

**Schwachstellengenese an Erddämmen als Resultat
sedimentär/diagenetischer Alterungsprozesse:
-Ursachenforschung und Möglichkeiten der zerstörungsfreien Erkundung-**

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

vorgelegt von

Andreas Sackmann

Renchen / Baden

Würzburg 2001

Eingereicht am:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Der Dissertation

1. Prüfer:

2. Prüfer:

Der mündlichen Prüfung

Tag der mündlichen Prüfung:

Doktorurkunde ausgehändigt am:

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Dämme und Deiche als geologische Körper betrachtet, die in einen natürlichen geologischen Rahmen eingebettet sind, einer Diagenese unterliegen und mit geowissenschaftlichen Methoden zu erkunden sind. Dem gemäß werden alle geologischen Prozesse und umweltbedingte Einflussfaktoren erörtert, die für die Alterung von Dämmen und die Entwicklung von Schwachstellen von Bedeutung sind. Entscheidende Einflussgrößen sind geogene, aber auch biogene, anthropogene und klimatische Faktoren.

Aus der Erkenntnis diesbezüglicher Zusammenhänge wird ein konzeptioneller Ansatz zu einer rein zerstörungsfreien Erkundung von Erddämmen bezogen, die neben visuellen Erkundungen und hydrogeologischen Methoden vor allem geophysikalische Verfahren, insbesondere die Widerstandsgeoelektrik nutzt.

Der große Nutzen solcher Widerstandsmessungen ist vielfach belegt worden, wobei die Anwendungen aber selten den akademischen Rahmen verlassen haben. Ungeeignete apparative Ausstattungen und fehlende Messkonzepte für die speziellen Anforderungen einer wirtschaftlich sinnvollen Dammerkundung sind als Hauptgründe für die geringe Praxisnähe anzusehen. Um die zwischen theoretischer Eignung und tatsächlicher Anwendbarkeit klaffende Lücke zu schließen, wurde sowohl für die großräumige als auch zur detaillierten Erkundung von Dämmen optimiertes Zubehör entwickelt, mit dessen Hilfe zerstörungsfreie Untersuchungen mit hoher Wirtschaftlichkeit möglich sind. Von dieser Entwicklung betroffen sind mechanisch belastbare Multielektrodenkabel, verschiedene Erderkonstruktionen, Zubehör für die Aufnahme geoelektrischer Profile und für die Widerstandskartierung, sowie insbesondere auch geoelektrische Messsysteme für Untersuchungen zu Wasser.

Neue Messkonzepte und Ausrüstungsbestandteile für die Eigenpotentialmethode und die Adaption der Mise-à-la-masse-Methode an die Dammerkundung vervollständigen den instrumentell/ methodischen Komplex.

Als Fallbeispiele für die Umsetzung dieser neuen Konzeption dienen geophysikalische Komplex-Messungen in Verbindung mit der Aufnahme visueller Befunde. Die Untersuchungen wurden, exemplarisch für Stauhaltungsdämme, am östlichen Rheinseitendamm sowie, exemplarisch für Deiche, an einem Kanaldeich im nordöstlichen Ruhrgebiet durchgeführt.

Dank

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Peter Udluft für die Betreuung der Arbeit, zahlreiche fachliche Anregungen und die Möglichkeit, diese Arbeit am Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt des geologischen Instituts der Universität Würzburg durchzuführen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Kord Ernstson für die Einführung in die zerstörungsfreie geophysikalische Untergrunderkundung sowie für die fachliche Betreuung der Arbeit und die Bereitschaft, im Verlauf zahlreicher Diskussionen und Briefwechsel maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beizutragen. Frau Elke Baumgartner war mir bei der Korrektur des Manuskripts behilflich. Herr Konrad Sackmann unterstützte mich bei den metalltechnischen Entwicklungsarbeiten. Das Bundesschiffahrtsamt, Dienststelle Freiburg, die Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe und das Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz in Offenburg stellten mir dammbauliche Unterlagen zur Verfügung.

1	Einleitung.....	9
1.1	Die Notwendigkeit präventiven Hochwasserschutzes	9
1.2	Konzeptioneller Ansatz.....	13
1.3	Die Möglichkeiten der nicht invasiven Dammerkundung.....	15
2	Aufbau und Einsatz von Hochwasserschutzanlagen	17
2.1	Küstendeiche.....	17
2.2	Stauhaltungsdämme	18
2.3	Flussdeiche.....	19
2.4	Dammbaumaterialien	20
3	Die Diagenese von Erddämmen	25
3.1	Umweltfaktoren	25
3.1.1	Geogene Faktoren.....	26
3.1.1.1	Tektonik	26
3.1.1.2	Die Fazies des Untergrundes	27
3.1.2	Biogene Faktoren.....	28
3.1.2.1	Der Einfluss der Flora	28
3.1.2.2	Der Einfluss der Fauna.....	30
3.1.3	Anthropogene Faktoren	31
3.1.4	Klimatische Faktoren	34
3.1.4.1	Temperatur.....	34
3.1.4.2	Niederschlag	35
4	Diagenetische Sedimentdynamik	36
4.1	Erosion	36
4.2	Suffosion.....	37
4.3	Kompaktion	38
4.4	Setzung.....	40
4.5	Isostatische Ausgleichsbewegungen	41
5	Die zerstörungsfreie Erkundung von Erddämmen	43
5.1	Visuelle Indikatoren	44

5.1.1	Senken.....	44
5.1.2	Morphologische Hochlagen.....	45
5.1.3	Verstärkter Pflanzenwuchs.....	45
5.1.4	Fehlende Vegetation.....	46
5.1.5	Quelltrichter.....	47
5.1.6	Sickerwasseraustritt.....	48
5.2	Hydrogeologische Methoden.....	49
5.2.1	Tracer.....	49
5.2.2	Hydrochemische Analyse.....	50
5.2.3	Die Quantifizierung des Druckwasserabflusses.....	51
5.3	Geophysikalische Methoden.....	52
5.3.1	Widerstandsgeoelektrik.....	52
5.3.1.1	Methodik.....	53
5.3.1.2	Eindimensionale Sondierungen.....	55
5.3.1.3	Zweidimensionale Sondierungen.....	57
5.3.1.4	Geoelektrische Kartierung.....	61
5.3.1.5	Dreidimensionale Widerstandsverteilung und geoelektrische Tomographie.....	62
5.3.2	Eigenpotentialmessungen.....	63
5.3.2.1	Methodik.....	64
5.3.2.2	Die Auswertung der Daten.....	66
5.3.3	Mise à la Masse-Methode.....	67
5.3.4	Induzierte Polarisierung.....	68
5.3.5	Elektromagnetik.....	68
5.3.6	Magnetik.....	70
5.3.7	Georadar.....	71
5.3.8	Seismik.....	72
5.3.9	Gravimetrie.....	73
5.3.10	Temperaturmessungen.....	74
5.4	Die Anpassung geoelektrischer Ausrüstungen an die Dammerkundung.....	76

5.4.1	Widerstandsgeoelektrik.....	76
5.4.1.1	Die Steigerung der Effizienz geoelektrischer Geländearbeiten.....	76
5.4.1.2	Mechanisch belastbare Multielektrodenkabel	77
5.4.1.3	Elektroden.....	78
5.4.1.4	Tiefensondierungszubehör.....	81
5.4.1.5	Zubehör zur Aufnahme geoelektrischer Profile	82
5.4.1.6	Zubehör für die geoelektrische Kartierung.....	83
5.4.1.7	Untersuchungen zu Wasser.....	84
5.4.1.7.1	Der segmentierte Sondenträger	85
5.4.1.7.2	Messungen in der freien Wassersäule	88
5.4.2	Eigenpotentialmessungen	89
5.4.2.1	Die Messausrüstung	89
5.4.2.2	Eigenpotentialmessungen zu Wasser	90
5.4.2.3	Steigerung des Messfortschritts und der Datenqualität.....	90
5.4.2.4	Langzeitbeobachtungen	93
5.4.3	Die Modifikation der Mise à la Masse-Methode zur Leckagedetektion an Erddämmen.....	96
6	Fallbeispiele	100
6.1	Die Erkundung von Stauhaltungsdämmen	100
6.1.1	Der Rheinseitendamm.....	100
6.1.2	Die Untergrundverhältnisse	102
6.1.3	Widerstandsgeoelektrik.....	104
6.1.3.1	Dammparallele geoelektrische Pseudosektionen	105
6.1.3.1.1	Ergebnisse.....	106
6.1.3.1.2	Interpretation.....	108
6.1.3.2	Geoelektrische Detailerkundung.....	109
6.1.3.2.1	Ergebnisse	110
6.1.3.2.2	Interpretation.....	110
6.1.4	Ergänzende Untersuchungen	112
6.1.4.1	Temperaturmessungen	112

6.1.4.1.1	Ergebnisse	113
6.1.4.1.2	Interpretation.....	115
6.1.4.2	Eigenpotentialmessungen	116
6.1.4.2.1	Ergebnisse	117
6.1.4.2.2	Interpretation.....	117
6.1.4.3	Der visuelle Befund.....	117
6.1.5	Zusammenfassung.....	118
6.2	Die Erkundung von Deichen	120
6.2.1	Der Deich des Wiescher Bachs in Wiescherhöfen.....	120
6.2.2	Widerstandsgeoelektrik.....	123
6.2.2.1	Ergebnisse	123
6.2.2.2	Interpretation.....	124
6.2.3	Magnetik	127
6.2.3.1	Ergebnisse	127
6.2.3.2	Interpretation.....	128
6.2.4	Zusammenfassung.....	129
7	Schlussbetrachtungen.....	126
8	Literaturverzeichnis	134

1 Einleitung

Der Schutz vor den Naturgewalten ist eine der vordringlichen Aufgaben der modernen Umweltwissenschaften. Neben dem Verständnis der Entstehung von Naturkatastrophen, nimmt die Suche nach Strategien zur Schadensminimierung eine zentrale Stellung ein.

1.1 Die Notwendigkeit präventiven Hochwasserschutzes



Abbildung 1.1: Hochwasser in Venedig. Was in der Lagunenstadt zum Alltagsleben gehört, richtet andernorts beträchtlichen volkswirtschaftlichen Schaden an (© Andreas Riedmiller; Das Fotoarchiv Köln).

Die Stammesgeschichte der Menschheit ist seit jeher eng an die Nähe zum Wasser gebunden. Die Eroberung neuer Siedlungsgebiete erfolgte häufig entlang von Küsten und Flussläufen. Die Flüsse dienten zum einen als idealer Transportweg, zum anderen garantierten sie die Verfügbarkeit des lebensnotwendigen Wassers. Auch das von periodisch wiederkehrenden Überschwemmungen betroffene Hinterland der Flüsse war

aufgrund seiner hervorragenden landwirtschaftlichen Eignung ein begehrtes Terrain für ackerbauliche Aktivitäten. Sowohl die frühen Hochkulturen des Zweistromlandes, als auch jene des Niltals verdankten ihr Aufblühen unter anderem der Nutzung dieser äußerst fruchtbaren Überschwemmungsareale (GERLACH & RADKE 1997). Den aus der Nähe zum Wasser resultierenden kulturellen Vorteilen stand jedoch schon immer die Gefahr katastrophaler Hochwasserereignisse gegenüber, die neben dem Totalverlust der materiellen Güter auch eine Bedrohung für Leib und Leben bedeuteten.



Abbildung 1.2: Oderhochwasser 1997 in der Zielendorfer Niesche. (© Sebastian Bolesch; das Fotoarchiv Köln).

Bereits die Sintflut, früheste und umfassendste Hochwasserkatastrophe des christlichen Wissenshorizontes, wurde einerseits als Strafe Gottes, andererseits aber auch als Chance des Neubeginns gesehen (HÖLDER 1989). Die Attraktivität des flussnahen Siedlungsraumes musste demnach stets gegen die Wahrscheinlichkeit und

Zerstörungskraft potentieller Hochwasser abgewogen werden. Aus diesem Grund wurde schon sehr früh mit der Dokumentation von Flutkatastrophen begonnen. Für den Rhein existieren Aufzeichnungen über extreme Hochwasserereignisse bereits seit dem 9. Jahrhundert (KRAHE 1997).



Abbildung 1.3: Deichbruch im Hamburger Stadtteil Jork während der Flutkatastrophe 1962 (© Fotoarchiv der Feldjäger; Bundeswehr der Bundesrepublik Deutschland).

Viele Hochkulturen unternahmen bereits in einer frühen Entwicklungsphase gewaltige Anstrengungen, um mit Hilfe von Eindeichungen ihren Siedlungs- und Kulturraum gegen die zumeist saisonal auftretenden Hochwasser abzuschotten (PLATE 1997). Andernorts hat man sich mit periodisch wiederkehrenden Überflutungen arrangiert (Abb. 1.1). Trotz aller zivilisatorischer und technischer Errungenschaften der Neuzeit ist es der Menschheit bis heute nicht gelungen, ihren Lebensraum dauerhaft und

zuverlässig vor den Gefahren katastrophaler Hochwasserereignisse zu schützen (Abb. 1.2, 1.3 und 1.4). EBEL (1997) gibt den weltweiten, im Zeitraum von 1991 bis 1995 durch Hochwasser entstandenen Schaden mit über 131 Milliarden US-Dollar, die Zahl der Todesopfer mit über 34 Tausend an.

Die auf eine zunehmende Bevölkerungsdichte zurückgehende Verknappung nutzbaren Landes wird zukünftig, vor allem in bereits dicht besiedelten Gebieten wie Mitteleuropa, mehr und mehr zur Nutzung von hochwassergefährdeten Arealen zwingen und einen verbesserten, effizienteren Hochwasserschutz unabdingbar machen. Die in Fachkreisen kaum noch ernsthaft bestrittenen Veränderungen des Weltklimas könnten die Menschheit dazu nötigen, binnen weniger Jahrzehnte weite Bereiche der von ihr genutzten Flächen einzudeichen und vor dem zerstörerischen Einfluss der ansteigenden Weltmeere zu schützen. BRONSTERT (1997) gibt einen Überblick der möglichen klimatogenen Hochwasserbeeinflussung. Neben der Veränderung des Klimas hat der Mensch in vielen Regionen durch Eingriffe in den natürlichen Wasserhaushalt die Gefahr katastrophaler Hochwasserereignisse erst geschaffen oder verschärft (OELMANN 1997).

Die jüngeren Hochwasser Mitteleuropas führen leider nur allzu deutlich vor Augen, wie schwierig ein wirkungsvoller Hochwasserschutz umzusetzen ist und mit welchen Gefahren und enormen Folgekosten ein Deichbruch verbunden sein kann. Die ökonomischste, mit dem Höchstmaß an Sicherheit verbundene Variante des Hochwasserschutzes ist demnach die aktive Prävention. Neben der hinreichenden Dimensionierung der Hochwasserschutzbauwerke ist deren regelmäßige Überprüfung hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit von größter Bedeutung. Sicherheitsrelevante Schwachstellen müssen bereits in einem möglichst frühen Stadium ihrer Entstehung erkannt und unschädlich gemacht werden, um die Wahrscheinlichkeit verheerender Überflutungsszenarien von vornherein zu minimieren. Bei der Überwachung der Betriebssicherheit von Erddämmen kommt den Geowissenschaften die entscheidende Schlüsselrolle zu. Sie bieten geeignete Arbeitsmethoden, um einerseits entstehende Schwachstellen zu orten und andererseits die Prozesse, die zur Entstehung der Schwachstellen beitragen, zu erkennen und zu beschreiben. Das Studium der sedimentär/diagenetischen Alterungsprozesse von Erddämmen sowie die zerstörungsfreie Erkundung der Dammkörper und ihres Untergrundes sind die

Grundlagen zum Bau und zur Instandhaltung sicherer, langlebiger Hochwasserschutzanlagen.



Abbildung 1.4: Landratsamt Kelheim während des Donauhochwassers 1999 (© CORI; Bürgernetz Kelheim e.V.).

1.2 Konzeptioneller Ansatz

Die Entstehung von Schwachstellen an Erddämmen ist kein Zufallsprodukt. Sie ist das Resultat ungünstiger, auf den Dammkörper einwirkender Umweltfaktoren, die im Verlauf der Diagenese zur Ausbildung sicherheitsrelevanter Schäden führen. Je umfassender die Kenntnisse um die Mechanismen und Auslöser der Schwachstellengenese sind, desto erfolgreicher können Konstellationen vermieden werden, die zur Entstehung von Sicherheitsrisiken beitragen. Die frühe Unterbindung destruktiver Diageneseprozesse ist das Ziel ökonomischen Dammmonitorings. Sind jedoch bereits sicherheits-

relevante Schwachstellen vorhanden, müssen diese ohne Ausnahme erkannt und neutralisiert werden. Denn nicht die durchschnittliche Beschaffenheit einer Dammstrecke entscheidet über deren Schutzfunktion, sondern stets deren schwächster Teilabschnitt. Genügt dieses schwächste Glied den Anforderungen im Belastungsfall nicht, wird die möglicherweise hervorragende Beschaffenheit des restlichen Damms bedeutungslos.

Häufig liegen über die strukturelle und lithologische Beschaffenheit von Erddämmen nur unzureichende Informationen vor. Viele Dämme sind über einen langen Zeitraum historisch gewachsen, wurden nach und nach erhöht und sind im Profil und entlang ihrer Längsachse sehr heterogen aufgebaut. Vor allem in der Vergangenheit wurde der Dammbau häufig zur Deponierung überflüssigen oder unwillkommenen Erdaushubs und auch Bauschutts genutzt, ohne die aus dieser Vorgehensweise erwachsenden Sicherheitsrisiken zu betrachten. Andere Dämme sind aus Sach- oder Finanzzwängen heraus von mangelhafter Substanz. Jedoch auch qualitativ hochwertige Dammanlagen unterliegen den diagenetischen Alterungsprozessen, die mit der Zeit zur Ausbildung von Schwachstellen führen können. Um alle diese potentiellen Gefahrenherde zu erfassen, müssen zur erfolgreichen Schwachstellenortung an Erddämmen möglichst engmaschige Untersuchungen, mit Rasterweiten von wenigen Metern, durchgeführt werden. Bohrungen und Schürfe lassen zwar einen direkten Blick auf die Beschaffenheit des Untergrundes und der Dammsubstanz zu und liefern eine Fülle punktueller Detailinformationen. Sie können jedoch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Substanzerhaltung nicht in derart engen Rastern durchgeführt werden. Ihre Positionierung erfolgt zumeist in einem willkürlich gewählten, starren Raster mit Abständen von einigen zehn bis einigen hundert Metern. Das Ergebnis ist ein grobmaschiges Informationsnetz, das neben punktuellen Detailinformationen erhebliche Informationslücken aufweist und das Aufspüren von Schwachstellen zu einem Glücksspiel werden lässt. So wurden beispielsweise auf Teilstrecken des östlichen Rheinseitendamms, sowohl am Dammfuß als auch auf der Dammkrone, Beobachtungspegel im Abstand von einhundert bis mehreren hundert Metern eingerichtet, in denen wöchentlich die Temperatur und der Wasserstand gemessen wird. Diese Informationen liefern zwar möglicherweise wichtige Anhaltspunkte für Veränderungen innerhalb des Dammkörpers, sie müssen jedoch, trotz ihres punktuellen Charakters, für die Beurteilung von einhundert bis mehrere hundert Meter Dammstrecke

herangezogen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine sicherheitsrelevante Veränderung der Dammsubstanz gerade in dem eng begrenzten Beobachtungsbereich eines Pegels abspielt ist gering, die bleibenden Informationslücken hingegen beträchtlich.

Um eine hohe räumliche Auflösung zu erreichen, ist die weniger detaillierte, jedoch flächendeckende Erfassung einzelner aussagekräftiger Parameter besser geeignet. Die zerstörungsfreie Erkundung ist das zeitgemäße und kostensparende Instrument zur Planung invasiver Untersuchungen und Instandhaltungsmaßnahmen. Sie kann sowohl vor dem Bau als auch vor Sanierungsarbeiten und zu turnusmäßigen Monitoringzwecken wirkungsvoll eingesetzt werden. Daneben dienen die zerstörungsfreien, ohne den Einsatz schweren Gerätes auskommenden Erkundungsverfahren der Substanzerhaltung und dem schonenden Umgang mit der beständig im Wert steigenden Ressource Natur.

1.3 Die Möglichkeiten der nicht invasiven Dammerkundung

Die Ursachenforschung der Entstehung von Schwachstellen an Erddämmen und deren zerstörungsfreie Erkundung stehen nicht in Konkurrenz zu den invasiven Untersuchungstechniken und ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen. Sie stellen vielmehr ein professionelles Instrument zur Vorbereitung invasiver Erkundungen und Instandhaltungsarbeiten, sowie zur Verwirklichung von Monitoringstrategien dar. Die Identifizierung und räumliche Eingrenzung destruktiver Diageneseprozesse bilden die Grundlage bereits vor dem Entstehen akuter Schädigungen greifender Instandhaltungsmaßnahmen. Die positive Beeinflussung der Alterungsprozesse soll helfen, die Standzeit eines Erddamms bei minimalem Kostenaufwand zu verlängern und anfallende Sanierungen zu verzögern.

Zur Bestimmung der Lage und Ausdehnung bereits vorhandener Schwachstellen werden bewährte Verfahren der Umweltgeophysik modifiziert und genau auf die speziellen Anforderungen der Schwachstellenortung an Erddämmen abgestimmt. Als geophysikalische Basismethode wird die Widerstandsgeoelektrik eingesetzt. Sie ist

weitgehend unempfindlich gegenüber störenden Einflüssen und spricht auf ein weites Spektrum möglicher Schwachstellen an. Ergänzend werden weitere, auf unterschiedliche und voneinander unabhängige Parameter ansprechende Erkundungsmethoden eingesetzt. Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit, strömungssensitive mit struktursensitiven Methoden zu kombinieren und ist erfolversprechender als die Aufnahme nur eines Untergrundparameters (BUTLER 1989; MILITZER 1989). ARMBRUSTER et al. (1989c) setzten erfolgreich eine Kombination von Widerstands-, Eigenpotential-, und Temperaturmessungen zur Schwachstellenortung an Erddämmen ein. MOLDOVEANU & SUCIU (1989) kombinieren Eigenpotential- mit Widerstandsmessungen. Eine weitere Erkundungstechnik der zerstörungsfreien Früherkennung von Schwachstellen an Erddämmen ist die Sichtprüfung (ARMBRUSTER et al. 1989c; LONDONG 1986). Insbesondere Veränderungen der Vegetation und der Deichmorphologie geben mitunter wertvolle Hinweise auf die Entstehung sicherheitsrelevanter Schwachstellen.

Anhand der kombinierten geologisch/geophysikalischen Erkundung werden einheitlich gestaltete Bereiche zusammengefasst und schwachstellengebundene Anomalien von ihrer unauffälligen Umgebung unterschieden. Die auf diese Weise gewonnenen Informationen bilden eine fundierte Entscheidungsgrundlage für weiterführende Erkundungen und die Durchführung von Sanierungsarbeiten.

2 Aufbau und Einsatz von Hochwasserschutzanlagen

In diesem Kapitel wird lediglich ein kurzer Einblick in die ingenieurwissenschaftliche Thematik des Erddammbaus gegeben. Von Interesse für die zerstörungsfreie Erkundung ist die Kenntnis der grundlegenden Konstruktionselemente einer Hochwasserschutzanlage sowie ein Überblick über das weite Spektrum der zum Erddammbau eingesetzten Materialien. Nach ihrem Einsatzzweck lassen sich drei Arten von Hochwasserschutzanlagen unterscheiden, deren unterschiedliche Funktionen in vielfältigen Aufbau- und Erscheinungsbildern ihren Ausdruck finden. Neben den nur ereignisabhängig eingestauten Küsten- und Flussdeichen werden die permanent eingestauten Stauhaltungsdämme kurz besprochen. Die Bauvorschriften sind innerstaatlich geregelt und müssen häufig an die regionalen oder lokalen Gegebenheiten angepasst werden. In der Bundesrepublik Deutschland sind die Industrienormen DIN 18300 und DIN 19700 maßgebend. Die Grundzüge der Vorgehensweise in den USA sind in POST et al. (1955) dargestellt. Neben den gesetzlichen Bestimmungen bildet der Erfahrungsschatz der am Erddammbau beteiligten Institutionen, Planungsbüros und Baugesellschaften häufig die Grundlage für die Auswahl der geeigneten Bauweise und Materialien.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Damm für alle Hochwasserschutzanlagen, ohne Rücksicht auf deren Aufbau oder Einsatzzweck verwendet. Als Deiche oder Erddeiche werden solche Anlagen bezeichnet, die lediglich temporär, ereignisgesteuert eingestaut werden. Als Stauhaltungsdämme werden die Dämme angesprochen, die dem permanenten Aufstau eines Gewässers dienen.

2.1 Küstendeiche

Die Küstendeiche, dem Hinterland vor katastrophalen Sturmfluten Schutz bietend, werden nur ereignisabhängig eingestaut. Meist sind beide Deichflanken der zerstörungsfreien Erkundung und der Sichtprüfung zugänglich. Sie sind im Lastfall starkem Wellenschlag ausgesetzt, gegen den sie besonders geschützt werden. Abb. 2.1 zeigt den schematischen Querschnitt eines gegen Wellenschlag geschützten Küstendeiches. Der flache Neigungswinkel der wasserseitigen Flanke lässt die Brandung auslaufen, ohne Schäden zu verursachen. Der zwischen Bemessungshochwasserstand und Deichkrone

liegende Freibord wird auch im Lastfall nicht beansprucht. Seine Höhe ergibt sich aus der angenommenen Wasserstandserhöhung in Folge von Windstau, plus der angenommenen Höhe des Wellenaufbaus, plus einem Sicherheitszuschlag. Weiterführende Informationen zum Aufbau von Seedeichen finden sich in BRÖSSKAMP et al. (1976).

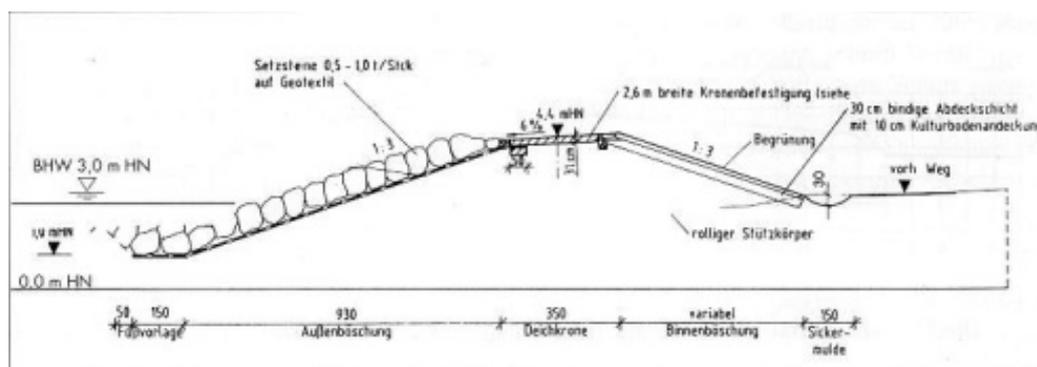


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Küstendeiches. (Quelle: Broschüre Küstenschutz, Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern).

2.2 Stauhaltungsdämme

Stauhaltungsdämme sind der permanenten Beanspruchung durch den Aufstau von See- oder Flusswasser ausgesetzt. Während Querdämme in der Regel technische Bauwerke darstellen und aus Materialien wie Stahlbeton oder massivem Mauerwerk bestehen, sind die Längs- oder Seitendämme entlang aufgestauter Flussläufe meist aus natürlichen Erdbaustoffen aufgebaut. Im Bereich der Uferlinie sind, insbesondere an der Schifffahrt zugänglichen Gewässern, die Dämme mit Grobklastika gegen Wellenschlag und Strömung geschützt. Neben der Qualität der hydraulischen Barriere des Dammes ist deren Anbindung an das nächste, im Liegenden anstehende, undurchlässige Schichtglied für die Funktionstüchtigkeit der Anlage von entscheidender Bedeutung (IDEL 1978; vergl. Abb. 2.2). Zwischen den gewässerbegleitenden Längsdämmen und den Flussdeichen besteht keine scharfe Grenze. Viele der Konstruktionsmerkmale sind

bei beiden Gruppen identisch. Die Stauhaltungsdämme müssen jedoch häufig qualitativ höherwertig aufgebaut werden, da sie einer Dauerbelastung durch permanenten Einstau ausgesetzt sind. Dies gilt sowohl für die hydraulische Barriere als auch für die Stützelemente.

2.3 Flussdeiche

Flussdeiche sind, im Gegensatz zu den Stauhaltungsdämmen, nur kurzzeitigen ereignisgesteuerten Belastungen ausgesetzt. Sie werden unter Umständen über Jahrzehnte hinweg nicht in Betrieb genommen und entziehen sich somit über einen langen Zeitraum der direkten Funktionskontrolle. Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Aufbau eines Flussdeiches mit den wichtigsten Konstruktionselementen. Der in Richtung Hinterland gelegene Seitengraben führt nur im Einstaufall Wasser. Er kann auch fehlen, ist jedoch meist Bestandteil von Stauhaltungsdämmen. Die zwischen Deichkern und geringdurchlässigem Schichtglied gelegene Dichtwand kann für die Funktionstüchtigkeit eines Deiches wie auch eines Dammes unerlässlich sein.

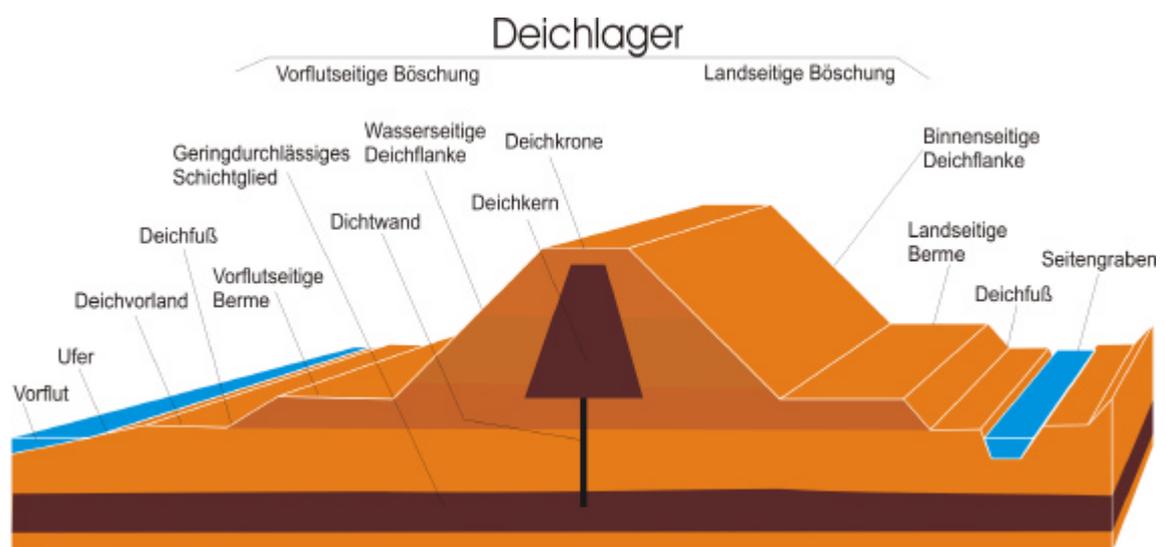


Abbildung 2.2: Konstruktionselemente eines Flussdeiches, von denen viele auch Bestandteil der Stauhaltungsdämme sind.

In Abhängigkeit ihrer Funktion werden nach LONDONG (1986) folgende Deicharten unterschieden:

Voll-, Bann- oder Hauptdeiche sind für große, seltene Hochwasser bemessen. Bei extremem Hochwasser werden jedoch auch sie überstaut.

Teilschutzdeiche werden für kleine und mittlere, jedoch häufiger auftretende Hochwasser konzipiert und schützen in der Regel landwirtschaftliche Nutzflächen.

Geschlossene Deiche sind ober- und unterstrom an hochliegendes Gelände angeschlossen.

Offene Deiche schließen oberstrom an hochliegendes Gelände an und werden unterstrom landseitig eingestaut.

Ringdeiche umschließen das zu schützende Gelände vollständig.

Flügeldeiche verbinden gewässerbegleitende Deichstrecken mit hochliegendem Gelände.

Leitdeiche geben dem Hochwasserabfluss die gewünschte Richtung.

Schardeiche schließen unmittelbar an das Flussufer, ohne Vorlandabschnitt, an.

Rückstauedeiche beginnen am Deich des Hauptgewässers und begleiten einmündende Nebengewässer so weit, dass durch Rückstau keine Überflutung des zu schützenden Gebietes eintreten kann.

Qualmdeiche umschließen von Durchsickerung gefährdete Strecken.

Schlafdeiche dienen als zweite Deichverteidigungslinie.

Binnendeiche unterteilen zu schützende Gebiete, um bei Überflutung die Schäden räumlich zu begrenzen.

Notdeiche werden in akuten Gefährdungssituationen mit einfachen Mitteln errichtet.

Hochwasserschutzwände ersetzen Deiche in Bereichen akuten Platzmangels.

2.4 Dammbaumaterialien

Das Spektrum der zum Erddammbau verwendeten Materialien ist außerordentlich breit. Es reicht von aus Mikrometergroßen Partikeln aufgebauten Tonen bis hin zu tonnenschweren Blöcken. Häufig sind Erddämme heterogen, aus mehreren unterschiedlichen Materialien aufgebaut, deren Eigenschaften erst im Verbund die Funktionstüchtigkeit des Damms herstellen. Über längere Strecken homogen aufgebaute Hoch-

wasserschutzanlagen sind weniger häufig. Nur selten steht das hierzu notwendige Material mit hinreichend geringer Durchlässigkeit und den notwendigen statischen Eigenschaften in ausreichender Menge zur Verfügung. Die Unterteilung in Dammkern und Deckschicht ist ebenso gebräuchlich wie der lagige Aufbau, der vor allem bei sukzessive erhöhten Dämmen vorherrscht. Generell wird zwischen Materialien, die eine dichtende Wirkung gegenüber der Durchströmung haben und Materialien, die eine Stützfunktion erfüllen, unterschieden. Als weitere funktionelle Einheit können im Abstrombereich der Dichtung auch besonders gut durchlässige Dränelemente in oder unter dem Dammkörper eingebaut werden. Auch Verbauungen gegen Wellenschlag und Wegbeschotterungen stellen zusätzliche Einheiten dar.

Die hydraulische Barriere wird wasserseitig (Abb. 2.1 und 2.3 links) oder im zentralen Teil des Dammkörpers (Abb. 2.2 und 2.3 rechts) eingebaut. Gebräuchlich sind künstliche Materialien wie PVC-, HDPE- und andere Folien (DVWK 1986), Asphalt (BEHRENS & BORMANN 1974; ZITSCHER 1983), Beton (LONDONG 1986), Ton/Zementgemenge in Form von Schlitz- oder Schmalwänden (CARL & STROBL 1976; Strobl 1982), Stahl (IDEL 1978) und geringdurchlässige Erdbaustoffe.



Abbildung 2.3: Hydraulische Barrieren. Wasserseitige Oberflächendichtung (links A). Dichtungsteppich (links A'). Zentrale Dichtung (links B). Kerndichtungen (rechts) mit zunehmender Durchlässigkeit von A nach C.

Die Kriterien für die Eignung einer aus Erdbaustoffen aufgebauten Dichtung sind geringe Durchlässigkeit, in Verbindung mit hinreichenden statischen Eigenschaften. Das eingebaute Lockersediment muss auch wassergesättigt der mechanischen Bean-

spruchung des Einstaus standhalten. Die geringere Dichtwirkung gröberkörniger Sedimente kann, in gewissen Grenzen, durch die Verbreiterung des Dichtelements ausgeglichen werden (Abb. 2.3 rechts). Die Verringerung der Durchlässigkeit wird zudem durch eine höhere Verdichtung erreicht. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben werden auch feinsandige Stahlwerkschlacken, als Bergematerial im Bergbau anfallender Schieferbruch und Feinsande als Abdichtungen eingebaut (LONDONG 1986).

Die Stützelemente nehmen die auf den Dammkörper einwirkenden mechanischen Kräfte auf. Sie müssen dieser Belastung sowohl im wasserungesättigten Zustand als auch im wassergesättigten standhalten. Auch die Resistenz gegenüber destruktiven Diageneseprozessen ist ein Kriterium, das bei der Auswahl der dammaufbauenden Materialien eine Rolle spielt. Verbauungen gegen Wellenschlag und Strömung müssen ausgesprochen erosionsresistent sein und sind deshalb aus grobkörnigen Bestandteilen mit hohem Partikelgewicht aufgebaut. Sie erfüllen dann ihren Zweck, wenn sie der Schleppkraft des angreifenden Fluss- oder Meerwassers widerstehen. Sowohl natürliche, aus kristallinem oder sedimentärem Gestein aufgebaute Blöcke als auch Formteile aus Beton finden Verwendung.

Welche Materialien letztlich als zum Dammbau geeignet eingestuft werden, hängt, neben den Materialkennwerten, von deren ausreichender Verfügbarkeit ab. Aufgrund der enormen Materialmengen, die zum Aufbau von küsten- und flussbegleitenden Dämmen und Deichen notwendig sind, werden auch weniger geeignete Materialien eingesetzt, die jedoch verfügbar und auch bezahlbar sind. Abbildung 6.2 zeigt das Beispiel eines Dammes, dessen Kern nur zum Teil aus geeigneten, geringdurchlässigen Materialien aufgebaut werden konnte. Auf der Luftseite wurde eine trapezförmige Partie des Kerns mit gröberkörnigem Material ergänzt, das die gewünschte geringe Durchlässigkeit nicht aufweist. Die Problematik, geeignetes Material in ausreichender Menge für den Erddammbau bereitzustellen, muss von Ingenieuren auf der ganzen Welt bewältigt werden. Ihnen obliegt die verantwortungsvolle Aufgabe zu entscheiden, mit welchem Aufwand das notwendige Maß an Sicherheit erreicht werden kann.

Ob und in welcher Menge geeignetes Material zur Verfügung steht, hängt von der geologischen Entstehungsgeschichte des jeweiligen Gebietes und den daraus hervorgegangenen Gesteinen ab. Steht kein geeignetes Gestein in der passenden Korngröße

zur Verfügung, wird auch Gesteinsbruch in Form von Splitt oder Schotter zum Bau verwendet. In der jüngeren Vergangenheit finden auch wiederverwertete Materialien, wie aufbereiteter Bauschutt, mineralische Klärrückstände und Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen und Hochöfen, im Erddammbau Verwendung. Neben der bautechnischen Eignung muss auch die Umweltverträglichkeit dieser Stoffe nachgewiesen werden (LONDONG 1986). Bei der Betrachtung längerer Dammstrecken muss aus den angeführten Gründen stets mit dem sich ändernden Aufbau des Dammkörpers und des Untergrundes gerechnet werden. Der obere Deich in Abbildung 2.4 ist, von der dünnen Deckschicht aus Mutterboden abgesehen, homogen aufgebaut. Das mittlere Profil wird von Lagen und lateral begrenzten Elementen unterschiedlicher Beschaffenheit aufgebaut. Unten ist das Profil eines nachträglich erhöhten Streckenabschnitts dargestellt. Die ehemalige Oberfläche ist in Form einer zweiten Mutterbodenschicht in 60 cm Tiefe erhalten.

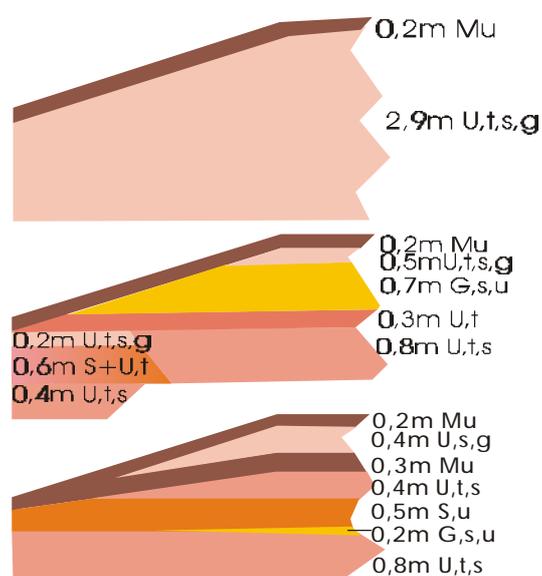


Abbildung 2.4: Querprofile eines Deiches auf einer Strecke von 600 Metern. Hochwasserrückhalteanlage der Rench bei Wagshurst in Baden (Abbildung nach Unterlagen des Amtes für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Offenburg). Mu= Mutterboden, U= Silt, S= Sand, G= Kies, t= tonig, u= siltig, s= sandig, g= kiesig.

Für die Entstehung von Schwachstellen spielt die Beschaffenheit und die Verteilung der dammaufbauenden Sedimente eine wichtige Rolle. Im Verlauf der Bauphase wird der Ausgangszustand für die anschließend ablaufenden diagenetischen Alterungsprozesse festgelegt, im Verlauf derer sich die Verwendung ungeeigneter Materialien zu ernsthaften Sicherheitsrisiken entwickeln können.

