

Nutzen der TDR-Meßtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik

A. Scheuermann¹, S. Schlaeger², R. Becker³, W. Schädel³, R. Schuhmann⁴

¹ Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe

² Institut für Technische Chemie, WGT am Forschungszentrum Karlsruhe

³ Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe

⁴ Institut für Meteorologie und Klimaforschung am Forschungszentrum Karlsruhe

ZUSAMMENFASSUNG: Bereits seit vielen Jahren ist die Time Domain Reflectometry (Zeitbereichsmessung, auch kurz TDR genannt) ein weitverbreitetes Verfahren zur indirekten Bestimmung der Feuchte in Böden, aber auch in anderen Materialien. In der Agrarwissenschaft ist dieses Verfahren schon lange etabliert, während man in der Geotechnik mit der TDR-Methode quasi Neuland betritt. Bis vor wenigen Jahren war die Feuchtemeßtechnik auf relativ kurze Sonden (bis max. 1 m) beschränkt, und ihre Genauigkeit war immer umstritten. Jedoch haben die Fortentwicklung der Meßtechnik und Verbesserungen in den Auswertungsmethoden die TDR-Methode zuverlässiger und breiter anwendbar gemacht. Um die TDR-Methode sowohl auf der Seite der Meßtechnik als auch auf der Seite der Anwendung weiterzuentwickeln, haben sich Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen der Universität Karlsruhe und des Forschungszentrums Karlsruhe in der sogenannten Soil Moisture Group (SMG) zusammengefunden. In dem vorliegenden Beitrag werden unterschiedliche Projekte aus der SMG vorgestellt, in denen die TDR-Methode ihren Einsatz gefunden hat; vorab wird eine kurze Einführung in die TDR-Methode präsentiert.

1 Einführung

Viele Fragestellungen der Geotechnik, der Bodenmechanik, aber auch der Hydrologie sind verknüpft mit Wassergehaltsänderungen in Bodenstrukturen bzw. mit potentiell kritischen Feuchte- oder Strömungssituationen. So hat sich beispielsweise die Untersuchung des hydraulischen und mechanischen Verhaltens ungesättigter Böden als herausragende Aufgabe des geotechnischen Ingenieurwesens herausgestellt. Sei es das Schrumpfen bindiger Böden bei sinkenden Wassergehalten, der Verlust der Standsicherheit von Hängen im Falle von ergiebigen Niederschlägen oder die Verflüssigung von Böden bei Bodenumlagerungen, all diese Problemstellungen hängen mit Wassergehaltsänderungen und dem dadurch resultierenden mechanischen Verhalten zusammen. Doch auch in der Hydrologie spielt die aktuelle Feuchtesituation eine wichtige Rolle. So wird die Transportgeschwindigkeit umweltbelastender Stoffe bei der Wasserinfiltration von Böden durch die vorherrschende Feuchte beeinflusst (da die hydraulische Leitfähigkeit von ihr abhängt), auch der Oberflächenabfluß bei Regenereignissen wird durch den Wassergehalt des Oberbodens gesteuert.

Vor diesem Hintergrund ist es immer wichtiger geworden, Wassergehalte durch geeignete Meßeinrichtungen in situ, aber auch im Labor zuverlässig und in einer ausreichenden Genauigkeit bezüglich der zu erfassenden Meßwerte sowie auch der zeitlichen Auflösung bestimmen zu können. Zerstörungsfrei ist dies allerdings nur durch indirekte Meßverfahren zu realisieren, von denen die Time Domain Reflectometry (TDR) nur eine von mehreren ist.

Eine Gruppe Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen der Universität Karlsruhe und des Forschungszentrums Karlsruhe haben sich in der Soil Moisture Group (SMG) zusammengefunden, um die TDR-Methode zur Bestimmung der Feuchte sowohl auf der Seite der Entwicklung, aber auch in Hinsicht auf die meßtechnische Anwendung voranzutreiben. Im Vordergrund steht hierbei die Weiterentwicklung und Umsetzung der orts aufgelösten Messung der Feuchte entlang von Meßsonden, jedoch auch die integrale Feuchtemessung kommt in Projekten innerhalb der SMG zur Anwendung. Nachfolgend wird die TDR-Meßtechnik vorgestellt, und eine Auswahl von Anwendungen innerhalb der SMG wird präsentiert, um von den Erfahrungen zu berichten, die Möglichkeiten der TDR-Meßtechnik auszuloten und andererseits deren Grenzen aufzuzeigen.

2 Messung der Bodenfeuchte mit TDR

2.1 Dielektrische Eigenschaften des Bodens

Der Boden ist ein typisches poröses Medium und setzt sich aus einer festen Bodenmatrix, dem Bodenwasser (in unterschiedlichen Bindungsformen) und der Bodenluft zusammen (vgl. Bild 1).

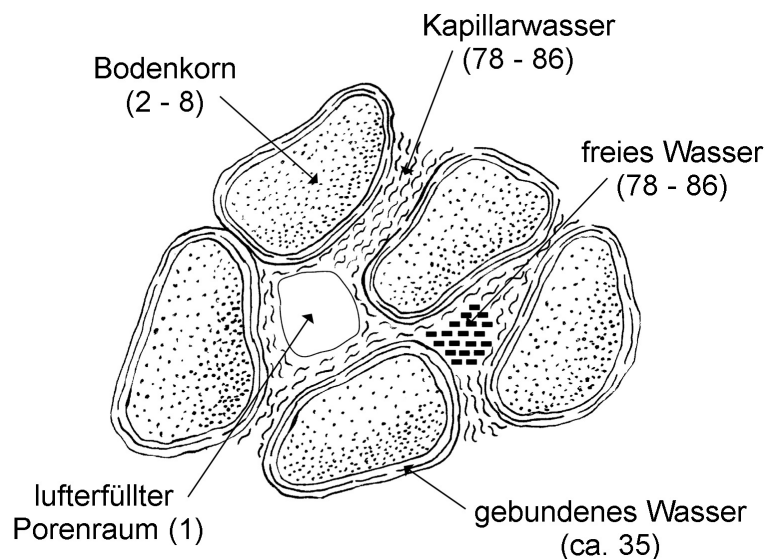


Bild 1: Dielektrische Eigenschaften (vgl. Zahlenwerte für die DK) der Bodenbestandteile

Die Anteile der Bestandteile variieren sowohl räumlich aufgrund unterschiedlicher Bodenzusammensetzung und Dichte als auch zeitlich aufgrund wechselnder Feuchte. Bei der Bestimmung des Wassergehaltes im Boden kann man sich die Tatsache zu Nutze machen, daß diese einzelnen Bestandteile deutlich unterscheidbare dielektrische Eigenschaften haben (siehe Bild 1), welche sich auch auf die Gesamtdielektrizität der Bodenmischung auswirken [1]. Aus der Dielektrizität (DK) eines Bodengemisches kann man daher sehr gut Rückschlüsse auf den Wasseranteil im Boden ziehen.

2.2 TDR-Feuchtesensoren

Mittels einer direkten Messung ist es nicht möglich, die DK eines Bodens zu bestimmen. Jedoch haben die dielektrischen Eigenschaften des Bodens Auswirkungen auf die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle, welche entlang eines Wellenleiters den Boden durchläuft. Diese Auswirkungen kann man mit Hilfe unterschiedlicher Methoden messen und aus ihnen Rückschlüsse auf die DK und somit die Feuchte des Bodens ziehen. Die einfachste Methode ist die Bestimmung der Laufzeit t entlang einer Sonde der Länge l . Diese Laufzeit – und mit ihr die mittlere Kapazität C des Bodens – steht in direktem Verhältnis zu der DK (ϵ_r) des die Sonde umgebenden Materials.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c_0 t}{2l} \right)^2, \quad t = 2l\sqrt{LC} \quad \text{mit:}$$

c_0 = Lichtgeschwindigkeit ($2,9979 \cdot 10^8$ m/s)
 L = Induktivität [H/m]
 C = Kapazität [F/m]
 t = Gesamtlaufzeit des Signals [s]
 l = Länge des Sensors [m]
 ϵ_r = Dielektrizitätskonstante DK [-]

Diese grundlegenden Zusammenhänge gelten für alle Sonden, möchte man die mittlere DK aus der Laufzeit bestimmen. Unbeschichtete Sonden können jedoch nur bis zu einer Länge von 1 m ausgebildet werden. Möchte man größere Strecken untersuchen, muß die Dämpfung der Welle entlang der Leitungslänge verringert werden. Am besten eignet sich dazu eine Isolierung um die Leiter, die allerdings nicht so stark sein darf, daß der Boden keinen Einfluß mehr auf die Wellenausbreitung hat. Im Falle von erdverlegbaren Sensoren hat sich eine dünne Beschichtung aus PE oder PVC bewährt. Bei sog. Rohrsonden wird das Material um das Rohr herum durch die Rohrwandung, die hier als Isolierung dient, hindurch gemessen. Und um von den starren Stabsonden wegzukommen, wurde am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK, Forschungszentrum Karlsruhe) ein Flachbandkabel entwickelt, das beliebig abgelängt und zudem flexibel verlegt werden kann. Auch dieses Sensorkabel besitzt eine Isolierung aus PE. In solchen Fällen muß diese zusätzliche Schicht allerdings auch bei der Bestimmung der DK bzw. der Feuchte aus der Laufzeit mit berücksichtigt werden. Hierzu sind für jeden Sondentyp Kalibriermessungen durchzuführen.

