

Anwendungen zur Feuchteüberwachung mit TAUPE-Sensoren

F. Königer, IMK; R. Schuhmann, ITC, H.-G. Mayer, MAP; M. Stacheder, A. Rohleder, Universität Karlsruhe

Wirkungsweise

Der Feuchtesensor TAUPE (Taupe = französisch Maulwurf) wurde in Zusammenarbeit mit der Technologietransfer-Abteilung (MAP) am Forschungszentrum Karlsruhe für die großflächige Bestimmung von Wassergehaltsverteilungen in horizontalen Bodenschichten entwickelt [1, 3, 4, 5].

Das Funktionsprinzip nutzt die elektrophysikalische Wechselwirkung zwischen einem elektrischen Leiter und seiner Umgebung. Bei der Sensorkonstruktion aus einem Flachbandkabel mit drei Kupferleitern (Abb. 1) greift ein elektromagnetisches Feld in das umgebende Medium und wirkt in einem Radius, der etwa dem Leiterabstand entspricht. Ist das Medium feuchter, nimmt seine Dielektrizitätszahl DZ wegen des großen Unterschieds von Wasser (DZ ca. 80) und Bodenmaterial (DZ ca. 3 bis 7) deutlich zu und beeinflusst die Ausbreitungseigenschaften und die Dämpfung des Feldes.

Bei der Anwendung des TDR (Time Domain Reflectometry, Zeitbereichs-Reflektometrie)-Verfahrens wird eine Folge von steilflankigen Rechtecksignalen auf die Leiter aufgeschaltet und im Zeitbereich das von dem Sensor reflektierte Messsignal aufgezeichnet [5]. Das dazu äquivalente FDR (Frequency Domain Reflectometry, Frequenzbereichs-Reflektometrie)-Verfahren verwendet diskrete Frequenzen für die integrale Ermittlung der Feuchte, indem Phasenänderungen des Signals längs der Sensoren ermittelt werden.

Eine flächige Anordnung von TAUPE-Sensoren mit einer Länge bis zu 20 m und, je nach Geländeneigung, in einem Abstand bis zu 10 m ermöglicht eine großräumige Ermittlung des Wassergehaltes. Sie kann durch zusätzliche Anordnung von Sensoren in verschiedenen Tiefen Informationen über die Variation des Wassergehaltes auch in einem größeren Volumen liefern.

Anwendungen

Einsatzgebiete für den Feuchtesensor TAUPE betreffen alle Anwendungen, bei denen die Kenntnis der räumlichen Variabilität der Feuchte in einem Medium von Interesse ist. In vielen Fällen sind repräsentative Feldmittelwerte und ihre zeitliche Änderung von Interesse, wobei die örtliche Auflösung von kleinskaligen Feuchtevariationen entlang des Sensors zusätzliche Informationen liefert.

Dies trifft besonders zu auf die Anwendungen:

- Dichtungskontrollsysteme für Mülldeponien (TDR- und FDR-Messungen) [1, 3, 6],
- Schneefeuchtemessung und Bestimmung des Schneewasseräquivalents, das ist die Menge an Wasser, die sich beim Schmelzen aus einer bestimmten Menge an Schnee bildet [2],
- Vertikale Überwachung der Wasserverteilung im Untergrund.

