

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Dichtungskontrollsystem für Deponien



von
A. Brandelik, R. Schuhmann, F. Königer
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Forschungszentrum Karlsruhe

Förderkennzeichen: BWD 20003

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

März 2004

Zusammenfassung

Mülldeponien sind gegen Emissionen in die Umwelt prüfbar zu sichern. Bisher bekannte Überwachungssysteme können nur Verletzungen der Konvektionssperren detektieren. Das zur Weiterentwicklung geförderte Messsystem TAUPE überwacht mineralische Abdichtungen durch das Monitoring des Wassergehalts der einzelnen Dichtungselemente oder des gesamten Abdichtungssystems. Gemessen wird die Dielektrizitätszahl des Bodens, woraus der Wassergehalt mit Hilfe einer Mischungsregel, die durch Probenahme kalibriert wird, bestimmt wird. TAUPE gewährleistet zusätzlich eine flächige Überwachung. Die Projektziele sind:

1. Nachweis, dass mit TAUPE aus dem Monitoring des Wassergehaltes der Wasserdurchfluss durch das Dichtungssystem flächenaufgelöst bestimmt werden kann,
2. Weiterentwicklung von TAUPE zur Leckage-Ortung von KDB,
3. Konstruktion einer robusten, einfachen und feldtauglichen elektronischen Messeinheit (anstelle der derzeit eingesetzten teuren Laborgeräte).

Für das Erreichen der Ziele 1 und 2 wurde ein Lysimeter von 8 m x 4 m Fläche und 1,5 m Tiefe gebaut. Dieser ist mit Vergleichsmessinstrumenten ausgestattet. Zur Vorbereitung der Lysimetermessungen wurde eine umfangreiche Literaturstudie über das bodenphysikalische Phänomen der Hysterese zwischen Be- und Entwässerung des Bodens durchgeführt. Die Kenntnis der Wirkung und Bedeutung der Hysterese ist Voraussetzung dafür, dass die Bestimmung des Durchflusses aus dem Wassergehalt genügend genau erfolgen kann. Zur Erfüllung der zweiten Aufgabe wurde darüber hinaus eine Materialsuche durchgeführt. Das gesuchte Material leitet das durch das Leck dringende Wasser lateral den eingelegten TAUPE-Sensoren zu. Im weiteren wurden in einem umfangreichen Messprogramm am Lysimeter die theoretischen Annahmen verifiziert. Die neue elektronische Messeinheit wurde entwickelt (Aufgabe 3) und in eine industrielle Fertigung überführt.

Das Vorhaben wurde im Rahmen des Förderprojektes „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS) am Forschungszentrum Karlsruhe mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Summary

Landfills have to be controlled against emissions into the environment. Older control systems can only detect leaks in plastic liners. In contrast, the control system TAUPE, object of this project, monitors mineral barriers by measuring the water content in the barrier layers or in the entire barrier. The measured physical quantity is the dielectric coefficient of the soil, which will be transformed in water content by the help of mixing rules and former calibrations. TAUPE is a large-surface control system. The project goals are:

1. to bring the evidence, that TAUPE can measure even the water flux distribution through the barrier beside the water content determination in the layers,
2. TAUPE has to be redesigned in order to localise plastic liner leaks as well,
3. The existing expensive laboratory electronic instruments have to be replaced by a new design for a reliable, low-cost and out-door operation.

To reach the goals 1 and 2 it was necessary to build a lysimeter with a surface of 8 m x 4 m and a depth of 1,5 m. It is equipped with control instruments in order to make reliable comparisons to the TAUPE data. A comprehensive reference study was preceded in order to know the soil physical phenomena of the water retention hysteresis between wetting and drying. The consequence and importance of the hysteresis were cleared which are the conditions for a sufficiently accurate flux determination from the water content. To solve the task 2, a broad inquiry was started to find suitable liner material which distribute the leak water lateral on the distance to the beside measuring sensor. A comprehensive measuring program verified the possibility of the flux determination. The new electronic instrument is already developed (goal 3) and transferred into an industrial production design.

Support by the Program “Environmental Quality and its Security and Sustainment” (BW-Plus) at the Forschungszentrum Karlsruhe with funds of the state of Baden-Württemberg is gratefully acknowledged.

I. Grundlagen, Aufgabenstellung

1 Motivation und Rationale des Vorhabens

Die rechtlichen Grundlagen für die Anforderungen an Deponieoberflächenabdichtungen wurden im Zwischenbericht anlässlich des Statusseminars im Februar 2001 ausführlich dargestellt. Die weitere Gültigkeit dieser Bedingungen ist mittlerweile durch den Erlass der Abfallablagerungs-Verordnung und der Deponieverordnung mit der Aufnahme wesentlicher Qualitätskriterien aus dem europäischen Recht gewährleistet.

Die Notwendigkeit der Untersuchungen konnte mit einer repräsentativen Erhebung über den Stand der Umsetzung des Baus von Deponieoberflächenabdichtungen belegt werden. Die Mehrzahl der Dichtungen sind ausschließlich aus mineralischen Elementen aufgebaut. Das belegt die Notwendigkeit, TAUPE oder ähnliche Kontrollsysteme einsetzen zu können. Unterstützend wirkt die Empfehlung „Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme in Oberflächenabdichtungen von Deponien“ der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung). Weiter wird das TAUPE Kontrollsystem im „Leitfaden zur Deponiestilllegung“ des VKS (Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V.) und der ATV-DVWK (Deutsche Vereinigung der Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) z.B. im Teil IV (Technische Kennblätter) unter 3.3. explizit genannt und beschrieben.

2 Aufgabenstellung

Das TAUPE-Messsystem (Bestimmung des Bodenwassergehaltes mittels Messung der Dielektrizitätskonstanten, DZ) hat sich im bisheriger Einsatz z.B. auf der Mülldeponie Karlsruhe-West bewährt. Die vorliegenden Erfahrungen aus den durchgeführten Messungen ließen weiteres Potenzial erkennen. Dazu wurden die folgenden Aufgaben erfüllt:

- o Klärung der Bestimmbarkeit des flächigen Durchflusses aus ein- oder mehrlagigen Messungen des Wassergehaltes der Dichtung,
- o Ertüchtigung des Messsystems für die Detektion kleinräumiger Durchflüsse (Leckageortung) z.B. in Konvektionssperren,
- o Konstruktion eines robusten, preiswerten und feldtauglichen elektrischen Messgerätes anstelle der heute eingesetzten teuren Laborgeräte.

Zur Umsetzung der ersten beiden Aufgaben wurde ein Lysimeter gebaut. Mit den Messungen am Lysimeter konnte der Nachweis erbracht werden, dass die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) eindeutig aus dem Bodenwassergehalt bestimmt werden kann. Der Durchflusses durch einen Kontrollquerschnitt kann auf Basis von Bilanzierungen verbessert abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Messungen werden in Kapitel II vorgestellt.

In Kapitel III werden die Messergebnisse zur Aufgabenstellung „Leckageortung“, gewonnen in der eigens dafür entworfenen Messeinrichtung, beschrieben. Es konnte damit das Material für die um das Dichtungskontrollsystem einzubauende Kontrollschicht definiert werden. Der dritte Teil der Aufgabenstellung, das Design eines feldtauglichen Gerätes, ist gelöst. Das Gerät und die Messmimik werden in Kapitel IV beschrieben. Ziel war es dabei, handelsübliche Geräte zu verwenden und die Ansprache der TAUPE-Sensoren über feldtaugliche Komponenten zu gewährleisten.

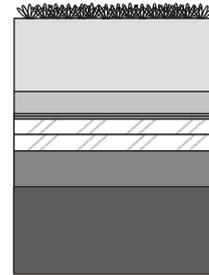
II. Bestimmung des Durchflusses aus dem Wassergehalt des Bodens

1 Grundlagen

1.1 Aufbau eines Deponie-Oberflächenabdichtungssystems

Die TA-Si schreibt vor, Deponie-Oberflächenabdichtungen aus mehreren Schichten aufzubauen. Das Regelsystem zur Abkapselung einer Hausmülldeponie (Deponieklasse II) hat folgenden Aufbau:

(von oben nach unten)	
Rekultivierungsschicht (RekS)	$D > 1,00$ Meter
Entwässerungsschicht (EntS)	$D > 0,30$ Meter
Schutzschicht (SchuS)	ohne Mindestangabe
Kunststoffdichtungsbahn (KDB)	$D > 2,50$ Millimeter
Mineralische Abdichtung (MA)	$D > 0,50$ Meter
Ausgleichsschicht (AusS)	$D > 0,50$ Meter



Die wasserwirtschaftliche Wirksamkeit wird bei intaktem System von der RekS bestimmt, bei Defekten auch von der EntS, der KDB und der MA. Jede Schicht für sich hat eine ganz spezielle Aufgabe, die auch nach Jahren für ein Funktionieren der gesamten Dichtung erhalten sein sollte. Die DepVO lässt zu dem oben beschriebenen Dichtungssystem „gleichwertige“ Varianten zu, die aber grundsätzlich nichts an der Bedeutung des einzelnen Bauteils auf den Wasserhaushalt ändern. Genannt werden soll hier nur die Bentonitmatte als Ersatz für die MA und die Kapillarsperre als Ersatz für die KDB und/oder die MA.

Das TAUPE-System soll alle Arten von Dichtelemente überwachen können. Dabei wird im Falle synthetischer Dichtungselemente eine zusätzliche mineralische Kontrollschicht, die im übrigen auch von der BAM unter der KDB bei Verzicht auf eine MA gefordert wird, eingezogen. Somit beschränken sich die bodenmechanischen und messtechnischen Untersuchungen auf den ersten Fall, die Überwachung mineralischer Elemente.

1.2 Hydrologische und hydromechanische Grundlagen von Abdichtungen

Gemäß dem Massenerhaltungsgesetz gilt für Deponieoberflächenabdichtungssysteme die Wasserhaushaltsgleichung. Die Inputgröße Niederschlag ist gleich der Summe aus der aktuellen Gesamtverdunstung (Evaporation des Bodens, Pflanzentranspiration und Interzeptionsverdunstung), der Summe der Abflüsse (Oberflächenabfluss, lateralem Abfluss in der RekS, Abfluss aus der EntS und der Versickerung durch die Dichtung) und der Änderung des Wassergehaltes in den Bodenschichten vom Anfang zum Ende des Beobachtungszeitraumes.

Der stationäre Fluss im ungesättigten Bereich wird durch die Gleichung von Darcy/Buckingham (Bewegungsgleichung) beschrieben. Die hydraulische Leitfähigkeit (k_r -Wert) ändert sich mit dem Wassergehalt (θ) nicht linear. Diese Funktion beschreibt eine für jeden Boden charakteristische Beziehung, z.B. wird bei der Entwässerung der durchflossene Querschnitt verringert, d.h. die größten Poren entwässern zuerst. Für instationäre Verhältnisse wird die Darcy/Buckingham-Gleichung mit der Kontinuitätsgleichung (Gültigkeit des Massenerhaltungsgesetzes) kombiniert. Mit dieser Kombination kann berücksichtigt werden, dass beim Fluss durch ein Bodenelement sich der Wassergehalt darin ändert (Richards-Gleichung). Enthalten sind in der Richards-Gleichung die Beziehungen zwischen θ und der Wasserspannung (Ψ), sowie dem k_r -Wert und θ . Diese Beziehungen haben eine hochgradige Nichtlinearität, sodass zur Lösung der Richards-Gleichung, d.h. zur Berechnung des Wassertransportes, numerische Verfahren herangezogen werden.