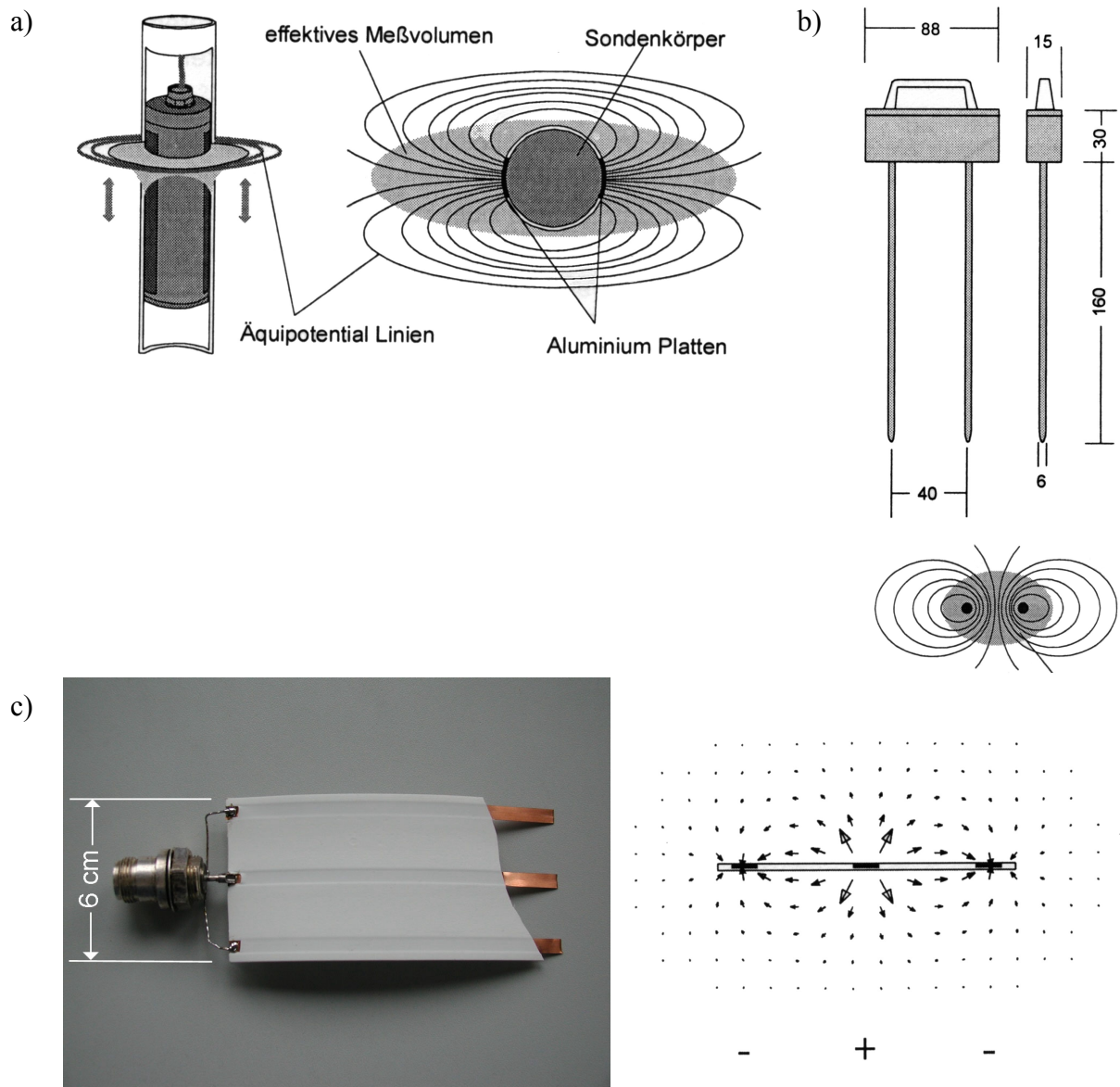


Bild 2: Gängige Sondentypen und deren Meßvolumen (grau hinterlegt) a) Rohrsonde und b) Zweistabsonde (aus [2]), c) am Institut für Meteorologie und Klimaforschung entwickeltes Flachbandkabel und elektrische Feldstärkenverteilung (aus der das Meßvolumen abgeleitet werden kann) bei Anregung in Luft

Aus der gegebenen Sensorgeometrie ergibt sich die Größe des zur Verfügung stehenden Meßvolumens (vgl. Bild 2). Bei unbeschichteten Stabsensoren entspricht der Durchmesser des Meßvolumens ungefähr dem zweifachen Abstand der Sensorleitungen. Bei zunehmender Isolierung verkleinert sich das Volumen.

2.3 Die Time Domain Reflectometry

In der TDR-Technologie wird ein Rechteckimpuls in den Sensor eingespeist. Dieser breitet sich entlang des Sensors aus und wird an Orten, an denen sich die Leitungseigenschaften

ändern (z.B. Sensoranfang und -ende) teilweise reflektiert. Die Reflexionen laufen auf dem Wellenleiter wieder zurück und können als Summe zum Eingangssignal in Abhängigkeit von der Zeit gemessen werden (siehe Bild 3). Hierzu wird neben einem Pulsgenerator ein Sampling-Oszilloskop benötigt. Beide Komponenten sind z.B. in dem Kabeltester vom Typ 1502B/C der Firma Tektronix vereinigt. Bei der herkömmlichen TDR-Methode wird bisher nur die Laufzeit zwischen Sensoranfang und -ende ausgewertet; sie liefert eine mittleren DK bzw. eine mittlere Bodenfeuchte. Die Reflexionsmessung beinhaltet aber wesentlich mehr Informationen, die zu einer räumlichen Auflösung der Kapazität und damit der Bodenfeuchte entlang des Sensors genutzt werden kann.

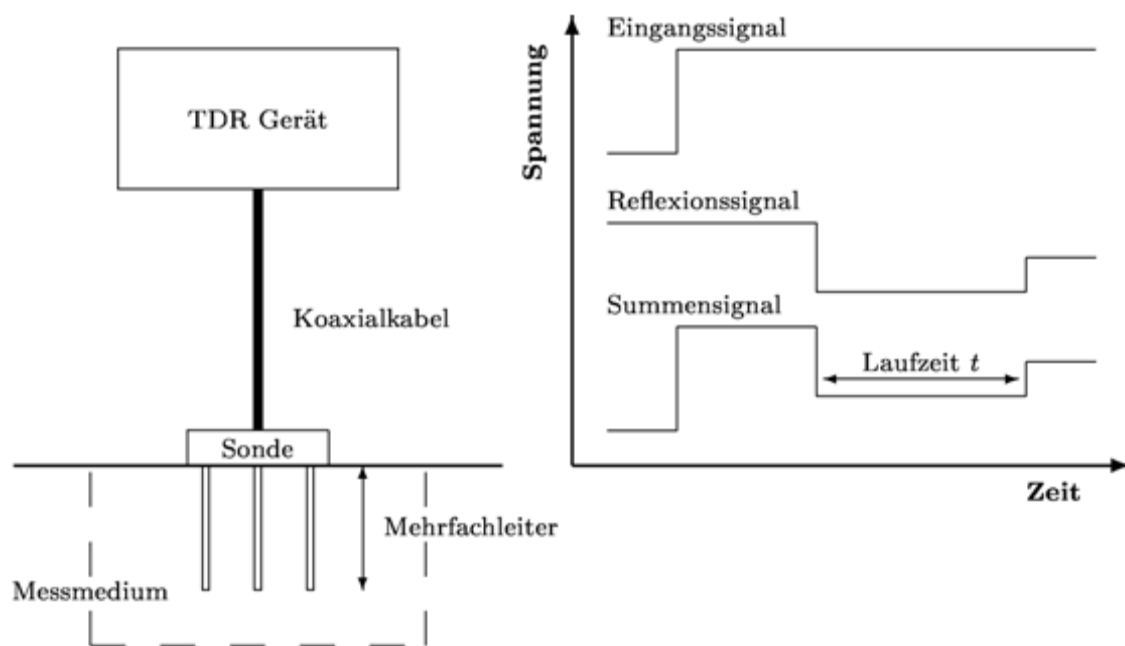


Bild 3: Konventionelle TDR-Feuchtemessung und Bestimmung der Laufzeit aus dem Meßsignal (schematisch, aus [3])

2.4 Rekonstruktion des Feuchteprofils

Die Telegraphengleichung (vgl. Bild 4) beschreibt als elektrisches Modell einer Sensorleitung die Ausbreitung einer elektrischen Welle in Abhängigkeit der konstanten Leitungseigenschaften (Induktivität L und Widerstand R) und der ortsabhängigen Eigenschaften (Kapazität C und Dämpfung G). D.h. neben der Kapazität beeinflusst auch die Dämpfung bzw. die spezifische elektrische Leitfähigkeit des Bodens die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in einem Sensor. Mit Hilfe einer zusätzlichen Reflexionsmessung von der entgegengesetzten Seite des Sensors ist es möglich, beide Bodenparameter simultan ortsaufgelöst über eine inverse Modellierung zu bestimmen [3, 4]. Als Ergebnis erhält man die Umgebungsparameter $C(x)$ und $G(x)$, die auch von der Isolierung des Sensors beeinflusst

werden. Für eine ausreichend gute räumliche Auflösung dieser beiden Parameter ist eine möglichst kurze Anstiegszeit des in die Sonde eintretenden Impulses sowie die maximale Anzahl von Samplingpunkten von entscheidender Bedeutung. Der Tektronix Kabeltester hat beispielsweise eine Anstiegszeit von 200 ps und eine Auflösung von 250 Samplingpunkten, was sich bisher als ausreichend erwiesen hat.

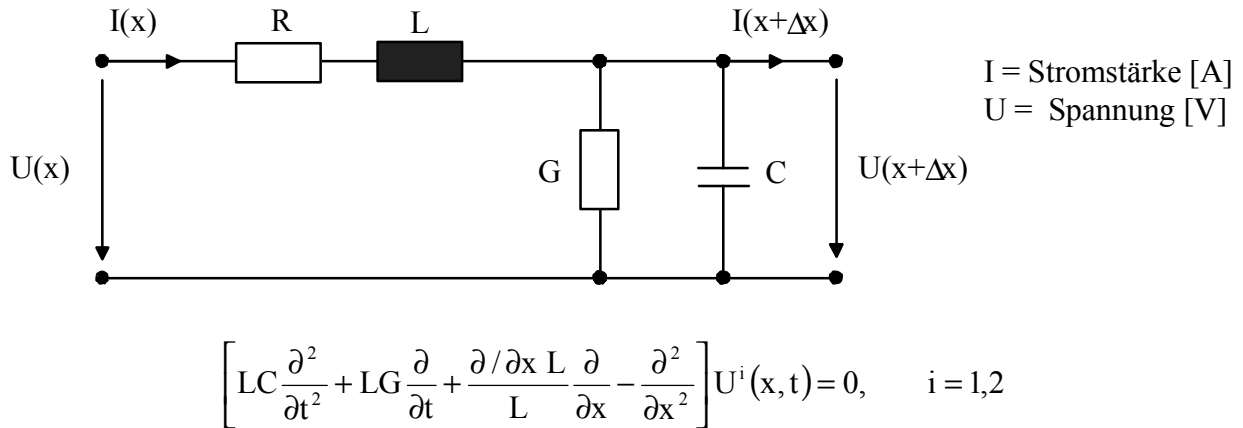


Bild 4: Ersatzschaltbild und Mathematische Modellierung einer Sensorleitung mit der Telegraphengleichung (vgl. [3])

Als nachfolgender Schritt wird in der Rekonstruktion die totale Kapazität $C(x)$ mit Hilfe eines Kapazitätsmodells in die Dielektrizität des umgebenden Materials umgerechnet. Für einen komplett in einem Material eingebetteten Sensor aus dem vorgestellten Flachbandkabel ergibt sich hierfür das Kapazitätsmodell aus Bild 5.