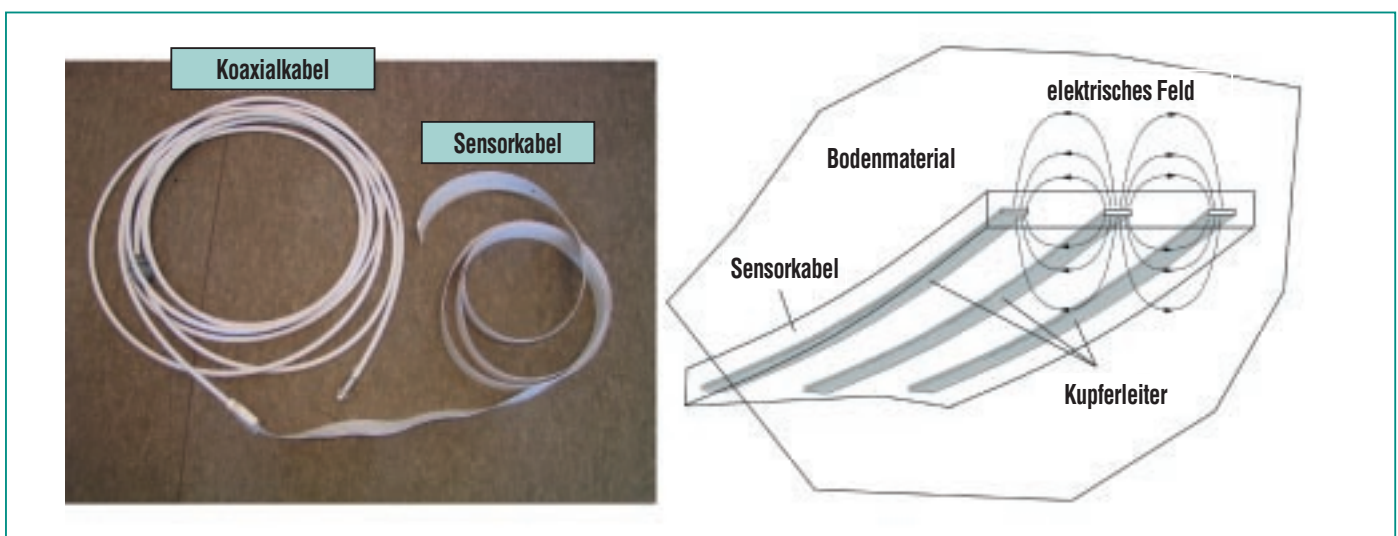


Abb. 1: TAUPE-Kabel mit koaxialer Signalzuführung und angegossenem Flachbandkabel mit drei Kupferleitern als Sensor.

Dichtungskontrollsysteme für Mülldeponien

Gemäß Deponieverordnung sind Oberflächenabdichtungen von Abfalldeponien so auszulegen, dass sie das Auswaschen von im Müllkörper befindlichen Schadstoffen durch Oberflächenwasser verhindern und das Grundwasser vor Verunreinigungen schützen. Das Dichtungselement ist zwischen Müll und Rekultivierungsschicht eingebaut.

Deponie Karlsruhe-West

Seit 1999 ist auf der Mülldeponie Karlsruhe-West eine vom Land Baden-Württemberg geförderte Demonstrationsanlage mit TAUPE-Sensoren (Abb. 2) in Betrieb und liefert kontinuierlich Daten über den Zustand der Abdichtung. Durch sie soll das Verfahren die Marktreife und damit einen breiten Einsatz im Bereich Deponieabdichtungskontrolle erreichen.

Deponie Magdeburg

Weitere Testanlagen mit TAUPE-Feuchtesensoren wurden zusammen mit MAP, mit der Umweltbehörde der Stadt Magdeburg und

der Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH, GGU, 2000 auf der Mülldeponie „Cracauer Anger“ in Magdeburg eingebaut. Sie sollen unter anderem die Langzeitfunktionsfähigkeit von unterschiedlichen geotextilen Drainagematten, wie sie im Tiefbau eingesetzt werden, demonstrieren. Das TAUPE-Kontrollsystem bestimmt hier die zeitliche Verzögerung im Wassertransport zwischen Niederschlag und Wassereintritt in das Dränelement.

Deponie „Hintere Dollert“

Im Rahmen eines Technologietransfer-Projektes wird zusammen mit dem Lizenznehmer Meteolabor AG und dem Landkreis Rastatt in einem Testfeld mit einer Fläche von 20.000 m² auf der Deponie „Hintere Dollert“ in Oberweier die Funktion des Dichtungselements unter realen Bedingungen getestet, also unter dem Einfluss von Deponiesetzungen, der Bildung von Deponiegas durch die Verrottung des Müllmaterials sowie Durchsickerungen von Oberflächenwasser direkt aus der Rekultivierungsschicht. Das im Testfeld installierte Dichtungskontrollsystem TAUPE gewährleistet die Kontrolle der

Dichtigkeit. Das Land Baden-Württemberg hat den Bau des Testfeldes finanziell gefördert.

Insgesamt sind 230 TAUPE-Sensorkabel in zwei Kontrollschichten, unterhalb des Dichtungselements und darüber im unteren Bereich der Rekultivierungsschicht, verlegt. Seit Mitte August 2005 werden die Daten des TAUPE-Systems kontinuierlich aufgezeichnet, ausgewertet und graphisch dargestellt.

