

Die Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Feuchteentwicklung in Bauwerken des Hochwasserschutzes oder Untertagedeponien (vgl. Bild 1) mit orts aufgelöster Time Domain Reflectometry (Spatial-TDR [2, 11]) erfordert die genaue Kenntnis der Ausbreitungscharakteristik elektromagnetischer Wellen (vgl. [1]) entlang der entsprechenden TDR-Sensoren in gesättigten und teilgesättigten verlustbehafteten und dispersiven Böden [5, 9, 10].

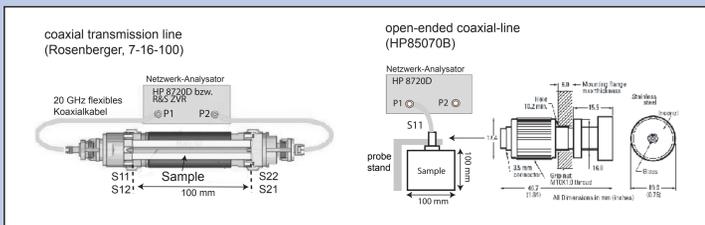


**Bild 1:** (links) Luftbild eines Hochwasserereignisses an der Unstrut bei Straußfurt/Thüringen am 15.04.1994. Am markierten Deichabschnitt wurde ein TDR-Monitoringsystem 2007 installiert [7]. (rechts) Streckenverschlussbauwerk in einem Salzbergwerk in Sondershausen [6].

In der vorliegenden Untersuchung wurden hierzu 3D elektromagnetische finite Elemente Simulationen mit einer kommerziellen Software von Ansoft (High Frequency Structure Simulator - HFSS) für den Flachbandkabelsensor (FBK, Bild 1) durchgeführt. Der Sensor wurde hierzu in Luft, Wasser unterschiedlicher Salinität, ein Mikrosil - Quarzpulver Typ 350 (mittlere Korngröße 11 µm) und eine 50 Masse % Sand- 50 Masse % Ca-Bentonit Mischung SB 50/50 (Calcigel: 71 Ma.% Ca- dioktaedrischer Smektit, 9 Ma.% Illit/dioktaedrischer Glimmer, 1 Ma.% Kaolin, 1 Ma.% Chlorit, 9 Ma.% Quarz, 5 Ma.% Feldspat, 2 Ma.% Calcit, 2 Ma.% Dolomit) eingebettet.

## Dielektrische Materialeigenschaften

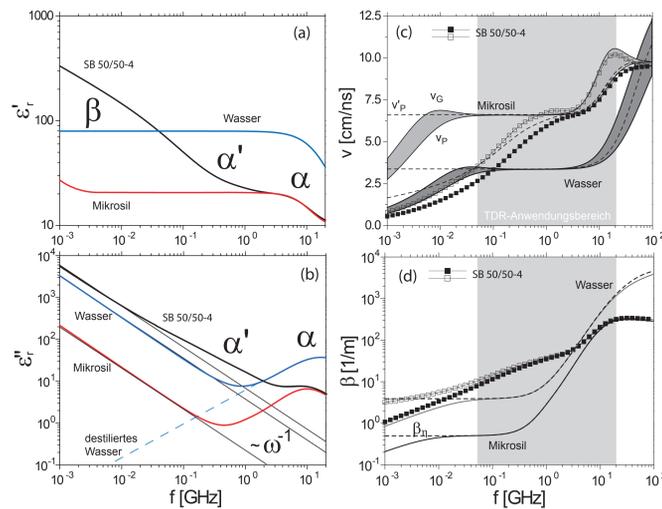
Die dielektrischen Spektren der untersuchten Materialien wurden breitbandig im Frequenzbereich 1 MHz - 20 GHz bei RT und 1 bar bestimmt (HP8720D sowie R&S ZVR Netzwerkanalysator). Hierbei kam eine Kombination aus offener Koaxialleitung (HP85070B) und verschiedener Koaxialmesszellen zum Einsatz (Bild 3). Ermittelt wurden die komplexen S-Parameter der Messzelle mit Probe nach Full-Two-Port Kalibration (Open, Short, 50 Ω -Match, Thru).



