

# Forschungsberichtsblatt

Dr. Alex Brandelik

Forschungszentrum Karlsruhe/ Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Laufzeit: 01.04.2000 - 31.12.2003

## 1. Forschungsergebnis

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist es gelungen, das Kontrollsystem „TAUPE“ so weit zu erüchtigen, dass es zur Kontrolle von Abdichtungssystemen von Deponien eingesetzt werden kann. Dazu waren folgende Aufgabenstellungen zu erfüllen:

- Es ist möglich, aus dem gemessenen aktuellen Bodenwassergehalt auf die hydraulische Leitfähigkeit ( $k_f$ -Wert) der den Sensor umgebenden Bodenschicht zu schließen. Dazu ist es erforderlich, die Materialkenngrößen der umgebenden Bodenschicht zu kennen. Die Abhängigkeit der gemessenen Dielektrizitätszahl vom Wassergehalt und der Einbaudichte hat in einer Kalibrierkurve vorzuliegen. Diese Kontrollschicht kann analog den Vorgaben der BAM zu Schutzschichten unter Kunststoffdichtungsbahnen aufgebaut werden: Schichtdicke  $> 15$  cm,  $k_f$ -Wert (gesättigt)  $< 10^{-6}$  m/sec. Geeignet dafür ist ein schluffiger Sand. Es konnte gezeigt werden, dass über die Ganglinie der gemessenen Wassergehalte eine weit verbesserte Genauigkeit in der Bilanzierung der Flüsse durch die betrachteten Schichten erreicht wird.
- Die Detektion von Leckagen ist grundsätzlich möglich. Dabei wird ausgenutzt, dass auf Deponieböschungen mit einer Neigung steiler als 5% Leckagewasser lateral in der Kontrollschicht abfließt. D.h., nach einer für die Randbedingungen der Deponie (Abdichtungsverhältnisse, Schutzgut, eingelagerte Abfälle etc.) zulässigen Strecke muss ein Sensorkabel erreicht werden. Bei Böschungsneigungen steiler 1:6, was auf Deponien regelmäßig anzutreffen ist, ist ein Sensorabstand von  $\gg 5$  m möglich. Das lässt auch einen wirtschaftlichen Einsatz des Kontrollsystems zu. Leckagen in Kunststoffdichtungsbahnen werden mit anderen Systemen (z.B. system Geologger) wirtschaftlicher überwacht. Jedoch ist es mit dem „TAUPE“-System möglich, die eindringende Wassermenge abzuschätzen und so dem Deponiebetreiber Information zu geben, den Sanierungsbedarf zu definieren.
- Es ist möglich, handelsübliche TDR-Geräte als Impulsgeber für das Sensorsystem einzusetzen. Die Messkonfiguration, bestehend aus Multiplexern zum Ansteuern mehrerer Sensoren, einem Signaltongeber zu Identifikation des angesteuerten Sensors, den Sensoren selbst und der Steuer-, Speicher- und Auswerteeinheit konnte im Lysimeter über drei Jahre getestet werden und hat ihre Tauglichkeit bewiesen.

Die intensive Beschäftigung mit der Übertragung der Impulslaufzeiten entlang den Sensoren in die Dielektrizitätszahl des umgebenden Mediums und die weitere Übertragung in den Bodenwassergehalt führte dazu, die Phänomene der Hysterese bei der Be- und Entwässerung des Bodens genauer zu untersuchen. Es ist bemerkenswert, dass die Hauptaktivitäten zur Untersuchung der Auswirkungen der Hysterese auf die eindeutige Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in Böden in dem Zeitraum zwischen 1955 und 1975 liegen. Mit den Veröffentlichungen von *van Genuchten* und *Mualem* war das Thema offensichtlich wissenschaftlich abgeschlossen, ohne jedoch eine endgültige, allgemein gültige Lösung für die Anwender anzubieten.

