

Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	5 (1998), 1	S. 51 – 57	6 Abb., 1 Tab., 7 Lit.
----------------------------------	--------------	-------------	------------	------------------------

Methodische Fortschritte zur Untersuchung des Aufbaus und des Zustandes vorhandener Deichbauten

PETER KNOLL, RAINER HERBST & JOHANNES PREUSS

1. Einführung

Bei der Auswertung der Schadensbilder während und nach dem Oderhochwasser vom Sommer 1997 (KRÜGER 1997) wurde deutlich, daß vor allem ältere Deiche aus unterschiedlichen Baumaterialien und zum Teil auf wenig tragfähigem Untergrund errichtet wurden. Lokale Änderungen des Baumaterials bzw. der geotechnischen Materialeigenschaften im Deich und im Untergrund können aber zur Bildung von Schwachstellen und in der Folge zu Deichbrüchen führen. Während langanhaltender Hochwasser reduziert die zunehmende Durchnässung in Verbindung mit lithologischen Besonderheiten die Standsicherheit von Deichen und spielt eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung von Deichbrüchen oder belastungsinduzierten Schwachstellen (KNOLL & LENDDEL 1998, DIETRICH 1997).

Nach der vordringlichen Sofortsicherung von offensichtlichen Bruchstellen steht mittelfristig die Kontrolle und die Schwachstellendiagnose an den vorhandenen Deichen an. Da allein im Lande Brandenburg über hundert Kilometer Deiche zu untersuchen sind, muß wie in der normalen geologischen Erkundung eine schnelle, flächendeckende Übersichtsmessung mit genaueren Untersuchungen an auffälligen

Abschnitten kombiniert werden. Im folgenden soll dargestellt werden, welche geophysikalischen Erkundungsverfahren dabei prinzipiell einsetzbar sind. Nach einer kurzen Übersicht über die einsetzbaren Verfahren wird eine kombinierte Geophysikalische Lockergesteins-Tomografie (KGLT) vorgestellt, mit der drei unabhängige geophysikalische Größen (Spezifischer elektrischer Widerstand, Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längs- und der Scherwellen) und punktuelle Aussagen über den lithologischen Aufbau gewonnen werden können. Diese Verfahrenskombination eignet sich zur detaillierten Untersuchung auch größerer Deichabschnitte.

2. Geophysikalische Erkundungsverfahren zur Deichuntersuchung

Entsprechend des oben vorgeschlagenen zweistufigen Vorgehens wurde die allgemeine Aufgabenstellung „Untersuchung vorhandener Deiche“ in mehrere Einzelaufgaben unterteilt (Tab. 1). Als geeignete geophysikalische Parameter sind Bodeneigenschaften anzusehen, welche erfahrungsgemäß mit den interessierenden geologisch/geotechnischen Parametern gekoppelt und mit vertretbarem Aufwand meß-

Tab. 1
Vorgehen bei der Untersuchung vorhandener Deiche

Geologisch/geotechnische Fragestellung	Geeigneter geophysikalischer Parameter	Einsetzbare Methoden
Schnelle Übersichtsmessung zur flächendeckenden Untersuchung des Deiches auf Aufbau und Zustand	Spezifischer elektrischer Widerstand r Geschwindigkeiten seismischer Wellen v_p, v_s	2D-Widerstandstomografie mit großen Elektrodenabständen Common-Offset-Seismik von der Oberfläche
Detaillierte Untersuchung zur Erkundung des lithologischen Aufbaus	Spezifischer elektrischer Widerstand ρ Geschwindigkeit der Längswelle v_p	2D-Widerstandstomografie mit kleineren Elektrodenabständen Längswellen-Tomografie
Detaillierte Untersuchung zur Lokalisierung von Vernässungszonen	Spezifischer elektrischer Widerstand ρ Geschwindigkeit der Längswelle v_p	2D-Widerstandstomografie mit kleineren Elektrodenabständen Längswellen-Tomografie
Detaillierte Untersuchung zur Lokalisierung von Bereichen verminderter Festigkeitseigenschaften	Geschwindigkeit der Scherwelle v_s , (Geschwindigkeit der Längswelle v_p)	Scherwellen-Tomografie Längswellen-Tomografie

bar sind. Das eingesetzte Meßverfahren muß in Abhängigkeit von der geforderten Auflösung und Meßgenauigkeit einerseits und von wirtschaftlichen Faktoren andererseits gewählt werden.

Der spezifisch elektrische Widerstand in Lockersedimenten wird vor allem von der Porosität und von der Porenfüllung bestimmt und kann zur Unterscheidung zwischen rolligen und bindigen Sedimenten sowie zwischen Bereichen mit unterschiedlichem Wassergehalt eingesetzt werden.

