

Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Weller
Dr. rer. nat. Ronald Lewis
Dipl.-Geophys. Ernst Niederleithinger

**Geophysikalische Verfahren
zur Strukturerkundung und
Schwachstellenanalyse von
Flussdeichen – ein Handbuch**

Forschungsbericht 281

Berlin 2008

Dieses Handbuch entstand im Rahmen der BMBF-Förderaktivität
„Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse - Rimax“

Projektkronym: „DEISTRUKT“
Förderkennzeichen: 02WH0635
Koordination: BAM VIII.2
Dipl.-Geophys. Ernst Niederleithinger
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
E-Mail: ernst.niederleithinger@bam.de

Mit Beiträgen von

Thomas Fechner, Uwe Hoffmann, Ronald Lewis, Tina Martin, Marcus Möller, Kai Musfeldt,
Ernst Niederleithinger, Ulrich Stötzner, Andreas Weller und Gerhard Zacher

Danksagung

Die Autoren danken

- den Projektpartnern und den beteiligten Mitarbeitern (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Technische Universität Clausthal, Büro für Geophysik Lorenz, Geotomographie GmbH, GBM Wiebe GmbH, Projektgesellschaft Scholz & Lewis)
- den Hochwasserschutzbehörden, die Teststandorte zur Verfügung stellten (Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Hadelner Deich- und Uferbauverband)
- den Kooperationspartnern (Umweltforschungszentrum Leipzig, Universität Köln, Bundesanstalt für Wasserbau).

Impressum

Forschungsbericht 281:

**Geophysikalische Verfahren zur Strukturerkundung und
Schwachstellenanalyse von Flussdeichen – ein Handbuch**

2008

Herausgeber:

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-Mail: info@bam.de

Internet: www.bam.de

Copyright © 2008 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Umschlag: Lutz Mittenzwei

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 0938-5533

ISBN 978-3-9812072-2-4

Inhalt

1	Einführung	5
2	Struktur und Schwachstellen von Flussdeichen	6
2.1	Vorbemerkungen	6
2.2	Deichstruktur	6
2.3	Schwachstellen und Deichzustand	6
3	Einsatz geophysikalischer Methoden bei der Untersuchung von Flussdeichen	8
3.1	Ablauf der Deicherkundung	8
3.2	Spezifische Randbedingungen bei der geophysikalischen Erkundung	10
3.3	Anforderungen an den Untersuchungsraum	10
3.4	Anforderungen an das Auflösungsvermögen	11
3.5	Geophysikalische Messparameter und deren geotechnische Relevanz	11
3.6	Methodenmatrix	11
3.7	Kalibrierung und Laborabgleich	13
3.8	Kombination geophysikalischer mit geotechnischer Erkundung	13
4	Methodenbeschreibung	15
4.1	Geoelektrik	15
4.2	Elektromagnetik	17
4.3	Georadar	18
4.4	Seismik	20
4.5	Ingenieurgeophysikalische Sondierungen	21
5	Eignung geophysikalischer Verfahren	22
5.1	Vorbemerkungen	22
5.2	Geoelektrik	23
5.3	Elektromagnetik	24
5.4	Georadar	24
5.5	Seismik	25
5.6	Ingenieurgeophysikalische Sondierungen	25
5.7	Kalibrieraufschlüsse	25
6	Literatur	26
	Anhang	27
	Hinweise zu Ausschreibungen und Aufträgen	27

1 Einführung

Vor dem Hintergrund der seit Mitte der 90er Jahre in Deutschland gehäuft auftretenden Hochwasserereignisse (Rhein 1993/1995, Saale 1994, Oder 1997, Donau, Elbe und Mulde 2002/2005/2006) und den damit verbundenen umfangreichen Schäden, die ursächlich auf das Versagen von Hochwasserschutzanlagen (Deichbrüche) zurückzuführen waren, wird deutlich, dass die teilweise mehrere hundert Jahre alten Flussdeiche den Belastungen, bedingt durch ihre Bauart, die eingesetzten Baustoffe und die Bauhöhen, zum Teil nicht mehr gewachsen sind.

Vor einer schutzzielabhängigen Entscheidung, ob eine Deichanlage künftigen Belastungen standhält oder ggf. zu ertüchtigen bzw. neu zu errichten ist, bedarf es als grundlegender Voraussetzung einer detaillierten Untersuchung des Tragsystems Bauwerk (Deich) und Untergrund. Ziel dieser Untersuchungen ist es, Schwachstellen des Tragsystems nach Umfang und Lage zu ermitteln, um daraus gezielt mögliche Sanierungsstrategien ableiten zu können.

Für eine systematische Schwachstellenanalyse bieten sich in Kombination mit konventionellen geotechnischen Untersuchungsmethoden geophysikalische Messverfahren an. Einschlägige Normen und Richtlinien (DWA-M 507, DIN 19712) empfehlen zwar den Einsatz von geophysikalischen Verfahren, geben aber kaum praktische Hinweise für die Anwendung dieser Methoden.

So erfolgt der Einsatz zerstörungsfreier geophysikalischer Verfahren zur Strukturerkundung an Deichen in Kombination mit geotechnischen Untersuchungen bisher regional differenziert und teilweise unsystematisch. Zudem werden von den für den Hochwasserschutz verantwortlichen Behörden zumeist keine oder sehr unterschiedliche Anforderungen an derartige Untersuchungen formuliert. Dadurch mangelt es den mit der Ausführung beauftragten Dienstleistern (Ingenieurbüros) zumeist an eindeutigen Vorgaben. Dies führt in der Regel dazu, dass die Qualität der aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Aussagen höchst unterschiedlich ausfällt und vielfach nicht als optimal bezeichnet werden kann.

Eine Hilfe zur Methoden- und Parameterwahl sowie eine systematische Bewertung der Eignung geophysikalischer Verfahren zur Strukturerkundung von Deichen gab es bisher nicht.

Nach den Hochwasserereignissen des Jahres 2002 an Elbe und Mulde initiierte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Forschungsprogramm „Rimax“ (Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse). Mit diesem Programm werden zahlreiche Projekte auf ganz unterschiedlichen Gebieten der Hochwasserforschung gefördert [8].

Eines dieser Projekte ist das Verbundprojekt „Systematische Evaluierung existierender und innovativer Methoden zur Schwachstellenanalyse und Strukturerkundung von Deichen“ (DEISTRUKT). Ziel war es, möglichst viele erfolgversprechende oberflächen- und bohrlochgeophysikalische Methoden auf ihre Eignung für die Deichstrukturerkundung und Schwachstellenanalyse zu prüfen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei auf die Umsetzung in geotechnisch verwertbare Ergebnisse gelegt.

Mit dem Vorhaben DEISTRUKT sollte die Grundlage für einen effektiven Einsatz dieser Verfahren gelegt werden. Behörden und ausführende Ingenieurbüros sollen ein Werkzeug für die Entscheidungsfindung bei Konzeption, Ausschreibung, Durchführung und Bewertung geophysikalischer Messungen in Verbindung mit den geotechnischen Untersuchungsergebnissen erhalten. Basierend auf einer intensiven Recherche und praktischen Tests wurde eine systematische Evaluierung durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt als Richtlinie in diesem Handbuch. Berührungsfreie Methoden der Aerogeophysik oder der Fernerkundung waren nicht Gegenstand der Untersuchungen und bleiben daher im vorliegenden Handbuch unberücksichtigt.

Das vorliegende Handbuch soll sowohl dem Praktiker aus Geophysik und Geotechnik als auch Behördenvertretern, die geophysikalische Leistungen zu beauftragen haben, als Hilfe zur Auswahl geeigneter Methoden und Messparameter dienen. Insoweit ist es auch als Ergänzung zu den Richtlinien DIN 19712, DIN 4020 und DWA-M 507 zu sehen.

Sinngemäß können die in diesem Handbuch gegebenen Empfehlungen und Hinweise auch für die Erkundung von Trassen für den Deichneubau bzw. für Deichrückverlegungen, Seedeiche sowie für Flusssseiten- bzw. Kanalseitendämme im Sinne von [36] gelten.

Im Kapitel 2 werden insbesondere die Bauweise (Struktur) von Flussdeichen und die damit verbundenen Schwachstellen des Tragsystems sowie die daraus abgeleiteten Untersuchungsmethoden beschrieben. Kapitel 3 behandelt die Anforderungen und den Ablauf der geophysikalischen Deicherkundung und zeigt die Verknüpfungen zu den geotechnischen Untersuchungen auf. Eine kurze Beschreibung der wichtigsten bei der Deicherkundung eingesetzten geophysikalischen Methoden enthält Kapitel 4. In Kapitel 5 erfolgt die Bewertung der Eignung dieser Methoden. Schließlich werden im Anhang Hinweise zur Ausschreibung geophysikalischer Leistungen gegeben.

2 Struktur und Schwachstellen von Flussdeichen

2.1 Vorbemerkungen

Geophysikalische Verfahren können als Bestandteil einer komplexen Bauwerks- und Standorterkundung für geplante oder bestehende Flussdeichanlagen einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung der Qualität der Baugrunderkundung liefern. Punktuelle Informationen aus Einzelaufschlüssen können so fachgerecht zu flächenhaften Darstellungen interpoliert und bis zu einem gewissen Maße auch extrapoliert werden.

In verallgemeinerter Form ist in DIN 4020 Bbl 1:2003-10, *Tabelle 5* und *6* eine generelle Übersicht über den Einsatz geophysikalischer Verfahren an der Erdoberfläche und in Bohrlöchern bei der Baugrunderkundung enthalten. Für die gebräuchlichsten Verfahren werden Messprinzipien, Messgrößen, Einsatzgebiete und Anwendungsgrenzen aufgezeigt. Zusätzlich wird darauf verwiesen, dass bei der Anwendung geophysikalischer Verfahren eine Kombination mehrerer Methoden die Aussagesicherheit erhöht.

Mit der DIN 19712: 1997-11 „Flussdeiche“, Kap. 14.2 wird bereits eine Zieldefinition für geophysikalische Erkundungsverfahren an Deichen formuliert:

„Diese Untersuchungen geben einen Überblick über den allgemeinen Aufbau des Deichkörpers, des deichnahen Untergrundes sowie des Vor- und Hinterlandes und zeigen Unstetigkeiten bzw. Störungen auf.“

In dieser Norm wird jedoch lediglich auf den Einsatz geoelektrischer Verfahren zur flächenhaften Aufnahme im Untersuchungsgebiet im Sinne einer Vorerkundung und auf die Anwendung von radiometrischen Sondierungen hingewiesen.

In den DWA-Themen „Dichtungssysteme in Deichen“ 2005-04 und im Merkblatt DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“, Kap. 5 (Entwurf 2007-02) werden neben der Geoelektrik auch das Georadar sowie die Seismik als weitere geophysikalische Verfahren für die Deicherkundung empfohlen. Für diese Verfahren werden kurze Hinweise zur Methodik, zu den Aussagemöglichkeiten und Einsatzgrenzen gegeben.

Neben den genannten Messverfahren kommen in der geotechnischen Erkundungspraxis weitere Verfahren und Methoden¹ zur Anwendung, deren Anwendbarkeit auf die speziellen Fragestellungen an Flussdeichen zu überprüfen war.

Bei der Bewertung von Einsatzmöglichkeiten und -grenzen dieser Verfahren kann auf einen reichen Fundus an Messungen zurückgegriffen werden, die im Nachgang der extremen Hochwasserereignisse in den letzten 15 Jahren in den Flussgebieten von Elbe, Rhein, Donau und Oder durchgeführt worden sind.

Darüber hinaus wurden für die Verfahrensevaluierung Messungen, begleitet von einem geotechnischen Untersuchungsprogramm, an vier Teststandorten an Elbe und Mulde in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen mit unterschiedlichen Deichbauweisen sowohl mit Standard- als auch innovativen Methoden durchgeführt.

2.2 Deichstruktur

Nach ihrer inneren Struktur (Bauweise) können gemäß [14] grundsätzlich drei Typen von Deichen unterschieden werden.

Homogener Deich

- überwiegend feinkörnige bis gemischtkörnige mineralische Deichbaustoffe mit plastischen Eigenschaften, selten grobkörnige Deichbaustoffe als Stützkörper
- Stützkörper oftmals in mehreren Ausbaustufen (Erhöhung, Verbreiterung) errichtet, bestehend aus mehr oder weniger homogenen Materialien (z. B. Altdeiche)

2-Zonen Deich

- überwiegend feinkörnige bis gemischtkörnige mineralische Deichbaustoffe mit plastischen Eigenschaften als Stützkörper
- landseitige stark durchlässige Dränkörper

3-Zonen-Deich

- überwiegend feinkörniger bis grobkörniger Stützkörper
- wasserseitige Dichtungselemente (z. B. mineralische Dichtung, Bentonitmatten, Fußspundwand)
- bzw. innere Dichtungselemente (z. B. Spundwand, Schlitzwand)
- landseitige stark durchlässige Dränkörper

Bei den unterschiedlichen Bauweisen sind landseitige Bermen mit oder ohne statisch stützende Funktion (Auflast) möglich. Weiterhin können besondere Einbauten, z. B. für den Erosionsschutz (Befestigungen, Jute-/Kunststoffmatten), Bestandteil der Deichanlage sein.

2.3 Schwachstellen und Deichzustand

Das Versagen einer Deichanlage unter Belastung kann vielfältige Ursachen haben. Letztlich führt das Zusammentreffen von Einwirkungen und den daraus abgeleiteten Beanspruchungen sowie diesen gegenüberstehenden Widerständen im Sinne der DIN 1054: 2005-01 dazu, dass eine Deichanlage den Belastungen standhält oder versagt.

Für die Prognose eines Systemversagens ist daher der Zustand (Kombination von Einwirkungen und Widerständen) des Tragsystems Bauwerk/Baugrund zu untersuchen. Potenzielle Schwachstellen des Systems treten z. B. unter einer hydraulischen Belastung (Hochwassersituation) oftmals deutlich hervor und können dann ggf. visuell erfasst werden. Der Zustand des Tragsystems verändert sich dabei naturgemäß in Abhängigkeit vom Grad der Belastung. In der Regel sind Schwachstellen jedoch möglichst vor einer solchen Belastung zu ermitteln. Das heißt, die geophysikalisch-geotechnische Erkundung der Deichanlage erfolgt gewöhnlich nicht während einer Hochwassersituation.

¹ Mit Methoden werden bestimmte Messvarianten innerhalb eines Grundverfahrens bezeichnet.

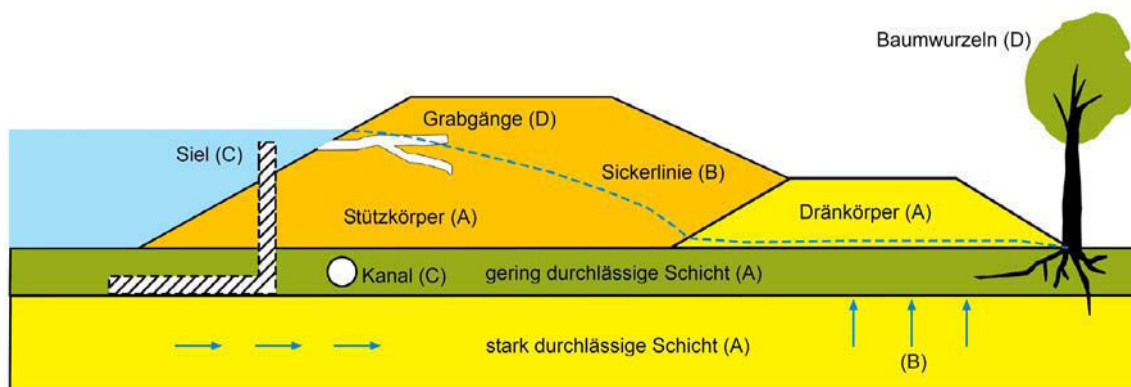


Abbildung 2.3.1
Darstellung der Zustandskategorien und potenzieller Schwachstellen

Es lassen sich vier Kategorien unterscheiden, die den Zustand des Tragsystems wesentlich beeinflussen und teilweise Schwachstellen darstellen können:

- Kategorie A - lithologische Einflüsse
- Kategorie B - hydraulische Einflüsse
- Kategorie C - anthropogene Einflüsse
- Kategorie D - biologische Einflüsse

Beispiele dieser Zustandskategorien und potenzieller Schwachstellen sind in Abb. 2.3.1 schematisch dargestellt.