Abb. 3 zeigt beispielhaft eine charakteristische Feuchteverteilung über die Testfeldfläche der Deponie in Oberweier in der unteren Kontrollschicht, die aus den Messsignalen der einzelnen Sensoren ermittelt werden. Dort ist erkennbar:

- An der Oberseite des Testfeldes und an den Rändern treten zum Teil hohe Feuchtwerte (blau) auf. Hier ist die Abdichtung gegen die Umgebung nicht optimal und Niederschlag kann eintreten.
- Die Feuchtwerte zwischen den beiden Wirtschaftswegen in der Hangmitte entsprechen den Erwartungen (weitgehend grün unterlegt) und liegen zwischen 8 und 11 Gewichtsprozent. Im mittleren Bereich ist der hohe Wassergehalt des dort feucht eingebauten Materials sichtbar.
- Am Hangfuß sind ebenfalls erhöhte Werte durch laterale Abflüsse gemessen.

Kritische, rot eingefärbte Bereiche können so leicht identifiziert und näher untersucht werden. Die Analyse der jeweiligen Sensordaten und die Prüfung auf Auffälligkeiten



Abb. 2: Einbau von TAUPE-Feuchtesensoren auf der Mülldeponie KA-West.

erlaubt es, einen möglichen Wasserzutritt durch die Dichtschicht zu erkennen.

Das System soll Leckagen mit einer Ortungsgenauigkeit $< 100 \text{ m}^2$ und die Änderung des Wassergehalts in der Abdichtung um ± 5 Volumenprozent detektieren. Mit dieser Messaussage wird es dem Deponiebetreiber möglich sein, das Schadenspotenzial einer detektierten Leckage abzuschätzen und geeignete Maßnahmen in die Wege zu leiten. Durch die Kenntnisse dieser Parameter ergeben sich erhebliche Einsparmöglichkeiten bei Reparaturarbeiten.

Schneefeuchtebestimmung

In dem vom Forschungszentrum koordinierten EU-Projekt „SNOW-POWER“ hat der kanadische Partner Hydro-Quebec, einer der weltgrößten Stromerzeuger aus Wasserkraft, festgestellt, dass sich durch die messtechnische Bestimmung der Schneefeuchte in einem ausgewählten Wassereinzugsgebiet von ca. 320 Tm^2 und einer damit erzielten Verbesserung der Zuflussprognose für großflächige Wasserspeicher um nur 10 % eine Ertragssteigerung durch die Steuerung des Wasserstandes von 2,2 TWh bzw. 45 M€ erzielen ließe.

Darüber hinaus tragen Schneefeuchtemessungen zur Verbesserung der Lawinenwarnung insbesondere von Nassschneelawinen bei, wobei über die Wassergehaltsbestimmung das Ausmaß und der Zeitpunkt der Schneeschmelze bestimmt wird. Die Hochwasservorhersage lässt sich damit ebenfalls erheblich präzisieren.

