[komp]:=(1+(a1)/(d_z[komp]/2))*du[komp];
  end;
(*----- Ende gesaettigt - Niederschlag -----*)

(*----- Durchflussberechnung oberer Rand: gesaettigt - Verdunstung -----*)
end else if (h_corm[komp]>0) and (inp_ms<0) then begin

  q[komp]:=inp_ms;
(*----- Ende gesaettigt - Verdunstung -----*)

end;

if inp_ms=0 then q[komp]:=0;

end;

procedure Gesamtdurchfluss;
(*-----
  Auffaddition der verschiedenen Zu- und Abflusskomponenten
  Aufgerufen von          : iteration
-----*)
var temp                  : real;

begin
  if q[komp]>=0 then begin
    inf:=inf+q[komp]*dt;
    if input_ms>0 then begin
      abfl:=(input_ms-q[komp])*dt;

```

```

    end else abfl:=0;
    abf:=abf+abfl;
end;

if inp_ms<=0 then begin
    temp:=(e[komp-1]*d_z[komp-1]+e[komp-2]*d_z[komp-2]+e[komp-3]*
    d_z[komp-3]+e[komp-4]*d_z[komp-4])*dt;
    eva:=eva+(nie/(86400*1000)-q[komp])*dt+temp;
    evabil:=evabil+q[komp]*dt-temp;
end else begin
    temp:=(e[komp-1]*d_z[komp-1]+e[komp-2]*d_z[komp-2]+e[komp-3]*
    d_z[komp-3]+e[komp-4]*d_z[komp-4])*dt;
    eva:=eva+(0.5*vhaud/(86400*1000))*dt+temp;
    evabil:=evabil-temp;
end;

if qm[0]>=0 then begin
    neb:=neb+qm[0]*dt;
end else begin
    kap:=kap+qm[0]*dt;
end;

if qk[0]>=0 then begin
    neb:=neb+qk[0]*dt;
end else begin
    kap:=kap+qk[0]*dt;
end;

end;

procedure iteration;
(*-----
    Steuerung der Iteration und Aufruf der Unterprogramme.
    Aufgerufen von          : hauptteil
-----*)
begin
    minfehler:=minfehler_1;
    maxfehler:=maxfehler_1;
(*---- Vorbelegung - u.a. wird der Zeitschritt auf den Minimalwert gesetzt. ----*)
    dt:=dtmin;
    t:=0;
    merker:=0;
    for k:=1 to komp do begin
        t_0[k]:=0;
    end;

(*----- Solange bis 86400 Sek = 1 Tag -----*)
    while t<86400 do begin
        n2:=0;
        abfl:=0;
        inp_ms:=input_ms;
        t:=t+dt;

        predictor;
        corrector;
        Durchfluss_Berechnen;
        Gesamtdurchfluss;

(*----- Berechnete Saugspannung wird auf die Saugspannung des vorherigen
        Zeitschritts uebertragen (h_acorm = h_corm alt). -----*)
        for k:=1 to komp do begin
            h_acorm[k]:=h_corm[k];
            h_acork[k]:=h_cork[k];
        end;

(*----- Berechnung der Summen der Zwischenabfluesse fuer die Bilanzierung. -----*)
        zwi_abflk:=0;
        zwi_abflm:=0;
        for k:=3 to komp do begin
            zwi_abflm:=zwi_abflm+q_zm[k];

```

```

    q_zm_tag[k]:=q_zm_tag[k]+q_zm[k];
    zwi_abflk:=zwi_abflk+q_zk[k];
    q_zk_tag[k]:=q_zk_tag[k]+q_zk[k];
end;

for k:=1 to 2 do begin
    neb:=neb+q_zm[k]+q_zk[k];
end;

zwabm:=zwabm+zwi_abflm;
zwabk:=zwabk+zwi_abflk;

(*----- Falls der errechnete Fehler (s. Proz. predictor und corrector) kleiner ist, als die
    untere Fehler schranke, wird der Zeitschritt vergroessert. -----*)
    if eps<minfehler then dt:=dt+dt;
    if dt>dtmax then dt:=dtmax;
    if dt<dtmin then dt:=dtmin;
    if t+dt>86400 then dt:=86400-t;
end;

end;

procedure Hauptteil;
(*-----
    Einlesen der der Startbedingungen
    Initialisierung
    Einlesen der Niederschlags- und Verdunstungswerte
    Fehler- und Bilanzrechnung
    Ergebnisausgabe
    Aufgerufen von                : Hauptprogramm
-----*)
var dummy,name                : string[12];
    dummy1                    : string[5];
    dummy2                    : string[8];
    rnd_dname                 : string[20];
    zwidatei,tagdatei        : text;
    profildatei,profildatei2  : text;
    ini_datei,awg_datei,zwi_datei : text;
    imb_datei,alg_datei,rnd_datei : text;
    tagbil,hoehe,wurzeltiefe   : real;
    q_einheit                 : array [1..10] of real;
    teil                      : array [1..5] of integer;
    pl,neutag,s,p,t,boden     : integer;
    ausgabeschritt           : integer;

begin
(*----- Festlegung der Dateinamen. -----*)
    name:='datei';

    assign(ini_datei,name+'.ini');
    assign(awg_datei,name+'.awg');
    assign(zwi_datei,name+'.zwi');
    assign(imb_datei,name+'.imb');
    assign(alg_datei,name+'.alg');
    assign(tagdatei,name+'.twerte');
    assign(profildatei,name+'.profil');
    assign(profildatei2,name+'.profil2');
    assign(zwidatei,name+'.zwiabf');

(*----- Einlesen der Initialisierungsdatei (ini-Datei). -----*)
    reset(ini_datei);
    readln(ini_datei,dummy,komp);
    readln(ini_datei,dummy,boden);
    readln(ini_datei,dummy,wurzeltiefe);
    readln(ini_datei,dummy,gws);
    readln(ini_datei,dummy,zeit_max);
    readln(ini_datei,dummy,dtmin);
    readln(ini_datei,dummy,dtmax);
    readln(ini_datei,dummy,minfehler_1);
    readln(ini_datei,dummy,maxfehler_1);

```

```

readln(ini_datei,dummy,rnd_dname);
readln(ini_datei,dummy,ausgabeschritt);
close(ini_datei);
assign(rnd_datei,rnd_dname);

(*----- Einlesen der Vorgaben fuer die Zwischenabfluesse: zwi-Datei. -----*)
reset(zwi_datei);
readln(zwi_datei);
for k:=1 to komp do begin
  readln(zwi_datei,k,z_grad_m[k],z_grad_k[k],z_grenz_m[k],z_grenz_k[k]);
end;
close(zwi_datei);

(*----- Einlesen der Vorgaben fuer den Austausch Kluftraum - Matrix: imb-Datei. -----*)
reset(imb_datei);
readln(imb_datei);
for k:=1 to komp do begin
  readln(imb_datei,k,atf_m[k],atf_k[k],at1_u_m[k],at1_g_m[k],at1_u_k[k],at1_g_k[k]);
end;
close(imb_datei);

(*----- Einlesen allgemeiner Vorgaben: alg-Datei. -----*)
reset(alg_datei);
readln(alg_datei);
for k:=1 to komp do begin
  readln(alg_datei,k,grenz_m[k],grenz_k[k],klab[k]);
end;
close(alg_datei);

(*----- Einlesend der Anfangswerte fuer das Profil, sowie Boden-Gesteinstyp-
Kennziffern und Maechtigkeit der Zellen: awg-Datei. -----*)
reset(awg_datei);
readln(awg_datei);
for k:=1 to komp do begin
  readln(awg_datei,k,typk[k],typk[k],d_z[k],h_acorm[k],h_acork[k]);
end;
readln(awg_datei,dummy2,tag);
readln(awg_datei,dummy2,sumnie);
readln(awg_datei,dummy2,wgstart);
readln(awg_datei,dummy2,wgende);
readln(awg_datei,dummy2,g_evabil);
readln(awg_datei,dummy2,g_inf);
readln(awg_datei,dummy2,g_eva);
readln(awg_datei,dummy2,g_neb);
readln(awg_datei,dummy2,g_abf);
readln(awg_datei,dummy2,g_kap);
readln(awg_datei,dummy2,g_zwab);
readln(awg_datei,dummy2,bilanzg);
close(awg_datei);

(*----- Anlegen der Datei fuer die Ausgabe der Saugspannungen im Profil: profil-Datei -----*)
rewrite(profildatei2);
if (tag=0) then begin
  for k:=1 to komp do begin
    writeln(profildatei2,k:4,' ',typk[k]:4,' ',typk[k]:4,' ',d_z[k]:7:3,' ',
      h_acorm[k],' ',h_acork[k]);
  end;
  writeln(profildatei2,'Tag      ',tag);
  writeln(profildatei2,'Niesum  ',sumnie);
  writeln(profildatei2,'WgStart ',wgstart);
  writeln(profildatei2,'WgEnde  ',wgende);
  writeln(profildatei2,'G_Evabi ',g_evabil);
  writeln(profildatei2,'G_Inf   ',g_inf);
  writeln(profildatei2,'G_Eva   ',g_eva);
  writeln(profildatei2,'G_Neb   ',g_neb);
  writeln(profildatei2,'G_Abf   ',g_abf);
  writeln(profildatei2,'G_Kap   ',g_kap);
  writeln(profildatei2,'G_Zwab  ',g_zwab);
  writeln(profildatei2,'Bilanz  ',bilanzg);
end;

(*----- Anlegen der Datei fuer die Ausgabe der Tageswerte: twerte-Datei -----*)

```

```

rewrite(tagdatei);
write(tagdatei,' Tag   Nied   ETpot   ETakt   Inf       Abf   ');
writeln(tagdatei,'      Zwiabf   Neub       WG       Bil');
close(tagdatei);

(*----- Anlegen der Datei fuer die Ausgabe der Zwischenabfluesse: zwiabf-Datei -----*)
rewrite(zwibasei);
writeln(zwibasei,' Tag   ');
close(zwibasei);

sst:=komp-boden;
typm[0]:=typm[1];typk[0]:=typk[1];

(*----- Fuer die spaetere Bilanzierung werden die Zellen der einzelnen stratigraphischen
Einheiten zusammengefasst (teil[t]). Dazu muessen die Typkennzahlen der strat.
Einheiten von strat. hoeher nach strat. tiefer absteigend sortiert sein
(z.B. so = 1, suG = 7). -----*)
t:=1; p:=1; pl:=1;
for k:=1 to komp do begin
  if typm[k]<>typm[k-1] then begin
    t:=t+1;
    teil[t]:=k;
  end;
end;
teil[t+1]:=komp;