1.3 Bodenphysikalische Grundlagen

Wird auf Grund der Unzulänglichkeit einer Barriere Wasser an einen mineralischen Kontrollquerschnitt weitergegeben, so wird die Wasserbewegung selbst durch die bodenphysikalischen Transporteigenschaften beschrieben. Diese Eigenschaft der Böden, Wasser in ihrem Porensystem zu speichern oder durch das Porensystem weiterzuleiten, ist von der vom Wassergehalt abhängigen hydraulischen Leitfähigkeit und von der jeweiligen Porenstruktur bestimmt. Im Regelfall ist der betrachtete Boden nicht wassergesättigt. Bei der ungesättigten Wasserbewegung sind folgende Beziehungen maßgeblich:

- o Wassergehalt (θ) zu Wasserspannung (Ψ), auch pF-(WG-)Kurve genannt
- o Wasserspannung (Ψ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert)
- o Wassergehalt (θ) zu hydraulischer Leitfähigkeit (k_f -Wert)

Der Einfluss und die Relevanz der bodenphysikalischen Parameter. So konnte aus einer Literaturstudie belegt werden, dass die Beziehung von k_f -Wert zu θ nur gering der Hysterese unterliegt. Das TAUPE-Messsystem misst die Bodenfeuchte. Seine Vor- und Nachteile sind in der allgemeinen Feuchtemesstechnik behandelt. Detailliert wurde die Funktion des TAUPE-Messsystems im Zwischenbericht 2001 beschrieben.

2 Lysimeter

Zur Erprobung der Funktionen des TAUPE-Messsystems ist es erforderlich, folgende Randbedingungen zu untersuchen:

- o Hydrologie, Bodenhydraulik (Niederschlag, Verdunstung, Zu- und Abfluss, Anfangswassergehalte)
- o Bodenmechanik (Bodenart mit Sieblinie, pF-Kurve)
- o Physik (Temperatur, Luftfeuchte, meteorologische Parameter)
- o Geometrie (Abmessungen, Form, Gefälle)

Dazu ist ein abgeschlossener, kontrollierbarer Messkörper erforderlich, der so groß ist, dass Randeinflüsse (Umläufigkeit, Unstetigkeiten) vernachlässigt werden können. Dabei werden Zulauf (Beregnung) und Ablauf gemessen.

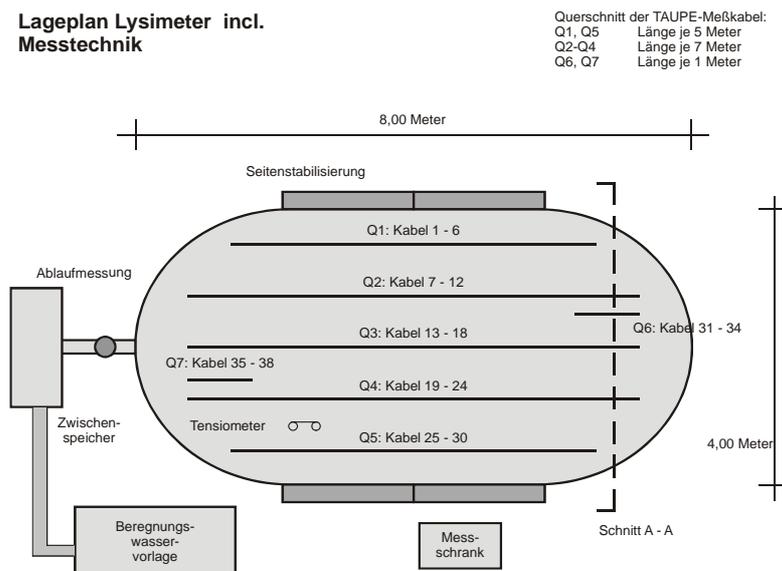


Bild 1: Lageplan des Lysimeters einschließlich der Messtechnik



Bild 2: Einbau des Lysimetermaterials

Das Bodenmaterial wurde in Lagen eingebaut. Die oberste Lage wurde mit einem Geogitter abgedeckt, um den Zutritt des Beregnungswassers zu vergleichmäßigen. Effekte wie Fingering sollen so minimiert werden. Insgesamt sind 38 horizontal verlaufende Messkabel in sechs Ebenen installiert.



Bild 3: Lage der Sensoren im dritten Horizont



Bild 4: Messgeräte (links Tektronix 1502 B)



Bild 5: Beregnung und Tensiometer, Geogitter

Ergänzt werden die TAUPE-Sensoren mit jeweils zwei Tensiometern (30 und 90 cm Tiefe) mit je einer Temperaturmessung. Alle Daten werden über Datalogger transponiert und auf einem PC gespeichert. In regelmäßigen Abständen werden die Daten seit Februar 2001 auf die Bürorechner überspielt, auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und ausgewertet.

3 Messergebnisse

3.1 Luftraum über dem Lysimetermaterial

Die Ganglinie der Lufttemperatur zeigt, dass die Wärmedämmung an der Oberfläche (5 cm Styropor) wirksam und ausreichend ist. Selbst im Sommer bei starker Sonneneinstrahlung lag die Temperaturdifferenz zwischen dem Tagesmaximum am Nachmittag und dem Minimum in der Nacht bei weniger als 5°C (Bild 2).

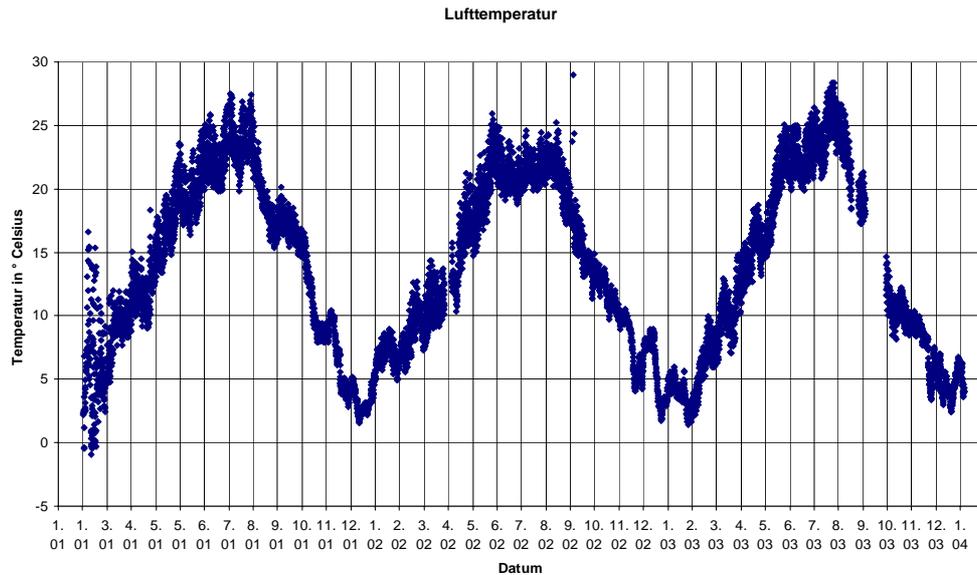


Bild 6: Ganglinie der Temperatur im Luftraum im Lysimeter

Die Feuchtesättigung der Luft in diesem Luftraum liegt bei $> 90\%$, d.h. in Abhängigkeit der höheren Temperatur am Nachmittag sinkt die relative Feuchte leicht ab, um dann bei sinkender Temperatur in der Nacht wieder auf 100% zu steigen. Es ist somit belegt:

- o Die Abdeckung des Lysimeters ist ausreichend dicht und ausreichend gedämmt (geringe tägliche Temperatur- und Luftfeuchtedifferenzen).
- o Die relative Luftfeuchte liegt im Bereich der Sättigung, d.h. eine Verdunstung aus der Lysimeteroberfläche in den Luftraum ist auszuschließen. Die Beregnungs-Wassermenge dringt in den Lysimeter ein und wird vollständig nach unten abgegeben.
- o Mit der Lufttemperatur besteht eine Referenzgröße für die Verifizierung der gemessenen Bodentemperatur.

3.2 Lysimetermaterial

Die Temperatur im Lysimetermaterial wird in zwei Horizonten gemessen, und zwar 20 cm (THL1) und 70 cm unter der Oberfläche (THL2). THL1 und THL2 zeigen einen nur geringen Tagesgang. Die maximale Temperaturdifferenz (Tag-Nacht) liegt bei $\Delta T < 0,2^\circ\text{C}$ (Bild 7).

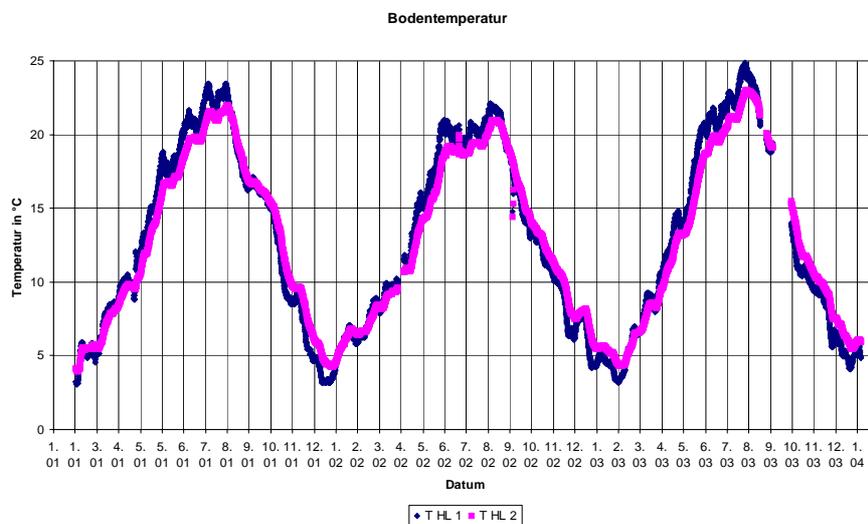


Bild 7: Ganglinie der Bodentemperatur im Lysimeter in zwei Horizonten

Dieser Gang korrespondiert zeitversetzt mit dem Verlauf der Temperatur im Lysimeterluftraum. Die Spitzen und Senken sind wegen der stärkeren Pufferung im Bodenmaterial weniger stark ausgebildet. So ist es zu erklären, dass die Kurve von THL2 ab September über der von THL1 liegt. Die in dieser Tiefe gespeicherte Wärme muss über die Oberfläche (Ausbildung eines Gradienten) oder das angrenzende Erdreich abgegeben werden. Der Temperaturgradient ist gegenüber Frühjahr/Sommer umgekehrt gerichtet. Die maximale Temperaturdifferenz (Februar/August) liegt bei THL1 bei ca. 21°C und bei THL2 bei ca. 18°C. Dieser Temperatureinfluss wird bei der Darstellung der Saugspannungen als Korrekturglied einzusetzen. Insgesamt zeigen die beiden Kurvenverläufe die erwarteten Größenordnungen. Die ausreichende Dämmung des Lysimeters wird daraus bestätigt.

Die Tensiometer sind in den beiden Horizonten jeweils doppelt angeordnet. Die beiden „oberen“ Tensiometer (T1 und T3) sind ca. 20 cm unter der Lysimeteroberkante, die beiden „unteren“ Tensiometer (T2 und T4) ca. 70 cm unter Lysimeteroberkante eingebaut. Jeweils ein Tensiometer je Horizont ist mit Temperaturfühlern bestückt. Der Verlauf der beiden der gleichen Tiefe zugeordneten Tensiometer ist über den gesamten Beobachtungszeitraum nahezu identisch, die Messwerte sind vertrauenswürdig.

Die gemessene Saugspannung ist außerdem Referenzparameter zum Abgleich der gemessenen Materialfeuchte mit den im Labor ermittelten pF-Kurven. Hiermit können diese Kurven bestätigt oder korrigiert werden und mittels der van-Genuchten/Mualem-Parameter (VGM) kann der jeweils gesuchte ungesättigte k_f -Wert ermittelt werden.

Der Zulauf wird über eine Wasseruhr gemessen. Die Ablaufwassermenge wird in einer Vorlage aufgefangen und bei Erreichen eines oberen Tastpunktes aus der Vorlage gepumpt. Dabei werden je Zyklus sieben Liter registriert. Diese Ablaufmessung wurde 2002 installiert, da wegen des geringen Abflusses die Messwerte der Wasseruhr unzuverlässig waren.