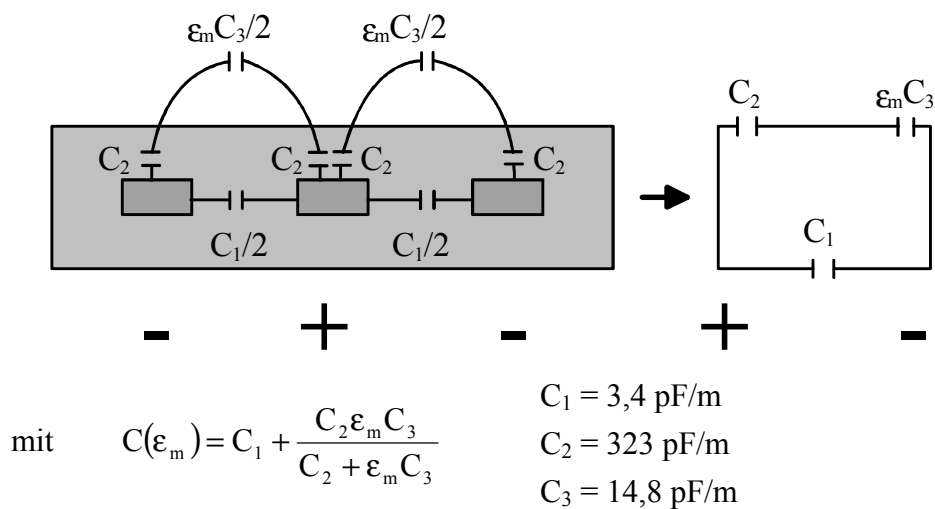


Bild 5: Querschnitt des dreiadrigen Flachbandkabels und sein elektrisches Ersatzschaltbild, darunter das dazugehörige Kapazitätsmodell mit den jeweiligen experimentell ermittelten Konstanten C_{1-3} (aus [7])

Im letzten Schritt muß die DK in den volumetrischen Wassergehalt umgerechnet werden. Dazu kann man sowohl Standardumrechnungen (vgl. hierzu [5]), aber auch material-spezifische Kalibrierfunktionen heranziehen. Unter Verwendung einer materialspezifischen Kalibrierung konnte im Vergleich zu unabhängig durchgeführten Feuchtemessungen eine mittlere Abweichung von ± 2 Vol.-% nachgewiesen werden [5] (vgl. Bild 6).

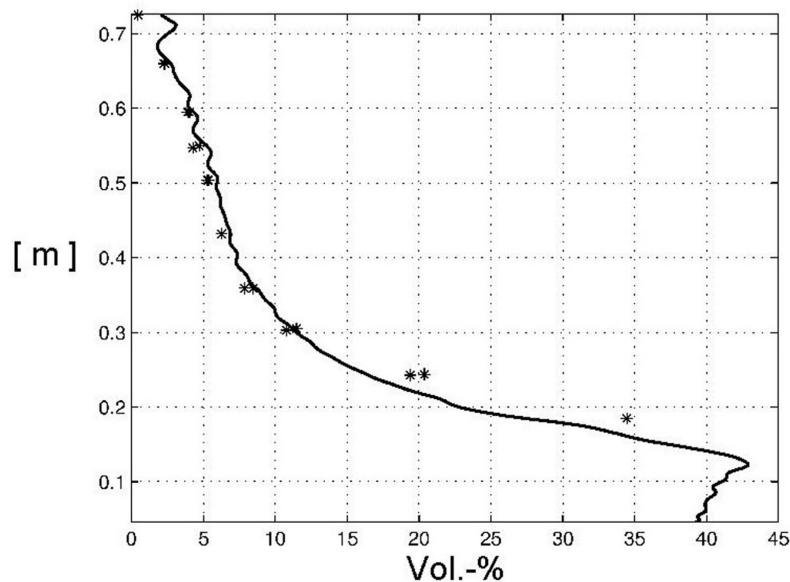


Bild 6: *Rekonstruierte Feuchtemessung entlang eines ca. 70 cm langen Flachbandkabels (Linie) im Vergleich zu punktuellen Feuchtemessungen mit der Ofentrocknungsmethode (Sternsymbole)[5]*

In den nachfolgenden Beispielanwendungen soll die Einsatzbreite der TDR-Meßtechnik dargestellt werden. Die Auswertungsmethoden wurden in den Beispielen dem jeweilig angestrebten Ziel angepaßt, so daß integral, aber auch orts aufgelöst die Feuchte ermittelt wurde. Hierbei kamen sowohl Stabsonden als auch das vorgestellte Sensorkabel zur Anwendung.

3 Feuchtemessung an einem naturmaßstäblichen Modelldeich

Die Methode der orts aufgelösten Feuchtemessung entlang von Kabelsensoren wurde großmaßstäblich erstmals vom Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe an einem Modelldeich auf dem Gelände der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe eingesetzt (vgl. Bild 7). Das Modell ist aus einem gleichförmigen Sand mit einer Körnung von 0,2 bis 2 mm aufgebaut und steht in einer Art Wanne aus einer wasser- und undurchlässigen Kunststoffdichtungsbahn. Aufgrund dieser Konstruktion wird das gesamte Wasser, das den Deich infiltriert, in einem Drän an der luftseitigen Böschung gesammelt und einer Meßeinrichtung zugeführt. Ziel der Untersuchung ist, den Einfluß einer Vorfeuchte-

verteilung im Innern eines Deiches auf die Infiltrationsdynamik im Falle eines Hochwassers quantitativ zu beschreiben. Hierfür wurde der Modelldeich zusätzlich zu den bereits vorhandenen Meßeinrichtungen mit 12 vertikal eingebrachten Kabelsensoren mit Längen zwischen 0,7 und 3 Metern instrumentiert. Das TDR-Gerät (Tektronix Kabeltester) sowie die Multiplexer (Relais für hochfrequente Signale) sind in einem feuchtedichten Aluminiumkoffer auf der Deichkrone fest installiert.



Bild 7: *Naturmaßstäbliches Deichmodell auf dem Gelände der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe während eines Einstauversuches im Dezember 2000 (Zustand stationärer Durchströmung)*

Die Datenerfassung und Steuerung des Meßsystems erfolgt über einen PC im Meßcontainer am luftseitigen Böschungsfuß. Mit diesem System ist es möglich, die Feuchteverteilung im Meßquerschnitt innerhalb von 5 Minuten aufzunehmen. Wassergehaltsänderungen mit einer Auflösung von 3 cm und einer mittleren Abweichung von $\pm 2\%$ (bezogen auf den Sättigungsgrad) – verglichen mit aufgezeichneten Ergebnissen eines unabhängigen Meßsystems – können so ermittelt werden (vgl. Bild 8). Die quantitative raumerfassende meßtechnische Beobachtung instationärer hydraulischer Vorgänge im Deichkörper wurde durch diese Meßtechnik erstmals ermöglicht.

Im Zuge der bereits erwähnten Untersuchung wurden einige Einstau- und Beregnungsversuche am Deichmodell durchgeführt (vgl. [4],[8],[9]). Bild 8 zeigt den Zustand der stationären Durchströmung bei einem Einstauversuch im Dezember 2000. Die Feuchte-

messungen wurden ortsauflösend rekonstruiert (vgl. Kapitel 2.4) und als Sättigungsverteilung in der Querschnittsfläche interpoliert. Auf der Wasserseite ist der Wasserstand im Becken eingezeichnet, und innerhalb des Deichkörpers ist die Lage der Sickerlinie eingetragen, wie sie sich aus den Porenwasserdruckmessungen an der Deichsohle abschätzen läßt. Zum Vergleich ist in Bild 8 für den gleichen Zeitraum eine mit einer Rohrsonde durchgeführte Messung dargestellt. Man erkennt, daß beide Messungen die ungefähre Lage der Sickerlinie gut wiedergeben. Wie sich auch aus der Ergebnisdarstellung ablesen läßt, erlaubt die Kabelsensormessung Beobachtungen unterhalb des Stauwasserspiegels, was für die Rohrsonden nicht zutrifft. Im Übrigen hat sich bei den Einstauversuchen herausgestellt, daß im durchströmten Bereich unterhalb der Sickerlinie keine volle Sättigung erreicht wird. Bis zu 15 % des Porenraumes verblieben luftgefüllt.

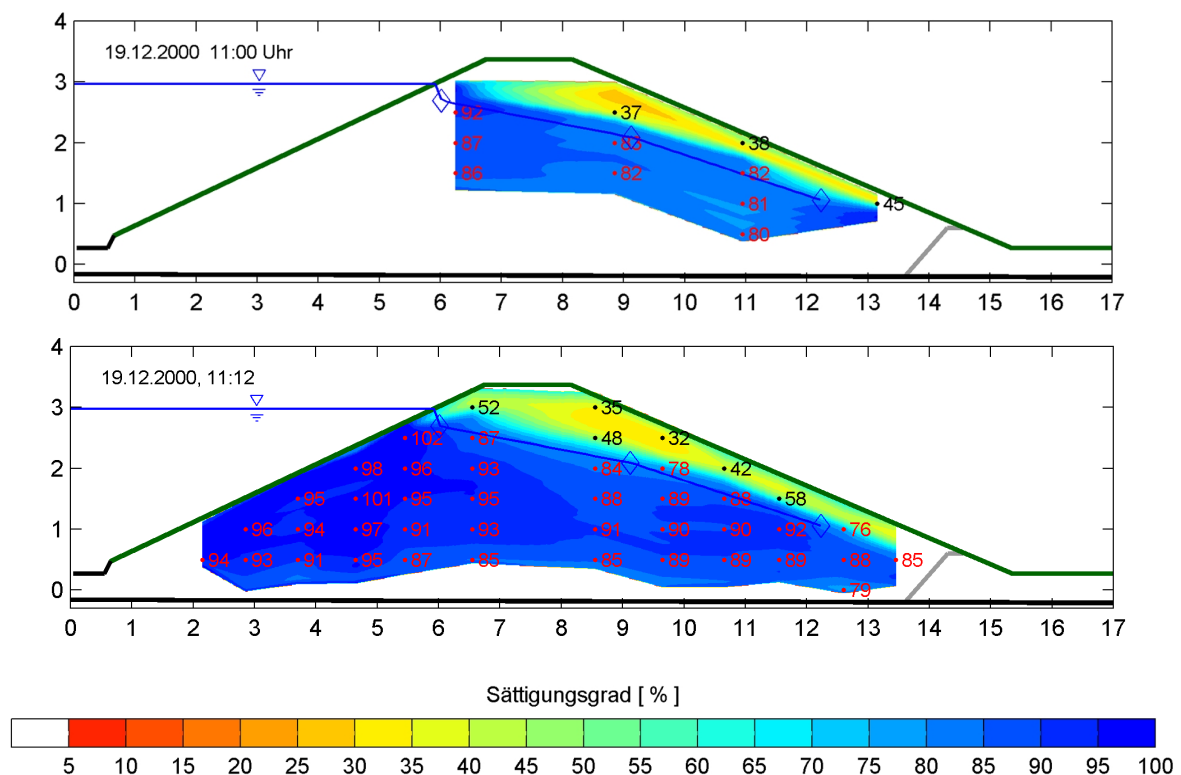


Bild 8: *Oben: Mit einer Rohrsonde gemessene und auf den Meßbereich Interpolierte Sättigungsverteilung. Unten: Mit den Kabelsensoren gemessene und interpolierte Sättigungsverteilung im Deichkörper während eines Einstauversuches im Dezember 2000. Die Punkte geben die Positionen der Kabelsensoren wieder, die daneben stehenden Werte wurden gemessen. Die Sickerlinie wurde aus Piezometermessungen in der Basis des Modells abgeleitet.*

Bei den mehrtägigen Beregnungsversuchen konnte beobachtet werden, daß trotz der massiven Beregnung – es wurde ein für Karlsruhe hundertjähriges Ereignis nachgestellt – keine vollständige Durchfeuchtung des Deichkörpers erreicht wurde (vgl. Bild 9). Vielmehr scheint

das Wasser im feuchten Bereich unterhalb der Böschungsoberfläche lateral abzufließen, so daß ein trockener Bereich im Deichkörper verbleibt. Darüber hinaus ermöglichte die vergleichende Auswertung der Meßinstrumente im Deichkörper den Nachweis von Fingering während der Beregnungsversuche. Noch bevor die Feuchtesensoren und auch Tensiometer Wassergehaltsänderungen aufzeichnen konnten, wurde ein steigender Wasserstand in der Basis des Modells durch Piezometermessungen aufgezeichnet.