(*----- Berechnung der Abstaende zwischen den Knoten aller Zellen -----*)
for k:=1 to komp-1 do begin
  z[k]:=(d_z[k]+d_z[k+1])/2;
end;
z[0]:=d_z[1];
z[komp]:=d_z[komp]/2;

(*----- Wenn die Berechnung nicht mit Tag 0 anfaengt (z.B. Fortsetzung nach Unterbrechung,
dann zuerst alle Tageswerte bis zum Beginn ueberspringen. -----*)
reset(rnd_datei);
if tag>0 then begin
  for k:=1 to tag do begin
    readln(rnd_datei,dummy1,nie,vhaud);
  end;
end;

(*----- Abfluss, Austausch, ET-Werte auf 0 setzen. -----*)
qm[0]:=0; qk[0]:=0;
for k:=1 to komp do begin
  zem[k]:=0;
  zek[k]:=0;
  imb[k]:=0;
  e[k]:=0;
end;

(*----- Ggf. Starttag und alte Bilanz uebernehmen. -----*)
neutag:=tag;
bilanzg_alt:=bilanzg;

(*----- Werte fuer betabc (wird fuer Durchlaessigkeitsberechnungen des
Kluftraumes benoetigt) werden vorab berechnet, damit die Werte
nicht bei jedem Iterationsschritt berechnet werden muessen. -----*)
for k:=1 to sst do begin
  betabc_berech(typk[k],betabc1[k],betabc2[k]);
end;

(*----- Anzahl der Zellen wird berechnet, die zur Abdeckung der vorgegebenen Wurzeltiefe
benoetigt werden. Anzahl ist abhaengig von der Hoehe der Zellen. -----*)
hoehe:=d_z[komp];
zaehler:=komp;
while hoehe<wurzeltiefe do begin
  zaehler:=zaehler-1;
  hoehe:=hoehe+d_z[zaehler];
end;

(*----- Druck unter der untersten berechneten Zelle wird auf die halbe Hoehe

```

```

        dieser Zelle festgesetzt (unterer Rand). -----*)
    hgw:=z[0]/2;
(*-----*)
(*----- B e g i n n   T a g e s s c h r i t t e -----*)
(*-----*)
(*----- Tagesschleife bis max. Anzahl der zu berechnenden Tage (zeit_max)-----*)
    for tag:=tag+1 to zeit_max do begin
(*----- Einlesen der Tageswerte aus der rnd-Datei. -----*)
        readln(rnd_datei,dummy1,nie,vhaud);
        sumnie:=sumnie+nie;
(*----- neuer Input abzgl. der 50% Verd. -----*)
        input_ms:=nie/(86400*1000)-0.5*vhaud/(86400*1000);
        for k:=zaehler to komp-1 do begin
            te[k]:=(d_z[k]/(hoehe-d_z[komp])*0.5)*vhaud/(86400*1000)/d_z[k]; (*1/2*)
        end;
(*----- Einiges auf 0 setzen. -----*)
        neb:=0; eva:=0; inf:=0; kap:=0; abf:=0; zwabm:=0; evabil:=0; zwabk:=0;
        for k:=1 to komp do begin
            q_zm_tag[k]:=0;
            q_zk_tag[k]:=0;
            t_0[k]:=0;
            para[k]:=0;
        end;
(*----- B e g i n n   I t e r a t i o n -----*)
        iteration;
(*----- E n d e   I t e r a t i o n -----*)
(*----- Einige Gesamtwerte berechnen (jeweils ueber den Berechnungszeitraum aufsummiert). -----*)
        g_evabil:=g_evabil+evabil; g_zwab:=g_zwab+zwabm+zwabk; g_neb:=g_neb+neb;
        g_eva:=g_eva+eva; g_inf:=g_inf+inf; g_kap:=g_kap+kap; g_abf:=g_abf+abf;
        tagbil:=wgende;
        wgende:=0;
(*----- Fuer die Bilanzrechnungen werden die Gesamtwassergehalte benoetigt. -----*)
        for k:=1 to sst do begin
            WgBerechnen(k,h_corm[k],typm[k],theta[k],kluftraum);
            wgende:=wgende+theta[k]*d_z[k]*1000;
            WgBerechnen(k,h_cork[k],typk[k],theta[k],kluftraum);
            wgende:=wgende+theta[k]*d_z[k]*1000;
        end;
        for k:=sst+1 to komp do begin
            WgBerechnen(k,h_corm[k],typm[k],theta[k],kluftraum);
            wgende:=wgende+0.5*theta[k]*d_z[k]*1000;
            WgBerechnen(k,h_cork[k],typk[k],theta[k],kluftraum);
            wgende:=wgende+0.5*theta[k]*d_z[k]*1000;
        end;
(*----- Gesamtbilanz -----*)
        bilanzg:=wgstart-wgende+(g_kap+g_inf+g_evabil-g_neb-g_zwab)*1000;
(*----- Tagesbilanz -----*)
        tagbil:=tagbil-wgende+(kap+inf+evabil-neb-zwabm-zwabk)*1000;
(*----- Bildschirmausgabe zur Kontrolle der Berechnungen. -----*)
        writeln('Bilanz: ',tagbil:8:5,' ',bilanzg:9:5,' Zeitschritt : ',tag);

(*----- Verteilung der Saugspannungen im Profil und weitere Werte, die fuer
Neustart benoetigt werden, werden fuer jeden Tagesschritt zwischen-
gespeichert (wichtig bei ungewolltem Programmabbruch). -----*)
        if (tag=neutag+1*p) then begin
            rewrite(profildatei);
            for k:=1 to komp do begin
                writeln(profildatei,k:4,' ',typm[k]:4,' ',typk[k]:4,' ',d_z[k]:7:3,' ',
                    h_corm[k],' ',h_cork[k]);
            end;
            writeln(profildatei,'Tag : ',tag);
            writeln(profildatei,'Niesum : ',sumnie);
            writeln(profildatei,'WgStart: ',wgstart);
            writeln(profildatei,'WgEnde : ',wgende);
            writeln(profildatei,'G_Evabi: ',g_evabil);
            writeln(profildatei,'G_Inf : ',g_inf);
            writeln(profildatei,'G_Eva : ',g_eva);
            writeln(profildatei,'G_Neb : ',g_neb);
            writeln(profildatei,'G_Abf : ',g_abf);
            writeln(profildatei,'G_Kap : ',g_kap);
            writeln(profildatei,'G_Zwab : ',g_zwab);
            writeln(profildatei,'Bilanz : ',bilanzg);
        end;

```

```

        close(profildatei);
        p:=p+1;
    end;

(*----- Die gleichen Werte koennen in festzulegenden Zeitabstaenden (ausgabe-schritt) gespeichert werden (z.B. 91 Tage fuer 1/4-Jahres-Speicherung): profil-Datei. -----*)
    if (tag=neutag+ausgabeschritt*p1) then begin
        for k:=1 to komp do begin
            writeln(profildatei2,k:4,' ',typm[k]:4,' ',typk[k]:4,' ',d_z[k]:7:3,' ',
                h_corm[k],' ',h_cork[k]);
        end;
        writeln(profildatei2,'Tag      :      ',tag);
        writeln(profildatei2,'Niesum  : ',sumnie);
        writeln(profildatei2,'WgStart: ',wgstart);
        writeln(profildatei2,'WgEnde : ',wgende);
        writeln(profildatei2,'G_Evabi: ',g_evabil);
        writeln(profildatei2,'G_Inf  : ',g_inf);
        writeln(profildatei2,'G_Eva  : ',g_eva);
        writeln(profildatei2,'G_Neb  : ',g_neb);
        writeln(profildatei2,'G_Abf  : ',g_abf);
        writeln(profildatei2,'G_Kap  : ',g_kap);
        writeln(profildatei2,'G_Zwab : ',g_zwab);
        writeln(profildatei2,'Bilanz : ',bilanzg);
        pl:=pl+1;
    end;

(*----- Berechnung der gesamten Zwischenabfluesse fuer jede Gesteinseinheit. -----*)
    for s:=1 to t do begin
        q_einheit[s]:=0;
    end;
    s:=1;
    for k:=1 to komp do begin
        if typm[k]=typm[k-1] then begin
            q_einheit[s]:=q_zm_tag[k]+q_zk_tag[k]+q_einheit[s];
        end else begin
            s:=s+1;
            q_einheit[s]:=q_zm_tag[k]+q_zk_tag[k];
        end;
    end;

(*----- Schreiben der Datei mit den Zwischenabfluessen. -----*)
    seekupdate(zwdatei,0);
    while not eof(zwdatei) do begin
        readln(zwdatei)
    end;
    write(zwdatei,tag:5);
    for s:=1 to t do begin
        write(zwdatei,q_einheit[s]*1000);
    end;
    writeln(zwdatei);
    close(zwdatei);

(*----- Schreiben der Datei mit den Tageswerten. -----*)
    seekupdate(tagdatei,0);
    while not eof(tagdatei) do begin
        readln(tagdatei)
    end;
    writeln(tagdatei,tag:4,' ',nie:5:2,' ',vhaud:5:2,' ',eva*1000:8:5,' ',
        inf*1000:8:5,' ',abf*1000:8:5,' ',(zwabm+zwabk)*1000:10:7,' ',
        neb*1000:9:7,' ',kap*1000:9:7,' ',wgende:8:5,' ',
        bilanzg:8:5,' ',tagbil:8:5);
    close(tagdatei);

(*----- Wenn der Bilanzfehler zu gross ist - Abbruch des Programms. -----*)
    if (abs(bilanzg-bilanzg_alt)>10) and (tag>1000) then tag:=4018;

(*----- Bilanzergebnis fuer naechsten Zeitschritt sichern. -----*)
    bilanzg_alt:=bilanzg;

(*----- Und zurueck zu einem neuen Tag, oder Ende wenn zeit_max erreicht. -----*)
end;

```

```

close(profildatei2);

(*-----*)
(*----- Ende Tagesschritte -----*)
(*-----*)
end;

begin
  hauptteil;
  writeln('Ende');
end.