3.3 Bodenwassergehalt

a. Messgerät (Impulsgeber)

Das bisher verwendete Messgerät der Firma Tektronix (Time-Domain-Reflektometer, TDR), das Bestandteil des TAUPE-Systems ist, wird seit geraumer Zeit nicht mehr hergestellt. Als Ersatz dafür konnte im Rahmen einer Marktstudie das Gerät TDR 100 der Fa. Campbell ermittelt werden. Dieses neue Messgerät wurde am Lysimeter eingesetzt und getestet. Es konnte festgestellt werden, dass das neue Gerät sich auf die vorhandene Messeinrichtung (Multiplexer, Sensoren) und die vorhandene Steuersoftware anpassen lässt. Der Lysimeter wurde Anfang 2003 auf das Campbell TDR 100 umgerüstet, da dieses für den Feldeinsatz geeignet ist. Zudem hat das Tektronix-Gerät die Schnittstellen sehr stark beansprucht und das Archivierungsprogramm nicht zuverlässig arbeiten lassen.

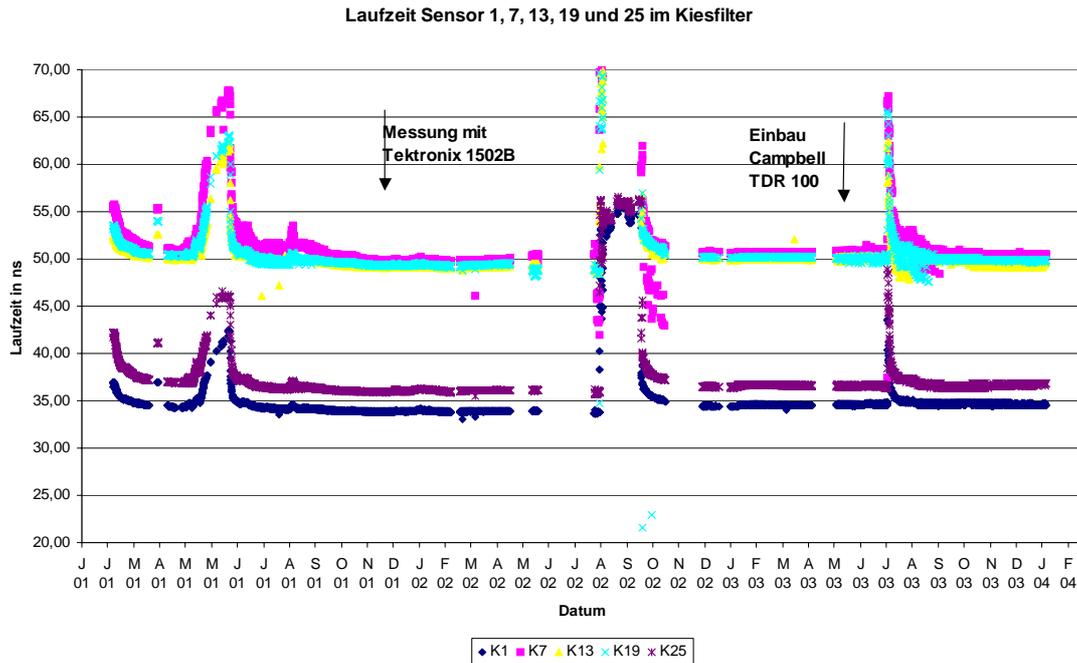


Bild 8: Laufzeiten der Sensoren im Kiesfilter. Die Umrüstung des Impulsgebers erfolgt nahtlos.

Die Wassergehalte im Lysimeter geben über die gesamte Untersuchungsperiode (2001 bis 2003) zuverlässig die aufgetretenen Ereignisse wieder. Im Bild 9 wird der Verlauf des Materialwassergehaltes im dritten Horizont von unten dargestellt. Die Regenereignisse und der Einstauversuch sind eindeutig identifizierbar.

b. Einsatzgrenzen des Messsystems

Oberflächenabdichtungen von Mülldeponien haben einen geschichteten Aufbau. Neben der Rekultivierungsschicht aus sehr heterogenem Material sind Schichten hoher Durchlässigkeit (Kiesfilter) und hoher Dichtigkeit (tonmineralische Dichtungen) eingesetzt. Dazu ist es wahrscheinlich, dass sich in der Abfolge der Schichten ein Kapillarsperreneffekt einstellt. Diese verschiedenen Randbedingungen wurden im einzelnen mit dem Messsystem überprüft.

In rolligen Böden (Kiessanden und Kiesen) ist die Messung des Wassergehaltes als Indikator für einen Wasserfluss nur dann gegeben, wenn der Wassergehalt nicht über den (i.d.R. geringen) Durchfluss, sondern über einen funktionsfähigen Ablauf bestimmt wird (Bild 10). Die Quantifizierung des Abflusses in einem Kiesfilter über den Wassergehalt ist nicht möglich.

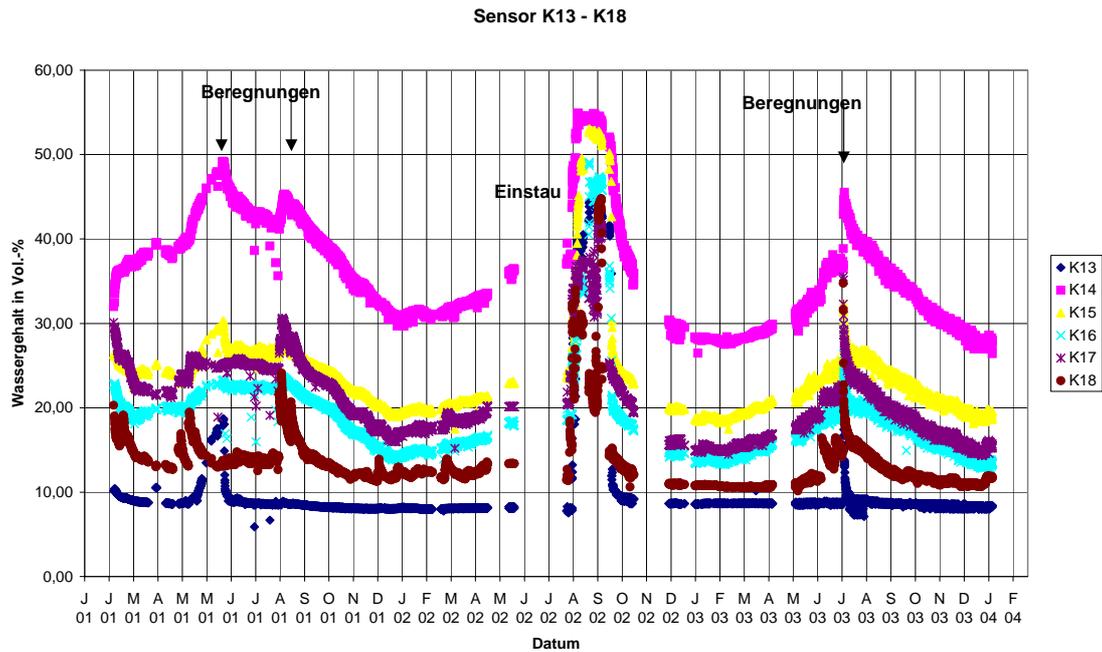


Bild 9: Wassergehalte im dritten Horizont von unten mit den aufgebracht Ereignissen

Eine Erhöhung des Wassergehaltes im Kiesfilter von ca. 9 Vol.-% auf 11 Vol.-% bedingt mehr als eine Verdoppelung seiner hydraulischen Leitfähigkeit. Eine entsprechende Größe der hydraulische Leitfähigkeit wird im aufliegenden Bodenmaterial i.d.R. erst ab einem Wassergehalt nahe der Sättigung (> 35 Vol.-%) erreicht. Der Durchfluss wird hier nicht vom Wassergehalt der Schicht dominiert, sondern durch den hydraulischen Gradienten. Es kann hier nur das Funktionieren der Dränagewirkung bestätigt werden.

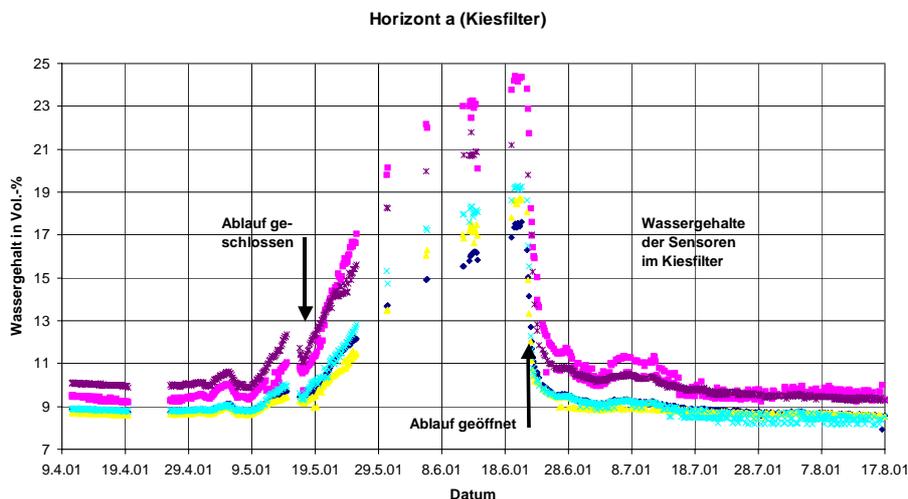


Bild 10: Erhöhung des Wassergehaltes bei Einstau des Kiesfilters

Wie dargestellt, bestehen Oberflächenabdichtungen von Deponien aus einer Folge verschiedener Schichten. Bei der Festlegung der Kombination der Schichten ist die pF-Kurve hilfreich. Die verschiedenen Verläufe der pF-Kurven (Bodencharakteristiken) führen dazu, dass bei einer bestimmten Schichtfolge (z.B. Feinsand über Grobsand) bei ungesättigten Verhältnissen an der Schichtgrenze die hydraulische Leitfähigkeit im Grobsand um mehrere Zehnerpotenzen geringer ist als die im Feinsand. Dieses nennt man Kapillarsperreneffekt. Bildet sich im Bereich der Sensoren ein Kapillarsperreneffekt aus, so pendelt sich der Bodenwassergehalt nahe der Sättigung ein. Ein Fluss entsteht erst dann, wenn ein genügend hoher hydraulischer Gradient aufgebaut wird. Auf den geneigten Böschungen von Müll-

deponien findet hier ein lateraler Abfluss statt. Die aus dem gemessenen Bodenwassergehalt bestimmte hydraulische Leitfähigkeit ist für den Fluss nicht maßgeblich, sie würde den Fluss um Faktoren überschätzen.

Messungen des Bodenwassergehaltes in inhomogenen Material (Rekultivierungsschicht) lassen ebenfalls keinen gesicherten Schluss auf einen Fluss zu. Zum einen wird im Bereich der Bodenoberfläche die Richtung des hydraulischen Gradienten maßgeblich durch den aktuellen Zustand der Evapotranspiration bestimmt, zum anderen findet der Fluss verstärkt über Makroporen statt, die durch das Messsystem nur zufällig erfasst werden. Mit einer integralen Messung entlang des Sensors sind nur qualitative Aussagen möglich. Sich verändernde Materialeigenschaften (Einschlämmen von Feinmaterial, Bildung von Furchen nach Starkregen, etc.) beeinflussen zudem das Messergebnis. Für Quantifizierungen wäre die fortwährende Kalibrierung jedes einzelnen Sensors erforderlich.

Wird die Materialfeuchte in tonmineralischen Dichtungen gemessen, so wird bei den derzeit geltenden Regeln für den Einbau ein Wassergehalt nahe der Sättigung gemessen. Hier steht nicht die Quantifizierung des Durchflusses im Vordergrund, sondern die Überwachung der potenziellen Austrocknung der Dichtung. Nach Unterschreitung des Wassergehaltes der Schrumpfgrenze ist der Durchfluss nicht mehr von der hydraulischen Leitfähigkeit des Materials abhängig, sondern er findet in den auftretenden Rissen („Makroporen“) statt.