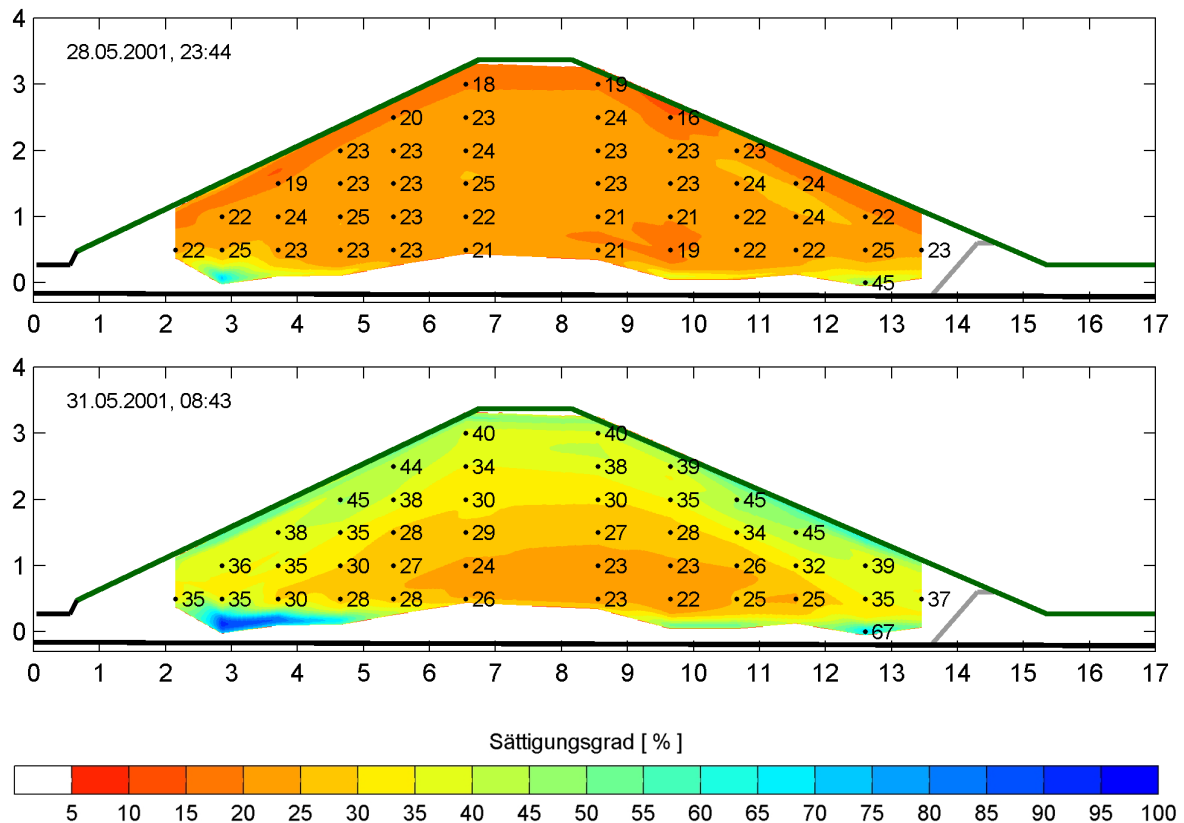


Bild 9: Mit den Kabelsensoren gemessene und interpolierte Sättigungsverteilung im Deichkörper vor (oben) und nach (unten) einem simulierten hundertjährigen Regenereignis für Karlsruhe (140 mm in 72 h).

Die Feuchtemessung mit den Kabelsensoren hat sich als hervorragendes Mittel zur Beobachtung instationärer hydraulischer Vorgänge erwiesen. Die Auswertung bzw. Rekonstruktion auf einem handelsüblichen PC ist relativ zeitaufwendig (für eine komplette Querschnittsmessung ca. 3-6 h). Aufgrund dieses großen zeitlichen Aufwandes für die Auswertung ist derzeit das vorgestellte Meßsystem für ein Echtzeitmonitoring nicht geeignet. Jedoch kann eine abgewandelte Auswertungsmethode, wie sie im Verlaufe noch vorgestellt wird, hier Abhilfe schaffen.

4 Bodenfeuchtemessung an hydrologischen Indikatorflächen

Ortsaufgelöste Bodenfeuchtemessungen in natürlich gewachsenen Böden konnten mit Hilfe von Zweistabsonden im Einzugsgebiet des Goldersbaches (Tübingen, Baden-Württemberg) realisiert werden. Mit geringer Störung der anstehenden pseudovergleyten Braunerde wurde vom Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe ein Meßcluster mit 46 vertikal eingebrachten Zweistabsonden aufgebaut. Die Fragestellung der Untersuchung lautet hierbei, ob kontinuierliche räumlich verteilte Online-Bodenfeuchte-Messungen prinzipiell zu einer Verbesserung der Hochwasserwarnung führen können.

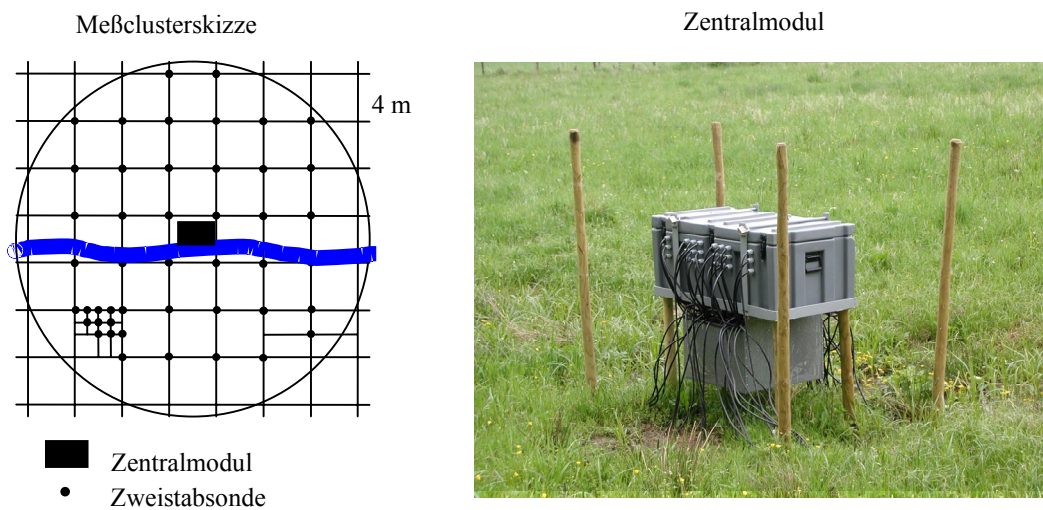


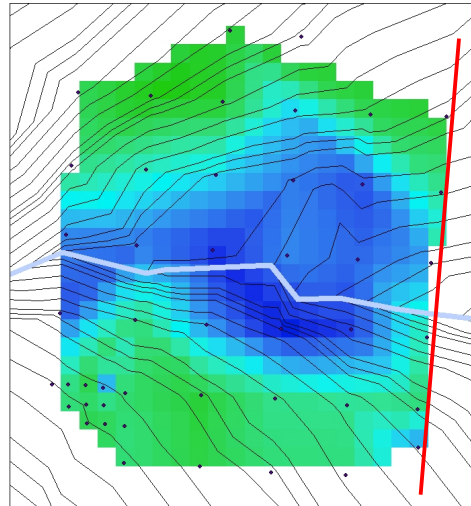
Bild 10: Links: Meßclusterskizze mit 46 Zweistabsonden und Zentralmodul (die blaue Linie stellt den Verlauf des Baches im Meßcluster dar); rechts: Zentralmodul im Meßgebiet Goldersbach

Die Hochwasserentstehung wird in kleinen Einzugsgebieten maßgeblich durch die Abflußbildung und Abflußkonzentration geprägt. Da die Abflußbildung der schnellen Abflußkomponenten hauptsächlich in den oberen Bodenhorizonten stattfindet, kommt dem Boden und dessen Infiltrationsfähigkeit eine wesentliche Bedeutung zu. Abhängig von Struktur, Textur und Bearbeitung des Bodens zeigt sich das Infiltrationsvermögen auch beeinflusst von der Vorsättigung. Während Struktur und Textur als quasi-stationär betrachtet werden können, ist die Vorsättigung zeitlich hoch dynamisch. Die Verbesserung der Hochwasserwarnung macht die Verbesserung der Erfassung dieses Prozesses unabdingbar.

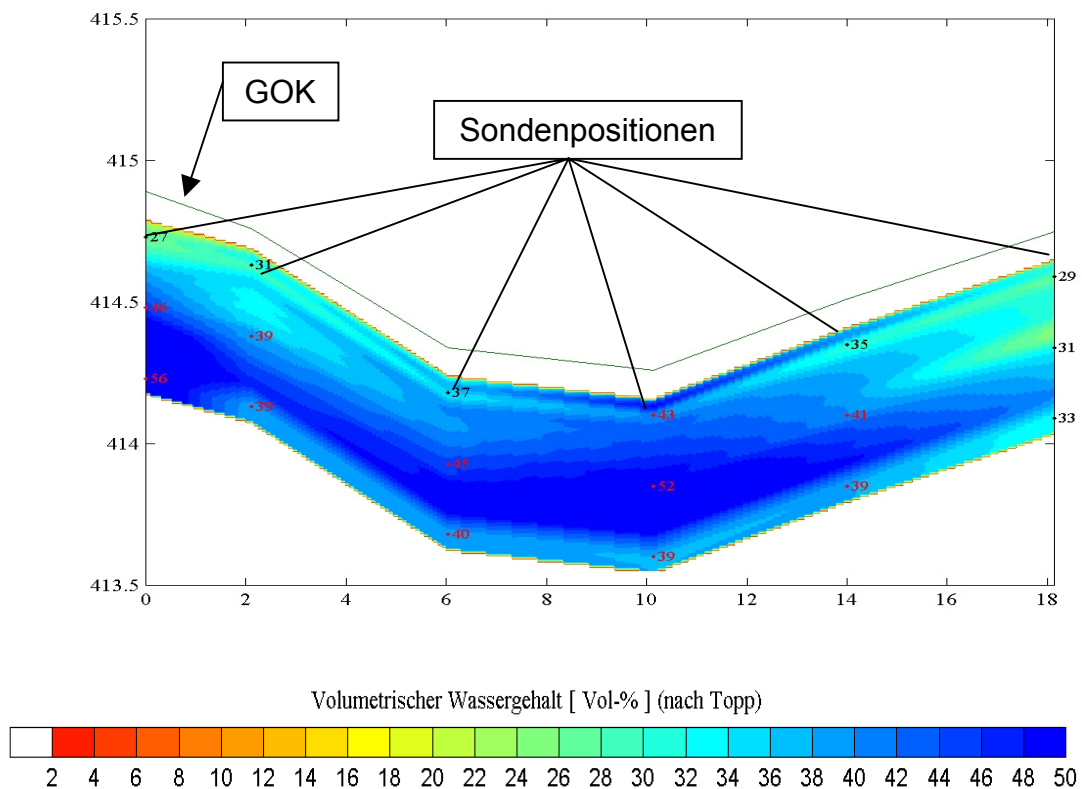
Das aufgebaute Meßsystem zur Bodenfeuchtemessung stellt dabei den Versuch dar, online Bodenfeuchte in einer zeitlichen Auflösung < 10 Minuten zu erfassen und nach ortsaufgelöster Rekonstruktion (vgl. Kap. 2.4) der Hochwasserwarnung zuzuführen. Zusammengefaßt in einem Zentralmodul, bestehend aus TDR-Gerät (Kabeltester der Fa. Tektronix 1502B), Multiplexer, solarer Stromversorgung und Funkmodem, wird das Meßcluster durch