unit durchlaess;

interface

uses dumatrix, dukluft;

var kluftraum          : real;
    betabc1, betabc2   : array [0..200] of real;

procedure durchlaessigkeit(j:integer;hh:real;typ:integer;var dul,kluftraum:real);

implementation

procedure durchlaessigkeit(j:integer;hh:real;typ:integer;var dul,kluftraum:real);
(*-----*)
  Zuweisung der Parameter fuer Berechnungen des Durchlaessigkeit fuer Matrix und Kluftraum.
  Aufgerufen von          : zwischenabfluss,imbibition,imbibition2,predictor,
                           corrector, durchfluss_berechnen
  Uebernahme: hh          : Saugspannung
                        typ : Typkennung (Matrix und Kluftraum)
  Uebergabe : dul         : unges. Durchlaessigkeit (mit du_matrix, du_matrix2,
                        du_kluft berechnet)
                        kluftraum : Kluftraum fuer uebergeordnete Prozeduren
(*-----*)
begin
  if typ=0 then du_matrix(4.87,1.77,3.2e-4,0,hh,kluftraum,dul);      (*Boden bst*)
  if typ=1 then du_matrix(1.33,1.35,2.5e-5,0,hh,kluftraum,dul);    (*Boden so*)
  if typ=3 then du_matrix(4.79,1.77,8.06e-4,0,hh,kluftraum,dul);  (*Boden smh*)
  if typ=4 then du_matrix(8.08,1.36,2.37e-5,0,hh,kluftraum,dul);  (*Boden smd*)
  if typ=5 then du_matrix(4.37,1.65,5.35e-4,0,hh,kluftraum,dul);  (*Boden smv*)
  if typ=6 then du_matrix(2.89,1.66,4.8e-4,0,hh,kluftraum,dul);   (*Boden sus*)
  if typ=7 then du_matrix(1.62,1.51,8.95e-5,0,hh,kluftraum,dul);  (*Boden sug*)

  if typ=11 then du_matrix(0.09,4.252,1.2e-9,0.0012,hh,kluftraum,dul); (*so2_t_se*)
  if typ=12 then du_matrix(0.09,4.252,1.2e-9,0.0009,hh,kluftraum,dul); (*so2_t_nw*)
  if typ=13 then du_matrix(0.09,4.252,1.2e-9,0.0026,hh,kluftraum,dul); (*so2_h_se*)
  if typ=14 then du_matrix(0.09,4.252,1.2e-9,0.0021,hh,kluftraum,dul); (*so2_h_nw*)
  if typ=18 then du_matrix(1.33,1.35,2.5e-5,0.0026,hh,kluftraum,dul); (*so2_h_se*)
  if typ=19 then du_matrix(1.33,1.35,2.5e-5,0.0021,hh,kluftraum,dul); (*so2_h_nw*)
  if typ=111 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.4e-5,89,hh,dul); (*so2_t_se*)
  if typ=121 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],7.4e-6,17,hh,dul); (*so2_t_nw*)
  if typ=131 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,59,hh,dul); (*so2_h_se*)
  if typ=141 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,17,hh,dul); (*so2_h_nw*)

  if typ=21 then du_matrix(0.152,1.17,9e-10,0.0026,hh,kluftraum,dul); (*so1_h_se*)
  if typ=22 then du_matrix(0.152,1.17,9e-10,0.0021,hh,kluftraum,dul); (*so1_h_nw*)
  if typ=211 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,59,hh,dul); (*so1_h_se*)
  if typ=221 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,17,hh,dul); (*so1_h_nw*)

  if typ=31 then du_matrix(0.511,2.25,1.0e-9,0.0009,hh,kluftraum,dul); (*smh_t_se*)
  if typ=32 then du_matrix(0.511,2.25,1.0e-9,0.0009,hh,kluftraum,dul); (*smh_t_nw*)
  if typ=33 then du_matrix(0.511,2.25,1.0e-9,0.0020,hh,kluftraum,dul); (*smh_h_se*)
  if typ=34 then du_matrix(0.511,2.25,1.0e-9,0.0024,hh,kluftraum,dul); (*smh_h_nw*)
  if typ=38 then du_matrix(4.79,1.77,8.06e-4,0.0020,hh,kluftraum,dul); (*smh_h_se Kluft*)
  if typ=39 then du_matrix(4.79,1.77,8.06e-4,0.0024,hh,kluftraum,dul); (*smh_h_nw Kluft*)
  if typ=311 then du_kluft(0.45,0.45,betabc1[j],betabc2[j],8.2e-6,93,hh,dul); (*smh_t_se*)
  if typ=321 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],4.3e-6,70,hh,dul); (*smh_t_nw*)
  if typ=331 then du_kluft(0.45,0.45,betabc1[j],betabc2[j],8.3e-5,91,hh,dul); (*smh_h_se*)

```

```

if typ=341 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],8.5e-5,76,hh,dul); (*smh_h_nw*)

if typ=41 then du_matrix(0.309,1.4,2.3e-8,0.0012,hh,kluftraum,dul); (*smd_t_se*)
if typ=42 then du_matrix(0.309,1.4,2.3e-8,0.0011,hh,kluftraum,dul); (*smd_t_nw*)
if typ=43 then du_matrix(0.309,1.4,2.3e-8,0.0023,hh,kluftraum,dul); (*smd_h_se*)
if typ=44 then du_matrix(0.309,1.4,2.3e-8,0.0027,hh,kluftraum,dul); (*smd_h_nw*)
if typ=48 then du_matrix2(8.08,1.36,2.37e-5,0.0023,hh,kluftraum,dul); (*smd_h_se Kluft*)
if typ=49 then du_matrix2(8.08,1.36,2.37e-5,0.0027,hh,kluftraum,dul); (*smd_h_nw Kluft*)
if typ=411 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.2e-5,87,hh,dul); (*smd_t_se*)
if typ=421 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],6.7e-6,63,hh,dul); (*smd_t_nw*)
if typ=431 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.1e-4,94,hh,dul); (*smd_h_se*)
if typ=441 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,62,hh,dul); (*smd_h_nw*)

if typ=51 then du_matrix(0.638,2.439,2.1e-9,0.0012,hh,kluftraum,dul); (*smv_t_se*)
if typ=52 then du_matrix(0.638,2.439,2.1e-9,0.0011,hh,kluftraum,dul); (*smv_t_nw*)
if typ=53 then du_matrix(0.638,2.439,2.1e-9,0.0023,hh,kluftraum,dul); (*smv_h_se*)
if typ=54 then du_matrix(0.638,2.439,2.1e-9,0.0027,hh,kluftraum,dul); (*smv_h_nw*)
if typ=58 then du_matrix2(4.37,1.65,5.35e-4,0.0023,hh,kluftraum,dul); (*smv_h_se*)
if typ=59 then du_matrix2(4.37,1.65,5.35e-4,0.0027,hh,kluftraum,dul); (*smv_h_nw*)
if typ=511 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.2e-5,87,hh,dul); (*smv_t_se*)
if typ=521 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],6.7e-6,63,hh,dul); (*smv_t_nw*)
if typ=531 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.1e-4,94,hh,dul); (*smv_h_se*)
if typ=541 then du_kluft(0.3,0.5,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,62,hh,dul); (*smv_h_nw*)

if typ=61 then du_matrix(0.295,3.458,1.2e-8,0.0013,hh,kluftraum,dul); (*sus_t_se*)
if typ=62 then du_matrix(0.295,3.458,1.2e-8,0.0010,hh,kluftraum,dul); (*sus_t_nw*)
if typ=63 then du_matrix(0.295,3.458,1.2e-8,0.0026,hh,kluftraum,dul); (*sus_h_se*)
if typ=64 then du_matrix(0.295,3.458,1.2e-8,0.0021,hh,kluftraum,dul); (*sus_h_nw*)
if typ=68 then du_matrix2(2.89,1.66,4.8e-4,0.0026,hh,kluftraum,dul); (*sus_h_se*)
if typ=69 then du_matrix2(2.89,1.66,4.8e-4,0.0021,hh,kluftraum,dul); (*sus_h_nw*)
if typ=611 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],2e-5,92,hh,dul); (*sus_t_se*)
if typ=621 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],9.5e-6,17,hh,dul); (*sus_t_nw*)
if typ=631 then du_kluft(0.4,0.4,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,59,hh,dul); (*sus_h_se*)
if typ=641 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],1.0e-4,17,hh,dul); (*sus_h_nw*)

if typ=71 then du_matrix(0.249,2.212,6e-9,0.0009,hh,kluftraum,dul); (*sug_t_se*)
if typ=72 then du_matrix(0.249,2.212,6e-9,0.0007,hh,kluftraum,dul); (*sug_t_nw*)
if typ=73 then du_matrix(0.249,2.212,6e-9,0.0022,hh,kluftraum,dul); (*sug_h_se*)
if typ=74 then du_matrix(0.249,2.212,6e-9,0.0019,hh,kluftraum,dul); (*sug_h_nw*)
if typ=78 then du_matrix2(1.62,1.51,8.95e-5,0.0022,hh,kluftraum,dul); (*sug_h_se*)
if typ=79 then du_matrix2(1.62,1.51,8.95e-5,0.0019,hh,kluftraum,dul); (*sug_h_nw*)
if typ=711 then du_kluft(0.45,0.45,betabc1[j],betabc2[j],8.2e-6,93,hh,dul); (*sug_t_se*)
if typ=721 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],4.2e-6,15,hh,dul); (*sug_t_nw*)
if typ=731 then du_kluft(0.45,0.45,betabc1[j],betabc2[j],8.3e-5,59,hh,dul); (*sug_h_se*)
if typ=741 then du_kluft(1.0,0.35,betabc1[j],betabc2[j],8.5e-5,7,hh,dul); (*sug_h_nw*)

end;

end.

unit dumatrix;

interface

procedure du_matrix(a,n,kg,nkl,h:real;var kluftraum,dum:real);
procedure du_matrix2(a,n,kg,nkl,h:real;var kluftraum,dum:real);

implementation

procedure du_matrix(a,n,kg,nkl,h:real;var kluftraum,dum:real);
(*-----
  Berechnung der ungesaettigten Matrixdruchlaessigkeit nach van Genuchten, Glchg. 9.
  Aufgerufen von          : durchlaessigkeit
  Uebernahme: a          : vG-Parameter alpha
                    n      : vG-Parameter n
                    kg     : ges. Matrixdurchlaessigkeit
                    nkl    : Kluftraumanteil
                    h      : Saugspannung
  Uebergabe : kluftraum  : Kluftraum fuer untergeordnete Prozeduren
                    dum   : unges. Matrixdurchlaessigkeit
  -----*)

```