Kategorie A - lithologische Einflüsse

Hierzu gehört die Bodenschichtung im Deichkörper und Untergrund mit ihren spezifischen Materialeigenschaften, wie Permeabilität, Filterstabilität, Scherfestigkeit, Steifigkeit und Sohlreibungsverhalten, die Widerstände gegenüber den Einwirkungen darstellen.

Die Bodenwichte kann sowohl zu den Widerständen als auch zu den Einwirkungen (z. B. Deicheigenlast) gerechnet werden.

Insbesondere die Bodenschichtung, d. h. die Verteilung von fein-, gemischt- und grobkörnigen Böden im Untergrund und Deichkörper kann mittels geophysikalischer und geotechnischer Methoden erkundet werden. Laboruntersuchungen dienen der Feststellung der Materialeigenschaften. Hinsichtlich der Belastung ungünstige Bodenschichtungen und Materialeigenschaften stellen Schwachstellen des Tragsystems dar.

Kategorie B - hydraulische Einflüsse

Die hydraulischen Einwirkungen beeinflussen die Standsicherheit von Flussdeichen im Belastungsfall (Hochwassersituation) maßgeblich. Daher sind Kenntnisse zur Lage der Sickerlinie im Deichkörper (Durchströmung), zu Strömungskräften von Grundwasser (gespannte oder artesisische Grundwasser- verhältnisse) im Untergrund sowie zur Strömungskraft des Oberflächenwassers (Überströmung und Anströmung in Prallhanglagen) notwendig.

Zur Lokalisierung der Sickerlinie können unter bestimmten Bedingungen neben konventionellen Grundwasserpegeln/ Porenwasserdruckgebern auch geophysikalische Verfahren eingesetzt werden. Die Feststellung der Grundwasser- druckverhältnisse erfolgt über Grundwassermessstellen.

Ein Wassereinstau auf der Luftseite der Deichanlage kann jedoch auch als Widerstand gegenüber Auftriebskräften aufgefasst werden.

Kategorie C - anthropogene Einflüsse

Landwirtschaftliche Nutzungen im Vor- und Hinterland von Deichanlagen, Verkehr auf und am Deich (Verkehrslasten) können Schädigungen an den Deichanlagen bewirken. Die An- und Einbindung von Bauwerken (Bauwerkslasten, Setzungsunterschiede) an und in den Deich (z. B. Schöpfwerke, Siele, Deichscharten) sind naturgemäß Schwachstellen, die bevorzugte Sickerwege darstellen und somit Materialtransportprobleme (Suffosion, Kontakterosion, Fugenerosion) verursachen können. Gleiches gilt für Bauwerke (z. B. Düker, Kanäle), die sich unter dem Deich befinden.

Die unterirdische Ausdehnung und Lage solcher Einbauten kann ebenfalls mit geophysikalischen und geotechnischen Verfahren erkundet werden.



Abbildung 2.3.2
Übersicht über Zustandskategorien und Methoden zur Erfassung von Schwachstellen und Deichzustand

Schließlich kann eine ungünstige Deichgeometrie eine Schwachstelle des Tragsystems darstellen.

Kategorie D - biologische Einflüsse

Hierzu zählen die Einflüsse, die Fauna und Flora auf die Erdbauwerke ausüben. Insbesondere Wühltiere (in tropischen Regionen auch Insekten) tragen durch ihre grabende Tätigkeit zu Hohlräumbildungen in den Deichanlagen bei und sorgen damit für bevorzugte Sickerwege (Schwachstellen), die wiederum Materialtransportprobleme verursachen und die Standsicherheit des Erdbauwerkes gefährden können.

Baumwurzeln haben eine ähnliche Wirkung auf die Deichanlage und stellen bevorzugte Sickerwege dar. Baumwurf gefährdet ebenfalls die Standsicherheit.

Zum Nachweis von Hohlräumen im Deich werden geophysikalische Verfahren eingesetzt.

Eine intakte Grasnarbe auf der Wasserseite der Deichanlage hingegen kann einen Widerstand gegenüber hydraulischen Einwirkungen darstellen.

In *Abbildung 2.3.2.* ist eine Übersicht über die Zustandskategorien und die für die Erfassung von Schwachstellen und des Zustandes geeigneten Untersuchungsmethoden dargestellt.

3 Einsatz geophysikalischer Methoden bei der Untersuchung von Flussdeichen

3.1 Ablauf der Deicherkundung

Die Erkundung von Deichen an Fließgewässern erfordert in der Regel eine großräumige Betrachtungsweise und stellt eine interdisziplinäre Aufgabe dar. Neben geologisch-hydrogeologischen Randbedingungen sowie geophysikalisch-geotechnischen Erkundungsmethoden sind insbesondere hydraulische und wasserbauliche Aspekte für die Deichbemessung und -gestaltung zu berücksichtigen. Aufgrund der

exponierten Lage in Flussauen spielen auch landschaftsökologische Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle.

Der Umfang der Untersuchungen richtet sich dabei nach der Zuordnung der Deichanlage zu einer geotechnischen Kategorie gemäß [14] bzw. [17] sowie der entsprechenden Planungsphase (Voruntersuchung, Hauptuntersuchung im Sinne von [17]).

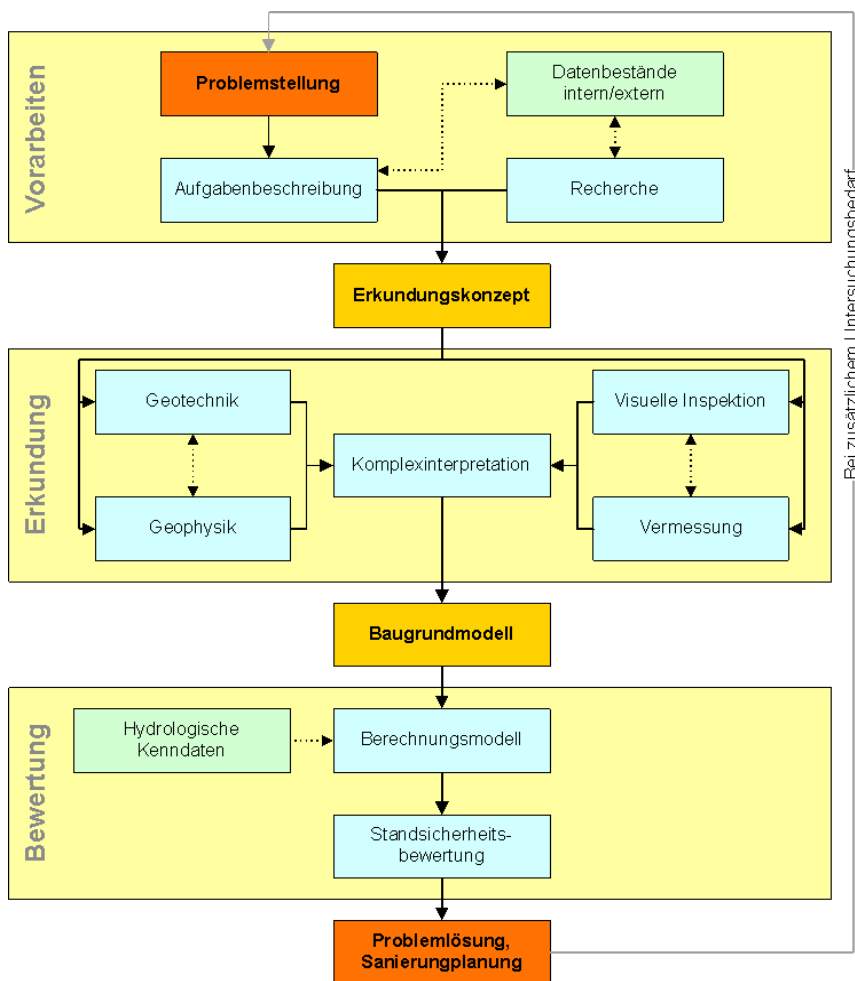


Abbildung 3.1.1
Generalisierter Ablauf der geophysikalisch – geotechnischen Deicherkundung

Das in Abb. 3.1.1 gezeigte Schema stellt einen generalisierten Ablauf der Deicherkundung dar. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die Anwendung geophysikalischer Verfahren allein niemals ohne den Verbund mit geotechnischen Methoden denkbar ist. Eine Bewertung der Ergebnisse muss gemeinsam durch den Geophysiker und Geotechniker erfolgen (siehe hierzu Merkblatt DWA-M 507 und DIN 4020).

Geophysikalische Messungen sind in Verbindung mit geotechnischen Erkundungsverfahren sehr gut für die großflächige Erkundung von Flussdeichen geeignet. So ist es z. B. mittels geophysikalischer Verfahren möglich, nachfolgende Informationen über Strukturen und Schwachstellen im Deich und Untergrund abzuleiten:

- Abgrenzung von Homogen- und Anomaliebereichen (z. B. lithologisch bedingter Schwachstellen),
- Hinweise auf mögliche Deichgliederungen (z. B. Altdeichstrukturen),
- Verteilung und Heterogenität von Deichbaustoffen,

- Verlauf charakteristischer Schichtgrenzen,
- Lokalisierung von Leitungen und Einbauten,
- Vorhandensein und Mächtigkeit stauender Deckschichten,
- Tiefenlage von hydrogeologisch wirksamen Liegendstauern,
- Angaben zur Grundwasserführung,
- Hinweise auf Gewässeraltarme und organische Böden,
- Korrelationen zu charakteristischen Bodenkenwerten.

Geophysikalische Messungen kommen in erster Linie zur Vorerkundung (vorlaufend zur geotechnischen Untersuchung gemäß Kap. 3.8.2) im Sinne einer Optimierung des geotechnischen Aufschlussprogramms zum Einsatz. Außerdem werden die Messergebnisse der Geophysik in die komplexe Auswertung und Interpretation einbezogen, um das Deich- bzw. Baugrundmodell flächenhaft bzw. räumlich darzustellen.

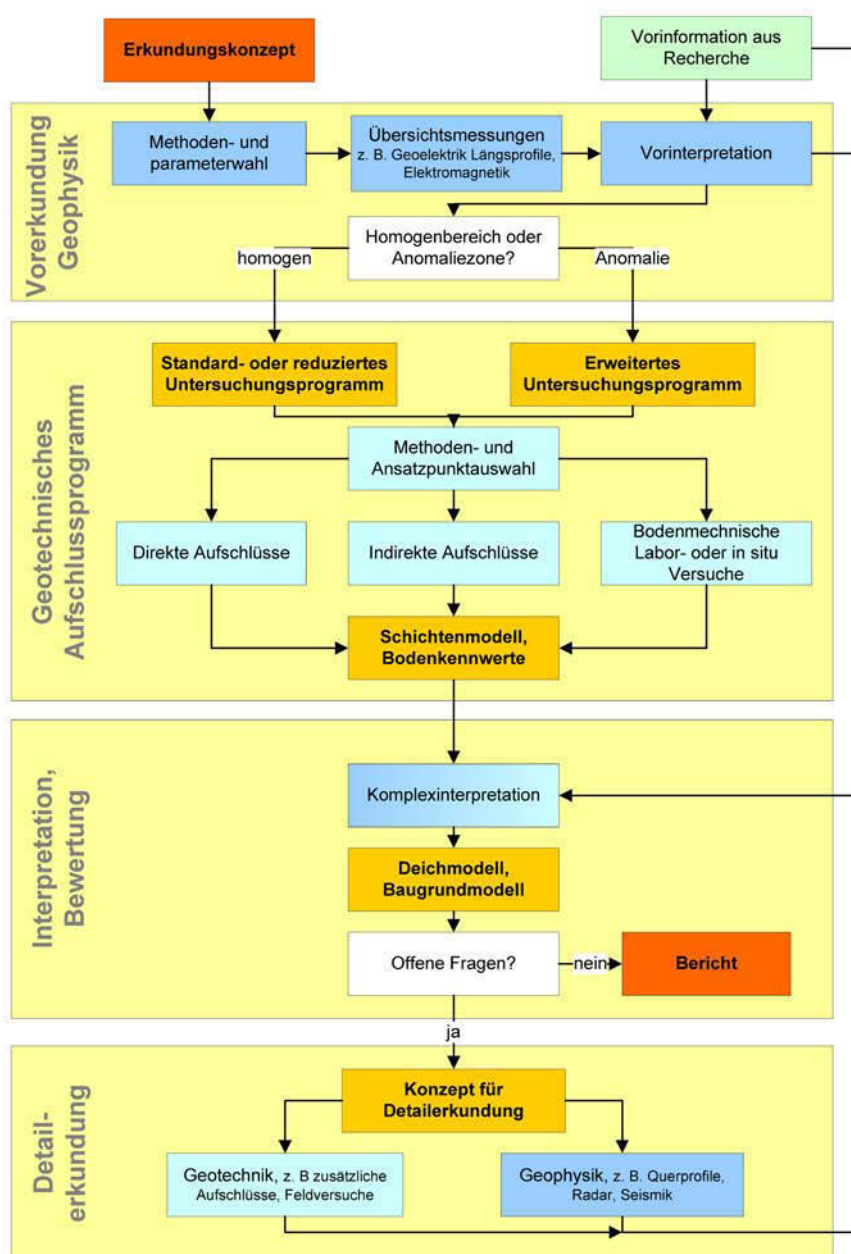


Abbildung 3.1.2
Stellung der Geophysik innerhalb der Deicherkundung und -bewertung

Eine weitere Einsatzmöglichkeit geophysikalischer Verfahren und Methoden bei der Strukturerkundung von Deichanlagen besteht in der Detailerkundung, wie z. B.

- der Ortung von Spundwänden und Leitungsquerungen (z. B. Geomagnetik, Georadar),
- dem Nachweis der Existenz und Mächtigkeit von wasserseitigen mineralischen Dichtungen (Geoelektrik, Georadar),
- der archäologischen Prospektion von ehemaligen Siedlungsgebieten in den Flussauen (Geomagnetik, Geoelektrik, Georadar),
- der Prüfung von Auswirkungen angrenzender Verkehrsanlagen auf die Erdbauwerke (Erschütterungsmessungen).

Das in Abb. 3.1.2 gezeigte Schema verdeutlicht die Einbindung der Geophysik in das Gesamtkonzept einer Deicherkundung und -bewertung.

3.2 Spezifische Randbedingungen bei der geophysikalischen Erkundung

Spezifische Randbedingungen ergeben sich aus der überwiegenden Lage der Untersuchungsstandorte in Flussauen bzw. an deren Rändern mit ihren flurnahen und oft wechselnden Grundwasserständen. Für diese Standorte sind folgende Besonderheiten charakteristisch:

lithologische Randbedingungen:

- horizontal und vertikal veränderliche Lagerungsverhältnisse im oberflächennahen Untergrund,
- räumlich und zeitlich wechselnde Wassergehalte in den Böden und Deichkörpern,
- Schichtenneigungen von $> 10^\circ$ innerhalb der Erdbauwerke, die den Anwendungsbereich von ein- und zweidimensionalen Inversionsverfahren einschränken,
- Ausbildung von Gradientenverteilungen petrophysikalischer Parameter innerhalb homogener Bodenschichten, die insbesondere durch stetig zu- oder abnehmende Wassergehalte bedingt sind,
- unterschiedliche Verdichtungs- und Konsolidierungsgrade sowie Lagerungsdichten in Deichkörper und Untergrund,
- unterschiedliche Konsistenzen, Plastizitäten und Tonmineralogie feinkörniger Böden,
- Schichtenanisotropie bei geschütteten und gewachsenen Böden,
- Auftreten organischer und organogener Böden mit unterschiedlichem Zersetzungsgrad oder Böden mit organischen Nebenbestandteilen,
- Böden unterschiedlicher Genese bzw. Festgesteine mit unterschiedlichem Verwitterungsgrad,

anthropogene Randbedingungen:

- unterschiedliche Deichbauweisen mit verdeckten Altdeichkonstruktionen, provisorisch ausgebesserten Schadstellen, partiellen Instandsetzungsabschnitten, Mangelkernen,

- unterschiedliche Deichbaustoffe (standortfremd oder standorteigen, homogen oder heterogen),
- Auffüllbereiche mit mineralischen und organischen Fremdbestandteilen,
- erhöhte Schadstoffbelastung in den Aueböden,
- land- und wasserseitige Entwässerungs- oder Seitengräben,
- Befestigungen und Bebauungen,
- Leitungsquerungen und -parallelverläufe,
- Spundwände,
- Überfahrten oder Rampen,
- Hindernisse für die Ausführung der Messungen (z. B. Zäune, Versiegelung, elektrische Leitungen),

biogene Randbedingungen:

- Auflockerungen im Oberboden,
- Durchwurzelung,
- Wühltieraktivitäten,
- Insektenbefall,

topografische Randbedingungen:

- Einfluss der Deichgeometrie auf die geophysikalischen Messungen,
- Schardeichlagen,
- Deichbögen bzw. Deichknickpunkte.