Aus dieser Beobachtung wird plausibel, dass bei einer gewünschten Quantifizierung des Durchflusses durch eine Schicht oder ein Abdichtungssystem eine Kontrollschicht aus wohldefiniertem Material eingebaut werden sollte, in die die Sensoren verlegt werden. Es ist naheliegend, dafür eine Schicht nach den Empfehlungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zu wählen. Diese Schicht wäre analog der Schutzschicht unter einer Kunststoffdichtungsbahn > 15 cm stark mit einem k_f -Wert von $\approx 10^{-6}$ m/sec. Als Material eignet sich dazu schluffiger Sand (Su) bis sandiger Schluff (sU). Mit dieser Kontrollschicht kann ein breites Spektrum von Zuflüssen aus dem oben liegenden Dichtungssystem quantifiziert werden.

c. Untersuchungen

Die bisherigen Messungen der Bodenfeuchte im Lysimeter lagen, mit Ausnahme der Messwerte in der Kapillarschicht, im Bereich $\theta_r < \theta < 25$ Vol.-%. Dieser Bereich wird bei der vorgeschlagenen Modifikation des Kontrollsystems (Kontrollschicht mit eingelegten Sensoren) relevant. Die Versuche dazu wurden im Rahmen des Zwischenberichtes im März 2002 vorgestellt. Im Folgenden wird die Untersuchung der Sensitivität der einzelnen Parameter dargestellt.

Im Labor wird die Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl (DZ) vom Feuchtegehalt des zu untersuchenden Materials ermittelt. Dazu wird bei verschiedenen Wassergehalten (WG) die DZ einer Bodenprobe in einer speziellen Testapparatur gemessen. Die DZ wird aus der Laufzeit eines aufgegebenen Impulses in einem Testsensor ermittelt. Diese Impulslaufzeit (LZ) im Sensor wird auf die Laufzeit des Impulses im Sensor in Luft bezogen. Mit dieser relativen LZ und den dazugehörigen Materialfeuchten werden in einer Kurve dritter Ordnung die Bodenfeuchte bestimmt.

$$WG \text{ (Vol.-%)} = a1 * K^3 + a2 * K^2 + a3 * K + a4$$

Mit den Kalibrierparametern (a1, a2, a3 und a4) werden für Böden einer Klasse (z.B. Sand) immer ähnliche Kurven beschrieben. K stellt die relative Sensorlaufzeit dar. Die Kalibrierkurve für das Lysimetermaterial wird so variiert, dass im ersten Fall die Parameter im oberen Bereich (hoher WG, hohe relative LZ) um bis zu 10% abgesenkt und im zweiten Fall im unteren Bereich (geringer WG, geringe relative LZ) um bis zu 10% angehoben werden. Das simuliert mögliche Fehler beim Aufstellen der Kalibrierkurve (Messen der DZ) im Labor bei extremen Bodenfeuchten (nass, trocken).

Im ersten Fall (nass) wird der WG gegenüber dem der Ausgangsganglinie um weniger als 1 Vol.-% angehoben, im zweiten Fall (trocken) um weniger als 1 Vol.-% abgesenkt. Diese Abweichung ist un-

abhängig von der Sensorlänge und vom Betrag des Ausgangs-WG. Das führt zu der Erkenntnis, dass aus einer veränderten, im Verlauf jedoch ähnlichen Kalibrierkurve sich nur vernachlässigbar geringe Abweichungen im WG ergeben. Der Fehler im WG mit < 1 Vol.-%, der dazu noch systematischen Charakter hat und durch eine Nachkalibrierung mittels gemessener WG kompensiert werden kann, ist somit vernachlässigbar.

Wird bei der Kalibrierung des Bodenmaterials ($DZ = f(WG)$) im Labor die Kurve genau genug beschrieben (wichtig ist dabei der Verlauf in der Kurvenmitte), so sind die Messfehler im Randbereich für die weitere WG-Bestimmung nahezu unerheblich. Da Böden ähnlicher Textur (Sande, Tone, Bentonite) ähnliche Kalibrierkurven haben, kann aus den Kalibrierparametern nur ein vernachlässigbarer Fehler, der sich im übrigen durch eine Nachkalibrierung über insitu gemessene WG korrigieren lässt, resultieren. Dagegen bringt eine nur kleine Variation der einzelnen Kalibrierparameter (bei festgehaltenen anderen Kalibrierparametern) hohe, von der Sensorlänge unabhängige, Änderung des berechneten WG. Die absolute Änderung des WG ist unabhängig von der Größe des Ausgangs-WG. Die Variation dient zur Abschätzung von Fehlern, die auf Grund von mangelhafter Datenübertragung entstehen können. Sie haben keine bodenmechanische oder elektrotechnische Begründung.

Der wichtigste Fall für die Messpraxis ist die Varianz der Sensor-LZ. Die berechnete Sensor-LZ kann von der „echten“ abweichen auf Grund einer unzureichenden mathematischen Bestimmung des Impulsendpunktes und der Festlegung des Sensoranfangs mit einer konstanten LZ des Impulses im Koaxialkabel. Es konnte gezeigt werden, dass bei kurzen Sensoren (< 10 Meter Sensorlänge) die Sensor-LZ sehr genau bestimmt werden muss, da ansonsten große Fehler (proportional zur Sensorlänge) auftreten. Durch Temperatureinfluss kann die LZ im Koaxialkabel um mehrere ns variieren. Die Koaxialkabel sind daher entsprechend geschützt zu verlegen.

Im Jahre 2002 wurde der Bereich $\theta > 25$ Vol.-% untersucht. Der Lysimeter wurde über längere Zeit mit hoher Intensität beregnet ($Q_{\text{Regen}} > Q_{\text{ab}}$). Schließlich wurde zusätzlich noch der Ablauf des Lysimeters verschlossen und der gesamte Lysimeter eingestaut. Insgesamt wurden ca. 6 m^3 Wasser im Lysimeter infiltriert (Bodenvolumen ca. 30 m^3). Anschließend wurde der Ablauf wieder geöffnet und der Leerlauf des Lysimeters protokolliert. Die Tensiometer geben diese Ereignisse wieder (Bild 11).

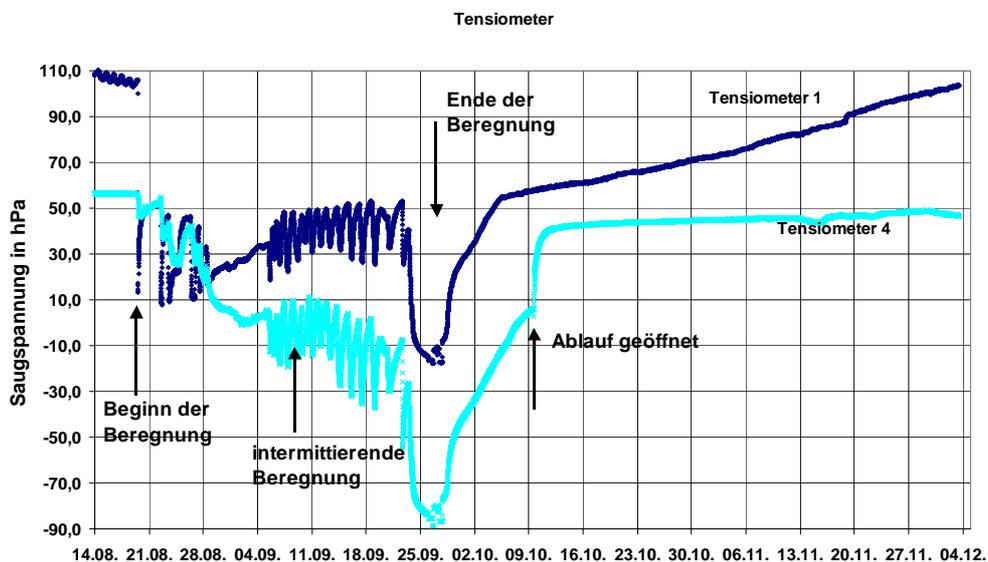


Bild 11: Verlauf der Saugspannung während der starken Beregnung

Die TAUPE-Sensoren geben die „Regenereignisse“ genau genug über eine Erhöhung des Bodenwassergehaltes wieder (Bild 12).

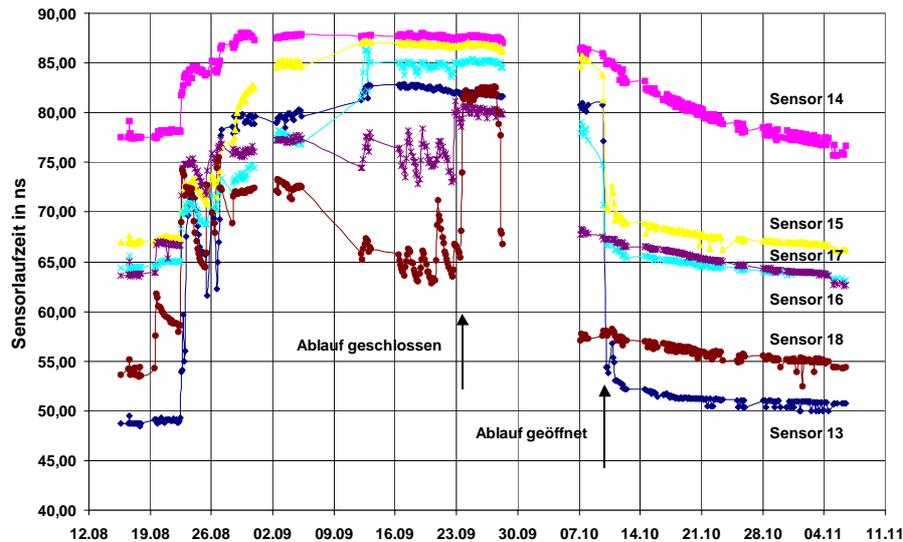


Bild 12: Verlauf der Wassergehalte im Lysimeter (senkrechter Schnitt)

Die Sensoren in einem horizontalen Profil laufen parallel, d.h. die Beregnung erfolgt sehr homogen und die Sensoren reagieren mit ähnlicher Sensibilität. Wird der Sättigungswassergehalt des Boden erreicht, bleibt die Laufzeit der Sensoren konstant. Das ist sehr gut zu beobachten, da die Sensoren von unten nach oben fortschreitend den Sättigungswassergehalt detektieren. Dabei konnte auch belegt werden, dass mit steigendem Bodenwassergehalt die Impulskurve auf dem Sensorkabel verschleift, d.h. die berechnete Sensorlaufzeit ist größer als die dem aktuellen Wassergehalt entsprechende. Daraus würde der Bodenwassergehalt zu hoch berechnet. Das ist jedoch für die Berechnung des Durchflusses aus dem Bodenwassergehalt weniger erheblich, da die hydraulische Leitfähigkeit in diesem Bereich nahezu ihren Sättigungswert erreicht hat. Der Zulauf zum Lysimeter („Beregnungswassermenge“) und der Ablauf aus dem Lysimeter zeigen die erwartete Zeitverzögerung. Das Leerlaufen der einzelnen Bodenschichten erfolgt in einer der jeweiligen Bodenart charakteristischen Kurve. Dieser Effekt wird durch den Kapillarsperreneffekt im zweiten Niveau (25 cm über dem Lysimeterboden) ausgeglichen, so dass der Lysimeter eine nahezu einheitliche Leerlaufcharakteristik aufweist. Das Bild 13 zeigt die Kombination der Messwerte Saugspannung und Impulslaufzeit.