Nutzt man das einfache theoretische Modell eines homogenen und isotropen elastischen Mediums, kann man folgende Beziehungen zwischen den Geschwindigkeiten der seismischen Wellen und den elastischen Parametern aufstellen (DRESEN et al. 1985):

$$v_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

- v_p - Geschwindigkeit der Längswellen
- v_s - Geschwindigkeit der Scherwellen
- K - Kompressionsmodul
- G - Schermodul
- ρ - Dichte

Diese theoretischen Beziehungen zeigen, daß die Geschwindigkeit der Scher- bzw. S-Wellen v_s vom Schermodul abhängt und damit eher ein Maß für den Scherwiderstand des Gesteins darstellt. Die Geschwindigkeit der P- oder Längswellen v_p hängt dagegen sehr stark vom Kompressionsmodul ab, welcher z. B. bei Flüssigkeiten ohne jede Scherfestigkeit sehr hoch sein kann. In der Praxis wird dieses durch den sprunghaften Anstieg der Längswellengeschwindigkeiten bei Erreichen der vollständigen Wassersättigung (SCHÖN 1983) bestätigt. Aus der Kombination Spezifischer Elektrischer Widerstand - Längswellengeschwindigkeit können Änderungen im Wassergehalt sehr deutlich abgelesen werden, wobei die Längswellengeschwindigkeit vor allem die vollständige Wassersättigung und damit den Verlust der scheinbaren Kohäsion in Lockergesteinen markiert.

Für die Abschätzung der mechanischen Eigenschaften ist die Scherwellengeschwindigkeit zu bevorzugen, da die Teilchenbewegung quer zur Ausbreitungsrichtung erfolgt und die Energieübertragung stärker von den Bedingungen an den Grenzflächen zwischen den Gesteinskörnern abhängt. Wegen der oben geschilderten Abhängigkeit der Längswellengeschwindigkeit von der Wassersättigung ist diese nur mit gewissen Einschränkungen zur Abschätzung von mechanischen Eigenschaften nutzbar und in Tabelle 1 in Klammern gesetzt.

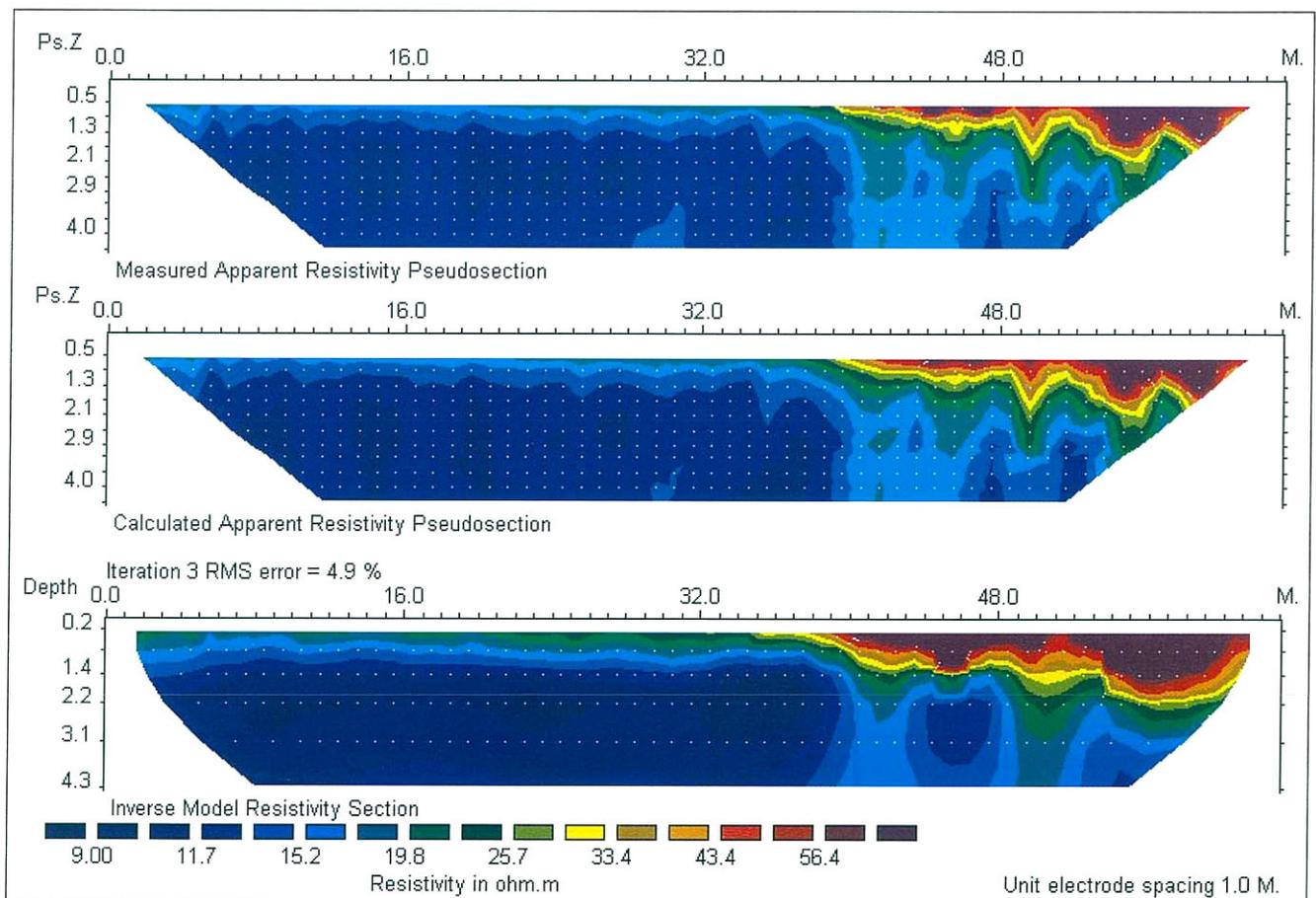


Abb. 1

2D-Geoelektrik, Meßbeispiel. Die gemessenen Scheinwiderstände (oben) werden mit den für ein Modell (unten) berechneten Scheinwiderständen (Mitte) verglichen. Im rechten Drittel des Profils überdeckt eine künstliche Aufschüttung mit grobkörnigen Anteilen den gewachsenen, feinkörnigen Boden.