Die bisherigen Messwertes Saugspannung ( $\psi$ ) zur hydraulischen Leitfähigkeit ( $k_f$ -Wert) unterliegen stark der Hysterese. *Mualem* stellt die Bandbreite der Hysterese (Abstand der Punkte der Hauptbewässerungs- und der Hauptentwässerungskurve) dar:

Beziehung: Wassergehalt = f(Saugspannung) [pF-WG-Kurve]

Faktor 3

Beziehung:  $k_f$ -Wert = f(Saugspannung)

Faktor 200

Aussagen, die eine zuverlässige Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit zulassen, sind somit unmöglich. Die Vergrößerung der Unsicherheit um den Faktor 100 resultiert auch aus den Beobachtungsmaßstäben. Diese Unsicherheit liefert die Grundlage für die Wahl des Bodenwassergehaltes als relevantem Messparameter. Betrachtet man die maximale Bandbreite der Hysterese bei der  $k_f$ -Wassergehalt-Beziehung, so nennt ihn Mualem mit

Beziehung:  $k_f$ -Wert = f(Wassergehalt) Faktor 0,4

Diese Beziehung liefert also Ergebnisse, die um den Faktor 500 schärfer, d.h. eindeutiger, sind als die aus der  $k_f$ -Saugspannung-Beziehung. Für die Konstruktion des für das vorliegende Projekt erforderlichen Messfeldes und die Auswahl der zugehörigen Bodenmaterialien konnten daraus wertvolle Schlüsse gezogen werden. Die Auswahl der Bodenmaterialien ist so zu treffen, dass Hystereseeffekte minimiert werden, um eine möglichst eindeutige Zuordnung gemessener Bodenwassergehalte zu den zugehörigen  $k_f$ -Werten zu ermöglichen.

## 2. Fortschritt in Wissenschaft und Technik

Der Fortschritt in Wissenschaft und Technik ist im Wesentlichen schon im vorgenannten Punkt dargestellt. Es konnte belegt werden, dass der Einfluss der Hysterese zur Bestimmung des  $k_f$ -Werts aus dem Bodenwassergehalt bei dem gewählten Material vernachlässigbar gering wird. Mittels der gewonnenen Beobachtungsreihen kann eine Bilanzierung des Flusses durch einen Kontrollquerschnitt mit wesentlich verbessertem Vertrauensbereich erfolgen. Die Abschätzung kann helfen, z.B. auf einer Deponie den notwendigen Handlungsbedarf bei flächigem Versagen des Dichtungssystems oder bei detektierten Leckagen zu definieren. Mit der ganzheitlichen Bewertung der Messergebnisse (in Bezug auf die spezifischen Randbedingungen der Deponie) wird eine wirtschaftliche und effektive Deponiebewirtschaftung unterstützt.

## 3. Empfehlungen für die Praxis

Mit der Weiterentwicklung des Sensorsystems „TAUPE“ wird es möglich, bei gegebenen bodenmechanischen Randbedingungen die hydraulische Leitfähigkeit ( $k_f$ -Wert) direkt aus dem Bodenwassergehalt zu bestimmen. Der  $k_f$ -Wert ist qua lege der Überwachungsparameter für Deponieabdichtungen. Somit besteht ein Werkzeug, mit dessen Hilfe der Fluss von Wasser in einem Kontrollquerschnitt über einen Beobachtungszeitraum bilanziert werden kann. Aus dem Wassergehalt bzw.  $k_f$ -Wert einer Kontrollschicht kann der  $k_f$ -Wert des darüber befindlichen Dichtungspaketes bestimmt werden und mit den genehmigten Werten abgeglichen werden. Das Kontrollsystem ist ein geeignetes Hilfsmittel, den Zustand der Oberflächenabdichtung über den Stilllegungszeitraum und die Nachsorgezeit permanent und zeitaufgelöst zu kontrollieren. Veränderungen werden schon in ihrer Entstehung und Entwicklung deutlich. Es wird der zuständigen Behörde ein weiteres Beurteilungskriterium an Hand geben, ob eine Deponie die Stabilität erreicht hat, dass sie aus Überwachungsabschnitten entlassen werden kann.

Mit diesen Auswertungen wird es weiter möglich werden, die Eingangsparameter für numerische Simulationsprogramme (z.B. HELP) nicht nur statisch, sondern auch dynamisch über die Zeit darzustellen. Der Jahresgang der  $k_f$ -Werte kann in die numerischen Berechnungen Eingang finden.

Das passende Messequipment konnte im Rahmen des Projektes entwickelt werden. Es wird derzeit nach den Richtlinien und Empfehlungen der Bundesanstalt für Materialforschung- und -prüfung (BAM) zertifiziert. Als Teil eines innovativen Abdichtungssystems wird das Kontrollsystem derzeit auf einer Deponie in Baden-Württemberg installiert werden.