3 Die Diagenese von Erddämmen

Unmittelbar nach dem Errichten eines Erddammes beginnt dessen Diagenese. Sie ist das Resultat der auf den Dammkörper einwirkenden Alterungsprozesse, die von einer großen Zahl unterschiedlichster Umweltfaktoren abhängen. Die diagenetischen Prozesse sind nur selten der direkten Beobachtung zugänglich und laufen zum Teil mit nur sehr geringen Geschwindigkeiten ab. Diese beiden Faktoren führen zu dem trügerischen Bild eines starren, nach seiner Errichtung keinen nennenswerten Veränderungen mehr unterworfenen Dammkörpers. Die genauere Betrachtung der Diagenese widerlegt jedoch diese Sichtweise. Wie jeder andere geologische Körper unterliegen auch Erddämme zahlreichen dynamischen Prozessen, und ihre sicherheitsrelevanten Eigenschaften sind der stetigen Veränderung unterworfen. Neben dem schädigenden Einfluss können sich diverse Umweltfaktoren auch positiv auf Standsicherheit und Lebensdauer auswirken. Zu den konstruktiven Alterungsprozessen zählt insbesondere die Erniedrigung der Durchlässigkeit und die Ausbildung protektiver Pflanzendecken.

Die Identifizierung voranschreitender, destruktiver Entwicklungen ist für das frühzeitige Abwenden potentieller Sicherheitsrisiken eine Grundvoraussetzung. Je umfassender die Kenntnisse um die Mechanismen und Auslöser der Schwachstellengenese sind, desto erfolgreicher können bereits im Vorfeld akuter Schädigungen Sicherheitsrisiken vermieden werden. Die Entstehung der Schwachstellen kann schlagartig eintreten oder sich über Jahre und Jahrzehnte hinziehen.

3.1 Umweltfaktoren

Jede aus Erdbaustoffen errichtete Hochwasserschutzanlage ist in ein Netz aus zahlreichen, sich gegenseitig und das Dammbauwerk beeinflussenden Umweltfaktoren eingebunden. Die Wirkung mancher Umweltfaktoren auf das Alterungsverhalten ist eindeutig als positiv oder negativ einzustufen. Die Wirkung Anderer hingegen ist stark vom Umfeld abhängig, innerhalb dessen sie aktiv sind.

3.1.1 Geogene Faktoren

Die lithologische und strukturelle Beschaffenheit des Untergrundes ist ein grundlegendes Kriterium für die Standsicherheit jeden Dammes. Keine noch so hochwertige Hochwasserschutzanlage wird ihren Zweck erfüllen, wenn nicht ihr Untergrund den gleichen Anforderungen an die Standsicherheit und Belastbarkeit genügt. Neben der Fazies des Untergrundes ist die endogene Dynamik für die Betriebssicherheit von Hochwasserschutzanlagen von Bedeutung.

3.1.1.1 Tektonik

Von tektonisch induzierten Destruktionsprozessen ist stets der komplette Damm betroffen. Ihre Ursache liegt in der Verschiebung starrer Segmente der Erdkruste gegeneinander. Die Bewegungen der Lithosphärenplatten werden durch das entlang der mittelozeanischen Rücken aufsteigende, spezifisch leichtere und das im Bereich der Subduktionszonen absteigende, schwerere Magma hervorgerufen (FRISCH & LOESCHKE 1993). Diese Konvektionszellen erstrecken sich möglicherweise über den Erdmantel hinaus weiter in das Erdinnere bis zum Erdkern (SCHMIDT & WALTER 1990). Einen Überblick über die vielseitigen Erscheinungsformen tektonischer Aktivitäten im Verlauf der Erdgeschichte Europas sowie die derzeit gefährdeten Gebiete geben SCHÖNENBERG & NEUGEBAUER (1987).

Die endogene Dynamik der Erde ruft Bewegungen der starren Lithosphärenplatten im Bereich von Millimetern bis wenigen Zentimetern pro Jahr hervor. Bedenkt man die zumeist unbegrenzten Standzeiten der Erddämme wird deutlich, dass auch die sehr langsamen tektonischen Bewegungen durchaus ein Sicherheitsrisiko im Hochwasserschutz darstellen. Besonders gefährdet von der Schwachstellenbildung sind jene Dammstrecken, die eine tektonisch aktive Zone queren. Die Lage tektonischer Bruchzonen im Raum und deren Erstreckung wird mit den von FLICK et al. (1988) beschriebenen Arbeitsmethoden charakterisiert. Die an sich sehr langsamen tektonischen Bewegungen laufen jedoch nicht immer kontinuierlich ab, sie können sich auch in Form von lithosphärischen Spannungszuständen über längere Zeit aufstauen und sich

dann in Form von Erd- oder Seebeben spontan innerhalb weniger Sekunden oder Minuten entladen und zu disaströsen Szenarien führen.

3.1.1.2 Die Fazies des Untergrundes

Die Fazies des Untergrundes spiegelt dessen Genese und momentanen Zustand wieder. Die faziellen Eigenschaften wirken sich sowohl auf die Statik als auch auf die Hydrodynamik aus. Die Durchlässigkeit von Lockersedimenten ist von deren Porenanteil, der Porengeometrie und dem Vernetzungsgrad der Poren abhängig (READING 1986), jene von Festgesteinen von noch vorhandenem Porenvolumen, von Lösungshohlräumen und zumeist in erster Linie von der Klüftung des Gesteins (MATTHEß & UBELL 1983).

Häufig besteht der Untergrund von Flussdämmen aus alluvialen Sedimenten, die eine große Zahl unterschiedlichster Ablagerungsräume repräsentieren (STANLEY 1994; READING 1986; KNIGHTON 1998), ein weites Faziesspektrum aufweisen und sich durch rasche laterale und vertikale Fazieswechsel auszeichnen. Mit Blick auf die Bedeutung für die statischen und hydrodynamischen Eigenschaften eines Dammes kann die Charakterisierung derart reich gegliederter Untergründe nur flächendeckend, in engsten Rastern durchgeführt, gelingen. So kann die Ursache von Unterströmungen in grobkörnig verfüllten, nur wenige Meter breiten Rinnen oder der fortschreitenden Verwitterung eines an organischem Material reichen Schichtgliedes liegen. Auch eng begrenzte Bruchzonen und Bereiche, die stark von chemischer Lösung betroffen sind, stellen mögliche Ursachen lokaler Unterströmungen dar.

Die primären Faziesmerkmale der oberflächennahen Sedimente, insbesondere die Gefügeeigenschaften, sind häufig diagenetisch überprägt. Bestimmende Faktoren sind die Pedo-, Cryo- und die Bioturbation (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 1992). Sowohl die hydromechanischen als auch die statischen Eigenschaften des Untergrundes können der Veränderung während des Deichbaus oder des Betriebes einer Hochwasser-schutzanlage unterliegen.

3.1.2 Biogene Faktoren

Erddämme sind häufig Bestandteil mehr oder minder naturbelassener Lebensräume. Die hochdifferenzierten Auelandschaften bieten beispielsweise einer großen Zahl diverser Pflanzen- und Tiergesellschaften Lebensraum (HENTSCHEL & ROTH 1997). Den flussnahen Landstrichen als Retentionsraum wird mehr und mehr Beachtung beigemessen, und zu deren Schutz und Renaturierung sind vielerorts umfangreiche Maßnahmen im Gange (KOENZEN 1997). Ein naturbelassener Erddamm kann als Teil des Ökosystems Aue oder als eigenständiges Ökosystem im Sinne STANLEYS (1994) aufgefasst werden. Viele der auf oder in einem Erddamm lebenden Spezies nehmen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung ihres Lebensraumes. Sowohl Vertreter des Pflanzen- als auch des Tierreiches können die Eigenschaften einer Hochwasserschutzanlage zum Positiven oder zum Negativen hin beeinflussen. Ob sich die Aktivitäten einer Art destruktiv auf die Alterungsprozesse eines Erddamms auswirken, ist, neben der Überlebensstrategie der jeweiligen Art, nicht zuletzt von deren Populationsdichte abhängig. ZIEGLER (1986) benennt die für die Besiedlungsdichte grundlegenden Faktoren.

3.1.2.1 Der Einfluss der Flora

Die Auswirkungen der Vegetation auf die Betriebssicherheit ist stark vom Habitus der beteiligten Arten abhängig. Generell bieten kurzwüchsige, flach wurzelnde Vergesellschaftungen mit filigranem, reich verzweigtem Wurzelwerk den besten Schutz gegenüber der Erosion, bei einhergehender minimaler Schädigung des Dammkörpers. Insbesondere Grasdecken bieten einen wirksamen, flächendeckenden Schutz. Von deren eng vernetztem Wurzelwerk werden mechanische Spannungen aufgenommen. Der oberirdische Teil der Gräser reduziert zudem wirksam die Strömungsgeschwindigkeit und die Erosionskraft des abfließenden Wassers in Bodennähe. Die schützende Wirkung des Bewuchses kann durch gezielte Instandhaltungsmaßnahmen gefördert werden (SCHARFF 1999).

Robusteres Wurzelwerk führt in der Wachstumsphase zunächst zur Verdichtung der Wurzelumgebung. Mit fortschreitender Substratverdrängung setzt jedoch, vor allem oberflächennah, Rissbildung und Gefügelockerung ein. Solange sie wachsen, wirken sich die Wurzeln im Sinne einer Durchlässigkeitserniedrigung eher günstig auf die hydrodynamischen Eigenschaften aus. Von den Wurzeln geht außerdem eine protektive, Hangrutschungen verhindernde Ankerwirkung aus. Nach dem Absterben setzt jedoch unweigerlich deren natürlicher Zersetzungsprozess ein. Dieser resultiert in der Bildung von Hohlräumen, die das Durchströmungsgeschehen nachhaltig beeinflussen und Ausgangspunkt für die Schwachstellenbildung sein können. Mit zunehmender Robustheit, Eindringtiefe und lateraler Erstreckung des Wurzelwerks nimmt die Gefahr von sicherheitsrelevanten Schädigungen zu. Von der Durchwurzelung ist mitunter der komplette Deichkörper betroffen. Abbildung 3.1 zeigt austretende Wurzeln knapp oberhalb der Niedrigwasserlinie auf der vorflutseitigen Deichflanke. Die verursachende Buche steht auf der luftseitigen Deichflanke. Die Wurzeln haben einen Durchmesser von bis zu mehreren Zentimetern.



Abbildung 3.1: Wurzelaustritt an einem Erddeich. Die weiße Kontrastfläche ist etwa 40 x 40 Zentimeter groß. Sandbach bei Bühl / Baden.

Die in der Vorflut und den Seitengräben wachsenden, mitunter diversen Wasserpflanzengesellschaften beeinflussen die Strömungsgeschwindigkeit und das Abflussverhalten. Starkes subaquatisches Pflanzenwachstum kann zu binding- oder trapping-Vorgängen führen, im Verlauf derer die Suspensionsfracht biogen gebunden (binding) oder aufgrund der erniedrigten Strömungsgeschwindigkeit aus der Suspension abgesetzt wird. Die subaquatische Vegetation wirkt dann als Sedimentfalle (trapping). Das Resultat ist ein verringerter Abflussquerschnitt.

Höherwüchsige, dicht stehende Pflanzengemeinschaften können die Möglichkeiten der Früherkennung von Schwachstellen im Rahmen von Sichtprüfungen und geophysikalischen Erkundungen, sowie das Eingreifen in Krisensituationen stark einschränken.

3.1.2.2 Der Einfluss der Fauna

Die augenfälligsten, von Faunenelementen verursachten Schädigungen sind die Bauten und Gangsysteme der Rodentia oder Nagetiere. Problematisch ist vor allem das massenhafte Auftreten von ursprünglich nicht in Europa beheimateten Arten wie Bisam- und Biberratte (REMANE et al. 1986), die großvolumige Baue und Gangsysteme im Inneren der Dammkörper anlegen. Während sich in bindigem Material das Volumendefizit weitgehend auf das einmalige Anlegen der Baue beschränkt, ist in grobkörnigen Lockersedimenten mit dem ständigen Nachstürzen von Material aus dem Hangenden und mit der anschließenden Ausräumung durch die Bewohner des Baues zu rechnen. In diesem Fall beträgt der biogene Materialaustrag ein Vielfaches des Volumens, die Schädigungen sind weitaus größer.

Weit in den Dammkörper reichende Wohnbauten stellen bevorzugte Fließwege und potentielle Ausgangspunkte für Suffosions-, Kompaktions- und Setzungsprozesse dar. Unter den Cricetidae, zu denen auch die Bisamratten gezählt werden, sind Vertreter der Wühlmäuse bekannt, die in einer Tiefe von 50 Zentimetern weit verzweigte Gangsysteme von bis zu 80 Metern Länge anlegen (REMANE et al. 1986). Kleinere, vernetzte Grabgänge begünstigen die Entwässerung der deichaufbauenden Sedimente. Eine hohe Grabgangdichte resultiert in erhöhten Durchlässigkeitswerten und weist dem betrof-

fenen Bereich die mitunter der Standsicherheit dienenden Attribute einer Dränschicht zu. LONDONG (1986) zeigt Möglichkeiten der Bekämpfung bei substanzschädigendem Wühltriebfall auf. Neben dem Bejagen und Ködern ist die Ansiedlung der natürlichen Feinde der Schädlinge eine Möglichkeit der Dezimierung.

3.1.3 Anthropogene Faktoren

Der Einfluss des Menschen auf die zeitliche Entwicklung von Erddämmen erstreckt sich auf die Nutzung und Instandhaltung. Wird der Substanzerhaltung keine Bedeutung zugemessen, können die Nutzung der Hochwasserschutzanlagen und unsachgemäße Instandhaltungsmaßnahmen zu erheblichen Sicherheitsrisiken führen. Umfangreiche Angaben zur Nutzung und Instandhaltung von Flussdeichen finden sich in LONDONG (1986).

Häufig haben Dämme aufgrund ihrer Nähe zum Wasser einen erheblichen, jedoch auch problembehafteten Naherholungswert. Das permanente Befahren mit schweren Motorfahrzeugen bedingt unerwünschte Masseverlagerungen und führt zu Kompaktions- und Setzungsschäden oder Rissbildung. Motorfahrzeuge und die Kultur bodenverdichtender Pflanzen können das Porenvolumen der obersten 45 Zentimeter der Deckschicht auf 3 Prozent reduzieren und so das Abflussverhalten und die Speicherkapazität des Untergrundes erheblich mitbestimmen (ENGEL 1997). Das Befahren der Deichflanken in regelmäßigen Abständen im Rahmen von Mäh- oder Wartungsarbeiten kann eine bereits vorhandene Pflanzendecke schwerwiegend schädigen oder den Erstbewuchs dauerhaft verhindern. Unbefestigte, von Mensch oder Tier angelegte Trampelpfade auf Deichflanken schädigen die Vegetationsdecke bis hin zur völligen Zerstörung und bieten der Erosion bevorzugte Angriffspunkte.

Die Schifffahrt beansprucht die Stauhaltungsdämme in Form lateraler Stöße an Kaianlagen und anderen Anlegestellen sowie durch die Erzeugung von Wellenschlag und Strömungen. Auch das Einleiten der Abgase von Schiffsmotoren ins Wasser und die damit einhergehende Erzeugung schwacher seismischer Wellen trägt zur mechanischen Beanspruchung eines Dammkörpers bei.



Abbildung 3.2: Wartungsarbeiten an einem Flussschiff. Der Aushub (blau) wird aus dem Niedrigwasserquerschnitt entfernt und erneut innerhalb des Hochwasserquerschnitts deponiert (Pfeilspitzen). Sandbach in Bühl / Baden.

Um den notwendigen Abflussquerschnitt zu gewährleisten, sind Aushubarbeiten im Sohlbereich der Vorflut notwendig. Hier wird sowohl das im Kronenbereich erodierte als auch antransportiertes Sediment akkumuliert. Häufig wird das ausgeräumte Material jedoch erneut innerhalb des Flussprofils deponiert (Abb. 3.2). Diese Art der Wartung dient rein kosmetischen Zwecken und bringt keine Verbesserung des Abflussverhaltens im Hochwasserfall. Günstiger ist die Deponierung außerhalb des Flussprofils (Abb. 3.3). Hierbei wird der Abflussquerschnitt vergrößert, das ausgeräumte Material wird jedoch ohne jeden weiteren Nutzen deponiert. Eine zusätzliche Schutzwirkung wird durch die gezielte Verstärkung des Deichkörpers von der Luftseite her an zuvor ermittelten Schwachstellen erreicht. Das ausgeräumte Material weist meist einen erheblichen Gehalt an organischer Substanz auf. Wird dieses Substrat lediglich zur Erhöhung der Auflast eingesetzt, spielen die im Verlauf der Verrottung entstehenden Hohlräume keine Rolle. Sie verleihen dem Sediment den möglicherweise sehr

erwünschten Charakter einer Dränschicht. Er wirkt sich schützend gegenüber Deichschäden in Folge inneren Überdrucks, im Sinne LONDONGS (1986), bei regressivem Hochwasser aus.

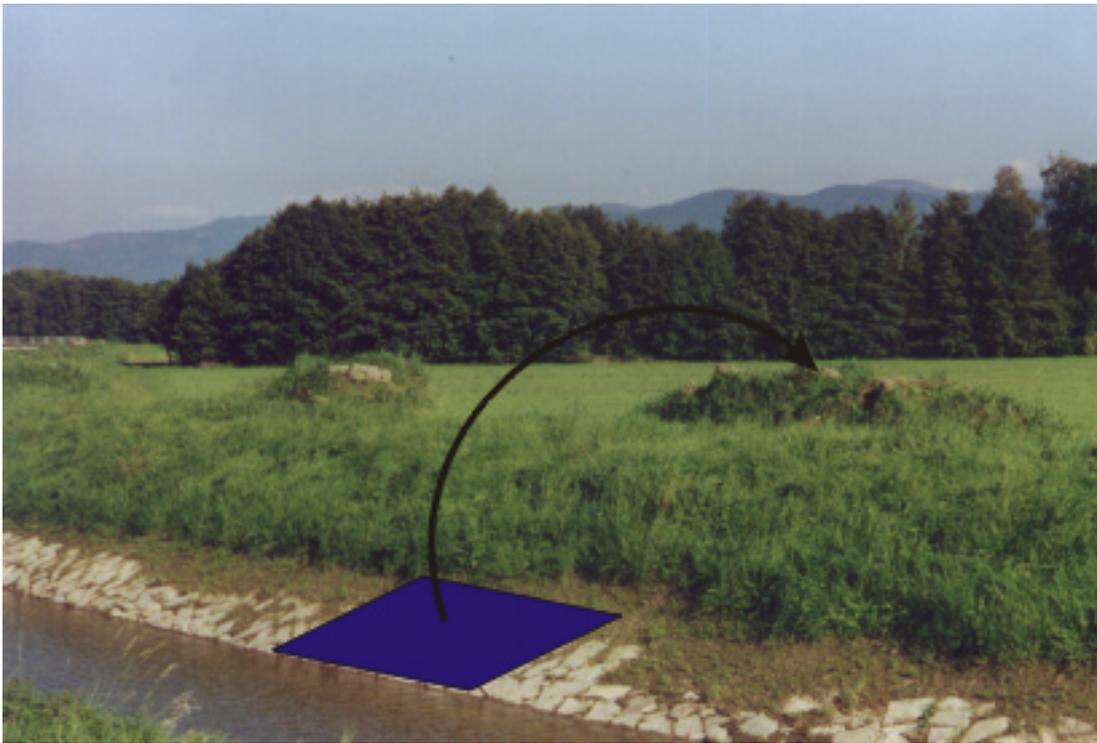


Abbildung 3.3: Deponierung des Sohl- und Flankenaushubs außerhalb des Flussprofils. Sasbach-Flutkanal bei Achern / Baden.

Wird jedoch vorflutseitiger Einbau und eine zusätzliche dichtende Wirkung angestrebt, ist die Zwischenlagerung bis zur Verrottung der organischen Substanz notwendig. Der Abbau organischen Materials wird durch lockere Lagerung unter aeroben Bedingungen gefördert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

3.1.4 Klimatische Faktoren

Das Klima stellt eine essentielle Randbedingung für alle Vorgänge in der Geo- und Biosphäre dar. Es beeinflusst die vom Niederschlag bestimmten hydromechanischen Transportprozesse ebenso wie die geochemischen und physikalischen Ab- und Umbauprozesse. Die mechanische Zerkleinerung führt zur Vergrößerung der Reaktionsflächen und begünstigt die chemischen Prozesse (MATTHES 1990). Die chemische Lösung gewinnt immer dann an Bedeutung, wenn untersättigtes Wasser auf frische, zur Ionenabgabe bereite Partikeloberflächen trifft (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992). Auch auf Zusammensetzung und Besiedlungsdichte der Flora und Fauna üben die klimatischen Verhältnisse einen wichtigen Einfluss aus.

3.1.4.1 Temperatur

Die Temperaturverhältnisse eines Erddamms werden vom Strahlungshaushalt der Sonne bestimmt. Die Wärmezufuhr aus dem Erdinneren spielt eine zu vernachlässigende Rolle. Der Wärmetransport erfolgt zum einen konduktiv über das Korngerüst und die fluide Phase, zum anderen konvektiv über mobile Sickerwässer und die zirkulierende Bodenluft. Neben einem Tagesgang folgen die Isothermen einem saisonalen Gang. Beide Verläufe zeigen zur Tiefe hin einen zeitlichen Versatz gegenüber den Bedingungen an der Oberfläche (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992; WEISCHET 1988).

Lokal ist das variable Zusammenwirken der Transportmechanismen, Morphologie, Exposition und der thermischen Materialkennwerte von Bedeutung. Des weiteren ist die Albedo der Deckschicht und die abschirmende Wirkung des Bewuchses, die den Energieeintrag um bis zu 90 Prozent reduzieren kann, für die Bodentemperatur ausschlaggebend (RICHTER 1986). Die Temperaturbedingungen sind häufig entscheidend für viele physikalische und chemische Vorgänge in der Geosphäre. Dies gilt auch für wichtige Destruktionsprozesse wie die mechanische Verwitterung (RICHTER 1986) und die chemische Lösung (LATSCHA & KLEIN 1990; KUNZE & SCHWENDT 1996). Die mit dem Einfrieren des Bodenwassers einhergehende Cryoturbation kann entscheiden-

den Einfluss auf die Gefügeeigenschaften des oberflächennahen Erdreichs ausüben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

3.1.4.2 Niederschlag

Der Niederschlag bestimmt Menge und zeitliches Auftreten des dem Grundwasser zufließenden, deszendenten Sickerwassers. Die Menge des infiltrierten Niederschlags ist stets größer als die dem Grund- oder Druckwasser zufließende Menge, da im Verlauf der Perkolation Kapillar- und Adsorptionswasser im durchflossenen Sediment verbleiben (HÖLTING 1996). Der Niederschlag fließt nicht zwingend unmittelbar nach dem Erreichen der Oberfläche ab oder infiltriert das Erdreich, er kann auch in Form von Schnee, Interzeption oder Senkenspeicherung zwischengespeichert werden. Die niederschlagsbedingte Erhöhung des Grundwasserspiegels und die damit einhergehenden erhöhten hydraulischen Gradienten verstärken die Suffosionsvorgänge.

Bei hinreichender Transportkraft ist der oberirdische Niederschlagsabfluss mit Erosion verbunden. Insbesondere nicht bewachsene Dammlanken, wie sie unmittelbar nach der Errichtung oder nach Sanierungsmaßnahmen auftreten, werden von der Erosion gefährdet. Einzelne Starkregenereignisse sind in der Lage, gravierenden Einfluss auf die vertikale Durchlässigkeit auszuüben. KNIGHTON (1998) berichtet von einer Durchlässigkeitsabnahme von fünfzig Prozent innerhalb einer mittelsandigen Deckschicht nach einem einzelnen, halbstündigen Starkregenereignis.

Im regionalen Maßstab beeinflussen die Niederschlagsverhältnisse Häufigkeit, Dauer und Intensität der Einstauereignisse von nicht permanent eingestauten Deichen. In kleinen Einzugsgebieten mit hoher Abflussbereitschaft führen einzelne Starkregen zu Hochwasserereignissen, in großen Einzugsgebieten sind dies länger anhaltende Dauerregen (ENGEL 1997).

4 Diagenetische Sedimentdynamik

Unter dem Begriff diagenetische Sedimentdynamik werden in dieser Arbeit alle hydrodynamischen und gravitativen Prozesse zusammengefasst, die nach der Bauphase zur Verlagerung der dammaufbauenden Lockersedimente beitragen.

4.1 Erosion

Die Erosion gehört zu den am besten untersuchten destruktiven Diageneseprozessen an Erddämmen. Sie greift den Dammkörper an seiner Oberfläche an, ist stets mit Volumendefizit verbunden und hinterlässt Rinnen oder Mulden.



Abbildung 4.1: Von Erosion betroffene Deichkrone. Im Bereich der ehemaligen Kante sind lediglich noch Residuale (dunkelgrau) im Mittel- bis Grobkiesbereich vorhanden. Der Feinkornanteil wurde erodiert. Deich des Wiescher Bachs bei Wiescherhöfen.

Umfangreiche allgemeine Informationen zu erosiven Prozessen, deren Verlauf und deren Wirkung finden sich in FÜCHTBAUER (1988), KNIGHTON (1998), PRESS & SIEVER (1986) und READING (1986).

Die Erosion an Erddämmen kann durch das eingestaute Wasser der Vorflut hervorgerufen werden und greift dann, mit Ausnahme von Überströmungen, die vorflutseitige Flanke in Richtung der Deichachse an. Normal zur Deichachse orientiert wirken Erosionsprozesse, die auf Niederschlagswasser, Leckagewasser oder überlaufendes Wasser der eingestauten Vorflut zurückgehen. Die Erosion verläuft rückschreitend, gegen die Fließrichtung des abströmenden Wassers und kann die Deichmorphologie nachhaltig verändern. Reicht die Transportkraft des abströmenden Niederschlagswassers nicht aus, um die Deckschicht vollständig zu erodieren, verbleiben die schwereren erosions-resistenten Komponenten an Ort und Stelle und bilden grobkörnige Residuale (Abb. 4.1).

Die erodierten Sedimente werden in der Vorflut oder den Seitengräben abtransportiert, oder im Bereich des Deichfußes mit abnehmenden Reliefgradienten sedimentiert. Erosion in Form von Rutschungen kann durch die Verringerung des Abflussquerschnitts zum Aufstau der Vorflut und in der Folge zu Überflutungsereignissen führen (ENGEL 1997).

4.2 Suffosion

Die Suffosion greift den Dammkörper in seinem Inneren an und ist der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Die substanzzehrenden Prozesse können Jahre, möglicherweise sogar Jahrzehnte unerkannt wirken, um dann spontan zu einer sichtbaren Schädigung zu führen. Von den suffosiven Transportvorgängen kann sowohl der Dammkörper selbst, als auch der vom Druckwasser durchflossene Teil des Untergrundes betroffen sein. LONDONG (1986) und KNIGHTON (1998) erläutern die Prozesse und Auswirkungen der Suffosion. Die mit Massenverlagerung verbundenen damminernen Transportprozesse beginnen in Bereichen höherer Durchlässigkeit und pflanzen sich, ebenso wie die rückschreitende Erosion, gegen die Strömungsrichtung in das

weniger durchlässige Medium fort. Ausgangspunkt sind Hohlräume aller Art, grobporige Sedimente oder die Sedimentoberfläche.

Anzeichen für Suffosion bestehen in feinkörnigen, kegelförmigen oder flächigen Sedimentakkumulationen im Bereich des landseitigen Deichfußes, Druckwasserkanals oder des unmittelbaren Hinterlandes, die keinem oberirdischen Liefergebiet zugeordnet werden können. Andere visuelle Indikatoren, wie etwa Muldenbildung, können unterschiedlichsten Ursprungs sein und stellen keine sicheren Indizien für suffosive Vorgänge dar.

Anhaltende Suffosion kann zunächst zur Entstehung von Makroporen, dann zur Ausbildung unterirdischer Röhren führen. Diese Röhren zeigen hangabwärts und mit fortschreitendem Materialaustrag einen höheren Vernetzungsgrad (ANDERSON & BURT 1990) und stellen bei fortdauernder Entwicklung ein zunehmendes Sicherheitsrisiko dar. Auf die Matrix beschränkte suffosive Prozesse in komponentengestützten Gefügen treten morphologisch nicht in Erscheinung. Sie beeinflussen dennoch die statischen und hydraulischen Materialkennwerte.

4.3 Kompaktion

Kompaktion bezeichnet die auflastbedingte Verdichtung der Dammsubstanz oder des Untergrundes. Sie setzt als Reaktion auf erhöhte Druckbelastung in Folge des Dammbaus, des Einstaus, der erhöhten Sättigung mit Niederschlags- oder Druckwasser oder anthropogener Einflüsse ein. Verläuft die Kompaktion vollkommen und pflanzt sich vom Inneren bis zur Oberfläche des Dammes hin fort, äußert sie sich in Form von morphologischen Senken. Beschränken sich die kompaktiven Prozesse auf das Damminnere, ist Hohlraumbildung die Folge (Abb. 4.2). Die Kompaktion kann Sedimente aller Gefügetypen betreffen. Neben der Auflasterhöhung kommt als Ursache die Verschlechterung der statischen Eigenschaften der betroffenen Sedimentpartie in Folge von Alterung in Betracht. Die Standfestigkeit gegenüber der Auflast kann im Verlauf geochemischer Umbauprozesse, des Abbaus organischen Materials oder suffosiven Materialaustrags abnehmen. Die Kompaktion geht mit der Verringerung des

Porenvolumens und der auflastbedingten Erhöhung der Packungsdichte einher und ist nicht zwingend mit einer Substanzverschlechterung verbunden. Für die Betriebssicherheit problematisch sind vor allem auf das Bauwerkinnere beschränkte, also nur schwer erkennbare Kompaktionsprozesse. Sie können mit Hohlraumbildung einhergehen und Ausgangspunkte destruktiver Sedimentdynamik sein.

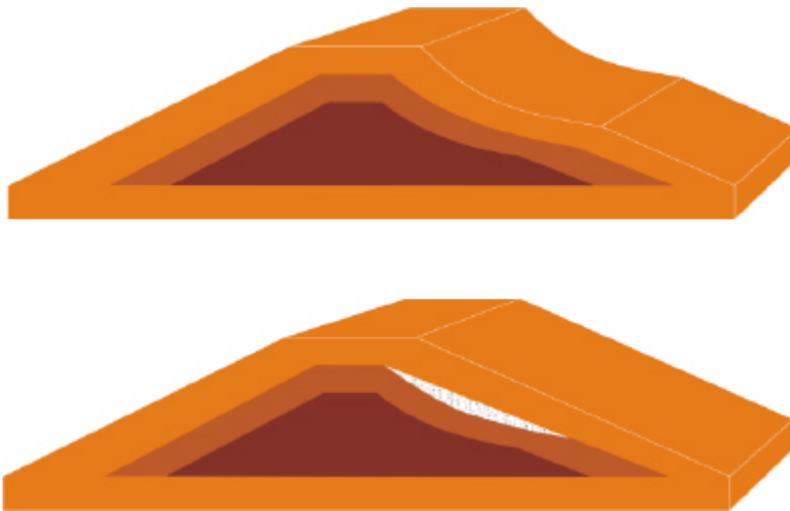


Abbildung 4.2: Kompaktion mit Senkenbildung (oben). Kompaktion mit Hohlraumbildung (unten).

Des Weiteren sind die Übergänge zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Kompaktionsraten und die Randbereiche der von Kompaktion betroffenen Abschnitte bevorzugte Orte der Schwachstellenbildung. Hier besteht die Gefahr der Ausbildung stressbedingter Schwächezonen. Eine weitere Auswirkung erhöhter Auflast ist das Einpressen eines fließfähigen Sediments in den sie umgebenden Porenraum gröberkörniger Sedimente (FÜCHTBAUER 1988).

4.4 Setzung

Die Setzung bezeichnet die auf initiale Bewegungsimpulse zurückgehende Verlagerung sedimentärer Partikel in Richtung des Liegenden. Sie hängt also nicht von der Auflast, sondern von der eigenen Masse der betroffenen Sedimentpartikel ab, die von der Anziehungskraft der Erde bewegt werden. Die Sedimentpartikel werden durch einen mechanischen Impuls in Bewegung versetzt, verlassen ihre ursprüngliche stabile Lage und nehmen einen freien Platz in einem tiefer gelegenen Teil des Korngerüsts ein. Je öfter Bewegungsimpulse von hinreichender Stärke pro Zeiteinheit auftreten, desto schneller läuft die Setzung ab.



Abbildung 4.3: Tief in einen Deichkörper reichende Risse im Randbereich einer Setzungszone. Deich des Wiescher Bachs in Wiescherhöfen.

Die Setzungsprozesse verlaufen, ebenso wie Erosion und Suffosion, rückschreitend. Sie pflanzen sich also, entgegen der Bewegungsrichtung der sedimentären Partikel, von größerer Teufe zur Oberfläche hin fort. Die Setzung kann vollkommen verlaufen und

sich vom Damminneren bis an die Oberfläche fortpflanzen, oder auf tiefer gelegene Partien beschränkt bleiben. Das Resultat ist, analog zur Kompaktion, Muldenbildung an der Oberfläche oder damminterne Hohlraumbildung. Damminterne Setzung beeinflusst die statischen und hydrodynamischen Eigenschaften negativ, ohne oberirdisch in Erscheinung zu treten. Auf die Matrix beschränkte Setzungsprozesse innerhalb komponentengestützter Gefüge können sowohl die geohydraulischen als auch die geophysikalischen Eigenschaften des betroffenen Sedimentes signifikant verändern, ohne jedoch morphologisch in Erscheinung zu treten. Sicherheitstechnisch problematisch sind insbesondere die Übergangsbereiche zu den nicht von Setzung betroffenen Dammabschnitten. Hervorgerufen durch die unterschiedlichen Bewegungsraten können hier tief in den Deichkörper reichende Schwächezonen entstehen (Abb. 4.3).

4.5 Isostatische Ausgleichsbewegungen

Isostatischer Druckausgleich tritt im Untergrund eines Dammes in Folge der veränderten Auflastverhältnisse unter dem Dammkörper und der eingestauten Vorflut auf. Kann der Untergrund die zusätzlichen Kräfte der erhöhten Auflast nicht kompensieren, kommt es zu lokalen Ausgleicherscheinungen. Im Bereich erhöhter Auflast setzt dann Absenkung, im Umland Aufwölbung ein. Voraussetzung ist ein hinreichend fließfähiger Sedimentkörper im Liegenden, der mit Masseverlagerung reagiert (Abb. 4.4). Prädestiniert für isostatische Aufwölbungen ist, aufgrund der verminderten Auflast, der Bereich des Seitengrabens. Die notwendige Fließfähigkeit kann primär vorhanden sein oder aber durch die veränderten Druckverhältnisse oder höheren Wassergehalt hervorgerufen werden. Die Masseverlagerung findet als unmittelbare Reaktion auf das Erbauen eines Erddamms oder als das Resultat veränderter Bedingungen während des Dammbetriebes statt. Der Untergrund von Deichen ist im Verlauf eines Einstaus veränderten Belastungsbedingungen ausgesetzt, die, obwohl nur kurzfristig auftretend, der Auslöser isostatischer Ausgleichsbewegungen sein könnten.

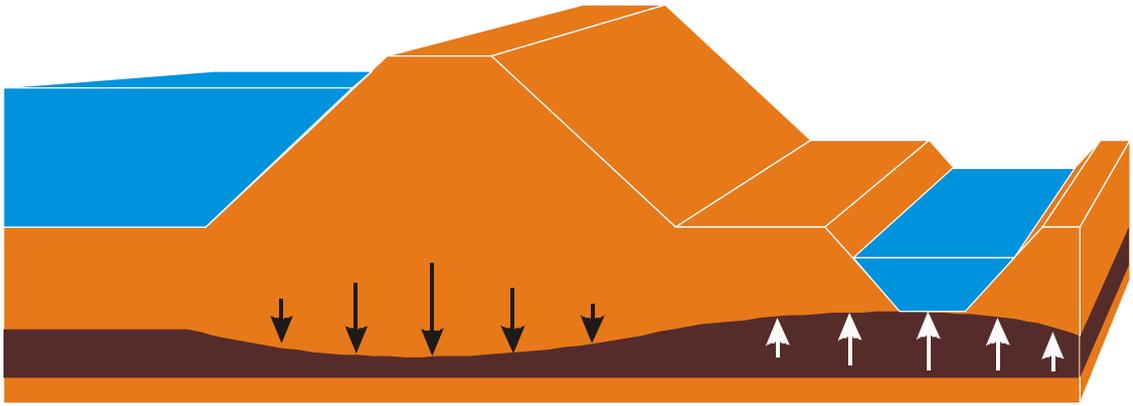


Abbildung 4.4: Isostatischer Druckausgleich im Liegenden eines Damms.

5 Die zerstörungsfreie Erkundung von Erddämmen

Eine zerstörungsfreie Untersuchungskampagne wird anhand der fallspezifischen Erfordernisse geplant und durchgeführt. Nicht jeder der in Abbildung 5.1 aufgeführten Arbeitsschritte ist unbedingter Bestandteil einer Erkundung. Die Gewichtung der einzelnen Arbeitsschritte kann im Einzelfall sehr unterschiedlich sein.



Abb. 5.1: Die Vorgehensweise bei der Durchführung einer zerstörungsfreien Erkundung

Die Geowissenschaften bieten ein reichhaltiges Instrumentarium zur zerstörungsfreien Erkundung des oberflächennahen Untergrundes. Neben den hydrogeologischen sind es vor allem die geophysikalischen Arbeitsmethoden, die erfolgreich zur engmaschigen, nicht invasiven Untersuchung von Erddeichen und -dämmen herangezogen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird keine komplette Abhandlung aller Methoden der Dammerkundung gegeben, sondern eine Auswahl erfolgversprechender oder bereits bewährter, rein zerstörungsfreier Methoden vorgestellt. Neben den zerstörungsfreien werden auch zerstörungsarme Methoden eingesetzt, die mit geringen Eingriffen in den Dammkörper auskommen. KANOWSKI (1978) stellt neben zerstörungsfreien auch zahlreiche zerstörungsarme Methoden zur Erkundung von Flusssdeichen vor. ARM-BRUSTER & MERKLER (1982) behandeln die Möglichkeiten der geophysikalischen Erkundung von Erddämmen. Die geoelektrischen Methoden werden, entsprechend ihrer zentralen Stellung innerhalb dieser Arbeit, ausführlicher behandelt. Als fachübergreifendes Standardinstrument der Schwachstellensuche wird zunächst die Aufnahme des visuellen Befundes erläutert.

5.1 Visuelle Indikatoren

Die in regelmäßigen Abständen wiederholte Sichtprüfung ist eine der Basismethoden zur Früherkennung von Schwachstellen an Erddämmen. Die potentiellen visuellen Schwachstellenindikatoren sind jedoch zumeist mit erheblichen Unsicherheiten bezüglich ihrer Genese behaftet. Eindeutigkeit ist häufig erst während oder unmittelbar vor einer akuten Gefahrensituation gegeben. Dennoch ist die regelmäßige fachkundige Sichtprüfung ein unverzichtbares Instrument zur Früherkennung von Schäden.

5.1.1 Senken

Die Bildung morphologischer Senken kann aus einer Vielzahl unterschiedlicher Ursachen resultieren. Neben Suffosion und Erosion kommen Setzung und Kompaktion ebenso in Betracht. Ob es sich jedoch um harmlose, auf die Oberfläche beschränkte

Vorgänge handelt, oder ob die Senkenbildung Ausdruck tiefer gelegener, die Deichsubstanz ernsthaft schädigender Prozesse ist, kann ohne weiterführende Untersuchungen meist nicht geklärt werden.

5.1.2 Morphologische Hochlagen

Auf Sedimentakkumulation zurückgehende Erhebungen sind an die nachlassende Transportkraft des suspensionsbeladenen, abströmenden Vorflut- oder Niederschlagswassers gebunden. Sie finden sich vorwiegend im Bereich des Deichfußes und in strömungsarmen, stark bewachsenen Zonen des Druckwasserkanals und der Vorflut. Sie bestehen aus erosiv oder suffosiv antransportiertem Material oder sind bio- oder anthropogen aufgeschüttet. Eine weitere Entstehungsmöglichkeit morphologischer Hochlagen sind die Entlastungsbereiche isostatischer Bewegungen im unmittelbaren Hinterland eines Dammes.

5.1.3 Verstärkter Pflanzenwuchs

Besonders üppige Vegetation kann Ausdruck einer leakagegebundenen Hochlage des Druckwasserspiegels sein. Während länger anhaltender Trockenphasen, in denen die Pflanzenvergesellschaftungen auf die Wasserversorgung durch aszendentes Druck- oder Grundwasser angewiesen sind, kann der geringere Abstand zwischen Druckwasseroberfläche und Geländeoberfläche ein entscheidender Überlebensvorteil sein. Während die Vegetation über den nicht geschädigten Dammabschnitten im Verlauf längerer Trockenperioden stark in Mitleidenschaft gezogen wird, bleibt sie im Bereich der leakagebedingten erhöhten Wassersättigung erhalten (Abb. 5.2). Die gleiche Wirkung auf den Pflanzenwuchs können jedoch auch Sedimentpartien mit erhöhtem Feinkornanteil ausüben. Die feinkörnigeren Sedimente haben sowohl eine höhere Speicherkapazität, als auch eine höhere Feldkapazität. Beide Eigenschaften führen unter Bedingungen, bei denen die Wasserversorgung ein limitierender Faktor für das

Pflanzenwachstum darstellt, zu verstärktem Wuchs, ohne ein Indiz für eine Leckage darzustellen.