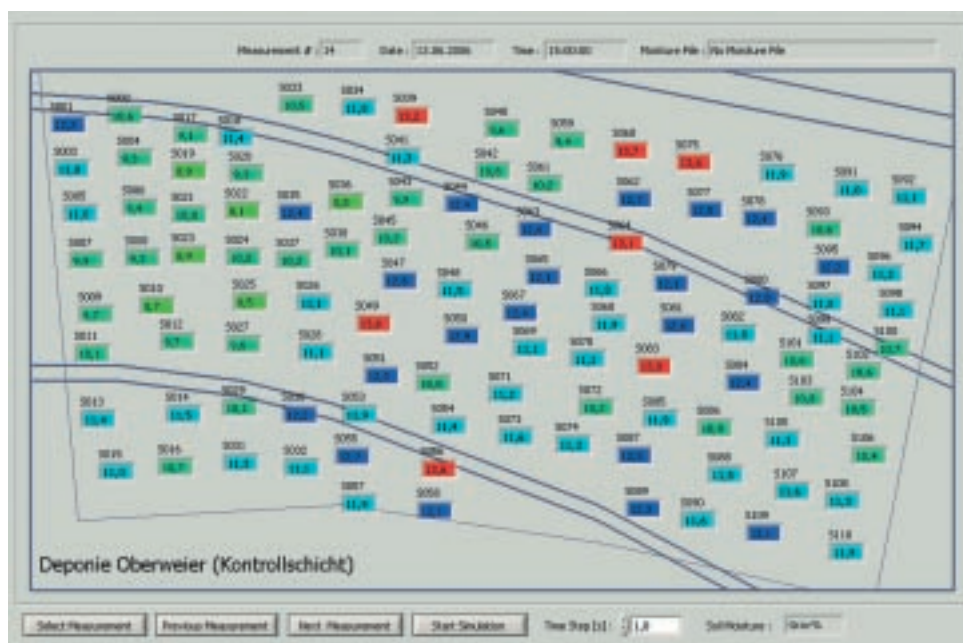


Abb. 3: Feuchteverteilung im Testfeld in der Kontrollschicht unter der Abdichtung. Die Zahlen in den farbig unterlegten Feldern zeigen die über die Sensorenlänge von 10 m integrierten gravimetrischen Wassergehalte der TAUPE-Sensoren in ca. 2 m Tiefe zu einem Zeitpunkt.

In drei Wintern wurden TAUPE-Sensoren (Abb. 4) auf einem Testfeld des Schnee- und Lawinenforschungszentrums Davos und auf Testfeldern von Hydro-Quebec in Canada getestet. Als Referenzmessungen dienten manuell erfasste Schneeprofilaufnahmen, in deren Rahmen auch der Wert des Schneewasseräquivalents schichtweise bestimmt wurde sowie Messungen der Dichte mittels eines Schneekissens (Abb. 5).

Die Stärke des TAUPE-Sensors für die Charakterisierung der Schneedecke liegt somit darin, dass zusätzlich zur Dichte und dem Schneewasseräquivalent auch der Flüssigwassergehalt der Schneedecke gemessen wird. Dies ist einerseits für hydrologische Fragestellungen interessant, weil damit der Zeitpunkt der Sättigung und des ersten Abflusses von Wasser aus der



Abb. 4: Installation des TAUPE-Sensors für die Bestimmung von Schneefeuchte, Schneedicke und Schneewasseräquivalent (Messfeld Weissfluhjoch, Davos (CH)) zwischen einem Bodenanker und dem Turm. Die obere Befestigung muss höher liegen, als die maximal zu erwartende Schneedecke.

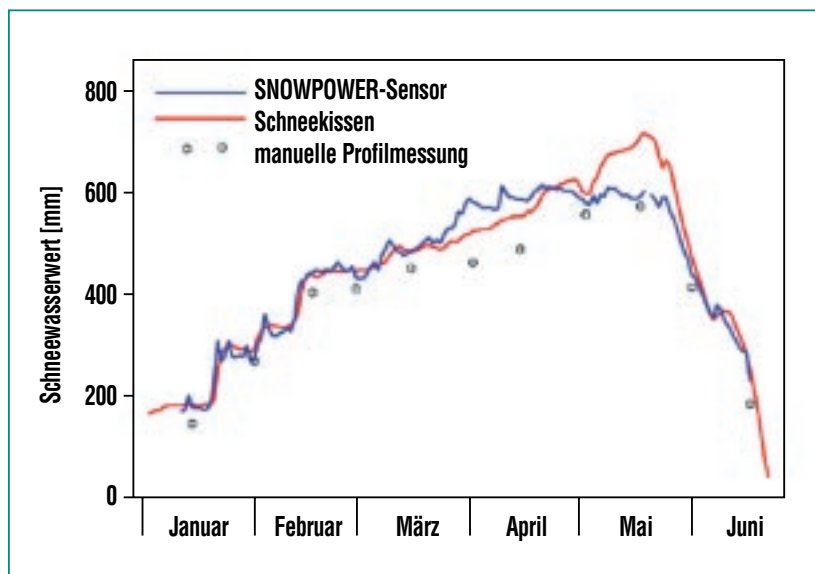


Abb. 5: Saisonaler Verlauf des Schneewasserwerts im Winter 2004/05 auf dem Weissfluhjoch, gemessen mit dem SNOWPOWER-Sensor, dem Schneekissen und aus Profilmessungen.

Schneedecke festzustellen ist. Andererseits kann diese Zusatzinformation für die Gefahrenbeurteilung bezüglich Nassschneelawinen von bedeutendem Interesse sein.

Schließlich kann man zusammen mit Fernerkundungsdaten und hydrologischen Modellen insbesondere die Zuflussprognose für Wasserkraftwerke deutlich verbessern.

stimmt maßgebend die verfügbaren Wassermengen für die Vegetation. Besonders bei geringen Flurabständen des Grundwassers kann durch eine unverträglich große Absenkung eine Umgestaltung der Flora erfolgen, die dann auch Auswirkungen auf die Fauna haben kann. Die Vielzahl der Grundwasserentnahmestellen in Deutschland, welche diesen Bedingungen entsprechen müssen, verspricht eine hohe wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens.