Wirken Störeinflüsse (z. B. elektromagnetische Einstrahlungen) auf die geophysikalischen Messungen ein, sind unter Umständen besondere Untersuchungsmethoden anzuwenden. Welche Randbedingungen im speziellen Fall zu berücksichtigen sind, ist durch den jeweiligen Gutachter im Vorfeld der Messungen durch intensive Recherchen und eine Ortsbegehung mit Ist-Zustandserfassung zu ermitteln. Es wird daher generell das Aufstellen einer dem Vorhaben angepassten Untersuchungskonzeption empfohlen.

3.3 Anforderungen an den Untersuchungsraum

Für die Erkundung von Flussdeichen werden von den maßgebenden Regelwerken (DWA-M 507, DIN 19712, DIN 4020) konkrete Anforderungen an den Untersuchungsraum (Erkundungsbreite, -tiefe und -dichte) gestellt.

Daraus ergibt sich, dass der Aufbau von Deich und Untergrund sowie von Vor- und Hinterland räumlich möglichst vollständig zu erfassen ist, d. h.

- der Deichkörper auf seiner gesamten Länge und Höhe (auch bis unmittelbar unter die Deichkrone),
- der Untergrund generell bis mindestens 6 m Tiefe unter Aufstandsfläche bzw. bis zur Grenztiefe z_a nach Abs. 7.4.4 Bild 2a der DIN 4020 ansonsten bis 4 m bzw. bis in eine Tiefe, die der maßgebenden Deichhöhe gemäß DWA-M 507 entspricht,

- das Vor- und Hinterland in der Regel auf einer Breite von jeweils bis zum 25-fachen der Deichhöhe (gemessen von der Deichachse) gemäß [14].

Bei besonderen hydrogeologischen Verhältnissen kann es erforderlich sein, die Erkundungstiefe bis zum liegenden Grundwasserstauer auszudehnen.

3.4 Anforderungen an das Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen der geophysikalischen Messungen muss an die Größe der nachzuweisenden Strukturen angepasst werden. Für die typischen Verhältnisse in den Flussauen bedeutet dies im Allgemeinen ein horizontales Auflösungsvermögen von

- min. 3 – 5 m im Deichkörper und
- min. 5 – 10 m im Untergrund sowie im Vor- und Hinterland.

Das vertikale Auflösungsvermögen sollte in der Größenordnung von 0,5 m liegen.

Für spezielle Fragestellungen ist ggf. ein höheres Auflösungsvermögen zu gewährleisten (z. B. Spundwand-, Dichtungsnachweis usw.).

Eine weitere Besonderheit der geophysikalischen Messungen stellen oberflächennahe Aussagehorizonte dar. So muss das Auflösungsvermögen z. B. auch die Erkundung des Aufbaus von Kleindeichen und die Erfassung geringmächtiger Deckstauer zulassen.

3.5 Geophysikalische Messparameter und deren geotechnische Relevanz

Mit den geophysikalischen Verfahren werden Messparameter von Potenzial- oder Wellenfeldern aufgezeichnet, deren Ausbreitung von den physikalischen Eigenschaften und Strukturen der Materialien im Untergrund beeinflusst werden. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass ein einzelner Messwert die integrale Wirkung eines oftmals ausgedehnten Volumenelementes darstellt.

Die elektrischen und elektromagnetischen Methoden liefern Informationen über die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund. Diese ist von der mineralogischen Zusammensetzung, der Lagerungsdichte (Porosität, Verdichtung), dem Wassergehalt und der Salinität des Wassers abhängig. Die seismischen Geschwindigkeiten werden von der Lithologie, der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt beeinflusst. Die Dielektrizitätszahl, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Radarwellen bestimmt, hängt wesentlich von der Lithologie und vom Wassergehalt des Materials ab.

Die meisten geophysikalischen Messgrößen hängen von mehreren geotechnischen Parametern ab. Eine direkte Umrechnung von geophysikalischen Messgrößen in geotechnische Parameter erfordert die Ableitung von Korrelationsbeziehungen in einem Labor- und Feldmessprogramm. Es ist zu beachten, dass die gewonnenen Ergebnisse in der Regel nur für bestimmte Materialien und regional begrenzt gültig sind.

Die ingenieurgeophysikalischen (radiometrischen) Sondierungen liefern über eine Kalibrierung die natürliche Rohdichte und den Wassergehalt des Materials.

Die als Profilschnitt dargestellte Verteilung von petrophysikalischen Parametern bleibt in Bezug auf eine Aussage zu den geotechnischen Parametern oft mehrdeutig. Um belastbare Korrelationsbeziehungen zwischen den petrophysikalischen und geotechnischen Parametern aufstellen zu können, sind zuverlässige Angaben oder Annahmen zu weiteren Parametern erforderlich. Diese können mit Rammkernbohrungen oder ingenieurgeophysikalischen Sondierungen gewonnen werden. Oftmals kann durch diese Aufschlüsse der Bezug zur Lithologie oder zu bestimmten Strukturelementen hergestellt werden.

In der *Tabelle 3.5.1* sind die für die Deichuntersuchungen relevanten geotechnischen Parameter und die geophysikalisch bestimmbareren petrophysikalischen Parameter zusammengestellt.

Je nach Besonderheiten im Untersuchungsgebiet können auch weitere, nicht genormte bodenmechanische Untersuchungen erforderlich sein, so z. B. die Bestimmung kapillarer Steighöhen in grob- und gemischtkörnigen Böden, mineralogisch-petrografische Sonderuntersuchungen oder Erosions- und Dispersionsversuche.

3.6 Methodenmatrix

Die in *Tabelle 3.6.1* zusammengestellte Methodenmatrix umfasst die für Deichuntersuchungen relevanten geophysikalischen Verfahren, die Gegenstand der Evaluierung waren. Für die einzelnen Verfahren werden das physikalische Messprinzip, die wirksamen petrophysikalischen Parameter, der Ort der Messdurchführung (Oberfläche oder Bohrloch) und Angaben zum Aufwand für die Geräteanschaffung, die Messdurchführung sowie die Auswertung angegeben. Dabei werden sowohl bewährte Standardverfahren (z. B. Widerstandsgeoelektrik und ingenieurgeophysikalische Sondierungen) als auch innovative Entwicklungen (z. B. spektrale induzierte Polarisation und Oberflächenwellenseismik) berücksichtigt. Eine Beschreibung für jedes Verfahren enthält das Kapitel 4.

Tabelle 3.5.1

Zusammenhang zwischen geotechnischen und petrophysikalischen Parametern.

Geotechnischer Parameter	Bemerkungen	Petrophysikalische Parameter	Zusammenhänge, Einflussgrößen
Bodenart nach Korngrößenverteilung ($m_T, m_U, m_S, m_G, m_X, C_U, C_C$)	Massenanteile der mineralischen Haupt- und Nebenbestandteile, Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahlen nach DIN 18137, Aussagen zur Plastizität	a) natürliche Gammastrahlung, b) elektrische Leitfähigkeit*	a) proportional zum Tongehalt b) qualitative Ansprache möglich
Wassergehalt (w), Sättigungszahl (S _v), Porenwasserdruck (u)	Angaben zum Zeitpunkt der Messungen/ Bohrungen: GW-Stand, Spannungsverhältnisse im Grundwasserleiter	a) Wassergehalt, b) elektrische Leitfähigkeit	a) mit n-n-Messung im Bohrloch bestimmbar, b) qualitative Ansprache (trocken/nass) in sandigen Bereichen möglich
Porositätskennzahlen (n, n _p , e)	Porosität, nutzbarer Porenanteil, Porenzahl	Porosität	beeinflusst el. Leitfähigkeit und seismische Geschwindigkeit
Zustandsformen, Konsistenzzahlen (I _c)	Konsistenzangaben zum Zeitpunkt der Bohrungen: fest, halbfest, steif, weich, sehr weich oder breiig, I _c aus Laborversuch	a) Schermodul* b) Wassergehalt	a) mit Scherwellengeschwindigkeit korrelierbar b) mit n-n-Messung im Bohrloch bestimmbar
Plastizitätszahl (I _p), Aktivitätszahl (I _a)	nicht, gering (leicht), mittel oder ausgeprägt (sehr) plastisch bzw. inaktive, normal aktive oder aktive Tone		
Wichten (Y, Y _d , Y', Y')	Feucht- und Trockenwichte, Wichte bei Wassersättigung, Wichte unter Auftrieb		
Dichten (ρ, ρ _d , ρ _r , ρ', ρ _s)	Roh- und Trockendichte, Dichte bei Wassersättigung, Dichte unter Auftrieb, Korndichte	natürliche Rohdichte	mit γ-γ-Messungen im Bohrloch bestimmbar
Lagerungsdichte (D, I _D), Verdichtungsgrad (D _{pr})	Lagerungsdichte, Verdichtungsgrad, getrennt für oberhalb und unterhalb des Grundwassers	Porosität*	mit P-Wellen und Scherwellengeschwindigkeit korrelierbar
Effektive Scherparameter (φ, c)	innere Reibung, Kohäsion (Scherfestigkeit nach DIN 18137)		
Statische Elastizitätsmoduln und deren Grenzen (E, E _s , E _v)	Elastizitätsmodul - Steifemodul - Verformungsmodul, Konsolidation des Bodens, Elastizitätsgrenzen	dynamischer Elastizitätsmodul*	mit P-Wellen und Scherwellengeschwindigkeit korrelierbar
Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte (k _i)	berechnet aus der Kornverteilung, ermittelt durch Pumpversuche bzw. im Labor nach DIN 18130	Real- und Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit*	unter Vollsättigung aus SIP-Messungen abschätzbar
Organische Bestandteile (V _{gl})	Bestimmung über Glühverlust: schwach (2-6 %) , mittel- (6-20 %) oder stark organisch (> 20 %)	Dichte, elektrische Leitfähigkeit*	Torf und Mudde durch geringe Dichte und hohe elektrische Leitfähigkeit erkennbar
Kalkgehalte (V _{Ca})	halbquantitative Angaben nach HCl-Test: oder im Labor nach DIN 18129		

* Muss durch standort – oder materialspezifische Korrelationen nachgewiesen werden

Tabelle 3.6.1
Methodenmatrix

Verfahren	Methode	Messprinzip	gemessener physikalischer Parameter	Messart	Geräteaufwand	Messaufwand	Auswerteaufwand
Geoelektrik/ Elektromagnetik	Widerstandsgeoelektrik	elektrisch	el. Leitfähigkeit σ	Oberfläche	gering	mittel	mittel
	Spektrale Induzierte Polarisation	elektrisch	el. Leitfähigkeit σ , Polarisierbarkeit P	Oberfläche	mittel	hoch	mittel
	Elektromagnetik (Zweispulenmethode)	elektromagnetisch	el. Leitfähigkeit σ	Oberfläche	gering	gering	gering
	Radiomagnetotellurik	elektromagnetisch	el. Leitfähigkeit σ	Oberfläche	mittel	mittel	hoch
Radar	Georadar	elektromagnetisch	Dielektrizität ϵ , el. Leitfähigkeit σ	Oberfläche	mittel	gering	gering
	Georadar mit Antennenarray	elektromagnetisch	Dielektrizität ϵ , el. Leitfähigkeit σ	Oberfläche	hoch	gering	mittel
Seismik	Refraktionstomographie	akustisch	P-Wellen-Geschw. v_p	Oberfläche	mittel	mittel	hoch
	Oberflächenwellenseismik	akustisch	Oberflächenwellen-Geschwindigkeit	Oberfläche	mittel	mittel	hoch
Ingenieur-geophysikalische Sondierung	Radiometrie und Geoelektrik	radiometrisch, elektrisch	Dichte d , Wassergehalt w , Porosität ϕ , el. Leitfähigkeit σ ,	Bohrung	mittel	mittel	gering

3.7 Kalibrierung und Laborabgleich

Die geophysikalischen Verfahren liefern sowohl strukturelle Informationen, so z. B. zur Mächtigkeit von Schichtpaketen oder die Position von Einlagerungen, als auch Informationen zur stofflichen Charakterisierung des Materials. Wie in Kapitel 3.5 ausgeführt, sind die Zusammenhänge zwischen geophysikalischer Messgröße oder dem daraus abgeleiteten petrophysikalischen Parameter (z. B. elektrische Leitfähigkeit oder seismische P-Wellengeschwindigkeit) und den geotechnischen Parametern meist nicht durch einfache Korrelationen zu beschreiben, da Abhängigkeiten von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestehen.

Es ist daher erforderlich, neben geotechnischen Laboruntersuchungen, auch petrophysikalische Untersuchungen an dem aus Bohrungen gewonnenen Probenmaterial durchzuführen. Mit diesen Laboruntersuchungen kann die Wirkung von Einflussfaktoren wie Wassergehalt, Lagerungsdichte oder mineralogische Zusammensetzung auf petrophysikalische Parameter systematisch untersucht werden. Die dabei gefundenen Beziehungen werden zur Interpretation der geophysikalischen Messungen herangezogen.

Um einen Abgleich zwischen Feld- und Labormessungen (Kalibrierung) durchführen zu können, sind weitgehend ungestörte Proben zu gewinnen.

Wenn die Datenbasis groß genug ist, können über sogenannte Cross-Plots, die mehrere Abhängigkeiten berücksichtigen, zuverlässigere Angaben zur Lithologie abgeleitet werden.

3.8 Kombination geophysikalischer mit geotechnischer Erkundung

3.8.1 Geotechnische Aufschlussverfahren und Aufschlussdichten

Die geotechnische Erkundung von Flussdeichen und des Untergrundes erfolgt in der Regel mit:

- kerngewinnenden Bohrmethoden (z. B. Kleinrammbohrungen, Ramm- oder Rotationskernbohrungen),
- Schürfen,

- Drucksondierungen mit oder ohne Porenwasserdruckmessung (CPTU, CPT, SCPT, RCPT),
- Rammsondierungen (DPL, DPM, DPH, DPG),
- bodenmechanischen Laboruntersuchungen:
Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Zustandsgrenzen, Roh-, Trocken-, Lagerungs- und Korndichten, Scherparametern, statische Elastizitätsmodulen usw.

Hinsichtlich der Aufschlussdichte in Längsrichtung wird durch die Regelwerke DIN 19712, DWA-M 507 und DIN 4020 für die Hauptbohrungen bei Deichen der geotechnischen Kategorie 3 ein Abstand von ≤ 100 m vorgegeben. Generell gilt für Linienbauwerke ein Erkundungsabstand zwischen 50 und 200 m (DIN 4020).

Für die geotechnische Erkundung bestehender Deiche hat sich ein Erkundungsraaster bewährt, bei dem auf Querprofilen angelegte Bohraufschlüsse im erforderlichen Abstand (50 und 200 m) längs der Deichachse angeordnet werden.

Ein solches geotechnisches Querprofil besteht gewöhnlich aus fünf Einzelaufschlüssen, die im Deichvor- und Hinterland, an den beiden Deichfüßen und auf der Deichkrone abgeteufelt werden.

Für spezielle Aufgabenstellungen oder bei bekannten Schwachstellen kann eine nochmalige Verdichtung dieses Rasters notwendig werden.

3.8.2 Erkundungsstrategien

Für die Herangehensweise an die komplexe geophysikalisch-geotechnische Erkundung gibt es Erkundungsstrategien, die aufgrund ihrer nachfolgend aufgeführten Vor- und Nachteile unterschiedliche Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse haben können.

Einsatzzeitpunkt geophysikalischer Verfahren bei der geotechnischen Erkundung

1. vorlaufend

- Vorteil: Durch die Ableitung von Homogenbereichen (siehe [17]) besteht die Möglichkeit der Optimierung des Aufschlussplanes, insbesondere von Lage und Tiefe der Bohrungen und Sondierungen sowie die nachträgliche Interpolation von Schichtdaten oder Wasserständen.
- Nachteil: Unter Umständen führen wenig sensitive Messanordnungen und geringe Signalstärken dazu, dass relevante Strukturen (siehe Kap. 3.1) im Rahmen der Dateninversion nicht erkannt werden. Die Messbedingungen können sich zwischen geophysikalischer und geotechnischer Erkundung signifikant verändern (insbesondere Grundwasserstände und Wassergehalte).