Abbildung 5.1: Verstärktes Pflanzenwachstum auf der binnenseitigen Dammlinke im Bereich einer Leckage. Östlicher Rheinseitendamm bei km 307550.

5.1.4 Fehlende Vegetation

Kahle Stellen können auf permanent austretendes Sickerwasser und den damit verbundenen Verlust an nährstoffreichem Feinkornanteil zurückgehen. Jedoch auch Bereiche mit primär geringem Feinkornanteil, die von keiner erhöhten Durchsickerung betroffen sind, zeigen Mangelvegetation. Vegetationsfreie Bereiche im Druckwasserkanal können auf den permanenten Absatz feinkörniger, aus dem Deichkörper ausgetragener Suspensionsfracht zurückgehen. Die anhaltende Sedimentation verhindert in diesem Fall erfolgreich die Ansiedlung photosynthetisierender Organismen. Ähnliche

Befunde liefern aber auch die Fraßspuren verschiedenster herbi- und carnivorer Faunenelemente. Sowohl fehlende als auch verstärkte Vegetation im Bereich der Deichflanken können auf primär angelegte Heterogenitäten oder selektive Erosion zurückgehen und sind nicht zwingend an sicherheitsrelevante Veränderungen des Wasserhaushalts gebunden.

5.1.5 Quelltrichter



Abbildung 5.3: Quelltrichter im Randbereich des Druckwasserkanals. Die kraterförmigen Eintiefungen um die Austrittsbereiche (dunkle Punkte in der rechten Bildhälfte) gehen auf von unten austretendes Druckwasser zurück.

Quelltrichter im Bereich des binnenseitigen Dammfußes oder im Druckwasserkanal (Abb. 5.3) entstehen innerhalb kurzer Zeit oder sind das Resultat andauernder Prozesse. Während die Entstehung im Verlauf eines ereignisgesteuerten Einstaus zumeist auf die

Beteiligung von Leckagewasser hindeutet, können temporäre Quellen auch auf lokale Tieflagen gegenüber dem Grundwasserspiegel hindeuten. Auch heterogene Abflussverhältnisse im basalen, luftseitigen Dammkörper können möglicherweise zur Bildung von Quelltrichtern führen.

5.1.6 Sickerwasseraustritt

Der Sickerwasseraustritt erfolgt ereignisgesteuert oder permanent oberhalb der Wasserlinie des Druckwasserkanals auf der luftseitigen Dammflanke. Für den Austritt von Sickerwasser kommen die gleichen Mechanismen wie für die Quellenbildung in Betracht. Das Wasser ist jedoch nicht gespannt, sondern bewegt sich frei entlang des höchsten hydrodynamischen Gradienten oder bevorzugter Fließwege entlang der Oberfläche oder im Korngerüst. Permanenter Sickerwasseraustritt geht häufig mit der Entstehung kahler Flächen einher.

5.2 Hydrogeologische Methoden

Die Hydrogeologie stellt vor allem Methoden zur Beurteilung der Durchströmungsverhältnisse von Stauhaltungsdämmen bereit. Eine Möglichkeit zur Untersuchung aktiver Leckagen ist die Beobachtung der Ausbreitung von Markierungsstoffen. Auch die Analyse der hydrochemischen Eigenschaften des Druckwassers und die Quantifizierung der Abflussmengen des Druckwassers können Hinweise auf den Sicherheitsstatus von Erddämmen liefern.

5.2.1 Tracer

Der Einsatz von Markierungsstoffen ermöglicht die Bestimmung der Fließrichtung und -geschwindigkeit. Ein idealer Tracer ist auch bei stärkster Verdünnung noch nachweisbar und unschädlich für Mensch und Natur (KÄSS 1992). Bei den beobachteten Geschwindigkeiten handelt es sich jedoch nicht um wahre Fließgeschwindigkeiten, sondern, je nach Typ des Tracers, um Abstands- oder Triftgeschwindigkeiten (MATTHEß & UBELL 1983). Neben Farbtracern wie Uranin, Fuchsin, Eosin und Rodamin, werden auch Salztracer, insbesondere NaCl, dessen Nachweis mit Hilfe von Silbernitrat oder über die Leitfähigkeit erfolgt, eingesetzt. Auch radioaktive Tracer finden Verwendung. Zum Schutz des Menschen und der Umwelt werden nur Isotope mit sehr kurzen Halbwertszeiten verwendet. Beispiele sind ^{24}Na mit $T_{0,5} = 14,9$ h in Form von NaCl und ^{130}J mit $T_{0,5} = 8,05$ d in Form von NaJ-Lösung (HÖLTING 1996). Als Partikeltracer werden eingefärbte Sporen von Bärlappgewächsen, beispielsweise von *Lycopodium clavatum*, eingesetzt. Auch verschiedene Spezies nicht pathogener Bakterien, wie *Serratia marcescens* und im Erdreich nicht fortpflanzungsfähige *Escherichia coli*-Stämme werden verwendet (HÖLTING 1996). Bei der zerstörungsfreien Anwendung von Tracertests wird der Markierungsstoff vorflutseitig eingegeben. Die Beobachtung der Tracerausbreitung erfolgt im Seitengraben. Neben dem qualitativen Nachweis heterogener Durchströmungsverhältnisse können die Ergebnisse, bei hinreichender räumlich/zeitlicher Auflösung, auch als Grundlage der Quantifizierung der Strömungsverhältnisse zwischen Eingabe- und Entnahmepunkten dienen. Die zugrunde liegende Transportgleichung kann analytisch (KINZELBACH 1992) oder numerisch gelöst werden (PRESS et

al. 1988). Neben dem Finite-Differenzen-, dem Finite-Elemente- und dem Charakteristik-Verfahren wird das Random-Walk-Verfahren eingesetzt (KINZELBACH UND RAUSCH 1995).

5.2.2 Hydrochemische Analyse

Eine natürliche Alternative zur Eingabe künstlicher Tracer ist die Erfassung hydrochemischer Unterschiede zwischen dem Wasser der Vorflut und dem des Seitengrabens. Geeignet zur Leckagedetektion sind jene hydrochemischen Parameter, die im Verlauf des Filtrationsprozesses starken Veränderungen unterliegen und deren Veränderung der Verweildauer des Druckwassers im Dammkörper proportional ist. Geringe Filtergeschwindigkeiten und die einhergehende lange Verweildauer des Druckwassers im Dammkörper gehen mit der starken Änderung hydrochemischer Parameter einher, während das den Dammkörper schneller passierende Leckagewasser geringeren hydrochemischen Alterationen unterliegt. Sowohl die Konzentrationserhöhung in Folge von Lösung als auch Konzentrationserniedrigung können geeignete Indikatoren sein. Welche Bestandteile der Lösungsfracht zur Leckagedetektion im Einzelfall geeignet sind, hängt von der Zusammensetzung des Vorflutwassers und den physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen im Verlauf der Durchströmung des Dammes ab.

Auch die Ausbildung der Mikroflora und -fauna in Abhängigkeit der Wasserqualität in der Vorflut und im Seitengraben kann Hinweise auf verstärkte Durchströmung geben. Ähnlichkeiten in der Populationsdichte und -zusammensetzung der Mikroorganismen weisen auf ähnliche Wasserqualität hin (SCHWOERBEL 1993; 1994). Ebenso wie bei der Veränderung der anorganischen Parameter kann bei großer Ähnlichkeit zwischen der Flora und Fauna der Vorflut und jener des Seitengrabens von einer nur geringen Veränderung der Wasserqualität und dem raschen Durchfließen des Dammkörpers ausgegangen werden. Treten diese Befunde räumlich eng begrenzt auf, gehen sie möglicherweise auf austretendes Leckagewasser zurück.

5.2.3 Die Quantifizierung des Druckwasserabflusses

Über längere Dammstrecken kann die Messung der Abflusssspende pro Streckeneinheit in den Seitengraben als Maß für die Durchströmungsverhältnisse herangezogen werden. Voraussetzung ist die hinreichende Kenntnis der hydrodynamischen Verhältnisse sowohl zwischen eingestauter Vorflut und dem Seitengraben als auch zwischen Hinterland und Seitengraben. Hohe Abflusssspenden, die dem Seitengraben von der Dammseite her zufließen, deuten auf hohe Durchlässigkeit und mögliche Leckagen hin. Ein geringer oder fehlender Zuwachs der Abflussmenge ist ein Indiz für geringdurchlässige Strecken. Die Verringerung der Abflussmenge deutet auf Filtrationsprozesse weg vom Seitengraben hin (LANGGUTH & VOIGT 1980). Bei der Quantifizierung des Druckwasserzuflusses zum Seitengraben muss die In- und Exfiltration aus dem Hinterland berücksichtigt werden (HÖLTING 1996; MATTHEß & UBELL 1983). Zur Berechnung der Zuflüsse werden analytische und numerische Verfahren eingesetzt (HARDISTY et al. 1993; KINZELBACH & RAUSCH 1995). Die Nachteile der Bestimmung der Abflusssspende zur Eingrenzung von Leckagen liegt in dem nur geringen räumlichen Auflösungsvermögen der Methode. Des Weiteren schlägt die aufwendige und zumeist mit erheblichen Unsicherheiten behaftete Parametrierung eines Strömungsmodells, das über lange Strecken Zu- und Abflüsse vom Damm und vom Hinterland in Richtung Seitengraben und vom Seitengraben weg berücksichtigen muss, negativ zu Buche.

5.3 Geophysikalische Methoden

Die Geophysik bietet die größte Bandbreite an Methoden zur flächendeckenden Erkundung von Erddämmen. Die Anwendung geophysikalischer Methoden konzentriert sich nicht, wie jene der Hydrogeologie und der Hydrobiologie, auf die Detektion austretenden Leckagewassers an Stauhaltungsdämmen. Mit ihnen ist vielmehr auch die Schwachstellenortung an Deichen möglich. Die Untersuchungen richten sich zum einen auf die Strömungsverhältnisse und den Wasserhaushalt, zum anderen aber auch auf strukturelle und lithologische Eigenschaften. Sie liefern ebenfalls Informationen über den Sicherheitsstatus der Hochwasserschutzanlagen.

Die zunehmende Verbreitung der Geophysik in den Umweltwissenschaften im Verlauf der letzten beiden Dekaden hat die Weiterentwicklung in diesem Bereich vorangetrieben. Heute steht eine große Zahl geeigneter Untersuchungsmethoden zur Bearbeitung unterschiedlichster Fragestellungen im Bereich der zerstörungsfreien Dammerkundung zur Verfügung. Der Geoelektrik wird im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Stellung eingeräumt. Sie wird einerseits schon lange erfolgreich zur zerstörungsfreien Erkundung von Dämmen eingesetzt und birgt andererseits noch erhebliches Potential, sowohl zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit einer Kampagne als auch zur Adaption der Methoden und der Messausrüstungen. In den folgenden Kapiteln wird zunächst ein Überblick über einige geeignete geophysikalische Methoden zur Dammerkundung gegeben. Anschließend werden eigene Arbeiten zur Adaption der geoelektrischen Messausrüstungen und Methoden an die speziellen Erfordernisse der Dammerkundung vorgestellt.

5.3.1 Widerstandsgeoelektrik

Die verschiedenen Techniken der Widerstandsgeoelektrik sind nützliche Werkzeuge im Rahmen des präventiven Hochwasserschutzes. Bereits seit den 70er Jahren wird diese aus der Rohstoffexploration übernommene geoelektrische Methode erfolgreich zur Erkundung von Erddämmen, -deichen und deren Untergrund eingesetzt (ARANDJELOVIC

1989; ARMBRUSTER & MERKLER 1982; BOGOSLOVSKY & OGILVY 1970a, b; BUTLER 1989; KANOWSKI 1978; MOLDOVEANU & SUCIU 1989).

5.3.1.1 Methodik

Die Widerstandsgeoelektrik zählt zu den aktiven geophysikalischen Verfahren. Der interessierende Parameter ist der spezifische Widerstand der Gesteine bzw. anderer Stoffe als Materialgröße.

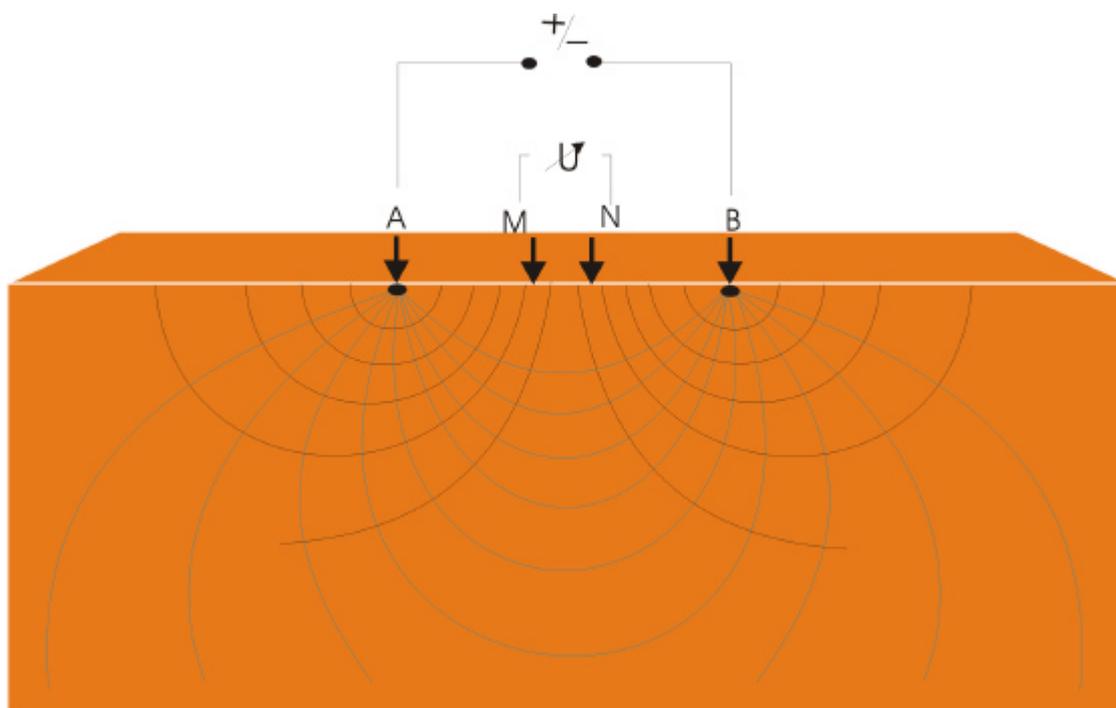


Abb.5.4: Prinzipskizze einer Widerstandsmessung mit einer linienförmigen, symmetrischen Elektrodenanordnung (A,B= Stromerder; M,N=Spannungserder) in einem homogenen und isotropen Halbraum. Spuren der Äquipotentialflächen = schwarz. Elektrische Feldlinien (Stromlinien) = blau.

Bei der Messung mittels der häufig verwendeten Vier-Punkt-Anordnung wird dem Untergrund über zwei Elektroden ein Strom zugeführt, der ein elektrisches Feld gemäß der Widerstandsverteilung aufbaut. Ist der Untergrund ein unendlich ausgedehnter Halbraum und bezüglich des spezifischen Widerstandes \tilde{n} homogen und isotrop, so ergibt sich

$$\tilde{n} = k * U/I,$$

wobei I der eingespeiste Strom und U die Spannung ist, die zwischen zwei beliebigen anderen Erdungspunkten gemessen wird (Abb. 5.4). k ist eine geometrische Größe, in die der gegenseitige Abstand der vier Erder eingeht. Linienförmig und symmetrisch angeordnete Erder sind üblich (Abb. 5.5), aber nicht zwingend (s. weiter unten). Ein oder zwei der Erder können in sehr großer Entfernung zum eigentlichen Messbereich platziert werden (Abb. 5.5 unten), so dass ihr Einfluss auf die Messung vernachlässigt werden kann.

Wird diese Vierpunktmessung über einem bezüglich des spezifischen Widerstandes inhomogenen, beispielsweise geschichteten Untergrund vorgenommen, erhält man formal wieder eine Widerstandsgröße, die aber nun keine Materialkonstante mehr ist. Man nennt sie deshalb den scheinbaren spezifischen Widerstand,

$$\tilde{n}_s = k * U/I.$$

\tilde{n}_s hängt von der Widerstandsverteilung des Untergrundes, aber auch von der Platzierung der Erder ab. Befinden sich die Spannungserder in der Nähe der Stromerder, wird bevorzugt die oberflächennahe Feldverteilung gemessen. Entfernen sich die Stromerder, gewinnt die Feldverteilung und damit die Widerstandsverteilung in der Tiefe an Gewicht. Das führt zum Grundgedanken, durch Variation der Erdergeometrien die Widerstandsverteilung des Untergrundes dreidimensional zu erfassen. Vertikale und horizontale Widerstandsänderungen können dabei gleichermaßen von Interesse sein.

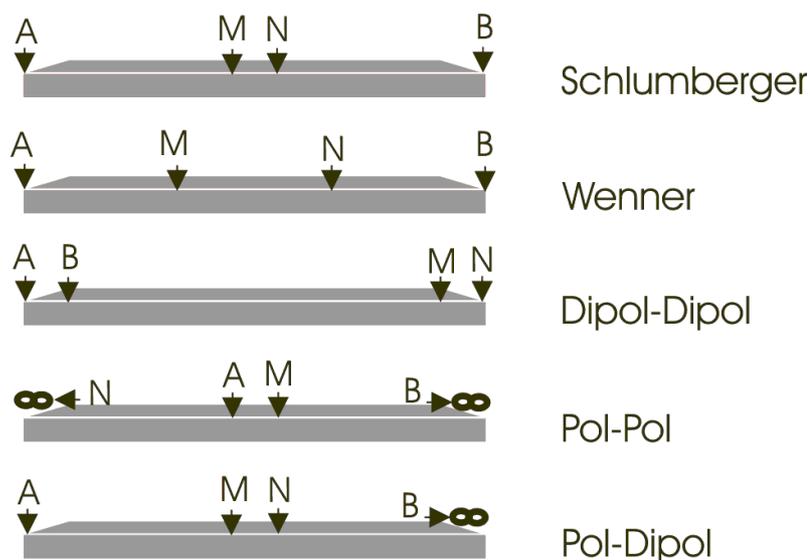


Abbildung 5.5: Einige der gebräuchlichsten Elektrodenanordnungen in der Widerstandsgeoelektrik. ∞ = Position einer Elektrode weit außerhalb des Einflussbereichs der Messung.

5.3.1.2 Eindimensionale Sondierungen

Beschränkt sich die Änderung der Gesteinswiderstände auf die Vertikale, liegt ein horizontal geschichteter Untergrund vor. Diese Konstellation wird mit Hilfe der Tiefensondierung korrekt beschrieben. An einem Messpunkt werden die Elektrodenabstände im Verlauf mehrerer Messungen sukzessive erhöht. Mit zunehmender Entfernung der Transmitterelektroden von den Potentialelektroden nimmt die Eindringtiefe des Transmitterstroms zu, der aus den Messwerten berechnete scheinbare spezifische Widerstand beinhaltet mehr und mehr Informationen aus größerer Tiefe (Abb. 5.6). Die Ergebnisse der Einzelmessungen werden zu einer Sondierungskurve verbunden. Dem mit zunehmender Tiefe abnehmendem räumlichen Auflösungsvermögen wird häufig entsprochen, indem der Abstand der Transmitterelektroden logarithmisch erhöht wird.

Um aus den Kurven der scheinbaren spezifischen Widerstände Rückschlüsse auf die Verteilung der spezifischen Widerstände des Untergrundes zu ziehen, werden die aus den Messwerten berechneten Kurven mit Modellkurven verglichen. Zur manuellen Auswertung können Kurvenatlanten herangezogen werden, die eine große Zahl von

Vergleichskurven enthalten. Die enorme Menge möglicher Kombinationen aus der Mächtigkeit der Schichtglieder und deren spezifischer Widerstände beschränkt die Zahl der einbezieharen Schichtglieder auf 3 bis 4. Nähere Informationen zu den Kurventypen und der Vorgehensweise bei der Auswertung finden sich in REYNOLDS (1997) und TELFORD et al. (1990). Modernere, rechnergestützte Methoden zur Auswertung einzelner Tiefensondierungen bedienen sich der linearen digitalen Datenfilterung (DOUGLAS et al. 1977; GOSH 1971; KOEFOED & DIRKS 1979; O'NEILL & MERRICK 1984). ZOHDY (1989) stellt eine iterative Methode zur Auswertung von Schlumberger- und Wenner-Sondierungen vor, bei der die Anzahl der Einzelmessungen pro Messpunkt der Anzahl der Schichten im Modell entspricht. Auch das Hedge-Hog und das Monte-Carlo-Verfahren, beide auf dem Prinzip von Versuch und Irrtum basierend, werden eingesetzt (BERKTOLD 1997).

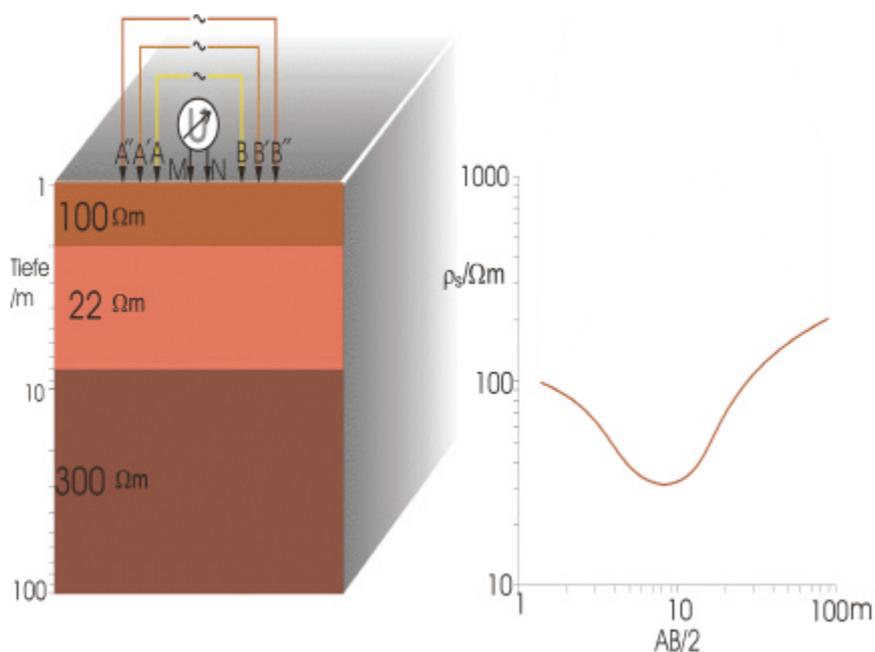


Abb. 5.6: Geoelektrische Tiefensondierung über horizontal geschichtetem Untergrund (Dreischichtfall). Links: Zunehmend größere Abstände der Transmitterelektrodenpaare A-B, A'-B', A''-B'' bei unveränderten Potentialelektroden M, N. Rechts: Berechnete Sondierungskurve (Schlumberger-Anordnung) für den gezeigten Dreischichtfall.

5.3.1.3 Zweidimensionale Sondierungen

Variieren die Gesteinswiderstände vertikal und horizontal, also in zwei Dimensionen, werden mehrere Sondierungen entlang einer senkrecht zur Längserstreckung der Widerstandselemente orientierten Linie durchgeführt (XY-Ebene in Abb. 5.7 oben). In Z-Richtung sind die Widerstandselemente, zumindest theoretisch, unendlich ausgedehnt. Die Ergebnisse werden in Form von Pseudosektionen scheinbarer spezifischer Widerstände dargestellt (EDWARDS 1977). Je nach Wahl der Erderaufstellungen werden die Sektionen unterschiedlich konstruiert. In allen Fällen handelt es sich um Isolinien- bzw. Isoflächendarstellungen der Widerstandswerte in einer Ebene entlang des Messprofils (XY-Ebene).

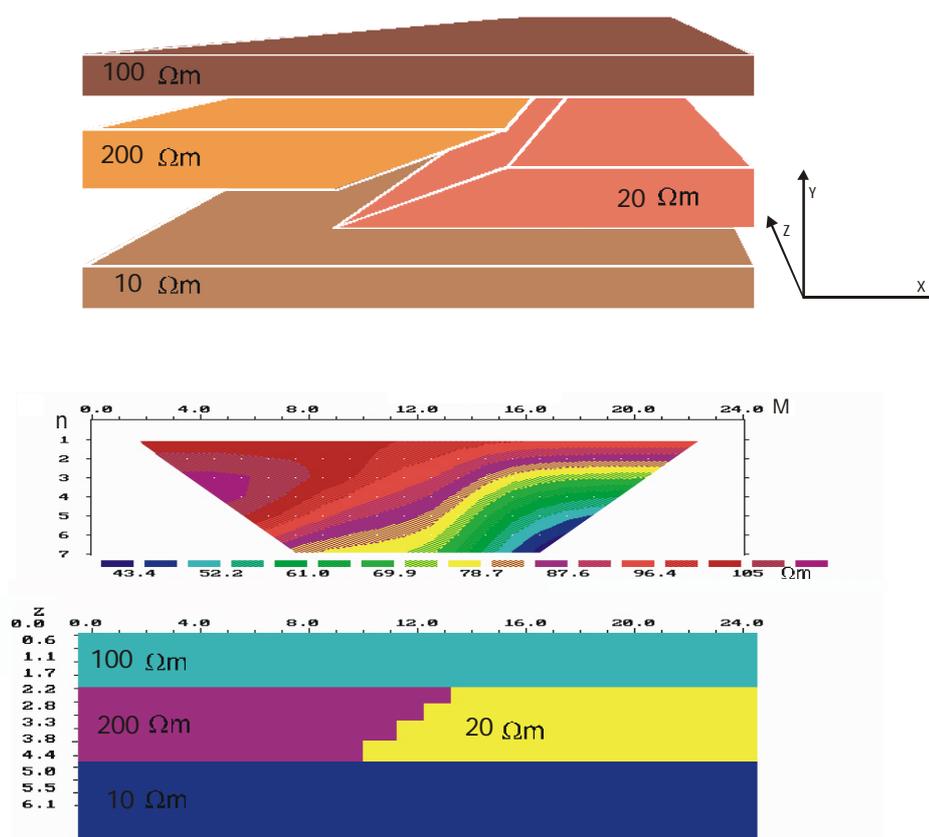


Abbildung 5.7: Zweidimensionale Widerstandsverteilung. Oben: Blockmodell. Unten: Schnitt parallel zur XY-Ebene an beliebiger Stelle durch das Blockmodell. Mitte: Aus dem Schnitt berechnete scheinbare spezifische Widerstände für die Schlumberger-Anordnung. Berechnungen mit R2dmod von M. H. Loke (LOKE & BARKER 1996). n = Abstand der Transmitter zu den Potentialelektroden in Meter; z = Tiefe; M = Elektrodenpositionen in Meter.

In Abbildung 5.8 ist dies für eine Aneinanderreihung von 12 Schlumberger-Tiefensondierungen, bestehend aus jeweils 20 Einzelmessungen, gezeigt. Die Kreuze kennzeichnen den halben Abstand der Transmitterelektroden, der an jedem Messpunkt sukzessive von 1,5 auf 100 Meter erhöht wurde. Auf der Abszisse ist die Distanz zwischen den Tiefensondierungen abgetragen, auf der Ordinate der halbe Abstand zwischen den Transmitterelektroden ($=AB/2$) in Meter. Die Ordinatenwerte stellen keine absoluten Tiefenangaben dar.

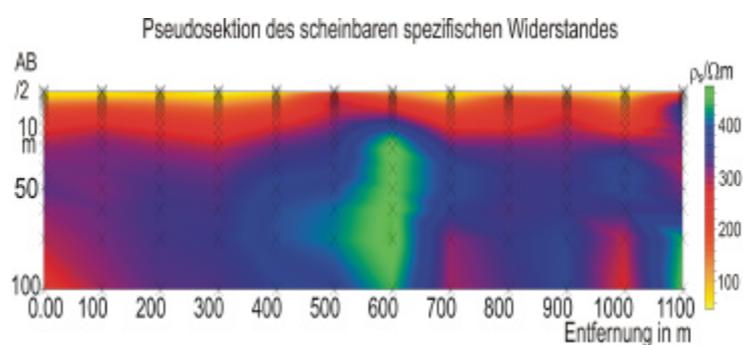


Abbildung 5.8: Pseudosektion des scheinbaren spezifischen Widerstandes über einer Kieslinse im Quartär des Oberrheingrabens. Der grüne Bereich hoher Widerstände geht auf die grobkörnigen Kiese zurück. Kreuz= Einzelmessung.

Die Darstellung in Form von Pseudosektionen dient der Visualisierung der Messwerte. Quantitativ werden die Sektionen mit Hilfe der numerischen 2D-Modellierung ausgewertet. Auf der Grundlage der Finite-Differenzen-Methode (DEY & MORRISON 1979; MUFTI 1976) und der Finite-Elemente-Methode (COGGON 1971; DAILY & OWEN 1991; TSOKAS & TSOURLOS 1997; SASAKI 1992) wird der Untergrund in geometrische Elemente zerlegt und den einzelnen Volumeneinheiten iterativ Widerstandswerte zugewiesen. Auf der Suche nach robusten, effizienten Modellierungsalgorithmen wendet SHIMA (1990) das Konzept der alpha-Center an, XU et al. (1998) die Methode der Grenzelemente. LOKE & BARKER (1995) führen die Dekonvolution der kleinsten Quadrate ein, im Rahmen derer der Einfluss der Sondenordnung auf die scheinbaren spezifischen Widerstände eliminiert wird. Als Startmodell wird ein homogener

Halbraum angenommen (LOKE & BARKER 1996). LEE & GREEN (1973) entwickeln ein Verfahren, mit dem speziell über vertikalen Strukturen gewonnene geoelektrische Sondierungen interpretiert werden können.

Die Wahl der Sondenordnung beeinflusst das Erscheinungsbild der Pseudosektionen nicht unerheblich (Abb. 5.9). Die Pseudosektionen des zweidimensionalen Modells aus Abbildung 5.9 wurden mit Hilfe der numerischen Vorwärtsmodellierung Res2Dmod von M. H. Loke (LOKE & BARKER 1996) erzeugt. Zu realisieren ist auch, ob bei den Messungen überhaupt zweidimensionale Widerstandsverteilungen, zumindest näherungsweise, gegeben sind. Andernfalls geben 2D-Modellierungen wenig Sinn. Ebenfalls zu beachten ist auch die Möglichkeit von Mehrfachlösungen.

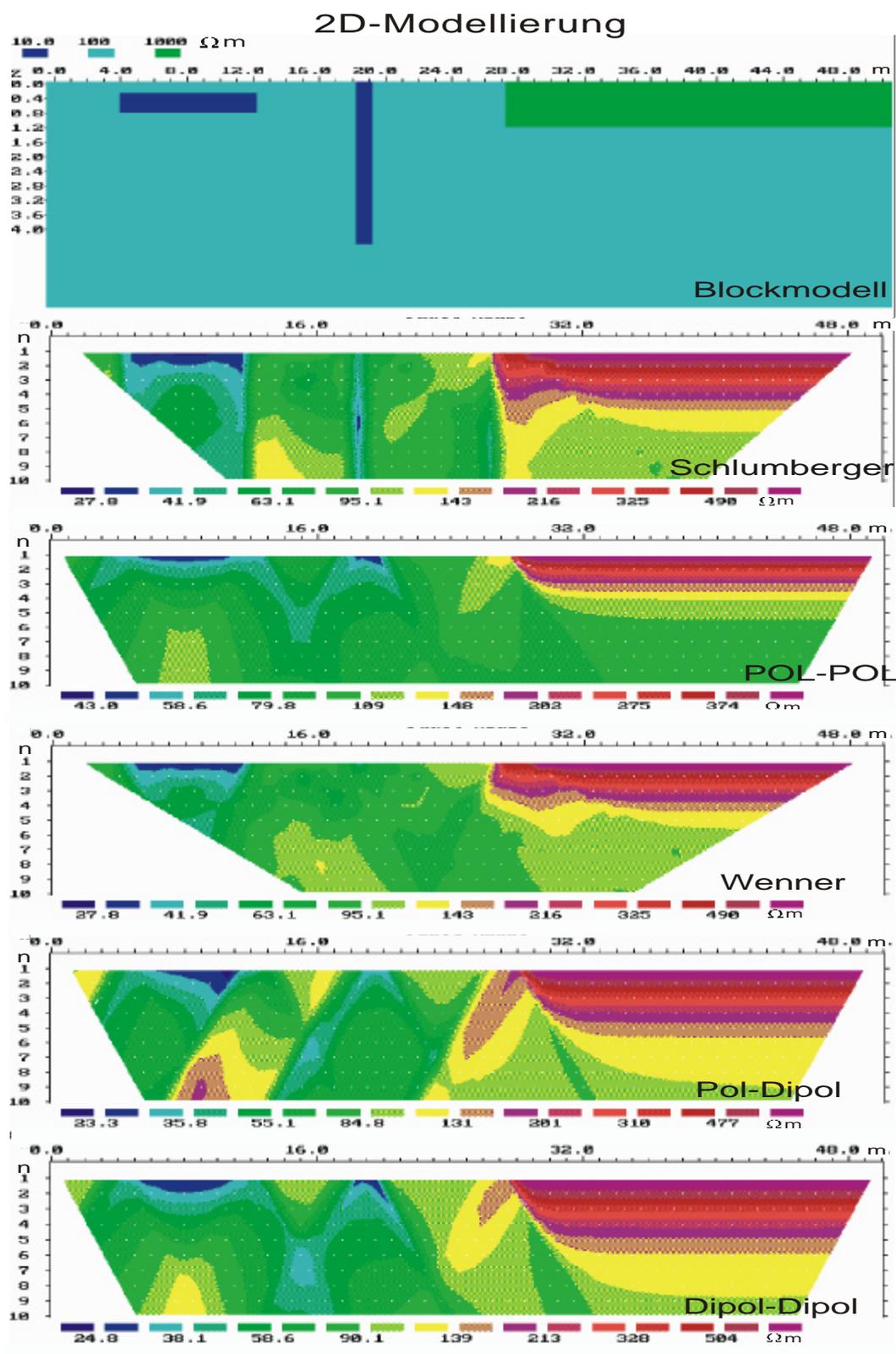


Abbildung 5.9: Die Auswirkung verschiedener Sondengeometrien auf die Messergebnisse. Die Pseudosektionen wurden mit Res2Dmod von M. H. Loke (Loke und Barker 1996) berechnet. z = Tiefe; n = Abstand der Transmitterelektroden von den Potentialsonden, angegeben in Vielfachen des Potentialsondenabstandes; Gesamtlänge= 50 m; Elektrodenabstand= 1 m.

5.3.1.4 Geoelektrische Kartierung

Ist lediglich ein bestimmter Tiefenbereich von Interesse, wird die Messeinrichtung mit gleichbleibender Elektrodenanordnung und -distanz über die Untersuchungsfläche bewegt (Abb. 5.10 oben) und an jedem Messpunkt wird nur eine Messung durchgeführt. Die Untersuchungen werden entlang von Profilen oder flächendeckend, in Form einer Widerstandskartierung, durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Form horizontal orientierter Isoohmenkarten dargestellt (Abb. 5.10 unten).

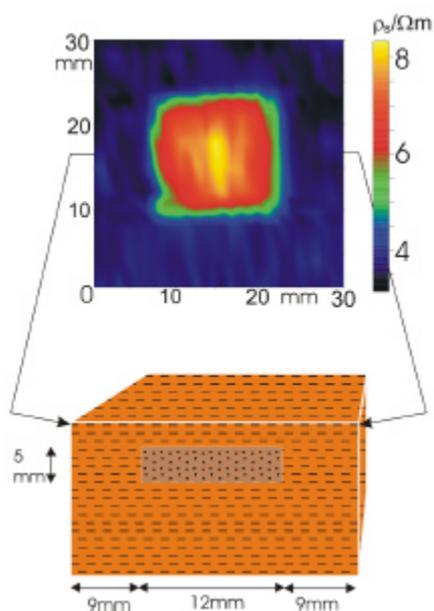
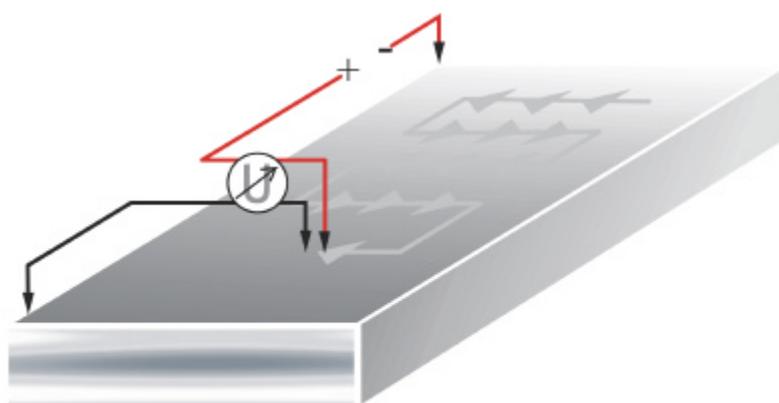


Abb. 5.10. Geoelektrische Kartierung. Oben: Prinzip einer Messung nach der Pol-Pol-Anordnung. Unten: Kartierung über einem Sandbox-Modell aus Feinsandkörper (braun) in leicht siltigem Ton (orange).

5.3.1.5 Dreidimensionale Widerstandsverteilung und geoelektrische Tomographie

Neben der zweidimensionalen Modellierung, die in vielen Fällen bei der Beschreibung der dreidimensionalen Realität nur unbefriedigende Ergebnisse liefert, werden zunehmend auch Methoden der dreidimensionalen Modellierung angewandt. Die enormen Datenmengen, die bei der dreidimensionalen Widerstandsmodellierung bewältigt werden müssen, machen den Einsatz schneller Berechnungsmethoden notwendig und wurden erst durch die kontinuierlich ansteigenden Prozessorleistungen der jüngeren Vergangenheit möglich (PARK & VAN 1991). SPITZER (1995) verwendet einen Finite-Differenzen-Algorithmus. OLDENBURG & ELLIS (1991) und LI & OLDENBURG (1994) wenden ein Inversions-Näherungsverfahren zur Reduzierung des Rechenaufwandes an.

Die Entwicklung hochauflösender tomographischer Mess- und Auswerteprozeduren ist auf die Erkundung komplexer Widerstands- und damit Untergrundverhältnisse, die den herkömmlichen geoelektrischen Erkundungsmethoden verschlossen bleiben, gerichtet (GRIFFITHS & BARKER 1993). Die geoelektrische Tomographie ist in der Lage, Widerstandskontraste sehr viel akzentuierter darzustellen, als dies die herkömmlichen Mess- und Auswerteverfahren ermöglichen (PARK 1998). Die Fortschritte bei der Erkundung komplexer Untergrundverhältnisse werden jedoch mit hohem Aufwand erkauft, der den Einsatz dieser Methoden im Rahmen kommerzieller Projekte häufig noch verbietet. Da die teils aus der klinischen Tomographie übernommenen Algorithmen auf eine sehr große Anzahl von Rohdaten angewiesen sind, wurden Möglichkeiten zur Reduktion der tatsächlich durchgeführten Messungen entwickelt. Anstatt alle Möglichen wird nur noch eine begrenzte Anzahl von Zwei-, Drei- oder Vierpunktanordnungen gemessen und die restlichen Werte gemäß der Superposition und der Reziprozität berechnet (XU & NOEL 1993, LEHMANN 1995). NOEL & XU (1991) verwenden die Methode der Rückprojektion der gewichteten Daten zur Darstellung der Widerstandsverhältnisse des Untergrundes.

5.3.2 Eigenpotentialmessungen

Die Eigenpotentialmethode zählt zu den passiven geoelektrischen Verfahren. Sie wird zur Erfassung des natürlichen elektrischen Spannungsfeldes des Untergrundes herangezogen und spricht als einziges geophysikalisches Verfahren direkt auf Grundwasserströmungen an. Die wichtigsten Eigenpotentialkomponenten sind, nach REYNOLDS (1997), das Diffusionspotential, das Nernst- und Zetapotential sowie das in der Umgebung von Erzkörpern auftretende Mineralisationspotential. Eine ausführliche Beschreibung der Entstehungsmöglichkeiten von Eigenpotentialen und Hinweise auf weiterführende Literatur finden sich in REYNOLDS (1997) und TELFORD et al. (1990). Das elektrokinetische Potential wird durch einen in ein poröses Medium durchfließenden Elektrolyten hervorgerufen. An der Grenzfläche zwischen Partikel und Elektrolyt bildet sich eine elektrische Doppelschicht aus, die innerhalb der Partikel eine negative, innerhalb des Elektrolyten eine positive Ladung aufweist (OGILVY et al. 1989). Bewegt sich der Elektrolyt entlang eines Druckgradienten durch einen Porenraum, findet eine Ladungstrennung statt. Bei deszendenden Grundwasserbewegungen entstehen im Allgemeinen negative und bei aszendenden Grundwasserbewegungen positive Anomalien (BOGOSLOVSKY & OGILVY 1970a). Die Amplituden der strömungsinduzierten Eigenpotentiale betragen, in Abhängigkeit des Druckgradienten, der Korngröße des durchströmten Mediums, des Tongehaltes, der Vegetation, der Temperaturverhältnisse und zahlreicher weiterer Faktoren von einigen zehn Millivolt (OGILVY et al. 1969; CORWIN et al. 1981) über 100 und mehr Millivolt (ERNSTSON & SCHERER 1986) bis über ein Volt (LENNART & JOHNSON 1976). Weitere Quellen von natürlichen Eigenpotentialen sind verschiedenste Redoxvorgänge (WILCKENS 1955) und die chemisch/physikalischen Eigenschaften des Untergrundes und des Grundwassers sowie deren Wechselwirkungen untereinander (CORWIN 1990; KILTY 1984; OGILVY et al. 1989).