Faßt man die drei Aufgabenstellungen, die im Rahmen der Detailerkundung zu lösen sind, zusammen, erscheint die Verknüpfung hochauflösender Meßmethoden zur Bestimmung der drei Parameter ρ , v_p und v_s als logische Konsequenz. Die KGLT stellt eine solche Kombination, abgestimmt auf den Einsatz in Lockergesteinen, dar. Kernstück dieses Verfahrens

einer Auffüllung mit grobkörnigen Anteilen (Widerstände größer 30 Ohm m, ab Profilmeter 40) deutlich zu erkennen. Normalerweise werden in trockenen, sandigen Aufschüttungen Widerstände von 100 Ohm m und mehr erreicht, so daß im dargestellten Beispiel von einem erhöhten Feinkornanteil in der Aufschüttung auszugehen ist.

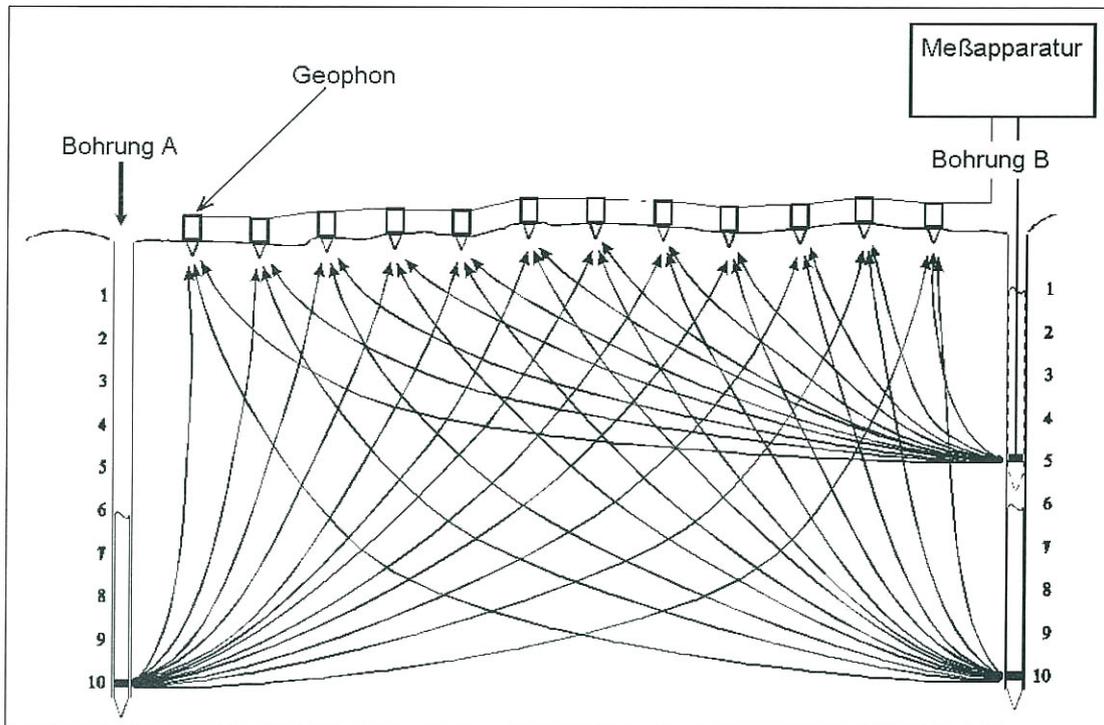


Abb. 2

Meßschema für eine mehrfachüberdeckte seismische Durchschallung. Die Quelle wird in verschiedener Tiefe in den Bohrungen A und B gezündet. Die Geophone zeichnen die seismischen Wellen an der Oberfläche zwischen den Bohrungen auf.

ist eine noch in der Entwicklung befindliche Scherwellen-Laufzeitomografie, die seit Frühjahr 1998 für Messungen an realen Objekten zur Verfügung steht. Zur KGLT gehören weiterhin die 2D-Widerstandstomografie und eine Längswellen-Laufzeitomografie.

Die 2D-Widerstands-Tomografie wird seit einigen Jahren routinemäßig in der Ingenieur- und Hydrogeologie eingesetzt und ist beispielsweise von BRANDT & RICHTER (1997) beschrieben worden. Wählt man die Elektrodenabstände nicht zu klein (z. B. 2 m), kann man mit moderner Meß- bzw. Rechentechnik auch längere Profile zügig vermessen. Für die detaillierten Untersuchungen muß der Elektrodenabstand auf die geforderte räumliche Auflösung abgestimmt werden, es empfehlen sich Abstände von 1 m oder weniger. Durch Kombination von langen Profilen längs der Deichkrone bzw. des Deichfußes mit kurzen Profilen quer zur Deichachse kann man auch dreidimensionale Modelle des Deiches ableiten. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer 2D-Widerstandstomografie auf einer Bergbaubrachfläche im Ruhrgebiet. Im Widerstandsmodell (unterer Teil der Abbildung) ist der Übergang von einem ungestörten Bodenbereich mit feinkörnigen Sedimenten (elektrischer Widerstand kleiner 20 Ohm m) zu

Im folgenden sollen die einzelnen Meßverfahren ohne Anspruch auf erschöpfende Behandlung aller Einzelheiten beschrieben werden, wobei der Schwerpunkt auf der KGLT liegt.