2. nachlaufend

- Vorteil: Auf Grundlage der Bohrerergebnisse erfolgt eine Optimierung der Methoden und Messparameter, um eine maximale Aussage aus den Messungen ableiten zu können, z. B. zu Aufstellungsweiten aus bestimmten Tiefeninformationen oder zur Art der Aufstellung für maximale Sensitivitätsbereiche oder Signalstärken.

- Nachteil: Ggf. liegen Anomalien in nicht durch Bohrungen verifizierten Bereichen. Die Anwendung von Extrapolationsverfahren sind in der Regel kritisch zu bewerten. Die Messbedingungen können sich zwischen geotechnischer und geophysikalischer Erkundung signifikant verändern (Grundwasserstände und Wassergehalte).

3. parallel

- Vorteil: Durch die nahezu zeitgleiche Ausführung von Messungen und Aufschlüssen bleiben Fehlereinflüsse durch veränderliche Durchfeuchtungsgrade des Bodens oder wechselnde Grundwasserstände relativ gering.
- Nachteil: Es besteht ein erhöhter technischer und organisatorischer Aufwand hinsichtlich der Umsetzung des Erkundungsprogramms (Mehrfachmobilisierungen für Bohr- oder Messtrupps, Zwischenauswertung im Gelände erforderlich).

Welche Vorgehensweise gewählt wird, hängt von der Größe und Charakteristik des Untersuchungsgebietes ab. Sind aus der Vorrecherche bereits ausreichend Informationen, z. B. aus Altbohrungen, verfügbar, können Methodik und Messparameter anhand dieser Daten ausgewählt und optimiert werden. Die Vorgehensweise nach 1 und 2 ist bei Untersuchungszeiträumen von zwei bis drei Wochen gut anwendbar, wobei die vorlaufende Ausführung als primär angesehen werden kann. Handelt es sich dagegen um sehr lange Deichanlagen, die Messungen und Bohrungen über mehr als drei Wochen erfordern, ist eine parallele Ausführung geophysikalischer Messungen und geotechnischer Arbeiten anzuraten.

Anpassung geophysikalischer Verfahren während der geotechnischen Erkundung

Bei der Anwendung mehrerer Messverfahren oder Messmethoden wird oftmals zwischen

- Übersichtsmessungen (z. B. in einem flächenhaften Messraaster oder tiefenbezogen ein- oder mehrfach überdeckend),
- Verdichtungsmessungen (z. B. mit höherer Rasterdichte, ein- oder mehrfach überdeckend) und
- Sondermessungen (z. B. spezielle Messanordnungen)

unterschieden (siehe Abb. 3.1.1).

Während Übersichtsmessungen in der Regel vorlaufend über das gesamte Untersuchungsgebiet erfolgen, werden Verdichtungsmessungen mit geringeren Messpunktabständen meist nachlaufend und nur in ausgewählten Anomaliebereichen realisiert. Gleiches gilt für Sondermessungen, bei denen allerdings auch andere Verfahren und Methoden zum Einsatz kommen können.

Das Ziel der verdichtenden Messungen besteht in einer Verbesserung des räumlichen Auflösungsvermögens in dem ausgewählten Erkundungsfenster durch speziell angepasste und fokussierende Messmethoden (Parameteroptimierung).

Mit Sondermessungen werden zusätzliche Informationen gewonnen, was z. B. in der unterschiedlichen petrophysikalischen Relevanz der Messungen begründet liegt. Durch Kopplung der Ergebnisse zweier oder mehrerer Messverfahren oder -methoden kann eine Verbesserung der Aussage-sicherheit erreicht werden.

Räumliche Lage geophysikalischer Messungen bei der geotechnischen Erkundung

Prinzipiell gilt, dass die räumliche Lage von geophysikalischen Messungen und geotechnischen Aufschlüssen dahingehend abzustimmen sind, dass eine optimale Korrelation zwischen Messdaten und Bohrergebnissen möglich ist.

Dies kann in der Regel nur dadurch gewährleistet werden, dass Mess- und Aufschlussprofile auf den gleichen Schnittspuren liegen. Aufschluss- und Messpunkte müssen der Lage nach vermessen werden (Rechts- und Hochwerte).

Je nach dem zeitlichen Einsatz der Geophysik werden die Schnittspuren (Längs- und Querprofile) durch den Mess- oder Aufschlussplan vorgegeben.

Die geophysikalische Erkundung sollte stets auf mehreren deichparallelen Längsschnitten im Vor- und Hinterland, an den Deichfüßen und auf der Deichkrone (Deichachse) durchgeführt werden. Bei speziellen Fragestellungen und bei Kenntnis oder Verdacht eines gegliederten Deichaufbaus wird auch die Messung von Querprofilen notwendig.

4 Methodenbeschreibung

Die folgenden Abschnitte sollen das Verständnis für die geophysikalischen Verfahren und Methoden erleichtern, die verwendeten Fachbegriffe erläutern und Hilfe bei der Erstellung von Ausschreibungsunterlagen bieten. Sie ersetzen kein Fachbuch. Allgemeine Darstellungen zu den meisten Methoden finden sich z. B. in [7] oder [9]. Empfehlungen zu Einsatzbereichen und für die Messparameterwahl werden in Kapitel 5 gegeben.

4.1 Geoelektrik

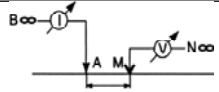
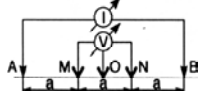
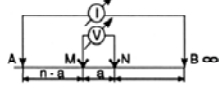
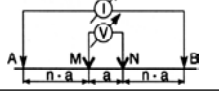

4.1.1 Prinzip und Messgröße

Geoelektrische Messmethoden ermitteln die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands im Untergrund. Dies

geschieht meist durch Einspeisung eines Gleichstromes oder eines niederfrequenten Wechselstromes durch zwei Elektroden in den Boden und Messung der Spannung an separaten Sonden. Mit einem sogenannten Geometrie-Faktor, der die Anordnung der Elektroden berücksichtigt, wird aus Strom und Spannung der scheinbare spezifische Widerstand ρ_a berechnet. Die Eindringtiefe wird dabei maßgeblich vom Elektrodenabstand beeinflusst (s. *Tabelle 4.1.1*). Für die Rekonstruktion der Werte sind zahlreiche Einzelmessungen und spezielle Software notwendig.

Der spezifische elektrische Widerstand des Bodens wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst, wie der Bodenart, dem Feinkornanteil (Art, Menge), der wirksamen Porosität und dem Wassergehalt sowie der Leitfähigkeit des Porenwassers. Es ist daher in der Regel nicht möglich, vom spezifischen

Tabelle 4.1.1
Geoelektrische Messkonfigurationen mit Bewertungen

Anordnung	Skizze ¹	Auflösungsvermögen		Datenqualität	Messaufwand	Eindringtiefe ¹
		Horizontal	Vertikal			
Pol-Pol		-	+	+	O	0,35 AM
Wenner (-α)		O	O	+	+	0,11-0,17 AB
Pol-Dipol		+	O	O	O	0,13-0,19 AN
Schlumberger		O	O	O	O	0,125-0,19 AB
Dipol-Dipol		+	-	-	- ²	0,195-0,25 AN

¹ nach [7] + gut (Messaufwand gering),
O akzeptabel,
- gering (Messaufwand hoch)

² bei mehrkanaligen Messapparaturen: +

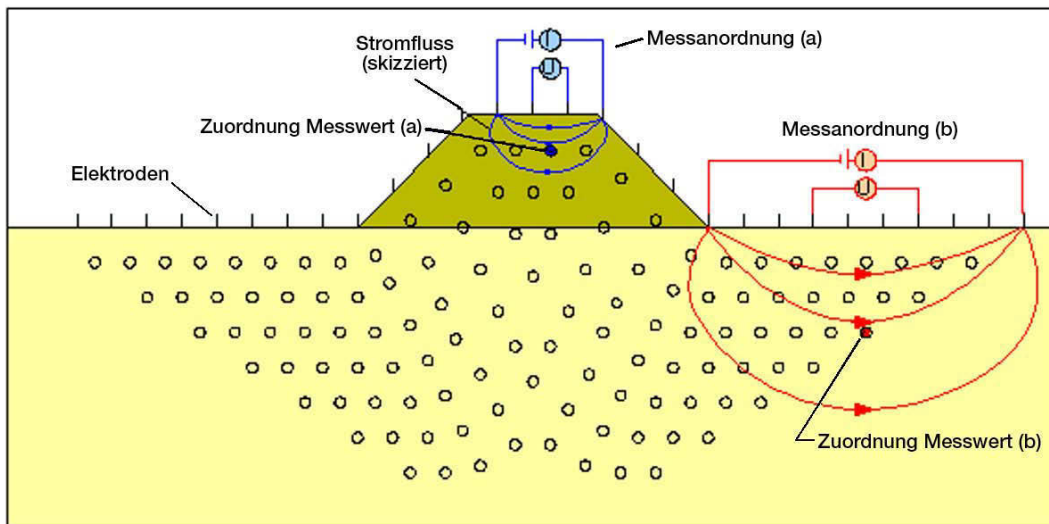


Abb. 4.1.1

Prinzip der Messung einer geoelektrischen 2D-Sektion

elektrischen Widerstand eindeutig auf eine bestimmte Materialeigenschaft zu schließen.

4.1.2 Messung und Messparameter

Die Anordnung der vier Elektroden für die Messung basiert meist auf standardisierten Basisanordnungen („Messkonfigurationen“). Eine Auswahl mit Vor- und Nachteilen ist in *Tabelle 4.1.1* gegeben.

Diese Basiskonfigurationen werden hinsichtlich Elektrodenabstand und Position verändert, um ein Bild des Untergrundes zu erhalten. Für geoelektrische Messungen sind kommerzielle Apparaturen erhältlich. Stand der Technik sind Geräte, die mit Multielektrodenkabeln mit 24 bis 256 Anschlüssen verbunden werden und diese für die notwendigen Einzelmessungen durchschalten. Inzwischen sind auch Mehrkanalapparaturen erhältlich, mit denen sich mehrere Einzelmessungen simultan durchführen lassen.

Für Messungen auf Deichen hat sich die sogenannte 2D-Geoelektrik bewährt. Hierbei werden die Anordnungen entlang einer Profillinie bewegt und in ihrer Eindringtiefe verändert, um eine sogenannte Pseudosektion zu erstellen, bei der die gemessenen scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände bezüglich der Messposition und einer fiktiven Eindringtiefe aufgezeichnet werden. Die Anzahl unterschiedlicher Eindringtiefen bestimmt dabei den erfassten Tiefenbereich und die vertikale Auflösung (*Abb. 4.1.1*).

Für spezielle Einsatzzwecke lassen sich auch 1D-Messungen (geoelektrische Sondierungen) oder 3D-Messungen mit flächenhaften Elektrodenanordnungen durchführen.

4.1.3 Auswertung und Interpretation

Aus den oft mehreren hundert Einzelmessungen müssen die realen Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund zumindest angenähert rekonstruiert werden. Dies geschieht mit Inversionssoftware. Dabei werden ausgehend von einem Startmodell die für das Modell berechneten Messwerte schrittweise an die gemessenen Daten angepasst. Dabei ist insbesondere bei Querprofilen die Topographie des Messprofils zu berücksichtigen. Als Ergebnis erhält man einen Vertikalschnitt des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Die Geoelektrik liefert nicht direkt die von der Geotechnik geforderten Parameter. Und nur in wenigen Fällen ist eine direkte Umrechnung des spezifischen elektrischen Widerstandes in Wassergehalte oder Porosität möglich. In der Regel erfolgt die Interpretation anhand von Bohrergebnissen und begleitenden Laboruntersuchungen, die lokal mit den Ergebnissen der Geoelektrik verglichen werden. Mit Hilfe dieser Kalibrierung wird der geoelektrische Schnitt in einen geologisch-geotechnischen Schnitt transformiert.

Abb. 4.1.2 zeigt ein geoelektrisches Längsprofil auf der Deichkrone und ein zugehöriges Querprofil. Im Längsprofil lassen sich Anomaliebereiche identifizieren. In *Abb. 4.1.2a* zeigt das Längsprofil beispielsweise zwischen Profilmeter 5 und 95 erhöhte spezifische Widerstände (1), die darauf hinweisen, dass hier grob- oder gemischtkörniges Material zum Deichbau verwendet wurde. Im weiteren Profilverlauf zeigt sich eine Zone mit sandigen Einlagerungen (2). Am Profilende steht über den ganzen erfassten Tiefenbereich feinkörniges Material an (3). Diese Zonierung ist in der geoelektrischen Sektion lateral sehr gut abzugrenzen, die Schichtgrenzen werden aber nicht tiefengenau erfasst. Längsprofile gehören zum Standardprogramm der geophysikalischen Deicherkundung. Zusätzliche Querprofile können die Deichstruktur deutlicher darstellen und ermöglichen zusammen mit den Längsprofilen eine bessere räumliche Erfassung von Anomaliebereichen. In *Abb. 4.1.2b* ist die Lage des im Längsprofil erkennbaren sandigen Teils des Deichaufbaus gut abzugrenzen (1). Die hohen Widerstände an der Wasserseite (2) sind auf eine starke Austrocknung des Lehms zurückzuführen, was erst durch eine Komplexinterpretation unter Einbeziehung der Bohrergebnisse deutlich wird. Die Unterkante des Auelehms (3) wird in der Geoelektrik von der Ausformung her richtig aber zu tief wiedergegeben. Dies muss im Einzelfall durch einen Abgleich mit den Bohrergebnissen korrigiert werden.

4.1.4 Verfahrenserweiterungen

Um die Mehrdeutigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes bei der Interpretation zu verringern, können zusätzliche Messgrößen erfasst werden. Die Methode der **Induzierten Polarisation (IP)** misst die elektrische Aufladefähigkeit des Bodens (Zeitbereichs-IP) oder die Abhängigkeit

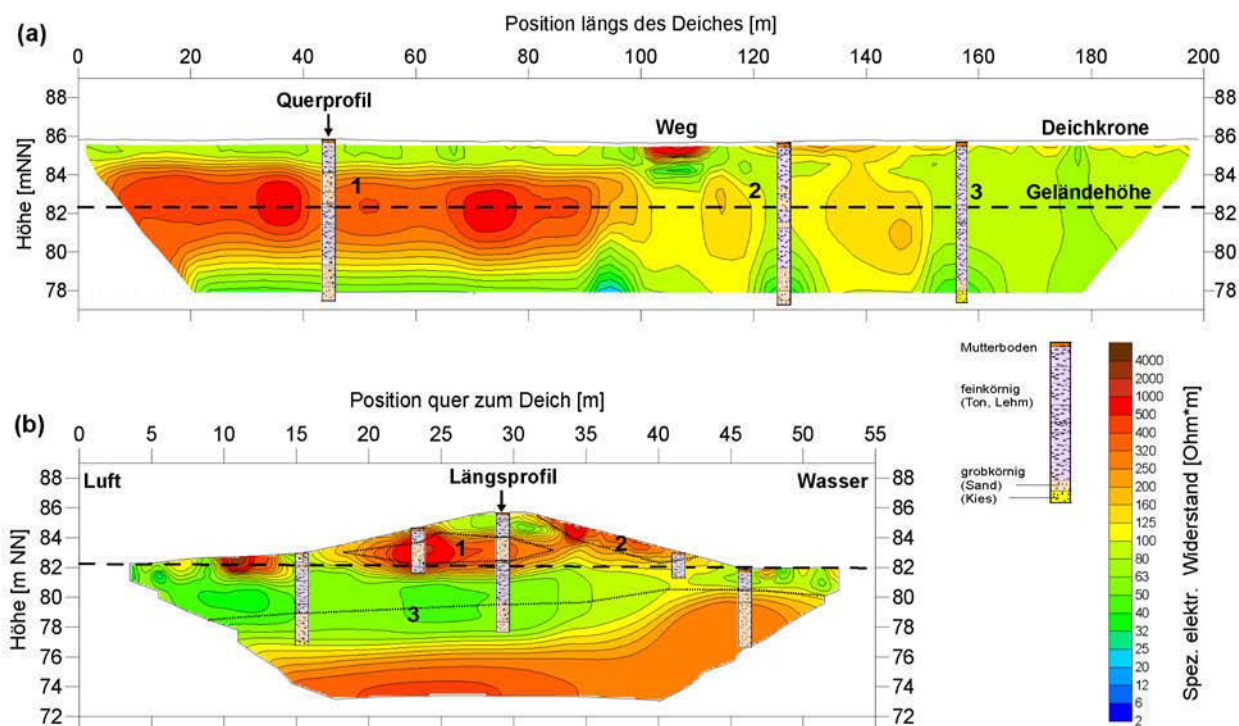


Abbildung 4.1.2 Ergebnisse geoelektrischer Messungen an einem DEISTRUKT-Referenzstandort im Vergleich zu den Bohrprofilen, (a) Vertikalschnitt des spezifischen elektrischen Widerstandes für das Längsprofil, (b) Vertikalschnitt des spezifischen elektrischen Widerstandes für das Querprofil

des Widerstandes von der Messfrequenz (Spektrale IP, SIP). Mit dieser Methode kann in Einzelfällen die lithologische Ansprache verbessert oder die hydraulische Leitfähigkeit abgeschätzt werden [1]. Der Messaufwand ist allerdings deutlich höher als bei der Widerstandsgeoelektrik.