Die Messung des Eigenpotentials wird bereits seit Jahrzehnten erfolgreich zur Leckagedetektion an Erddämmen eingesetzt (ARMBRUSTER & MERKLER 1982; BOGOSLOVSKI & OGILVY 1970a; MERKLER et al. 1989; OGILVY et al. 1969; WURMSTICH & FABER 1989; und andere). Dennoch wirft die Eigenpotentialmethode einige schwerwiegende Probleme auf. Unter natürlichen Bedingungen gemessene Eigenpotentiale stellen ein Mischsignal dar, dessen Zerlegung in seine Teilkomponenten zumeist nicht ohne weiteres möglich ist. Das Zielsignal bei der Leckageortung an Erddämmen besteht

ausschließlich in dem durch das abströmende Leckagewasser verursachten Anteil der elektrokinetischen Komponente des Eigenpotentials. Alle anderen potentialerzeugenden Faktoren, die unter natürlichen Verhältnissen stets mehr oder minder präsent sind, tragen, im Rahmen der Leckageortung an Erddämmen, zum Störsignal bei. Störsignale können ausgehen von:

- Strömungspotential des Niederschlagswassers
- Evaporationsbedingtem Strömungspotential
- Evapotranspirationsbedingtem Strömungspotential
- Geochemischen Prozessen
- Konzentrationsunterschieden des Porenelektrolyten
- Bioelektrischen Prozessen
- Seismoelektrischen Prozessen
- Technischen Störquellen
- Magnetotellurischen Störungen
- Temperaturdifferenzen
- Apparative Fehlerquellen

und zahlreichen weiteren Fehlerquellen. Eine ausführliche Diskussion potentieller Fehlerquellen gibt CORWIN (1989).

5.3.2.1 Methodik

Eine Standardtechnik der Eigenpotentialmethode ist die Totalfeld-Messung. Mit Hilfe einer mobilen Elektrode wird die elektrische Eigenpotentialdifferenz an den Messpunkten gegen eine stationäre Basis gemessen (PARASNIS 1966; CORRY 1985). Die zweite häufig gebräuchliche Technik nutzt die Gradienten- oder Dipolanordnung (PARASNIS 1966; TELFORD et al. 1990). Bei dieser Anordnung sind beide Elektroden mobil und werden mit gleichbleibendem Abstand entlang einer Linie versetzt (Abb. 5.11). Die Messwerte können dann sukzessive zur Potentialkurve der Totalfeld-Messung addiert werden.

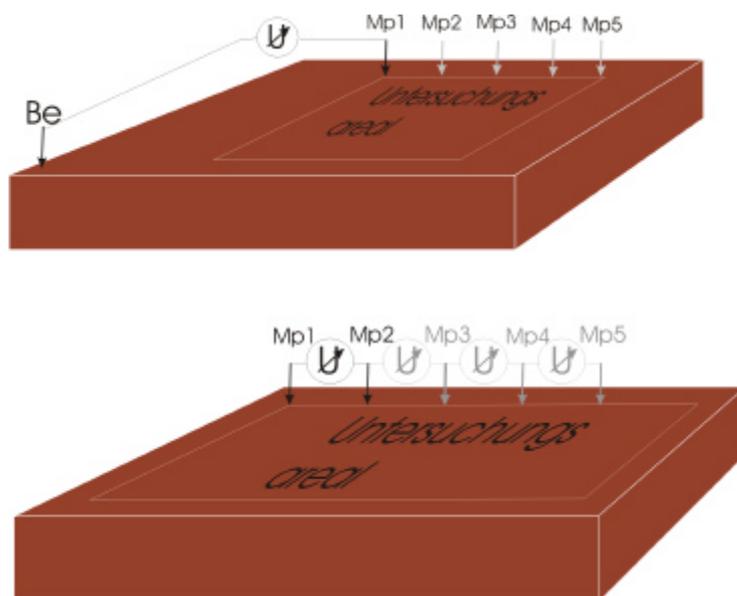


Abb.5.11. Eigenpotentialmessungen als Totalfeld-Messung (oben) und Gradienten-Messung (unten). Mp= Messpunkt; Be= Basiselektrode.

Die Gradientenanordnung bietet aufgrund der kompakteren Messanordnung Vorteile, sie ist jedoch anfällig gegenüber der Fehlerakkumulation (CORWIN 1990). Um eine gute Vergleichbarkeit der Daten innerhalb eines Datensatzes zu erreichen, werden die beeinflussbaren Messbedingungen an jedem Messpunkt möglichst konstant gehalten. Dies ist insbesondere der mit der Eindringtiefe der Elektroden variierende Feuchtegehalt und der Verdichtungsgrad des Substrates, die Sondentemperatur sowie die Dauer der Messung. Die Zeitspanne zwischen dem Platzieren der Sonden und der Stabilisierung des Messwerts kann zwischen wenigen Sekunden (WINTER et al. 1989) und mehreren Stunden liegen (WEIGEL 1989). Instabile Spannungswerte sind jedoch nicht unweigerlich das Resultat störender Einflüsse. CORWIN (1989) unterscheidet zwischen Schwankungen der Störsignale, die eine Verfälschung der Ergebnisse zur Folge haben, und Schwankungen des Zielsignals, deren Beobachtung von Interesse sein kann. SCHUCH & WANKE (1968) beobachten einen evapotranspirationsbedingten Tagesgang des Eigenpotentials. Auch ERNSTSON & SCHERER (1986) finden vegetationsbedingte Strömungspotentiale von bis zu 150 mV. Klimatische Faktoren bedingen auch die längerfristige Beeinflussung des Eigenpotentials. Durch deszendentes Niederschlagswasser verursachte Strömungspotentiale können noch mit mehrmonatiger Verzögerung

auftreten und starken Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der anderen Eigenpotentialkomponenten nehmen (ERNSTSON & SCHERER 1986).

5.3.2.2 Die Auswertung der Daten

Die Auswertung der Daten wird aufgrund der komplexen Natur des Eigenpotentials häufig rein qualitativ vorgenommen. Die Darstellung erfolgt in Isopotentialkarten die, in Abhängigkeit der Untersuchungstechnik, die Potentialdifferenzen gegenüber einem Basispunkt oder den Potentialgradienten zwischen zwei benachbarten Messpunkten darstellen. Die Ergebnisse flächendeckender Eigenpotentialmessungen zur Ermittlung der Fließrichtung in Kluftegesteinen können auch in Richtungsrosen dargestellt werden (HÖTZL & MERKLER 1989).

Neben der rein qualitativen Interpretation der Daten existieren zahlreiche Ansätze zur quantitativen Interpretation. MEISER (1962) interpretiert die Eigenpotentiale über einem Kohlevorkommen mit Hilfe elektrischer Dipole. LAPAJNE (1976) verwendet zur Quantifizierung von Strömungspotentialen das Konzept scheinbarer hydrogeologischer Parameter. BHATTACHARYA & ROY (1981) entwickeln Nomogramme für kugelige und zylindrische Potentialquellen unterschiedlicher Tiefenlage. WILT & CORWIN (1989) stellen ein 2D-Modellierungsprogramm zur Modellierung von Leckagen an Erddämmen vor, das auf einem Finite-Differenzen-Algorithmus von SILL (1983) basiert. SUNDARARAJAN et al. (1998) publizieren einen analytischen Ansatz, der Eigenpotentialanomalien mit Hilfe unendlicher geneigter Flächen interpretiert. ABDELRAHMAN & SHARAFELDIN (1997) stellen einen numerischen Ansatz zur Bestimmung der Tiefenlage von Eigenpotentialanomalien vor. Sie verwenden kugelförmige oder zylindrische Eigenpotentialquellen.

5.3.3 Mise à la Masse-Methode

Die Methode des geladenen Körpers hat ihren Ursprung in der Erzexploration. Um die Ausdehnung und Form eines bereits bekannten Erzkörpers zu ermitteln, wird dieser durch den direkten Kontakt mit einer Transmitterelektrode elektrisch geladen. Das hieraus resultierende elektrische Feld beinhaltet die gewünschte Information und wird mit Hilfe einer Potentialelektrode an der Oberfläche gemessen (Abb. 5.12).

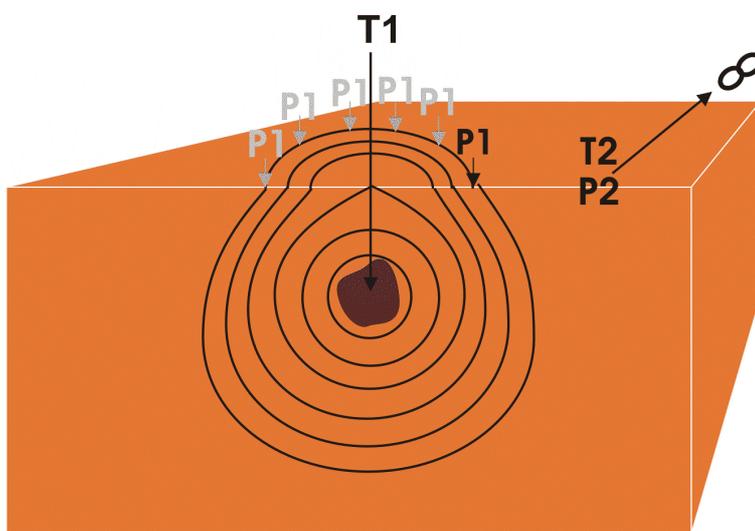


Abbildung 5. 12: Prinzip der Mise à la Masse-Methode. T1= stationäre Transmitterelektrode; P1= mobile Potentialelektrode. Die zweite Transmitterelektrode (T2) und die zweite Potentialelektrode (P2) werden weit außerhalb des Messbereichs platziert.

Die Transmitterelektrode verbleibt während der Messungen an Ort und Stelle in Kontakt mit dem Erzkörper, die Potentialelektrode ist mobil. Mit ihr wird das Areal um die Transmitterelektrode entlang von Profilen oder Rastern untersucht. Weiterführende Informationen zur Methode und ihren Anwendungsmöglichkeiten finden sich in PARASNIS (1966) und REYNOLDS (1997).

5.3.4 Induzierte Polarisierung

Die Effekte der induzierten Polarisierung wurden erstmals 1912 von Conrad Schlumberger dokumentiert. In den frühen 50er Jahren wurde die Methode in Nordamerika weiterentwickelt (TELFORD et al. 1990). Seit den 70er Jahren wird der komplexe Widerstand gemessen und die spektrale induzierte Polarisierung eingesetzt (PELTON et al. 1978). Seit Beginn der 90er Jahre werden die Methoden der induzierten Polarisierung in der Umweltgeophysik eingesetzt (CAHYRA et al. 1990) und befinden sich bis heute in der Weiterentwicklung (REYNOLDS 1997). Untersucht werden unterschiedliche, durch das Anlegen einer äußeren Spannung hervorgerufene Polarisierungseffekte. Neben Messungen im Zeitbereich und bei einzelnen Frequenzen werden spektrale IP-Messungen im Frequenzbereich von 10^{-3} bis $4 \cdot 10^3$ Hz durchgeführt. Zur Herstellung des galvanischen Kontaktes mit dem Untergrund werden die gleichen Vierpunkt-Sondenordnungen eingesetzt wie für die geoelektrischen Widerstandsmessungen. Nähere Informationen zur Methode und zu weiterführender Literatur finden sich in REYNOLDS (1997), MARSHALL & MADDEN (1959) und FRASER et al. (1964).

Die Messungen können ebenso über die dielektrischen Eigenschaften eines Mediums Auskunft geben wie über dessen Porenanteil und -geometrie, den Tongehalt und zahlreiche weitere Gesteinseigenschaften. Welches Potential die Methoden der induzierten Polarisierung letztlich tatsächlich für die zerstörungsfreie Untersuchung von Erddämmen bergen, werden erst die Resultate zukünftiger Arbeiten zeigen können.

5.3.5 Elektromagnetik

Die elektromagnetischen Methoden zählen zu den verbreitetsten Anwendungen der zerstörungsfreien Untergrunderkundung. Der Schwede Karl Sundberg entwickelte nach dem ersten Weltkrieg das nach ihm benannte Sundberg-Verfahren zur Erz- und Kohlenwasserstoffexploration. Ein weiterer Pionier auf dem Gebiet der Elektromagnetik war der russische Geophysiker V. R. Bursian, dessen Arbeiten aus den frühen 30er Jahren stammen (REYNOLDS 1997). Die berührungslosen elektromagnetischen Verfahren gestatten Untersuchungen zu Land, in der Luft, zu Wasser und in

Bohrlöchern. Das Spektrum der Methoden und der dafür eingesetzten Geräte ist sehr vielfältig. Neben den passiven tellurischen und magnetotellurischen Methoden, die als Signalquelle die zeitlichen Variationen des natürlichen Magnetfeldes der Erde und der äquatorialen Gewitterzonen nutzen, existiert eine große Zahl aktiver Verfahren, die auf der Auswertung künstlich erzeugter Signale basieren. Die Detektion von in großer Distanz zum Untersuchungsgebiet erzeugten elektromagnetischen Feldern ist ebenso gebräuchlich wie die Vermessung von in unmittelbarer Nähe, von stationären oder mobilen Sendern erzeugten Felder. Die Größe der Sender reicht von wenigen Metern bis zu mehreren Kilometern. Die elektromagnetischen Erkundungsmethoden nutzen Frequenzbereiche von maximal wenigen Kilohertz. Die Zweispulensysteme mit mobilem Transmitter und Receiver haben die weiteste Verbreitung in der Umwelt- und Ingenieurgeophysik (MCNEILL 1990). OGILVY et al. (1991) haben mit Hilfe elektromagnetischer Erkundungen ein unterirdisches Cavernensystem erkundet, das im Mittelalter die Stadt Alcalá de Henares, nahe Madrid, mit Wasser versorgt hat.

Die in den Untergrund eindringenden elektromagnetischen Wellen induzieren in gut leitenden Strukturen Wirbelströme, die ihrerseits ein sekundäres elektromagnetisches Feld hervorrufen. Dieses Feld enthält die gewünschten Informationen über den Untergrund. Die Erfassung seiner Komponenten ist Gegenstand der Untersuchungen. Weiterführende Informationen finden sich bei NABIGHIAN (1987), (PARASNIS 1966) und WARD (1990).

Mit Hilfe der elektromagnetischen Verfahren wird die Leitfähigkeitsverteilung innerhalb des Untergrundes erkundet, die Rückschlüsse auf Lithofazies und Wassergehalt zulässt. Ein großer Vorteil gegenüber den reinen Widerstandsmethoden (siehe Kapitel 5.4) besteht in der berührungslosen Anwendbarkeit. Die rein induktive Ankopplung ermöglicht hohe Messfortschritte selbst dann noch, wenn bei der Anwendung der Widerstandsgeoelektrik bereits mit erheblichen Kontaktproblemen und der starken Verringerung des Messfortschritts zu rechnen ist. Problematisch sind Abschirmungseffekte gut leitender Deckschichten und die Anfälligkeit gegenüber technischen und atmosphärischen Störungen.

5.3.6 Magnetik

Die Magnetik gehört zu den ältesten, von der Menschheit genutzten physikalischen Methoden. Bereits 200 v. Chr. wurden in China magnetitreiche Gesteinsfragmente zur groben Bestimmung der Richtung eingesetzt. In Europa wurde die richtungsweisende Magnetnadel jedoch erst im Mittelalter von Marco Polo eingeführt (REFORD 1980). Im Verlauf des 20. Jahrhunderts erfuhr die Magnetik eine permanente Weiterentwicklung. Neben dem Protonenpräzessionsmagnetometer wurde das Absorptionszellen-Magnetometer entwickelt. Seit Ende der 60er Jahre werden Gradiometer eingesetzt, die zwei einzelne Fluxgatemagnetometer, mit einem vertikalen Abstand zueinander, enthalten. Mit Hilfe der Gradiometer wird näherungsweise der Vertikalgradient der Vertikal-komponente des natürlichen Magnetfeldes gemessen. Da stets Differentialmessungen durchgeführt werden und beide Sonden gleichermaßen von zeitlichen Variationen betroffen sind, können diese vernachlässigt werden. Ebenso werden langwellige Anomalien unterdrückt. Detaillierte Angaben zu den Messgeräten und -verfahren finden sich in REYNOLDS (1997) und TELFORD et al. (1990).

Gemessen wird die magnetische Induktion, die auf zwei Arten der Magnetisierung zurückgehen kann. Zum einen ist dies die remanente Magnetisierung, die auch ohne das Vorhandensein eines äußeren magnetischen Feldes persistent ist, und zum anderen die induzierte Magnetisierung, die lediglich temporär, solange ein äußeres Magnetfeld anliegt, auftritt. Die resultierende Gesamtmagnetisierung ergibt sich aus der Vektor-addition der induzierten und remanenten Magnetisierung (STÖCKER 1994).

Die magnetischen Methoden werden bei der zerstörungsfreien Erkundung von Hochwasserschutzanlagen zur Differenzierung unterschiedlich magnetisierter Materialien eingesetzt. Dies können natürliche, den Dammkörper aufbauende Erdbaustoffe mit magnetischen Komponenten, autochthone Komponenten des Untergrundes, aber auch verborgene Bauwerksreste, beispielsweise aus Ziegel oder armiertem Beton, oder illegal eingelagerter Hausmüll, Industrieabfälle oder Bauschutt sein.

5.3.7 Georadar

Das Geo- oder Bodenradar nutzt weitaus höhere Frequenzen als die elektromagnetischen Erkundungsmethoden. Das Spektrum reicht von einigen Megahertz bis in den Gigahertzbereich hinein. Die ersten Anwendungen von Radarmethoden zur Ortung von im Untergrund verborgenen Objekten finden sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts in deutschen Patentschriften von Hülsenmeyer, Löwy und Hülsenbeck (REYNOLDS 1997). In den folgenden fünf Jahrzehnten wurden die impulsbasierten Radarverfahren weiterentwickelt und seit den 60er Jahren zunächst für die Untersuchung von Permafrostgebieten eingesetzt. Mittlerweile hat sich das Anwendungsspektrum erweitert und reicht von ingenieurgeologischen Fragestellungen über die Rohstoffexploration bis hin zur Archäologie (THIERBACH 1974). Die Radarmethoden werden von der Oberfläche aus, im Bohrloch, im Flugzeug und zu Wasser angewandt.

Unterschiedliche Materialien reagieren sehr verschieden auf die Durchstrahlung mit den hochfrequenten elektromagnetischen Wellen. Während die polaren Eismassen sich quasi transparent gegenüber der Radarstrahlung zeigen und diese bis in große Tiefen passieren lassen, wird sie von wassergesättigten Tonen und dem Meerwasser gänzlich reflektiert oder absorbiert. Auf ihren Weg in die Tiefe wird die Radarstrahlung an Grenzflächen zwischen Bereichen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften reflektiert. Die Geschwindigkeit, mit der sich die elektro-magnetischen Wellen ausbreiten, richtet sich nach der Beschaffenheit des durchstrahlten Mediums. Eine detaillierte Erläuterung der Methode und Hinweise auf weiterführende Literatur finden sich in REYNOLDS (1997).

Georadar ist im Rahmen der zerstörungsfreien Dammerkundung immer dann von Nutzen, wenn dielektrisch deutlich kontrastierte Objekte oder Schichtglieder unterschieden werden sollen. Dies gilt für die Ortung von Fremdkörpern und Hohlräumen ebenso wie für die Differenzierung einzelner Dammelemente und der Schichtglieder des Untergrundes. Streuung, Absorption sowie Antennen- und Übertragungsverluste wirken sich störend auf die Messungen aus. Hohe Wassergehalte der zu untersuchenden Sedimente reduzieren die Eindringtiefe der Radarstrahlung auf ein Minimum (REYNOLDS 1997).

5.3.8 Seismik

Seismische Untersuchungen werden bereits seit dem 19. Jahrhundert zur Untergrund-erkundung eingesetzt. Erste Versuche mit künstlich erzeugten seismischen Impulsen wurden von dem Iren Robert Mollet 1846 unternommen (REYNOLDS 1997). 1910 entdeckte Andrija Mohorovièiæ die nach ihm benannte Diskontinuität zwischen Erdkruste und -mantel anhand der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten erdbebenbedingter seismischer Wellen (TELFORD et al. 1990). Während die Beobachtung natürlicher seismischer Impulse keine Rolle bei der Erkundung des oberflächennahen Untergrundes spielt, ist der Einsatz von auf künstlich erregten seismischen Impulsen basierenden Methoden weit verbreitet. Künstliche seismische Impulse werden mit Hilfe von Vorschlagshämmern, Dampfhämmern, von Fall- und beschleunigten Gewichten erzeugt. Weitere Möglichkeiten sind der Einsatz von Sprengstoff, Feuerwaffen und der schlagartigen Expansion von Pressluft in Wasser. Höherfrequente Impulse werden durch Vibratoren erzeugt (TELFORD et al. 1990). Das Prinzip seismischer Messungen beruht auf der Beobachtung der Laufzeit und räumlichen Ausbreitung einer seismischen Welle. Die Reflektionsseismik nutzt die an Schichtgrenzen reflektierten seismischen Wellen, die Refraktionsseismik untersucht die refraktierten Wellen (Abb. 5.13). Weiterführende Informationen zu den seismischen Methoden im Allgemeinen finden sich in TELFORD et al. (1990) und REYNOLDS (1997). Die Adaption einer seismischen Methode an die Erfordernisse der Deicherkundung in Form von normal zur Deichachse orientierten Durchschallungsmessungen ist in KANOWSKI (1978) dargestellt.

Seismische Untersuchungen eignen sich weniger zur Detektion räumlich eng begrenzter Leckagen oder Schwachstellen, sie liefern vielmehr Informationen zum lithologischen Aufbau des Dammkörpers und des Untergrundes sowie zur Lage von Schichtgrenzen. Störend bei der Durchführung seismischer Messungen wirken sich stark befahrene Wasser- und Landstraßen sowie die Nähe zu industriellen Anlagen und ungünstige Witterungsverhältnisse, wie starker Regen oder Wind, aus.

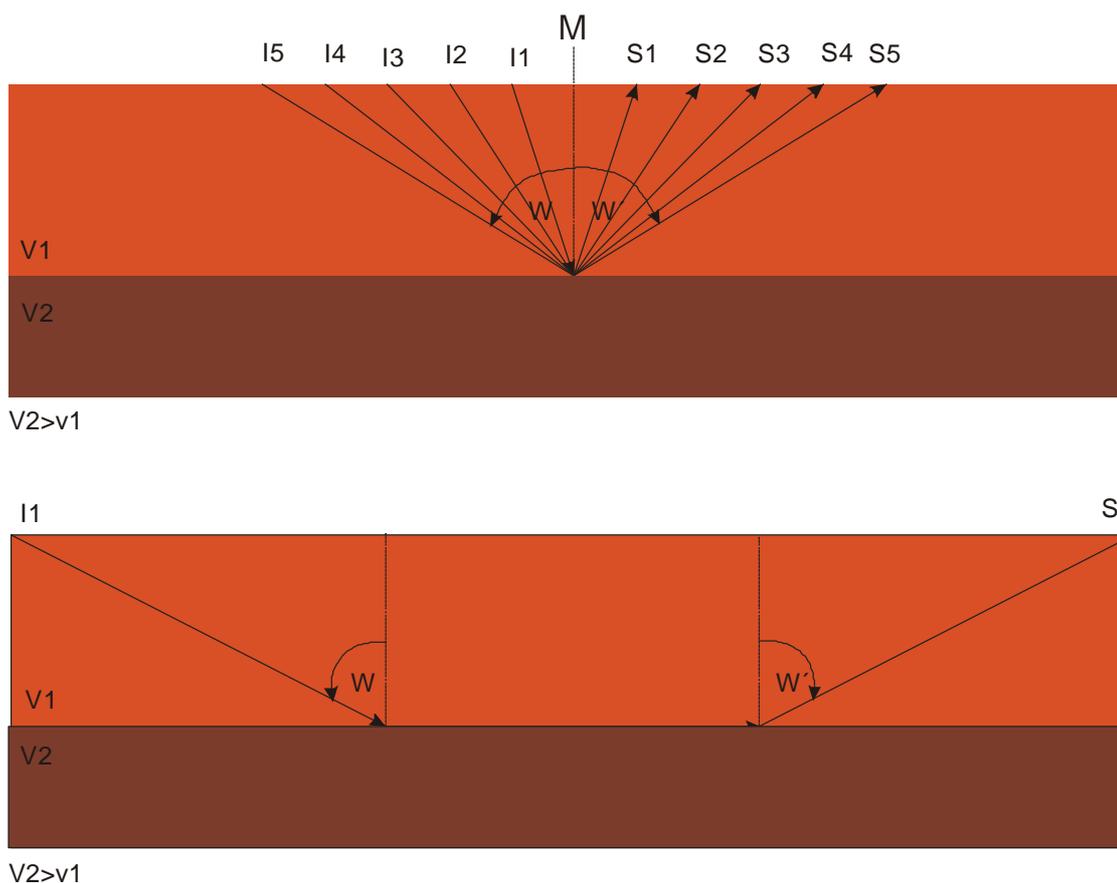


Abbildung 5.13: Seismische Impulse. Oben: Reflektionen einzelner seismischer Impulse (I1 bis I5) an der Grenzschicht und die resultierenden Signale (S1 bis S5). Unten: Strahlenweg einer refraktierten Welle. Bei horizontaler Lagerung ist $W = W'$.

5.3.9 Gravimetrie

Die Gravimetrie wird seit dem frühen 20. Jahrhundert intensiv in der Kohlenwasserstoffexploration eingesetzt. Mit der Entwicklung der Mikrogravimetrie und der entsprechenden Messtechnik, gewann diese Methode zunehmend an Attraktivität im Bereich der angewandten Geologie und Archäologie (REYNOLDS 1997). Mit Hilfe der gravimetrischen Methoden werden durch das Gravitationsfeld und das rotationsbedingte Beschleunigungsfeld der Erde hervorgerufene Änderungen der Beschleunigung gemessen. Generelle Informationen zur Methode und deren Anwendung bei der Bearbeitung geologischer Fragestellungen finden sich in TELFORD et al. (1990).

Insbesondere bei der Hohlräumortung im Rahmen geologischer und archäologischer Fragestellungen können die gravimetrischen Methoden sehr erfolgreich eingesetzt werden (COLLEY 1963; LAKSHMANAN 1991). Problematisch bei der Erkundung des oberflächennahen Untergrundes sind geringe Dichteunterschiede der Zielobjekte im Vergleich zur Umgebung und geringe Volumina. Hohe Kosten verursachen der Einsatz hochgenauer Messgeräte, die aufwendige Positionsbestimmung der Messpunkte, die Erfassung der Morphologie und geringe Messfortschritte. In der Praxis ist der Einsatz der vergleichsweise aufwendigen Gravimetrie immer dann besonders erfolgversprechend, wenn andere Methoden zu großen Störeinflüssen unterliegen. Die zumeist in irgendeiner Form präsenten anthropogenen Störeinflüsse wie elektrische Leitungen, Zäune und andere metallische Objekte, industrielle Aktivitäten und infrastrukturbedingte Erschütterungen können den gravimetrischen Methoden ebenso wenig anhaben wie die klimatischen Einflüsse Wind und Regen. Hingegen kann die Präsenz eines oder mehrerer dieser Störfaktoren geoelektrische, elektromagnetische und seismische Messungen stark beeinträchtigen.

Für die gravimetrische Untersuchung von Dämmen sind die Dichteunterschiede der am Aufbau des Dammkörpers beteiligten Lockersedimente von Bedeutung. Sowohl die petrologische Zusammensetzung als auch der Kompaktionsgrad und die Wassersättigung tragen zur Gesamtdichte bei. Jedoch auch der Aufbau des Untergrundes beeinflusst entscheidend die Ergebnisse der gravimetrischen Messungen. Während bei aus Lockersedimenten aufgebauten Untergründen die gleichen Kriterien wie beim Dammkörper selbst zum Tragen kommen, sind bei Festgesteinen neben der Petrologie die Klüftigkeit, die diagenetische Hohlraumbildung und, bei den Sedimentgesteinen, der Zementationsgrad von ausschlaggebender Bedeutung.

5.3.10 Temperaturmessungen

Temperaturmessungen geben wertvolle Hinweise auf die Durchströmungsverhältnisse permanent eingestauter Dämme. Die erhöhte Durchströmung im Bereich einer Leckage beeinflusst, neben weiteren physikalischen und chemischen Parametern, die Temperaturverteilung an der Erdoberfläche (ARMBRUSTER et al. 1989b). Sowohl positive als

auch negative Temperaturanomalien können einen geschwächten Dammabschnitt mit verstärkter Durch- oder Unterströmung signalisieren. ARMBRUSTER et al. (1997a, b) geben einen Überblick der thermometrischen und thermographischen Verfahren, deren Einsatzmöglichkeiten, Aussagekraft und Grenzen.

Während die Temperaturverteilung auf den Dammflanken von der Strahlungsintensität und der Verteilung der thermischen Materialkenngrößen im Dammkörper abhängt, wird die Wassertemperatur in den Seitengräben vom abströmenden Druckwasser dominiert und liefert direkte Hinweise auf den Wasserhaushalt. Durch die Verlagerung der Messungen in den obersten Bereich der Sedimentsäule lässt sich die von ARMBRUSTER et al. (1997a) beschriebene Verschleppung der Temperaturanomalien umgehen. Dennoch ist die Aussagekraft der Temperaturmessungen begrenzt, da die Position der Temperaturanomalien nur eingeschränkt Auskunft über die Position korrespondierender Leckagen gibt. Die Lage der Anomalien im dammseitigen Randbereich des Druckwasserkanals ist in hohem Maß von den Fließwegen zwischen Leckage und Seitengraben abhängig, die nicht zwingend normal zur Dammachse orientiert sein müssen. Eigene Geländeuntersuchungen an bekannten Leckagen haben ergeben, dass das abfließende Leckagewasser keineswegs stets entlang des kürzesten Weges senkrecht zum Streichen des Damms dem Druckwasserkanal zufließt, sondern dass die bevorzugten Fließwege zwischen Leckage und Druckwasserkanal von zahlreichen lithofaziellen Faktoren abhängen können. Die hydromechanisch relevanten Sediment-eigenschaften hängen zum einen von der Qualität des eingebauten Materials sowie den angewandten Einbautechniken ab, zum anderen sind sie der permanenten Beeinflussung durch die Alterungsprozesse der Diagenese ausgesetzt. Generell ist beim Austritt von Leckagewasser mit der großflächigen Verteilung im Abstrombereich der Leckage zu rechnen (s. Kap. 6.1.5.1). ARMBRUSTER et al. (1989a) bestimmen an einem großmaßstäblichen Modell einen maximalen Neigungswinkel der Druckwasserlinie parallel zur Dammachse von 6° im Abstrombereich einer Leckage.

5.4 Die Anpassung geoelektrischer Ausrüstungen an die Dammerkundung

Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Informationstechnologie hat zum Einsatz hochentwickelter Auswerteverfahren und miniaturisierter Messtechnik geführt, deren Leistungsfähigkeit die der vorhergehenden Generationen weit hinter sich lässt. Ein Manko bei der Durchführung geoelektrischer Erkundungen sind jedoch die vergleichsweise arbeitsintensiven Gelände-prozeduren. Sie verursachen hohe Kosten, die möglicherweise nicht in jedem Fall durch den Informationsgehalt der Messungen gerechtfertigt sind. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist der Einsatz von genau auf den Untersuchungszweck zugeschnittenem Zubehör. Ein weiterer erfolgversprechender Ansatz ist die Adaption der Methoden selbst. Die Anpassung der Messausrüstung und der Methoden an die Erfordernisse der Dammerkundung ist ein wichtiger Schritt, um die geoelektrische Erkundung als eines der Routineinstrumente des zeitgemäßen präventiven Hochwasserschutzes zu etablieren.

5.4.1 Widerstandsgeoelektrik

Die in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Untersuchungs- und Auswertetechniken der Widerstandsgeoelektrik sind, wie in der Vergangenheit von zahlreichen Autoren gezeigt, grundsätzlich gut für die Untersuchung von Erddämmen geeignet. Die Analyse der einzelnen Arbeitsschritte im Verlauf eigener Geländearbeiten bildete die Grundlage für die auf hohe Messfortschritte gerichtete Weiterentwicklung der Ausrüstungsbestandteile.

5.4.1.1 Die Steigerung der Effizienz geoelektrischer Geländearbeiten

Charakteristisch für die Erkundung von Erddämmen sind lange Untersuchungsstrecken bei kleinen bis moderaten Elektrodenauslagen und kleinen Messpunktabständen. Die geringen Messpunktabstände, in Verbindung mit den langen Untersuchungsstrecken, bedingen das häufige Versetzen der Messeinrichtung. Die einzelnen Arbeitsschritte

setzen sich aus einer Vielzahl immer wiederkehrender Handgriffe im Verlauf des Aufbaus, des Messvorgangs, der Dokumentation, des Abbaus und des Versetzens der Messeinrichtung an den nächsten Messpunkt zusammen. Während die Optimierung des Messvorgangs und der Dokumentation in modernen Messgeräten in Form mehrkanaliger Geräte, der Messwertstapelung und elektronischer Speichermedien bereits verwirklicht ist, bergen die restlichen Arbeitsabläufe geoelektrischer Geländearbeiten erhebliches Rationalisierungspotential (Abb. 5.14).

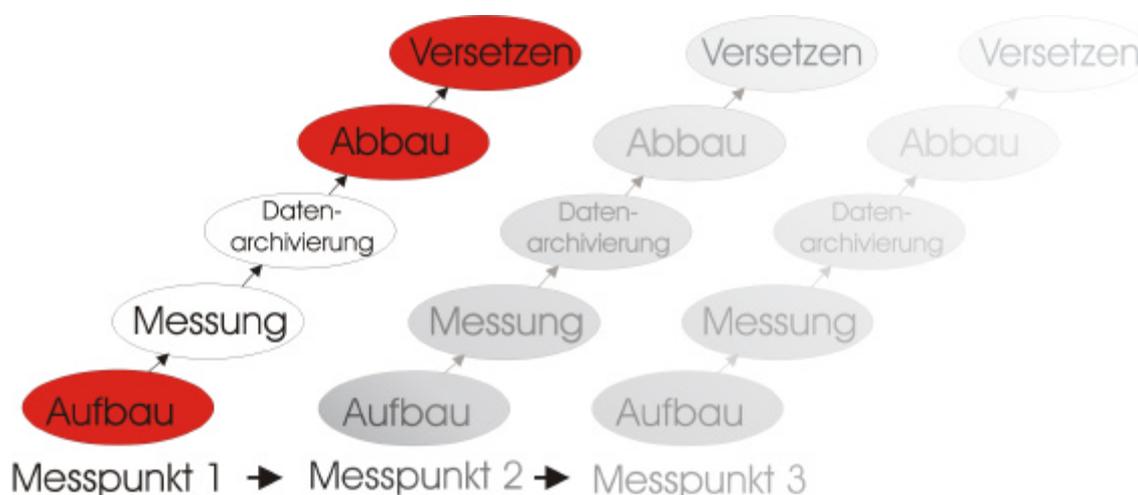


Abbildung 5.14: Arbeitsablauf geoelektrischer Geländearbeiten. Die rot unterlegten Arbeitsschritte bieten Möglichkeiten zur Rationalisierung.

5.4.1.2 Mechanisch belastbare Multielektrodenkabel

Bereits seit den frühen 80er Jahren werden zur Durchführung geoelektrischer Untersuchungen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit Multielektrodenkabel eingesetzt (BARKER 1981; GRIFFITHS et al. 1990; VAN OVERMEEREN & RITSEMA 1988). Mit Hilfe mehradriger Kabel wird eine größere Zahl von Elektroden mit dem Messgerät verbunden, die dann manuell oder rechnergestützt zu unterschiedlichen Elektrodenanordnungen kombiniert werden. Herkömmliche Multielektrodenkabel müssen an jedem Messpunkt komplett aufgebaut und nach der Messung wieder zerlegt und an den

nächsten Messpunkt verbracht werden. Im Rahmen eigener Geländetests wurde ein Multielektrodenkabel mit einer zusätzlichen funktionellen Einheit zur Übertragung mechanischer Zugkräfte entwickelt und damit der Aufwand für diese Arbeitsschritte erheblich reduziert. Das Kabel wird zu Beginn der Messungen mit Elektroden bestückt und, komplett zusammengesetzt, von Messpunkt zu Messpunkt gezogen (Abb. 5.15).

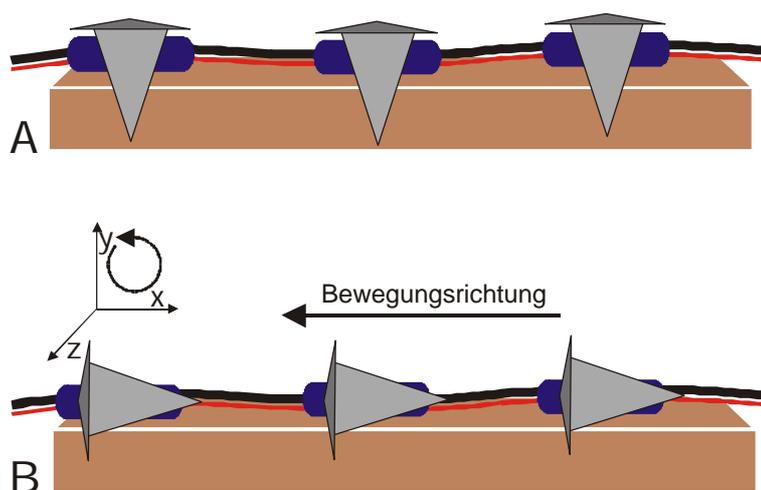


Abbildung 5.15: Das Versetzen des bestückten Multielektrodenkabels. Um das Querstellen der Elektroden zur Bewegungsrichtung einzuschränken, ist die Beweglichkeit der Elektroden auf die Rotation in der XY-Ebene beschränkt.

5.4.1.3 Elektroden

Die Herstellung des galvanischen Kontakts zwischen Elektrode und Erdreich zählt zu den aufwendigsten Schritten bei der Durchführung geoelektrischer Untersuchungen. Der herkömmliche, in der Widerstandsgoelektrik verwendete Elektrodentyp ist stab- oder T-förmig. Es werden häufig aus Vollmaterial bestehende Edelstahlelektroden von 80 bis 90 Zentimetern Länge eingesetzt, die von Hand oder mit Hilfe eines Hammers in den Untergrund eingebracht werden. Auf der Suche nach alternativen Elektroden stellt HESSE et al. (1986) den Kontakt mit Hilfe eines Hochdruck-Wasserstrahls her, der das manuelle Einbringen von Metallelektroden überflüssig macht. PANISSOD et al. (1998)

setzen mit Spikes bestückte Metallräder ein.

Um mit dem oben beschriebenen Multielektrodenkabel mit mechanischer Kraftübertragung hohe Messfortschritte zu erzielen, wurden unterschiedliche Elektrodenvarianten entwickelt und getestet (Abb. 5.16). Die T-förmigen Elektroden eignen sich aufgrund ihrer Größe und des hohen Gewichts nicht zum Einsatz an einem Multielektrodenkabel mit mechanischer Kraftübertragung. Besser geeignet sind Miniaturelektroden oder Spikes. Aufgrund ihres geringen Gewichts und der geringen Größe bergen diese sehr handlichen Elektroden große logistische Vorteile, insbesondere wenn mehrere zehn oder mehrere hundert Elektroden zum Einsatz kommen. Sie stoßen jedoch aufgrund der kleinen Kontaktfläche bei hohen Kontaktwiderständen an ihre Grenzen. Lamellenelektroden weisen von allen getesteten Elektrodentypen das beste Verhältnis von Oberflächengröße zum Gewicht auf. Sie sind jedoch mechanisch nur wenig stabil. Pyramidenförmige Elektroden stellen einen Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen der elektrischen und mechanischen Eigenschaften dar. Die Pyramidalelektroden sind aufgrund ihrer Hohlform leicht, sie weisen im Vergleich zu stabförmigen Elektroden eine größere Oberfläche auf und sind mechanisch dennoch stabil. Sie stoßen an ihre Grenzen, wenn große Eindringtiefen gefordert werden.