einen stromsparenden handelsüblichen Einplatinen-Computer gesteuert. Die Datenabfrage ist über das Funkmodem möglich. Die Verteilung der 37 Zweistabsonden ist rasterförmig mit 4 m Zellenabstand. Durch die Einbringung weiterer 9 Sonden wird ein genestetes Meßnetz mit 1 m Zellenabstand erzielt (Bild 10). Bei einer Sondenlänge von 60 cm wird eine räumliche Auflösung entlang der Stäbe von 5 mm erreicht.

a)



b)



Die Rekonstruktion zu einem Meßzeitpunkt zeigt in allen 6 Querschnitten die Sättigung im Bereich der Bachau, sowie einen Kapillarsaum als Übergang zu trockeneren Bereichen an. Ebenfalls kann der Verlauf des Baches im interpolierten Bodenfeuchteraum nachgebildet werden (Bild 11).

Die ersten Versuche haben die Tauglichkeit des Meßclusters für die vorgesehenen Untersuchungen aufgezeigt. Der nächste geplante Schritt ist die Einbindung in bestehende hydrologische Modelle.

5 Überwachung von Barrieren

Ein anderer Anwendungsbereich: Deponie-Oberflächenabdichtungen (DOA) haben die Aufgabe zu verhindern, daß Niederschlagswasser in Müllkörper einsickert (Immission). Diese Aufgabe entspricht der Wirkung einer Barriere. In der bei uns geltenden Deponie-Verordnung wird die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) als Qualitäts- und Überwachungsparameter bestimmt. Da die mineralische Komponente von Kombinationsdichtungen als sogenanntes „long-term“-Element die Wirksamkeit des gesamten Abdichtungssystems definiert, steht der k_f -Wert somit im Zentrum des Interesses. Deponiebetreiber sind zur Überprüfung der Wirksamkeit der DOA verpflichtet.

Mit dem Ziel, zeitaufgelöst messen zu können, wurden bisher Tensiometer zur Feuchtemessung eingesetzt, denn anhand der gemessenen Saugspannung (Ψ) kann auf den k_f -Wert geschlossen werden. Die Ermittlung der Materialbeziehung (Basis ist die Saugspannungsbeziehung) erfolgt im Labor auf einer anderen Skala als bei in situ Messungen. Betreffende Unsicherheiten sind bei der Übertragbarkeit zu beachten. Darüber hinaus unterliegen die bodenspezifischen Beziehungen einer Hysterese. Heute ist die Formel nach *van Genuchten/Mualem* zur Berechnung des k_f -Wertes aus den Saugspannungscharakteristiken gebräuchlich. Der k_f -Wert wird dabei konkret allein aus Bodenparametern (residualer Wassergehalt (θ_r), Sättigungswassergehalt (θ_s) und einem Formfaktor der Kornverteilung (m)) sowie dem aktuellen Wassergehalt (θ) berechnet. Es ergibt sich daraus wiederum die Grundaufgabe, den Bodenwassergehalt zuverlässig zu bestimmen.

Zur Bestimmung des Wassergehaltes von Barrieren sind Verfahren, die destruktiv sind oder nur Momentaufnahmen zulassen, nicht geeignet. Gefordert sind Verfahren, die mit einer hohen Genauigkeit, dazu kontinuierlich und flächig messen. Es bestehen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit, da Fehlmessungen oder Fehlinterpretationen von Daten zu hohen unnötigen Investitionen für Sanierungen oder Reparaturen führen. Elektromagnetische Verfahren wie das TDR-Verfahren (hier integral eingesetzt) erfüllen die gestellten Anfor-

derungen am besten. Da die Sensoren im Boden verlegt sind, sind die Messungen jederzeit durchführbar, und die Meßergebnisse sind reproduzierbar. Die Sensoren werden baubegleitend in einer Kontrollschicht in die DOA integriert. Die Eigenschaften der Kontrollschicht ergeben sich aus dem Ziel, die Hysterese zu minimieren und die technischen Vorgaben (Definition in den Empfehlungen der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, BAM) zu erfüllen. Optimal wird die Kontrollschicht unter die zu überwachende Schicht platziert oder unter dem gesamten Dichtungssystem verlegt. Im Regelfall reicht eine Lage der Kontrollschicht aus. In Lysimetern, die zur Entwicklung des Überwachungsverfahrens mittels TDR Sensoren einzusetzen waren, sind zur Beschreibung der Bewegung von Feuchtefronten mehrere Lagen von Sensoren erforderlich.

Zum Nachweis der Funktion des gewählten Verfahrens wurde am Forschungszentrum Karlsruhe vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung ein Lysimeter (vgl. Bild 12 und Bild 13) gebaut [10]. Um die Identifizierung von vorrückenden Feuchtefronten nach Regenereignissen und die Bilanzierung dieser Ereignisse nicht zu erschweren, wurde der Lysimeter abgedeckt und thermisch gedämmt. Mittels einer einfachen Beregnungsanlage war es möglich, genau dosiert Wassermengen aufzugeben. Der Lysimeter wurde mit einem engen Raster von Bodenfeuchte-Sensoren und zusätzlich mit Tensiometern (Verifizierung der Wassergehalte über die pF-WG-Kurve) sowie Thermometern (Ausschluß einer thermisch bedingten Wasserbewegung und Korrektur der temperaturabhängigen Dielektrizitätskonstante) überwacht.



Bild 12: *Lysimeter, zweite Sensorlage*

Es wurden mehrere „Regenereignisse“ auf den Lysimeter aufgegeben. Das Vordringen der Feuchtefront wurde eindeutig detektiert. Deutlich ist zu erkennen, daß sich zwischen der Bodenschicht und der unten liegenden Entwässerungsschicht des Lysimeters ein Kapillarsperreneffekt einstellte (Bild 14 und Bild 15). Der Abfluß nach unten war nur nach einer Aufsättigung der Schicht möglich. Das Material bot mit einem Kornanteil von Durchmesser $< 0,06$ mm mit weniger als 10 Gew-% den Vorteil, daß ein kapillarer Aufstieg in weitere Schichten nicht zu beobachten bzw. zu berücksichtigen war.

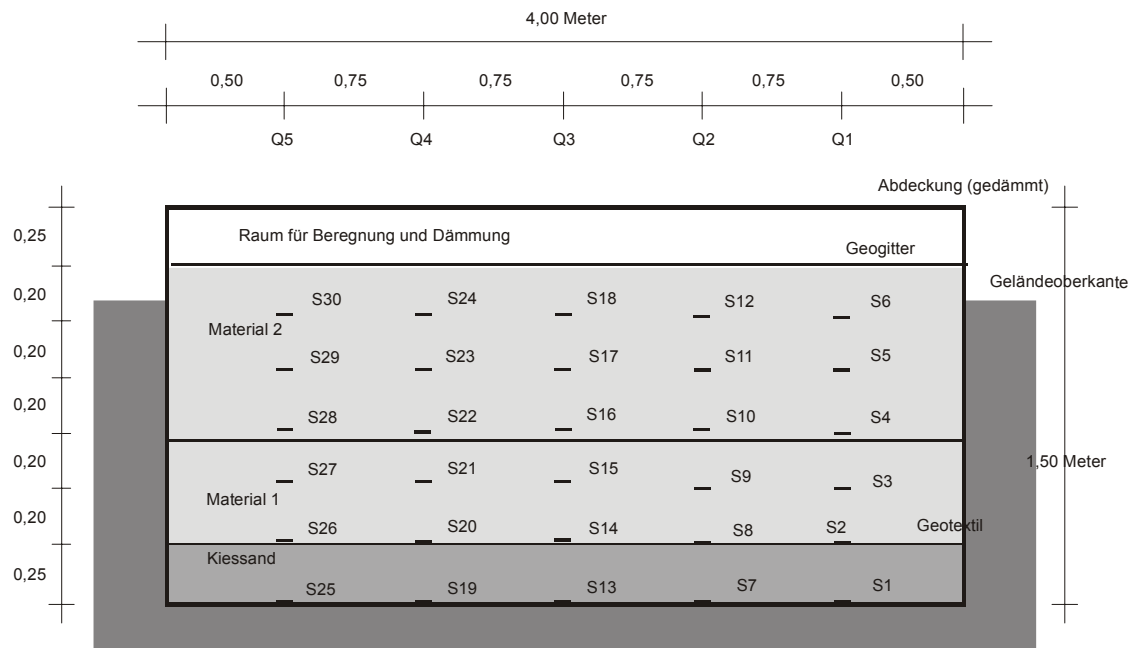


Bild 13: Querschnitt durch den Lysimeter; Material 1 und 2 sind unterschiedliche schluffige Materialien, die kurzen Striche geben die Lage der Flachbandkabel wieder.