4.2 Elektromagnetik

4.2.1 Prinzip und Messgrößen

Elektromagnetische Felder werden durch die Struktur des spezifischen elektrischen Widerstands (bzw. der elektrischen Leitfähigkeit) im Untergrund beeinflusst. Diese Tatsache wird durch die elektromagnetischen Verfahren der Geophysik genutzt. Als Quellen können natürliche oder technische Felder (z. B. Radiosender, „passive“ Verfahren) oder aber „künstliche“ Felder (z. B. von Wechselstrom durchflossene Spulen, „aktive“ Verfahren) sein. Die meisten der zahlreichen Verfah-

rensvariationen messen die durch Induktion im Untergrund erzeugten sogenannten Sekundärfelder an der Oberfläche. Messgröße ist in der Regel die im Empfänger (der meist eine Spule ist) erzeugte elektrische Spannung. Eindringtiefe und Auflösung werden von den vorherrschenden spezifischen Widerständen, der Messfrequenz und der Sender-/Empfängeranordnung bestimmt. Der apparative und zeitliche Aufwand ist für die einzelnen elektromagnetischen Methoden extrem unterschiedlich und nimmt mit zunehmender Erkundungstiefe meist stark zu. Beispiele für Messverfahren sind in Abb. 4.2.1 dargestellt.

Physikalisch bedingt reagiert die Elektromagnetik besser auf elektrisch gutleitende Einlagerungen (z. B. feinkörnige Bereiche in sandigem Substrat) als auf schlechtleitende. Durch Variation der Frequenz lassen sich auch Sondierungen durchführen und durch Änderung der Aufstellungsposition vertikale oder horizontale Untergrundschnitte erzeugen.



Abbildung 4.2.1 (a) RMT-Messungen (BAM/Universität Köln)



(b) Induktionselektromagnetik (BfG Lorenz) auf einem Flussdeich

Auch das Georadar nutzt elektromagnetische Felder, allerdings bei sehr hohen Frequenzen. Das Verfahren wird in Kapitel 4.3 gesondert behandelt.

4.2.2 Messung und Messparameter

Die Messprozeduren für die verschiedenen verfügbaren Verfahrensvariationen und Geräte unterscheiden sich zum Teil erheblich. Für einen kompletten Überblick und Details sei auf die Literatur (z. B. [7]) verwiesen.

Für den Einsatz bei der Deicherkundung kommen zum Beispiel in Frage (Abb. 4.2.1):

- Induktionselektromagnetik (aktiv, zwei-Spulensysteme in einem Gehäuse oder durch Kabel verbunden)
- Radiomagnetotellurik (RMT, passiv, Nutzung von Radiosendern, Empfänger ist Spule und/oder geerdetes Kabel)

Wichtig ist, dass die meisten Verfahren im Unterschied zur Geoelektrik ohne galvanische Ankopplung (d. h. ohne das Stecken von Elektroden) auskommen und für größere Eindringtiefen oft einen geringeren Platzbedarf haben. Der Messfortschritt ist meist höher als bei der Geoelektrik.

Zu den Messparametern, die anhand der Fragestellung und der Randbedingungen festzulegen sind, gehören:

- Verfahrens- und Gerätetyp
- Je nach Gerät Messfrequenz(en) und/oder Spulenabstand
- Geräteausrichtung (z. B. relativ zum Deich, wegen topographischer Einflüsse)

4.2.3 Auswertung und Interpretation

Bei der Auswertung beschränkt man sich meist auf die flächenhafte Darstellung der Messwerte. Der entsprechende Tiefenbereich wird an Hand einfacher Formeln abgeschätzt. Inhomogenitäten lassen sich gut aufspüren, genaue Dimensionen und Tiefe sind aber nur schwer zu bestimmen. Der

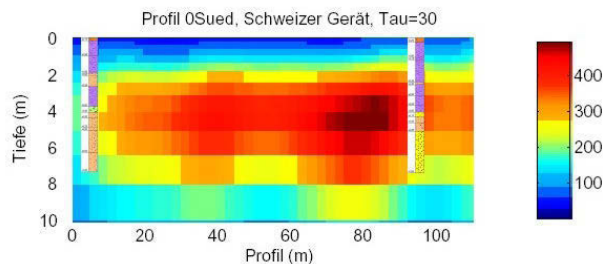
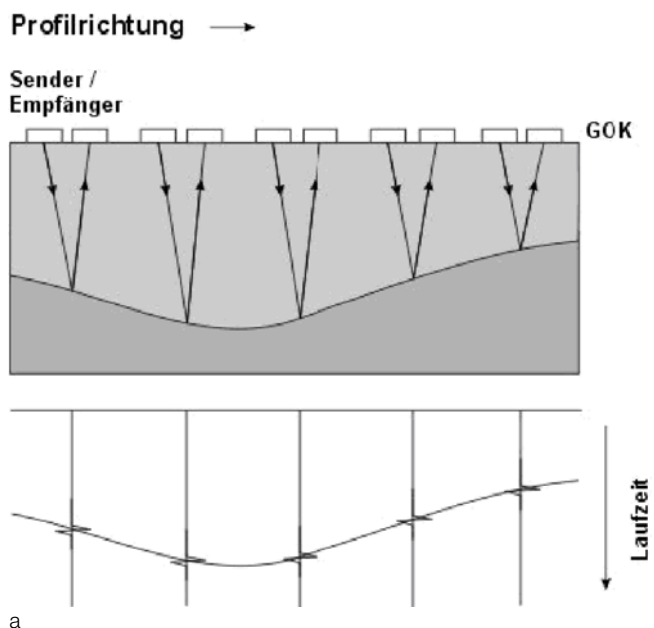


Abbildung 4.2.2 Auswertungsergebnis (Widerstands-Vertikalschnitt durch den Untergrund) eines RMT-Profiles im Vergleich zu Bohrergebnissen, Lokalisierung einer Sand/Kiesablagerung (hohe Widerstände, rot) im Auelehm (niedrige Widerstände, blau-grün)

Aufwand für eine quantitative Auswertung ist hoch, doch im Einzelfall sinnvoll. Für viele Verfahrensvarianten steht keine kommerzielle Auswertesoftware zur Verfügung.

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die Topographie oft erheblichen, aber nicht direkt korrigierbaren Einfluss auf das Messergebnis hat. Zusätzlich gilt analog zur Geoelektrik, dass für Widerstandsinhomogenitäten oft mehrere Ursachen in Frage kommen. Auch hier ist ein Abgleich mit Bohrergebnissen unerlässlich.

Abb. 4.2.2 zeigt eine elektromagnetische Sektion (RMT-Verfahren) parallel zu einem Deich im Vorland über einen vermuteten Altarm, der sich normalerweise durch eine besonders niederohmige Zone abzeichnen sollte. Die Zone mit hohem Widerstand weist dagegen aber auf Sande und Kiese im Untergrund hin (bestätigt durch Bohrergebnisse, aber Tiefenkorrektur notwendig). Da dies auch im Deichhinterland festgestellt wurde, ist im Hochwasserfall eine starke Unterströmung des Deiches zu befürchten.

4.3 Georadar

4.3.1 Prinzip und Messgrößen

Das Arbeitsprinzip des Georadars beruht auf einem Puls-Echo-Verfahren. Es arbeitet mit der Aussendung extrem kur-

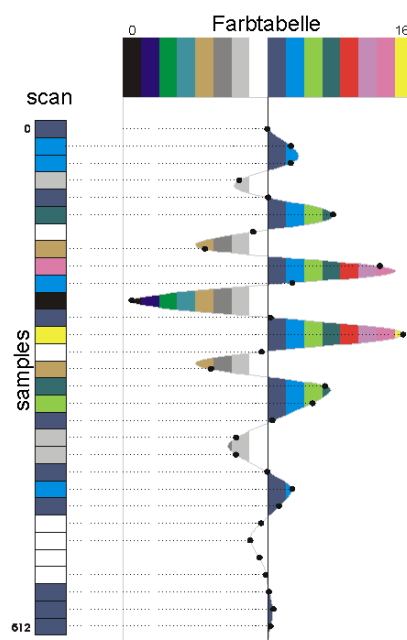


Abbildung 4.3.1 (a) Prinzip der Radarmessung, (b) Beispiel für Sig-nardarstellung

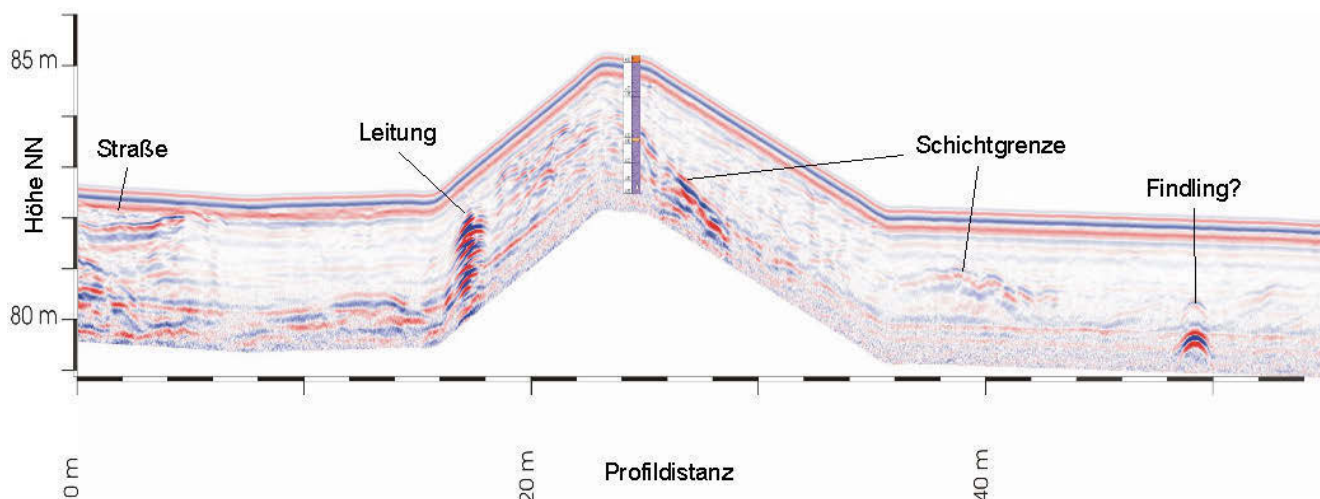


Abbildung 4.3.2
Radargramm von einem der DEISTRUKT-Testdeiche. Aus der Laufzeit der Radarimpulse wurden die Tiefen berechnet (GBM Wiebe).

zer, sehr schnell aufeinander folgender elektromagnetischer Impulse, die mittels einer geeigneten Antenne ins Erdreich abgegeben werden.

Diese Impulse breiten sich im Boden aus und werden von dort vorhandenen Objekten, wie z. B. Versorgungsleitungen, Steinen und Fundamenten sowie Schichtgrenzen ganz oder teilweise reflektiert (Abb. 4.3.1).

Die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r$ ist neben der elektrischen Leitfähigkeit σ die physikalische Größe, die für die Arbeitsweise des Verfahrens der bestimmende Parameter in Böden und anderen Medien ist. Sie ist ein Produkt aus der elektrischen Feldkonstante ε_0 und der materialabhängigen relativen Dielektrizitätszahl ε_r . Da die Materialzusammensetzung im Erdreich variiert, ist ε_r Schwankungen unterworfen. Die relative Dielektrizitätszahl für Böden liegt im verwendeten Frequenzbereich zwischen den Werten $\varepsilon_r = 1$ für Luft und $\varepsilon_r = 81$ für Wasser. Entscheidend für eine Reflexion ist ein Übergang von einem Medium mit niedrigem ε_r in eines mit einem hohem ε_r oder umgekehrt. Durch diese Gegebenheiten unterliegen die elektromagnetischen Wellen sich ständig ändernden Ausbreitungsbedingungen. Das Verfahren erzeugt ein Abbild der wechselnden dielektrischen Bedingungen im Boden. Die Laufzeit des Signals ist ein Maß für die Lagetiefe von Objekten. Während der Ausbreitung im Medium erfährt das Signal eine materialabhängige Dämpfung, wodurch die Eindringtiefe begrenzt ist.

Ausschlaggebend für das Auffinden von Objekten und Schichten in Böden ist nicht nur die Reflektivität, sondern vor allem die Homogenität des Mediums, das die Objekte umgibt. Besondere Beachtung gilt außerdem der Leitfähigkeit σ im Ausbreitungsmedium. Sie bestimmt die maximale Eindringtiefe von elektromagnetischen Wellen. Je höher die Leitfähigkeit, desto geringer die Eindringtiefe. Die reflektierten Impulse, das heißt die analogen Spannungswerte, werden von der Empfangsantenne aufgenommen, im Gerät digitalisiert und in ihrer zeitlichen Zuordnung abgespeichert. Der einzelne Impuls beschreibt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Spannung. Den nach dem Sample-Vorgang entstandenen Kurvenzug nennt man beim Georadar Scan. Die einzelnen Scans können je nach geforderter vertikaler Auflösung mit 128, 256, 512 oder 1024 Abtastpunkten dargestellt werden. Für eine Farbzuzuordnung wird der Scan in 16

oder mehr Spannungsbereiche aufgeteilt (Abb. 4.3.2b). Die Scans werden durch geeignete Signalverarbeitungssoftware parallel aneinander gereiht und fortlaufend als Radargramm dargestellt.

4.3.2 Messung und Messparameter

Wichtigster Messparameter ist die „Frequenz“ der Antennen¹. Diese bestimmt Auflösung (Hohe Frequenz → detaillierte räumliche Auflösung) und Eindringtiefe (niedrige Frequenz → große Eindringtiefe). Die Frequenz ist auf die Fragestellung abzustimmen und ggf. durch Testmessungen zu prüfen. Zusätzlich müssen andere Parameter wie Scanlänge (Anzahl der Messwerte pro Messspur) und Anzahl der Scans pro Profilmeter festgelegt werden. Auch diese Parameter sind auf die Fragestellung abzustimmen. Für die Messung wird die Radarantenne kontinuierlich über das Profil gezogen. Die Messgeschwindigkeit beträgt ca. 5 bis 15 km/h. Die Daten werden kontinuierlich aufgezeichnet und aus den zahlreichen Einzelmessungen wird ein Radargramm (Abb. 4.3.3) zusammengesetzt.

4.3.3 Auswertung und Interpretation

Die im Gelände gewonnenen Radargramme werden zunächst bearbeitet (Filterung, Anpassung der Farbskala, Ortskorrektur etc.). Danach wird die Zeitachse unter Berücksichtigung der Geschwindigkeiten der Radarsignale im Boden in eine Tiefenachse umgerechnet. Mit zusätzlichen, aufwändigeren Verfahren, z. B. einer Migration, lassen sich Objekte und Schichtgrenzen im Untergrund schärfer und genauer in ihrer Lage abbilden. Die Topographie ist bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Wenn ein dichtes Profilmessnetz vermessen oder das unten beschriebene Antennenarray eingesetzt wurde, kann die Auswertung und Darstellung auch dreidimensional erfolgen.

Das in Abb. 4.3.2 dargestellte Radargramm zeigt einen Schnitt durch einen inhomogenen Flussdeich. Es werden sowohl Indikationen für Einzelobjekte (z. B. Findlinge, anthropogene Einlagerungen) als auch Inhomogenitäten im

¹ Es handelt sich um zwei Antennen (Sender und Empfänger), die meist mit festem Abstand in einem Gehäuse montiert sind.