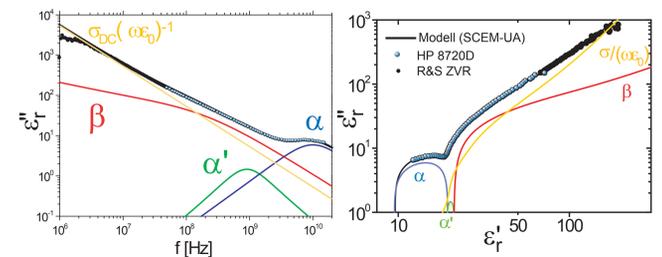
**Bild 2:** Schematischer Aufbau zur Bestimmung der komplexen Dielektrizitätszahl eines homogenen Materiales mittels Koaxialleiter-Technik, (links) Beispiel einer Koaxialmesszelle (7 mm x 16 mm x 100 mm) und (rechts) offene Koaxialleitung (Oberflächensonde).

Die untersuchten Bodenproben wurden hierbei schrittweise mit natürlichem Wasser befeuchtet. Die feuchte Probe nach 24 h unter verschiedenen Verdichtungen in die Messzellen eingebaut und nach jeder Messung die entsprechende Lagerungsdichte und der gravimetrische Wassergehalt bestimmt.

Im untersuchten Druck - Temperatur - Frequenzbereich wurden drei bodenspezifische Relaxationsprozesse angenommen (vgl. Bild 3, 4): ( $\alpha$ ) die primäre Wasserrelaxation, ( $\alpha'$ ) Relaxation einer gebundenen Wasserphase und ( $\beta$ ) Wasser-Ion-Bodenmatrix Wechselwirkungen (Maxwell-Wagner Effekt) [4]. Das dielektrische Relaxationsverhalten wurde mittels eines fraktionierten Relaxationsmodells [3] unter Berücksichtigung einer scheinbaren Gleichstromleitfähigkeit mit Hilfe eines globalen Optimierungsverfahrens (Shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithmus (SCEM-UA)) nach [2] bestimmt.



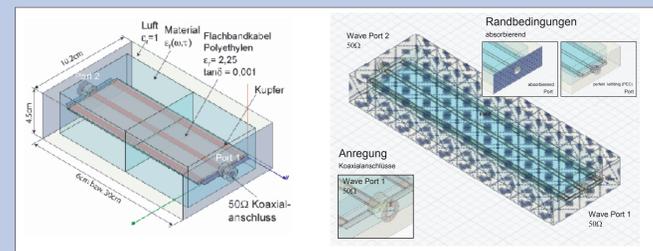
**Bild 3:** (a,b) Komplexe relative Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r^*(\omega)$  in Abhängigkeit von der Frequenz mit den entsprechenden Relaxationsprozessen und (c) Phasengeschwindigkeit  $v_p(\omega)$ , Hochfrequenzapproximation der Phasengeschwindigkeit  $v_G(\omega)$ , (d) Dämpfung  $\beta(\omega)$  und Hochfrequenzapproximation der Dämpfung  $\beta_H(\omega)$  für das Mikrosil-Quarzpulver (gravimetrischer Wassergehalt  $w = 25,47 \%$ , Dichte  $\rho = 1,55 \text{ g/cm}^3$ , Gleichstromleitfähigkeit  $\sigma_{DC} = 0.012 \text{ S/m}$ ), die Sand-Bentonit Mischung (SB 50/50-4,  $w = 28,1 \%$ ,  $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma_{DC} = 0.34 \text{ S/m}$ ) und natürliches Wasser mit  $\sigma_{DC} = 0.18 \text{ S/m}$ .