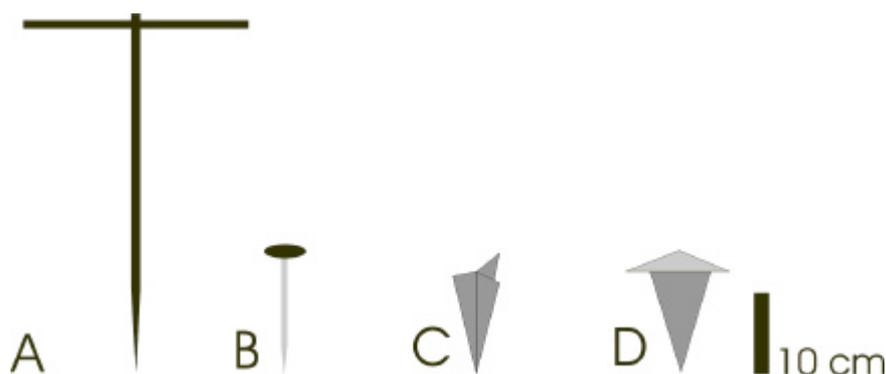


Abbildung 5.16: Geoelektrische Elektroden. A: Herkömmliche T-förmige Edelstahlelektrode. B: Spike. C: Lamellenelektrode. D: Pyramidalelektrode. A und B sind kommerziell erhältlich, C und D sind Eigenentwicklungen. B, C und D eignen sich für die Bestückung eines Multielektrodenkabels mit mechanischer Kraftübertragung.

Unabhängig vom verwendeten Elektrodentyp können unter schwierigen Bedingungen zu hohe Übergangswiderstände zwischen Substrat und Elektroden auftreten. Vor allem grobkörnige Sedimente mit geringem Matrixanteil und trockene Substrate verursachen häufig schwerwiegende Kontaktprobleme. Zur Verbesserung der Kontaktverhältnisse können die Elektroden mit einem Elektrolyten, im einfachsten Fall Wasser, oder einer Tonsuspension benetzt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung zusätzlicher Elektroden. Diese Vorgehensweise entspricht der Parallelschaltung elektrischer Widerstände, deren resultierender Widerstand nur einen Bruchteil dessen der Einzelelektrode beträgt. Eigene Versuche haben ergeben, dass neben der makroskopischen Oberflächenvergrößerung die Mikroreliefierung ein geeignetes Mittel zur Verbesserung des elektrischen Kontaktes zwischen Elektroden und Erdreich ist. Zwar lässt sich die Oberfläche auf diese Weise um ein Vielfaches erhöhen, wie groß jedoch der tatsächliche Nutzen ist, hängt stark vom Verhältnis der Korngrößen des Substrats zur Größenordnung der Reliefierung ab.

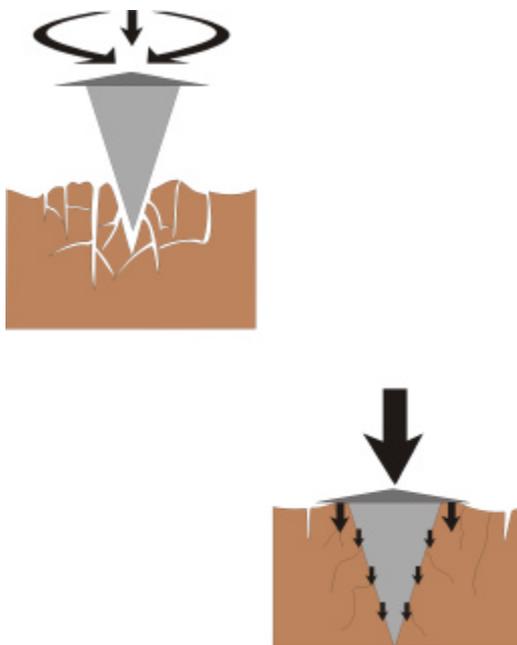


Abbildung 5.17: Die Positionierung pyramidalen Elektroden in hochverdichtetem Substrat.

Harte, hochverdichtete Substrate können, ebenso wie unzureichende Kontaktverhältnisse, den Messfortschritt einer geoelektrischen Untersuchung stark herabsetzen. Meist hilft nur das kraft- und zeitaufwendige Einhämmern der Elektroden weiter. Die in Abbildung 5.17 gezeigten Elektroden bieten eine weniger kraftraubende Möglichkeit des Einbringens in harte Untergründe. Die kantige Form erlaubt durch leichte Drehbewegungen das Auflockern der unmittelbaren Elektrodenumgebung. Nach Erreichen der Eindringtiefe wird das Sediment durch gerichteten Druck von oben auf die Pyramidenflanken und die vergrößerte Deckelfläche erneut komprimiert und der bestmögliche Kontakt zum Untergrund hergestellt.

5.4.1.4 Tiefensondierzubehör

Die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Tiefensondierungen werden üblicherweise mit stationären, beim Messgerät positionierten Kabeltrommeln durchgeführt. Begonnen wird, nach dem Auslegen eines Maßbandes, mit der kleinsten Distanz zwischen den Transmitterelektroden, die dann Schritt für Schritt erhöht wird, bis die gewünschte maximale Elektrodenauslage erreicht ist. Zur Reduzierung des Arbeitsaufwands wurde eine leichtgewichtige Variante der Tiefensondierungselektrode entwickelt, bei der Kabeltrommel und Maßband in die Elektrode integriert sind (Abb. 5.18).

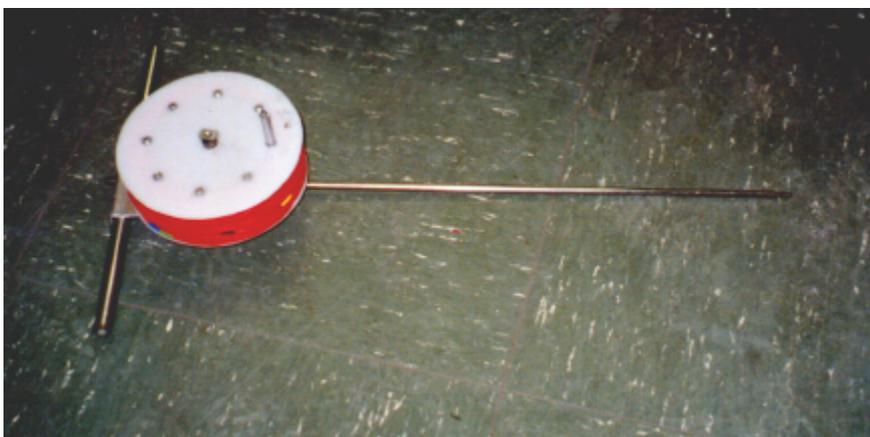


Abbildung 5.18: Elektrode zur Durchführung geoelektrischer Tiefensondierungen.

Das Kabel dient als Stromüberträger und gleichzeitig als Positionierungshilfe. Die Positionen der Messpunkte sind auf dem Kabel markiert. Als erster Arbeitsschritt wird das Kabel ausgelegt und somit gleichzeitig die Position der Elektroden festgelegt. Bei den Messungen wird dann, entgegen der üblichen Vorgehensweise bei einer geoelektrischen Tiefensondierung, mit der maximalen Auslage begonnen, und der Elektrodenabstand wird sukzessive verringert (Abb. 5.19).

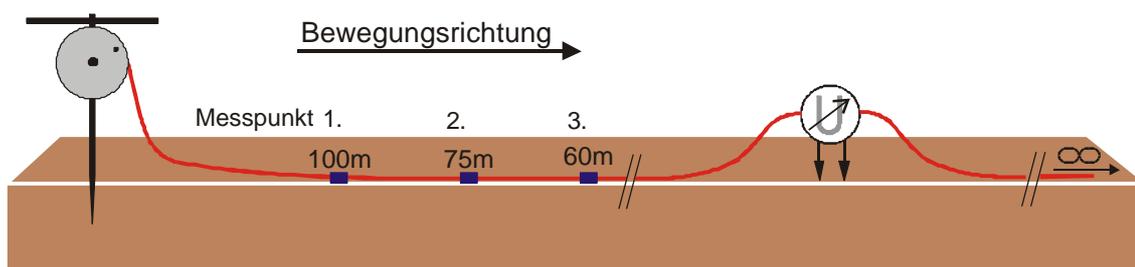


Abbildung 5.19: Messanordnung zur Durchführung einer geoelektrischen Tiefensondierung nach der Pol-Dipol-Anordnung.

Durch das Mitführen der Kabeltrommel an der Elektrode wird die mechanische Beanspruchung des Kabels auf ein Minimum reduziert und seine Standzeit erheblich verlängert.

5.4.1.5 Zubehör zur Aufnahme geoelektrischer Profile

Speziell für die Aufnahme langer, parallel zum Streichen des Dammkörpers orientierter Widerstandsprofile wurde ein leichtgewichtiges Multielektrodenkabel entwickelt (Abb. 5.20; Kap. 5.4.1.2). Zur Ansteuerung des mehradrigen Multielektrodenkabels reicht ein einfaches, mechanisches Schaltspiel aus. Aufgrund des geringen Gewichts und der guten Handhabungseigenschaften können Messungen mit diesem Kabeltyp, die Verwendung eines adäquaten Messgeräts vorausgesetzt, leicht von einer einzelnen

Person bei hohen Messfortschritten durchgeführt werden.

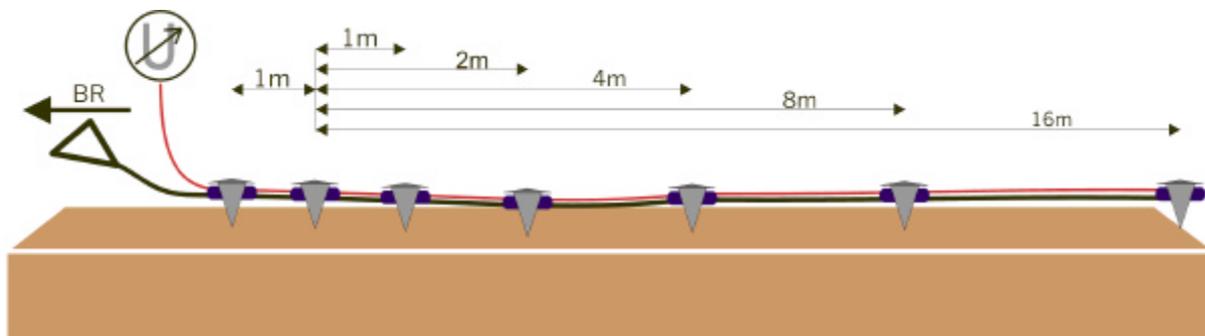


Abbildung 5.20: Nach der Pol-Dipol-Anordnung bestücktes Multielektrodenkabel mit multipler Transmitterelektrode. BR = Bewegungsrichtung.

5.4.1.6 Zubehör für die geoelektrische Kartierung

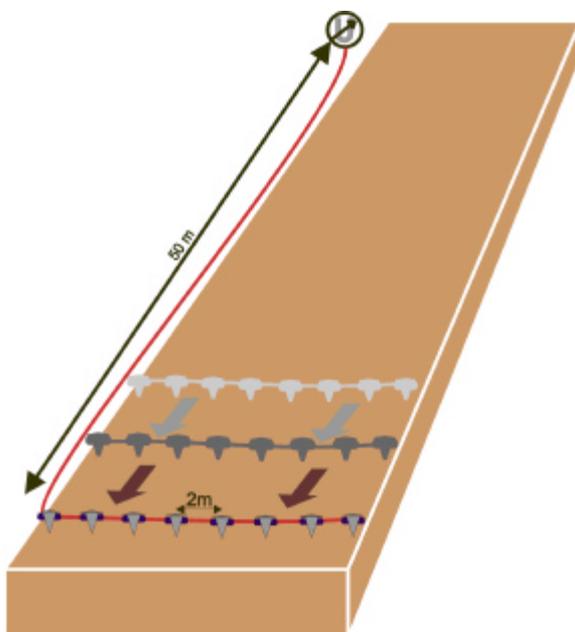


Abbildung 5.21: Multielektrodenkabel zur Durchführung von Detailerkundungen. Mit dem hier gezeigten Kabel kann ohne das Versetzen des Messgeräts eine 100 m lange, 16 m breite Dammstrecke erkundet werden.

Dieses Kabel wurde für flächendeckende Detailerkundungen entwickelt. Es zeichnet sich durch große Länge und auf den Endbereich des Kabels beschränkte Elektroden aus (Abb. 5.21). Die Gesamtlänge richtet sich nach dem angestrebten Aktionsradius, die Länge des mit Elektroden bestückten Teilstücks nach der Breite der Untersuchungsfläche. Während Messgerät und Ansteuereinheit an einem festen Punkt verbleiben, wird lediglich das Kabel über die Untersuchungsfläche bewegt. Auf diese Weise kann auch mit unhandlichen Messgeräten ein hoher Messfortschritt erzielt werden.

5.4.1.7 Untersuchungen zu Wasser

Geoelektrische Widerstandsuntersuchungen zu Wasser werden durchgeführt, um Informationen über die wasserseitige Dammsflanke, den Untergrund der Vorflut oder den Untergrund des Druckwasserkanals zu gewinnen. Die Erkundung von der Wasseroberfläche aus, in der freien Wassersäule oder über Grund, kann kontinuierlich, ohne das zeitraubende Platzieren der Elektroden von Hand und bei besten Kontaktverhältnissen durchgeführt werden. Problematisch wirkt sich, insbesondere bei Messungen von der Oberfläche, eine unruhige Wasseroberfläche aus, die zu ständig wechselnden Widerstandsverhältnissen in der unmittelbaren Sondenumgebung und einer breiten Streuung der Messwerte führt.

Der Einsatz reiner Schleppsysteme, wie sie bei marinen geophysikalischen Untersuchungen häufig zum Einsatz kommen (REYNOLDS 1997), ist mit einigen Nachteilen behaftet. Um die Sondengeometrie und -abstände beizubehalten, muss das Kabel ständig auf Zug gehalten werden. Stillstand oder Rückwärtsbewegungen sind nicht möglich. Die Manövrierfähigkeit eines Schleppsystems ist eingeschränkt und meist nur in sehr großen Radien möglich.

5.4.1.7.1 Der segmentierte Sondenträger

Für Messungen im Bereich der Wasseroberfläche wurde ein aus zahlreichen einzelnen Schwimmkörpern aufgebautes System entwickelt. Um die Sonden­geometrie eines aus starren Segmenten aufgebauten Schwimmsystems aufrecht zu erhalten, muss dieses nicht permanent bewegt werden. Das System kann kontinuierlich oder in Intervallen bewegt werden. Abbildung 5.22 zeigt ein Segment eines schwimmfähigen Sondenträgers.

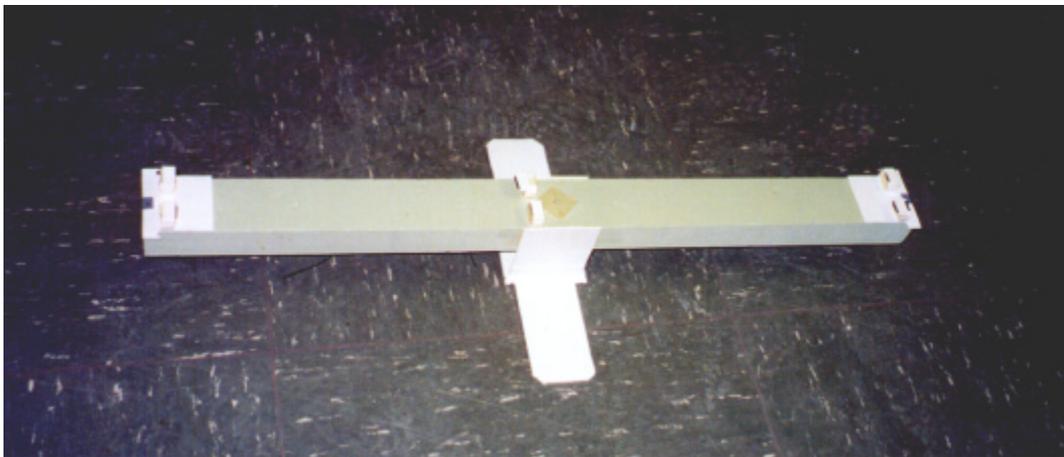


Abbildung 5.22: 1 m langes Teilstück eines segmentierten Sondenträgers. An den Enden sind Kabel­führungen und Gelenke angebracht, in der Mitte die Elektrodenhalterung mit einer aluminium­beschichteten, 320 cm² großen PVC-Elektrode.

Auf seitlich angreifende Wellen oder Strömungen reagiert der segmentierte Sondenträger mit einer kurzzeitigen Ausweichbewegung. Er kompensiert die einwirkende Bewegungsenergie durch Verformung und kehrt nach dem Abflachen der Belastungsspitze in seine Ausgangslage zurück (Abb. 5.23). Der Sondenträger kann sowohl in Bewegung als auch stationär betrieben werden. Abbildung 5.24 zeigt den stationären Einsatz im Rahmen eines Langzeitversuchs.

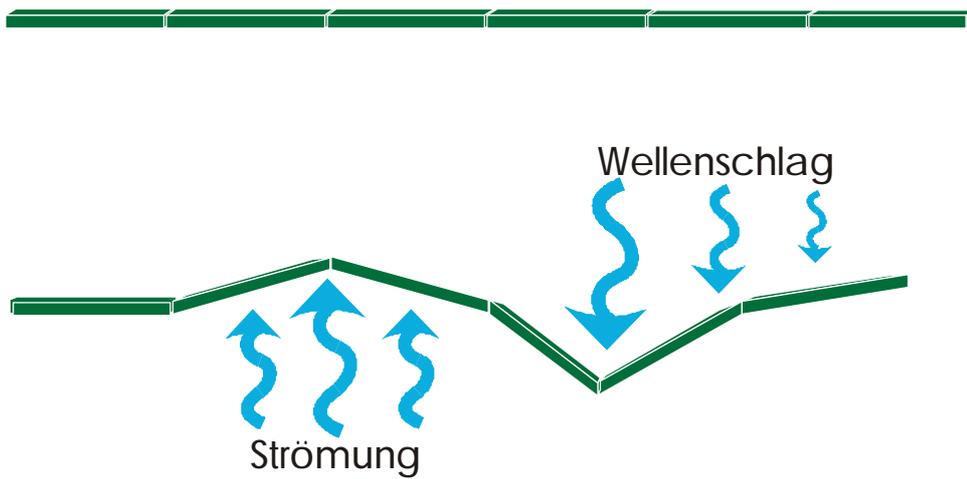


Abbildung 5.23: Das Funktionsprinzip des segmentierten Sondenträgers. Auf seitlich angreifende Kräfte reagiert der Sondenträger mit Verformung (unten). Nach Abflachen der Krafteinwirkung kehrt der Sondenträger in seine ursprüngliche lineare Form zurück (oben).



Abbildung 5.24: Aus vier 1,5 m langen Segmenten aufgebauter Sondenträger im stationären Einsatz.

Der Aufbau aus kompatiblen Elementen ermöglicht die flexible Anpassung des Systems an den jeweiligen Einsatzzweck. Dies gilt für dessen Länge ebenso, wie für die Anzahl, Größe und Beschaffenheit der verwendeten Elektroden (Abb. 5.25).



Abbildung 5.25 Messanordnung mit vier 160 cm^2 großen ellipsenförmigen Edelstahlelektroden (Wenner-Anordnung).

5.4.1.7.2 Messungen in der freien Wassersäule

Bei wind- oder verkehrsbedingter unruhiger Wasseroberfläche kann die Qualität des Messsignals durch die Verlagerung der Messungen in die freie Wassersäule verbessert werden. Speziell für Messungen bei starkem Wellengang wurde ein System mit tief liegendem Schwerpunkt entwickelt (Abb. 5.26). Die Elektroden werden von den Schwimmkörpern getragen. Die Feinabstimmung erfolgt mit Hilfe kleiner Ausgleichsgewichte und der kleinvolumigen stabförmigen Schwimmkörper. Der Auftrieb der Stäbe wird so gering gewählt, dass sie die Elektrode gerade noch in Position halten, jedoch beim Passieren einer Welle die Trägheit des Schwimmkörpers, des Ausgleichsgewichts und der Elektrode nicht überwinden können.

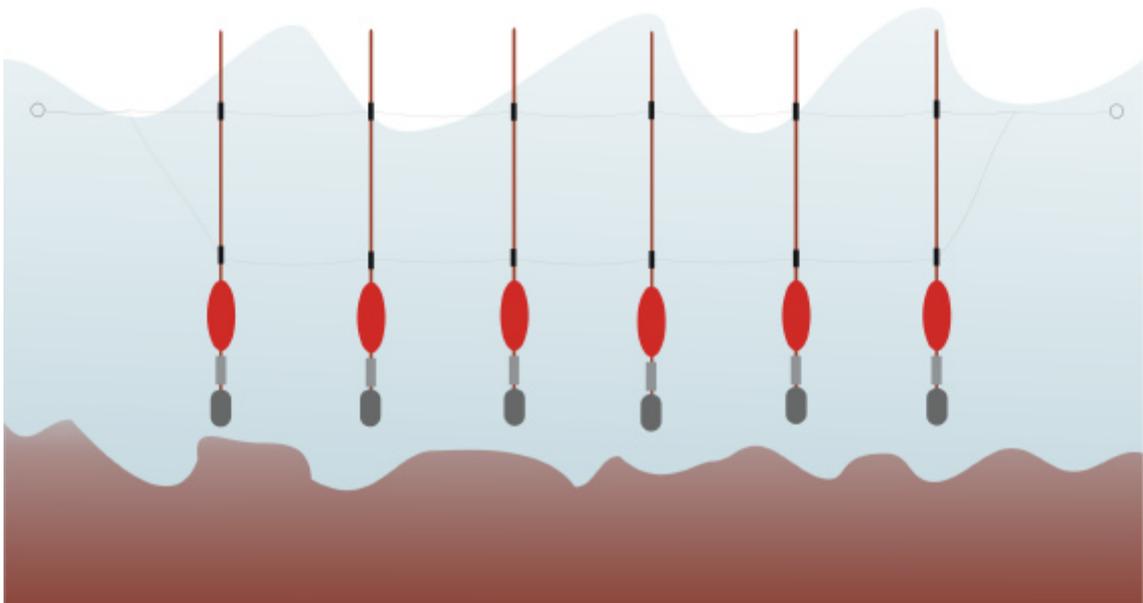


Abbildung 5.26: Sondenanordnung zur Durchführung geoelektrischer Messungen in der freien Wassersäule. Elektroden= dunkelgrau; Ausgleichsgewichte= hellgrau; Schwimmkörper= rot; stabförmige Schwimmkörper= braun.

5.4.2 Eigenpotentialmessungen

Die Eigenpotentialmethode zählt zu den apparativ anspruchslosesten geophysikalischen Methoden. Dieser Sachverhalt darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass sich alle Ausrüstungsbestandteile in technisch einwandfreiem Zustand befinden müssen, um ausrüstungsbedingte Fehlerquellen auszuschließen.

5.4.2.1 Die Messausrüstung

Ein sehr attraktiver Aspekt der Eigenpotentialmethode ist der vergleichsweise geringe apparative Aufwand. Als Messgerät kann jedes handelsübliche Multimeter mit hoher Eingangsimpedanz verwendet werden, das mittels PVC-isolierten Kupferlitzen mit den Elektroden verbunden wird. Die Verwendung von Kabeln in Industriequalität ist zur Durchführung qualitativ hochwertiger Messungen völlig hinreichend, solange sich diese in einwandfreiem Zustand befinden. Bereits feinste Haarrisse in der Ummantelung können die Messungen empfindlich stören. Eine weitere, häufig unterschätzte Störquelle ist der Verbindungspunkt zwischen den Elektroden und dem Kabel. Besteht zwischen dem Substrat und der Steckverbindung ein galvanischer Kontakt, hervorgerufen etwa durch Spritzwasser oder Tau, entstehen die gleichen gravierenden Probleme wie bei einer Beschädigung der Kabelisolation. WINTER et al. (1989) verwenden eine innenliegende, gekapselte Steckverbindung, die gegenüber derartigen Störungen nicht anfällig ist.

Zur Herstellung des galvanischen Kontaktes mit dem Untergrund werden aufgrund ihrer Unpolarisierbarkeit in erster Linie Elektrolytelektroden eingesetzt. Diese bestehen aus einem Metall, das in eine gesättigte Lösung eines seiner Salze getaucht wird. Neben den gebräuchlichsten Cu/CuSO₄-Elektroden finden Ag/AgCl und Zn/ZnSO₄ (REYNOLDS 1997), selten auch Cd/CdCl₂, Pb/PbCl₂ (CORWIN 1989) und Kalomelektroden (SCHUCH 1962; 1989) Verwendung. Um konzentrationsabhängige Potentiale zu vermeiden, muss die Metallsalzlösung stets gesättigt sein. Eine bei Raumtemperatur hergestellte gesättigte Lösung ist, aufgrund der Verschiebung des Lösungsgleichgewichts, bei ansteigenden Temperaturen nicht mehr gesättigt und kann Störpotentiale in der Höhe der Zielpotentiale verursachen. Diese mögliche Fehlerquelle wird durch ein Über-

angebot der festen Phase des Metallsalzes im Sondenkörper behoben (TELFORD et al. 1990). Auch Metallelektroden aus Platin (MERKLER & HÖTZL 1989), kupferbeschichtetem Edelstahl (BUTLER 1989; BUTLER & LOPIS 1990), Kupfer (TELFORD et al. 1990) und aus Blei (REYNOLDS 1997) finden Verwendung.

5.4.2.2 Eigenpotentialmessungen zu Wasser

Einige die Eigenpotentialmessungen störenden Einflüsse treten im Wasser nicht oder nur abgeschwächt auf. Hierzu zählen Schwankungen der chemischen Zusammensetzung der unmittelbaren Sondenumgebung ebenso wie Änderungen der Temperatur und lokale Unterschiede der Evaporation und Evapotranspiration. Auch der Tagesgang der Temperatur verläuft im Wasser ausgeglichener, die Gefahr temperaturbedingter Scheinanomalien ist geringer. Darüber hinaus lassen sich aufgrund des geringen Arbeitsaufwandes beim Platzieren der Elektroden, eine geeignete Messeinrichtung vorausgesetzt, auf dem Wasser sehr hohe Messfortschritte erzielen.

5.4.2.3 Steigerung des Messfortschritts und der Datenqualität

Um den Vorteil des hohen Messfortschritts optimal zu nutzen, ist die Anpassung der Messeinrichtung an den jeweiligen Einsatzzweck notwendig. Bereits kleine Modifikationen und Hilfseinrichtungen können die Wirtschaftlichkeit der Untersuchungen steigern. Werden die Messungen vom Ufer aus durchgeführt, kann der Messfortschritt durch den Einsatz einer Teleskopstange erhöht werden. Hierzu wird das Messgerät und die mobile Elektrode an der Teleskopstange befestigt. Der an Schifffahrtstraßen meist verblockte und schlecht begehbare Uferstreifen muss so nicht direkt betreten werden (Abb. 5.27).

Die apparativ einfachste Verbesserungsmöglichkeit der Datenqualität ist, sowohl zu Wasser als auch zu Land, die Wiederholungsmessung, die jedoch auch den doppelten Arbeitsaufwand verursacht. Als Alternative können bei der Totalfeldmessung (s. Abb.

5.11) mehrere, räumlich getrennte Basissonden verwendet werden (MERKLER et al. 1989; WEIGEL 1989).

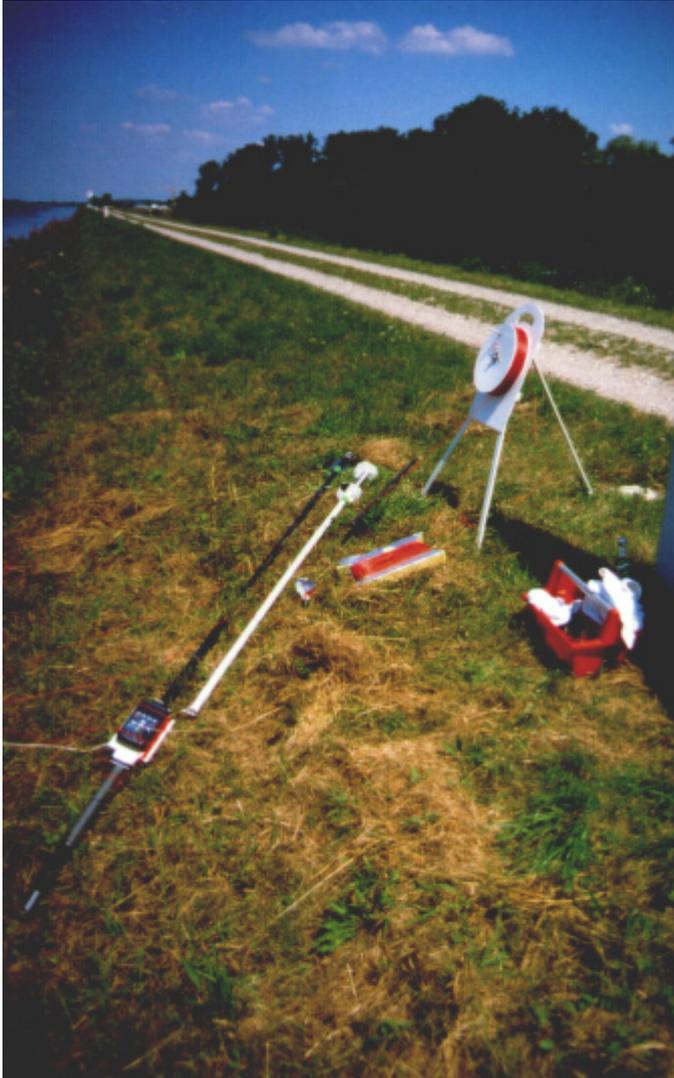


Abbildung 5.27: Ausrüstung zur Durchführung von Eigenpotentialmessungen im Randbereich von Gewässern. Blaue Stange= mobile Elektrode; weiße Stange= Basiselektrode.

Zur Verbesserung der Datenqualität bei Messungen auf dem Wasser wurde eine aus mehreren Einzelelektroden bestehende Elektrodeneinheit gebaut, die als Basis- und als mobile Elektrode verwendet werden kann. Werden alle Sonden von nur einem Messkanal angesteuert, wird eine räumliche Mittelung des Messwerts und die geringere

Gewichtung von Störeinflüssen an den einzelnen Sonden erreicht. Die Verwendung mehrkanaliger Messgeräte erlaubt die Mittelung der Werte nach vorangegangener Kontrolle der einzelnen Kanäle. Abbildung 5.28 zeigt eine schwimmfähige, mehrfach bestückte Elektrodeneinheit.

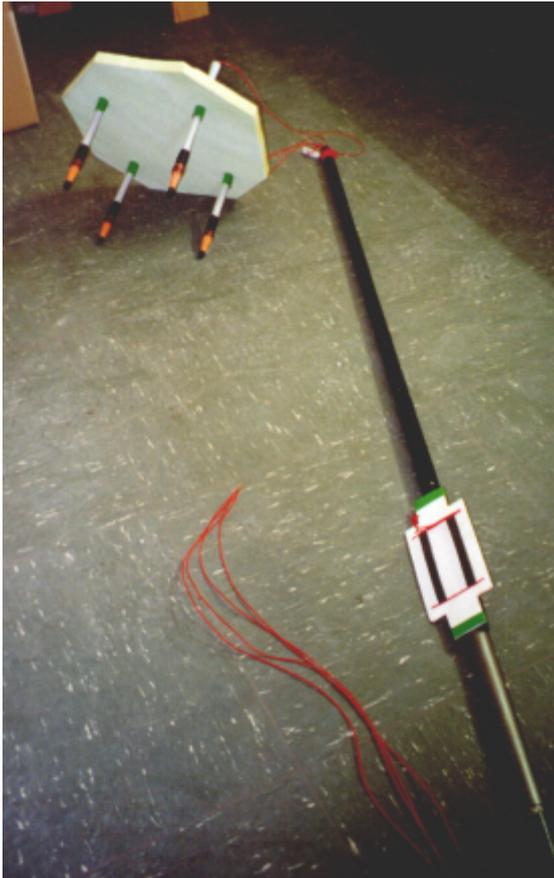


Abbildung 5.28: Vierfach bestückte Elektrodeneinheit. Die vier Elektrolytelektroden werden wahlweise gemeinsam von einem Messkanal oder einzeln, von einem Messkanal pro Elektrode angesteuert.

Für Messungen unter hydrodynamisch oder klimatisch schwierigen Bedingungen können die im Abschnitt Widerstandsgeoelektrik vorgestellten Sondenträger mit Elektrolytelektroden bestückt und zur Durchführung der Eigenpotentialmessungen verwendet werden.

5.4.2.4 Langzeitbeobachtungen

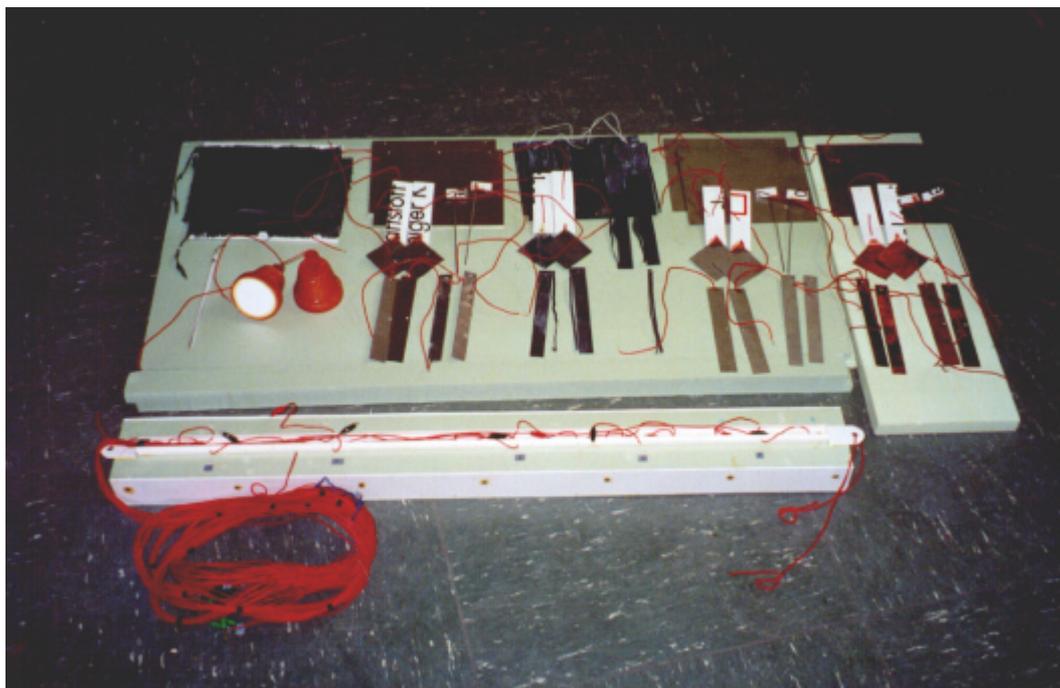


Abbildung 5.29: Testelektroden unterschiedlichen Materials und unterschiedlicher Größe. Von links nach rechts: Kohlefaser (links oben) und Elektrolytelektroden (links unten), daneben Kupfer, Blei, Aluminium und Edelstahl. Im Vordergrund ist der komplett aus Kunststoffen aufgebaute Elektrodenträger abgebildet.

Die Installation von Monitoringsystemen ermöglicht die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung intakter oder bereits geschädigter Dammstrecken über einen längeren Zeitraum hinweg. Um derartige Untersuchungen in einem wirtschaftlich sinnvollen Rahmen durchzuführen, müssen der Wartungsaufwand und die Störanfälligkeit eines solchen Systems auf ein Minimum begrenzt werden. Freilandversuche an einem großmaßstäblichen Modelldamm haben gezeigt, dass apparative Fehlerquellen erhebliches Störpotential bei der Langzeitbeobachtung des leakagebedingten Strömungspotentials bergen können (WURMSTICH & FABER 1989). Auch bei den besser kontrollierbaren Laborversuchen muss der Einfluss möglicher Störquellen auf die Messungen des Strömungspotentials gewissenhaft analysiert werden, um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden (MOLDOVEANU & GEOGESCU 1989). Eine mögliche Fehlerquelle sind nicht reproduzierbare, zeitlich variable Potentialschwankungen und -sprünge, die sowohl bei Elektrolytelektroden (KASSEL et al. 1989) als auch bei

Metallelektroden (MERKLER & HÖTZL 1989) auftreten. Um diese Störeinflüsse angemessen zu berücksichtigen, müssen möglichst genaue Informationen zu den Eigenschaften der verwendeten Sonden vorliegen.

Zur Durchführung von Langzeitmessungen erscheint, trotz der schlechteren Signalqualität, aufgrund ihrer Wartungsfreundlichkeit und der geringeren Störanfälligkeit die Verwendung von Feststoffelektroden gegenüber Elektrolytelektroden vorteilhafter. Anhand eigener vergleichender Elektrodentests wurden sowohl metallische als auch nichtmetallische Elektroden auf ihre Signalstabilität hin untersucht (Abb. 5.29). Jeweils 5 Elektrodenpaare gleicher Beschaffenheit und unterschiedlicher Größe wurden mit 10 cm Abstand strömungsparell an einem 1 m langen Elektrodenträger befestigt und in einem Fließgewässer bei etwa 0,5 m/s Strömungsgeschwindigkeit getestet. Die Tests wurden im östlichen Seitengraben des Rheins bei km 308 durchgeführt. Der individuelle Rauschpegel einer Festkörperelektrode ist vom verwendeten Material abhängig. Die beste Signalstabilität zeigte Blei, dicht gefolgt von Kupfer und Kohlefaser. Die Edelstahlelektroden lieferten die schlechtesten Werte (Abb. 5.30). Jedoch auch die Größe der Sondenoberfläche beeinflusst die Signalstabilität (Abb. 5.31).

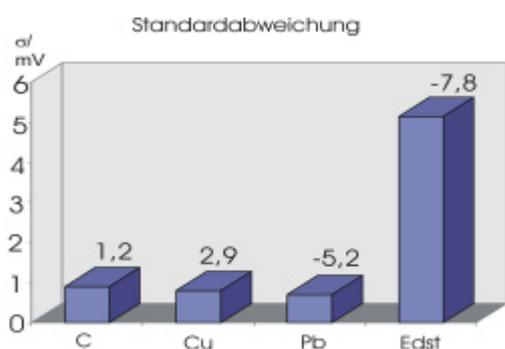


Abbildung 5.30: Signalstabilität von 1000 cm² großen Kohlefaser- (C), Kupfer- (Cu), Blei- (Pb) und Edelstahlelektroden (Edst). Testdauer= 100 min, Messintervall= 1 min. Über den Säulen ist der über das gesamte Messintervall gebildete Mittelwert in Millivolt angegeben.

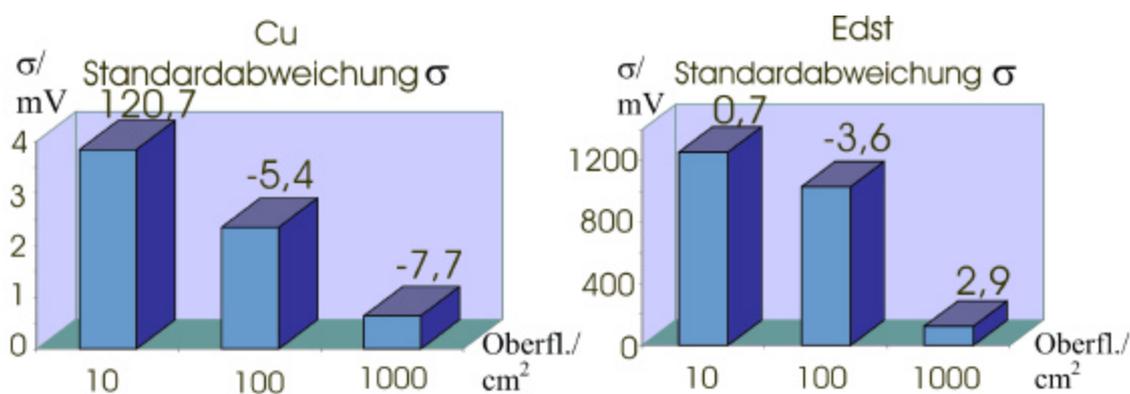


Abbildung 5.31: Elektrodentest mit Kupfer (Cu)- und Edelstahlelektroden (Edst) unterschiedlicher Größe. Mit zunehmender Elektrodenoberfläche nimmt die Standardabweichung (σ) ab. Testdauer= 100 min, Messintervall= 1 min. Über den Säulen ist der Mittelwert aller Messwerte in Millivolt angegeben.

Der Rauschpegel individueller Elektroden ist zeitlich nicht konstant. Mit anhaltender Betriebsdauer konnte, insbesondere bei Pb-Elektroden, eine Stabilisierung des Signals beobachtet werden (Abb. 5.32).