Abbildung 4.3.3
Radarscanner im Einsatz am Deich

Deich und Untergrundaufbau angezeigt. Da diese auf unterschiedliche Ursachen (Materialwechsel, Feuchteunterschiede) zurückzuführen sein können, sind sie nur im Zusammenhang mit anderen Messergebnissen oder Bohrungen eindeutig zu interpretieren. Das Auflösungsvermögen liegt typischerweise im Dezimeterbereich.

4.3.4 Verfahrenserweiterungen

In neueren Spezialmessgeräten werden die Einzelantennen durch Antennenarrays ersetzt. Diese sind zwar in der Anschaffung deutlich teurer und stellen erhöhte Anforderungen an die Auswertung, bieten aber einige Vorteile gegenüber der konventionellen Messung. Zum einen wird durch Abdeckung eines breiten Streifens statt nur einer Linie die Messzeit verkürzt. Zum anderen kann durch unterschiedliche Ausrichtung der Antennen im Array auch die Empfindlichkeit gegenüber Strukturen, die in unterschiedliche Richtungen verlaufen, erhöht werden. Oft kann direkt zwischen Einzelobjekten und Leitungen unterschieden werden, sowie Schichtneigungen senkrecht zum Profil festgestellt werden. *Abb. 4.3.2* zeigt einen Radarscanner auf einem Querprofil am Deich im Einsatz.

4.4 Seismik

Seismische Verfahren eignen sich für die Strukturerkundung und reagieren besonders sensitiv auf Dichteveränderungen und Änderungen elastischer Parameter von Bodenmaterialien. Diese äußern sich in der Änderung der Geschwindigkeit

seismischer Wellen. Während die bekannten seismischen Verfahren auf der Auswertung von reflexions- und refraktionsseismischen Signalen („Echos“ von Grenzflächen im Untergrund) beruhen, wird bei der Oberflächenwellenseismik das sogenannte Dispersionsverhalten seismischer Oberflächenwellen untersucht. Diese Wellen verfügen über große Signalamplituden und werden bei den anderen seismischen Verfahren als Störwellen bezeichnet.

4.4.1 Refraktionstomographie

Die Refraktionsseismik untersucht die Einsatzzeiten der zuerst an den verschiedenen Geophonen eintreffenden seismischen Wellen (direkte Welle, Refraktionen). Die sogenannte direkte Welle wird bei kurzen Entfernungen zwischen Quellpunkt und Aufnahmepunkt registriert und gibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der oberen Bodenschicht wieder. Liegen die Aufnahmepunkte in weiterer Entfernung vom Quellpunkt, wird die direkte Welle von den Signalen der an einer tieferen Schicht mit höherer seismischer Geschwindigkeit erzeugten refraktierten Welle überholt.

Die Durchführbarkeit des refraktionsseismischen Verfahrens hängt stark von den Verhältnissen der seismischen Geschwindigkeit der oberhalb und unterhalb des Refraktors liegenden Schichten ab. Ein Refraktor lässt sich nur nachweisen, wenn dessen Schallgeschwindigkeit größer ist als die der darüber liegenden Schicht. Besteht ein zu geringer Kontrast zwischen den seismischen Geschwindigkeiten der Schichten sind die refraktionsseismischen Messungen für eine Erkundung nicht geeignet.

Im Falle, dass keine konkrete Schicht mit hoher seismischer Geschwindigkeit im Untergrund vorhanden ist, sondern die Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe graduell zunimmt, spricht man dagegen von Tauchwellenseismik. Die Schalllaufwege entsprechen gekrümmten Bahnen zurück zur Oberfläche. Von Refraktionstomographie bzw. Tauchwellentomographie wird dann gesprochen, wenn die Laufzeiten dieser seismischen Wellen mittels eines numerischen, tomographischen Algorithmus ausgewertet werden. Im Gegensatz zur klassischen Refraktionsseismik erhält man wie in *Abb. 4.4.1* eine kontinuierliche Verteilung der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe und entlang des Messprofils.

Zur Durchführung der Refraktionsseismik werden Geophone entlang der Erdoberfläche ausgelegt bzw. es werden schleppbare Geophonketten (Landstreamer) verwendet. Der Abstand zwischen den einzelnen Geophonen sollte etwa 1 bis 2 m

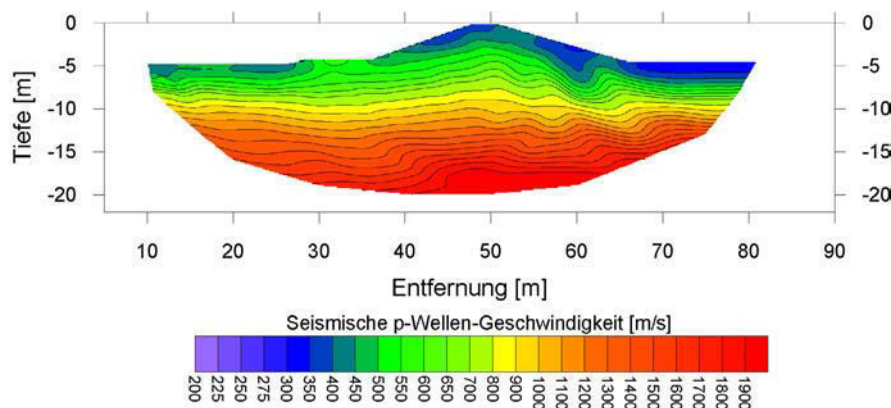


Abbildung 4.4.1
Ergebnis der Refraktionstomographie:
das Refraktionstomogramm

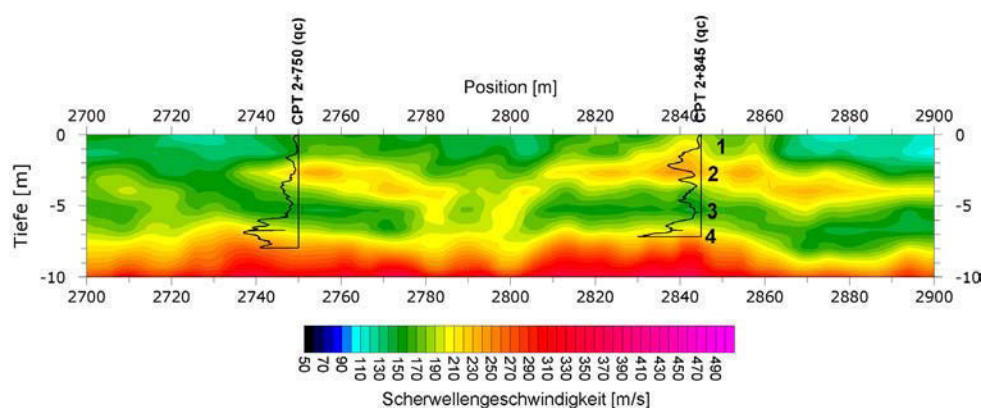


Abbildung 4.4.2

Vertikalschnitt der Scherwellengeschwindigkeit, ermittelt aus einer MASW-Messung im Vergleich mit dem Ergebnis von zwei CPTs auf einem Profil entlang eines Deiches

betragen. Für ein effektives Vorgehen wird eine 24-Kanal-Seismikmessapparatur empfohlen. Die Entfernung zwischen der Schallquelle und den Geophonen, das sogenannte Offset, ist so zu wählen, dass die gewünschte Eindringtiefe erreicht werden kann. Bei der Deichuntersuchung bis ca. 10 m Tiefe sollte das Offset zwischen 5 und 20 m liegen.

4.4.2 Oberflächenwellenseismik

Oberflächenwellen sind prinzipiell an die Erdoberfläche gebunden. Ihre Ausbreitung ist vor allem von der Scherwellengeschwindigkeit des Untergrundes abhängig. Die Energie der Oberflächenwellen nimmt mit der Tiefe ab.

Zur Untersuchung von Oberflächenstrukturen bis ca. 10 – 15 m Tiefe ist vor allem die Rayleighwelle von Bedeutung, da sie mit herkömmlicher Standardmessausrüstung erfasst werden kann. Die Oberflächenwellen zeigen ein frequenzabhängiges Verhalten, d. h. je geringer die Frequenz ist desto tiefer dringen die Wellen ein und umgekehrt. Das besondere Verhalten der seismischen Oberflächenwellen wird als Dispersion bezeichnet und für jedes Seismogramm in Form einer Dispersionskurve berechnet. Die gemessenen Dispersionskurven werden mit theoretisch berechneten Kurven verglichen. Durch eine numerische Anpassung kann ein Tiefen-Geschwindigkeitsprofil der Scherwellengeschwindigkeit entlang des Messprofils berechnet werden.

Zur Signalanregung kommen einfache Quellen wie z. B. Hammerschlag, für höhere Energien und bessere Reproduzierbarkeit auch beschleunigte Fallgewichte oder ähnliches in Frage. Zur Datenregistrierung werden klassisch zwei Geophone benutzt, aus deren Messdaten eine Dispersionskurve und die Tiefenprofile konstruiert werden (oft verwendetes Kürzel SASW für „Spectral Analysis of Surface Waves“). Seit einiger Zeit werden vielkanalige Messapparaturen (typisch 24 bis 48 Geophone) eingesetzt. Dabei werden Geophonreihen entlang der Erdoberfläche ausgelegt bzw. es werden schleppbare Geophonketten (Landstreamer) verwendet. Der Abstand zwischen den einzelnen Geophonen sollte etwa 0,5 bis maximal 1 m betragen. Die Entfernung zwischen der Schallquelle und den Geophonen, das sogenannte Offset, ist so zu wählen, dass die gewünschte Eindringtiefe erreicht werden kann. Als Näherung kann angenommen werden, dass das Offset in etwa der Eindringtiefe entsprechen sollte. Die Daten aller Geophone werden geschlossen ausgewertet und aus den Daten vieler Quellpositionen eine dichte Reihe von Tiefenprofilen errechnet, die sich als Tiefenschnitt wie in

Abb. 4.4.2 darstellen lassen (oft verwendetes Kürzel MASW für „Multichannel Analysis of Surface Waves“, [10]).

In Abb. 4.4.2 wird ein Vertikalschnitt der Scherwellengeschwindigkeit, der aus einer MASW-Messung gewonnen wurde, für einen Deichabschnitt gezeigt. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse von zwei CPT-Sondierungen eingetragen. Es wird bei beiden Sondierungen deutlich, dass der gemessene Spitzenwiderstand in Bereichen mit höherer Scherwellengeschwindigkeit signifikant ansteigt.

4.5 Ingenieurgeophysikalische Sondierungen

4.5.1 Prinzip und Messgrößen

Ingenieurgeophysikalische Sondierungen umfassen radiometrische und geoelektrische Messungen, die mit oder in einem gerammten bzw. gedrückten Sondenführungsgestänge ausgeführt werden. Sie liefern ähnlich wie die Bohrlochgeophysik eine vertikale Verteilung bestimmter bodenphysikalischer Kennwerte.

Aktive radiometrische Messungen beruhen auf der Wechselwirkung zwischen der radioaktiven Strahlung künstlicher Quellen mit dem Untergrund. Messparameter ist die Impulsrate von Gammastrahlen bzw. Neutronen nach Durchstrahlung. Beim Durchdringen von Gestein wird die Gamma-Strahlung absorbiert. Der Absorptionskoeffizient ist zur Dichte proportional. Durch Kalibrierung ist eine direkte Verknüpfung von Strahlungsintensität und Rohdichte herbeizuführen. Schnelle Neutronen werden in Wasser abgebremst. Ihre Flussdichte nach Durchstrahlung ist ein Maß für den Wassergehalt des untersuchten Mediums (siehe auch [9]). Bei der Kalibrierung müssen die Eichmodelle eine den zu untersuchenden Böden analoge Zusammensetzung aufweisen. Im Ergebnis der kerngeophysikalischen Sondierungen werden die Bodenkennwerte Rohdichte und Feuchte indirekt ermittelt und teufenbezogen angegeben. An der Spitze des Sondenführungsgestänges kann durch eine spezielle Elektrodenanordnung auch der spezifische elektrische Widerstand der durchteuften Bodenschichten bestimmt werden.

4.5.2 Art der Messung

Die radiometrischen Messungen setzen eine Kalibrierung des Systems Quelle – Sonde – Sondenführungsgestänge – Zählrohr in

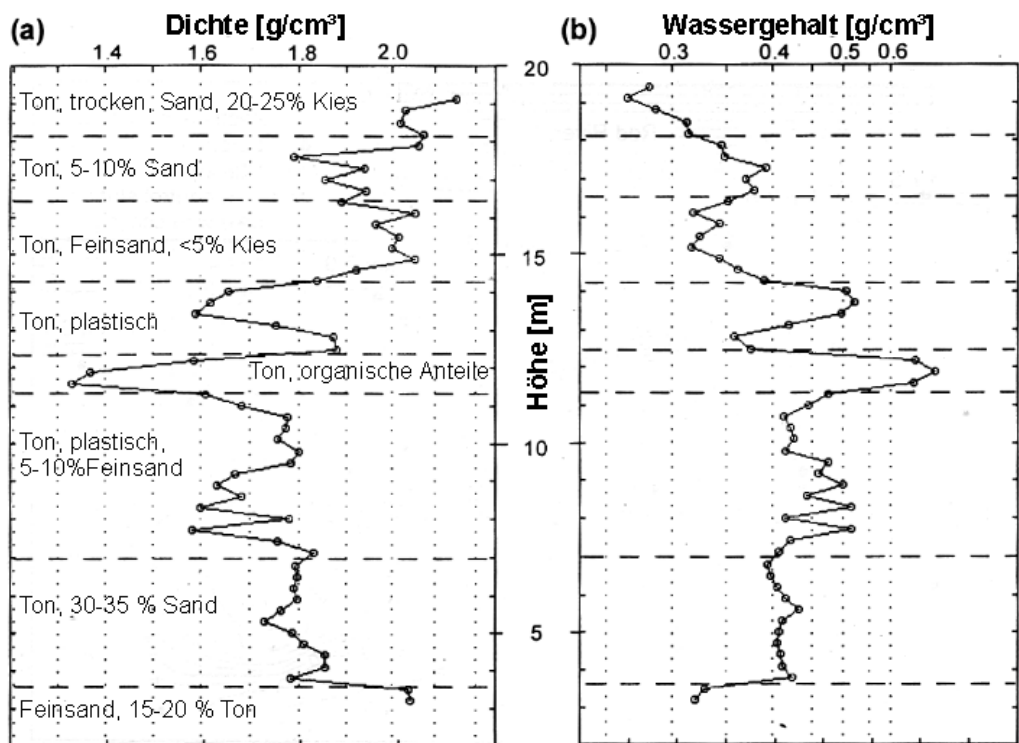


Abb. 4.5.1
 Ergebnis einer ingenieurgeo-
 physikalischen Sondierung aus
 [2]. Die Daten der Gamma-
 Gamma-Sonde (a) und der
 Neutronensonde (b) wurden
 durch Kalibrierung in Dichte und
 Wassergehalt umgerechnet.

entsprechenden Medien voraus. Die Messung erfolgt punktförmig durch diskontinuierliches Auf- bzw. Abwärtsbewegen der Sonde mit beliebiger Messpunktdistanz.

Die ingenieurgeophysikalische Sondierung kann im Verbund mit anderen Sondenmessungen wie geotechnischen Sondierungen (z. B. Schlagzahlmessungen) ausgeführt werden. Ihre Positionierung sollte nach vorherigen, flächendeckenden geophysikalischen Messungen gezielt erfolgen. Die Ergebnisse der ingenieurgeophysikalischen Sondierung können mit denen der anderen Verfahren an der gleichen Stelle direkt verglichen werden.

4.5.3 Auflösung

Der von der Messung erfasste Raumbereich ist abhängig vom Abstand Quelle – Zählrohr. Die in Gebrauch befindlichen

Sonden haben eine Distanz von 30 cm und eine dementsprechende Wirkungstiefe. Der einzelne Messwert ist aufgrund des Integraleffekts repräsentativ für dieses Volumenelement.

Das vertikale Auflösungsvermögen kann durch die Wahl des Messpunktabstands bestimmt werden. Es beträgt je nach Aufgabenstellung 10 bis 50 cm. Die Erkundungstiefe ist abhängig von der Bodenart und der Leistungsfähigkeit des Rammsystems. Die gebräuchlichen Sonden reichen bis maximal 50 m Tiefe.

Das Beispiel in Abb. 4.5.1 zeigt, dass anhand der Kurven der natürlichen Rohdichte und des Wassergehaltes eine zuverlässige Gliederung des Tiefenprofils in bestimmte Schichtpakete möglich ist. Die Tonschicht mit hohem Anteil an organischem Material wird durch eine geringe Dichte und einen hohen Wassergehalt charakterisiert.