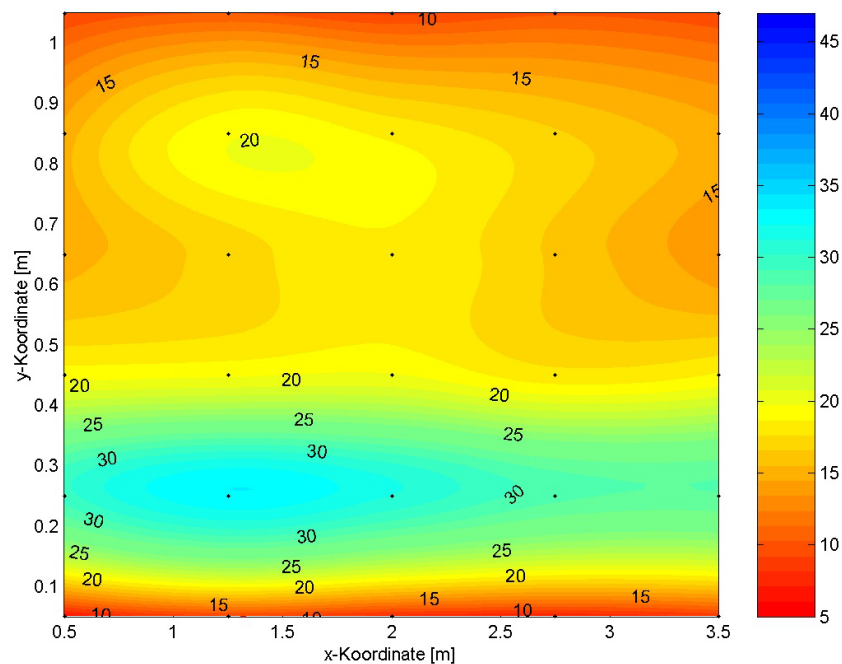


Bild 14: Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes im Lysimeter vor der Beregnung

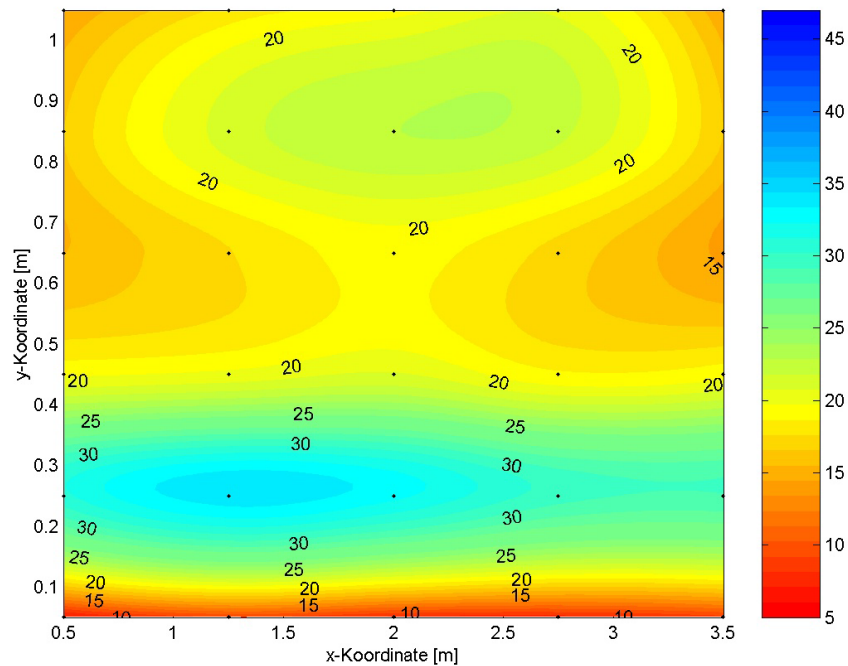


Bild 15: *Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes im Lysimeter während der Beregnung*

Über die gemessenen Wassergehalte und die daraus berechneten k_f -Werte war es möglich, die „Regenereignisse“ zu bilanzieren und die Wasserbewegung vertikal durch den Lysimeter zu beschreiben. Die Abweichung des berechneten Flusses zur gemessenen Wassermenge liegt mit $< 20 \%$ in einer vertretbaren Größenordnung. Die ursprüngliche Unsicherheit, die sich alleine aus der Berechnung des k_f -Wertes ergab, hatte demgegenüber einen Faktor 200.

Die Beschreibung des Wasserhaushaltes der Abdeckschichten wird dazu beitragen, Diskussionen über das mittelfristige Verhalten mineralischer Dichtelemente mit Meßwerten zu unterstützen bzw. zu konkretisieren. Das Meßsystem soll erstmals großflächig auf einer Deponie in Baden-Württemberg eingesetzt werden.

6 Monitoring von Deichen und Dämmen mittels TDR

Dämme von Hochwasserrückhaltebecken oder von Stauhaltungen an Flüssen sowie Deiche als Hochwasserschutz an Binnengewässern werden heute oft nach den Regeln des Dammbaus für Dauerstaubedingungen ausgelegt. Die in der Regel zoniert aufgebauten Deich- bzw. Dammkörper sind jedoch nicht etwa „dicht“ im Sinne von völlig undurchlässig. Dies gilt letztlich auch für Staudämme mit synthetischen Dichtungen wie z.B. Asphaltbeton oder Beton. Die sich bei einem Einstau einstellenden sickerhydraulischen Verhältnisse in einem Staudamm bzw. dessen hydraulisches Verhalten sind für den geotechnischen Ingenieur von großem Interesse. Wenige Verfahren bieten bislang jedoch die Möglichkeit, diese Vorgänge

orts aufgelöst und zuverlässig aufzunehmen. Neben den üblichen Wasserstandsmessungen in Form von Standrohrpeilstellen bzw. Piezometermeßstellen finden in diesem Bereich immer häufiger auch andere Verfahren wie die Thermometrie [11] Anwendung. Ein neuer Weg wurde hier vom Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF) beschritten, in dem der Versuch unternommen wird, Feuchteanomalien entlang von 20 m langen Kabelsensoren zu lokalisieren.

Um die Eignung der TDR-Meßtechnik für die dargestellte Aufgabe zu untersuchen, wurden am IBF großmaßstäbliche Infiltrationsversuche an einem 30 m langen Kabelsensor, eingebaut in einem entsprechend langen, mit Sand gefüllten, oben geschlitzten und unten perforierten Rohr, durchgeführt (vgl. Bild 16).

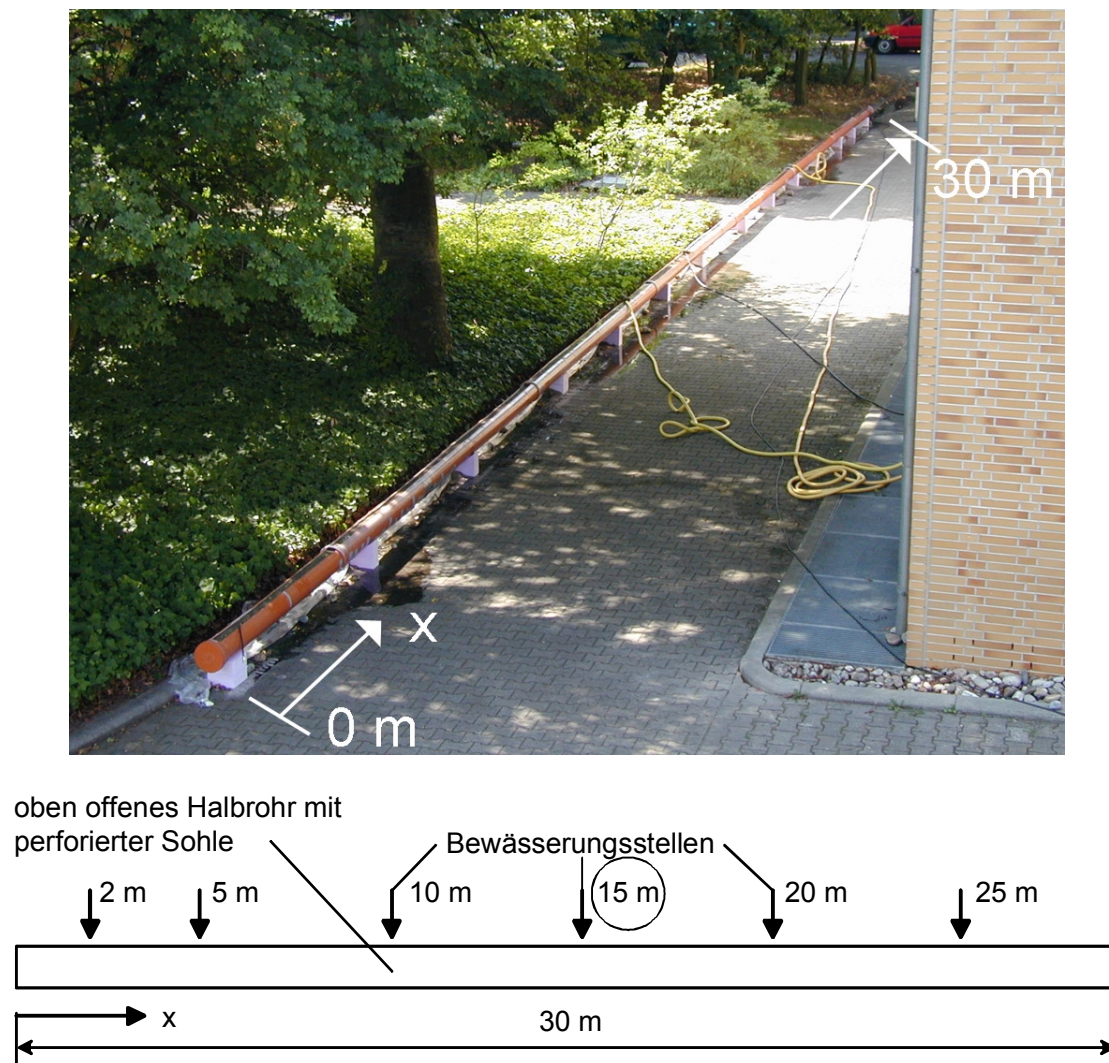


Bild 16: Infiltrationsversuch an einem 30 m langen Flachbandkabel zur Lokalisierung von Feuchteanomalien. Das Foto zeigt das oben geschlitzte Rohr mit der Sandfüllung, das Kabel befindet sich etwa in Rohrmittle. Die Skizze zeigt eine Übersicht des Versuchsaufbaus, es wurde an mehreren Stellen bewässert, präsentiert werden die Ergebnisse zu den Bewässerungen bei $x = 15 \text{ m}$ (vgl. Bild 17 und 18), wobei bereits zuvor bei den Positionen $x = 2, 5 \text{ und } 10 \text{ m}$ bewässert wurde.

An unterschiedlichen Positionen wurde der Sensor über verschiedene Breiten bewässert. Dabei wurden Reflexionsmessungen von beiden Enden des Sensors durchgeführt, um die Auflösungsgenauigkeit zu verbessern [12]. Das Ziel der Auswertung dieser Messungen ist nicht die Rekonstruktion der Feuchte entlang des Kabels, wie bei dem Modelldeich in der BAW (vgl. Kap. 3), sondern die direkte Auswertung der Meßsignale zur Lokalisierung etwaiger Feuchteanomalien; die absolute Feuchteänderung ist in diesem Falle wenig von Bedeutung, was die Auswertung vereinfacht. Bild 17 zeigt die von beiden Enden durchgeführten Reflexionsmessungen für eine über unterschiedliche Breiten (10, 30, 60 und 100 cm) durchgeführte Infiltration bei $x = 15$ m.