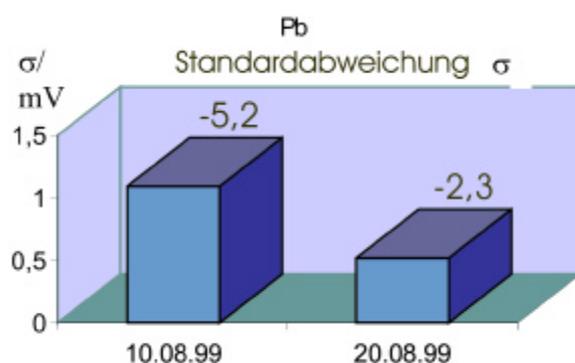


Abbildung 5.32: Signalstabilität von 1000 cm² großen Blei- (Pb) Elektroden. Über den Säulen ist der aus allen Messwerten gebildete Mittelwert in Millivolt angegeben.

Innerhalb von 10 Tagen nahm die Standardabweichung der nicht näher bestimmbaren Störspannungen im Verlauf eines Labortests um etwa 50% ab. Der Test wurde in einem

galvanisch isolierten, 100 Liter fassenden Wasserbehälter bei gleichbleibender Raumtemperatur von etwa 21 °C durchgeführt. Die Elektroden wurden parallel, mit einem Abstand von 10 Zentimetern knapp unterhalb der Wasseroberfläche platziert. Die Standardabweichung σ wurde jeweils anhand einer 100-minütigen Messperiode bestimmt, während derer alle zwanzig Sekunden ein Messwert ermittelt wurde.

5.4.3 Die Modifikation der Mise à la Masse-Methode zur Leckagedetektion an Erddämmen

Auf die Leckageortung an Dämmen übertragen, besteht der geladene Körper in elektrisch gut leitenden Dammabschnitten leckagebedingter, erhöhter Wassersättigung. MOLDOVEANU & SUCIU (1989) stellen eine zerstörungsarme Variante der Mise à la Masse-Methode zur Charakterisierung bereits bekannter Leckagen vor. Sie stellen den Kontakt zu der Schwächezone mit Hilfe einer Bohrung her und erhöhen den Leitfähigkeitskontrast durch die Zugabe einer NaCl-Lösung. Dieses Verfahren setzt jedoch einen Eingriff in den Dammkörper ebenso wie die Kenntnis über die Position der Leckage voraus. Um die Position einer noch nicht bekannten Leckage zerstörungsfrei festzustellen, wurde die Mise à la Masse-Methode an die speziellen Erfordernisse der Damm-erkundung angepasst (Abb. 5.33).

Im Verlauf von Geländeversuchen wurde eine Variante mit linearer, in der Vorflut platzierter Transmitterelektrode gefunden, die einige Vorteile aufweist:

- Die konzentrische Verteilung der Isopotentiale um die punktförmige Transmitterelektrode führt aufgrund der linearen Morphologie- und Strukturelemente eines Dammes zu unerwünschten Verzerrungen. Diese Verzerrungen werden bei der Verwendung eines linearen Transmitters auf ein Minimum reduziert.

- Die Platzierung des Transmitters auf der Vorflutseite und die der Potentialelektrode auf der Luftseite des Dammes ermöglicht die Einbeziehung des gesamten Dammkörpers in die Messungen. Die Verwechslungsgefahr von Bereichen erhöhter Wassersättigung mit auf die Deckschicht der luftseitigen Dammflanke beschränkten Leitfähigkeitsanomalien wird reduziert.

-Die lineare Transmitterelektrode ist tolerant gegenüber lateralen Ungenauigkeiten der Elektrodenposition der Potentialelektrode.

-Die Methode kommt mit nur einer mobilen Elektrode aus und ermöglicht hohe Messfortschritte.

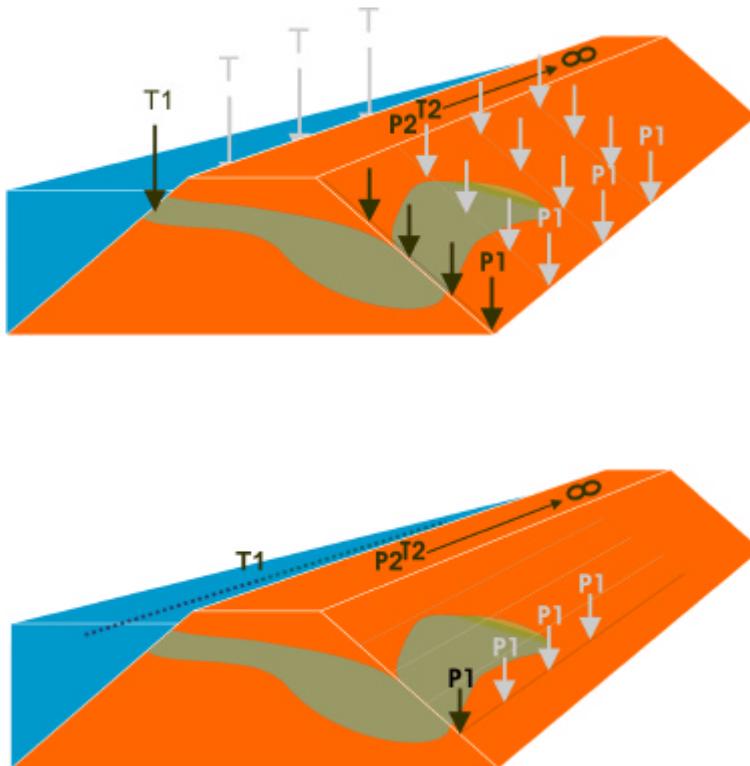


Abbildung 5.33: Die Anpassung der Mise à la Masse-Methode an die Leckagedetektion. Oben: Mit punktförmiger Transmitterelektrode. Unten: Mit linearer Transmitterelektrode. T1,2= Transmitterelektroden; P1,2= Potentialelektroden; ∞ = Platzierung der Elektroden weit außerhalb des Messbereichs.

Trotz der etwas umfangreicheren Vorarbeiten hat sich im Verlauf erster Testmessungen der Einsatz linearer Transmitterelektroden als praktikabel und mit hohem Messfortschritt durchführbar erwiesen (Abb. 5.34).

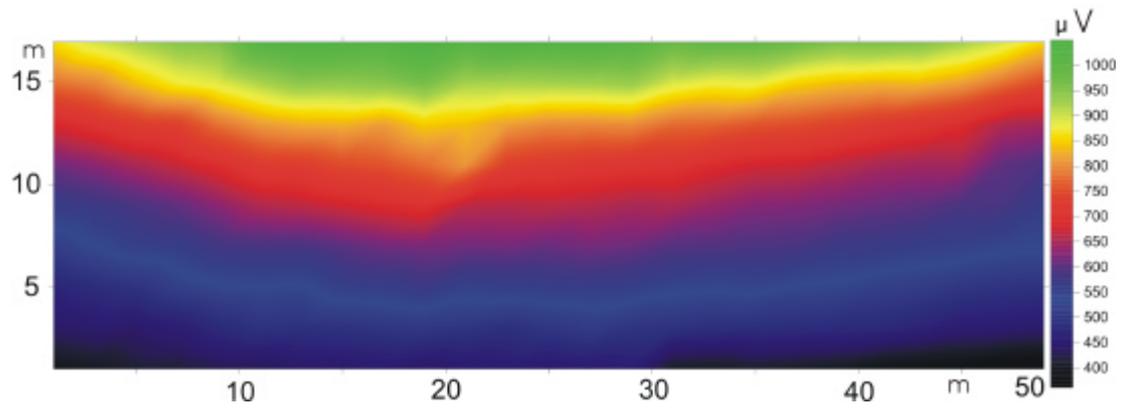


Abbildung 5.34: Isopotentialkarte einer Mise à la Masse-Untersuchung mit linearer Transmitterelektrode. Messpunktabstand (X u. Y)= 2 m. Östlicher Rheinseitendamm km 307 400 bis 307 450.

Neben der Mise à la Masse-Methode können lineare Transmitterelektroden mit zahlreichen weiteren, in der Widerstandsgoelektrik gebräuchlichen Elektrodenanordnungen eingesetzt werden. Abbildung 5.35 zeigt eine Auswahl geoelektrischer Elektrodenanordnungen mit linearen Transmitterelektroden.

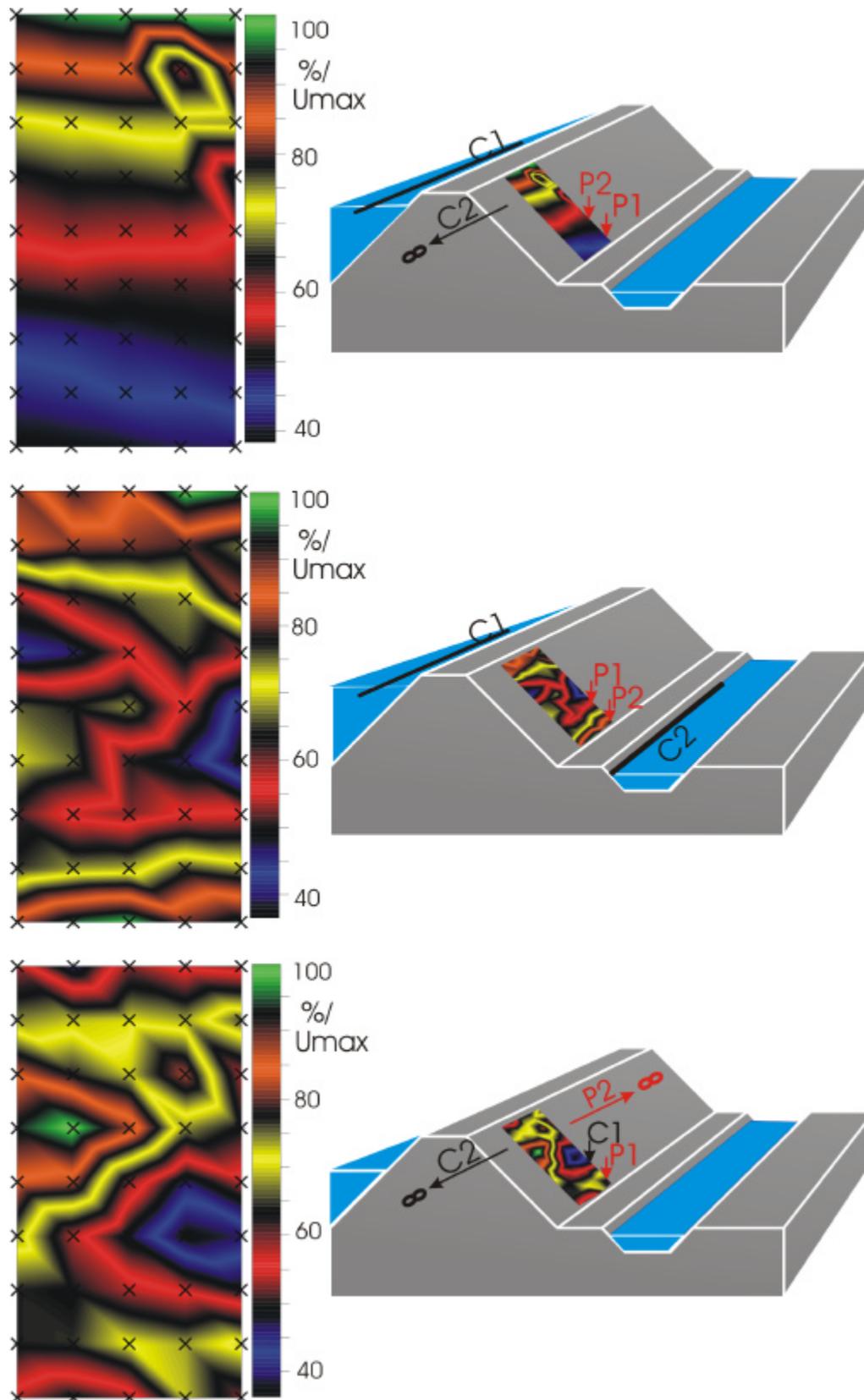


Abbildung 5.35: Einsatzmöglichkeiten linearer und punktförmiger Transmitterelektroden. Oben: Pol-Dipol-Anordnung. Mitte: Gradientenanordnung. Unten: Pol-Pol-Anordnung. Angegeben sind die auf den Maximalwert normierten Spannungswerte in Prozent.

6 Fallbeispiele

Die im Folgenden vorgestellten Fallbeispiele geben einen Einblick in die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Dammerkundung. Während sich die Erkundung eines Stauhaltungsdammes in erster Linie auf aktive Leckagen und die hierfür typischen Indikatoren konzentrierte, richtete sich die Erkundung eines nicht eingestauten Kanaldeichs auf lithofazielle Merkmale, die sich zukünftig im Einstaufall zu einem Sicherheitsrisiko entwickeln könnten.

6.1 Die Erkundung von Stauhaltungsdämmen

Bei der geophysikalischen Leckagedetektion an Stauhaltungsdämmen wird nach leakagebedingten Veränderungen der Damm- und Untergrundeigenschaften gesucht. Darüber hinaus hinterlassen, vor allem in ihrer Entwicklung bereits fortgeschrittene Leckagen, oberirdisch sichtbare Spuren, die im Rahmen einer Sichtprüfung lokalisiert werden können.

6.1.1 Der Rheinseitendamm

Die Erkundung permanent eingestauter Dämme wird am Beispiel des östlichen Rhein-dammes oberhalb der Staustufe Gamsheim erläutert (Abb. 6.1). Das Untersuchungsziel bestand in der Detektion bereits vorhandener und in Entwicklung befindlicher Leckagen, die in diesem Streckenbereich seit Jahren bekannt sind. Überdies wurde der Einfluss einer 18 m hohen Spundwand auf die hydrodynamischen Verhältnisse und der potentielle Störeinfluss der Spundwand auf die geoelektrischen Messungen überprüft. Neben Widerstands-, Eigenpotential- und Temperaturmessungen wurde eine Sichtprüfung durchgeführt.

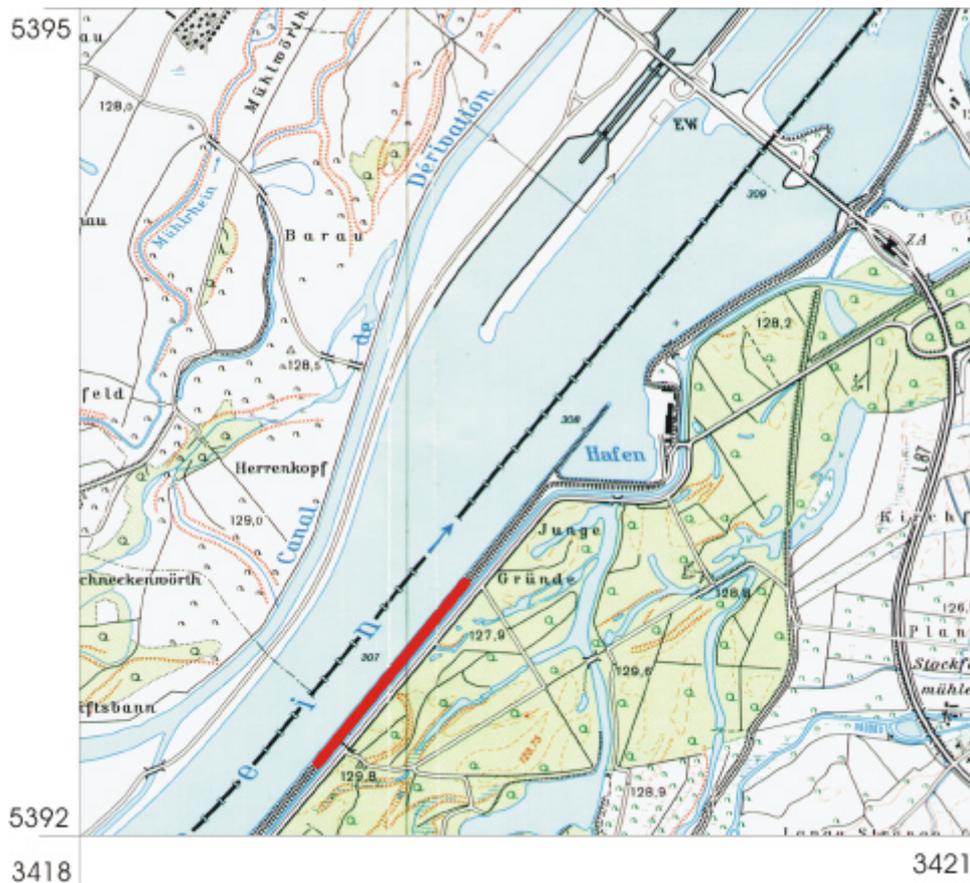


Abbildung 6.1: Lage des 750 m langen Untersuchungsgebietes am östlichen Rheinseitendamm zwischen Rheinkilometer 306 600 und 307 350 (rote Linie). Zahlen= Gauss-Krüger-Koordinaten. Maßstab 1 : 25 000.

Der generalisierte Aufbau des Rheinseitendamms oberhalb der Staustufe Gamsheim ist in Abbildung 6.2 dargestellt. In der Realität weist der damminterne Aufbau zum Teil erhebliche Schwankungen auf, die möglicherweise auf den primären Einbau unterschiedlicher Sedimente, möglicherweise aber auch auf die selektive Sedimentdynamik während der Alterungsprozesse zurückgehen. Die hydraulische Barriere besteht aus einer Kerndichtung, deren trapezförmiger Querschnitt zur Luftseite hin teilweise aus größerem, sandig/kiesigem Sediment besteht. Derartige Abdichtungen sind typisch für Hochwasserschutzanlagen, während deren Bau nicht genügend geeignetes Material zum Aufbau einer vollwertigen Kerndichtung zur Verfügung stand. Sie sind von minderer Qualität und werden als Mangelkern bezeichnet. Der restliche Dammkörper besteht aus

siltig/sandigem Kies variabler Zusammensetzung. Bei gleichbleibendem Aufbau nimmt die Größe des Dammes stromabwärts, mit Annäherung an die Staustufe zu.

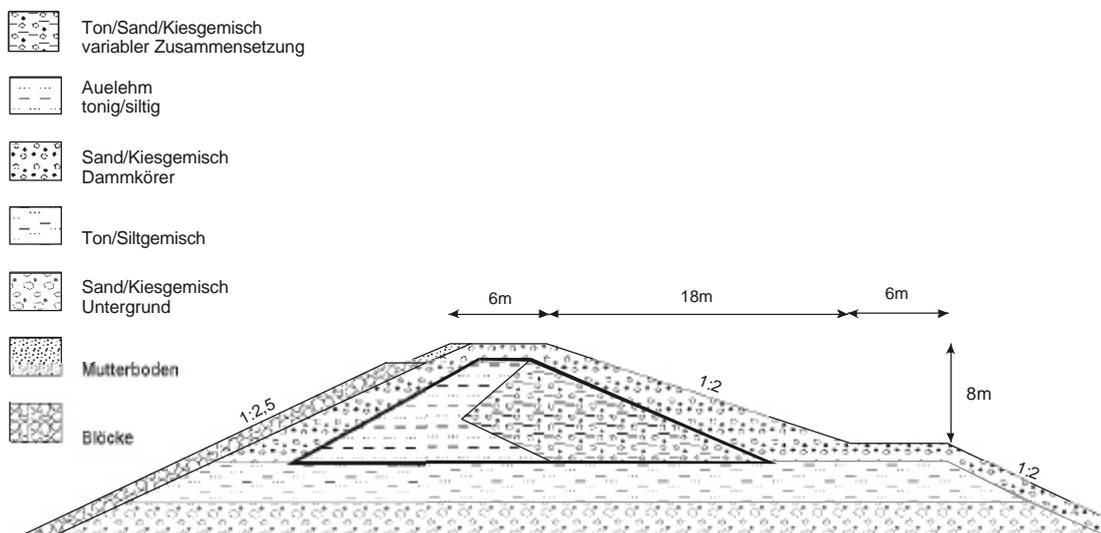


Abbildung 6.2: Schematischer Aufbau des östlichen Rheinseitendamms oberhalb der Staustufe Gamsheim. (Abb. nach Vorlagen des Wasser- und Schifffahrtsamtes Freiburg).

6.1.2 Die Untergrundverhältnisse

Der Untergrund des Rheinseitendamms besteht aus holozänem Alluvium, das von einem bisweilen siltigen Sand/Kiesgemisch variabler Zusammensetzung aufgebaut wird. Die den Sedimentkörper zur Oberfläche hin abschließende Deckschicht wird von sandig/kiesigen Auelehmen gebildet. Im Allgemeinen reicht das Spektrum fluvialer Sedimente, die häufig den Untergrund von Flussdeichen und -dämmen bilden, von tonigen Sedimenten unterschiedlichen Gehaltes organischer Substanz bis hin zu groben Kiesen und Gerölllagen (BENN & EVANS 1998; FÜCHTBAUER 1988; READING 1986). Im Quartär des Oberrheingrabens ist von hydraulisch sehr durchlässigen Grobkiesen bis hin zu quasi undurchlässigen Seetonen das gesamte Korngrößenspektrum in unterschiedlichster Fazies vorhanden (GEYER & GWINNER 1991). Die Fazieswechsel zwischen einheitlich ausgebildeten Bereichen können sich entlang scharfer Grenzen sowohl

vertikal als auch horizontal auf engem Raum vollziehen und mit dem markanten Wechsel der hydraulisch/statischen Eigenschaften einhergehen.

Aus den Vertikalprofilen des untersuchten Streckenabschnitts (Abb. 6.3), zwischen denen ein Abstand von einhundert bis mehreren hundert Metern liegt, lässt sich aufgrund der unbekanntenen Größenordnung der Untergrundstrukturen keinesfalls ein aussagekräftiges Faziesmodell ableiten. Die großen Abstände der Bohrungen sind nicht geeignet, den reich gegliederten fluviatilen Sedimentationsraum angemessen zu charakterisieren.

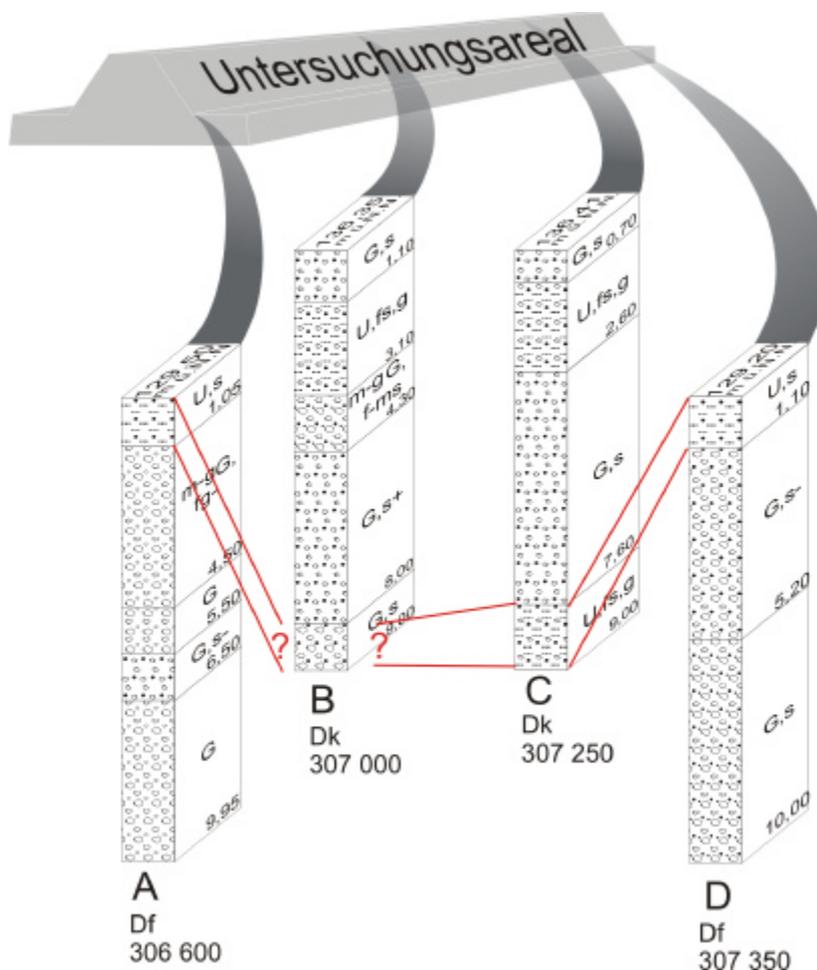


Abbildung 6.3: Bohrprofile des Rheinseitendammes im Untersuchungsgebiet. Rote Linie= Korrelation der Deckschicht. Df= Dammfuß; Dk= Dammkrone; 306 600= Rheinkilometrierung; U= Silt; S= Sand; G= Kies; u= siltig; s= sandig; g= kiesig; f= fein; m-g= mittel bis grob; (Zeichnung nach Vorlagen der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe).

Zur Bestimmung der Lage und Ausdehnung potentieller bevorzugter Fließwege ist die Interpolation zwischen den weit auseinander liegenden Bohrpunkten kein geeignetes Mittel. Durchlässigkeitsinhomogenitäten im Größenbereich einiger Meter oder Zehnermeter werden entweder nicht erkannt, weil sie im Bereich der Bohrung nicht angetroffen werden. Liegen sie jedoch im Bereich einer Bohrung, werden sie möglicherweise überinterpretiert, weil ihnen aufgrund der Bohrpunktabstände ein viel zu großer Streckenabschnitt zugewiesen werden muss. Anhand des Profils B in Abbildung 6.3 ist nicht zu entscheiden, welche Ausdehnung der Bereich der fehlenden oder sehr grobkörnig ausgebildeten Deckschicht hat. Sie kann zwischen 650 und wenigen Metern betragen.

6.1.3 Widerstandsgeoelektrik

Das Ziel der widerstandsgeoelektrischen Untersuchungen bestand im Auffinden von Bereichen, in denen aufgrund abfließenden Leckagewassers zusätzlicher wassergesättigter Porenraum lokale Widerstandsminima verursacht. Das an den Leckagen austretende Druckwasser kann Aufwölbungen des ursprünglichen Druckwasserspiegels verursachen, oder auch in Form von hängenden Druckwasserstockwerken abfließen. Der Einfluss aller weiteren widerstandsrelevanten Elemente des Dammes, angrenzender Bauwerke und des Untergrundes ist bei der Betrachtung der wassersättigungsabhängigen scheinbaren spezifischen Widerstände störend.

Um die potentiellen Störfaktoren qualitativ zu erfassen, wurde zunächst ein einfaches Modell der widerstandsrelevanten Einheiten des Dammes entworfen (Abb. 6.4). Derartige Modelle stellen jedoch stets nur eine Annäherung an die Verhältnisse in natürlichen Systemen dar. In dem hier vorgestellten Beispiel variierten die Abmessungen der dammaufbauenden Elemente, die Lithologie der Wegebeschotterung, die Morphologie des Dammes und die Vegetation.

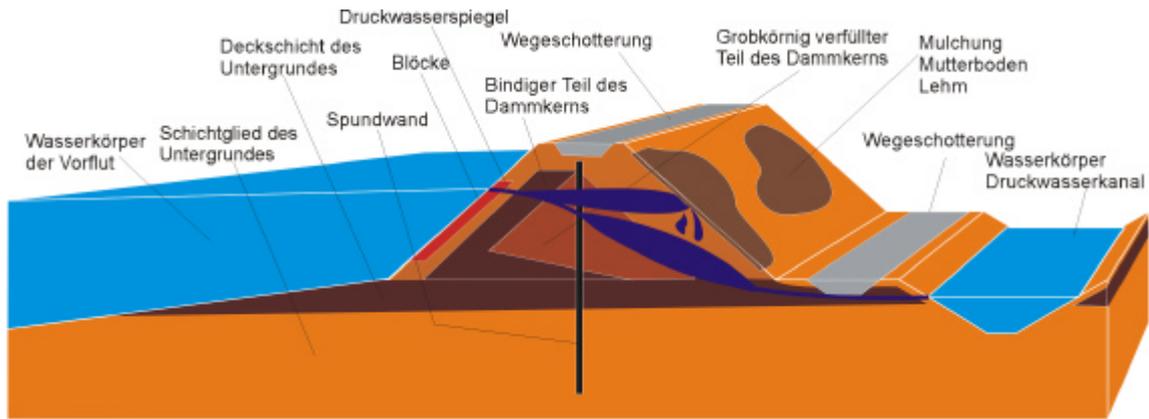


Abbildung 6.4: Die Widerstandselemente des östlichen Rheinseitendamms oberhalb der Staustufe Gamsheim. Das dunkelblau dargestellte Leckagewasser ist der Verursacher der gesuchten Widerstandsminima.

6.1.3.1 Dammparallele geoelektrische Pseudosektionen

Die gemessenen Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes stellen stets eine komplexe Größe dar, die von allen Widerstandselementen des Damms beeinflusst werden. Bei den hier ausschließlich zur Anomaliesuche durchgeführten Messungen entlang von dammparallelen Profilen ist es möglich, sowohl den Einfluss der Topographie als auch jenen der zweidimensionalen Dammelemente auf die Messwerte zu vernachlässigen. Sie wirken sich an jedem Messpunkt entlang eines dammparallelen Profils gleich aus und tragen zu dem Teil des scheinbaren spezifischen Widerstandes bei, der keine Information über potentielle Schwachstellen beinhaltet.

Um ein aussagekräftiges Bild der Widerstandsverhältnisse des Dammkörpers und des Untergrundes zu entwerfen, sind meist Messungen entlang mehrerer Profile notwendig. Die Position der Profile wird so weit entfernt wie möglich von störenden Widerstandselementen und, in diesem Fall, möglichst nahe an den gesuchten, leakagebedingten Veränderungen der Druckwasserlinie gewählt. Die Widerstandsverhältnisse, sowohl im Bereich der Dammkrone als auch des Dammfußes, wurden innerhalb des Untersuchungsgebietes stark von der wechselnden Beschaffenheit der Wegebeschotterung, unterschiedlichem Verdichtungsgrad und Abweichungen vom Sollprofil

des Dammes beeinflusst. Die auf der Dammkrone und der luftseitigen Berme gemessenen Werte unterlagen einer starken Streuung und ließen keine Rückschlüsse auf mögliche Leckagen zu. Weitaus weniger von diesen Störungen beeinflusst zeigte sich der mittlere Teil der luftseitigen Dammflanke. Die Profile im Bereich des Fußes und der Krone wurden etwa 1 m entfernt von der Kronen- und der Fußkante auf der Flanke positioniert. Die Messungen wurden mit der in Kapitel 5.4.1.5 beschriebenen Ausrüstung nach der Pol-Dipol-Anordnung durchgeführt. Als Messgerät wurde ein im niederfrequenten Wechselstrombereich arbeitendes, nur etwa 400 g schweres Gerät verwendet. Die teilweise sehr schlechten Kontaktverhältnisse gingen auf grobkörniges Substrat mit nur geringem Feinkornanteil und anhaltende Trockenheit zurück. Der mangelhafte galvanische Kontakt zwang zeitweise zur Verwendung großflächiger Elektroden und zur Kontaktverbesserung durch Wässern der Elektroden. Bei einem Messpunktabstand von 8 Metern und 6 Messungen pro Messpunkt wurden von einer einzelnen Person Messfortschritte von etwa 600 Metern pro Tag erreicht.

6.1.3.1.1 Ergebnisse

Abbildung 6.5 enthält drei über die luftseitige Dammflanke verteilte Pseudosektionen des scheinbaren spezifischen Widerstandes. Die obere Pseudosektion zeigt zwischen 70 und 750 m eine deutliche vertikale Zonierung mit zur Tiefe hin abnehmenden scheinbaren spezifischen Widerständen. Zwischen 0 und 170 m tritt ein auf die mittleren und großen Elektrodenauslagen beschränktes Minimum des scheinbaren spezifischen Widerstandes auf, das bei 45 m von einem auf die mittleren Elektrodenauslagen begrenzten Maximum überlagert wird. Am unmittelbar benachbarten Messpunkt ist ebenfalls ein Maximum vorhanden, das jedoch auf die kurzen Auslagen beschränkt ist. Ein weiteres auf die kurzen Auslagen beschränktes Maximum befindet sich bei 140 m. Im mittleren Profil ist die vertikale Zonierung bei den kurzen Auslagen nur bereichsweise ausgebildet. Dazwischen befinden sich Abschnitte mit niedrigeren scheinbaren spezifischen Widerständen. Zwischen 520 und 550 m ist ein zweigeteiltes, sich auf die mittleren und kurzen Elektrodenauslagen erstreckendes Minimum ausgebildet.

Pseudosektionen des scheinbaren spezifischen Widerstandes

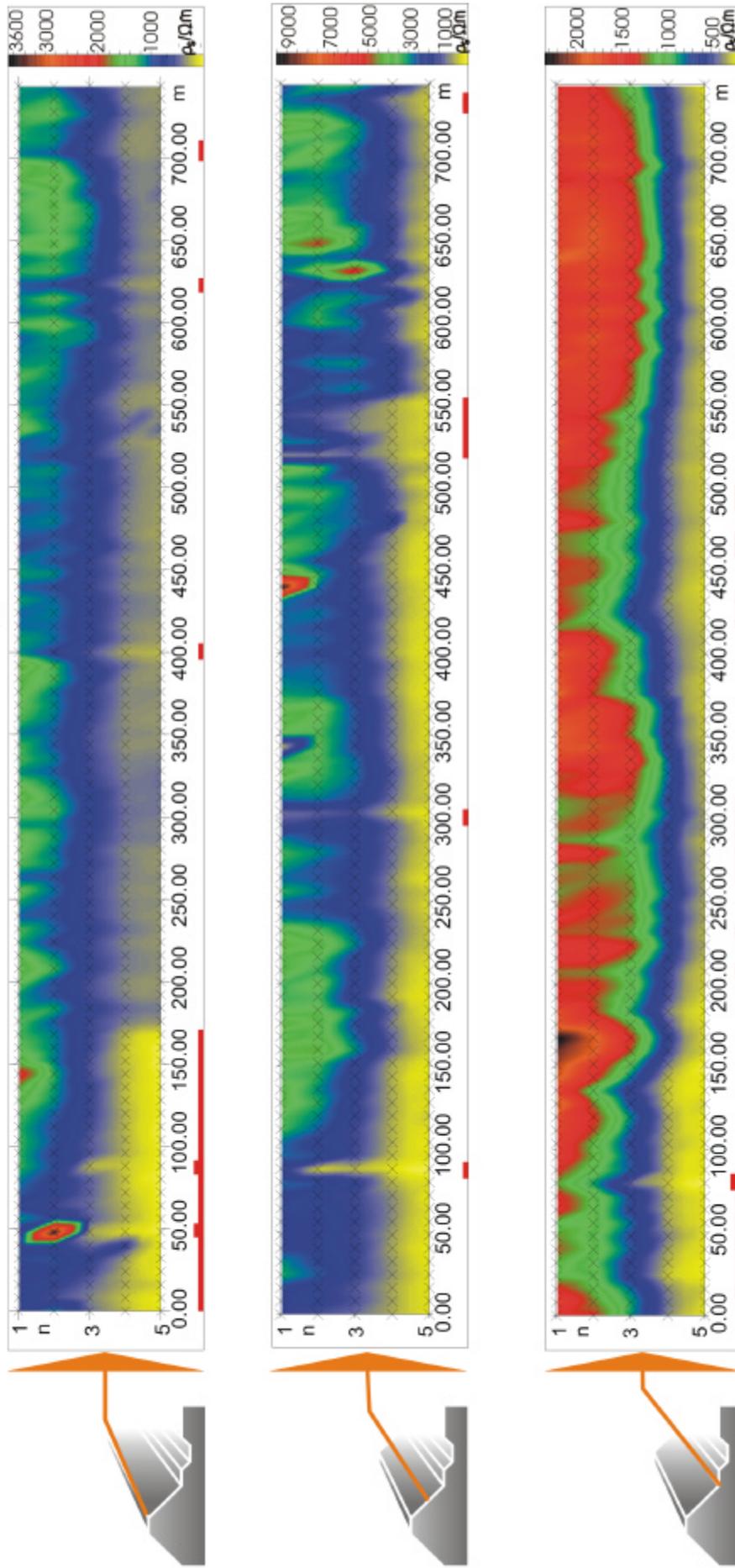


Abbildung 6.5: Pseudosektionen entlang der luftseitigen Dammflanke des Rheinseitendammes zwischen Km 306 600 und 307 350. An den Dammsymbolen (links) ist die Position des jeweiligen Profils markiert. Kreuz= Einzelmessung. Rote Balken= Minima des scheinbaren spezifischen Widerstandes.

Weitere lokale Minima sind bei 90 und 300 m sichtbar. Bei 440 m ist ein auf die kurzen Elektrodenauslagen beschränktes, eng begrenztes Maximum ausgebildet, zwischen 630 und 650 m ein weiteres, das sich jedoch auf die mittleren Elektrodenauslagen erstreckt. Das ebenfalls vertikal zonierte untere Profil zeigt bei den mittleren und großen Elektrodenauslagen zwei flache, weitläufige Minima und zwei ebenso weitläufige Maxima des scheinbaren spezifischen Widerstandes. Im Bereich der kurzen Auslagen sind drei etwa 100 m breite Zonen mit zahlreichen kleineren Widerstandsminima zu sehen. Bei 150 m ist ein auf die kurzen Auslagen beschränktes, kleinräumiges Maximum ausgebildet.

6.1.3.1.2 Interpretation

Die in allen drei Pseudosektionen auftretende vertikale Zonierung der Widerstände wird auf den bei größer werdenden Elektrodenauslagen größer werdenden Einfluss tiefer gelegener, wassergesättigter Dammpartien auf die Messwerte zurückgeführt. Die höhere Wassersättigung bedingt zur Tiefe hin kleinere spezifische Widerstände. Das Minimum zwischen 0 und 170 m in der oberen Sektion geht eindeutig auf die in das Untersuchungsgebiet hineinragende Spundwand zurück. Aufgrund ihrer Position im zentralen Teil des Dammkörpers beeinflusste die Spundwand lediglich die in ihrer Nähe durchgeführten Messungen im Kronenbereich, nicht aber jene im Mittelteil und unteren Teil der luftseitigen Dammflanke. Ein störender Einfluss der Spundwand auf die Messungen wurde nicht festgestellt. Die Signalstabilität war auf dem Streckenabschnitt mit Spundwand ebenso gut wie auf dem Streckenabschnitt ohne Spundwand. Auch konnte in keiner der Sektionen ein Trend zur Erhöhung oder Erniedrigung der scheinbaren spezifischen Widerstände festgestellt werden. Das bei etwa 50 m an zwei Messpunkten auftretende Maximum wird auf einen sehr eng begrenzten, möglicherweise nur einen oder wenige Kubikmeter umfassenden Bereich stark erhöhter spezifischer Widerstände zurückgeführt. Dieser könnte durch ein im Dammkörper belassenes, nicht verfülltes Betonrohr oder einige Blöcke verursacht worden sein. Das auf den flachen Bereich beschränkte, kleinräumige Maximum bei 140 m geht möglicherweise auf einen primär, während der Bauphase angelegten oder im Verlauf der Dammalterung durch partielle Erosion entstandenen Bereich mit größerem

Sediment zurück. Lithofazielle Ursachen werden ebenfalls für die Maxima in der mittleren Sektion bei 440 m und zwischen 630 und 650 m, sowie für das Maximum bei 150 m im unteren Profil angenommen. Die im oberflächennahen Bereich nicht vertikal zonierte Dammabschnitte des mittleren Profils gehen teilweise auf die Überdeckung des ursprünglich grobkörnigen Oberflächenbereichs mit niederohmigen, leicht sandig/kiesigen Lehmen zurück, teilweise möglicherweise auch auf eine von der Umgebung abweichende Petrologie der dammaufbauenden Sedimente. Zwischen 520 und 550 m der mittleren Sektion gehen die erniedrigten scheinbaren spezifischen Widerstände mit deutlich verstärktem Pflanzenwuchs und der intensiven Durchwurzelung des oberflächennahen Bereichs einher. Dieser Befund, gestützt durch eine detaillierte geoelektrische Erkundung, den visuellen Befund und Temperaturmessungen, deutet mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf eine der gesuchten Aufwölbungen des Druckwasserspiegels im Abstrombereich einer Leckage hin. Das lateral eng begrenzte Minimum bei 90 m, das in der oberen und in der unteren Sektion ebenso zu sehen ist, geht eindeutig auf eine vom Dammfuß bis zur Dammkrone reichende Stahlbetontreppe zurück. Die im unteren Profil angedeutete weitläufige Undulation der scheinbaren spezifischen Widerstände wird als Ausdruck wechselnder lithofazieller Ausbildung des Untergrundes unter dem Dammkörper gewertet. Die zu drei Zonen zusammengefassten, oberflächennahen Minima sind möglicherweise durch höheren Feinkornanteil und höheren Feuchtegehalt verursacht. Von den drei Minimumzonen in der unteren Pseudosektion von Abbildung 6.5 konnten lediglich im Bereich der mittleren, zwischen 260 und 320 m gelegenen, weitere Indizien für eine Leckage gefunden werden.

6.1.3.2 Geoelektrische Detailerkundung

Ein Teilstück der untersuchten Dammstrecke mit zwei deutlichen Widerstandsminima im zentralen Bereich der Dammflanke, wurde einer engmaschigen Detailerkundung unterzogen. Abbildung 6.6 entspricht dem Abschnitt 500 bis 600 m in Abbildung 6.5. Die flächendeckende Messung der scheinbaren spezifischen Widerstände wurde nach einer senkrecht zum Streichen des Dammes orientierten Pol-Pol-Anordnung mit einem Elektroden- und Messpunkt Abstand von zwei Metern durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde die in Kapitel 6.4.1.6 vorgestellte Messausrüstung eingesetzt.