3. Common-Offset-Seismik

Bei diesem einfachen Meßverfahren werden eine seismische Energiequelle und eine geringe Anzahl von Empfängern (Geophonen) in konstantem Abstand (Offset) zueinander über die Meßfläche bewegt. Der erfaßte Tiefenbereich wird durch die Wahl des Offsets, also des Abstandes zwischen Quelle und Empfänger, festgelegt. Faßt man die Aufzeichnungen für alle Meßpunkte entlang einer Linie zusammen, werden relative Änderungen der Geschwindigkeiten und eventuell Schichtgrenzen in nicht allzu großer Tiefe sichtbar. Auf Grund dieser rein qualitativen Auswertung können dann Anomalien, d. h. auffällige Bereiche, für weitere Untersuchungen festgelegt werden.

4. Kombinierte Geophysikalische Lockergesteins-Tomografie

Ziel des Verfahrens ist es, durch Bestimmung von drei unabhängigen Parametern den Informationsgehalt der Ergebnisse zu verbessern und gleichzeitig eine hohe räumlich Auflösung

zu gewährleisten. Neben der bereits beschriebenen 2D-Widerstandstomografie, die von der Erdoberfläche aus eingesetzt wird, sollen die Geschwindigkeiten der seismischen Wellen durch tomografische Inversionsverfahren bestimmt werden. Diese Inversionsverfahren basieren auf der Durchstrahlung des Untersuchungsobjektes aus verschiedenen Richtungen.

wenigen Strahlen durchquert, jedoch kann man durch Anregung in einer Bohrung in der Deichmitte die Überdeckung auf das erforderliche Maß steigern. Durch Zusammensetzen von Aufstellungen wie in Abbildung 2 mit kurzen Querprofilen (s. Abb. 3) wird die Ableitung von 3D-Modellen des Deiches und seines Untergrundes möglich.

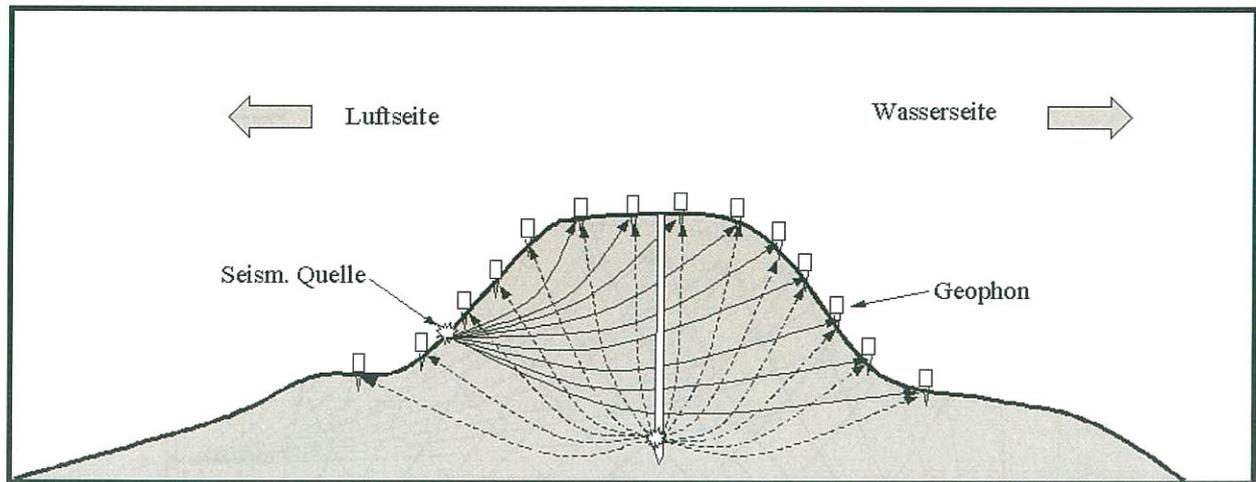


Abb. 3

Mögliches Meßschema für die Untersuchung eines Deichquerschnitts. Die Empfänger (Geophone) werden quer zur Deichachse auf der Oberfläche verteilt. Im Bild ist nur eine Quellposition an der Oberfläche gezeigt, je nach Anforderung werden die Anregungspunkte gleichmäßig an der Oberfläche verteilt und eventuell durch Anregung in einer zentralen Bohrung ergänzt.

Dabei soll jeder Punkt von mehreren Strahlen aus möglichst allen Richtungen durchlaufen werden. Anders als in der Medizin kann in der Geophysik nur selten eine Durchstrahlung von allen Seiten erfolgen, man muß sich also mit mehr oder weniger vollständigen Beobachtungssystemen behelfen, bei deren Planung ökonomische Überlegungen eine wichtige Rolle spielen. In Abbildung 2 ist eine Variante der Datenaufnahme gezeigt, bei welcher die Aufnehmer (Geophone) auf der Erdoberfläche zwischen zwei Bohrungen platziert werden. Die Anregung der seismischen Wellen erfolgt in verschiedener Tiefe in den Bohrungen. Diese Anregungsart ist zu bevorzugen, da mehr hochfrequente Signalenergie angeregt wird und damit die räumliche Auflösung verbessert wird. Gleichzeitig werden die wichtigsten Störsignale, die Oberflächenwellen, unterdrückt. Die Überdeckung und damit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse nimmt mit der wachsenden Tiefe und Entfernung von den Bohrungen ab. Bei der Versuchsplanung müssen also Bohrtiefe und Abstand zwischen den Bohrungen entsprechend der Aufgabenstellung festgelegt werden.