```

var m,z                : real;

begin
  kluftraum:=nkl;
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    z:=1+exp(n*ln(-a*h));
    dum:=(1-nkl)*(sqr(1-exp((n-1)*ln(-a*h))*exp(-m*ln(z)))/(exp(m/2*ln(z))))*kg);
  end else dum:=kg*(1-nkl);
end;

procedure du_matrix2(a,n,kg,nkl,h:real;var kluftraum,dum:real);
(*-----
  Wie du_matrix, allerdings fuer die Fuellung der Kluefte in den obersten Metern. Wird also
  mit den Bodenparametern gerechnet.
  Aufgerufen von          : durchlaessigkeit
  Uebernahme: a           : vG-Parameter alpha
                    n       : vG-Parameter n
                    kg       : ges. Matrixdurchlaessigkeit
                    nkl      : Kluftraumanteil
                    h        : Saugspannung
  Uebergabe : kluftraum   : Kluftraum fuer untergeordnete Prozeduren
                    dum     : unges. Matrixdurchlaessigkeit
-----*)
var m,z                : real;

begin
  kluftraum:=nkl;
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    z:=1+exp(n*ln(-a*h));
    dum:=(nkl)*(sqr(1-exp((n-1)*ln(-a*h))*exp(-m*ln(z)))/(exp(m/2*ln(z))))*kg);
  end else dum:=kg*(nkl);
end;

end.

unit dukluft;

interface

procedure du_kluft(klab_1,klab_2,bb_1,bb_2,kklges:real;prozent:integer;h:real;var duk:real);

implementation

procedure berechnen(hh,bb,kluftab,duges:real;var dudu:real);
(*-----
  Berechnet die relative Kluftdurchlaessigkeit nach W&N, Glchg. 17, jeweils fuer ein
  Kluftsystem. tau wird indirekt ueber Naeherung gemaess Glchg. 10 geloest.
  Aufgerufen von          : du_kluft
  Uebernahme: hh         : Saugspannung
                    bb     : beta_bc
                    kluftab : Kluftabstand
                    duges   : ges. Kluftdurchl
  Uebergabe : dudu       : rel. Kluftdurchlaessigkeit
-----*)
var beta,bs,min,max,w0,w1,w2,tau : real;
    beta_bc,error,f1,f12,temp_1,temp_2 : real;
    iteration : integer;
const pi      : real=3.14159265358979323846;

begin
  beta_bc:=bb;
  beta:=exp(1/3*ln((4+beta_bc)*exp(-beta_bc)/(kluftab*duges*1.33E-7)));
  bs:=-1.464924312E-05/hh;
  w0:=beta_bc;
  w1:=beta*bs;
  (*----- muss zwischen -700 und +700 liegen, da die Gleichung f1:=1-(exp(-w0-w1))*(1+w0+w1)
  (s. 8 Prog.-Zeilen weiter unten) sonst Ueberlauf erzeugt -----*)

```

```

if w1>700 then begin
  w1:=700;
end;
if w1<-700 then begin
  w1:=-700;
end;
w2:=w1*w1;
fl:=1-(exp(-w0-w1))*(1+w0+w1);
if fl>pi/4 then begin
  fl2:=fl;
(*----- Startbedingungen fuer Iteration -----*)
  min:=0; max:=1; error:=1; tau:=0.001;
  iteration:=0;
(*----- Fehler max. 1.0e-15 -----*)
  while error>1.0E-15 do begin
    iteration:=iteration+1;
    temp_2:=tau+(1+tau*tau)*(pi/4-arctan(tau));
    if temp_2>fl2 then begin
      max:=tau;
      tau:=(tau+min)/2;
    end
    else if temp_2<fl2 then begin
      min:=tau;
      tau:=(tau+max)/2;
    end;
    error:=abs(temp_2-fl2);
(*----- max. 200 Iterationen -----*)
    if iteration=200 then begin
      error:=1.0E-15;
    end;
  end;
  temp_1:=24-(exp(-w1)*(24+24*w1+12*w2+4*w2*w1+w2*w2));
  temp_2:=6-(exp(-w1)*(6+6*w1+3*w2+w2*w1));
  dudu:=tau/(6*(4+w0))*(temp_1+w0*temp_2);
end else dudu:=0;
end;

procedure du_kluft(klab_1,klab_2,bb_1,bb_2,kklges:real;prozent:integer;
  h:real;var duk:real);
(*-----
  Berechnung der zusammengesetzten, ungesaettigten Kluftdurchlaessigkeit (also beide
  Kluftsysteme).
  Aufgerufen von
  Uebernahme: klab_1, klab_2
                bb_1,bb_2
                kklges
                prozent
                h
  Uebergabe : duk
-----*)
var du_kf_ges,du_k_rel,du_1,du_2 : real;

begin
  du_kf_ges:=kklges*prozent/100;
  if h<0 then begin
    berechnen(h,bb_1,klab_1,du_kf_ges,du_k_rel);
    du_1:=du_kf_ges*du_k_rel;
  end else du_1:=du_kf_ges;
  du_kf_ges:=kklges*(100-prozent)/100;
  if h<0 then begin
    berechnen(h,bb_2,klab_2,du_kf_ges,du_k_rel);
    du_2:=du_kf_ges*du_k_rel;
  end else du_2:=du_kf_ges;
  duk:=(du_1+du_2);
(*----- Restdurchlaessigkeit soll erhalten bleiben -----*)
  if duk<=1.0E-20 then duk:=1.0E-20;
end;

end.

```

```

unit kapazit;

interface

uses kpkluft,kpmatrix;

procedure kapazitaet(hh:real;typ:integer;var kp1:real);

implementation

procedure kapazitaet(hh:real;typ:integer;var kp1:real);
(*-----
   Zuweisung der Parameter fuer Berechnung der Kapazitaet fuer Matrix und Kluftraum.
   Aufgerufen von           : predictor,corrector, durchfluss_berechnen
   Uebernahme: hh           : Saugspannung
           typ               : Typkennung (Matrix und Kluftraum)
   Uebergabe : kp1          : Kapazitaet (mit ka_matrix und ka_kluft berechnet)
   -----*)
begin
  if typ=0 then ka_matrix(4.87,1.77,0.44,0.0169,0,hh,kp1);      (*Boden bst*)
  if typ=1 then ka_matrix(1.33,1.35,0.48,0.038,0,hh,kp1);      (*Boden so*)
  if typ=3 then ka_matrix(4.79,1.77,0.43,0.025,0,hh,kp1);      (*Boden smh*)
  if typ=4 then ka_matrix(8.08,1.36,0.46,0.041,0,hh,kp1);      (*Boden smd*)
  if typ=5 then ka_matrix(4.37,1.65,0.44,0.027,0,hh,kp1);      (*Boden smv*)
  if typ=6 then ka_matrix(2.89,1.66,0.44,0.019,0,hh,kp1);      (*Boden sug*)
  if typ=7 then ka_matrix(1.62,1.51,0.46,0.026,0,hh,kp1);      (*Boden sug*)

  if typ=11 then ka_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0012,hh,kp1); (*so2_t_se*)
  if typ=12 then ka_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0009,hh,kp1); (*so2_t_nw*)
  if typ=13 then ka_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0026,hh,kp1); (*so2_h_se*)
  if typ=14 then ka_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0021,hh,kp1); (*so2_h_nw*)
  if typ=18 then ka_matrix(1.33,1.35,0.48,0.038,0.0026,hh,kp1); (*so2_h_se*)
  if typ=19 then ka_matrix(1.33,1.35,0.48,0.038,0.0021,hh,kp1); (*so2_h_nw*)
  if typ=111 then ka_kluft(10.415,2.765,1,1.0642e-8,0.0012,hh,kp1); (*so2_t_se*)
  if typ=121 then ka_kluft(9.199,2.986,1,1.0259e-8,0.0009,hh,kp1); (*so2_t_nw*)
  if typ=131 then ka_kluft(19.071,3.123,1,9.134e-10,0.0026,hh,kp1); (*so2_h_se*)
  if typ=141 then ka_kluft(20.808,3.117,1,7.736e-10,0.0021,hh,kp1); (*so2_h_nw*)

  if typ=21 then ka_matrix(0.152,1.17,0.30,0.01,0.0026,hh,kp1); (*sol_h_se*)
  if typ=22 then ka_matrix(0.152,1.17,0.30,0.01,0.0021,hh,kp1); (*sol_h_nw*)
  if typ=211 then ka_kluft(19.071,3.123,1,9.134e-10,0.0026,hh,kp1); (*sol_h_se*)
  if typ=221 then ka_kluft(20.808,3.117,1,7.736e-10,0.0021,hh,kp1); (*sol_h_nw*)

  if typ=31 then ka_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0009,hh,kp1); (*smh_t_se*)
  if typ=32 then ka_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0009,hh,kp1); (*smh_t_nw*)
  if typ=33 then ka_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0020,hh,kp1); (*smh_h_se*)
  if typ=34 then ka_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0025,hh,kp1); (*smh_h_nw*)
  if typ=38 then ka_matrix(4.79,1.77,0.43,0.025,0.0020,hh,kp1); (*smh_h_se*)
  if typ=39 then ka_matrix(4.79,1.77,0.43,0.025,0.0025,hh,kp1); (*smh_h_nw*)
  if typ=311 then ka_kluft(4.7,2.99,1,4.17e-8,0.0009,hh,kp1); (*smh_t_se*)
  if typ=321 then ka_kluft(7.03,2.99,1,1.87e-8,0.0009,hh,kp1); (*smh_t_nw*)
  if typ=331 then ka_kluft(10.21,3.21,1,7e-11,0.0020,hh,kp1); (*smh_h_se*)
  if typ=341 then ka_kluft(18.16,3.21,1,2e-11,0.0025,hh,kp1); (*smh_h_nw*)

  if typ=41 then ka_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0012,hh,kp1); (*smd_t_se*)
  if typ=42 then ka_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0011,hh,kp1); (*smd_t_nw*)
  if typ=43 then ka_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0023,hh,kp1); (*smd_h_se*)
  if typ=44 then ka_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0027,hh,kp1); (*smd_h_nw*)
  if typ=48 then ka_matrix(8.08,1.36,0.46,0.041,0.0023,hh,kp1); (*smd_h_se Kluftraum*)
  if typ=49 then ka_matrix(8.08,1.36,0.46,0.041,0.0027,hh,kp1); (*smd_h_nw Kluftraum*)
  if typ=411 then ka_kluft(6.36,2.99,1,2.28e-8,0.0013,hh,kp1); (*smd_t_se*)
  if typ=421 then ka_kluft(7.77,2.99,1,1.53e-8,0.0012,hh,kp1); (*smd_t_nw*)
  if typ=431 then ka_kluft(9.23,3.21,1,9e-11,0.0023,hh,kp1); (*smd_h_se*)
  if typ=441 then ka_kluft(18.28,3.21,1,2e-11,0.0027,hh,kp1); (*smd_h_nw*)

  if typ=51 then ka_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0012,hh,kp1); (*smv_t_se*)
  if typ=52 then ka_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0011,hh,kp1); (*smv_t_nw*)
  if typ=53 then ka_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0023,hh,kp1); (*smv_h_se*)
  if typ=54 then ka_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0027,hh,kp1); (*smv_h_nw*)
  if typ=58 then ka_matrix(4.37,1.65,0.44,0.027,0.0023,hh,kp1); (*smv_h_se*)
  if typ=59 then ka_matrix(4.37,1.65,0.44,0.027,0.0027,hh,kp1); (*smv_h_nw*)
  if typ=511 then ka_kluft(6.36,2.99,1,2.28e-8,0.0013,hh,kp1); (*smv_t_se*)

```

