

TDR-Sensoren zur Kontrolle von Deponieabdichtungen in Salzbergwerken

K. Kupfer; E. Trinks; Th. Schäfer

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

1 Einführung

Nicht verwertbare und überwachungsbedürftige Abfälle werden in der Bundesrepublik Deutschland in Untertagedeponien im Salzgestein entsorgt. Die Langzeitisolation vom äußeren Biozyklus wird durch geotechnische Barrieren realisiert; dazu gehören Verschlussbauwerke, wie Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse (Bild 1).



Bild 1:
Streckenverschlussbauwerk in einem Salzbergwerk [1]

Nach dem Stand der Technik sind Langzeitfunktionsfähigkeit und Langzeitsicherheit von Bentonitabdichtungen im Falle eines angenommenen Flüssigkeitszutritts, bisher messtechnisch nicht ausreichend untersucht. Messtechnische Untersuchungen zeigten, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit herkömmlicher Feuchtemessverfahren für den hier definierten Einsatzfall zu gering ist [2].

Ein dielektrisches Messsystem mit flexiblen Elektroden soll für die Feuchtemessung am Verschlussmaterial Bentonit in salinärer Umgebung vorgestellt werden, mit dem die beschriebenen Nachteile umgangen werden können [3]. Störeinflüsse, wie Ionenleitfähigkeit, Druck und Dichte, sollen eingehend untersucht und ausgewertet werden. Elektromagnetische Feldsimulationen vom Sensor und Ausbreitungen von Feldern im umgebenden Medium sind neu. Sie werden dazu beitragen, den Sensor zu optimieren sowie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messmethode zu erhöhen. Durch Anwendung der TDR konnte das Feuchteprofil längs eines Kabelsensors, der in einem Trog mit verschiedenen feuchten Materialien untergebracht war, detektiert werden. Bei weiteren Versuchen wurde der Kabelsensor in Druckbehältern im Bentonit eingeschlossen [4].

2 TDR-Messverfahren

Die Time Domain Reflectometry (TDR) diente ursprünglich als Kabelradar und wurde bereits frühzeitig zur Feuchtemessung in Böden verwendet. Koaxialleitungen dienten als Messfühler und

wurden als starre 2- oder 3-Leitersysteme ausgeführt. Die Methode basiert auf der Detektion der Laufzeit eines Impulses am Ende einer offenen Leitung, die mit einem feuchten Material umgeben ist [5]. Beim vorliegenden Verfahren wird ein Impuls hoher Steilheit auf ein 3-Leiter-Bandkabel gegeben, das vom Dielektrikum umgeben ist. Der Messaufbau zur Auswertung der Impulsantwort und zur Bestimmung der Laufzeit wird im Bild 2 gezeigt.



Bild 2: TDR-Versuchsstand mit Kabelsensor, Kabeltester und DV-Einheit

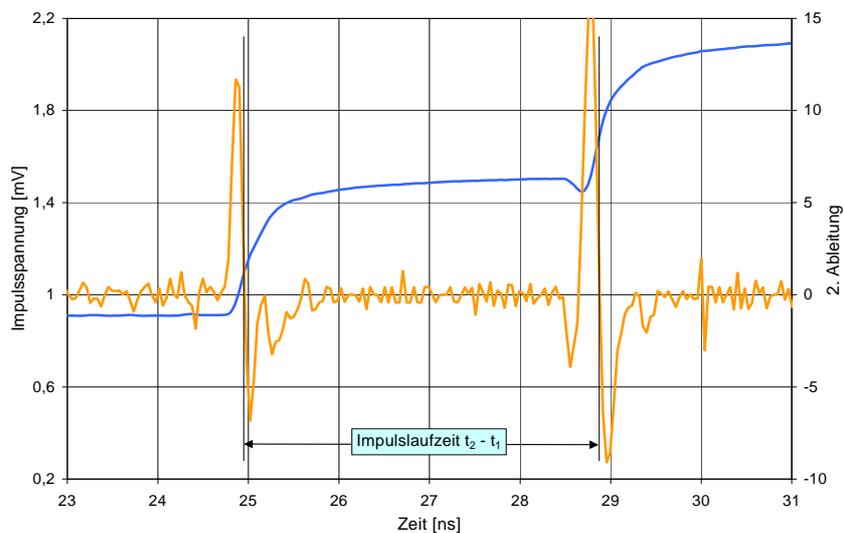


Bild 3: Bestimmung der Impulslaufzeit mit Hilfe der 2. Ableitung

Die Impulslaufzeit ergibt sich als Zeitdifferenz zwischen 2 Wendepunkten der Impulsantwort. Sie kann nach Bild 3 durch zweifache Differentiation an den Wendepunkten ermittelt werden. Die erste Ableitung der Kurve zeigt im Wendepunkt ein Maximum, die zweite Ableitung ergibt einen Nulldurchgang.