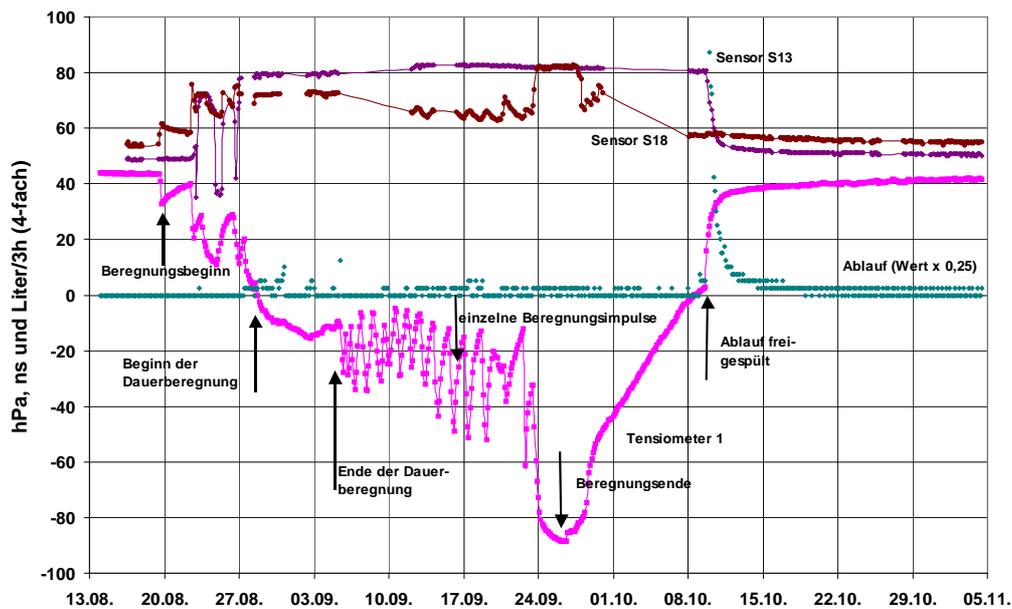


Bild 13: Abgleich von Saugspannung, Wassergehalt und Ablaufwassermenge

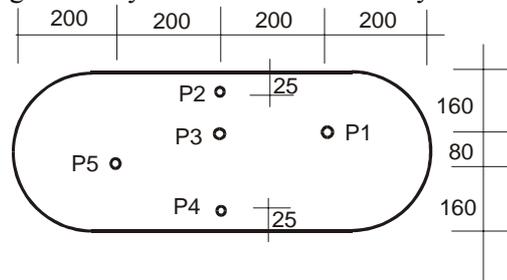
Diese beiden Messwerte sind deutlich miteinander korreliert, was gerade im Zeitraum der intermittierenden Beregnung deutlich wird. Auch werden die singulären Ereignisse (Verschließen und Öffnen

des Ablaufes) von beiden Messeinrichtung zeitgerecht genau wiedergegeben. Die einzelnen Ereignisse sind deutlich sichtbar. Ebenfalls wird erkennbar, wie zum Ende des Beobachtungszeitraums alle Messeinrichtungen ihren Ausgangszustand wieder erreichen. Zur Ergänzung wurde die Ablaufkurve des Lysimeters mit aufgenommen. Diese Kombination wird zur Berechnung des Durchflusses aus dem Bodenwassergehalt wichtig.

d. Bilanzierung

Um das Phänomen der ungleichen Feuchteverteilung vom Lysimeterinneren zum Lysimeterrand zu ergründen, wurden am Bodenproben entnommen und deren Wassergehalte gravimetrisch bestimmt.

Bild 14: Lage der Probenahmestellen im Lysimeter



Die Proben wurden in einer Tiefe von ca. 70 cm entnommen. Es wurden folgende, auf den Boden bezogene Werte ermittelt:

Probe-Nr.	WG (grav.) [Gew.-%]	Boden-Dichte [gr/cm ³]	WG (vol.) [Vol.-%]	benachbarte Sensoren
1	9,1	1,8	16,6	S3, S4
2	8,6	1,8	15,6	S9, S10
3	8,5	1,8	15,6	S21, S22
4	8,8	1,8	16,0	S27, S28
5	7,9	1,8	14,4	S32, S33
6=1	9,1	1,8	16,6	S36, S37

Tabelle 1: Wassergehalte der Bodenproben

Zum gleichen Zeitpunkt wurden mit den Bodenfeuchte-Sensoren folgende Wassergehalte ermittelt:

Profil	1		2		3		4		5		6	
	S	WG										
c	3	19,8	9	19,6	21	18,6	27	19,1	32	13,0	36	18,7
d	4	15,8	10	17,2	22	16,6	28	14,2	33	12,9	37	14,4
Mittelw.	3,4	17,8	9,10	18,4	21,22	17,6	27,28	16,7	32,33	13,0	36,37	16,4
Sensor-Länge	5 Meter		7 Meter		7 Meter		5 Meter		1 Meter		1 Meter	

Tabelle 2: Wassergehalte der verschieden langen Sensoren (S = Sensornummer, WG in Vol.-%)

Gleicht man die WG aus den Tabellen 1 und 2 miteinander ab (Tabelle 3), so ist zu erkennen, dass die Differenzen von Δ WG bei < 3 Vol.-% liegen.

	Sens.3,4	Sens.9,10	Sens.21,22	Sens.27,28	Sens.32,33	Sens.36,37
Probe-Nr.	P1	P2	P3	P4	P5	P6=P1
WG-Pr.	16,6	15,6	15,6	16,0	14,4	16,6
WG-Sens	17,8	18,4	17,6	16,7	13,0	16,4
Δ WG	+1,2	+2,8	+2,0	+0,7	-1,4	-0,2

Tabelle 3: Abgleich der Wassergehalte (WG-Pr. aus gravimetrischem WG der Bodenprobe ermittelt)

Es werden im Folgenden zwei Ereignisse bilanziert. Das erste Ereignis (24.04. bis 07.05.2001) wird vereinfacht ohne Fluss bilanziert, um die Größenordnungen der Änderung der Feuchteverteilung abzuschätzen. Das Ereignis vom 27.08. bis 07.09.2001 wird gemäß dem bodenhydraulischen Modell bilanziert.

Die Reaktion der Bodenfeuchte-Sensoren auf das Regenereignis ist in Tab. 4 dargestellt. Die Beregnungsmenge betrug 300 Liter. Bis zum 07.05.2001 wurden in den oberen Bodenschichten die Wassergehalte vor der Beregnung wieder erreicht. Die Beregnungsmenge hat die oberen Bodenschichten passiert und den Lysimeter teilweise schon verlassen. Die Speicherung wird im beispielhaft gewählten senkrechten Schnitt durch den Lysimeter dargestellt. Bei dieser vereinfachten Darstellung ist eine Kalibrierung der Bodenfeuchte-Sensoren nicht erforderlich. Die Kalibrierung bewirkt nur eine Parallelverschiebung der Sensorwerte. Die Differenzen der einzelnen Wassergehalte bleiben nahezu konstant. Die weiteren vier senkrechten Profile wurden analog Tabelle 4 bilanziert. Insgesamt sind im Lysimeter am 07.05.2001 noch 74 Liter der Beregnungswassermenge gespeichert. Die Feuchtefront hat sich am 07.05.2001 schon deutlich nach unten bewegt und ein Großteil der aufgegebenen Wassermenge hat den Lysimeter schon wieder verlassen (gemessener Abfluss $Q_{ab} \sim 220$ Liter).

Sens. Nr.	Wassergehalt			Bezugsvolumen			Q
	26.04. [Vol.-%]	07.05. [Vol.-%]	Δ WG [Vol.-%]	Fläche [m ²]	Höhe [m]	Volumen [m ³]	
1	7,29	7,30	+0,01	5,3	0,25	1,32	0,13
2	24,66	25,87	+1,21	5,3	0,20	1,06	12,8
3	16,96	17,95	+0,99	5,3	0,20	1,06	10,5
4	13,95	14,80	+0,85	5,3	0,20	1,06	9,0
5	13,73	13,87	+0,14	5,3	0,20	1,06	1,5
6	11,48	10,27	-1,21	5,3	0,20	1,06	-12,8
Σ	-	-	-	-	-	-	21,1

Tabelle 4: Änderung der Wassergehalte in Folge der Beregnung vom 26.04.2001 (Q = im Querschnitt gespeicherte(+)/abgegebene(-) Wassermenge)

Mit dieser vereinfachten Bilanzierung wird die Größenordnung der Wassermengen des Ereignisses bestätigt. Der Verlauf der Bodenwassergehalte wird für das Ereignis (27.08. bis 07.09.2001) exemplarisch in einem mittleren Querschnitt (Sensor S13 bis S18) dargestellt.

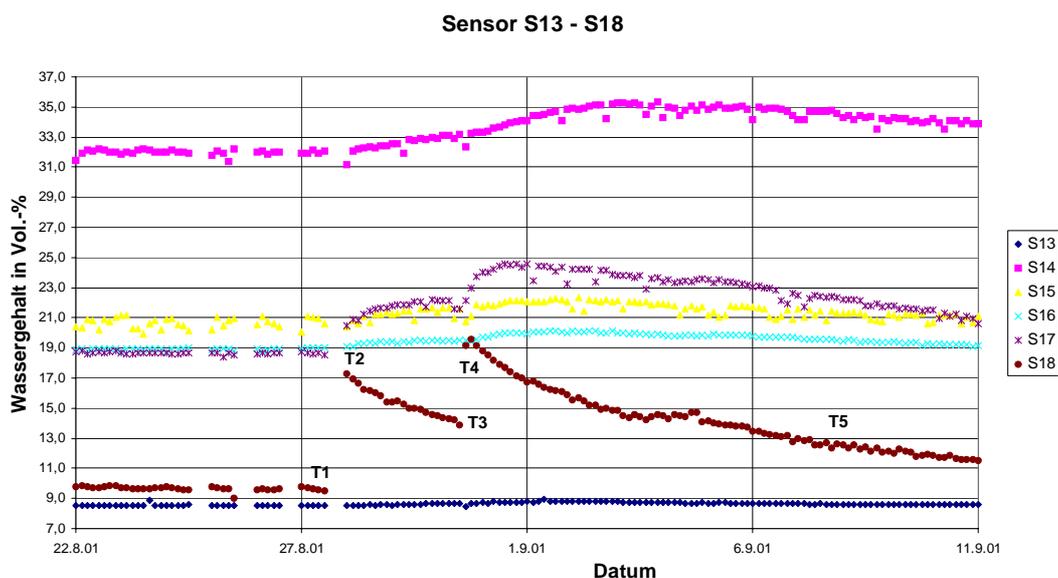


Bild 15: Wassergehalte der Beregnung vom 26.08. bis 07.09.2001

Zum Zeitpunkt T1, nach einer Trockenperiode, liegt im Sensor S18 (Horizont f) nahezu der Residualwassergehalt ($\theta_r=8-10$ Vol.-%) vor. Es wird dann mit 300 Litern beregnet (T1 bis T2). Nach 75 Stunden werden weitere 200 Liter aufgegeben (T3 bis T4). Der Verlauf des Wassergehaltes von Sensor S18 erreicht etwa am 07.09.2001 eine waagrechte Asymptote, die allerdings noch etwas höher liegt als θ_r (T5). Aus den pF-WG-Kurven wird ersichtlich, dass zur Restentwässerung auf θ_r eine hohe Saugspannung aufgebaut werden muss. Mit dem 07.09.2001 ist der Versuch beendet.

Zeitraum		θ_{tA}	θ_{tB}	θ -Beziehung	Bodenmodell	Bezeichnung
t_A	t_E					
T1	T2	$\theta_1=\theta_r$	θ_2	$\theta_2 > \theta_1 = \theta_r$	Fall 1	Bewässerung
T2	T3	θ_2	θ_3	$\theta_r < \theta_3 < \theta_2$	Fall 4	Entwässerung
T3	T4	θ_3	θ_4	$\theta_r < \theta_3 < \theta_4$	Fall 1	Bewässerung
T4	T5	θ_4	θ_5	$\theta_r < \theta_5 < \theta_4$	Fall 4	Entwässerung

Tabelle 5: Zuordnung des Feuchteverlaufs zum Bodenmodell

Für die hier relevanten Fälle des Bodenmodells gilt:

Fall 1: $q_{ab} = k(\theta_{2-1}) * b * \Delta t$
 $\Delta q = \Delta \theta * b * h$
 mit $q_z = q_{ab} + \Delta q$

Fall 4: $q_{ab} = k(\theta_{3-2}) * b * \Delta t$
 $\Delta q = \Delta \theta * b * h$
 mit $q_z = q_{ab} - \Delta q$

Die Bilanz erfolgt für den Sensor 18 (q multipliziert mit der Einheitstiefe $t=1$ in Liter).