In einem Technologietransfer-Vorprojekt in Zusammenarbeit mit dem Landesumweltamt Sachsen-Anhalt sind die bisherigen TAUPE-Sensoren dahingehend abgeändert worden, dass existierende Sensoren auf PVC-Rohre (Abb. 6) aufgebracht wurden. Auf einer Mülldeponie in Magdeburg-Hängelsberge messen die eingebrachten Rohrsensoren die Änderung der Müllfeuchte durch Bewässerung an der Oberfläche bis in sechs Meter Tiefe. Das Ergebnis liefert eine Bewertungsgrundlage für die einzubringende Wassermenge und ihre Verteilung in unterschiedlichen Tiefen und steuert die Optimierung des Deponiegasausstoßes. Lokale Vernässungen und Austrocknungen sowie permanente Zonen höherer Feuchte sind damit klar erkennbar (Abb. 7).

Dieses Projekt läuft seit Mitte Juli 2006 und liefert seither eine detaillierte räumliche und zeitliche Auflösung der Feuchteverteilung im Müllkörper.

Das Technologietransfer-Projekt „Rohrsensor“ beinhaltet, gemeinsam mit einem Lizenznehmer, die Entwicklung eines professionell anwendbaren Sensors auf den



Abb. 6: Rohrsensor für Vertikalprofil der Feuchte in einer Mülldeponie.

Rohrsensor

Eine weitere Anwendung von TAUPE-Feuchtesensoren befasst sich mit der Bestimmung von vertikalen Feuchteprofilen und Wassergehaltsbestimmung in verschiedenen Bodenmaterialien.

Ein aktuelles Technologietransfer-Projekt mit den Stadtwerken Karlsruhe hat zum Ziel, an einer Studie mitzuarbeiten, welche die Umweltverträglichkeit der Wasserentnahme durch die Stadtwerke und die Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten der Wasserwerke untersucht.

Die Versickerung von Niederschlägen in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Erdbodens be-