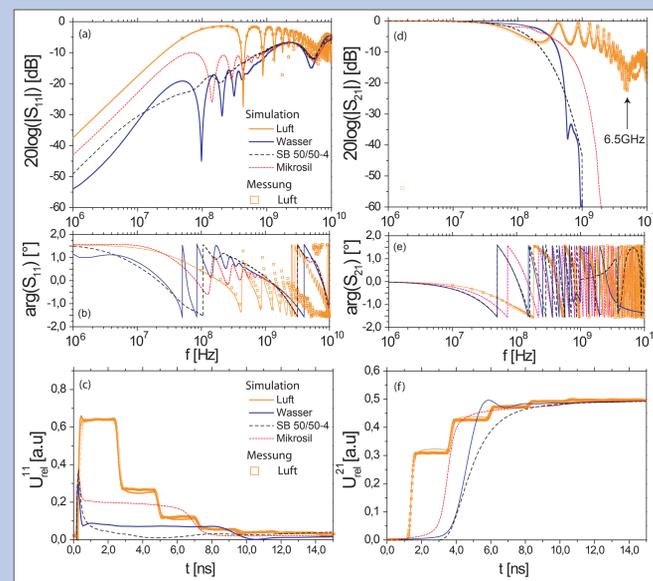
**Bild 4:** (links) Imaginärteil der komplexen relativen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r''(\omega)$  in Abhängigkeit von der Frequenz mit den entsprechenden Relaxationsprozessen ( $\alpha$  und  $\alpha'$ ,  $\beta$ ) und (rechts) entsprechendes Argand-Diagramm

## 3D FE Simulation

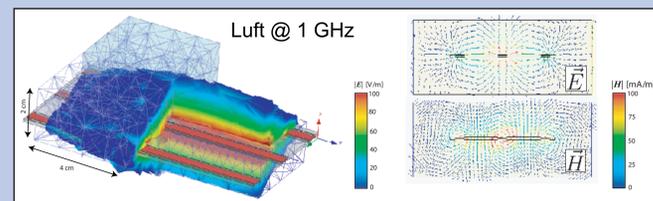
Die auf Vektorelementen basierten FE-Simulationen im Frequenzbereich wurden mit einer adaptiven Netzwerfeinerung für Lösungsfrequenzen von 1 MHz, 10 MHz, 0.1GHz, 1 GHz und 12.5 GHz durchgeführt sowie die S-Parameter und die Sprungantwort im Transmissions- und Reflexionsmodus beidseitig bestimmt (Bild 6).



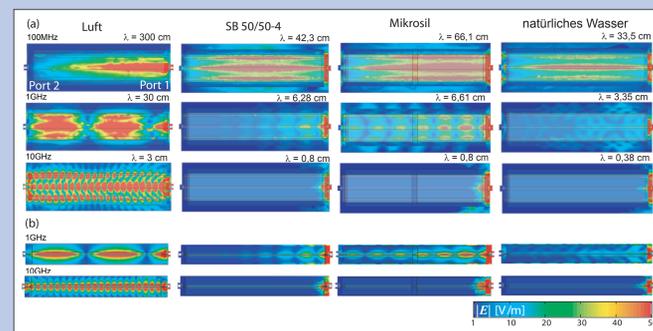
**Bild 5:** Geometrie, Rand- und Anfangsbedingungen der simulierten Struktur des TDR-Flachbandkabelsensors.



**Bild 6:** Ergebnisse der Simulation des 30cm FBK eingebettet in Luft im Vergleich zur Messung mit dem Netzwerkanalysator HP8720D (50 MHz - 10 GHz) sowie in die Materialien aus Bild 2. (a, b) Betrag und Phase des komplexen Reflexionsfaktors an Port 1 und (d, e) Transmissionsfaktors an Port 2 sowie die entsprechende Sprungantwort (c, f) für einen Abschluss von Port 2 mit 50 Ω.