In Abbildung 3 ist eine weitere mögliche Versuchsanordnung skizziert, die ohne Bohrungen auskommt. Die Geophone werden quer zur Deichachse an der Oberfläche aufgestellt. Die Quelle "wandert" durch die Geophonauslage, d. h. die Anregung erfolgt an verschiedenen Positionen auf der Deichoberfläche. Von Vorteil ist, daß die Messungen praktisch zerstörunglos erfolgen, dafür müssen eine etwas geringere räumliche Auflösung und Schwierigkeiten in der Datenbearbeitung durch starke Oberflächenwellen in Kauf genommen werden. Wieder wird der untere Teil des Deiches nur von

Zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeiten wird die Laufzeit, d. h. die Zeit, in welcher die Welle von der Quelle auf ihrem mehr oder weniger stark gebogenen Laufweg bis zum Empfänger benötigt, gemessen, daher die Bezeichnung "Laufzeittomografie". Prinzipiell ist es möglich und wünschenswert, die Amplituden der aufgezeichneten Wellen in die Inversion mit einzubeziehen, jedoch steigt dabei der Bearbeitungsaufwand unproportional.

Während die Laufzeiten der schnelleren Längswellen relativ einfach bestimmt werden können, sind die Scherwellen durch die Überlagerung mit den Längswellen schlechter in den Aufzeichnungen zu erkennen. Bisher wurden deshalb zeit- und arbeitsaufwendige Verfahren zur gezielten Anregung von Scherwellen eingesetzt. Mit neuentwickelten Spezialgeophonen ist es möglich, die Scherwellen bei der Aufzeichnung von den Längswellen zu trennen, so daß in **einem Arbeitsgang sowohl Längs- als auch Scherwellen** aufgezeichnet werden können.

Ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zum praktischen Einsatz der Laufzeittomografie stellt die Verfügbarkeit von einfach zu handhabenden Bohrlochquellen für Bohrungen kleiner Durchmesser dar. In Abbildung 4 ist eine solche Quelle (IBS-36 von Geo-Meßtechnik Bad Salzdetfurth) zu sehen, die in ein Rammkernsondiergestänge (36 mm) integriert werden kann. Dadurch sinken sowohl die Kosten für die Bohrarbeiten als auch die am Untersuchungsobjekt entstehenden Schäden. Gleichzeitig können die geophysikalischen

Arbeiten mit einer Rammkernsondierung und der geologische Beschreibung der durchbohrten Sedimente verbunden werden.

Die **geophysikalische Inversion** der anfallenden Datenmengen stellt hohe Anforderungen an die Rechenleistung und die graphischen Möglichkeiten der eingesetzten Hard- und Software, die bis vor wenigen Jahren nur mit entsprechend teuren Rechnersystemen zu befriedigen waren. Erst durch die enorme Leistungssteigerung und den Preisverfall auf dem Gebiet der Personalcomputer und Workstation kann das vorgestellte Verfahren mit wirtschaftlichem Effekt angewendet werden.

dargestellten Meßschema, d. h. in vier Rammkernsondierungen wurde mit Hilfe der IBS-36 angeregt. An der Erdoberfläche wurden 40 Vertikalgeophone um die jeweils aktive Sondierung aufgestellt. Der Abstand zwischen den Bohrungen betrug 20 m, zwischen den Geophonen < 1 m und zwischen den Anregungspunkten in den Bohrungen $< 0,5$ m. Gemessen wurde in quartären Lockergesteinen (Sande, Geschiebemergel) in einem Gebiet südlich von Berlin. Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt eine deutliche Differenzierung der Lockergesteine, Zonen hoher Geschwindigkeiten (0,5-1,0 km/s) können von Zonen mit niedrigen Geschwindigkeiten (0,2-0,5 km/s) unterschieden werden.