6.1.3.2.1 Ergebnisse

Zwischen 30 und 60 m Längserstreckung im zentralen und oberen Teil der Dammflanke befindet sich ein ausgeprägtes Minimum, knapp unterhalb der Mitte bei etwa 20 m ein weiteres mit geringerer Ausdehnung. Die beiden größeren Minima werden von Bereichen mit mittleren und, im zentralen Bereich der Dammflanke, höheren scheinbaren spezifischen Widerständen gesäumt. Am oberen und unteren Rand des Messgebietes zeigen sich zahlreiche weitere, räumlich eng begrenzte Minima.

6.1.3.2.2 Interpretation

Die beiden größeren, bei 20 m und zwischen 30 und 60 m gelegenen Minima entsprechen dem in der mittleren, dammparallelen Pseudosektion auftretenden, zweigeteilten Widerstandsminimum. Auffällig ist die Ausdehnung der größeren Minimumzone bis an den oberen Rand des erkundeten Areals, die in der oberen dammparallelen Sektion von Abbildung 6.5 nicht zu sehen ist. Eine mögliche Ursache ist der Einfluss der unterschiedlichen Sondenanordnungen auf die Messwerte, eine andere mögliche Ursache die Änderung des Feuchtegehalts im Verlauf eines Monats, der zwischen den beiden Geländekampagnen lag. Die auf einen oder wenige Messpunkte beschränkten Minima entlang der Krone und des Fußes werden als lithofaziell verursacht interpretiert. Die Bereiche mit mittleren und höheren scheinbaren spezifischen Widerständen repräsentieren intakte Dammschnitte.

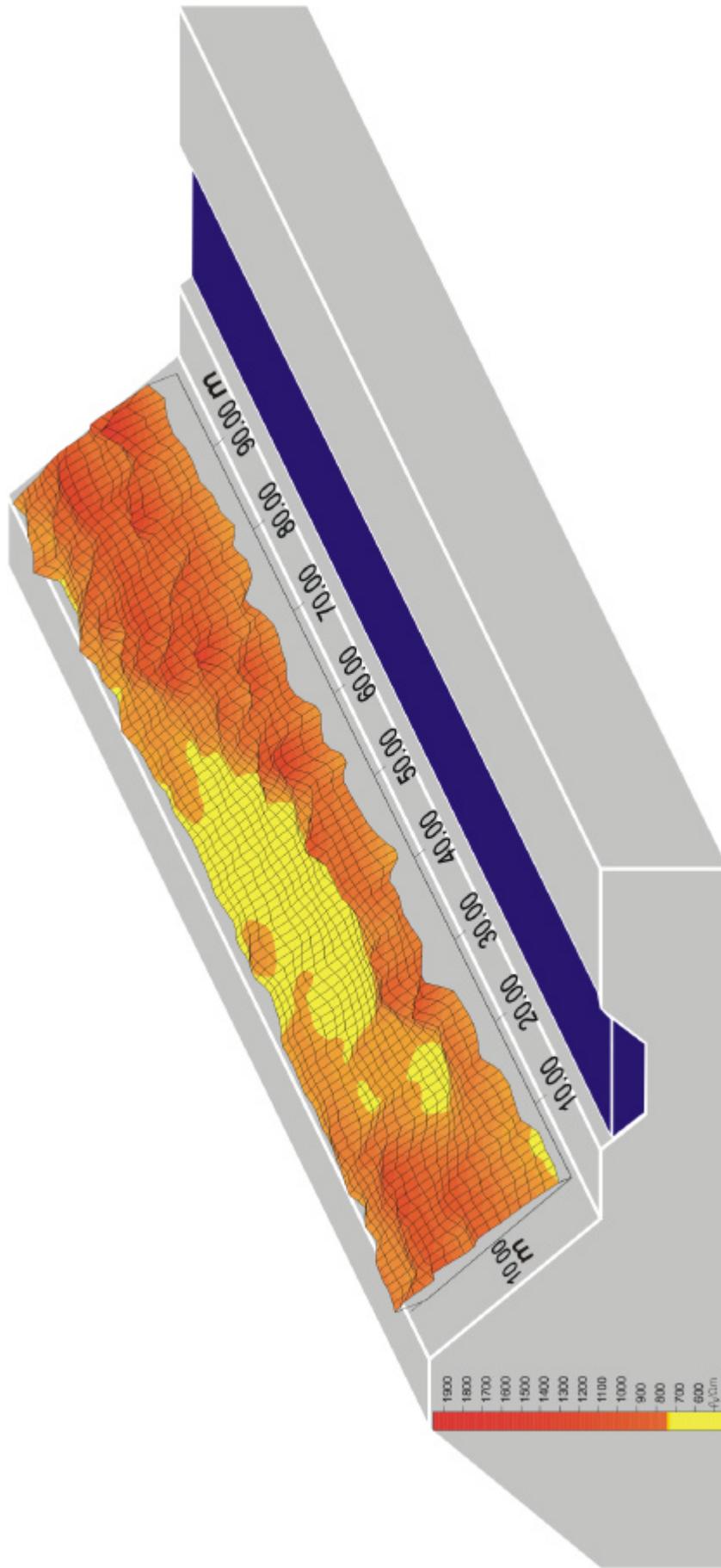


Abbildung 6.6: Pseudosektion des scheinbaren spezifischen Widerstandes. Die Abbildung zeigt den Abschnitt zwischen 500 m und 600 m aus Abbildung 6.5. Die gelben Bereiche sind Widerstandsminima.

6.1.4 Ergänzende Untersuchungen

Um möglichst verlässliche Aussagen über die Beschaffenheit des Dammes zu treffen, wurden, neben der Widerstandsgeoelektrik, ergänzende Messungen des Eigenpotentials im Randbereich des Rheins und der Temperaturverteilung im Seitengraben durchgeführt. Zudem wurden sowohl die Uferböschung des Rheins und des Seitengraben, als auch die luftseitige Dammflanke auf visuelle Leckageindikatoren untersucht (Abb. 6.7).

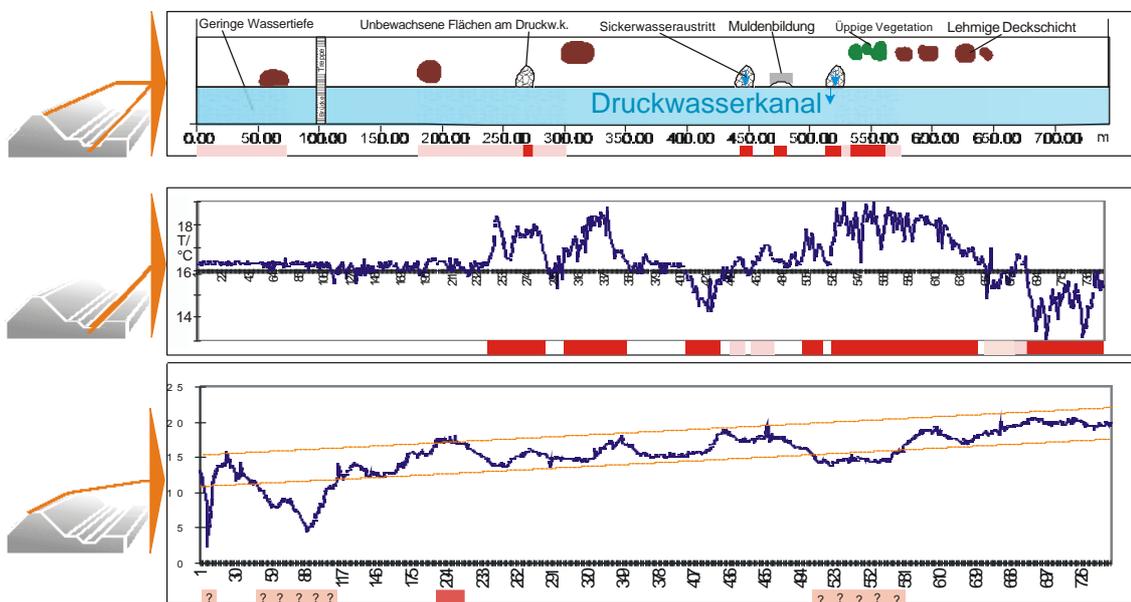


Abbildung 6.7: Ergänzende Erkundungen. Oben: Der visuelle Befund. Mitte: Die Temperaturverhältnisse im Randbereich des Seitengraben. Unten: Das Eigenpotential im Randbereich des Rheins. Schwach rot eingefärbten Balken= vage Hinweise auf Leckagen; intensiv rote Balken= deutliche Hinweise auf Leckagen. Fragezeichen= ungewisse Ursache.

6.1.4.1 Temperaturmessungen

Während der Temperaturmessungen herrschte eine nahezu identische Rhein- und Seitengrabetemperatur der freien Wassersäule von $16,4 \pm 0,2$ °C. Die Temperaturen blieben über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant. Die Messungen wurden

mit einem Einstichfühler in der obersten Sedimentpartie des Randbereichs des Seitengrabens durchgeführt. Das Temperaturprofil setzt sich aus 1000 Einzelmessungen zusammen. Die Werte wurden im Verlauf von 5 Stunden mit einem Messpunktabstand von 1 m gemessen. Die erste Hälfte des Profils lag im Bereich einer den Seitengraben vom Rhein hydraulisch trennenden Barriere (Abb. 6.8).

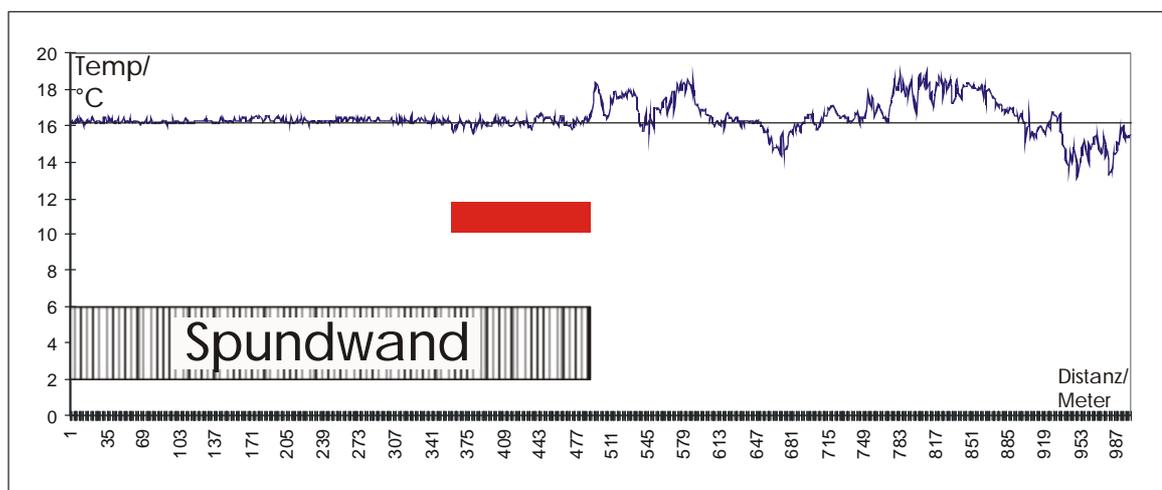


Abbildung 6.8: Temperaturprofil vom 01.10.1999. Gesamtlänge= 1 km, Messpunktabstand= 1 m. Roter Balken= zunehmende Temperaturschwankungen im Endbereich der Spundwand

6.1.4.1.1 Ergebnisse

Der erste Teil des Temperaturprofils zeigt insgesamt sehr ausgeglichene Temperaturverhältnisse. Bis zu Profilmeter 360 traten lediglich einige auf einzelne Messpunkte beschränkte Schwankungen von maximal 0,3 °C auf (Abb. 6.9). Zwischen 360 und 490 m nahmen die Temperaturschwankungen sowohl der Häufigkeit als auch dem Betrag nach deutlich zu. Positive und negative Anomalien erstreckten sich jedoch über maximal einige Meter und erreichten eine Amplitude von höchstens 0,7 °C. Ab etwa 490 m traten großräumige Anomalien von bis zu über einhundert Metern Ausdehnung und Beträgen von mehreren °C auf. Der Temperaturverlauf war ab hier insgesamt starken Schwankungen unterworfen. Lediglich in dem Übergangsbereich zwischen

Profilmeter 600 und 650 waren die Temperaturen ausgeglichener. Im Anschluss an die Spundwand folgte zwischen 490 und 540 m eine zweigeteilte positive Anomalie und eine zweite zwischen 560 und 600 m. Dazwischen lag eine kleine, etwa 10 m lange negative Anomalie. Zwischen 650 und 700 m erstreckte sich eine deutliche negative Anomalie, an die sich ein Übergangsbereich mit leicht positiven und negativen Werten zwischen 700 und 750 m anschloss. Zwischen 750 und 890 m erstreckte sich eine ausgedehnte positive Temperaturanomalie, auf die ein Übergangsbereich zwischen 890 und 930 m folgte. Ab 930 m erstreckte sich bis zum Ende des Profils eine negative Anomalie.

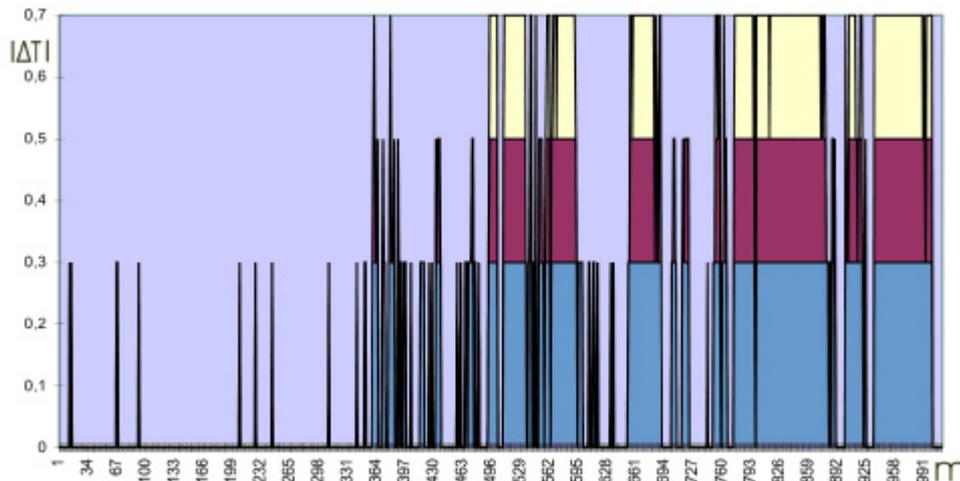


Abbildung 5.6: Temperaturabweichungen von der Durchschnittstemperatur. Abszisse= Profillänge, Ordinate= Betrag der Temperaturabweichungen vom Mittelwert in °C. Gelb= Anomalien $>0,5$ °C.

Systematische Temperaturschwankungen in Abhängigkeit der sub- und emersen Vegetation des Seitengrabens oder lithologischer Unterschiede konnten nicht festgestellt werden.

6.1.4.1.2 Interpretation

Dass trotz annähernd identischer Temperaturen des Rheins und des Seitengrabens Temperaturanomalien von mehreren °C auftraten, kann mit der thermischen Speicherkapazität des vom Druckwasser durchflossenen Sediments erklärt werden. In der letzten Septemberwoche lag die Temperatur des Rheins tagelang noch bei über 20 °C und hat das stärker durchströmte Sediment entsprechend stärker aufgeheizt als die langsamer durchflossene Umgebung. Mit den Ende September gesunkenen Wassertemperaturen kehrte sich der Prozess um. Das erwärmte Sediment gab die gespeicherte Wärme wieder an das nun kältere Druckwasser ab und verursachte die positiven Wärmeanomalien. Die negativen Anomalien werden auf die Wärmeabgabe an den Untergrund und die Durchmischung des Druckwassers mit kaltem Grundwasser im Bereich von Unterströmungen erklärt.

Die positiven Anomalien zwischen 490 und 540 m und zwischen 550 und 600 m werden als von einer zentralen Leckage ausgehende Teilanomalien betrachtet, deren Temperaturen im Mittelbereich von einer zusätzlichen Unterströmung bis unter die Durchschnittstemperatur gedrückt wurden. Der sich anschließende Übergangsbereich zwischen 600 und 650 m, sowie die Übergangsbereiche zwischen 700 und 750 m und zwischen 890 und 930 m wurden von den sie umgebenden positiven und negativen Anomalien gleichermaßen beeinflusst. Der häufige Vorzeichenwechsel der kleineren Anomalien in diesen Bereichen wird als Indiz für die heterogenen Durchlässigkeitsverhältnisse im Abstrombereich der hydraulischen Barriere und die weite laterale Streuung des Leckagewassers gewertet. Die negative Anomalie zwischen 650 und 700 m zeigte, von einem einzelnen kleinräumigen Anstieg im zentralen Bereich abgesehen, vom Zentrum nach außen einen vergleichsweise kontinuierlichen Temperaturanstieg. Dieser Befund deutet auf gleichmäßiges, von einem Zentrum ausgehendes Abfließen innerhalb eines homogenen Mediums hin. Bei der im Endbereich der Messstrecke gelegenen negativen Anomalie waren mehrere Minima ausgebildet, ihr Verlauf war insgesamt unruhig. Das Vorhandensein mehrerer Minima wird auf die lithofazielle Heterogenität des Dammkörpers zurückgeführt. Die großräumige positive Anomalie zwischen 750 und 890 m zeigte ebenfalls eine reiche Zergliederung, die auf die lithofaziell bedingten, heterogenen Durchlässigkeitseigenschaften des Dammkörpers zurückgeführt wird.

Das Fehlen baulicher Mängel vorausgesetzt, musste auf dem Teilstück mit der 18 m in den Dammkörper und seinen Untergrund reichenden Spundwand von der nahezu völligen hydraulischen Abkopplung des Seitengrabens vom Rhein gerechnet werden. Die Temperaturmessungen bestätigten diese Annahme jedoch nur teilweise. Zwar wurde anhand der Ergebnisse deutlich, dass sämtliche markanten Temperaturanomalien ausnahmslos außerhalb des Bereichs mit Spundwand lagen. Andererseits zeigten sich bereits weit vor dem Ende der Spundwand Temperaturanomalien mit kleinerer Amplitude, die sich mit der Annäherung an das Ende der Spundwand häuften. Als Ursache für diese Anomalien wird der annähernd dammparallele Abfluss des Druckwassers im Dammkörper vom Ende der Spundwand her über eine Strecke von mindestens 140 m angenommen.

Aufgrund des rein supplementären Charakters der Temperaturmessungen wurde auf ein stark vereinfachtes Temperaturmodell zurückgegriffen, das eine schlüssige qualitative Interpretation der Befunde zuließ. Als Grundlage der quantitativen Interpretation ist dieses Modell jedoch nicht geeignet, da weder die Albedo unterschiedlich beschaffener Streckenabschnitte, noch die Verteilung der spezifischen thermischen Leitfähigkeit und Speicherkapazität innerhalb der dammaufbauenden Sedimente berücksichtigt sind.

6.1.4.2 Eigenpotentialmessungen

Die Eigenpotentialmessungen wurden bei durchweg ruhigen Wasserverhältnissen und ohne nennenswerte Temperaturänderungen bei dichter Bewölkung im Randbereich des Rheins nach der Totalfeld-Methode durchgeführt. Die Basiselektrode befand sich etwa 100 m außerhalb des Messbereichs. Als Elektroden wurden Kupfer/Kupfersulfatelektroden verwendet. Die Profillänge betrug 750 m, der Messpunktabstand 1 m. Testmessungen auf der luftseitigen Dammschleuse erbrachten aufgrund anhaltender Kontaktprobleme keine befriedigenden Ergebnisse.

6.1.4.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Eigenpotentialmessungen werden in Abbildung 6.7 gezeigt. Der Anstieg der Spannung betrug stromabwärts im Mittel 9,6 mV/km. Das Eigenpotential unterlag an verschiedenen Kontrollpunkten zeitlichen Schwankungen von bis zu 12 Millivolt. Die Eigenpotentialverteilung verlief entlang der gesamten Messstrecke sehr unregelmäßig mit zahlreichen positiven und negativen Anomalien, die nicht alleine durch leakagebedingte Strömungsprozesse erklärt werden konnten. Eine Übereinstimmung mit Befunden anderer Methoden konnte nicht festgestellt werden. Insbesondere die beiden negativen Anomalien von -10 und -12 Millivolt, gleich zu Beginn der Messstrecke und bei etwa 90 m, gehen mit keinerlei Anzeichen für eine Leckageaktivität einher. Sie liegen beide im Bereich sehr ausgeglichener Temperaturverhältnisse im Seitengraben.

6.1.4.2.2 Interpretation

Trotz sehr sorgfältiger Messungen konnten keine plausiblen Hinweise auf potentielle Leckagen gefunden werden. Die beiden ausgeprägten negativen Eigenpotentialanomalien, sowie die zahlreichen kleinräumigen Anomalien von wenigen Millivolt, werden als elektrochemischen Ursprungs interpretiert. Anhand der Befunde wird deutlich, dass die Strömungspotentialkomponente des Eigenpotentials nicht ohne weiteres von den Störsignalen unbekannter Herkunft und Zusammensetzung unterschieden werden kann. Mögliche Störquellen werden in atmosphärischen Vorgängen, dem Einfluss technischer Anlagen und dem Vorhandensein geochemischer Eigenpotentialquellen gesehen.

6.1.4.3 Der visuelle Befund

Der visuelle Befund wurde im Frühsommer, bei bereits gut ausgebildeter Vegetation aufgenommen. Besonderes Augenmerk lag auf Sickerwasseraustritt, Bereiche

verstärkter und fehlender Vegetation und der Beschaffenheit der Deckschicht. Aufgrund der bereits im Kapitel 5.1 erwähnten Mehrdeutigkeit der visuellen Indikatoren wurde versucht, nur eindeutig als nicht mehr der natürlichen Variation des Geländes entsprechende Auffälligkeiten zu verzeichnen. Die rein qualitative Befundaufnahme unterliegt jedoch stets der subjektiven Einschätzung des Beobachters und kann, bei anderen Rahmenbedingungen oder von einer anderen Person durchgeführt, auch andere Ergebnisse liefern. Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Als sichere Leckageindikatoren werden der Sickerwasseraustritt, feinkörnige Sedimentakkumulation im Randbereich des Druckwasserkanals und die Ausbildung von Quelltrichtern bei Profilmeter 530 betrachtet.

6.1.5 Zusammenfassung

Mit Ausnahme der Eigenpotentialmethode lieferten alle anderen Methoden Hinweise auf aktive Leckagen. Zwar beinhaltete jeder der Einzelbefunde eine Fülle von Informationen, jedoch erst durch die kombinierte Betrachtung ließ sich ein schlüssiges Modell entwerfen. Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet zwei den Dammkörper selbst betreffende mögliche Schwächezonen gefunden, auf die zahlreiche Indikatoren hinweisen. Das in der mittleren Pseudosektion von Abbildung 6.5 bei 300 m gelegene Minimum und die im unteren Profil zwischen 260 und 320 m gelegene Zone mit mehreren Minima des scheinbaren spezifischen Widerstandes bilden, zusammen mit einer unbewachsenen Fläche an der Böschung des Druckwasserkanals bei 270 m und einer dreigeteilten positiven Temperaturanomalie, eine Zone mit gehäuft auftretenden Leckageindikatoren. Alle diese Anomalien könnten durch eine einzige, zwischen 300 und 310 m gelegene Leckage verursacht sein, deren Abstrombereich einen zum Druckwasserkanal hin geöffneten Trichter bildet und lithologisch inhomogen aufgebaut ist. In der unmittelbaren Nähe der Leckage wird aufgrund der kleinräumigen negativen Temperaturanomalie eine Unterströmung des Dammkörpers vermutet. Möglicherweise geht die Entstehung der Leckage auf von der Unterströmung verursachte, destruktive Prozesse zurück, die sich nach und nach in den Dammkörper ausbreiteten.

Die widerstandsgeoelektrisch genauer untersuchte Leckage zwischen 500 und 550 m befindet sich im subzentralen Bereich der größten positiven Temperaturanomalie. Neben dem geoelektrischen Befund wird dieser Abschnitt anhand des visuellen Befundes und der Temperaturmessungen als Schwächezone angesprochen. Aufgrund des Sickerwasseraustritts und des suffosiven Suspensionseintrags in den Druckwasserkanal wird diese Leckage als fortgeschritten und sehr aktiv betrachtet. Der Masseverlust durch Suffosion kann zu schwerwiegenden Schädigungen der Dammsubstanz führen, die möglicherweise nach Jahren oder Jahrzehnten spontan in Erscheinung treten und ein ernstzunehmendes Sicherheitsrisiko darstellen können.

Darüber hinaus treten zwei weitere, lediglich in den Temperaturmessungen vorhandene negative Anomalien in Erscheinung, die als Unterströmungen interpretiert werden und somit auf den Bereich unter dem Dammkörper beschränkt sind. Die Unterströmungen spielen bei der Entstehung von Schwachstellen möglicherweise die Rolle eines Entstehungsherd, von dem aus sich destruktive Diageneseprozesse in den Dammkörper hinein ausbreiten.

6.2 Die Erkundung von Deichen

Die zerstörungsfreie Erkundung nicht eingestauter Erddeiche gestaltet sich, im Vergleich zur Dammerkundung, schwieriger. Von der meist nur kurzen Dauer des Einstaus abgesehen, bieten die Deiche keine direkte Möglichkeit zur Beurteilung ihrer Durchlässigkeitseigenschaften. Weder die durch Leckagewasser hervorgerufenen Widerstandsminima und Eigenpotentialanomalien, noch durchströmungsbedingte Temperaturanomalien treten auf. Die Erkundung beschränkt sich ausschließlich auf lithologische Merkmale, die während eines Einstaus ein Sicherheitsrisiko darstellen könnten.

6.2.1 Der Deich des Wiescher Bachs in Wiescherhöfen

Die Erkundung eines nicht eingestauten Deiches wird am Beispiel des Wiescher Bachs in Wiescherhöfen bei Pelkum im nordöstlichen Ruhrgebiet erläutert (Abb. 6.10).



Abbildung 6.10: Lage des 750 m langen Untersuchungsgebietes am Wiescher Bach in Wiescherhöfen (grüne Linie). Zahlenwerte= Gauss-Krüger-Koordinaten. Maßstab 1 : 25 000.

Der vollständig zum Kanal ausgebaute Wiescher Bach dient, neben der Aufnahme von Abwasser, der permanenten Absenkung des Grundwasserspiegels in einem tief gelegenen Ortsteil von Wiescherhöfen (Abb. 6.11).



Abbildung 6.11: Einlassbauwerk. Ein Teil der aus der Grundwasserabsenkung in Wiescherhöfen (im Bildhintergrund) anfallenden Wassermenge wird dem Wiescher Bach über dieses Einlassbauwerk zugeleitet.

Der Wiescher Bach wird im Bereich einer morphologischen Senke beiderseits von einem bis zu etwa 8 m hohen Deich gesäumt (Abb. 6.12). Während das wasserseitige Deichprofil über die gesamte Erkundungstrecke unverändert bleibt, variiert die Höhe der Deichkrone über der Geländeoberkante, in Abhängigkeit von der Lage in der Senke, zwischen 0 und etwa 8 Metern. Der Neigungswinkel der Außenböschung und die Breite der Deichkrone variieren, jedoch ohne ersichtliche Systematik. Die maximale Breite der Deichkrone von etwa 10 Metern, tritt sowohl im Bereich der größten Höhe als auch auf einem randlich gelegenen Teilstück von nur einem Meter Höhe auf. Der Sohlbereich

des Baches ist von dem Einlassbauwerk stromaufwärts mit Schotter ausgebaut, stromabwärts mit Betonplatten. Über den internen Aufbau der Deiche lagen keine Informationen vor.

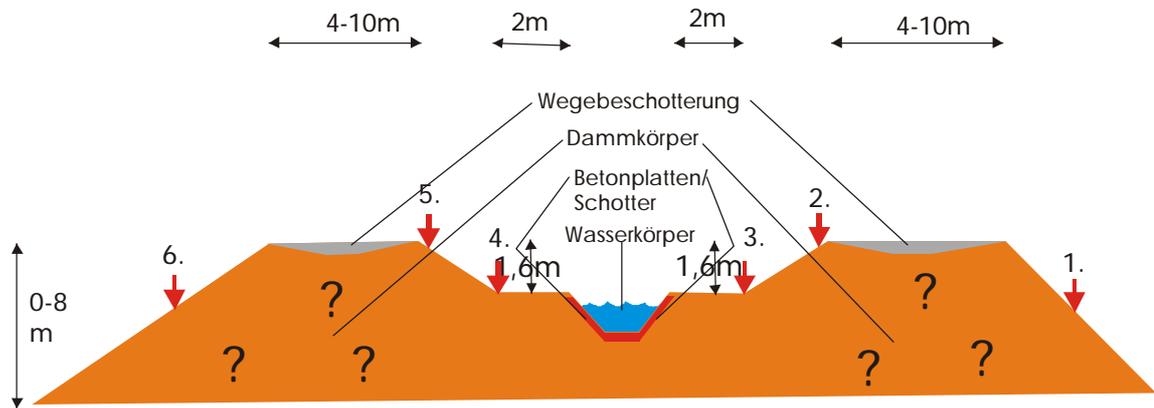


Abbildung 6.12: Widerstandselemente und Abmessungen der Deiche des Wiescher Baches in Wiescherhöfen. Über den internen Aufbau der Deiche lagen keine Informationen vor (Fragezeichen). Rote Pfeile= Position der Geoelektrikpseudosektionen in Abbildung 6.13 in Fließrichtung des Kanals.

Die Deiche des Wiescher Baches sind insbesondere während langanhaltender Niederschläge Belastungsspitzen ausgesetzt. Ein Deichbruch würde sich nicht nur auf das unmittelbare Hinterland auswirken, sondern hätte auch das Erliegen der Grundwasserabsenkung im Bereich eines ganzen Ortsteils zur Folge und wäre mit einem erheblichen materiellen Schaden verbunden. Erste Durchsickerungen im Einstaufall sowie das zutage Treten kleinerer Hausmüllvorkommen während Instandhaltungsmaßnahmen gaben zur Vermutung Anlass, dass während des Deichbaus ungeeignete Materialien, wie Bauschutt und Hausmüll, illegal in den Deichkörper eingebaut wurden. Zur Klärung der Sachlage wurde ein 750 m langer Abschnitt des Wiescher Baches einer zerstörungsfreien geophysikalischen Erkundung unterzogen. Das Untersuchungsziel wurde auf die Detektion hydraulisch durchlässiger Einlagerungen, insbesondere Bauschutt und grobkörniges Abraummaterial von in der Nähe gelegenen Kohlegruben und von Hausmülleinlagerungen festgelegt. Ergebnisse von Voruntersuchungen und Informationen zum Aufbau des Deiches und des Untergrundes waren

nicht verfügbar. Neben Messungen des scheinbaren spezifischen Widerstandes (Abb. 6.13) wurden Magnetikuntersuchungen durchgeführt (Abb. 6.14).

6.2.2 Widerstandsgeoelektrik

Im Mittelpunkt der widerstandsgeoelektrischen Erkundung stand die Eingrenzung faziell einheitlicher Bereiche und die Suche nach durch Grobklastika hervorgerufenen Maxima des scheinbaren spezifischen Widerstandes. Die spezifischen Widerstände der Hausmülldeponierungen hängen von dessen Zusammensetzung ab und können sowohl hoch- als auch niederohmige Anomalien verursachen.

Der scheinbare spezifische Widerstand wurde entlang von 6 deichparallelen, 750 m langen Profilen nach der Pol-Dipol-Anordnung gemessen. Der Messpunktabstand betrug 8 m. Pro Messpunkt wurde mit jeweils 5 unterschiedlichen Elektrodenauslagen zwischen $AB/2 = 1,5$ m und $AB/2 = 16,5$ m gemessen. Die Kontaktverhältnisse waren abschnittsweise sehr gut, abschnittsweise jedoch aufgrund von Bioturbation und teilweise verrottetem organischem Material auch mäßig bis schlecht. Bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt und zeitweise starkem Regen und Wind wurden von einer einzelnen Person Messfortschritte von 600 bis 900 Metern pro Tag erzielt.

6.2.2.1 Ergebnisse

In Abbildung 6.13 sind die Ergebnisse der Widerstandsmessungen in Form von Pseudosektionen dargestellt. Pseudosektion 1 zeigt an beiden Enden einheitlich niedrige, im Mittelteil etwas höhere Werte. Bei etwa 510 m ist eine einzelne Anomalie mit nieder- und hochohmigem Anteil zu sehen. Die zweite Pseudosektion ist stromaufwärts des Einlassbauwerks deutlich vertikal gegliedert, wobei der oberflächennahe Bereich die höheren scheinbaren spezifischen Widerstände aufweist. Der stromabwärts des Einlassbauwerks gelegene Teil von Pseudosektion 2 und 3 zeigt die vertikale Zonierung nur im zentralen Teil und sehr schwach ausgeprägt. Der

stromaufwärts des Einlassbauwerks gelegene Teil von Pseudosektion 3 ist ebenfalls nur schwach vertikal zoniert, zeigt jedoch insgesamt höhere Widerstände als der stromabwärts gelegene Teil und mehrere deutliche positive Anomalien. Die erste befindet sich etwa bei Profilmeter 300, die zweite zwischen 650 und 660 Metern und die dritte, auf den oberflächennahen Bereich beschränkte, bei 740 m. Im Anschluss ist ein sehr abrupter Wechsel zu niedrigeren Werten feststellbar. In der vierten Pseudosektion steigen auf den ersten vierhundert Metern die scheinbaren spezifischen Widerstände kontinuierlich an, danach bleiben die Widerstände der größeren Tiefen etwa gleich, jene der geringeren Tiefen nehmen bei 420 m abrupt ab. Bei 740 m ist insgesamt ein Abfallen der Widerstände zu verzeichnen. Zwischen 300 und 320 m ist ein kleinräumiges, auf die mittleren Elektrodenauslagen beschränktes Maximum ausgebildet, zwischen 650 und 720 m ist ein großflächiges, sich zur Tiefe hin verjüngendes Maximum zu sehen. Bei 380 m ist ein auf eine Einzelmessung beschränktes Minimum sichtbar. Die Pseudosektion 5 zeigt sowohl die vertikale Zonierung, als auch stromaufwärts einen kontinuierlichen Anstieg der Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes bis zur Brücke. Danach fallen die Werte insgesamt ab, die Zonierung ist nur noch undeutlich ausgeprägt und die Werte bleiben bis zum Ende des Profils auf etwa gleichem Niveau. Die sechste Pseudosektion ist der fünften ähnlich, wobei die Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes etwas niedriger sind. Ein schwach ausgeprägtes, auf die kurzen Elektrodenauslagen beschränktes Maximum befindet sich zwischen 150 und 220 m, ein weiteres zwischen 290 und 310 m. Etwas deutlicher ist das ebenfalls überwiegend auf die kurzen Elektrodenauslagen beschränkte Maximum zwischen 450 und 520 m ausgebildet.

6.2.2.2 Interpretation

Die höheren Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes im zentralen Teil von Pseudosektion 1 werden auf einen Fazieswechsel des Deichbaumaterials zurückgeführt, von dem der gesamte, in Fließrichtung gesehen rechte Deich stromabwärts des Einlassbauwerks betroffen ist. Die im obersten Profil zwischen 500 und 530 m auftretende Anomalie, die sowohl Maxima- als auch Minimaanteile aufweist, geht wahrscheinlich auf heterogen zusammengesetzte Hausmüllinlagerungen zurück, die

auf diesem Streckenabschnitt vereinzelt auch zutage treten. Die deutliche vertikale Zonierung in der Pseudosektion oberhalb des Einlassbauwerks ist möglicherweise durch eine Änderung in der Wegebeschotterung bedingt, die deutlich in den Deichkörper hineinreicht und auch die dritte Pseudosektion beeinflusst. In den Pseudosektionen 2 und 3, zwischen 50 und 200 m, könnte dieser Materialwechsel ebenso vorkommen, jedoch auf den oberflächennahen Bereich beschränkt. Die kleinräumige positive Anomalie in Pseudosektion drei bei 300 m geht auf die aus feinkörnigen Magmatiten bestehende Prallwand des gegenüber liegenden Einlassbauwerks zurück. Die beiden Maxima bei 650 und 740 m sind möglicherweise durch eine hohe Grabgangdichte von Nagetieren verursacht, die am dies- und jenseitigen Ufer auch zu schwerwiegenden Kontaktproblemen führten. Die Anomalie zwischen 650 und 720 m in Pseudosektion 4 könnte auf die gleiche Ursache zurückgehen. Das oberflächennahe Substrat in diesem Bereich war zum Zeitpunkt der Messungen intensivst bioturbiert und von armdicken, wahrscheinlich von einer Rattenspezies angelegten Gängen durchsetzt. Ein deutlicher Hinweis auf eine Schwachstelle wird in dem Maximum zwischen 300 und 320 m in Pseudosektion 4 gesehen. In diesem Bereich wurden während eines früheren Einstaus Durchsickerungen beobachtet. Überdies waren im Bereich der Deichkrone deutliche Setzungserscheinungen sichtbar. Das auf einen Messpunkt beschränkte Maximum bei 390 m wird als Messfehler interpretiert. Die vertikale Zonierung in Pseudosektion 5 könnte auf die stromaufwärts sukzessive zunehmende Mächtigkeit der Wegebeschotterung zurückgehen, die nach der Brücke nur oberflächlicher aufgebracht wurde. Die drei auf den oberflächennahen Bereich beschränkten Widerstandsmaxima in Pseudosektion 6 sind möglicherweise Indikatoren für gröberkörniges, knapp unterhalb der Oberfläche im Bereich der luftseitigen Deichflanke deponiertes Material, oder besonders weit in den Deichkörper hineinreichende Grobklastika der Wegebeschotterung.

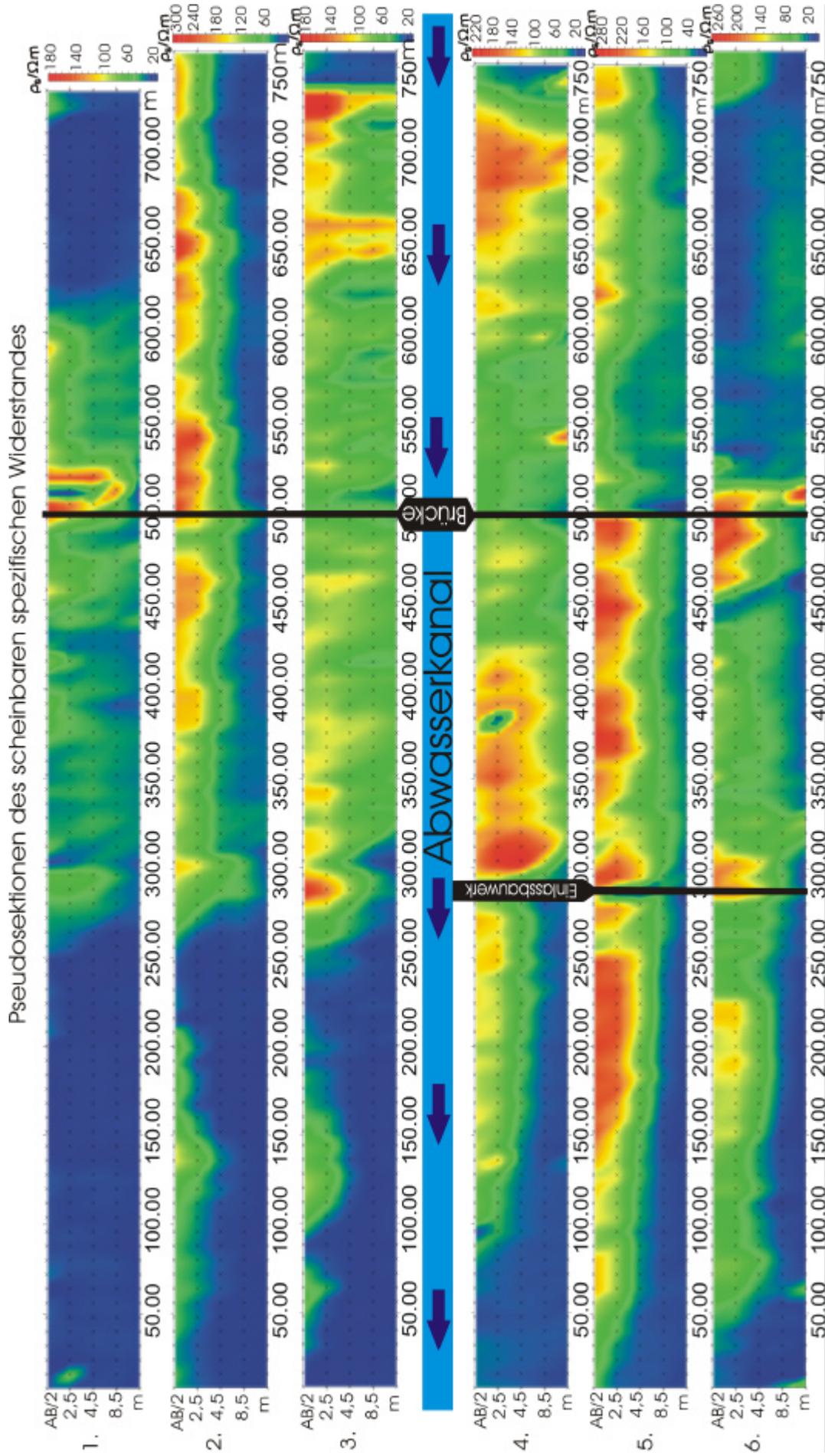


Abbildung 6.9: Pseudosektionen des scheinbaren spezifischen Widerstandes entlang des Wiescher Bachs in Wiescherhöfen. Die Positionen der Pseudosektionen am Deichkörper sind in Abbildung 6.12 eingezeichnet. Blaue Pfeile= Fließrichtung des Kanals.