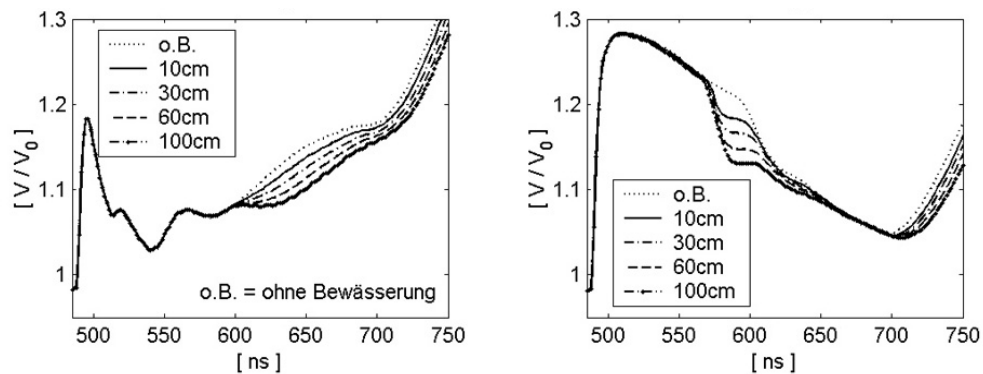


Bild 17: Beidseitige Reflexionsmessungen an einem 30 m langen Flachbandkabel während einer Infiltration über unterschiedliche Breiten (10, 30, 60 und 100 cm) bei $x = 15$ m (also in Strang-Mitte)

Wie man am Kurvenverlauf im linken Diagramm (Messung von $x = 0$ m) erkennen kann, wurde der Bereich zwischen $x = 0$ m und $x = 15$ m (entspricht dem Zeitbereich 500-600 ns) durch zuvor durchgeführte Bewässerungen bei $x = 2$, $x = 5$ und $x = 10$ m hydraulisch „gestört“, wohingegen der Bereich zwischen $x = 16$ m und $x = 30$ m seinen anfangs trockenen Zustand beibehalten hatte. Der Einfluß dieser im Mittel unterschiedlich feuchten Bereiche zeigt sich auch an den zeitlichen Anfangspunkten der Anomalie. Die Änderungen der Reflexionssignale rühren gegenüber der Messung ohne Beregnung letztlich nur aus den Infiltrationen bei $x = 15$ m her. Im linken Diagramm beginnen diese Änderungen nach 600 ns im rechten jedoch bereits nach 570 ns. Dieser Unterschied resultiert aus der langsameren Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals in einem Medium mit einer höheren Dielektrizitätskonstante bzw. mit einem höheren Feuchtegehalt. Eine genaue Lokalisierung der Feuchteanomalie aus einer einseitigen Reflexionsmessung ist daher kaum möglich. Nutzt man jedoch den Informationsgehalt beider Reflexionsmessungen aus, indem man die Zeitsignale zunächst vom Signal des Ausgangszustandes (ohne Bewässerung) subtrahiert, dann entsprechend ihres Eintrittspunktes in das Kabel übereinanderlegt und auf den Ortsbereich transformiert, so erhält man eine sehr gute Abschätzung der Örtlichkeiten der Feuchteanomalie (vgl. Bild 18). Diese Abschätzung kann im Vergleich zu einer Rekonstruktion der Feuchte ohne großen Aufwand schnell errechnet werden und eignet sich daher sehr gut als Auswertalgorithmus für ein Monitoringsystem.

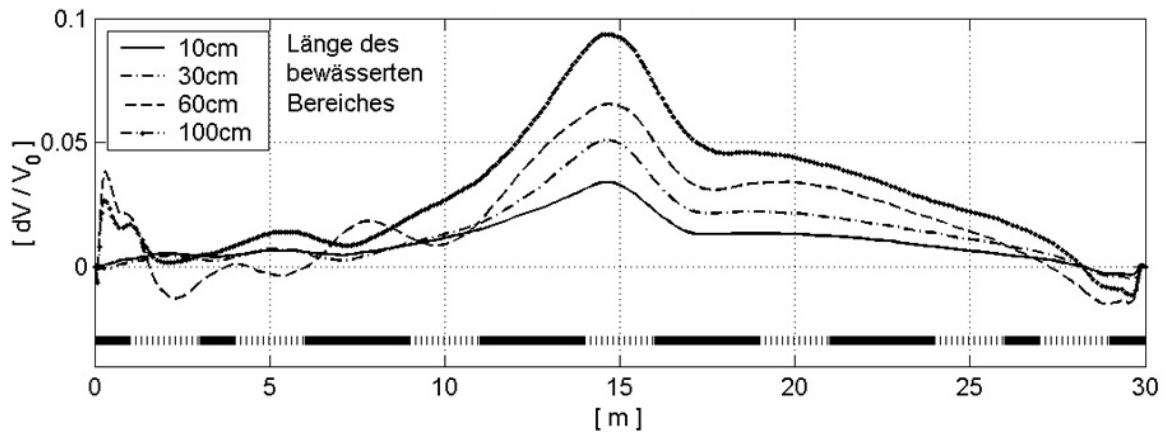


Bild 18: Transformation der in Bild 17 dargestellten Reflexionsmessungen während einer Infiltration bei $x = 15 \text{ m}$

Seinen ersten Einsatz erfährt dieses Monitoringsystem am Rhein in einem zonierten Deich mit einer mineralischen Dichtung auf der Wasserseite und einem Drän am luftseitigen Böschungsfuß [12]. Die Sensoren sind hierbei ca. 30 cm unterhalb der Dichtung in zwei Ebenen in Längsrichtung verlegt. Die Meßstrecke hat eine Gesamtlänge von 200 m. Insgesamt wurden 400 m Flachbandkabel und rund 1600 m Koaxialkabel für die Meßstelle verarbeitet. Die für die Messung benötigten Geräte werden in Schächten auf der Deichkrone verwahrt. Das System wird mit einer Datenfernübertragung und Steuerung via Internet ausgerüstet. Die Praxistauglichkeit des System soll in Beregnungsversuchen und bei Einsätzen während eines Hochwassers unter Beweis gestellt werden.

7 Säulenversuchsstand zur Ermittlung bodenhydraulischer Parameter

Die experimentelle Bestimmung von bodenphysikalischen Eigenschaften – seien es hydraulische oder mechanische – erfordert eine hohe Genauigkeit der zu erfassenden Parameter, die sich u.U. gegenseitig beeinflussen können. Eine solche gegenseitige Abhängigkeit hydraulischer und mechanischer Eigenschaften ist bei Böden bereits seit längerem bekannt. Jedoch erlauben die bislang verfügbaren Standardversuche zur Bestimmung derartiger hydraulischer Eigenschaften die Durchführung bei lediglich einem Lagerungszustand, der bei Einbau der Probe meist eher dicht ausfällt. Doch gerade die Porenstruktur ist – vor allem bei technisch hergestellten Schüttungen – der maßgebende Faktor des hydraulischen Verhaltens von Böden, und diese unterliegt in der Natur bekanntlich einer statistischen Variabilität.

Aus diesem Grunde haben die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und das Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF) ein Projekt ins Leben gerufen, in dem versucht werden soll, die bodenhydraulischen Eigenschaften (Saugspannungsbeziehung und ungesättigte Durchlässigkeit) an einer Probe mit 40 cm Höhe und 19 cm Durchmesser im Multi-Step-

Outflow-Verfahren zu bestimmen. Zu diesem Zweck ist der Versuchsstand mit Flachbandkabeln ausgerüstet, die orts aufgelöst die Feuchteverteilung über die Höhe der Probe aufzeichnen. In Kombination mit punktuellen Tensiometermessungen wird versucht, die ungesättigte Durchlässigkeit direkt aus dem Versuchsablauf abzuleiten. Zusätzlich werden Verformung, mechanische Belastung, Durchfluß und angelegte hydraulische Belastung aufgezeichnet. Bild 19 zeigt den Versuchsaufbau als schematische Darstellung.

Für die Feuchtemessung am Säulenversuchsstand kommen ebenfalls Flachbandkabel zum Einsatz, die aber – anders als bei den Messungen am Modelldeich in der BAW – keinen direkten Kontakt zum Boden haben. Allgemein ist ein besonderes Problem der Feuchtemessung die Kalibrierung des Sensors. Beim Säulenversuchsstand ist zwischen den Kabelsensoren (zwei Stück, einander gegenüber angebracht) und der Probe ein Gummisack angeordnet, der die Probe von der Umgebung hydraulisch abschließt. Zudem werden die Sensoren auf der Außenseite von einem GFK-Rohr begrenzt, so daß die Probe nur zu einer Seite hin vom elektromagnetischen Feld erfaßt wird (vgl. Bild 20). Aus diesem Grunde – und das macht diesen Versuchstand in diesem Zusammenhang erwähnenswert – erwies sich die Kalibrierung des elektrischen Systems als äußerst delikat.

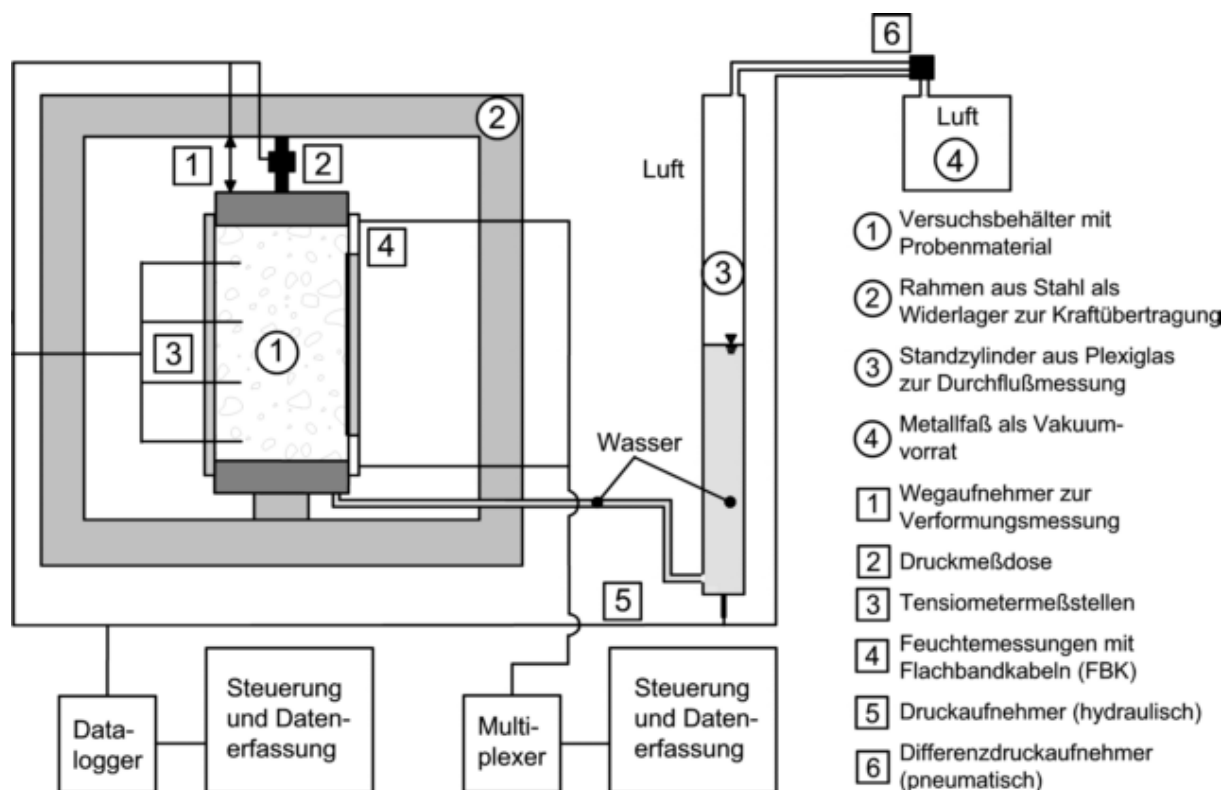


Bild 19: Schematische Darstellung des Säulenversuchsstandes zur Ermittlung bodenhydraulischer Eigenschaften im Multi-Step-Outflow-Verfahren