Zeitp.	Fall	θ_{18} Vol.-%	$k(\theta)^*$ $\times 10^{-8}$	Δt h	$F_{\text{maßgeb.}}$ m^2	q_{ab} Liter	$\Delta \theta$ Vol.-%	Δq Liter	q_z Liter
T1		9,2							
T2	1	16,4	0,52	27	6,0	3	+6,50	+78	+81
T3	4	13,9	0,95	45	6,0	9	-2,19	-26	-17
T4	1	19,1	1,40	9	6,0	3	+5,32	+63	+66
T5	4	13,2	0,60	159	6,0	20	-5,96	-71	-51
Gesamt				213		35		+44	+79

Tabelle 6: Bilanzierung des Ereignisses vom 26.08. bis 07.09.2001, Sensor 18

Die hydraulische Leitfähigkeit ($k(\theta)^*$) wurde nach der van Genuchten/Mualem ermittelt. Die dazu erforderlichen Parameter wurden vom Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe ermittelt. In gleicher Weise wurden die Sensoren S6, S12 und S24 bilanziert. Näherungsweise wurde für den Sensor S30 der jeweilige Wassergehalt von Sensor S6 eingesetzt. Der Sensor S30 war bei der Boden-Probenahme am 05.07.2001 beschädigt worden.

Zeitp.	Sensor-Nr.					ΣQ	
	S6	S12	S18	S24	S30		
T2	2	3	3	4	2	14	
T3	4	9	9	11	4	37	Abfluss
T4	1	3	3	3	1	11	Q_{ab}
T5	12	29	20	53	12	126	
T2	33	49	78	72	33	265	
T3	-6	-2	-26	-14	-6	-54	Speicher
T4	27	43	64	56	27	217	ΔQ
T5	-31	-44	-71	-70	-31	-247	

Tabelle 7: Bilanzierung des Ereignisses, Abfluss und Speicherung (Mengenangaben in Liter)

Die Regenereignisse spiegeln sich in Tab. 7 deutlich wieder. So wird das erste Ereignis mit einer Beregnungswassermenge von 300 l zum Zeitpunkt T2 mit insgesamt $265 \text{ l} + 14 \text{ l} = 279 \text{ l}$ wiedergegeben, das zweite Ereignis mit 200 l zum Zeitpunkt T4 mit $217 \text{ l} + 11 \text{ l} = 228 \text{ l}$. Das erste Ereignis wird um ca. 10 % unterschätzt (geringere hydraulische Leitfähigkeit, d.h. der Abfluss Q_{ab} wird unterschätzt), das zweite Ereignis um ca. 14 % überschätzt (höheres Ansprechen der Wassergehalte, da der Boden schon benetzt war, d.h. es liegt ein geringerer Benetzungswiderstand vor).

Die Feuchteverteilung zu den fünf Untersuchungszeitpunkten zeigt Bild 16. Es ist erkennbar, wie die beiden Regenereignisse durch den Lysimeter wandern.

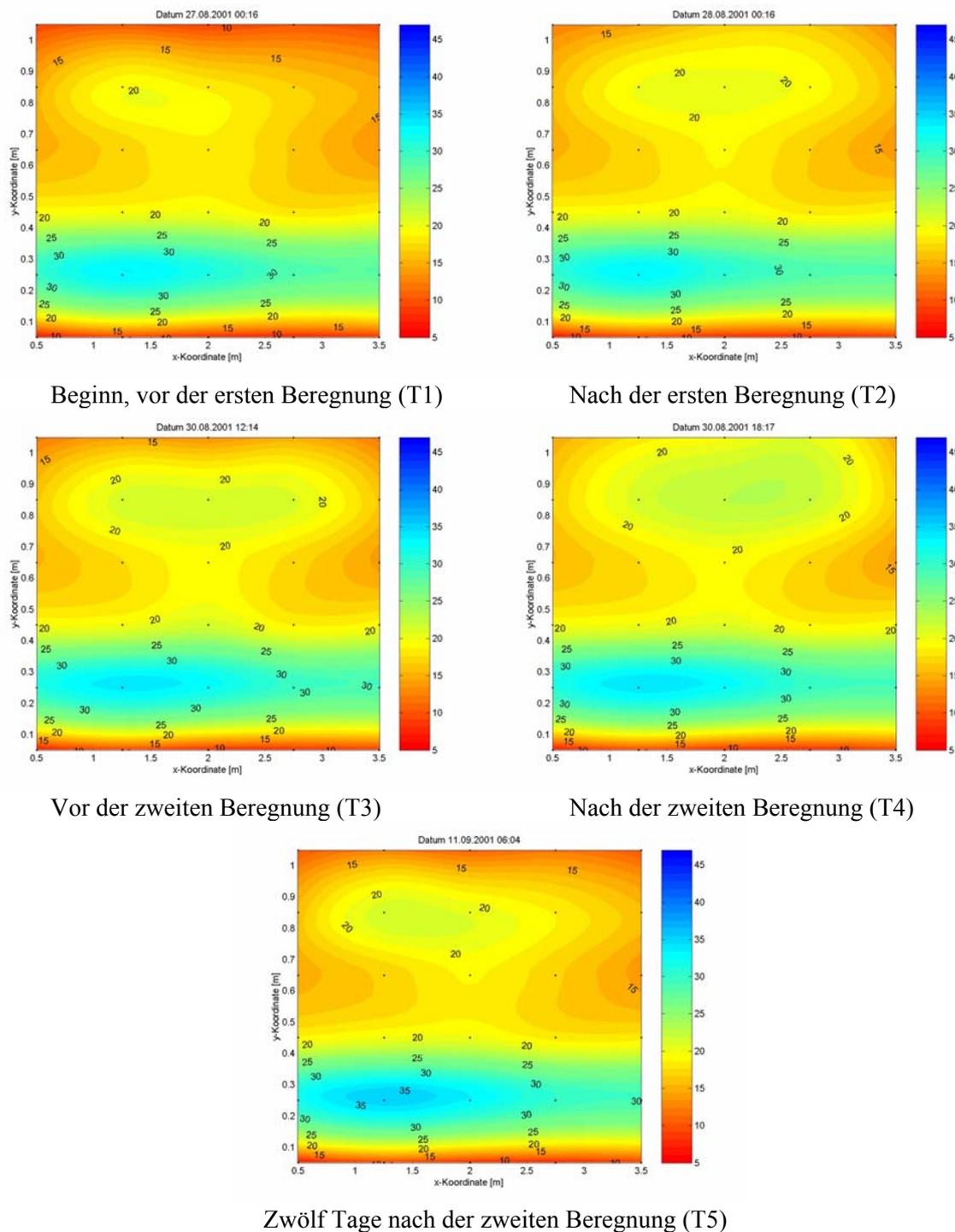


Bild 16: Verteilung der Bodenfeuchte im Lysimeter zu den Beobachtungszeitpunkten des Ereignisses vom 26.08. bis 07.09.2001

Der Kapillarsaum wird aufgesättigt (WG von ca. 30 Vol.-% auf über 35 Vol.-%), sodass der hydraulische Gradient ausreicht, das ankommende Wasser vertikal abzuführen. Die Reaktion im Kiesfilter ist sehr schwach ausgeprägt ($\Delta\theta \sim 0,5$ Vol.-%). Sie liegt unter dem Darstellungsmaßstab und wird daher nicht abgebildet. Das Regenereignis ist zum Zeitpunkt T5 noch nicht beendet, es sind noch insgesamt 174 Liter (ca. ein Drittel der Beregnungswassermenge) im Querschnitt gespeichert.

Tabelle 8 zeigt die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten zum Zeitpunkt T1 (trocken vor dem ersten Regenereignis) und T4 (feucht, nach dem zweiten Regenereignis) in einem vertikalen Profil in der Lysimetermitte.

Sensor- Nummer	θ	θ_s	θ_r	$S_e(\theta)$	n	m	β	k_s cm/h	$k_u(\theta)$ m/sec	
Zeitp. T1										
S13	8,5	25,0	0,1	0,34	1,21	0,17	6,39E-08	28,80	5,11E-12	*
S14	32,0	37,0	11,0	0,81	2,35	0,57	2,15E-01	0,20	1,20E-07	**
S15	20,1	35,0	11,0	0,38	2,35	0,57	7,56E-03	0,20	4,20E-09	
S16	18,9	35,0	9,5	0,37	2,54	0,61	9,01E-03	0,15	3,75E-09	
S17	18,7	35,0	9,5	0,36	2,54	0,61	8,27E-03	0,15	3,45E-09	
S18	9,8	28,0	9,5	0,02	2,54	0,61	5,83E-08	0,15	2,43E-14	
Zeitp. T4										
S13	8,7	25,0	0,1	0,35	1,21	0,17	8,48E-08	28,80	6,78E-12	*
S14	33,3	37,0	11,0	0,86	2,35	0,57	2,96E-01	0,20	1,64E-07	**
S15	21,1	35,0	11,0	0,42	2,35	0,57	1,17E-02	0,20	6,48E-09	
S16	19,4	35,0	9,5	0,39	2,54	0,61	1,11E-02	0,15	4,61E-09	
S17	23,0	35,0	9,5	0,53	2,54	0,61	3,85E-02	0,15	1,60E-08	
S18	19,6	28,0	9,5	0,55	2,54	0,61	4,37E-02	0,15	1,82E-08	
*	Die Formel von <i>van Genuchten/Mualem</i> kann hier nicht angewendet werden (Kies mit großem Porenvolumen). Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird um Zehnerpotenzen zu gering ermittelt.									
**	Durch die Ausbildung einer Kapillarsperre wird die ermittelte hydraulische Leitfähigkeit nicht wirksam. Zum vertikalen Fluss in den untenliegenden Kiesfilter (=Kapillarblock) ist ein hoher hydraulischer Gradient erforderlich.									

Tab. 8: Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im Lysimeter zum Ereignis vom 26.08. bis 07.09.2001 (Zeitpunkt T1 und T4) im vertikalen Schnitt (Sensor S13 bis S18). β ist der S_e -abhängige Term der Gl. 6.2.1..

Zu prüfen bleibt noch, ob der gemessene Bodenwassergehalt für die den Sensor umgebende Schicht repräsentativ ist. Außerdem ist die „Stabilität“ der Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem gemessenen Bodenwassergehalt zu verifizieren.

Kriterien für die Auswahl des Materials für die Kontrollschicht sind:

- o möglichst „flache“ Steigung der pF-WG-Kurve im Bereich $1 < pF < 2$, d.h. durch diese Forderung wird der Schluffanteil begrenzt,
- o die Residualsättigung sollte im Bereich $5 \text{ Vol.-%} < \theta_r < 10 \text{ Vol.-%}$ liegen, was ebenfalls den Schluffanteil auf < 10 bis 15 Gew.-% begrenzt,
- o die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s sollte $< 10^{-6} \text{ m/sec}$ sein.

Für die Kontrolle von Deponieoberflächenabdichtungen hat sich der Bereich der Bodenfeuchte mit $\theta_r < \theta < 25 \text{ Vol.-%}$ als ausreichend gezeigt. In diesem Bereich ist die θ -Verteilung über die Schichtdicke nahezu konstant. Findet von oben ein Zufluss zur Kontrollschicht statt, so stellt sich auf Grund der

geringen Schichtdicke und der relativ hohen hydraulischen Leitfähigkeit eine nur geringe Differenz der Bodenfeuchte oben (θ_o) und unten (θ_u) ein. Versuche haben ergeben, dass die maximale Differenz $\theta_o - \theta_u < 2$ Vol.-% liegt. Nimmt man eine lineare Verteilung der Bodenfeuchte in der Kontrollschicht an, so liegt bei mittlerer Messung der Messfehler mit ca. 1 Vol.-%. Das ist die Größenordnung der Messgenauigkeit des elektrophysikalischen Systems. Darüber hinaus wird durch die gewählte Schichtdicke von $d \approx 15$ cm gewährleistet, dass das Messvolumen um den Sensor für die gesamte Schicht repräsentativ ist. Der Sensor erfasst die halbe Schichtdicke. Der Fehler der Messung bleibt also eine Funktion der Dämpfung des Materials entlang dem Sensor und der Auswertegenauigkeit der Impulskurven bei höheren Bodenwassergehalten. Bei maximal 20 Vol.-%, was ca. 60 % der Sättigung entspricht, sind diese Einflüsse jedoch vernachlässigbar gering.