Die Laufzeit der Impulse im Kabel in Abhängigkeit vom umgebenden Medium (Luft, feuchter Sand und Wasser) werden in Bild 4 gezeigt. Die Erhöhung der Feuchte im Sand führt mit der Vergrößerung der Dielektrizitätskonstante (ϵ_r') zur Erhöhung der Laufzeit.

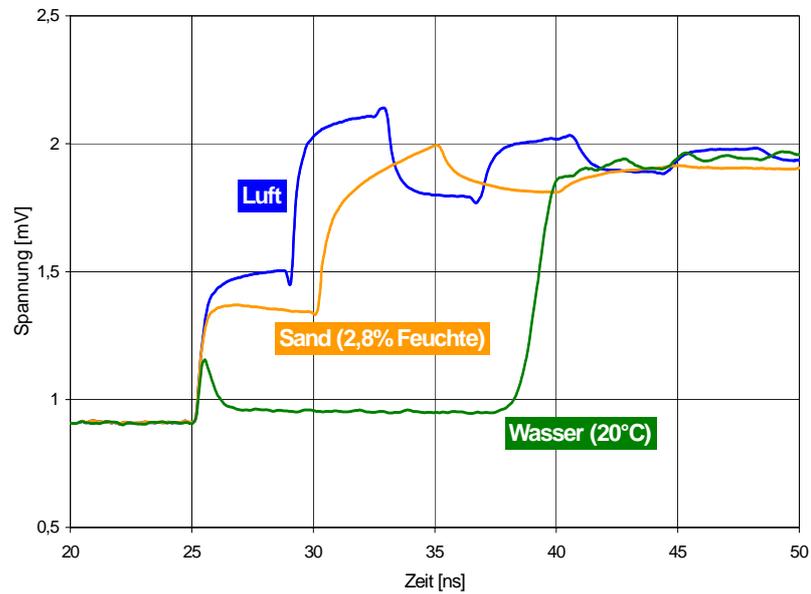


Bild 4: Messwerte der Laufzeit in Abhängigkeit von der Umgebung des Kabelsensors (Luft, feuchter Sand und Wasser)

3 EM-Feldsimulationen zur Kalibrierung

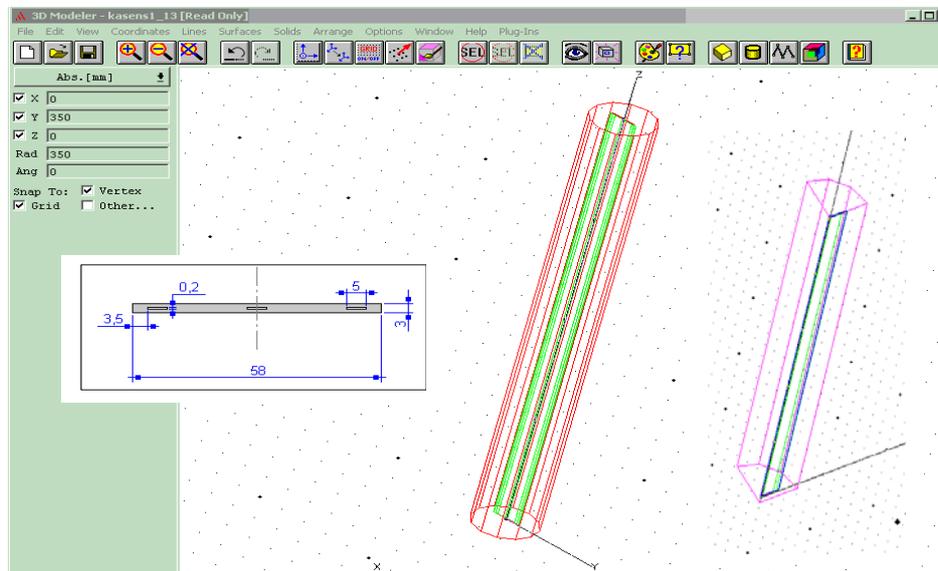


Bild 5: Konstruktion des Bandkabels im 3D-Modeler

Kalibrierungen zur Feuchtemessung sind sehr zeitaufwendig, vor allem dann, wenn bei der Erhöhung der Feuchte beim Bentonit gleich mehrere Parameter gleichzeitig geändert werden (Feuchte, Dichte, Ionengehalt).