5 Eignung geophysikalischer Verfahren

5.1 Vorbemerkungen

Um die Eignung der geophysikalischen Verfahren für die Strukturerkundung und Schwachstellenanalyse von Flussdeichen zu bewerten, wurde an vier Teststandorten mit unterschiedlichen Deichtypen ein umfangreiches Untersuchungsprogramm sowohl mit Standard- als auch innovativen Methoden durchgeführt. Die begleitenden geotechnischen Untersuchungen lieferten die Datengrundlage für die Evaluierung der einzelnen Methoden hinsichtlich der zugrunde liegenden Fragestellungen. Zusätzlich wurden die Erfahrungen aus Projekten bis zurück in die 1970er Jahre sowie die einschlägige Literatur ausgewertet und zur Bewertung der Methoden herangezogen.

Die Einschätzung der Eignung der geophysikalischen Verfahren wurde insbesondere daran gebunden, in welchem Maße sie in der Lage sind, einen vertiefenden Beitrag zur Lösung

der sich im Rahmen einer geotechnischen Deicherkundung ergebenden Aufgaben- und Fragestellungen zu leisten. Diese Aufgaben- und Fragestellungen wurden in Spalte 1 der Tabelle 5.1 formuliert.

In der Tabelle 5.1 sind die wichtigsten Ergebnisse der Evaluierung der einzelnen Verfahren in vereinfachter Form zusammengestellt. Die Entscheidung darüber, ob eine Methode für eine bestimmte Fragestellung erfolgversprechend ist, muss in enger Zusammenarbeit zwischen Geophysiker und Geotechniker geklärt werden. In besonderen Problemfällen wird es sinnvoll sein, den Eignungsnachweis mit Testmessungen zu führen. Die Eignung einer Methode wird nicht alleine durch die fachgerechte Ausführung der Feldmessungen bestimmt. Auch die Auswertung der Messdaten und die sachkundige Interpretation in Zusammenarbeit mit dem Geotechniker entscheiden darüber, ob eine Methode erfolgreich für eine bestimmte Aufgabenstellung eingesetzt werden kann.

Tabelle 5.1
Eignung der geophysikalischen Verfahren für ausgewählte Fragestellungen

Aufgabe/Fragestellung	Geoelektrik	Elektromagnetik	Georadar	Seismik	Ingenieur-geophysikalische Sondierung
Ausweisung von Homogenbereichen (Deich + Untergrund)	+	○	-	-	-
Ausweisung strukturbedingter Anomalien (z. B. reparierter Deichbruch)	○	○	○	○	-
Lokalisierung von Einbauten und Objekten (Leitung, Bauwerk)	○	○	+	-	-
Deichgliederung (Deichtypen)	+	○	○	-	+
Verlauf von charakteristischen Schichtgrenzen im Lockergestein (Ton/Sand/Torf)	○	○	○	○	+
Verteilung und Mächtigkeit hangendstauender Deckschichten	+	○	○	-	+
Grundwasserstand	-	-	○	○	+
Korrelationen zu charakteristischen Bodenkennwerten	-	-	-	○	+
Wertebereiche der Empfehlung + : Anwendung empfohlen ○ : Anwendung bedingt empfohlen - : Anwendung nicht empfohlen					

In den nachfolgenden Abschnitten werden einige konkrete Empfehlungen zur Anwendung der einzelnen Verfahren gegeben.

5.2 Geoelektrik

Die Widerstandsgeoelektrik mit galvanischer Ankopplung der Elektroden hat sich als Übersichtsverfahren zur Untersuchung auf Längsprofilen als besonders geeignet erwiesen [6]. Dieses Verfahren sollte daher das Standardmessprogramm bei jeder Untersuchung mit der Zielstellung der Ausweisung von Homogenbereichen in Deichkörper und Deichuntergrund bilden. In Verknüpfung mit Kalibrierbohrungen ist eine zuverlässige Unterscheidung zwischen feinkörnigen oder gemischtkörnigen Böden mit plastischen Eigenschaften und grobkörnigen Böden ohne plastische Eigenschaften möglich. Grundwasserstände lassen sich im überwiegend feinkörnigen Deichmaterial oder Auelehm nicht erkunden.

Im Normalfall sollte ein Profil mittig auf der Deichkrone verlaufen. Bei speziellen Anforderungen, wie z. B. bei der Untersuchung von gegliederten Deichen, sind zwei Profile zu empfehlen. Für die Untersuchung des Deichuntergrundes sind im Deichvor- und im Deichhinterland jeweils zwei Profile zu messen, wobei ein Profil in etwa 2 m bis 5 m Abstand vom Deichfuß angelegt werden sollte und ein weiteres Profil in größerem Abstand vom Deich entsprechend den Anforderungen. Bei den Messungen auf Längsprofilen wird ein Elektrodenabstand von 2 m empfohlen. In begründeten Fällen, insbesondere bei Kleindeichen unter 1,5 m Höhe und geringmächtigen Deckstauern sind geringere Elektrodenabstände zu wählen. Eine ausreichende Eindringtiefe für den Untersuchungsbereich ist sicherzustellen. Für die Messungen auf Längsprofilen können die Konfigurationen Wenner- α oder Schlumberger empfohlen werden. Im Hinblick auf den Einsatz

von mehrkanaligen Apparaturen sind Konfigurationen zu wählen, bei denen alle Kanäle genutzt werden. Dazu zählen die inverse Schlumberger-Konfiguration (Stromeinspeisung über die mittleren Elektroden), die Dipol-Dipol-Konfiguration und ausgewählte Gradientenanordnungen.

Die auf den einzelnen Profilen gemessenen Pseudosektionen sind mit 2D-Inversionsprogrammen zu bearbeiten, um Modelle der Widerstandsverteilung im Untergrund zu erzeugen. Da alle verfügbaren Inversionsprogramme (Res2DInv, DC2DSirt, ResistivityImager2D ...) ähnliche Ergebnisse liefern, sollte der bearbeitende Geophysiker die Entscheidung über die Auswahl des Inversionsprogramms und der Einstellung der programmspezifischen Inversionsparameter treffen und dokumentieren. Die resultierenden Tiefenschnitte der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes sind im geforderten Maßstab unter Verwendung eines geeigneten Farbkeils darzustellen, der eine möglichst aussagekräftige Differenzierung der realen Widerstandsverteilung im Deichkörper und in dessen Untergrund über den gesamten zu untersuchenden Deichabschnitt erlaubt. Eine relativ selten praktizierte, aber gut geeignete Möglichkeit hierzu besteht in einer Berechnung von Häufigkeitsverteilungen der elektrischen Bodenwiderstandswerte nach der Inversion und deren grafischer Darstellung in Form von Histogrammen. Auf Grundlage der ermittelten Minima-, Maxima- und Mittelwerte können optimierte Darstellungsformen abgeleitet werden, z. B. logarithmisch gestaffelte Isohmenskalen bzw. Farbkeile.

Nicht hinreichend durch die Messung aufgelöste Bereiche (z. B. der oberflächennahe Bereich bis zu einer Tiefe kleiner als der halbe Elektrodenabstand) sind in der Darstellung geeignet kenntlich zu machen.

Für die Interpretation der Tiefenschnitte sind folgende Hinweise zu beachten:

Für die Widerstandsgeoelektrik gilt wie für alle Potenzialverfahren das Äquivalenzprinzip. Das Inversionsprogramm erzeugt ein mögliches Modell der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund. Abweichungen in der Ausdehnung, Tiefenlage und im Widerstandscontrast von realen Strukturen sind möglich.

Die direkte Materialansprache aus dem spezifischen elektrischen Widerstand kann im Einzelfall schwierig sein, da z. B. trockene Tone und wassergesättigte Sande ähnliche spezifische elektrische Widerstände aufweisen können.

Da geometrische Änderungen des Deichquerschnittes die Widerstandsmessungen beeinflussen und bei der 2D Inversion unberücksichtigt bleiben, ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur in Bereichen mit gleichem Deichquerschnitt möglich.

Geoelektrische Tiefenschnitte können daher nur unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Aufschlüssen, Bohrungen, Rammsondierungen oder ingenieurgeophysikalischen Sondierungen zuverlässig interpretiert werden. Jedes Untersuchungsprogramm sollte Messungen des spezifischen elektrischen Widerstandes an einer hinreichenden Anzahl von Proben vorsehen, um die Beziehungen zwischen Bodenart und spezifischem elektrischen Widerstand nachzuweisen. Als Alternative können auch ingenieurgeophysikalische Sondierungen mit einer Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes für eine Kalibrierung herangezogen werden (siehe auch Kap. 3.7)

Wenn es die petrophysikalischen Ergebnisse zulassen, können aus den Ergebnissen aller Längsprofile Isopachenpläne erstellt werden, die z. B. die Verteilung der Deckstauermächtigkeit im Deichbereich darstellen.

Für Detailuntersuchungen sind geoelektrische Messungen auf Querprofilen zu empfehlen ([3], [5]). Unter Einbeziehung von Bohrungen kann damit die strukturelle Gliederung im Deichquerschnitt erfasst werden. Um ein gegenüber den Längsprofilen höheres Auflösungsvermögen zu erreichen, ist ein Elektrodenabstand von 1 m zu empfehlen. Die Profile sollten an die Längsprofile im Deichvor- und Deichhinterland anschließen. Da bei der Inversion die Topographie unbedingt mit zu berücksichtigen ist, muss die Deichgeometrie möglichst elektrodengenau aufgenommen werden. Auch für Querprofile kann die Wenner- α -Konfiguration empfohlen werden. Eine bessere Detailauflösung und eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Ungenauigkeiten in der Topographiebestimmung werden durch die Kombination von bestimmten Messkonfigurationen wie z. B. Wenner- α und Wenner- β oder Halbwenner vorwärts und rückwärts erreicht [5]. Für die Interpretation der Tiefenschnitte gelten die für die Längsprofile gegebenen Hinweise.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zur Anwendung der Schleppgeoelektrik mit galvanischer oder auch kapazitiver Ankopplung rechtfertigen noch keine Empfehlungen für den routinemäßigen Einsatz zur Deichuntersuchung. Die Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit, die sehr stark von den Ankopplungsbedingungen und damit von der Oberflächenbeschaffenheit und den meteorologischen Einflüssen abhängen, bleiben noch weit hinter den Anforderungen zurück.

Die Erweiterung der geoelektrischen Profilmessungen in Richtung induzierte Polarisierung liefert bisher noch keine für geotechnische Aussagen verwertbare Zusatzinformation.

Im Einzelfall kann die zusätzliche Messung von IP-Effekten bei Widerstandssondierungen sinnvoll sein, um Aussagen zum Durchlässigkeitsbeiwert von Schichten unter dem Grundwasserstand abzuleiten [1].

5.3 Elektromagnetik

Die meisten elektromagnetischen Methoden arbeiten ohne elektrischen Kontakt zum Boden und erlauben dadurch einen hohen Messfortschritt. Je nach Methode und Messfrequenz liefern sie die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit entweder für den oberflächennahen Bereich oder den tieferen Untergrund. Probleme bereitet die Tiefenzuordnung von Strukturen und die Tatsache, dass die Deichgeometrie bisher nicht berücksichtigt wird.

Die Aussagesicherheit hinsichtlich struktureller Informationen und der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund bleibt deutlich hinter der Widerstandsgeoelektrik zurück und kann diese nicht als Standardverfahren ersetzen.

Für ausgewählte Fragestellungen kann die Anwendung elektromagnetischer Verfahren empfohlen werden. Dazu gehören die Messung auf versiegelten Flächen, wenn z. B. die Deichkrone als Fahrweg asphaltiert wurde, oder auch die Ortung von gut leitfähigen Objekten im Deichkörper.

Elektromagnetischen Verfahren können effektiv auf großen Flächen angewandt werden, beispielsweise bei der Vorerkundung für eine Deichverlegung. In Frankreich werden das Slingram-Verfahren und RMT aufgrund der Geschwindigkeits- und Kostenvorteile trotz der Probleme bei Eindringtiefe, Auflösung und Auswertung als bevorzugte Messverfahren für die Deicherkundung eingesetzt [4].

5.4 Georadar

Die Radar-Messtechnologie hat sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt. Die hohe Messgeschwindigkeit, die große Datendichte und das hohe Auflösungsvermögen tragen dazu bei, dass in den gewonnenen Radargrammen eine Vielzahl von Detailinformationen enthalten ist, die hinsichtlich ihrer geotechnischen Aussage oftmals nur schwer zu bewerten ist. Der daraus resultierende Interpretationsaufwand ist sehr hoch, da automatische Verfahren zur Signaturerkennung für die Deichuntersuchungen nicht verfügbar sind. So können kleinräumige Änderungen im Wassergehalt des Materials deutliche Reflexionen hervorrufen, die aber für die geotechnische Bewertung des Deiches irrelevant sind.

Dort wo die Eindringtiefe nicht durch oberflächennahe feinkörnige Schichten begrenzt wird, kann das Verfahren wichtige Strukturinformationen liefern. Aussagen zur Lithologie sind nur schwer ableitbar.

Das Verfahren kann zur Detailerkundung an ausgewählten Abschnitten eingesetzt werden. Es eignet sich besonders zum Nachweis von verdeckten Einbauten im Deich. Es wird empfohlen, dass vor der routinemäßigen Anwendung des Verfahrens Testmessungen mit dem Ziel durchgeführt werden, die Eignung des Verfahrens für die Aufgabenstellung nachzuweisen und die Messparameter (Messfrequenz, Antennenposition) festzulegen. Die Testmessungen sollten Bestandteil der Ausschreibung sein.

Für die Deicherkundung sind generell Antennen im Bereich von 100 – 400 MHz geeignet, wobei das Erreichen der für die Fragestellung notwendigen Eindringtiefe ggf. durch Testmessungen nachzuweisen ist. Die Messdichte sollte mindestens 20, bei der Suche nach Leitungen besser 40 Einzelscans/Profilmeter betragen. Die notwendige Aufzeichnungszeit ist wiederum durch Testmessungen zu bestimmen. Dies gilt ebenso für die Anzahl der Messwerte pro Scan, die generell 512 nicht unterschreiten sollte. Besonders wichtig ist die Wahl einer geeigneten Verstärkungsfunktion für die Darstellung, um weder schwache Reflektionen zu unterdrücken, noch Artefakte oder Datenrauschen zu überhöhen. Alle Parameter sind zu dokumentieren.

5.5 Seismik

Die Refraktionsseismik oder auch die Tauchwellentomographie liefern die Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit im Untergrund, die im ungesättigten Bereich als Maß für die Lagerungsdichte angesehen werden kann. Da refraktierte Wellen nur entstehen, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt, werden Bereiche mit einer Geschwindigkeitsabnahme nicht erkannt. Aus den auf Längs- und Querprofilen gewonnenen Tiefenschnitten der Geschwindigkeitsverteilung lassen sich nur schwer für die geotechnische Interpretation verwertbare Aussagen ableiten. Die Refraktionsseismik kann daher nur für spezielle Aufgabenstellungen bei der Deicherkundung empfohlen werden. So kann mit diesem Verfahren bei Deichlagen mit oberflächennah anstehendem Festgestein die Mächtigkeit der Lockerbedeckung bestimmt werden.

Das auf der Ausbreitung von Oberflächenwellen basierende MASW-Verfahren liefert einen Vertikalschnitt der Scherwellengeschwindigkeit. Bei bekannter Dichte des Materials, die aus einer ingenieurgeophysikalischen Sondierung mit der Gamma-Gamma-Messung leicht zu bestimmen ist, lassen sich die Scherwellengeschwindigkeiten in den dynamischen Schermodul umrechnen. Die Oberflächenwellenseismik kann auch sogenannte Langsamschichten mit reduziertem Schermodul gut auflösen. Bisher ist dieses Verfahren nur auf Längsprofilen einsetzbar. Numerische Modellierungen haben jedoch gezeigt, dass bei MASW-Messungen auf der Deichkrone Topographieeffekte vernachlässigt werden können, wenn die Neigung der Böschungen nicht steiler als 1:3 ist.

Es konnte bei verschiedenen Vergleichen eine deutliche Korrelation mit dem bei CPT-Messungen gewonnenem Spitzenwiderstand gezeigt werden (siehe *Abb. 4.4.2*). Somit bietet diese Methode die Möglichkeit, mit einer an der Oberfläche durchgeführten Messung, Erkenntnisse über die Verteilung von Parametern wie Lagerungsdichte, Reibungswinkel, Elastizitäts- und Steifemodul zu gewinnen.