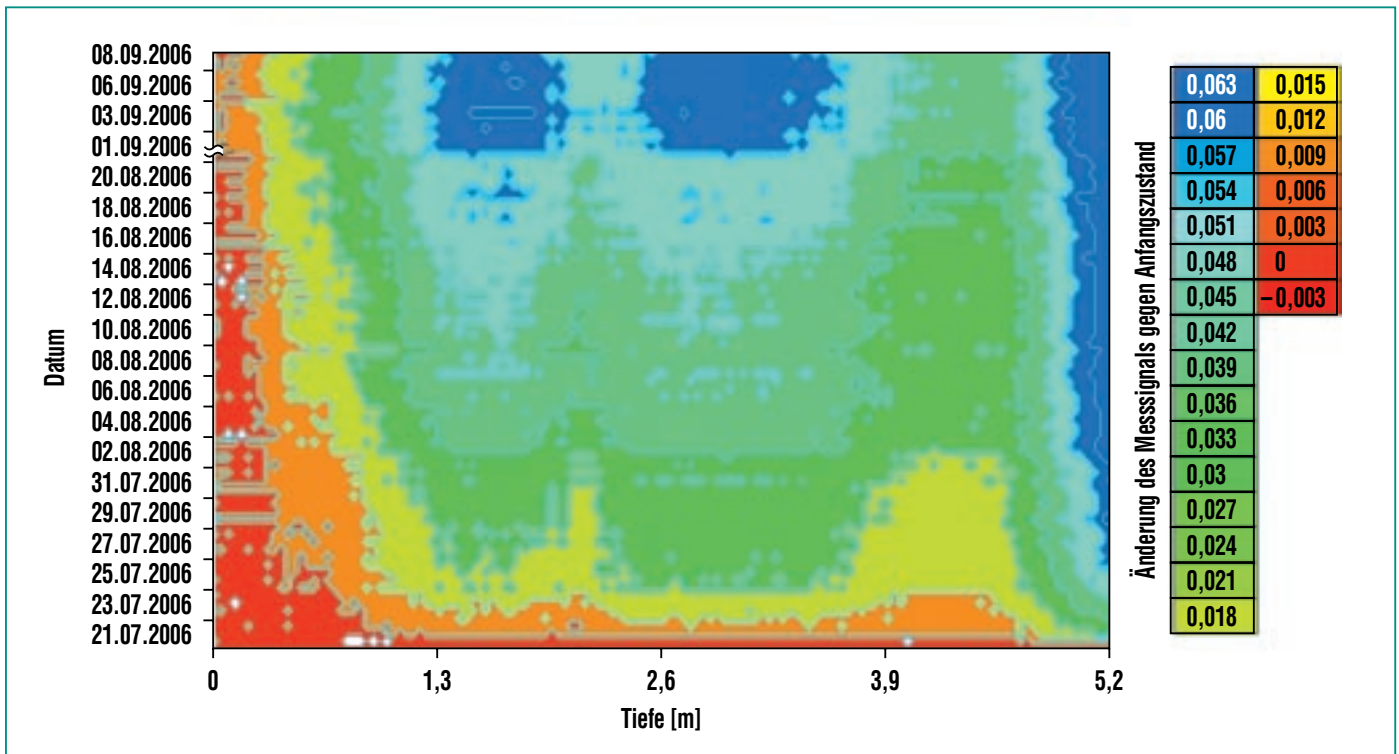


Abb. 7: Zeitliche und räumliche Variation des Messsignals entlang des Rohrsensors der Länge 6 m, bezogen auf einen Ausgangszustand der Feuchte im Müllkörper.

Grundlagen des bisherigen TAUPE-Feuchtesensors und den Erkenntnissen aus dem Vorprojekt in Magdeburg.

Derartige Rohrsensoren sollen in einfacher Weise den nahezu ungestörten Einbau in eine beliebige Umgebung, zum Beispiel auch in Dämme und Deiche, ermöglichen. Die Messtechnik zur Ermittlung von Wassergehalt und Feuchteverteilung besteht aus der Zusammenstellung bestehender und weiterentwickelter Komponenten mit Berücksichtigung von effektiven Stromspartechniken, die einen netzunabhängigen Betrieb auf längere Dauer möglich macht.

Zusammenfassung

Unterschiedliche Anwendungen des TAUPE-Feuchtemessverfahrens zeigen den breiten Einsatzbereich zu gänzlich verschiedenen Fragestellungen. Sie reichen von der Kontrolle der Dichtigkeit von Mülldeponien über die Bestimmung des Schneewasseräquivalents bis zur Überwachung der Grundwasserneubildung. Der besondere Vorteil des Verfahrens liegt in der Fähigkeit, nicht nur Punktmessungen durchführen zu können, sondern die Feuchte in einem größeren Volumen auch orts aufgelöst zu bestimmen. Da-

mit sind in einem weiten Anwendungsgebiet, sowohl in der Wissenschaft als auch in wirtschaftlich interessanten Bereichen, detaillierte Aussagen über die Wassergehaltsverteilung in einem Medium möglich.

Literatur

- [1] A. Brandelik, C. Hübner, R. Schuhmann, (1996), *Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten*, Deutsches Patent Nr. 19501196
- [2] A. Brandelik, C. Hübner, (1997), *Verfahren zur Bestimmung des volumetrischen Flüssigwasser-gehalts und der Dichte von Schnee und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*, Deutsches Patent Nr. 19755052
- [3] A. Brandelik, C. Huebner, R. Schuhmann, (1998), *Moisture sensor for large area layers* (German patent no. 4432687, European patent no. 0804724, US patent no. 5942904), 16 June
- [4] A. Brandelik, C. Hübner, *Subsurface Sensing, Subsurface Aquametry, Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Vol. 1, No. 4, (2001) 365–376
- [5] C. Hübner, A. Brandelik, (2001), *Elektrophysikalische Aquametrie*, Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrg. 33, 1/2001, S. 23–30
- [5] R. Becker, A. Bieberstein, C. Hübner, R. Nüesch, W. Schädel, A. Scheuermann, S. Schlaeger, R. Schuhmann, 2003, *Nondestructive in situ and online measurements of soil physical parameters*, in *Soil and Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 39th US Rock Mechanics Symposium, Cambridge*, 22–26 June
- [6] F. Königer, J. Roth, W. Rabl-Lasar, R. Schuhmann, R. Nüesch, *Dichtungskontrollsystem für Deponien – Erfahrungen mit dem System TAUPE auf der Hausmülldeponie „Hintere Dollert“ des Landkreises Rastatt*, *Berichtsband zum Workshop 2006, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis*, Oktober 17–18, Karlsruhe, Germany, S. 215–221