Durch Umlagerungen im Gefüge durch die Auflast aus dem aufliegenden Abdichtungssystem können sich diese Parameter ändern. Beispielsweise sinkt bei einer Nachverdichtung der Luftporengehalt und damit θ_s , gleichzeitig kann durch den geringeren Porendurchmesser θ_r ansteigen. Der Parameter m wird ebenfalls durch die Lagerungsdichte und die Porengrößenverteilung bestimmt. Untersuchungen am Institut für Boden- und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe haben ergeben, dass das gewählte Material (Su) bei verdichtetem Einbau nur noch unerheblich nachverdichtet wird, d.h. die aus den aus der eingebauten Schicht entnommenen Proben bestimmten Parameter sind auch für die weitere Beobachtung repräsentativ. Mit Hilfe von Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Form der pF-WG-Kurve im betrachteten Bereich ($\theta_r < \theta < 20$ Vol.-%) sehr stabil ist.

Zusammengefasst gilt: der von den Bodenparametern abhängige Parameter bleibt unter der Voraussetzung nur geringer Nachverdichtungen in der Kontrollschicht stabil. Damit ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_u proportional zur im Labor ermittelten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s . Der absolute Fehler wird damit nicht durch die Bodenparameter bestimmt, sondern durch die Messgenauigkeit des elektrophysikalischen Kontrollsystems.

III. Leckageortung in Konvektionssperren

Konvektionssperren in Abdichtungssystemen haben die Aufgabe, unmittelbar nach ihrem Aufbringen den Transport von Flüssigkeiten in die Deponie zu unterbinden. Außerdem werden gasförmige Emissionen aus einer biologisch noch aktiven Mülldeponie verhindert. Verwendet werden dazu Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus HD-PE. Die Mechanismen des Stofftransportes durch eine KDB und Kriterien für die Qualität der KDB nach deren Verlegung hat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) umfassend beschrieben. Für die Qualität der Ortung von Fehlstellen (Leckagen) in Konvektionssperren hat BAM die speziellen Empfehlungen erlassen:

- o Technische Nachweisschwelle:
„Leckagen aufgrund von kreisförmigen Löchern ab 5 mm Durchmesser (entsprechend einer Fläche je Leckagestelle ab 20 mm^2) müssen nachgewiesen werden.“
- o Ortungsgenauigkeit:
„Die von einem Dichtungskontrollsystem angezeigte Position einer Leckage muss innerhalb eines Kreises mit Radius $\sim 2,5$ m (entsprechend einer Fläche von 20 m^2) um die tatsächliche Position der Leckage liegen.“
- o Anforderung an das Auflager der Kunststoff-Dichtungsbahn (KDB):
„ k_f -Wert $\leq 10^{-6}$ m/s, Dicke $\geq 0,15$ m zur Limitierung der durch Schadstellen dringenden Flüssigkeitsmenge.“

Dazu ist eine Funktionsprüfung durchzuführen. Dabei werden Testleckagen in die KDB eingebracht, deren Detektion von einem behördlich bestellten „Fremd“-Überwacher (FÜ) überwacht und protokolliert werden. Die Ortung der Leckagen hat daher innerhalb einer kurzen Zeitspanne zu erfolgen. Z. Zt. einsetzbare Leckage-Ortungssysteme detektieren eine Änderung des elektrischen Potentials um eine Leckage. Dabei kann aber nicht unterschieden werden, ob die detektierte Fehlstelle relevant wird für den Wasserhaushalt der Deponie oder nicht.

Wehry hat auf Basis seines physikalischen Modells (siehe Bild 17) ein analytisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, den Wasserdurchtritt durch eine Fehlstelle in einer KDB in Abhängigkeit von den bodenmechanischen Eigenschaften der umgebenden Materialien zu quantifizieren.

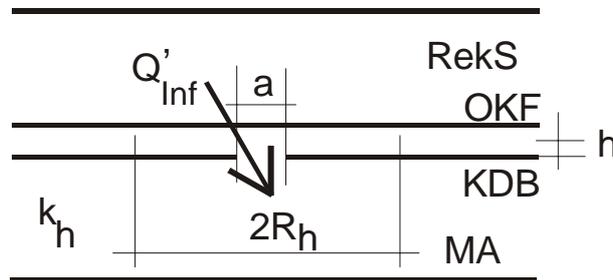


Bild 17: Physikalisches Leckage-Modell nach Wehry

Im ungesättigten Bereich definiert er einen Radius (R_h), in dem die einsickernde Wassermenge das Bodenmaterial benetzt. Dieser Radius ist eine Funktion des Durchmessers der Fehlstelle (a), des hydrostatischen Druckes im Niveau der Fehlstelle (h) und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit nach VGM (k_{VGM}). Die Infiltrationswassermenge ergibt sich zu:

$$Q'_{inf} = 2 * \pi * R_h^2 * k_{VGM}$$

mit

$$R_h = 0,26 * a^{0,05} * h^{0,45} * k_{VGM}^{-0,13}$$

Die Struktur der Formel findet sich auch in den Untersuchungen von Giruod und Bonaparte (1989, „Leakage through liners constructed with geomembranes“) wieder. Für hydraulische Leitfähigkeiten $< 10^{-6}$ m/sec hat Wehry Nomogramme entwickelt, aus denen direkt die Abmessung des benetzten Querschnitts (R_h) in Abhängigkeit vom Durchmesser der Fehlstelle und der hydrostatischen Druckhöhe abgegriffen werden kann.

Grundsätzlich sind auch die vorgestellten Bodenfeuchte-Sensoren in der Lage, Testleckagen zu detektieren. Bei planmäßigem Einsatz der Sensoren in einem wirtschaftlichen Regelabstand von > 5 m kann die Detektion der Testleckagen im ungünstigen Fall jedoch erst nach einigen hundert Tagen erfolgen. Diese Zeit benötigt die Leckageflüssigkeit, um durch die MA bis zum Sensorkabel zu gelangen. Folglich ist es das Ziel:

Die Reaktion des Systems hat innerhalb eines Tages zu erfolgen.

Dazu ist ein Fließweg zu schaffen, mit dessen Hilfe die Sensoren schneller ansprechen. Der Ansatz führt zu der Vorgabe der BAM, unter einer KDB ein spezielles Auflager einzurichten. In diese Schicht sind die Materialien, die den direkten Fließweg sicherstellen, integrierbar.

Zur Erprobung von Materialien wurde eine Messeinrichtung gefertigt. Damit werden folgende Materialeigenschaften getestet:

- o Wasserleitfähigkeit, d.h. wie schnell wird das Wasser im Material geleitet,
- o Wasseraufnahmefähigkeit, d.h. welche Flüssigkeitsmenge nimmt das Prüf-material auf, um es eine bestimmte Strecke weit zu transportieren.

Die Messeinrichtung ist wie folgt aufgebaut:

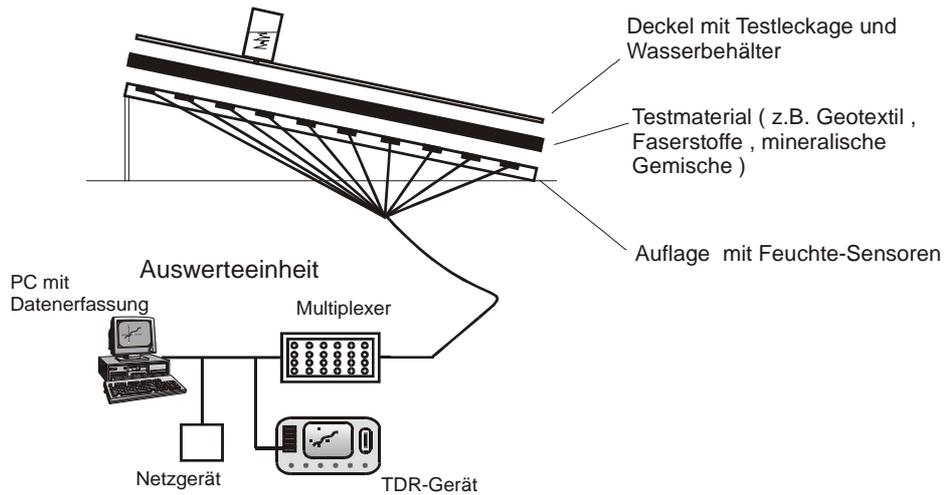


Bild 18: Aufbau der Testeinrichtung zur Detektion von Leckagen

Zunächst wurde die Funktion der Messeinrichtung erprobt. Die Messeinrichtung ist aus Plexiglas, sodass das Vordringen der Flüssigkeit nicht nur mittels der eingebauten Feuchtesensoren detektiert werden kann, sondern auch optisch mittels Kamera zur Kontrolle. Bild 19 zeigt die Ausbreitung der Flüssigkeit kurz nach deren Aufgabe, Bild 20 ist ca. ein Stunde später aufgenommen (Gefälle mit 5% nach links).

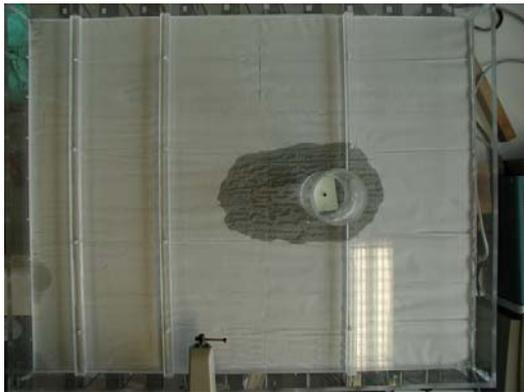


Bild 19: Bewässerung nach 15 Minuten (9:28 Uhr, Graph s. Bild 21)

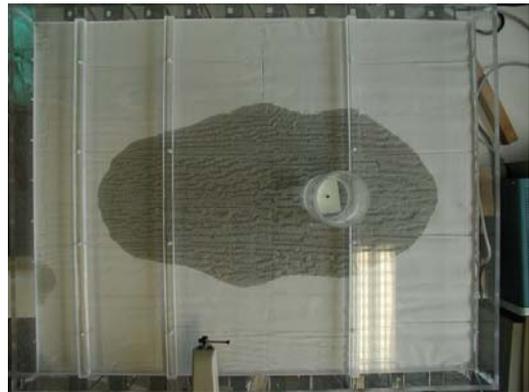


Bild 20: Bewässerung nach 70 Minuten (10:29 Uhr, Graph s. Bild 21)

Das Messsignal von Sensor-Nr. 3 (platziert an der zweiten Querstrebe von links) ist in Bild 21 dargestellt.

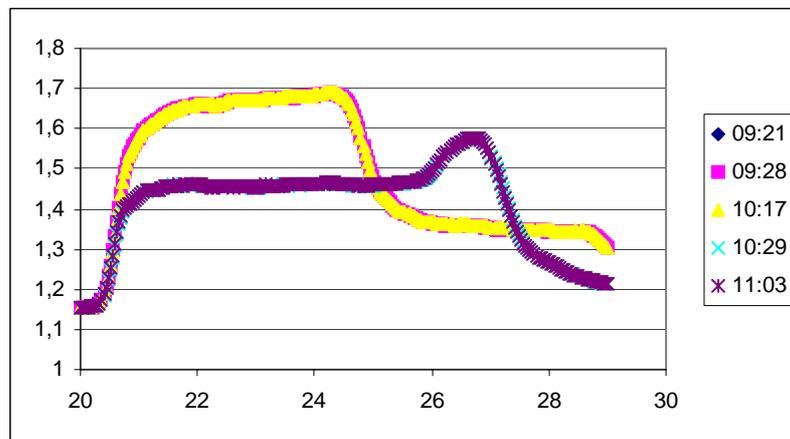


Bild 21: Verlauf der Spannungskurven in den Feuchtesensoren (Sensor 3)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Feuchtefront zwischen 10:17 Uhr und 10:29 Uhr den Messsensor erreicht hat. Während bei den drei Messungen vorher die Dielektrizitätszahl des trockenen Papiers die Sensorlaufzeit bestimmt hat, bestimmt in den folgenden beiden Messungen die Dielektrizitätszahl des Wassers die Sensorlaufzeit. Da hier nur der qualitative Effekt gefragt ist, ist diese Aussage über das Vorhandensein einer Leckage ausreichend. Nachdem damit die prinzipielle Funktion der Leckagedetektion nachgewiesen werden konnte, bleibt noch die Aufgabe, unterschiedliche Materialien (mineralische und synthetische) auf ihre Geeignetheit zu prüfen. Die laterale hydraulische Leitfähigkeit oder der laterale Abfluss in einer Kapillarsperre sind die maßgeblichen Größen. Die Einlage eines synthetischen Dräns (Geotextil mit hoher horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit oder eine Dränmatte) ohne Wasserhaltefähigkeit kann die Detektionsdauer und Auflösung wesentlich verkürzen.