```

if typ=521 then ka_kluft(7.77,2.99,1,1.53e-8,0.0012,hh,kp1); (*smv_t_nw*)
if typ=531 then ka_kluft(9.23,3.21,1,9e-11,0.0023,hh,kp1); (*smv_h_se*)
if typ=541 then ka_kluft(18.28,3.21,1,2e-11,0.0027,hh,kp1); (*smv_h_nw*)

if typ=61 then ka_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0013,hh,kp1); (*sus_t_se*)
if typ=62 then ka_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0010,hh,kp1); (*sus_t_nw*)
if typ=63 then ka_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0026,hh,kp1); (*sus_h_se*)
if typ=64 then ka_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0021,hh,kp1); (*sus_h_nw*)
if typ=68 then ka_matrix(2.89,1.66,0.44,0.019,0.0026,hh,kp1); (*sus_h_se*)
if typ=69 then ka_matrix(2.89,1.66,0.44,0.019,0.0021,hh,kp1); (*sus_h_nw*)
if typ=611 then ka_kluft(11.862,2.695,1,9.280e-9,0.0013,hh,kp1); (*sus_t_se*)
if typ=621 then ka_kluft(9.992,2.986,1,8.689e-9,0.0010,hh,kp1); (*sus_t_nw*)
if typ=631 then ka_kluft(19.071,3.123,1,9.141e-10,0.0026,hh,kp1); (*sus_h_se*)
if typ=641 then ka_kluft(20.808,3.117,1,7.727e-10,0.0021,hh,kp1); (*sus_h_nw*)

if typ=71 then ka_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0009,hh,kp1); (*sug_t_se*)
if typ=72 then ka_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0007,hh,kp1); (*sug_t_nw*)
if typ=73 then ka_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0022,hh,kp1); (*sug_h_se*)
if typ=74 then ka_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0019,hh,kp1); (*sug_h_nw*)
if typ=78 then ka_matrix(1.62,1.51,0.46,0.026,0.0022,hh,kp1); (*sug_h_se*)
if typ=79 then ka_matrix(1.62,1.51,0.46,0.026,0.0019,hh,kp1); (*sug_h_nw*)
if typ=711 then ka_kluft(9.201,2.665,1,1.632e-8,0.0009,hh,kp1); (*sug_t_se*)
if typ=721 then ka_kluft(7.617,2.975,1,1.509e-8,0.0007,hh,kp1); (*sug_t_nw*)
if typ=731 then ka_kluft(18.643,3.123,1,9.566e-10,0.0022,hh,kp1); (*sug_h_se*)
if typ=741 then ka_kluft(19.812,3.013,1,9.560e-10,0.0019,hh,kp1); (*sug_h_nw*)

end;

end.

unit kpmatrix;

interface

procedure ka_matrix(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var kpm:real);

implementation

procedure ka_matrix(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var kpm:real);
(*-----
  Berechnung der Kapazitaet, Ableitung der Glchg. 21 von vG.
  Aufgerufen von      : kapazitaet
  uebernahme: a       : vG-Parameter alpha
                   n   : vG-Parameter n
                   tas  : Saettigungswassergehalt: nicht benoetigt
                   tar  : Restwassergehalt: nicht benoetigt
                   nkl  : Kluftraumanteil: nicht benoetigt
                   h    : Saugspannung
  uebergabe : kpm     : Kapazitaet
-----*)
var m :real;

begin
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    kpm:=(tas-tar)*m*n*a*exp(-(1+m)*ln(1+exp(n*ln(-a*h))))*exp((n-1)*ln(-a*h));
  end else kpm:=0;
end;

end.

unit kpkluft;

interface

procedure ka_kluft(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var kpk:real);

implementation

```

```

procedure ka_kluft(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var kpk:real);
(*-----
  Berechnung der Kapazitaet fuer Kluftraum, Kluftraumverhalten durch Matrixverhalten
  angenaehert, Ableitung der Glchg. 21 von van Genuchten.
  Aufgerufen von      : kapazitaet
  Uebernahme: a      : vG-Parameter alpha
                   n      : vG-Parameter n
                   tas     : Saettigungswassergehalt: nicht benoetigt
                   tar     : Restwassergehalt: nicht benoetigt
                   nkl     : Kluftraumanteil: nicht benoetigt
                   h       : Saugspannung
  Uebergabe : kpm      : Kapazitaet
-----*)
var m          : real;

begin
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    kpk:=(1-tar)*m*n*a*exp(-(1+m)*ln(1+exp(n*ln(-a*h))))*exp((n-1)*ln(-a*h));
  end else kpk:=0;
end;

end.

unit wgberech2;

interface

uses wgkluft2,wgmatrix;

var nn,alpha,kluftraum,thetar,thetas : real;
    betabc1,betabc2                  : array [0..200] of real;

procedure WgBerechnen(j:integer;hh:real;typ:integer;var thetal,kluftraum:real);

implementation

procedure WgBerechnen(j:integer;hh:real;typ:integer;var thetal,kluftraum:real);
(*-----
  Zuweisung der Parameter fuer Berechnung des Wassergehaltes fuer Matrix und Kluftraum.
  Aufgerufen von      : zwischenabfluss,imbibition,predictor,corrector,
                      : durchfluss_berechnen,hauptteil
  Uebernahme: j      : Zelle (benoetigt fuer Zuweisung von beta_bc)
                   hh     : Saugspannung
                   typ     : Typkennung (Matrix und Kluftraum)
  Uebergabe : kpl     : Kapazitaet (mit ka_matrix und ka_kluft berechnet)
-----*)
begin
  if typ=0 then (*Boden bst*)
    wg_matrix(4.87,1.77,0.44,0.0169,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=1 then (*Boden so*)
    wg_matrix(1.33,1.35,0.48,0.038,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=3 then (*Boden smh*)
    wg_matrix(4.79,1.77,0.43,0.025,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=4 then (*Boden smd*)
    wg_matrix(8.08,1.36,0.46,0.041,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=5 then (*Boden smv*)
    wg_matrix(4.37,1.65,0.44,0.027,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=6 then (*Boden sug*)
    wg_matrix(2.89,1.66,0.44,0.019,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=7 then (*Boden sug*)
    wg_matrix(1.62,1.51,0.46,0.026,0,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);

  if typ=11 then (*so2_t_se*)
    wg_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0012,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=12 then (*so2_t_nw*)
    wg_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0009,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=13 then (*so2_h_se*)
    wg_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0026,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
  if typ=14 then (*so2_h_nw*)
    wg_matrix(0.09,4.252,0.1394,0.06,0.0021,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
end;

```

```
if typ=18 then (*so2_h_se*)
  wg_matrix2(1.33,1.35,0.48,0.038,0.0026,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=19 then (*so2_h_nw*)
  wg_matrix2(1.33,1.35,0.48,0.038,0.0021,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=111 then (*so2_t_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.16,0.08,betabc1[j],betabc2[j],0.0012,1.4e-5,hh,thetal);
if typ=121 then (*so2_t_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.10,0.12,betabc1[j],betabc2[j],0.0009,7.4e-6,hh,thetal);
if typ=131 then (*so2_h_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.27,0.24,betabc1[j],betabc2[j],0.0026,1.0e-4,hh,thetal);
if typ=141 then (*so2_h_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.24,0.29,betabc1[j],betabc2[j],0.0021,1.0e-4,hh,thetal);

if typ=21 then (*sol_h_se*)
  wg_matrix(0.152,1.17,0.30,0.01,0.0026,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=22 then (*sol_h_nw*)
  wg_matrix(0.152,1.17,0.30,0.01,0.0021,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=211 then (*sol_h_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.16,0.08,betabc1[j],betabc2[j],0.0026,1.0e-4,hh,thetal);
if typ=221 then (*sol_h_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.27,0.24,betabc1[j],betabc2[j],0.0021,1.0e-4,hh,thetal);

if typ=31 then (*smh_t_se*)
  wg_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0009,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=32 then (*smh_t_nw*)
  wg_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0009,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=33 then (*smh_h_se*)
  wg_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0020,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=34 then (*smh_h_nw*)
  wg_matrix(0.511,2.25,0.122,0.045,0.0025,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=38 then (*smh_h_se*)
  wg_matrix2(4.79,1.77,0.43,0.025,0.0020,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=39 then (*smh_h_nw*)
  wg_matrix2(4.79,1.77,0.43,0.025,0.0025,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=311 then (*smh_t_se*)
  wg_kluft2(0.45,0.45,0.14,0.06,betabc1[j],betabc2[j],0.0009,8.2e-6,hh,thetal);
if typ=321 then (*smh_t_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.08,0.10,betabc1[j],betabc2[j],0.0009,4.3e-6,hh,thetal);
if typ=331 then (*smh_h_se*)
  wg_kluft2(0.45,0.45,0.26,0.23,betabc1[j],betabc2[j],0.0020,8.3e-5,hh,thetal);
if typ=341 then (*smh_h_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.21,0.27,betabc1[j],betabc2[j],0.0025,8.5e-5,hh,thetal);

if typ=41 then (*smd_t_se*)
  wg_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0012,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=42 then (*smd_t_nw*)
  wg_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0011,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=43 then (*smd_h_se*)
  wg_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0023,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=44 then (*smd_h_nw*)
  wg_matrix(0.309,1.4,0.1536,0.027,0.0027,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=48 then (*smd_h_se Kluftraum*)
  wg_matrix2(8.08,1.36,0.46,0.041,0.0023,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=49 then (*smd_h_nw Kluftraum*)
  wg_matrix2(8.08,1.36,0.46,0.041,0.0027,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=411 then (*smd_t_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.14,0.07,betabc1[j],betabc2[j],0.0013,1.2e-5,hh,thetal);
if typ=421 then (*smd_t_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.08,0.11,betabc1[j],betabc2[j],0.0012,6.7e-6,hh,thetal);
if typ=431 then (*smd_h_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.26,0.23,betabc1[j],betabc2[j],0.0023,1.1e-4,hh,thetal);
if typ=441 then (*smd_h_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.21,0.27,betabc1[j],betabc2[j],0.0027,1.0e-4,hh,thetal);

if typ=51 then (*smv_t_se*)
  wg_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0012,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=52 then (*smv_t_nw*)
  wg_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0011,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=53 then (*smv_h_se*)
  wg_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0023,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=54 then (*smv_h_nw*)
  wg_matrix(0.638,2.439,0.1135,0.051,0.0027,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
```