6.2.3 Magnetik

Das Ziel der Magnetfeldmessungen war die Detektion magnetischer Anomalien, die auf Einlagerungen mit, im Vergleich zu ihrer Umgebung, unterschiedlicher remanenter Magnetisierung oder Suszeptibilität zurückgehen. Hierzu zählen neben den eisenmetallhaltigen Hausmüllkomponenten vor allem armierte Betonteile und gebrannter Ziegel. Die Untersuchungen geben keinen direkten Aufschluss über die Durchlässigkeitseigenschaften der deichaufbauenden Materialien, sie basieren vielmehr auf der Annahme des direkten Zusammenhangs zwischen dem Einbau von magnetisch anormalem Bauschutt, Hausmüll- oder grobklastischem Abraummateriale und der erhöhten Deichbruchgefahr im Einstaufall.

Die Magnetfeldmessungen wurden entlang parallel und senkrecht zum Streichen des Deiches orientierter Profile mit Hilfe eines kontinuierlich messenden Gradiometers durchgeführt. Der Profilabstand betrug maximal 2 m. Die Messungen wurden bei Temperaturen um den Gefrierpunkt und bei zeitweise starkem Wind und Regen durchgeführt. Pro Tag wurden von einer einzelnen Person Messfortschritte von mehreren Kilometern erreicht.

6.2.3.1 Ergebnisse

Im Verlauf der Messungen wurden zahlreiche Anomalien gefunden, die sowohl als isolierte Maxima und Minima wie auch in Form von Dipolen, also mit einem positiven und einem negativen Anteil, auftraten. Entlang der Kronen beider Deiche traten im gesamten Untersuchungsareal aneinandergereihte positive und negative Anomalien von jeweils einigen Metern Ausdehnung auf (Abb. 6.14 unten). Die Anomalien erreichten Werte von über ± 200 Nanotesla/Meter. In Abbildung 6.14 oben ist eine positive Anomalie abgebildet, die eine Fläche von mehr als 100 Quadratmetern überdeckt.

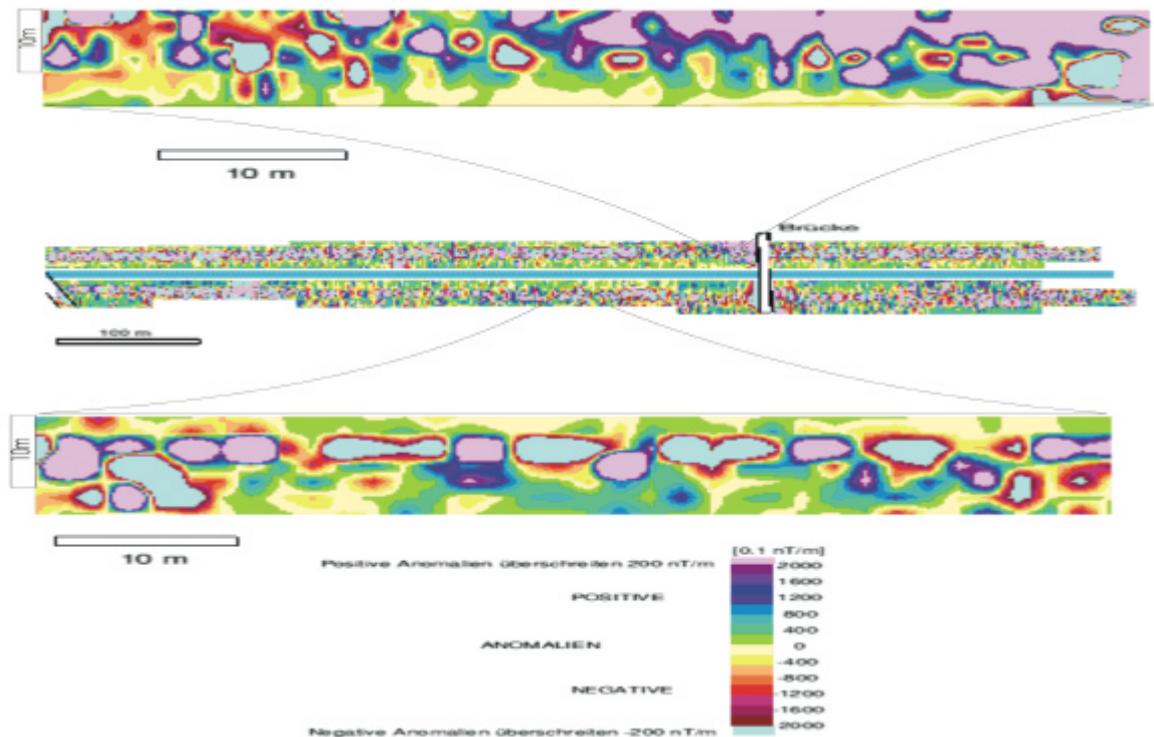


Abb. 6.14: Vertikalkomponente des Vertikalgradienten des Magnetfeldes. Mitte: Gesamtuntersuchung. Oben: Ausschnitt mit großflächiger, positiver Anomalie (rosa). Unten: Streckenabschnitt mit zahlreichen positiven und negativen Anomalien im Meterbereich. [nT/m]= Nanotesla/Meter.

6.2.3.2 Interpretation

Die perlschnurartig aneinandergereihten magnetischen Anomalien entlang beider Deichkronen werden möglicherweise von den Fahrweg stabilisierenden, in den Deichkörper eingebetteten Betonplatten verursacht. Die großflächige, in rosa dargestellte Anomalie in Abbildung 6.14 oben, geht möglicherweise auf einen mit Hausmüll durchsetzten Streckenabschnitt zurück, der eine stark positive magnetische Anomalie verursacht. Gestützt wird diese Interpretation durch die in diesem Bereich vereinzelt zutage tretenden Hausmüllkomponenten.

6.2.4 Zusammenfassung

Sowohl die Geoelektrik- als auch die Magnetfeldmessungen erbrachten Hinweise auf den internen Aufbau der Kanaldeiche und auf mögliche Schwachstellen. Die Ergebnisse bieten, neben ihrem unmittelbaren Informationsgehalt, die Möglichkeit, weiterführende Untersuchungen gezielt durchzuführen. Auf der Grundlage der Untersuchungen können sowohl detaillierte zerstörungsfreie Erkundungen als auch invasive Maßnahmen eingeleitet werden. Insbesondere die teuren und substanzzehrenden invasiven Sondierungen sowie Schürfe und Bohrungen können punktgenau niedergebracht und auf das notwendige Maß beschränkt werden.

7 Schlussbetrachtungen

Dämme werden im allgemeinen als technische Schutzeinrichtungen betrachtet, an denen zufällige und nicht prognostizierbare Schäden auftreten. Sie erfahren meist erst dann erhöhte Aufmerksamkeit, wenn eine akute Gefahrensituation droht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer Weg in Richtung einer höheren Betriebssicherheit von Erddämmen im Wasserbau eingeschlagen. Nicht die Reaktion auf bereits vorhandene Sicherheitsrisiken, sondern die Prävention steht im Mittelpunkt. Das Studium der auf einen Dammkörper einwirkenden geologischen Prozesse wird als Grundlage frühzeitig greifender Instandhaltungsmaßnahmen betrachtet. Dämme werden als geologische Komplexe und Bestandteile natürlicher Systeme begriffen, die sich in einer fortwährenden diagenetischen Veränderung befinden. Die relevanten geologischen Prozesse und Einflussfaktoren sind hierbei keineswegs auf Erddämme beschränkt. Sie sind vielmehr in allen Bereichen der oberflächennahen Lithosphäre anzutreffen. Hierzu zählen die vom Menschen unberührten Faziesbereiche des oberflächennahen Untergrundes ebenso wie Deponieabdichtungen oder Abraumhalden des Bergbaus. Große Unterschiede bestehen hingegen in den Auswirkungen der zeitlichen Entwicklung. Vorgänge, die auf einer Abraumhalde ohne jede Bedeutung sind, können an einem Erddamm zu einem ernsthaften Sicherheitsrisiko führen.

Die rein visuelle Detektion von Schwachstellen und die Differenzierung der zugrunde liegenden destruktiven Diageneseprozesse ist meist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die visuellen Indikatoren sind häufig vieldeutig und keiner genauen Ursache zuzuordnen. Verwechslungsmöglichkeiten mit Vorgängen in der Bio- und Geosphäre ohne sicherheitstechnische Relevanz sind bei praktisch allen Schwachstellenindikatoren gegeben. Die Sichtprüfung ist jedoch eine Möglichkeit schnell und kostengünstig erste Anhaltspunkte über bereits weit fortgeschrittene Schwachstellenbildung mit oberirdisch sichtbaren Anzeichen zu gewinnen. Interessiert in erster Linie der Zustand des Damminnenen, geht an weiterführenden Untersuchungen meist kein Weg vorbei.

Ein Arbeitsschwerpunkt wurde auf die Adaption der geoelektrischen Ausrüstungen an die speziellen Erfordernisse der Dammerkundung gelegt. Die Entwicklungsarbeiten resultierten in der deutlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit geoelektrischer Messkampagnen. Mit dem mechanisch belastbaren Multielektrodenkabel wurde eine

preisgünstige Alternative zu herkömmlichen Multielektrodenkabeln entwickelt, die jedoch im Prototypenstadium bezüglich der Lebensdauer den kommerziell erhältlichen Kabeln unterlegen ist. Die lithologisch und klimatisch bedingten Kontaktprobleme konnten durch die Verwendung pyramidenförmiger Elektroden und der Mikroreliefierung der Elektrodenoberfläche minimiert werden. Das zeitraubende Wässern und die Platzierung zusätzlicher Elektroden war, auch während ungünstiger Witterungsbedingungen, nur in Ausnahmefällen nötig. Die für Messungen an der Wasseroberfläche und in der freien Wassersäule entwickelten Sondenträger sind in der Lage, die Beeinträchtigung geoelektrischer Messungen durch widrige Messbedingungen, wie verkehrs- und windbedingten Wellenschlag, zu verringern. Ihre Funktionstüchtigkeit wurde bislang jedoch nur für kurze Elektrodenauslagen getestet.

Verbesserungen auf dem Gebiet der Eigenpotentialmessungen hielten sich in bescheidenem Rahmen. Lediglich die Erkenntnis, dass eine Vergrößerung der Elektrodenoberfläche sowie Alterungserscheinungen bei den wartungsfreundlichen Feststoffelektroden zu einer größeren Signalstabilität führt, schlägt positiv zu Buche. Auch kleinere apparative Neuerungen zur Verbesserung der Signalqualität und zur Erhöhung des Messfortschritts bei Messungen auf dem Wasser wurden gefunden. Als eher negative Erkenntnis hat sich nach umfangreichen Versuchen herauskristallisiert, dass die Methode zwar theoretisch sehr attraktiv erscheint und bei speziellen Fragestellungen mit einfachen Rahmenbedingungen auch schlüssige Resultate liefert, sie vom Status einer Routinemethode aber noch weit entfernt ist.

Die Anpassung der *Mise à la Masse*-Methode an die linearen Geometrieverhältnisse von Erddämmen mit Hilfe linearer Transmitterelektroden führte zu ersten positiven Ergebnissen. Die Geländearbeiten konnten mit großem Messfortschritt durchgeführt werden und resultierten in plausiblen Ergebnissen. Die Platzierung der linearen Transmitterelektrode in der Vorflut, verbunden mit der Spannungsmessung entlang der luftseitigen Dammflanke, ermöglicht die Einbeziehung des gesamten Dammkörpers in die Messungen bei gleichzeitiger geringer Anfälligkeit gegenüber lateralen Positionierungsfehlern der Potentialelektrode. Die Entwicklung geeigneter Auswerteprozeduren für die Rohdaten steht jedoch noch aus.

Die praktische Umsetzung des neuen Konzeptes und die Praxistauglichkeit der Ausrüstungsbestandteile wurde an zwei Fallbeispielen erprobt. In beiden Fällen konnten mit Hilfe verschiedener zerstörungsfreier Erkundungsmethoden starke Indizien für das Vorhandensein aktiver und potentieller Leckagen gefunden werden. Die Ergebnisse der teils unter kommerziellen Bedingungen durchgeführten Untersuchungen können als Beleg für den wirtschaftlich sinnvollen Nutzen der zerstörungsfreien geowissenschaftlichen Erkundung im Rahmen des präventiven Hochwasserschutzes angesehen werden. Diese Wertung wird nicht dadurch beeinträchtigt, dass trotz sorgfältigster Vorgehensweise bei den Geländearbeiten und der Datenauswertung einige Befunde unklar blieben. Als Ursache hierfür werden die Komplexität der Untersuchungsobjekte und die von vielen geophysikalischen Verfahren bekannte Mehrdeutigkeit der Ergebnisse betrachtet. In manchen Bereichen erscheint auch eine noch bessere Anpassung der geophysikalischen Methodik an die Dammerkundung wünschenswert.

Problematisch beim Einsatz der Widerstandsgeoelektrik zur Leckagedetektion ist und bleibt die Verwechslungsmöglichkeit von Bereichen erhöhten Wassergehalts mit Bereichen geringerer Korngrößen oder unterschiedlicher Petrologie. Auch zwischen leakagebedingten und nicht leakagebedingten Schwankungen des Druckwasserspiegels bestehen Verwechslungsmöglichkeiten. Neben Leckagen kommen ebenso lithofaziell inhomogene Bereiche als Verursacher von Wasserspiegelschwankungen in Betracht.

Trotz dieser Einschränkungen wird das genaue Studium der destruktiven Diagenese-prozesse mit dem Ziel der Entwicklungsprognose für die Zukunft eine erfolgversprechende Möglichkeit sein, die Sicherheitsrisiken an Hochwasserschutzanlagen bereits vor dem Eintreten akuter Gefahrensituationen zu reduzieren. Eine erfolgversprechende Ergänzung der routinemäßigen geoelektrischen Leckagedetektion mag der Einsatz geoelektrischer Tracer (Bevc und Morrison 1991; Moldoveanu und Suciu 1989; White 1994) werden.

In Analogie zu den turbulenten Abflussvorgängen an der Erdoberfläche, die in Schüben und entlang sich ändernder Fließwege vor sich gehen, wird das Abfließen des Druckwassers im Abstrombereich einer Leckage ebenfalls als dynamischer Vorgang betrachtet. Die Beeinflussung hinreichend großer Volumina vorausgesetzt, liegt die Beobachtung der Fließprozesse im Abstrombereich einer Leckage mit Hilfe

geoelektrischer Methoden im Bereich des Möglichen. Die Beobachtung der zeitlichen Variabilität von Widerstands- und Strömungspotentialwerten bietet zukünftig möglicherweise einen wichtigen Schlüssel zur genauen Lokalisierung und der Abschätzung der Aktivität von Leckagen an Stauhaltungsdämmen. Dieser Ansatz verspricht Erfolg bei der Differenzierung von leakagebedingten gegenüber lithofaziell bedingten Anomalien.

Trotz der großen apparativen und methodischen Fortschritte auf dem Gebiet der zerstörungsfreien geophysikalischen Erkundung im Verlauf der beiden vergangenen Jahrzehnte, ist und bleibt dieses Arbeitsfeld sehr anspruchsvoll und erfordert ein hohes Maß an fachlicher Kompetenz. Um die zerstörungsfreie Erkundung als Routineinstrument des präventiven Hochwasserschutzes zu etablieren, ist die weitere Anpassung der Methoden und deren fachkundiger Einsatz notwendig. Auf diesem Weg können die Kosten einer Untersuchungskampagne minimiert und ein Höchstmaß an Informationsgewinn erreicht werden. Die geowissenschaftliche Dammerkundung kann jedoch nicht als isolierter Komplex verstanden werden. Sie entfaltet ihr volles Potential nur in Synergie mit ingenieurwissenschaftlichen Maßnahmen. Die Zusammenarbeit der Geo- mit den Ingenieurwissenschaften könnte zukünftig zu völlig neuen, ganzheitlichen Konzepten im Bereich des präventiven Hochwasserschutzes führen, deren Ziel der bezahlbare Schutz von Menschenleben und materiellen Gütern vor der zerstörerischen Kraft unkontrollierter Wassermassen ist.

8 Literaturverzeichnis

- ABDELRAHMAN, E. S. M. & SHARAFELDIN, S. M. 1997. A least-squares approach to depth determination from self-potential anomalies caused by horizontal cylinders and spheres. - *Geophysics* 62: 44 - 48.
- ANDERSON, L. A. & JOHNSON, G. R. 1976. Application on the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California. - *J. of Geophys. Res.* 81: 1527 - 1532.
- ANDERSON, M. G. & BURT, T. P. 1990. Subsurface runoff. Process studies in hillslope hydrology. - 480 S.; Chichester (Wiley).
- ARANDJELOVIC, D. 1989. An attempt to determine the earth embankment conditions by resistivity investigation. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.; Berlin (Springer).
- ARMBRUSTER, H. & MERKLER, G. P. 1982. Möglichkeiten der Leckstellen-ortung an Erddämmen. - *Geotechnik* 1: 14 - 22.
- ARMBRUSTER, H. 1989. Some detection methods used for the storage reservoir at Iffezheim, FRG. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.; Berlin (Springer).
- ARMBRUSTER, H., BLINDE, A. & HÖTZL, H. 1989 a. The project of the Volkswagen Foundation "Geoelectrics/Thermometry". - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.; Berlin (Springer).
- ARMBRUSTER, H., BLINDE, A., BRAUNS, J., DÖSCHER, H. D., HÖTZL, H. & MERKLER, G.-P. 1989 b. The application of geoelectrical and thermal measurement to locate dam leakages. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.;

Berlin (Springer).

- ARMBRUSTER, H., BRAUNS, J., MAZUR, W. & MERKLER, G.-P. 1989 c. Effects of leaks in dams and trials to detect leakages by geophysical means. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- ARMBRUSTER, H., GROßWIG, S., HANNICH, D., HURTIG, E. & MERKLER, G.-P. 1997 a. Thermische Untersuchungen an Seitengräben zur Kontrolle durchströmter langgestreckter Dämme Teil 1. - Wasserwirtschaft 87: 238 - 243.
- ARMBRUSTER, H., GROßWIG, S., HANNICH, D., HURTIG, E. & MERKLER, G.-P. 1997 b. Thermische Untersuchungen an Seitengräben zur Kontrolle durchströmter langgestreckter Dämme Teil 2. - Wasserwirtschaft 89: 78 - 83.
- BARKER, R. D. 1979. Signal contribution sections and their use in resistivity studies. - Geophys. J. of the Royal Astron. Soc. 59: 123 - 129.
- BARKER, R. D. 1981. Offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. - Geophys. Prosp. 29: 128 - 143.
- BEHRENS, H.-J. & BORMANN, H. 1974. Asphalt dichtungen und Deckwerke am Elbe-Seitenkanal. - Bauingenieur 49: 190 - 197.
- BENN, D. I. & EVANS, D. J. A. 1998. Glaciers & Glaciation. - 734 S.; London (Arnold).
- BERKTOLD, A. 1997. Geoelektrik - Vierpunkt-Verfahren. - In: Beblo, M. (Hrsg.) 1997. Umweltgeophysik. 468 S.; Berlin (Ernst).
- BEVC, D. & MORRISON, H. F. 1991. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt-water injection experiment. - Geophysics 56: 769 - 777.
- BHATTACHARYA, B. B. & ROY, N. 1981. A note on the use of a nomogram für self-potential anomalies. - Geophys. Prosp. 29: 102 - 107.

- BLUM, R. 1989. Geoelectrical mapping and groundwater contamination. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- BOGOSLOVSKY, V. A. & OGILVY, A. A. 1970 a. Natural potential anomalies as a quantitative index of the rate of seepage from water reservoirs. - Geophys. Prosp. 18: 261 - 268.
- BOGOSLOVSKY, V. A. & OGILVY, A. A. 1970 b. Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. - Geophys. Prosp. 18 Suppl.: 758 - 773.
- BOGOSLOVSKY, V. A. & OGILVY, A. A. 1972. The study of streaming potentials on fissured media models. - Geophys. Prosp. 20: 109 - 117.
- BÖTTCHER, R. 1997. Wird die Umweltplanung dem Hochwasser gerecht ? - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- BRÖSSKAMP, K. H. 1976. Seedeichbau - Theorie und Praxis. Hamburg (Vereinigung der Nassbaggerunternehmen e. V.).
- BRONSTERT, A. 1997. Klimaänderungen und Hochwasser - Zusammenhänge und Auswirkungen. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- BRUNOTTE, E. 1997. Das Einzugsgebiet des Rheins - ein geographischer Überblick. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- BUTLER, D. K. & Llopis, J. L. 1990. Assessment of anomalous seepage conditions. - In: Ward, S. H. (Hrsg.). Geotechnical and Environmental Geophysics Vol. 2; Review and Tutorial. Tulsa (Society of Exploration Geophysists).
- BUTLER, D. K. 1989. Geophysical methodology for subsurface fluid flow detection, mapping and monitoring: An overview and selected case

- history. - In: MERKLER G.-P., Militzer, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- CARL, L. & STROBL, TH. 1976. Dichtungswände aus einer Zement- Bentonit-Suspension. - Wasserwirtschaft 76: 246 - 252.
- COGGON, J. H. 1971. Electromagnetic and electrical modelling by the finite element method. - Geophysics 36: 132 - 155.
- COLLEY, G. C. 1963. The detection of caves by gravity measurements. - Geophys. Prosp. 11: 1 - 9.
- CORRY, C. E. 1985. Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralisation. - Geophysics: 1020 - 1034.
- CORWIN, R. F. 1990. The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications. - In: WARD, S.H. (Hrsg.). Geotechnical and Environmental Geophysics Vol. 1; Review and Tutorial. 127 - 145. Tulsa (Society of Exploration Geophysists).
- CORWIN, R. F. 1989. Data quality for engineering self-potential surveys. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- CORWIN, R. F., DEMOULLY, G. T., HARDING, R. S. JR. & MORRISON, H. F. Interpretation of self-potential survey results from the East Mesa geothermal field, California. - J. Geophys. Res. 86: 1841 - 1847.
- DAILY, W. & OWEN, E. 1991. Cross-borehole resistivity tomography. - Geophys. 56: 1228 - 1235.
- DEY, A. & MORRISON, H. F. 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. - Geophys. Prosp. 27: 106 - 136.
- DOUGLAS, C. N. & LANDISMAN, M. 1977. VES dipole-dipole filter coefficients. - Geophysics 42: 1037 - 1044.
- DVWK 1986. Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erd- und

- Wasserbau. - DVWK-Schriften 76. Hamburg (Paul Parey).
- EBEL, U. 1997. Klient Hochwasser - (k)ein Fall für die Versicherungswirtschaft ? - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. - Geophysics 42: 1020 - 1036.
- ENGEL, H. 1997. Die Ursachen der Hochwasser am Rhein - natürlich oder selbstgemacht ? - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- ERNSTSON, K. & SCHERER, U. 1986. Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters. - Geophysics 51: 1967 - 1977.
- FLICK, H., QUADE, H. & STACHE, G.-A. 1988. Einführung in die tektonischen Arbeitsmethoden. - 93 S., 4. Aufl.; Clausthal-Zellerfeld (Pilger).
- FOURNIER, C. 1989. Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: Case history of the Chaîne des Puys (Puy-de Dome, France). - Geophys. Prosp. 37: 647 - 668.
- FRASER, D. C., KEEVIL, N. B. & WARD, S. H. 1964. Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment. - Geophysics 29: 832 - 847.
- FRIEDEL, S. 1997. Hochaufösende Geoelektrik - Geoelektrische Tomographie. - In: Beblo, M. (Hrsg.) 1997. Umweltgeophysik. - 468 S.; Berlin (Ernst).
- FRISCH, W. & LOESCHKE, J. 1993. Plattentektonik. - 243 S., 3. Aufl.; Darmstadt (Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- FÜCHTBAUER, H. 1988. Sedimente und Sedimentgeschichte. - 1141 S., 4. Aufl.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GERLACH, J. 1989. Data processing by temperature measurements. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS,

- J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- GERLACH, R. & RADTKE, U. 1997. Hochwassersedimente - die Visitenkarte des Menschen. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- GEYER, O. F. & GWINNER M. P. 1991. Geologie von Baden-Württemberg. - 482 S., 4. Aufl.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GHOSH, D. P. 1971. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. - Geophys. Prosp. 19: 769 - 775.
- GRIFFITHS, D. H. & BARKER, R. D. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. - J. Appl. Geophys. 29: 211 - 226.
- GRIFFITHS, D. H., TURNBULL, J. & OLAYINKA, A. I. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. - First Break 8: 121 - 129.
- HARDISTY, J., TAYLOR, D. M. & METCALFE, S. E. 1993. Computerised environmental modelling. - 204 S.; Chichester (Wiley).
- HENSCHEL, P. & ROTH, J. 1997. Hochwasser - natürliches Lebenselixier der Auen. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- HESSE, A., JOLIVET, A. & TABBAGH, A. 1986. New prospects in low depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. - Geophysics 51: 585 - 594.
- HÖLDER, H. 1989. Kurze Geschichte der Geologie und Paläontologie. - 244 S.; Berlin (Springer).
- HÖLTING, B. 1996. Hydrogeologie. - 441 S., 5. Aufl.; Stuttgart (Enke).
- HÖTZL, H. & MERKLER, G.-P. 1989. Self-potential Measurement to determine preferred waterflow in fractured rocks. - In: MERKLER G.-P., MILITZER,

- H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- IDEL, K. H. 1978. Stahlpundwand als Dichtungsmembrane kleiner Staudämme. - Wasser und Boden 30: 287- 288.
- ISHIDO, T. 1989. Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- KANOWSKI, H. 1978. Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Untersuchung von Flussdeichen. - 105 S.; Dresden (Diss. am Institut für Wasserwirtschaft, TU Dresden).
- KÄSS, W. 1992. Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie Band 9. - 528 S.; Berlin (Borntraeger).
- KASSEL, A., FABER, S. & MERKLER, G.-P. 1989. Laboratory studies on the characteristics of electrodes used for streaming-potential measurements. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- KILTY, K. T. 1984. On the origin and interpretation of self-potential anomalies. - Geophys. Prosp. 32: 51 - 62.
- KINZELBACH, W. 1992. Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. - 343 S., 2. Aufl.; München (Oldenburg).
- KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. 1995. Grundwassermodellierung. - 283 S.; Berlin (Borntraeger).
- KNIGHTON, D. 1998. Fluvial forms & processes. - 383 S.; London (Arnold).

- KOEFOED, O. & DIRKS, F. J. H. 1979. Determination of resistivity sounding filters by the Wiener-Hopf least squares method. - *Geophys. Prosp.* 27: 245 - 250.
- KOENZEN, U. 1997. Fließgewässerrenaturierung und Auenschutz - eine Möglichkeit zur Hochwasserprävention ? - In: Immendorf, R. (Hrsg.). *Hochwasser.* - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- KOSTYANEV, S. G. 1989. Mathematical models of self-potential fields (gEOelectrical and gEOthermal) for detection of subsurface flow phenomena. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.; Berlin (Springer).
- KRAHE, P. 1997. Hochwasser und Klimafluktuationen am Rhein seit dem Mittelalter. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). *Hochwasser.* - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- KUNZE, U. R. & SCHWENDT, G. 1996. *Grundlagen der qualitativen und quantitativen Analyse.* - 356 S., 4. Aufl.; Stuttgart (Georg Thieme).
- LAKSHMANAN, J. 1991. The generalized gravity anomaly: Endoscopic microgravity. - *Geophysics* 56: 712 - 723.
- LANGGUTH, H.-R. & Voigt, R. 1980. *Hydrogeologische Methoden.* - 486 S.; Berlin (Springer).
- LAPAJNE, J. 1976. Hydrogeologic parameters from streaming potential anomalies. - Presented at the 3rd Internat. Sympos. on underground water tracing: 130 - 139; Ljubljana (Univ. Press).
- LATSCHA, H. P. & KLEIN, H. A. 1990. *Anorganische Chemie.* - 499 S., 4. Aufl.; Berlin (Springer).
- LEE, T. & GREEN, R. 1973. A method for the direct interpretation of electrical soundings made over a fault or dike. - *Geophysics* 38: 762 - 770.
- LEHMANN, H. 1995. Potential representation by independent configurations

- on a multi-electrode array. - *Geophys. J. Int.* 120: 331 - 338.
- LENNART, A. A. & GORDON, R. J. 1976. Application of the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California. *J. Geophys. Res.* 81: 1527 - 1532.
- LI, J. & OLDENBURG, D. W. 1994. Inversion of 3-D DC resistivity data using an approximate inverse mapping. - *Geophys. J. Int.* 116: 527 - 537.
- LOKE, M. H. & BARKER, R. D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. - *J. Appl. Geophys.* 29: 211 - 226.
- LOKE, M. H. & BARKER, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. - *Geophys. Prosp.* 44: 131 - 152.
- LONDONG, D. 1986. Flußdeiche. DVWK - Merkblätter zur Wasserwirtschaft 210. Hamburg - Berlin (Parey).
- MÄLZER, H. 1989. The Black Forrest Observatory Schiltach. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. *Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena.* - 514 S.; Berlin (Springer).
- MARSHALL, D. J. & MADDEN, T. R. 1959. Induced polarization: A study of its causes. - *Geophysics* 24: 790 - 816.
- MATTHES, S. 1990. *Mineralogie.* - 488 S., 3. Aufl.; Berlin (Springer).
- MATTHEß, G. & UBELL, K. 1983. *Allgemeine Hydrogeologie Band 1.* - 438 S.; Berlin (Borntraeger).
- MCNEILL, J. D. 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. - In: Ward, S. H. (Hrsg.). *Geotechnical and environmental geophysics Vol. 1:* 191 - 218; Tulsa (Society of Exploration Geophysicists).
- MEISER, P. 1962. A method for quantitative interpretation of self-potential measurements. - *Geophys. Prosp.* 10: 203 - 218.
- MERKLER, G.-P. & HÖTZL, H. 1989. Model experiments on a small test

channel - Empirical correlations between flow potentials and the hydraulic field. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).

MERKLER, G.-P., ARMBRUSTER, H. HÖTZL, H., MARSHALL, P., KASSEL, A. & UNGAR, E. 1989. Modelling of streaming potentials and thermometrical measurements at a big laboratory channel. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).

MILITZER, H. & OELSNER, Chr. 1989. Some problems concerning the measurements of near-surface streaming potentials as well as of surface temperatures for the detection of near-surface flow phenomena. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).

MILITZER, H. 1989. Main topics of the round table discussion. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).

MOLDOVEANU, T. & GEORGESCU, P. 1989. Aspects concerning the results of laboratory geoelectric measurements for the study of hydrogeological phenomena. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).

MOLDOVEANU, T. & SUCIU, O. 1989. Aspects concerning the detection by geoelectrical methods of seepage at some Romanian dams. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS,

- J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- MORGAN, F. D. 1989. Fundamentals of streaming potentials in geophysics: Laboratory methods. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- MUFTI, I. R. 1976. Finite-difference resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. - Geophysics 41: 62 - 78.
- NABIGHIAN, M. N. 1987. Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 2A: 427 - 520; Tulsa (Society of Exploration Geophysicists).
- NEUMAIER, H. & WEBER, H. H. 1996. Altlasten. - 518 S., 3. Aufl.; Berlin (Springer).
- NOEL, M. & XU, B. 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. - Geophys. J. Int. 107: 95 - 102.
- NOVER, G. & WILL, G. 1989. Complex resistivity measurements in granites. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- O'NEILL, D. J. & MERRICK, N. P. 1984. A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array. - Geophys. Prosp. 32: 105 - 123.
- OELMANN, H. 1997. Leben mit der Flut - das Kölner Hochwasser-Oschutzkonzept. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- OGILVY, A. A., AYED, M. A. & BOGOSLOVSKY, V. A. 1969. Geophysical studies of water leakages from reservoirs. - Geophys. Prosp. 27: 36 -62.
- Ogilvy, A. A., OSTROVSKIJ, E. J. & RUDERMAN, E. N. 1989. Electrical surveys using the method of the natural electrical field; new investigations. -

- In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- OGILVY, R. D., CUADRA, A., JACKSON, P. D. & MONTE, J. L. 1991. Detection of an air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method. - Geophys. Prosp. 39: 845 - 859.
- OLDENBURG, D. W. & ELLIS, R. G. 1991. Inversion of geophysical data using an approximate inverse mapping. - Geophys. J. Int. 105: 325 - 353.
- OREAR, J. 1979. Physik. - 752 S.; München (Hanser).
- OVERMEEREN, van, R. A. & RITSEMA I. L. 1988. Continuous vertical electrical sounding. - First Break 6: 313 - 324.
- PANISSOD, C., DABAS, M., HESSE, A., JOLIVET, A., TABBAGH, J. & TABBAGH, A. 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. - Geophysics 63: 1542 - 1550.
- PARASNIS, D. S. 1966. Mining geophysics. - 576 S.; Amsterdam (Elsevier).
- PARK, S. 1998. Fluid migration in the vadose zone from 3-D inversion of resistivity monitoring data. - Geophysics 63: 41 - 51.
- PARK, S. K. & VAN, G. P. 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. - Geophysics 56: 951 - 960.
- PELTON, W. H., WARD S. H., HALLOF, P.G., SILL, W. R. & NELSON, P. H. 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency induced polarization. - Geophysics. 43: 588 - 609.
- PLATE, E. 1997. Naturkatastrophe Hochwasser. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- POST, G., LONDE, P. & HINTEREGGER, H. 1955. Der Erdstaudammbau - amerikanische Praxis. München (Sager & Woerner).
- POTTECHER, G. & POIRMEUR, C. 1989. The MIMAFO direct current cross-hole method: A support to hydraulic investigations. - In: MERKLER G.-P.,

- MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- PRESS, F. & SIEVER, R. 1986. Earth. - 656 S.; New York (Freeman).
- PRESS, H. W., FLANNERY, B. P., TEUKOLOSKY, S. A. & VETTERLING, W. T. 1986. Numerical recipes. - 818 S.; Cambridge (University Press).
- READING, H. G. 1986. Sedimentary Environments and Facies. - 615 S., 2. Aufl.; Oxford (Blackwell).
- REFORD, M. S. 1980. History of geophysical exploration, magnetic method. - Geophysics 45: 1640 - 1658.
- REMANE, A., STORCH, V. & WELSCH, U. 1986. Systematische Zoologie. - 698 S., 3. Aufl.; Stuttgart (Gustav Fischer).
- REYNOLDS, J. M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. - 796 S.; Chichester (Wiley).
- RICHTER, J. 1986. Der Boden als Reaktor. - 238 S.; Stuttgart (Enke).
- SARTORI, M. 1989. Application of thermal IR-techniques for reconnaissance of dam and barrage defects in an early state, analysis of dump sites and tunnel condition surveys. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- SASAKI, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. - Geophys. Prosp. 40: 453 - 463.
- SCHARFF, G. 1999. Auswirkungen eines Pflegekonzeptes auf den Bewuchs von Flußdeichen. - Wasserwirtschaft 89: 376 - 381.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. 1992. Lehrbuch der Bodenkunde. - 491 S., 13. Aufl.; Stuttgart (Enke).
- SCHMIDT, K. & WALTER, R. 1990. Erdgeschichte. - 307 S.; Berlin (de Gruyter).

- SCHÖNENBERG, R. & NEUGEBAUER, J. 1987. Einführung in die Geologie Europas. - 294 S., 5. Aufl.; Freiburg (Rombach).
- SCHUCH, M. 1963. Beobachtungen von Eigenpotentialen an Torflagerstätten mit verschiedenen Elektroden. - Zeitschr. f. Geophys. 29: 175 - 196.
- SCHUCH, M. 1989. Streaming potential in nature. In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- SCHUCH, M. & WANKE, R. 1968. Die zeitlichen Variationen elektrischer Strömungsspannung auf kurzen vertikalen Meßstrecken in Mineralböden. - Zeitschr. f. Geophys. 34: 599 - 610.
- SCHWOERBEL, J. 1993. Einführung in die Limnologie. - 387 S., 7. Aufl.; Stuttgart (Fischer).
- SCHWOERBEL, J. 1994. Methoden der Hydrobiologie. - 368 S., 4. Aufl.; Stuttgart (Fischer).
- SHIMA, H. 1990. Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers. - Geophysics 55: 682 - 694.
- SILL, W. R. 1983. Self-potential modeling from primary flows. - Geophysics 48: 76 - 86.
- SPITZER, K. 1995. A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. - Geophys. J. Int. 123: 903 - 914.
- STANLEY, S. M. 1994. Historische Geologie. - 632 S.; Heidelberg (Spektrum).
- STÖCKER, H. 1994. Taschenbuch der Physik. - 874 S., 2. Aufl.; Thun (Deutsch).
- STROBL, TH. 1982. Ein Beitrag zur Erosionssicherheit von Einphasen-Dichtungswänden. - Wasserwirtschaft 72: 269 - 272.
- SUNDARARAJAN, N., SRINIVASA, P. & SUNITHA, V. 1998. An analytical method

- to interpret self-potential anomalies caused by 2-D inclined sheets. -
Geophysics 63: 1551 - 1555.
- SZARANIEC, E. 1971. An effective array spacing for electrical sounding
curves. - Geophysics 36: 358 - 362.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990. Applied Geophysics.
- 770 S., 2. Aufl.; Cambridge (University Press).
- THIERBACH, R. 1974. Electromagnetic reflections in salt deposits. - J. of
Geophys. 40: 633 - 637.
- TSOKAS, G. N. & TSOURLOS, P. 1997. Transformation of the resistivity
anomalies from archaeological sites by inversion filtering. -
Geophysics 62: 36 - 43.
- VENETIS, C. 1989. Temperature disturbance in a dam due leakage. - In:
MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS,
J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface
flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- WALTHAM, D. 1994. Mathematics: A Simple Tool For Geologists. - 185 S.;
London (Chapman & Hall).
- WARD, S. H. 1990. Geotechnical and environmental geophysics. - 468 S.;
Tulsa (Society of Exploration Geophysicists).
- WEIGEL, M. 1989. Self-potential surveys on waste dumps - Theory and
practice. - In: Merkle G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H.
& BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of
subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- WEISCHET, W. 1988. Einführung in die allgemeine Klimatologie. - 264 S., 4.
Aufl.; Stuttgart (Teubner).
- WHITE, P. A. 1994. Electrode array for measuring groundwater flow direction
and velocity. - Geophysics 59: 192 - 201.
- WILCKENS, F. 1955. Die Grundlagen der Eigenpotentialmethode. - Zeitschr. f.
Geophys. 21: 25 - 40.

- WILKE, K. 1997. Hochwasservorhersage am Rhein - Wunsch oder Wirklichkeit ? - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- WILT, M. J. & CORWIN, R. F. 1989. Numerical modeling of self-potential anomalies due to leaky dams: Model and field examples. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- WINTER, H., ARROYO, M., HAAK, V., STOLL, J. & VOGT, R. 1989. Geoelectrical measurements at the KTB location. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- WINTER, H., AULBACH, E. & Stoll, J. 1989. Copper-coppersulfate electrodes for self-potential and magnetotelluric measurements. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- WURMSTICH, B. & FABER, S. 1989. Long-term self-potential data acquisition and processing. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- XU, B. & NOEL, M. 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. - Geophys. Prosp. 41: 791 - 801.
- XU, S. Z., ZHAO, S. & NI, Y. 1998. A boundary element method for 2-D dc resistivity modelling with a point current source. - Geophysics 63: 399 - 404.
- YARAMANCI, U. & FLACH, D. 1989. Geoelectrical measurements at the salt

- mine asse to observe an underground barrier construction. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- ZESSE, R. 1997. Hochwasser in historischen Karten - Beispiel der Elbe bei Dresden. - In: Immendorf, R. (Hrsg.). Hochwasser. - 261 S.; Heidelberg (C. F. Müller).
- ZIEGLER, B. 1986. Allgemeine Paläontologie. - 248 S., 4. Aufl.; Stuttgart (Schweizerbart).
- ZIPFEL, K. & HORALEK, U. 1989. Detection of river-infiltrated water flow by evaluation of hydrogeologic, hydrochemical and hydrothermal data using numerical groundwater models. - In: MERKLER G.-P., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Lecture Notes in Earth Sciences Vol. 27; Detection of subsurface flow phenomena. - 514 S.; Berlin (Springer).
- ZITSCHER, F.-F. 1983. Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau. - 4. Aufl.; (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau).
- ZOHDY, A. A. R. 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. - Geophysics 54: 245 - 253.