Bei einem bekannten elektrischen Ersatzmodell, wie dies bei einem in ein beliebiges Medium eingebetteten Flachbandkabel der Fall ist (vgl. Bild 5), reicht eine Kalibrierung mit den bekannten Medien Luft (Dielektrizitätskonstante $DK = 1$), Wasser ($DK = 80$) und ein drittes Material mit einer bekannten bzw. meßbaren DK (z.B. wassergesättigte Glaskugeln mit einer DK von ca. 30) aus. Bei dem hier vorliegenden Fall konnte zwar ebenfalls das Ersatzmodell abgeleitet werden, es erwies sich jedoch nicht als praktikabel, da sich die gemessenen Kapazitäten beim Modell für Wasser und wassergesättigte Glaskugeln kaum unterschieden. Eine Anpassung des Ersatzmodells auf diesem Wege war also nicht möglich.

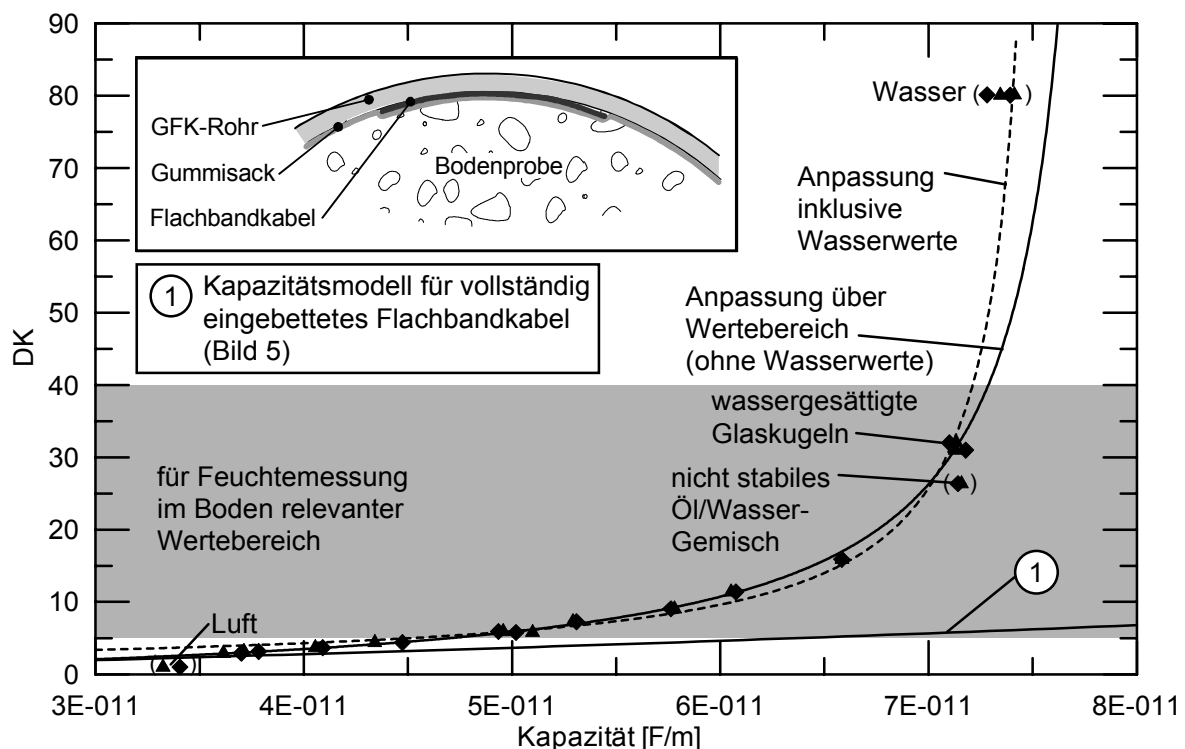


Bild 20: Ergebnis der Kalibrierung der beiden Feuchtesensoren (Rauten und Dreiecke) im Säulenversuchsstand. Die beste Anpassung im Wertebereich für feuchten Boden erhielt man ohne die eingeklammerten Kalibrierwerte. Zum Vergleich ist die Kalibrierkurve für das Kapazitätsmodell (Bild 5) aufgetragen.

Zur Lösung dieses Problems wurde der Versuch unternommen, die Feuchtesensoren für die im Modell vorliegende Anordnung mit Öl/Wassergemischen zu kalibrieren. Bild 20 zeigt die eingestellten DK und die mit den Sensoren gemessenen Kapazitäten. Zusammen mit den Messungen für wassergesättigte Glaskugeln (oberhalb der Messung für ein nicht stabiles Öl/Wassergemisch) konnte für den für feuchte Böden relevanten Wertebereich eine ausreichende Anzahl von Kalibrierwerten bereitgestellt werden. Für eine optimale Anpassung in diesem Wertebereich erwies es sich als vorteilhaft, die Kalibrierwerte für Luft (allein) und Wasser (allein) zu vernachlässigen (vgl. Bild 20).

Der Vergleich zwischen der ermittelten Kalibrierfunktion und dem Kapazitätsmodell für ein vollständig eingebettetes Flachbandkabel (Bild 5) zeigt, daß sich Schwankungen in den gemessenen Kapazitäten C bei den Messungen am Säulenmodell stärker auswirken werden. Wie gut die Genauigkeit der Messungen am Säulenversuchsstand letztendlich sein wird, zeigt sich erst in einem Vergleich der rekonstruierten Feuchtemessungen mit Feuchtwerten die z.B. durch die Ofentrocknungsmethode ermittelt werden.

Nachdem die Kalibrierung dieser Meßeinrichtung gelungen ist, können nun am Säulenversuchsstand orts aufgelöste Messungen zur Bestimmung der DK für beliebige Materialien durchgeführt werden. Zur Ermittlung der Feuchte bedarf es lediglich einer Kalibrierung des zu untersuchenden Materials zur Bestimmung der Beziehung zwischen DK und volumetrischem Wassergehalt. Das Modell wird derzeit in Betrieb genommen, und mit ersten Messungen wird bald begonnen werden. An geeigneter Stelle soll dann hierüber berichtet werden.

8 Schlußbemerkungen

Im vorliegenden Beitrag geht es um verschiedene Möglichkeiten, die TDR-Methode in ihrer speziell in Karlsruhe weiterentwickelten Form für Problemstellungen im Bereich der Geotechnik, der Hydrologie, aber auch anderer Bereiche nutzbar zu machen. Hierbei wurde das Verfahren sowohl bei Anwendungen in situ als auch bei Labor- bzw. Freilandversuchen erfolgreich eingesetzt. Besonders hervorgehoben werden muß, daß je nach Aufgabenstellung die Sensorform und -geometrie sowie die Auswertungsmethode der Meßsignale zielorientiert angepaßt wurden. Eine erfolgreiche Anwendung der TDR-Meßtechnik in unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft und Technik kann nur auf Basis einer derartigen projektorientierten Anpassung erfolgen. Die „Werkzeuge“ (TDR-Gerät, Multiplexer usw.) sind vorhanden und wurden innerhalb der Soil Moisture Group in Karlsruhe weiterentwickelt und ergänzt. Das Ziel ist es, die erfolgreiche Arbeit innerhalb dieser aus unterschiedlichen Institutionen zusammengesetzten Gruppe weiterzuführen und die erarbeiteten Ergebnisse und Kenntnisse auch der industriellen Anwendung nutzbar zu machen.

9 Literatur

- [1] MÜCKENHAUSEN, E.: Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen, 3. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 1985.
- [2] IMKO, MICROMODULTECHNIK GMBH: TRIME, Meßsysteme für Boden und Materialfeuchte, Prospekt, 2002.

- [3] SCHLAEGER, S.: Inversion von TDR-Messungen zur Rekonstruktion räumlich verteilter bodenphysikalischer Parameter, Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 156, 2002.
- [4] SCHEUERMANN, A., SCHLAEGER, S., HÜBNER, C., BRANDELIK, A., BRAUNS, J.: Bestimmung von Feuchteprofilen mittels TDR während eines Einstauversuches an einem naturgemäßen Deichmodell, tm – Technisches Messen, 69(1), 37-42, 2002.
- [5] TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, Water Resources Research 16(3), 574-582, 1980.
- [6] SCHLAEGER, S., HÜBNER, C., WEBER, K.: Moisture profile determination with TDR – Development and application of Time-Domain-Reflectometry inversion algorithms for high resolution moisture profile determination. In Breh, W. et al. *Field Screening Europe 2001*, 341-346, Kluwer Academic Publisher, 2002.
- [7] HÜBNER, C.: Entwicklung Hochfrequenter Meßverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung, Dissertation, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6329, 1999.
- [8] SCHEUERMANN, A., BRAUNS, J.: Die Durchfeuchtung von Deichen in Abhängigkeit von Vorbedingungen, In: Tetzlaff, G. et al. *Zweites Forum Naturkatastrophen (DKKV) 2001*, Proceedings, Leipzig, 218-225, 2002.
- [9] SCHEUERMANN, A., BRAUNS, J.: Die Durchfeuchtung von Deichen – Modellversuche und Analyse. In: DGGT 12. *Donau-Europäische-Konferenz 2002*, Proceedings, Passau, 197-200, 2002.
- [10] SCHUHMANN, R.: Kontrolle von Barrieren: Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit anhand des Bodenwassergehaltes, Dissertation. Veröffentlichungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (erscheint 2003).
- [11] ARMBRUSTER, H., DORNSTÄDTER, J., KAPPELMEYER, O., TRÖGER, I.: Thermometrie zur Erfassung von Schwachstellen an Dämmen, Wasserwirtschaft 83 (1993) 4.
- [12] SCHEUERMANN, A., BRAUNS, J., SCHLAEGER, S., BECKER, R., HÜBNER, C.: Monitoring von Dämmen und Deichen mittels TDR. In: Kupfer, K. et al. *11. Feuchtetag 2002*, Proceedings, Weimar, 187-196, 2002.