Simulationen haben bei der Kalibrierung den Vorteil, dass bestimmte Eigenschaften in relativ kurzer Zeit spezifisch verändert werden können. Mit Hilfe eines EM-Feldsimulators wird es möglich, Spezifika des Sensors oder des Materials aus der Datenvielfalt heraus zu filtern und Sensoren zu optimieren. Simulationen des Kabels und des umgebenden Mediums wurden mit dem Programm HFSS (Hochfrequenzstruktursimulator) der Fa. Ansoft vorgenommen. Das Programm basiert auf einer finite-Elemente-Methode und arbeitet im Frequenzbereich.

Das Kabel mit Polyethylen-Mantel wird in Originalabmessungen im 3-D-Modeler konstruiert (Bild 5). Es ist mit einem Zylinder von 0,5 m Länge umgeben, in dem das verlustbehaftete Dielektrikum eingefüllt werden kann. Da die Berechnungen in einem breiten Frequenzbereich bei hoher DK und stark verlustbehafteten Materialien hohe Rechenkapazität beanspruchen und sehr lange dauern, wurde ein Symmetriemodus angewandt und nur ein Viertel des Kabels berechnet. Das Bandkabel wird am Eingang von einem kurzen Koaxkabel gespeist. An den Enden ist es quasi offen, d.h. mit Widerständen $2 \times 1 \text{ M}\Omega$ abgeschlossen.

Die dielektrischen Materialeigenschaften, wie Dielektrizitätskonstante und Verlustfaktor (ϵ_r' und $\tan \delta$) werden mit dem Netzwerkanalysator in einem breiten Frequenzbereich ermittelt (1 MHz...15 GHz), in den Materialmanager eingetragen und dem Zylinderinnenraum zugeordnet. In diesem Menü werden auch die Materialien des Kabels eingetragen. Im 3D-Boundary/Source-Manager werden Leitwerte bestimmter Materialien, Quellen, Symmetrieebenen, Abschlusswiderstände sowie Begrenzungsflächen definiert. In einer Lösungstabelle (Solution Setup) werden Startkennwerte für die Berechnung vorgegeben (Tab. 1):

Tabelle 1: Erläuterung der Startkennwerte für die Berechnung

Startfrequenz:	1 MHz	Rechenläufe:	8
Stoppfrequenz:	12,5 GHz	Max. Delta S^1 :	0,02
Mittl. Frequenz:	6 GHz	Fehler Toleranz:	0,2
Anzahl von Schritten:	2999	Max. Lösungen:	100
Interpolierender Sweep		Tetraeder-Verfeinerung:	20
Mesh-Verfeinerung:	adaptiv	:	

1) Betrag der relativen Änderung der S-Parameter

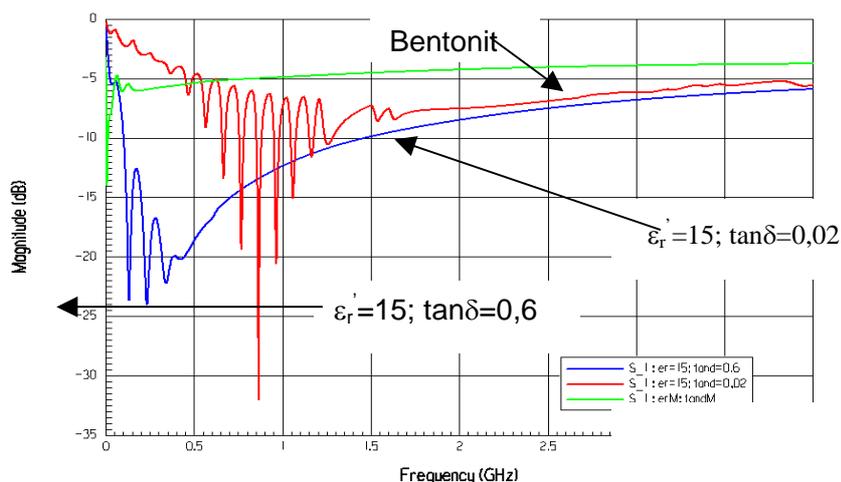


Bild 6: Amplitudengang als Funktion der Frequenz mit ϵ_r und $\tan \delta$ als Parameter