```

if typ=58 then (*smv_h_se*)
  wg_matrix2(4.37,1.65,0.44,0.027,0.0023,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=59 then (*smv_h_nw*)
  wg_matrix2(4.37,1.65,0.44,0.027,0.0027,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=511 then (*smv_t_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.15,0.07,betabc1[j],betabc2[j],0.0013,1.2e-5,hh,thetal);
if typ=521 then (*smv_t_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.08,0.12,betabc1[j],betabc2[j],0.0012,6.7e-6,hh,thetal);
if typ=531 then (*smv_h_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.27,0.24,betabc1[j],betabc2[j],0.0023,1.1e-4,hh,thetal);
if typ=541 then (*smv_h_nw*)
  wg_kluft2(0.3,0.5,0.24,0.29,betabc1[j],betabc2[j],0.0027,1.0e-4,hh,thetal);

if typ=61 then (*sus_t_se*)
  wg_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0013,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=62 then (*sus_t_nw*)
  wg_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0010,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=63 then (*sus_h_se*)
  wg_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0026,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=64 then (*sus_h_nw*)
  wg_matrix(0.295,3.458,0.1724,0.063,0.0021,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=68 then (*sus_h_se*)
  wg_matrix2(2.89,1.66,0.44,0.019,0.0026,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=69 then (*sus_h_nw*)
  wg_matrix2(2.89,1.66,0.44,0.019,0.0021,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=611 then (*sus_t_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.18,0.08,betabc1[j],betabc2[j],0.0013,2e-5,hh,thetal);
if typ=621 then (*sus_t_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.11,0.13,betabc1[j],betabc2[j],0.0010,9.5e-6,hh,thetal);
if typ=631 then (*sus_h_se*)
  wg_kluft2(0.4,0.4,0.27,0.24,betabc1[j],betabc2[j],0.0026,1.0e-4,hh,thetal);
if typ=641 then (*sus_h_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.24,0.29,betabc1[j],betabc2[j],0.0021,1.0e-4,hh,thetal);

if typ=71 then (*sug_t_se*)
  wg_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0009,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=72 then (*sug_t_nw*)
  wg_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0007,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=73 then (*sug_h_se*)
  wg_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0022,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=74 then (*sug_h_nw*)
  wg_matrix(0.249,2.212,0.1682,0.0467,0.0019,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=78 then (*sug_h_se*)
  wg_matrix2(1.62,1.51,0.46,0.026,0.0022,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=79 then (*sug_h_nw*)
  wg_matrix2(1.62,1.51,0.46,0.026,0.0019,hh,nn,alpha,kluftraum,thetas,thetar,thetal);
if typ=711 then (*sug_t_se*)
  wg_kluft2(0.45,0.45,0.14,0.06,betabc1[j],betabc2[j],0.0009,8.2e-6,hh,thetal);
if typ=721 then (*sug_t_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.08,0.10,betabc1[j],betabc2[j],0.0007,4.2e-6,hh,thetal);
if typ=731 then (*sug_h_se*)
  wg_kluft2(0.45,0.45,0.26,0.23,betabc1[j],betabc2[j],0.0022,8.3e-5,hh,thetal);
if typ=741 then (*sug_h_nw*)
  wg_kluft2(1.0,0.35,0.17,0.28,betabc1[j],betabc2[j],0.0019,8.5e-5,hh,thetal);

end;

end.

unit wgmatrix;

interface

procedure wg_matrix(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var nn,alp,kluftraum,thetas,thetar,thetam:real);
procedure wg_matrix2(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var nn,alp,kluftraum,thetas,thetar,thetam:real);

implementation

procedure wg_matrix(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var nn,alp,kluftraum,thetas,thetar,thetam:real);
(*-----
  Berechnung Wassergehaltes fuer Matrix, nach Glchg. 21 von vG.

```

```

    Aufgerufen von          : wgberechnen
    Uebernahme: a           : vG-Parameter alpha
        n                   : vG-Parameter n
        tas                  : Saettigungswassergehalt
        tar                  : Restwassergehalt
        nkl                  : Kluftraumanteil
        h                   : Saugspannung
    Uebergabe : nn          : vG-Parameter n (fuer uebergeordnete Proz.)
        alp                  : vG-Parameter alpha (fuer uebergeordnete Proz.)
        kluftraum           : Kluftraumanteil (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetas              : Saettigungswassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetar              : Restwassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetam              : Wassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
-----*)
var m                        : real;

begin
  nn:=n;
  kluftraum:=nkl;
  thetas:=tas;
  thetar:=tar;
  alp:=a;
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    thetam:=(1-nkl)*(tar+(tas-tar)/(exp(m*ln(1+exp(n*ln(-a*h))))));
  end else thetam:=tas*(1-nkl);
end;

procedure wg_matrix2(a,n,tas,tar,nkl,h:real;var nn,alp,kluftraum,thetas,thetar,thetam:real);
(*-----*)
  Berechnung Wassergehaltes fuer Kluffuellungen in den obersten Abschnitten des Fest-
  gesteins (Kluefte mit Bodenmaterial gefuellt), nach Glchg. 21 von vG.
  Aufgerufen von          : wgberechnen
  Uebernahme: a           : vG-Parameter alpha
        n                   : vG-Parameter n
        tas                  : Saettigungswassergehalt
        tar                  : Restwassergehalt
        nkl                  : Kluftraumanteil
        h                   : Saugspannung
  Uebergabe : nn          : vG-Parameter n (fuer uebergeordnete Proz.)
        alp                  : vG-Parameter alpha (fuer uebergeordnete Proz.)
        kluftraum           : Kluftraumanteil (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetas              : Saettigungswassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetar              : Restwassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
        thetam              : Wassergehalt (fuer uebergeordnete Proz.)
-----*)
var m                        : real;

begin
  nn:=n;
  kluftraum:=nkl;
  thetas:=tas;
  thetar:=tar;
  alp:=a;
  if h<0 then begin
    m:=1-1/n;
    thetam:=(nkl)*(tar+(tas-tar)/(exp(m*ln(1+exp(n*ln(-a*h))))));
  end else thetam:=tas*(nkl);
end;

end.

unit wgkluft2;

interface

procedure wg_kluft2(klab_1,klab_2,oew_1,oew_2,bb_1,bb_2,nkl,kklges,h:real;var thetak:real);

implementation

```

```

procedure wg_kluft2(klab_1,klab_2,oew_1,oew_2,bb_1,bb_2,nkl,kklges,h:real;var thetak:real);
(*-----
  Berechnung des Wassergehaltes fuer Kluftraum nach W&N, Glchg. 18.
  1.33E-7 = Umrechnungsfaktor Permeabilitaet --> k_f
  1.46E-5 = alle Faktoren aus W&N, Glchg. 6 zusammengefasst (ausser h)
  Aufgerufen von          : wgberechnen
  Uebernahme: klab_1, klab_2      : Klufstabstaende fuer beide Kluftsysteme
                oew_1, oew_2      : Oeffnungsweiten fuer beide Kluftsysteme
                bb_1, bb_2        : beta_bc fuer beide Kluftsysteme
                nkl                : Kluftraum
                kklges             : ges. Kluftraumdurchlaessigkeit
                h                  : Saugspannung
  Uebergabe : thetak              : Wassergehalt Kluftraum, absolut
-----*)
var  beta_bc,beta,bs,temp1,temp2      : real;
     thetak_1,thetak_2                : real;

begin
  if h<0 then begin
(*----- Kluftsystem 1 -----*)
    beta_bc:=bb_1;
    beta:=exp(1/3*ln((4+beta_bc)*exp(-beta_bc)/(klab_1*kklges*1.33E-7)));
    bs:=-1.464924312E-5/h;
    temp1:=2-exp(-beta*bs)*(2+2*beta*bs+beta*beta*bs*bs);
    temp2:=beta_bc*(1-exp(-beta*bs)*(1+beta*bs));
    thetak_1:=1/(2+beta_bc)*(temp1+temp2)*(oew_1/1000/klab_1*2);
(*----- Kluftsystem 2 -----*)
    beta_bc:=bb_2;
    beta:=exp(1/3*ln((4+beta_bc)*exp(-beta_bc)/(klab_2*kklges*1.33E-7)));
    bs:=-1.464924312E-05/h;
    temp1:=2-exp(-beta*bs)*(2+2*beta*bs+beta*beta*bs*bs);
    temp2:=beta_bc*(1-exp(-beta*bs)*(1+beta*bs));
    thetak_2:=1/(2+beta_bc)*(temp1+temp2)*(oew_2/1000/klab_2*2);

    thetak:=thetak_1+thetak_2;
  end else thetak:=1*nkl;
end;

end.

unit betabc;

interface

procedure betabc_berech(typ:integer;var bebc1,bebc2:real);

implementation

procedure rechnung(kont_1,kont_2:real;var erg1,erg2:real);
(*-----
  Berechnung des Faktors beta_bc, W&N, Glchg. 20
  beta_bc wird indirekt ueber ein Naehungsverfahren geloest.
  Benoetigt werden die Kontaktflaechenanteile kont_1 und kont_2 fuer die beiden Kluftsysteme.
  erg1 und erg2 sind die beta_bc-Werte fuer die Kluftsysteme.
  Aufgerufen von          : betabc_berech
  Uebernahme: kont_1, kont_2      : Kontaktflaechenanteile
  Uebergabe : erg1, erg2          : beta_bc-Werte
-----*)
var  temp,min,max,error,kontalt      : real;
     iteration                        : integer;

begin
(*----- Startbedingungen -----*)
  erg1:=0.01; kontalt:=10; min:=0; max:=10; error:=1;
  if kont_1<>kontalt then begin
    iteration:=0;
(*----- Fehlergrenze der Iteration 1e-20 -----*)
    while error>1e-20 do begin
      iteration:=iteration+1;
      temp:=1-exp(-erg1)*(1+erg1);
      if temp<kont_1 then begin

```