Der Test unterschiedlicher mineralischer Materialien hat ergeben, dass bei einem Aufbau der Kontrollschicht in Analogie zu den Vorgaben der BAM ein schluffiger Sand als Kontrollmaterial ideal ist. Jedoch ist es notwendig, in Abhängigkeit von den Anforderungen des Schutzgutes, die Sensoren in sehr geringem Abstand zu verlegen. Das wiederum führt zu hohen Kosten, was das System dann unwirtschaftlich machen kann. Grundsätzlich ist es also möglich, Leckagen mit dem TAUPE-System zu detektieren. Im jeweiligen Anwendungsfall ist aber zu prüfen, ob die Systemsicherheit ausreichend ist und die Wirtschaftlichkeit gegeben ist.

Weiter ist die Detektion einer Leckage in einer Schicht durch die Änderung der Impulslaufcharakteristik übertragbar auf die Detektion von Inhomogenitäten in Böden. Wird eine Kontrollschicht nach den Vorgaben der BAM beispielsweise unter der Rekultivierungsschicht eingebaut, können mittels der Feuchtesensoren Flüsse über präferenzielle Fließwege (Makroporen) detektiert werden. Um diese Flüsse zu quantifizieren ist es erforderlich, die Änderung des Wassergehaltes in der Schicht mit deren hydraulischer Leitfähigkeit zu verknüpfen. Es ist dann nur noch die geometrische Lage der Sensoren an die gewünschte Auflösung anzupassen.

IV. Feldtaugliches Messgerät

Die Entwicklung eines feldtauglichen Messgerätes wurde zweigleisig verfolgt. Zum einen wurde die Entwicklung des Marktes aufmerksam beobachtet. Die Fa. Campbell Scientific hat das handliche Gerät TDR 100 entwickelt und auf den Markt gebracht. Das Gerät wurde umfangreich getestet und seine Einsatzfähigkeit als Impulsgeber für unsere Aufgabenstellung bestätigt. Das TDR 100 kann jedoch nicht ohne weiteres im Freien verwendet werden. Es bedarf eines Schutzes gegen Einflüsse von Witterung und Vandalismus. Da die Sensorkabel im Regelfall als Netz eingesetzt werden, wird ein Multiplexer und ein Signaltoneerzeuger notwendig. Diese Geräte können an zentralen Punkten in der Umgebung angepassten Einhausungen untergebracht werden. Minimal ist eine Messkiste erforderlich (siehe Bild 22), die im Winter beheizbar ist und im Sommer nicht direkt der Sonne ausgesetzt ist. Idealerweise wäre eine Zentraleinheit klimatisiert.

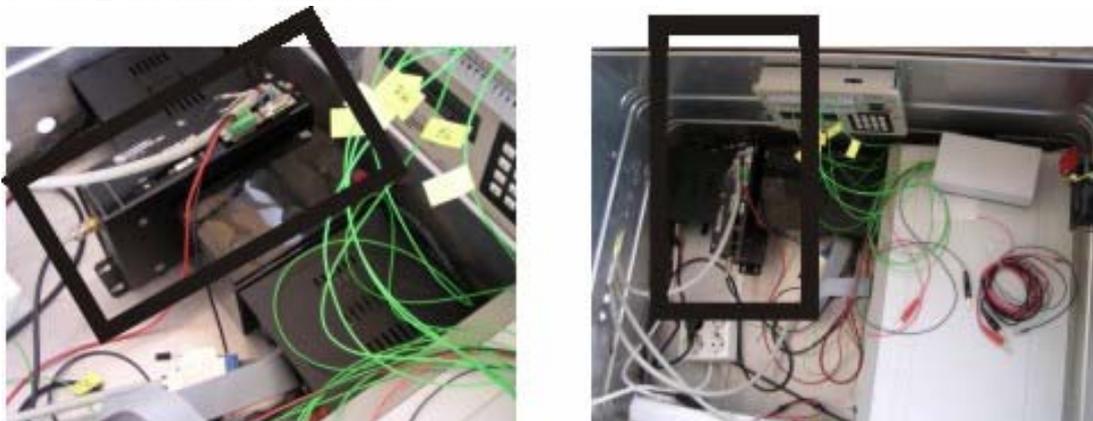


Bild 22: Messgerät (im Rahmen) zur Messung im Zeitbereich (TDR)

Parallel wurde mit Förderung der Technologie-Abteilung des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) ein feldtaugliches Gerät zur Messung im Frequenzbereich (FDR) entwickelt. Das Gerät liegt mittlerweile vor und wird im Lysimeter auf dem Gelände des FZK getestet.



Bild 23: Messgerät zur Messung im Frequenzbereich (FDR)

Die patentrechtlich geschützte Messmethode wurde im Jahre 2003 an einen Lizenznehmer vergeben. Diese Firma hat das handelsübliche TDR-Gerät mit einer notwendigen Peripherie aufgerüstet, sodass die Konfiguration erstmals großflächig auf einer Deponie in Baden-Württemberg eingesetzt werden kann.

V. Zusammenfassung

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.

Nimmt man eine starre Bodenmatrix und konstante Temperatur während eines Be- und Entwässerungsvorganges an, so sind als Ursachen der Hysterese in der pF-WG-Beziehung folgende Faktoren identifiziert:

- Der Randwinkel zwischen Bodenmatrix und Bodenwasser (Meniskuskrümmung) ist beim Vorrücken von Wasser größer als bei seinem Rückzug.
- Es existieren porengeometrische Effekte, die mit dem „Ink-bottle“-Effekt beschrieben werden.
- Adsorbiertes Wasser an Tonmineraloberflächen führt zur Adsorptionshysterese („Capillary condensation“).
- Eingeschlossene Luft verstärkt die porengeometrischen Effekte.

Diese Faktoren führen dazu, dass die Beziehung des bisherigen Messwertes Saugspannung (ψ) zur hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) ebenfalls stark der Hysterese unterliegt. *Mualem* stellt die Bandbreite der Hysterese (Abstand der Punkte der Hauptbewässerungs- und der Hauptentwässerungskurve) dar:

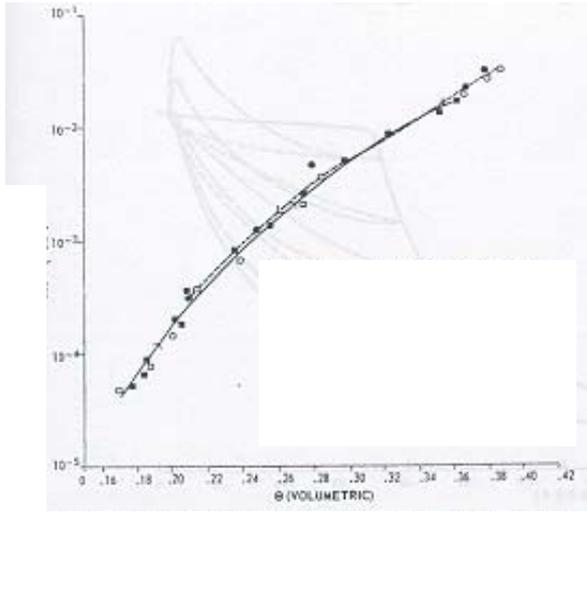
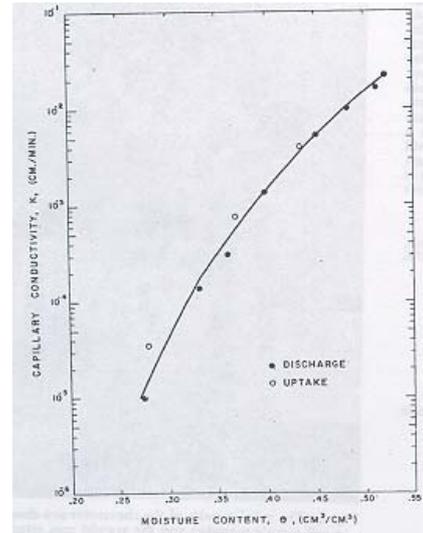
Beziehung: Wassergehalt = f(Saugspannung) [pF-WG-Kurve]	Faktor	3
Beziehung: k_f -Wert = f(Saugspannung)	Faktor	200

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 (ψ wird logarithmisch aufgetragen, der k_f -Wert exponentiell). 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.

Die überwiegende Anzahl der relevanten Veröffentlichungen zeigt auf, dass für schluffige Sande die Beziehung Wassergehalt zu k_f -Wert nur einer geringen oder keiner Hysterese unterliegt. Schlüsselparameter dafür sind die Porengrößenverteilung und der Verdichtungsgrad. Diese beiden Parameter sind aber auch für die Qualität der Messungen des Bodenwassergehaltes entscheidend. Es ist somit für die Durchführung des Versuchs belegt, dass die Hysterese bei der Bestimmung des k_f -Wertes aus dem Bodenwassergehalt nur eine untergeordnete Unschärfe in die Messergebnisse einbringt. Da bei der Versuchsdurchführung auch das Langzeitverhalten der Entwicklung der Wassergehalte bewertet wird, sind diese Unschärfen erkennbar, aber durch die nur relative Verwertung der Änderungen (Differenzen) des Wassergehaltes auch eliminierbar. In Bild 24 und 25 wird gezeigt, dass die Auswirkung der Hysterese tatsächlich vernachlässigbar ist.

Bild 24: k_f -Wassergehalt-Beziehung nach ToppBild 25: k_f -Wassergehalt-Beziehung nach Elrick

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.

V. Literatur

R. Nüesch, J. Brauns, R. Schuhmann, R. Becker, W. Schädel, C. Hübner und S. Schlaeger, "Non-destructive insitu and online measurement of soil physical parameters", angenommener Vortrag, Rock and Soil of America, MIT, Bosten, Juli 2003.

R. Schuhmann, „Kontrolle von Barrieren: Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Hand des Bodenwassergehaltes“, genehmigte Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Nr. 219, Veröffentlichung für 2003 geplant

R. Schuhmann, „Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit aus dem zugehörigen Bodenwassergehalt zur Überwachung von Barrieren“, Forschungszentrum Karlsruhe, Nachrichten aus dem ITC, Wasser- und Geotechnologie, Nr. 3, Dezember 2002

A. Scheuermann, S. Schlaeger, R. Becker, W. Schädel und R. Schuhmann, „Nutzen der TDR-Messtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik“, Beitrag zum Symposium der Bundesanstalt für Wasserbau im Oktober 2002

A. Brandelik, R. Nüesch, C. Hübner und R. Schuhmann, „Verschlussstopfen und Verfahren zum Verschließen von untertägigen Hohlräumen“, Deutsches Patent 2002, Nr. 10149972

A. Brandelik, R. Schuhmann und F. Königer, „Dichtungskontrollsystem für Deponien“, BW-Plus-Statusbericht II, März 2002

A. Brandelik, C. Hübner und R. Schuhmann, „Dichtungskontrollsystem für Deponien“, BW-Plus-Statusbericht I, Februar 2001

A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, „Moisture sensor for large area layers“, US Patent 1999, Nr. 5942904

A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, „Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten“, europäisches Patent 1998, Nr. 0804724

A. Brandelik, G. Krafft, C. Hübner, P. Ruppert, H. Schwarzmüller, F. Herbst, R. Schuhmann, R. Zischak, H. Hölzl, „Zerstörungsfreie In-situ-Messung der Feuchte und Dichteänderung von mineralischen Deponieabdichtungen - Erfahrungsbericht“, Müll & Abfall Heft 1/1997

A. Brandelik, G. Krafft, C. Hübner, P. Ruppert, H. Schwarzmüller, F. Herbst, R. Schuhmann, R. Zischak, H. Hölzl, „Zerstörungsfreie In-situ-Messung der Feuchte und Dichteänderung von mineralischen Deponieabdichtungen“, Müll & Abfall Heft 4/1996

A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, „Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten“, Deutsches Patent 1996, Nr. 19501196