Ein Impuls mit einer Anstiegszeit von 200 ps entspricht einem Frequenzbereich von 1 MHz – 12,5 GHz. Für hochfeuchte oder mit Salzlösung getränkte Materialien, die hohe dielektrische Verluste aufweisen, muss die obere Grenzfrequenz reduziert werden (ca. 10 GHz), da

> 130000 Tetraeder berechnet werden und die Rechenleistung des Computers sonst u. U. überschritten wird. Die Ergebnisse der Berechnung sind S-Parameter. Sie können als Funktion über der Frequenz, im Smith-Diagramm oder in Polarkoordinaten dargestellt werden. Des Weiteren können Schnitte durch verschiedene Feld- oder Vektordarstellungen sowie Phasenanimationen gewählt werden.

Bild 6 zeigt den Amplitudengang von Materialien mit verschiedenen ϵ_r' und $\tan\delta$ über der Frequenz. Für Bentonit wurden frequenzabhängige Werte in den Materialmanager eingegeben. Die berechneten Funktionen des Amplituden- und Phasenganges werden in einen Spice-Simulator importiert. Mit FFT und einer Schaltungsberechnung mit Transientenanalyse werden die Sprungfunktionen ermittelt. Das Modell der offenen Leitung wird dabei als 2-Pol behandelt, an dessen Eingang ein Sprung mit einer Anstiegszeit von 200 ps gegeben wird.

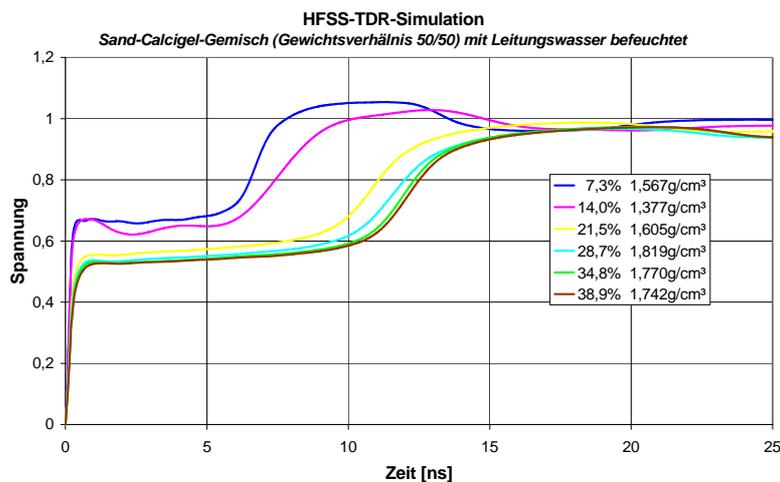


Bild 7: Berechnete Sprungantworten für ein Sand-Calcigel-Gemisch bei verschiedenen Feuchte- und Dichtewerten

Die berechneten Sprungantworten für ein Sand-Calcigel-Gemisch bei verschiedenen Feuchte- und Dichtewerten zeigt Bild 7. Die Laufzeit nimmt vom trockenen zum feuchten Material zu. Aus diesen Sprungantworten können Kalibrierkurven in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der Dichte ermittelt werden; dabei wird die Laufzeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen.

4 Experimentelle Untersuchungen



Bild 8: Trog mit Kabelsensor und Kammern für Materialien unterschiedlicher Feuchte

Zur Untersuchung von Feuchteprofilen längs des Kabelsensors wurde ein Trog mit einer Unterteilung für das Befüllen mit unterschiedlichen Dielektrika verwendet (Bild 8). Das Kabel wurde senkrecht eingesetzt, um Wasseransammlungen auf der Kabeloberfläche zu vermeiden.