```

        min:=erg1;
        erg1:=(erg1+max)/2;
    end
    else if temp>kont_1 then begin
        max:=erg1;
        erg1:=(erg1+min)/2;
    end;
    error:=abs(temp-kont_1);
(*----- max. 100 Iterationen -----*)
    if iteration=100 then begin
        error:=1.0E-20;
    end;
end;
end;
(*----- Startbedingungen -----*)
erg2:=0.01; kontakt:=10; min:=0; max:=10; error:=1;
if kont_2<>kontakt then begin
    iteration:=0;
(*----- Fehlergrenze der Iteration 1e-20 -----*)
    while error>1e-20 do begin
        iteration:=iteration+1;
        temp:=1-exp(-erg2)*(1+erg2);
        if temp<kont_2 then begin
            min:=erg2;
            erg2:=(erg2+max)/2;
        end
        else if temp>kont_2 then begin
            max:=erg2;
            erg2:=(erg2+min)/2;
        end;
        error:=abs(temp-kont_2);
(*----- max. 100 Iterationen -----*)
        if iteration=100 then begin
            error:=1.0E-20;
        end;
    end;
end;
end;

end;

procedure betabc_berech(typ:integer;var bebc1,bebc2:real);
(*-----
    Zuteilung der Kontaktflaechenanteile der Kluefte fuer jede startigrafisch-tektonische Ein-
    heit und jedes der beiden Kluftsysteeme (deshalb zwei Werte).
    Aufgerufen von          : hauptteil
    Uebernahme: typ         : Typkennziffern fuer start.-tekt. Einheit
    Uebergabe : bebc1, bebc2 : beta_bc-Werte (Berechnung in der procedure rechnung)
-----*)
begin
    if typ=111 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*so2_t_se*)
    if typ=121 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*so2_t_nw*)
    if typ=131 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*so2_h_se*)
    if typ=141 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*so2_h_nw*)

    if typ=211 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*so1_h_se*)
    if typ=221 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*so1_h_nw*)

    if typ=311 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smh_t_se*)
    if typ=321 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smh_t_nw*)
    if typ=331 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smh_h_se*)
    if typ=341 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smh_h_nw*)

    if typ=411 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smd_t_se*)
    if typ=421 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smd_t_nw*)
    if typ=431 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smd_h_se*)
    if typ=441 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smd_h_nw*)

    if typ=511 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smv_t_se*)
    if typ=521 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*smv_t_nw*)
    if typ=531 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smv_h_se*)

```

```
if typ=541 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*smv_h_nw*)

if typ=611 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*sus_t_se*)
if typ=621 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*sus_t_nw*)
if typ=631 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*sus_h_se*)
if typ=641 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*sus_h_nw*)

if typ=711 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*sug_t_se*)
if typ=721 then rechnung(0.05,0.1,bebc1,bebc2); (*sug_t_nw*)
if typ=731 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*sug_h_se*)
if typ=741 then rechnung(0.01,0.01,bebc1,bebc2); (*sug_h_nw*)

end;

end.
```

Anlage 37

Beispieldateien

Inputdatei: *.ini (Initialisierungsdatei)
kompartime: Anzahl der Zellen (Kompartimente)
boden : Anzahl der Zellen im Bodenhorizont
wurzelt : Durchwurzelungstiefe [m]
gws : Anzahl der Zellen des Horizontes in dem der GW-Spiegel liegt
(i.A. der unterste Horizont im Profil)
zeitmax : max. Berechnungszeit [Tage]
dtmin : minimaler Zeitschritt [s]
dtmax : maximaler Zeitschritt [s]
minfehler : min. Fehler (empirisch zu ermitteln, Groessenordnung 1-50)
maxfehler : max. Fehler (sollte etwa das 2,5-fache von minfehler betragen)
inputdatei: Datei mit den Inputwerten
ausgabe : Zeitabstand in dem die Profilwerte (Ssp) gespeichert werden
sollen [Tage] (z.B. 91 Tage fuer ca. viertelj. Abstand)

kompartime: 38
boden : 13
wurzelt : 0.42
gws : 25
zeitmax : 4018
dtmin : 320
dtmax : 2560
minfehler : 10
maxfehler : 25
inputdatei: rand/rohrbr.rnd
ausgabe : 91

Inputdatei: *.awg (Anfangswerte Saugspannung und Typen)
 Nr. Nummerierung der Zellen von unten nach oben aufsteigend
 MTy Typnummer fuer Matrix
 KTy Typnummer fuer Kluftraum
 dz Maechtigkeit der Zellen [m]
 Ssp Saugspannungen in Matrix und Kluftraum [m]
 Tag : Beginn der Berechnungen
 Niesum : Niederschlagssumme [mm]
 WgStart: Wassergehalt Profil zu Beginn [mm]
 WgEnde : Wassergehalt Profil zum Berechnungszeitpunkt [mm]
 G_Evabi: Gesamte Evapotranspiration (nur Input und Output im Profil) [mm]*
 G_Inf : Gesamte Infiltration [mm]
 G_Eva : Gesamte Evapotranspiration (beeinhaltet auch Evaporation) [mm]*
 G_Neb : Gesamte Neubildung [mm]
 G_Abf : Gesamter Oberflaechenabfluss [mm]
 G_Kap : Gesamter Kapillaraufstieg [mm]
 G_Zwab : Gesamter Zwischenabfluss [mm]
 Bilanz : Gesamtbilanz [mm]
 * unterschiedliche Vorzeichen um Verwechslungen zu erschweren

```
-----
Nr  MTy  KTy  dz      Ssp Matrix      Ssp Kluftraum
1   74   741  1.500  2.282940515469987e-02 -8.845082846689542e-02
2   74   741  1.500  -1.876373349178758e-01 -1.871990330112839e-01
3   74   741  1.500  -2.141613520819870e-01 -2.133352286203706e-01
4   74   741  1.500  -2.302390421848042e-01 -2.288569161838199e-01
5   74   741  1.500  -2.399460638193553e-01 -2.379857256118501e-01
6   74   741  1.400  -2.456961898326446e-01 -2.433952690778343e-01
7   74   741  1.400  -2.491853183539766e-01 -2.469924989532959e-01
8   74   741  1.400  -2.513734400411136e-01 -2.499295113833986e-01
9   74   741  1.400  -2.526556509908715e-01 -2.522998290134125e-01
10  74   741  1.300  -2.530832996769932e-01 -2.530884951192735e-01
11  74   741  1.200  -2.518569484071351e-01 -2.518749493724943e-01
12  74   741  1.100  -2.474078774999564e-01 -2.474544483652049e-01
13  74   741  0.900  -2.394373483553567e-01 -2.394755962783752e-01
14  74   741  0.700  -2.284659247733626e-01 -2.322150611199469e-01
15  74   741  0.500  -2.031201643259018e-01 -2.264568138448857e-01
16  74   741  0.300  -1.639715182871755e-01 -2.664968456988522e-01
17  74   741  0.250  -1.269138520189160e-01 -6.659057171875633e-01
18  74   741  0.200  -9.223856999381243e-02 -7.803033559156752e-01
19  74   741  0.150  -6.355480174938573e-02 -8.944097033229165e-01
20  74   741  0.100  -4.259821480131865e-02 -7.540288764677382e-01
21  74   741  0.070  -2.830387166090585e-02 -2.052627020177463e+00
22  74   741  0.050  -1.824325268448717e-02 -3.663288409198024e-01
23  74   79   0.030  -1.156376944760035e-02 -1.647186541551788e+00
24  74   79   0.010  -8.234886688047132e-03  1.126046568233482e-03
25  74   79   0.005  -6.986409899725377e-03 -6.375658916478648e-03
26  7   7   0.005  -1.193676994756619e-02 -1.137623494544323e-02
27  7   7   0.010  -1.943657813527887e-02 -1.887533871018888e-02
28  7   7   0.015  -3.193337882029279e-02 -3.137519656134617e-02
29  7   7   0.030  -5.443135159333699e-02 -5.387572725421945e-02
30  7   7   0.050  -9.442471704223719e-02 -9.387545125827093e-02
31  7   7   0.070  -1.544134167274201e-01 -1.538752433301711e-01
32  7   7   0.100  -2.393951575963818e-01 -2.388745347871334e-01
33  7   7   0.100  -3.393744416573025e-01 -3.388744930472580e-01
34  7   7   0.100  -4.393600619913445e-01 -4.388790902976006e-01
35  7   7   0.100  -5.393561728739016e-01 -5.388911834199673e-01
36  7   7   0.100  -6.393694589031149e-01 -6.389158665947321e-01
37  7   7   0.070  -7.244011255539159e-01 -7.239525042438882e-01
38  7   7   0.050  -7.844393551418323e-01 -7.839918584280614e-01
Tag   :      0
Niesum : 0.0000000e+00
WgStart: 3.6698825e+03
WgEnde : 3.6730040e+03
G_Evabi: 0.0000000e+00
G_Inf  : 0.0000000e+00
G_Eva  : 0.0000000e+00
G_Neb  : 0.0000000e+00
G_Abf  : 0.0000000e+00
G_Kap  : 0.0000000e+00
G_Zwab : 0.0000000e+00
Bilanz : 0.0000000e+00
```

Inputdatei: *.alg (Allgemeine Werte)
Nr. Nummerierung der Zellen von unten nach oben aufsteigend
grenzm Grenzwert fuer Saugspannung Matrix
grenzk Grenzwert fuer Saugspannung Kluftraum
Grenzwert fuer Saugspannung in den durchwurzelten Bereichen sollte
groesser sein, als im Rest des Bodenhorizonts (etwa permanenter Welkepunkt)
klab mittlerer Kluftabstand (bei mehreren Kluftsystemen gemittelt)
Kluftabstand von 1.0 bedeutet: keine Kluefte (Bodenhorizont)

Nr.	grenzm	grenzk	klab
1	-10	-10	0.169
2	-10	-10	0.169
3	-10	-10	0.169
4	-10	-10	0.169
5	-10	-10	0.169
6	-10	-10	0.169
7	-10	-10	0.169
8	-10	-10	0.169
9	-10	-10	0.169
10	-10	-10	0.169
11	-10	-10	0.169
12	-10	-10	0.169
13	-10	-10	0.169
14	-10	-10	0.169
15	-10	-10	0.169
16	-10	-10	0.169
17	-10	-10	0.169
18	-10	-10	0.169
19	-10	-10	0.169
20	-10	-10	0.169
21	-10	-10	0.169
22	-10	-10	0.129
23	-10	-10	0.129
24	-10	-10	0.089
25	-10	-10	0.089
26	-16	-16	1.000
27	-17	-17	1.000
28	-18	-18	1.000
29	-19	-19	1.000
30	-23	-23	1.000
31	-31	-31	1.000
32	-48	-48	1.000
33	-87	-87	1.000
34	-139	-139	1.000
35	-159	-159	1.000
36	-159	-159	1.000
37	-159	-159	1.000
38	-159	-159	1.000

Inputdatei: *.zwi (Vorgaben fuer die Berechnungen der Zwischenabfluesse)
 Nr. Nummerierung der Zellen von unten nach oben aufsteigend
 gradm max. Gradient fuer Zwischenabfluss Matrix
 gradk max. Gradient fuer Zwischenabfluss Kluftraum
 grenzm max. Saugspannung, die nach Zwischenabfluss erreicht werden darf (Matrix)
 grenzk max. Saugspannung, die nach Zwischenabfluss erreicht werden darf (Kluftraum)