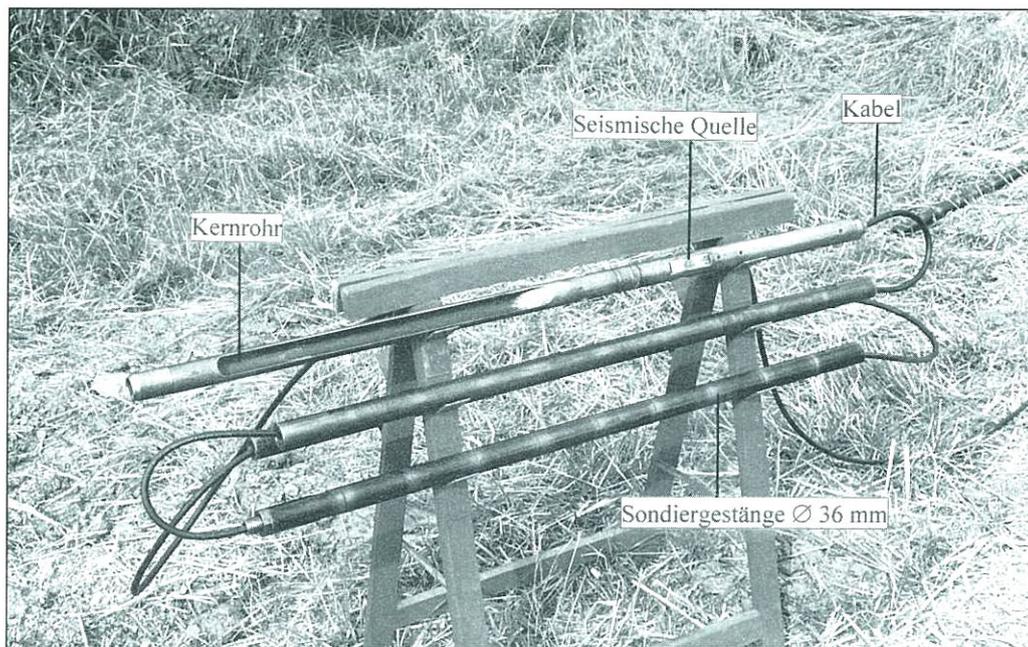


Abb. 4

Seismische Quelle IBS-36, eingebaut in eine Rammkernsonde ($\varnothing 36$ mm). Die Steuerung und Energieversorgung erfolgen durch Kabel von der Erdoberfläche. Mit freundlicher Genehmigung durch Geo-Meßtechnik Bad Salzdetfurth.

Die ersten Schritte zur Inversion, d. h. die Kontrolle und Bearbeitung der aufgezeichneten Daten bis hin zur Laufzeitbestimmung der P- bzw. S-Welle (Abb. 5) erfolgt mit einem der üblichen Programmpakete zur Bearbeitung seismischer Daten. Wichtig ist, daß diese Software über ausreichende Möglichkeiten zur interaktiven Datenbearbeitung verfügt, um eine ständige Kontrolle durch einen erfahrenen Bearbeiter zu gewährleisten. Bei der Laufzeitbestimmung durch rein automatische Verfahren können unvermeidbar große Fehler auftreten.

Als nächster Schritt erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung durch tomografische Inversionsverfahren. Meist werden iterative Verfahren bevorzugt, bei denen das Geschwindigkeitsmodell immer besser an die gemessenen Laufzeiten angepaßt wird. Wieder ist die Interaktion zwischen der Software und dem Bearbeiter bei der Wahl der Modellparameter und bei Entscheidung zum Abbruch der Berechnungen nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen wichtig.

Abbildung 6 zeigt das Resultat einer Laufzeittomografie für die Längswellen. Gearbeitet wurde nach dem in Abbildung 2

Auf Grund von Erfahrungswerten und Literaturdaten (z. B. SCHÖN 1969) können Regeln für die qualitative Interpretation festgelegt werden, z. B. sprechen hohe Längswellen-Geschwindigkeiten und niedrige Widerstände für eine wasser-gesättigte Zone. Werden in dieser Zone geringe Scherwellen-Geschwindigkeiten festgestellt, muß mit einer "Aufweichung" und einer entsprechend veringerten Standfestigkeit gerechnet werden. Die KGLT bietet zusätzlich die Möglichkeit, die Interpretation punktuell an den Kernen der Rammkernsondierungen zu verifizieren. Gerade diese Kombination aus punktuellen geologischen Aufschlüssen und den berechneten Verteilungen mehrerer geophysikalischer Parameter stellt einen der wichtigsten Vorzüge des genannten Verfahrens dar.

Von vielen Autoren (z. B. MILITZER et al. 1986) wird auf die Schwierigkeiten hingewiesen, eine allgemeingültige Korrelation zwischen den geophysikalisch bestimmten Bodenparametern einerseits und den mit herkömmlichen Verfahren unter statischen Bedingungen (Lastplattenversuch etc.) be-

stimmten bodenmechanischen Eigenschaften andererseits abzuleiten. Deshalb muß man sich für die quantitative Interpretation, d. h. die Berechnung von bodenmechanischen Parametern aus den geophysikalischen Werten, mit empirischen Beziehungen behelfen. Diese Beziehungen gelten jedoch nur unter bestimmten Bedingungen und weisen immer gewisse Schwankungsbreiten auf.

Im Falle einer Deichuntersuchung verbessern sich Möglichkeiten der quantitativen Interpretation durch die Zugehörigkeit des Materials zu einer begrenzten Anzahl von Bodenarten (Lockersedimente mit unterschiedlichen Anteilen an bindigem und organischem Material), durch die relativ konstanten Lagerungsbedingungen (künstliche Aufschüttungen ohne nachfolgende Überdeckung mit anderen Sedimenten) und durch die bereits erwähnten Zusatzinformationen aus den Rammkernsondierungen. Im Rahmen von Testmessungen an realen Objekten muß geklärt werden, ob die so bestimmten Werte, eventuell unter Berücksichtigung eines additiven Sicherheitselementes, als Bemessungswert für Standsicherheitsberechnungen (z. B. KNOLL & LENDEL 1998) genutzt werden können.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Mit der Entwicklung neuer und kleiner Scherwellenquellen und Scherwellengeophonen sind für die Untersuchung des oberflächennahen Untergrundes mit Scherwellenseismik neue Möglichkeiten eröffnet worden. Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe durch seismische Tomografie mit kombinierten Scher- und Transversalwellen-Durchschallungen Informationen über den Aufbau und näherungsweise

über die bodenmechanischen Eigenschaften (z. B. Schermodul) oberflächennaher Bodenbereiche Aufschluß gewonnen werden können. Dazu wird um eine Scherwellenquelle ein Raster aus P- und S-Wellengeophonen angeordnet und die entsprechenden Laufzeitenverteilungen können für unterschiedliche Quellentiefen aufgezeichnet werden. Auf der Grundlage theoretischer Analysen wird eine Auswertesoftware entwickelt und damit Aufschluß über die Verteilung der Schermoduln und der Dichteverteilung im Untergrund erreicht.