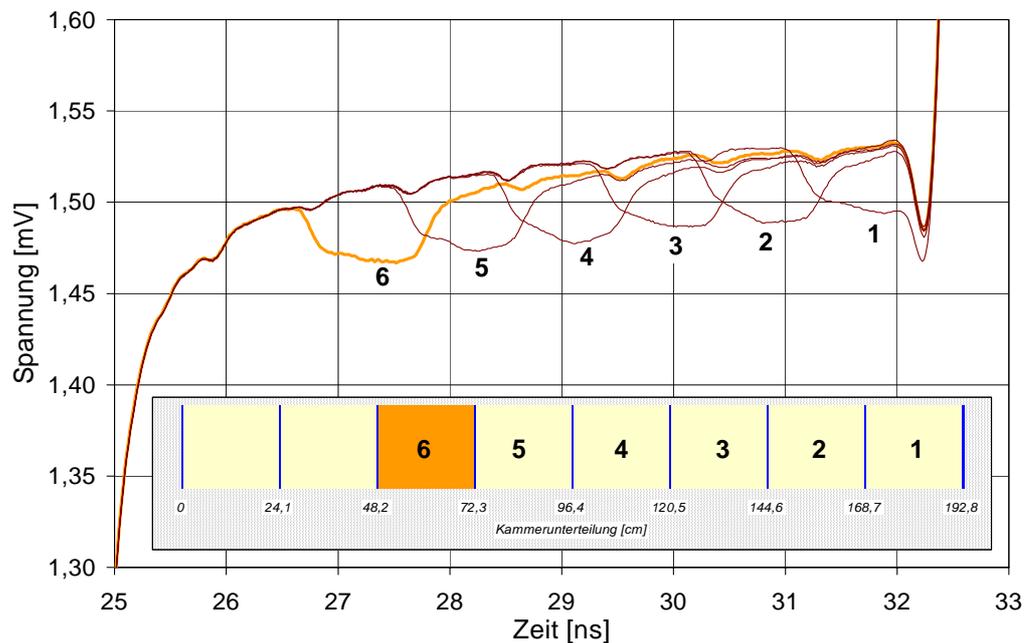


Bild 9: Darstellung des Transportes eines Feuchtepaketes durch die Impulsform

Beim Versuch (Bild 9) wurde bei einer Messung nur jeweils eine Kammer mit Sand (Wassergehalt ca. 0,5 %) befüllt (1), dabei entstand die Kurve mit Impulsform 1. Danach wurde die Kammer 2 befüllt usw. bis Kammer 6 und die entsprechende Impulsform 6 erreicht waren. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass mit der Impulsform Veränderungen der Feuchte im Trog aufgezeichnet werden können. (Die Kurven 1 – 5 resultierten aus früheren Messungen; die Kurve 6 zeigt den aktuellen Zustand).

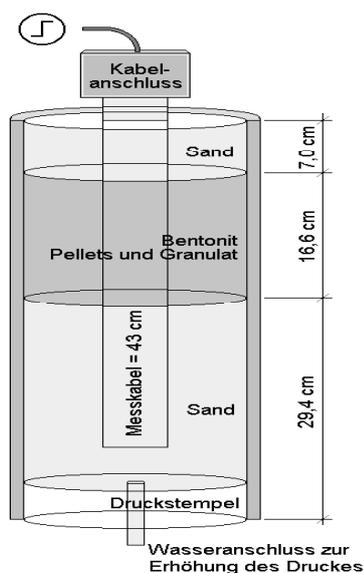


Bild 10: Druckversuchsstand zur Detektion von Feuchtefronten im Bentonit; links schematische Darstellung der Befüllung

Ein Druckversuchsstand zur Detektion von Feuchtefronten im Bentonit wird in Abb. 10 gezeigt. Die nach oben offene Druckzelle wird von unten mit deionisiertem Wasser oder Salzlösung befüllt. In der linken schematischen Darstellung ist die Schichtung der Materialien und der Einbau des Kabelsensors zu sehen. In diesem Versuchsstand werden Untersuchungen bis zu einem Druck von 40 bar durchgeführt.