```
-----
Nr. gradm gradk grenzm grenzk
1 0.03 0.03 0 0
2 0.03 0.03 0 0
3 0.03 0.03 0.00 0.000
4 0.03 0.03 0.00 0.000
5 0.04 0.04 0.00 0.000
6 0.04 0.04 0.00 0.000
7 0.04 0.04 0.00 0.000
8 0.04 0.04 0.00 0.000
9 0.04 0.04 0.00 0.000
10 0.04 0.04 0.00 0.000
11 0.04 0.04 0.00 0.000
12 0.04 0.04 0.00 0.000
13 0.04 0.04 0.00 0.000
14 0.04 0.04 0.00 0.000
15 0.04 0.04 0.00 0.000
16 0.04 0.04 0.00 0.000
17 0.04 0.04 0.00 0.000
18 0.04 0.04 0.00 0.000
19 0.04 0.04 0.00 0.000
20 0.04 0.04 0.00 0.000
21 0.04 0.04 0.00 0.000
22 0.04 0.04 0.00 0.000
23 0.03 0.03 0.00 0.000
24 0.02 0.02 0 0.000
25 0.01 0.01 0 0.000
26 0.075 0.075 1 1
27 0.075 0.075 1 1
28 0.075 0.075 1 1
29 0.075 0.075 1 1
30 0.075 0.075 1 1
31 0.075 0.075 1 1
32 0.075 0.075 1 1
33 0.075 0.075 1 1
34 0.075 0.075 1 1
35 0.075 0.075 1 1
36 0.075 0.075 1 1
37 0.075 0.075 1 1
38 0.075 0.075 1 1
```

Inputdatei: *.imb (Vorgaben fuer die Berechnung des Austausches zwischen Matrix und Kluftraum)

Nr. Nummerierung der Zellen von unten nach oben aufsteigend
 atf_m Austauschfaktor
 atf_k Austauschfaktor
 atlum Austauschfaktor
 atlgm Austauschfaktor
 atluk Austauschfaktor
 atlgk Austauschfaktor

```
-----
Nr.   atf_m   atf_k  atlum   atlgm   atluk   atlgk
  1  0.0000001  1.1  1e-11   1e-14   8e-11   8e-14
  2  0.0000001  1.3  2e-08   2e-08   4e-07   4e-07
  3  0.0000001  1.3  2e-08   2e-08   4e-07   4e-07
  4  0.0000001  1.3  2e-08   2e-08   4e-07   4e-07
  5  0.0000001  1.3  2e-08   2e-08   4e-07   4e-07
  6  0.0000001  1.3  4e-09   4e-09   4e-07   4e-07
  7  0.0000001  1.3  4e-09   4e-09   4e-07   4e-07
  8  0.0000001  1.3  4e-09   4e-09   4e-07   4e-07
  9  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 10  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 11  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 12  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 13  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 14  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 15  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 16  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 17  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 18  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 19  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 20  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 21  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 22  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 23  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 24  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 25  0.0000001  1.3  3e-09   3e-09   4e-07   4e-07
 26  0.01  0.01  0  0  0  0
 27  0.01  0.01  0  0  0  0
 28  0.01  0.01  0  0  0  0
 29  0.01  0.01  0  0  0  0
 30  0.01  0.01  0  0  0  0
 31  0.01  0.01  0  0  0  0
 32  0.01  0.01  0  0  0  0
 33  0.01  0.01  0  0  0  0
 34  0.01  0.01  0  0  0  0
 35  0.01  0.01  0  0  0  0
 36  0.01  0.01  0  0  0  0
 37  0.01  0.01  0  0  0  0
 38  0.01  0.01  0  0  0  0
```

Inputdatei: *.rnd (obere Randwerte)

Spalte 1: Tage

Spalte 2: Niederschlag [mm]

Spalte 3: potentielle Evapotranspiration [mm]

```
-----
  1  4.6  0.3
  2  3.8  0.2
  3  1.8  0.3
  4   7  0.1
  5  1.1  0.1
  6  1.4  0.1
```

Ergebnisdatei: *.twerte (Tageswerte)
 Abkuerzungen selbsterklaerend. Alle Groessen bis auf 'Tag' in mm.

```
-----
Tag  Nied  ETpot  ETakt   Inf     Abf     Zwiabf   Neub      WG      Bil
      Fehlersumme Fehler
1  7.40  0.20  0.20000  7.29179  0.00821  0.4572513  0.2623152  0.0000000  3677.62638
      -1.25546  1.86604
2  1.80  0.20  0.20000  1.68700  0.01300  1.8025179  0.2623365  0.0000000  3676.94222
      -1.04805  0.20741
3  0.70  0.20  0.20000  0.58966  0.01034  1.0657043  0.2623031  0.0000000  3676.05366
      -0.99744  0.05061
4  9.80  0.00  0.00000  9.79999  0.00001  4.5136684  0.2623185  0.0000000  3680.67857
      -0.59825  0.39920
5  0.60  0.00  0.00000  0.56390  0.03610  3.5606976  0.2623970  0.0000000  3677.02131
      -0.20018  0.39807
-----
```

Ergebnisdatei: *.zwiabf (Tageswerte der Zwischenabfluesse)
 In diesem Beispiel nur zwei Schichtfolgen (pro Schichtfolge eine Spalte). Die Zwischen-
 abfluesse in der obersten Schichtfolge stehen rechts (i.d.R. der Bodenhorizont).
 Alle Groessen bis auf 'Tag' in mm.

```
-----
Tag
1  1.265553053676440e-02  4.445957320259765e-01
2  1.792378163055167e-02  1.784594102844031e+00
3  1.759395005936349e-02  1.048110332246053e+00
4  1.873347951433816e-02  4.494934909810246e+00
5  1.851872672218185e-02  3.542178894993425e+00
-----
```

Ergebnisdatei: *.profil (Profil mit Saugspannungen)
Aufbau wie awg-Datei

```
-----  
1 74 741 1.500 3.778151041528739e-04 -8.849397138695693e-02  
2 74 741 1.500 -1.889949630006872e-01 -1.872514641638137e-01  
3 74 741 1.500 -2.163344589311813e-01 -2.137363459018563e-01  
4 74 741 1.500 -2.337053700761934e-01 -2.297816192514093e-01  
5 74 741 1.500 -2.454810898617918e-01 -2.396904305891862e-01  
6 74 741 1.400 -2.542973004123045e-01 -2.459637293921791e-01  
7 74 741 1.400 -2.620287997385773e-01 -2.504471690543018e-01  
8 74 741 1.400 -2.698807167808707e-01 -2.540549429786076e-01  
9 74 741 1.400 -2.783429081699335e-01 -2.566728699907019e-01  
10 74 741 1.300 -2.874955082987911e-01 -2.590255657878131e-01  
11 74 741 1.200 -2.973484683137987e-01 -2.620810308711892e-01  
12 74 741 1.100 -3.087472711437070e-01 -2.689413753064686e-01  
13 74 741 0.900 -3.218366282547954e-01 -2.935202352051531e-01  
14 74 741 0.700 -3.210909935773653e-01 -4.269897002964501e-01  
15 74 741 0.500 -2.750450563625637e-01 -7.040920919764332e-01  
16 74 741 0.300 -2.089627387673904e-01 -8.484728197569621e-01  
17 74 741 0.250 -1.546682496115556e-01 -8.903335676851072e-01  
18 74 741 0.200 -1.074906522043567e-01 -9.950135778413198e-01  
19 74 741 0.150 -6.991314737573590e-02 -8.967445641734382e-01  
20 74 741 0.100 -4.296986331958414e-02 -1.817784296400301e+00  
21 74 741 0.070 -2.474521461660119e-02 -4.461184707797440e-01  
22 74 741 0.050 -1.196286347106294e-02 -2.034233633102679e+00  
23 74 79 0.030 -3.489303648627739e-03 2.991769070464995e-02  
24 74 79 0.010 7.284474897866975e-04 9.935175725511754e-03  
25 74 79 0.005 2.308317618911747e-03 2.444285315931283e-03  
26 7 7 0.005 -2.638199826469796e-03 -2.555425437728792e-03  
27 7 7 0.010 -1.013747672423825e-02 -1.005540017325633e-02  
28 7 7 0.015 -2.263596759535959e-02 -2.255547097610538e-02  
29 7 7 0.030 -4.513273712700838e-02 -4.505518903110432e-02  
30 7 7 0.050 -8.512691440275125e-02 -8.505486650988844e-02  
31 7 7 0.070 -1.451162675498528e-01 -1.450535286215257e-01  
32 7 7 0.100 -2.301000501763676e-01 -2.300502409533158e-01  
33 7 7 0.100 -3.300830451291576e-01 -3.300458523604934e-01  
34 7 7 0.100 -4.300734139854731e-01 -4.300456621690815e-01  
35 7 7 0.100 -5.300739564014811e-01 -5.300529086812211e-01  
36 7 7 0.100 -6.300899619990002e-01 -6.300731174702107e-01  
37 7 7 0.070 -7.151215851455528e-01 -7.151064432091319e-01  
38 7 7 0.050 -7.751584747695707e-01 -7.751437168565375e-01
```

Tag : 4004

Niesum : 1.175089999999999e+04

WgStart: 3.669882500000000e+03

WgEnde : 3.673322505990583e+03

G_Evabi: -4.780858538836296e+00

G_Inf : 1.095598364422315e+01

G_Eva : 5.555358538836321e+00

G_Neb : 1.052241834419496e+00

G_Abf : 2.041635577684228e-02

G_Kap : 0.000000000000000e+00

G_Zwab : 5.026003517795908e+00

Bilanz : 9.343974718087046e+01