Da diese Methode das Potenzial hat, Aussagen zur Bodenkennwerten zu liefern, kann dieses Verfahren für Deichuntersuchungen empfohlen werden.

Für das MASW-Verfahren wird eine Messapparatur mit mindestens 24 Kanälen benötigt. Die Eigenfrequenz der Geophone sollte bei 4,5 Hz liegen. Es wird ein Geophonabstand von 0,5 m und ein Schusspunktoffset von 5 bis 10 m empfohlen. Um eine hinreichende Auflösung zu erreichen, sollten die Messpunktabstände auf dem Profil 2 bis 5 m betragen.

5.6 Ingenieurgeophysikalische Sondierungen

Ingenieurgeophysikalische Sondierungen liefern aus Messungen in gerammten oder gedrückten Löchern teufengenau die petrophysikalischen Parameter Dichte, Wassergehalt und spezifischer elektrischer Widerstand unter in-situ-Bedingungen. Aus diesen Parametern lassen sich die Porosität und die Wassersättigung bestimmen und meist auch zuverlässige Angaben zur Lithologie und zu den Schichtgrenzen ableiten ([2], [6], [9]). Bis zum Jahre 1990 gehörten die ingenieurgeophysikalischen Sondierungen neben den Rammkernbohrungen zum Standardprogramm jeder Deichuntersuchung in der DDR. Sie waren notwendig, um die geophysikalischen Oberflächenmessungen hinsichtlich ihrer lithologischen Aussage zu kalibrieren.

Es wird empfohlen, ingenieurgeophysikalische Sondierungen in das Messprogramm von Deichuntersuchungen aufzunehmen. Es sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, die petrophysikalischen Parameter Dichte, Wassergehalt und spezifischer elektrischer Widerstand in Verbindung mit geotechnischen Sondierungen (CPT-Sondierungen mit Messungen von Spitzenwiderstand und Mantelreibung) zu bestimmen. Auf diese Weise können die Beziehungen zwischen den geotechnischen und petrophysikalischen Parametern abgeleitet werden. Zur Kalibrierung der Geoelektrik sind RCPT-Messungen vorteilhaft.

5.7 Kalibrieraufschlüsse

Die notwendige Anzahl von Kalibrierbohrungen (oder Schürfen) sowie Laboruntersuchungen zum Abgleich der geophysikalischen Ergebnisse mit den geotechnischen Anforderungen ist im Vorfeld von Untersuchungen nur schwer abschätzbar. Grundsätzlich kann man von der in den einschlägigen Richtlinien vorgeschlagenen Werten von durchschnittlich einem Aufschluss pro 100 m ausgehen ([12],[14]). Nach Vorliegen der geophysikalischen Ergebnisse sind die Positionen der Aufschlüsse anzupassen, so dass in Homogenbereichen ein gröberes Raster und in Anomaliezonen ein engerer Abstand angesetzt wird. In inhomogenen Untersuchungsbereichen sollte die notwendige Anzahl der Aufschlüsse deutlich über den oben veranschlagten Durchschnittswert hinausgehen. Dies ist mit dem Auftraggeber und dem verantwortlichen Geotechniker abzustimmen. Die zusätzlichen Kosten sind notwendig, um das Risiko, Schwachstellen zu übersehen, zu vermindern und damit eine höhere Aussagesicherheit bei der Sanierungsplanung zu gewährleisten.

6 Literatur

- [1] Börner, F.; Schopper, J.R.; Weller, A. (1996): Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting* 44, 583-601.
- [2] Doan Van Tuyen; Tran Canh; Weller, A. (2000): Geophysical investigations of river dikes in Vietnam. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 4, 195-206.
- [3] Donié, Ch.; Krajewski, W; Wawrzyniak, Ch. (2007): Geoelektrisch-geotechnische Erkundung von Hochwasserschutzdeichen. *Geotechnik* 30, 42-47.
- [4] Fauchard, C.; Mériaux, P. (2007): Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes – Guide for implementation and interpretation. Éditions Quae.
- [5] Hennig, T.; Weller, A.; Tran Canh (2005): The effect of dike geometry on different resistivity configurations. *Journal of Applied Geophysics* 57, 278-292.
- [6] Hohlfeld, T.; Geiling, P.; Dörrer, T. (2004): Geophysikalisch-geotechnische Untersuchungen zur Einschätzung der Baugrundverhältnisse an Hochwasserschutzdeichen. *Geotechnik* 27, 356-363.
- [7] Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien. Band 3: Geophysik. 2. Auflage, Springer, Berlin.
- [8] Merz, B. (Hrsg.): Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse. Broschüre. GfZ Potsdam, 2006. <http://www.rimax-hochwasser.de>
- [9] Militzer, H.; Schön, J.; Stötzner, U. (1986): Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. 2. Auflage, Dt. Verlag für Grundstoffind., Leipzig.
- [10] Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J. (1999): Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800–808.
- [11] Prinz, H.; Strauß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie, Spektrum Akademischer Verlag, 4. Auflage, München.
- [12] DIN 19712:1997-11: Flussdeiche
- [13] DVWK-Merkblatt 210/1986: Flussdeiche
- [14] Merkblatt DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“, (Entwurf 2007-02).
- [15] DWA-Themen „Dichtungssysteme in Deichen“, April 2005.
- [16] DIN 1054:2005-01: Baugrund – Standsicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau:
- [17] DIN 4020:2003 mit Beiblatt 1: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke
- [18] DIN EN ISO 22475-1: 2007-01, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwasserermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung
- [19] DIN EN ISO 14688-1: 2003-01, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1: Benennung und Beschreibung
- [20] DIN EN ISO 14688-2: 2004-11, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen
- [21] DIN EN ISO 14689-1: 2003-01, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels, Teil 1: Benennung und Beschreibung
- [22] DIN 4023:2006-02: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen
- [23] DIN EN ISO 22476-1: 2005-04 (Entwurf): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchung, Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck
- [24] DIN EN ISO 22476-2: 2005-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchung, Teil 2: Rammsondierungen
- [25] DIN EN ISO 22476-3: 2005-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchung, Teil 3: Standard Penetration Test
- [26] DIN 18121-1:1998-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung

Regelwerke und Normen:

- [27] DIN 18122-1:
1997-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
- [28] DIN 18123:
1996-11: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung, 1996.
- [29] DIN 18124:
1997-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte, Kapillarpyknometer - Weithalspyknometer
- [30] DIN 18125-1:
1997-08: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens, Teil 1: Laborversuche
- [31] DIN 18128:
2002-12: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Glühverlustes
- [32] DIN 18129:
1996-11: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Kalkgehaltsbestimmung
- [33] DIN 18130-1:
1998-05: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Teil 1: Laborversuche
- [34] DIN 18137:
1990-2002: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit
- [35] DIN 18196:
2006-06: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- [36] Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2005, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe Hamburg Ilmenau

Anhang

Hinweise zu Ausschreibungen und Aufträgen

Vorbemerkung

Ausschreibungen können funktionell (Beschreibung des Zieles, ohne Festlegung der verwendeten Methoden und Parameter) oder mit detaillierter Auflistung der zu erbringenden Einzelleistungen erfolgen. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile. Erstere Variante erlaubt die für das Erreichen der Ziele optimale Variantenauswahl und führt möglicherweise auch zu einem wirtschaftlich optimalen Angebot. Zum Vergleich der Angebote ist fundierte Sachkenntnis auf dem Gebiet der Ingenieurgeophysik erforderlich. Die zweite Variante garantiert bei sachgemäßer Leistungsbeschreibung eine gute Vergleichbarkeit der Angebote, verhindert aber den Wettbewerb mit möglicherweise günstigeren Methoden oder Vorgehensweisen (Sondervorschläge). Die Einsatzmöglichkeiten, die von der Ausschreibung oder den in diesem Handbuch vorgeschlagenen Methoden abweichen, kann ein Bieter durch Demonstrationsmessungen vor Ort nachweisen.

Welche der beiden Varianten zu wählen ist, muss im Einzelfall entschieden werden. Da nie ausgeschlossen werden kann, dass die Untergrundverhältnisse oder die Deichstruktur anders sind als erwartet, sollten sich Auftraggeber und -nehmer stets die Möglichkeit zu einer Modifikation des Erkundungskonzeptes und den damit verbundenen Einzelleistungen vorbehalten, wenn sich dies im Verlaufe der Erkundung nachgewiesenermaßen zum Erreichen der Untersuchungsziele als notwendig erweist. Nach dem Vorliegen erster Zwischenergebnisse sollten die Vertragspartner die Vorgehensweise erneut betrachten und ggf. an die lokalen Verhältnisse anpassen.

Erkundungsziel und Untersuchungsobjekt

Der Ausschreibungstext bzw. beigefügte Anlagen sollten folgende Angaben unbedingt enthalten:

- Beschreibung des Untersuchungsgebietes
- Genaue Definition des Erkundungszieles
- Geforderte Erkundungstiefe
- Geforderte Auflösung/Messpunktabstände (horizontal/vertikal, Anzahl Messprofile)
- Ggf. die geforderte Lagegenauigkeit lokalisierter Objekte
- Angaben über Untergrundverhältnisse (Geologie, Grundwasser)
- Hinweise auf vorhandene Daten und frühere Untersuchungen
- Beschreibung der gewünschten Ergebnisform (Bericht, Karten, Schnitte, Zahlenwerte,...)
- Zugänglichkeit (auch Einschränkungen durch Privateigentümer, Naturschutzgebiete etc.)
- Verweis auf spezifische Regelungen und Normen (z. B. DWA-M 507)
- Anforderungen bzgl. der Teilnahme an Besprechungen, Komplexauswertung, Erstellung integrierter Berichte

Einmessung

Der Auftraggeber stellt im Normalfall eine aktuelle Kartengrundlage mit allen relevanten Angaben in geeignetem Maßstab zur Verfügung, nach Möglichkeit in einem üblichen CAD-Format. Insbesondere bei stufenweiser Erkundung durch verschiedene Auftragnehmer sind eine hinreichende Anzahl von gegen Vandalismus gesicherte Referenzpunkte zu

vereinbaren bzw. zu setzen. Details sind in Ausschreibungen vorzugeben bzw. im Vertrag zu vereinbaren.

Die Einmessung der Messpunkte und Profile nach Rechts- und Hochwerten erfolgt üblicherweise durch den Auftragnehmer. Die notwendige Genauigkeit ist zu vereinbaren. Besondere Anforderungen sind z. B. an die relativen Distanzen zwischen Sensorpositionen (Elektrodenspieße bei der Geoelektrik, Geophone bei der Seismik) geknüpft. Der absolute Positionsfehler sollte hier auf der Gesamtlänge des Profils ein Viertel der geforderten horizontalen Auflösung nicht übersteigen. Distanzabweichungen zwischen zwei Sensoren bis zu 3% können toleriert werden. Bei Radarmessungen sollte der Positionsfehler +/-0,1 m nicht übersteigen.

Interpretation und Integration der Ergebnisse

Die Ausschreibung muss sicherstellen, dass der Auftraggeber die Ergebnisse in erforderlicher Art und im passenden Format erhält. Zudem sind bei der Interpretation alle relevanten Vorinformationen zu berücksichtigen und die Ergebnisse in den geotechnischen Untersuchungsbericht zu integrieren. Im einzelnen ist zu fordern:

- Berücksichtigung der vorhandenen Nebeninformationen (Topographie, Bauwerke, Bohrergebnisse) bei der Interpretation und der Ergebnisdarstellung in Karten und Schnitten.
- Maßstabsgerechte Darstellung der gemessenen/berechneten geophysikalischen Profile, Karten, Schnitte mit einer angepassten, für ein Messgebiet einheitlichen Farbskala in Isoliniendarstellungen oder Blockmodellen.
- Interpretation der physikalischen Kennwerte im Hinblick auf Material, Struktur und Eigenschaften des Untergrundes.
- Kalibrieren der ermittelten Parameter (Materialeigenschaften, Tiefenlage von Strukturen und Objekten) anhand von durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten Bohr- oder Laborergebnissen.
- Entwicklung eines Baugrundmodells gemeinsam mit dem geotechnischen Gutachter.

Der Auftraggeber bzw. von diesem mit der Vermessung, Bohrungen oder der geotechnischen Begutachtung beauftragte Dienstleister müssen dem geophysikalischen Auftragnehmer rechtzeitig und in geeigneter Form die notwendigen Unterlagen übergeben.

Dokumentation

Verfahrensunabhängig sollte in der Ausschreibung generell eine präzise Dokumentation der Messungen und ihrer Interpretation gefordert werden:

- Datum, Uhrzeit, Wetterbedingungen bei den Messungen
- Verantwortlicher Techniker vor Ort, Qualifikation
- Lageplan der Messpunkte und -profile (ggf. auch als Tabelle oder CAD-Datei)
- Beschreibung der verwendeten Methode und Messparameter
- Angabe zur Datendichte auf den Messprofilen

- Verwendetes Gerät und wesentliches Zubehör
- Dokumentation möglicher Störeinflüsse (z. B. Bauwerke, Oberflächenbeschaffenheit, technische Anlagen im Untersuchungsgebiet, im Untergrund oder in der Nähe)
- Angaben zur Datenbearbeitung und -auswertung (verwendete Methode, Software, Parameter)
- Lieferung der Rohdaten und der Ergebnisse, ggf mit Erläuterung, in einem vereinbarten Format auf Datenträger.

Methodenspezifische Angaben

Die im Folgenden gelisteten Angaben gelten vor allem für die Ausschreibung spezifischer Einzelleistungen. Bei funktionalen Ausschreibungen können die Angaben zum großen Teil entfallen. Dann muss der Auftragnehmer aber die Wahl der Parameter dokumentieren und begründen.

Geeignete Messparameter für die Deicherkundung finden sich in den Kapiteln 4 und 5.

a) 2D-Geoelektrik

- Messanordnung (Wenner, Dipol-Dipol, Schlumberger, ...)
- Elektrodenabstand
- Anzahl der Tiefenniveaus (sukzessive Vergrößerung der Aufstellungsweite)
- Anzahl Wiederholungsmessungen und zulässige Fehlerbandbreite
- Art der Auswertung (für 2D-Geoelektrik: im Allgemeinen 2D-Inversion)
- Rechnerische Topographiekorrektur bei Querprofilen

b) Elektromagnetik

Da die verfügbaren Geräte sehr stark in ihren Eigenschaften variieren, ist hier anders als bei den anderen Verfahren die Forderung nach einem spezifischen Gerätetyp vertretbar. Dies ist jeweils mit dem Vermerk „oder vergleichbar“ zur ergänzen, wobei der Nachweis der Vergleichbarkeit durch den Auftragnehmer zu erbringen ist.

Ansonsten sind festzulegen:

- Messfrequenz(en) (falls variabel)
- Sender-Empfänger-Abstände (falls variabel), Ausrichtung, Messhöhe über Grund.
- Auswertungsart (z. B.: nur Darstellung der Messwerte oder Inversion)

c) Georadar

- Eigenschaften der eingesetzten Antenne(n)
- Angaben zu Messparametern (Scanlänge, Samples/Scan, Scans/m, Filter, Verstärkung)
- Testmessungen zur Ermittlung der tatsächlichen Eindringtiefe
- Aufgrund der hohen Datenmenge spezielle Anforderungen an Dokumentation und Archivierung, ggf. Übergabe geeigneter Betrachtungssoftware

- Rechnerische Topographiekorrektur bei Querprofilen

d) Seismik

- Verfahrensvariante (Refraktionstomographie, Oberflächenwellenseismik, ...)
- Verfahrensspezifische Apparatur- und Geophoneigenschaften (z. B. Kanalzahl, Eigenfrequenz)
- Geophonabstände, Auslagenlänge
- Quellentyp
- Messparameter (Aufzeichnungszeit, Samplefrequenz, Filterung)
- Auswertemethodik und -software
- Rechnerische Topographiekorrektur bei Querprofilen

e) Ingenieurgeophysikalische Sondierungen

- anzuwendende Verfahren/Methoden (Gamma-Gamma, Neutron-Neutron, spezifischer elektrischer Widerstand)
- Verbindung mit welchen geotechnischen Sondierverfahren
- Anzahl, Lage und Abstand der Sondierungen
- Tiefe der Sondierungen
- Messpunktabstand in der Vertikalen
- Art der Kalibrierung
- geforderte Messgenauigkeit der petrophysikalischen Kennwerte
- Dokumentation der Ergebnisse