Bei Anwendung dieses Verfahrens auf Deichbauwerke kann ohne wesentliche Eingriffe in das Dammbauwerk selbst relativ rasch der stoffliche Aufbau und der geotechnische Zustand eines Dammschnittes abgeschätzt werden. Wenn das Verfahren von Deichabschnitten mit bekannten Verhältnissen ausgeht, kann so relativ rasch eine Einteilung des Deiches in Bereiche mit unterschiedlichen Festigkeitszuständen vorgenommen und somit Bereiche mit vorrangigem Sanierungsbedarf ermittelt werden.

Für die Schwachstellendiagnose an den über hundert Kilometer langen Flußdeichen im Lande Brandenburg müssen schnelle, flächendeckende Verfahren (2D-Widerstandstomografie, Common-Offset-Seismik) mit genaueren Untersuchungen an auffälligen Abschnitten kombiniert werden.

Mit der Kombinierten Geophysikalischen Lockergesteinstomografie (KGLT) bietet sich die Möglichkeit, auch größere Deichabschnitte zu erkunden und zu bewerten. Die KGLT umfaßt die 2D-Widerstandstomografie mit geringen Elektrodenabständen (1 m) und eine Verbindung aus Längswellen- und Scherwellen-Laufzeitomografie. Für die seismische

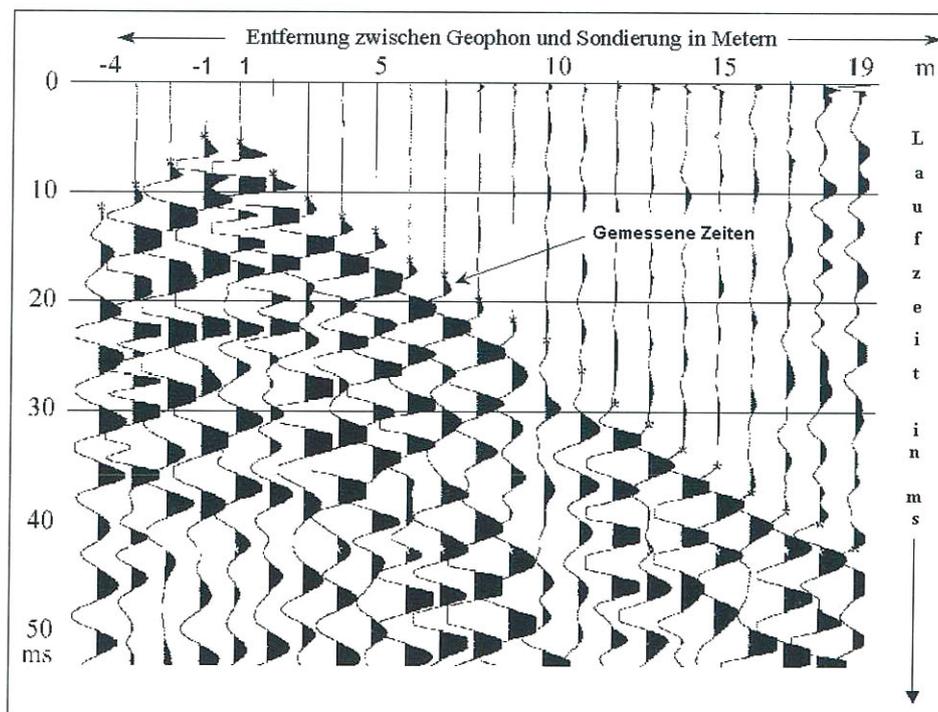


Abb. 5

Beispiel für eine seismische Aufzeichnung. Mit wachsender Entfernung vom Bohrlochmund (horizontale Achse) wachsen auch die Laufzeiten. Gemessen wurden die mit kleinen Sternen gekennzeichneten Laufzeiten der direkten P-Welle.