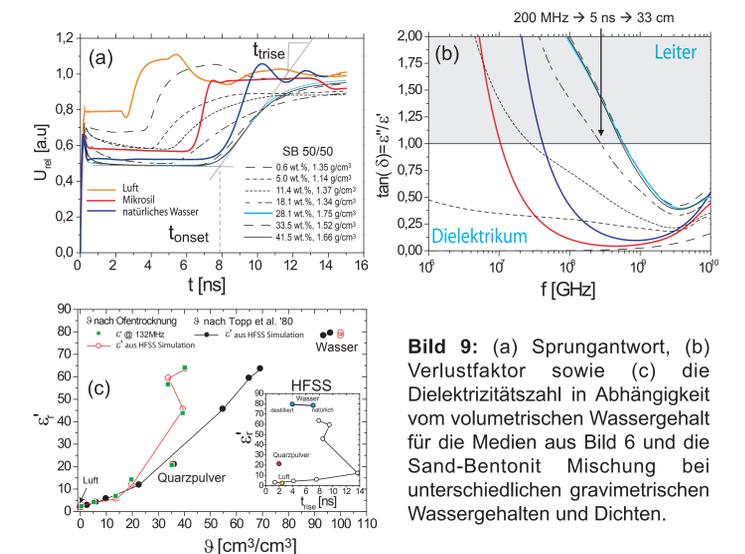
**Bild 7:** Elektrische und magnetische Feldverteilungen des FBK in Luft.



**Bild 8:** Betrag des elektrischen Feldes (stehende Welle) für verschiedene Frequenzen nach Anregung von Port 1 (a) für einen horizontalen und (b) für einen vertikalen Schnitt durch die Struktur in Bild 6.

## Ergebnisse

Die numerischen Berechnungen geben die 3D elektrischen und magnetischen Feldverteilungen realistisch wieder. Qualitativ ist deutlich eine Änderung der Sensitivitätscharakteristik entlang des Sensors in Abhängigkeit von der Frequenz und vom dielektrischen Relaxationsverhalten des umgebenden Materials erkennbar (Bild 8). Speziell für die hoch verlustbehafteten und stark dispersiven Böden nimmt die Anstiegszeit mit steigendem Wassergehalt zu. Ferner führt für das 30 cm Segment die starke Dispersion und Absorption zu einem anomalen Verhalten (Umkehrreffekt) ab einem kritischen Wassergehalt (Bild 9).



**Bild 9:** (a) Sprungantwort, (b) Verlustfaktor sowie (c) die Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt für die Medien aus Bild 6 und die Sand-Bentonit Mischung bei unterschiedlichen gravimetrischen Wassergehalten und Dichten.

## Fazit

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung verdeutlichen die Problematik der genauen Kenntnis der räumlichen Sensitivitätscharakteristik von Feuchtesensoren als Basis einer quantitativen Feuchtebestimmung und die hiermit eng verknüpften Anforderungen an die Inversionsmethodik. Weiterführende numerische, experimentelle und theoretische Untersuchungen in Kombination mit Rekonstruktionsverfahren müssen die Möglichkeiten und Grenzen von Spatial-TDR in stark verlustbehafteten und dispersiven Materialien zeigen.

## Literatur

[1] Forkmann, B. und Petzold, H. (1989), Prinzip und Anwendung des Gesteinsradars zur Erkundung des Nahbereiches, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig  
[2] Heimovaara, T. J., Huisman, J. A., Vrugt, J. A., Bouten, W. (2004), Vadose Zone J., 3, 1128-1145  
[3] Hilfer, R. (2002), Phys. Rev. E, 65, 061510  
[4] Ishida, T.; Kawase, M.; Yagi K.; Yamakawa, J.; Fukada K. (2003), Colloid and Interface Science, 268, 121-126  
[5] Kelleners, T.J., Robinson, D.A., Shouse, P.J., Ayars, J.E., Skaggs, T.H. (2005), Soil. Sci. Soc. Am. J., 69, 67-76  
[6] Kupfer, K., Trinks, (2005), in K. Kupfer (Ed.), Electromagnetic Aquametry, (2005) Springer-Verlag, 349-365  
[7] Schuermann, A., Wagner, N., Bieberstein, A., Kupfer, K. (2007): Status-Seminar Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse, Proceedings, S. 26  
[8] Sihvola, A. (2000): Electromagnetic Mixing Formulas and Applications, IEEE Electromagnetic Waves Series, 47, INSPEC Inc.  
[9] Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P. (1980), Water Resour. Res., 16 (1), 574-588  
[10] Wagner, N. Kupfer, K., Trinks, E. (2006), Measurement Science and Technology, in print  
[11] Schlaeger, S. (2005), Hydrol. Earth Sys. Sci., Vol. 9 (5), pp. 481-492.