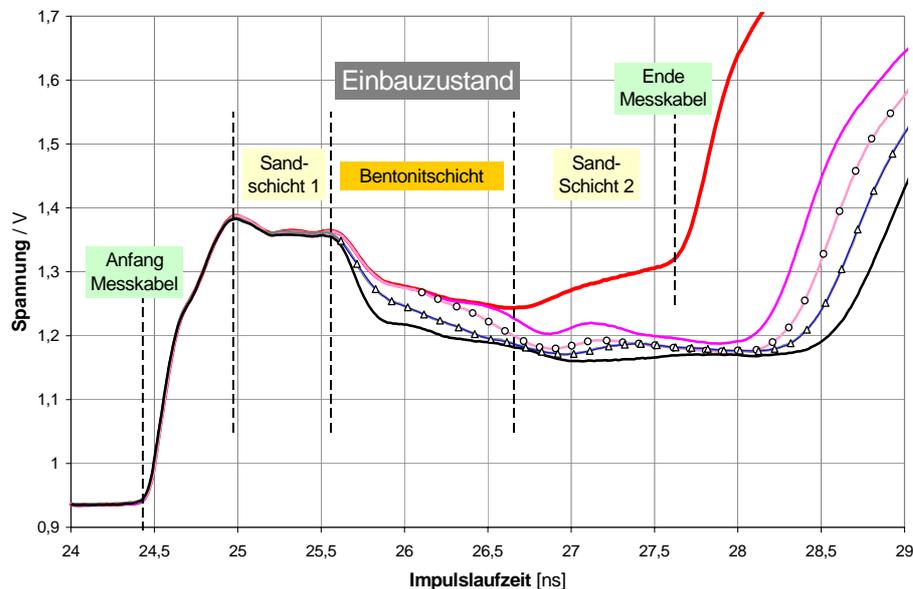


Bild 11: Detektion des Fortschreitens der Feuchtefront in der Bentonitschicht

Im Bild 11 werden die Zonen im Druckversuchsstand gezeigt, durch die der Kabelsensor führt. Die Messsignale wurden über einen Zeitraum von 200 Tagen aufgezeichnet. Die rote Kurve kennzeichnet den Ausgangszustand, danach durchdringt das eingepresste Wasser relativ schnell die Sandschicht bis es auf die Bentonitschicht auftrifft. Das langsame Eindringen der Feuchtefront in die Bentonitschicht ist in zeitlicher Reihenfolge in Abbildung 11 dargestellt und konnte mit dem Kabelsensor durch zahlreiche Messungen detektiert werden. Durch die entstehende Dichtwirkung kann das Wasser nur sehr langsam in die Bentonitschicht eindringen. Höhere Drücke lassen bessere Barriereigenschaften im Bentonit erwarten. Mit unterschiedlichen Druckstufen wurde eine Belastung von 40 bar erreicht. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Lösung entspricht dies einer Teufe im Salzbergwerk von 300 - 400 m. Um praktische Erkenntnisse für den Anwendungsfall zu bekommen, werden bei den Untersuchungen auch Salzlösungen verwendet.

Der Beitrag gibt einen Überblick über die Erfassung von Feuchtefronten in Sand und Bentonit mit der Methode der Time Domain Reflectometry. Bei den experimentellen Untersuchungen variieren eine Vielzahl von Einflussgrößen, wie Feuchte, Dichte, Druck, Salinität und Temperatur. EM-Feldsimulationen werden angewendet, um die Eigenschaften des Sensors und des Materials gezielt zu verändern. Wesentliche Kernpunkte sind die Erfassung von Feuchteprofilen in Bentonitverschlussbauwerken, die Kalibrierung des Messsystems, der Nachweis der Stabilität und die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Danksagung

Wir danken dem Projektträger des BMBF und BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung für die Förderung des Vorhabens 02C0800.

Literatur

[1] Sitz, P.; Koch, G.; Gruner, M.: *Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar*. Statusgespräch 15./16. Mai 2001. Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 7. - Karlsruhe, Juli 2001.

[2] F. Manthee, W. Fischle: Feuchtemessung in Tondichtungen mittels Thetasonden. 11. Feuchtetag, Weimar 2002; S. 176-186

[3] C. Hübner: *Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung*. Dissertation FZK Karlsruhe Wiss. Berichte FZKA 6329

[4] K. Kupfer, E. Trinks, Th. Schäfer, Th. Keiner: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Feuchteprofilen mittels TDR-Messleitung*; 11. Feuchtetag, Weimar 2002; S. 23-35

[5] Ferre, P.A.; Topp, G.C.: *Time-domain Reflectometry Sensor Techniques for Soil Water Content Measurements and Electrical Conductivity Measurements*. In Sensor Update Vol. 7; RF and Microwave Sensing of Moist Materials, Food and other Dielectrics; Editors: Kupfer, Kraszewski, Knöchel, Wiley-VCH Verlag 2000; pp. 277

Kontaktadresse:

Dr.-Ing. Klaus Kupfer; MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar; Amalienstr. 13;
99425 Weimar; Tel.: 03643-564361; klaus.kupfer@mfpa.de

Vortrag gehalten anlässlich des Feuchtetages 2004 in Berlin.