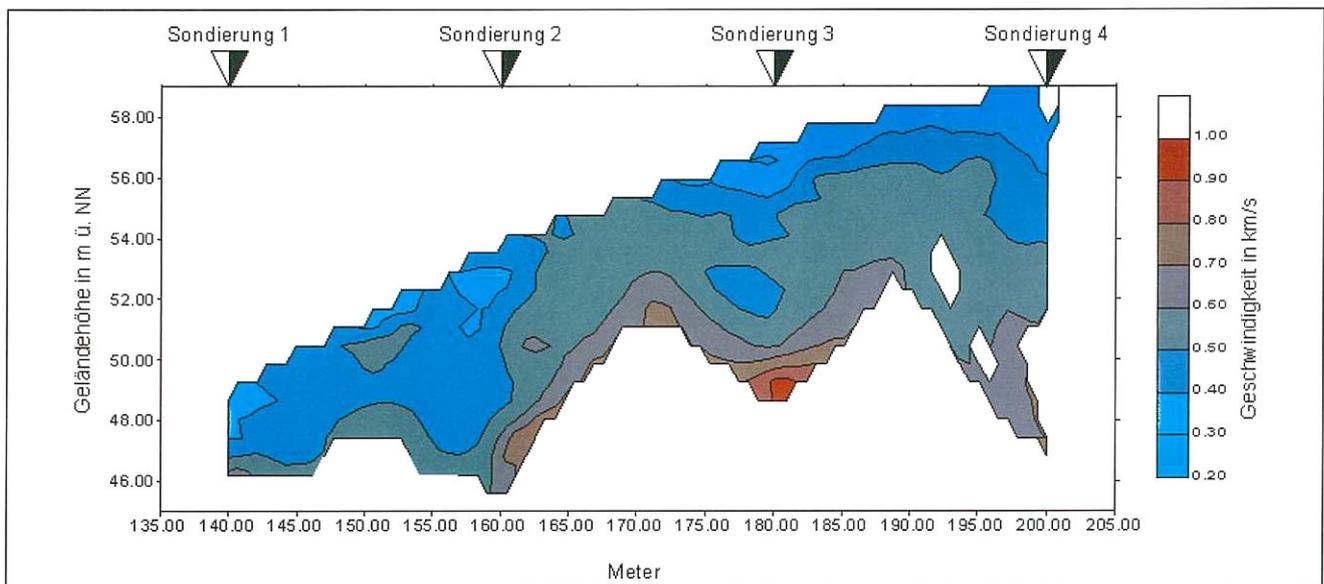


Abb. 6

Ergebnis der tomografischen Inversion der P-Wellen-Laufzeiten. Erkennbar ist die deutliche Differenzierung der anstehenden eiszeitlichen Lockergesteine in Bereiche niedriger (0,2 - 0,5 km/s) und hoher (0,5 - 1,0 km/s) Geschwindigkeiten.

mischen Messungen werden neuentwickelte Bohrlochquellen für kleine Bohrlöcher und spezielle Geophone zur getrennten Aufzeichnung von Längs- und Scherwellen genutzt.

Durch die Verknüpfung dreier, voneinander unabhängiger geophysikalischer Werte mit den punktuellen Aussagen von Rammkernsondierungen steigt die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich und es können Zonen mit möglichen Standfestigkeitsproblemen lokalisiert werden. Die Entwicklung der angepaßten Meßtechnik ist praktisch abgeschlossen, so daß bereits im Frühjahr 1998 Testmessungen an realen Objekten durchgeführt werden können.

6. Danksagung

Der Kern der Forschungsarbeiten ist als Fördervorhaben 97294590F im Rahmen der Produkt- und Verfahrensinnovation beim MWMT Brandenburg beantragt. Ein Teil der Forschungsarbeiten wurde in Kooperation mit der Universität Potsdam durchgeführt. Wir danken Frau Dr. E. Lück und vor allem Herrn Dr. M. Eisenreich für die gute Zusammenarbeit. Herrn Dr. H.A.K. Edelman (Hannover) und Herrn E. Nolte (GEO-MESSTECHNIK Bad Salzdetfurth) sei für die Anregungen und die Unterstützung während der praktischen seismischen Messungen und der Datenbearbeitung gedankt.

Literatur

BRANDT, ST. & CH. RICHTER (1997): Komplexe geophysikalischer Untersuchungen zum Aufbau von Flußdeichen und deren Vorländer.- Vortrag, gehalten auf der 6. Fachtagung des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg zum Thema „Ingenieurgeologische Beiträge Standsicherheit von Flußdeichen“ am 28.10.1997 in Potsdam, s. dieses Heft, S. 43

DIETRICH, R. A. (1997): Numerische Modellierung von Sickerwasserströmungen in gesättigten und ungesättigten Deichregionen zur Beurteilung der Standsicherheit von Deichen. - Vortrag, gehalten auf der 6. Fachtagung des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg zum Thema „Ingenieurgeologische Beiträge zur Standsicherheit von Flußdeichen“ am 28.10.1997 in Potsdam.

DRESEN, L., GEBRANDE, H., HARIJES, H.-P., HUBRAL, P. & H. MILLER (1985): Seismische Verfahren. Angewandte Geowissenschaften, Bd. II, herausgegeben von F. Bender. S. 156-298, Stuttgart (Enke)

KRÜGER, F. (1997): Schadensbilder und Deichverteidigung während der Hochwassersituation 1997 an der Oder. - Vortrag, gehalten auf der 6. Fachtagung des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg zum Thema „Ingenieurgeologische Beiträge zur Standsicherheit von Flußdeichen“ am 28.10.1997 in Potsdam, s. dieses Heft, S. 15

MILITZER H., SCHÖN, J. & U. STÖTZNER (1986): Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - 419 S., Leipzig (VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie)

SCHÖN, J. (1969): Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen in Lockerböden und ihre Beziehung zu bodenmechanischen Kennwerten. - Freiburger Forschungsheft C 250, Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie) - (1983): Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. - 405 S., Stuttgart (Enke)

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Peter Knoll
Dipl.-Ing. Rainer Herbst
Dipl.-Geophys. DJohannes Preuß
GEO-DYN Gesellschaft für geophysikalisches Messen und geotechnische Untersuchungen mbH
Potsdamer Straße 18 A
14513 Teltow