

Abschlussbericht BWPLUS-Projekt PD.96.180

**Ausarbeitung und praktische Demonstration eines
Meßsystems für die großflächige und langzeitige
Kontrolle der Dichtheit von Mülldeponien.**



A. Brandelik und C. Hübner

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH/ Universität Karlsruhe

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Die Arbeiten des Projektes "Wasser, Abfall, Boden" wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg gefördert

September 1999

Ausarbeitung und praktische Demonstration eines Meßsystems für die großflächige und langzeitige Kontrolle der Dichtheit von Mülldeponien

Zusammenfassung

Die Aufgabe von Deponieabdichtungen ist es, die potentiellen Wasser- und Gasemissionen in die Umgebung zu verhindern. Insbesondere der Wassereintrag und der wäßrige Stoffaustrag sollen auf ein unbedenkliches Maß begrenzt werden. Erfahrungsgemäß ist damit eine ausreichende Reduzierung der Gaswegigkeit verbunden. Viele Deponien haben keine oder eine nur unzureichend ausgestattete Basisabdichtung. In diesen Fällen kommt der Oberflächenabdichtung eine besondere Bedeutung zu. Ihre Funktionsfähigkeit muß auf der gesamten Fläche wiederholt nachgewiesen werden. Eine dafür geeignete Meßgröße ist der Wassergehalt, der in unmittelbarem Zusammenhang mit der Dichtwirkung steht. Bisher bekannte Kontrollsysteme sind jedoch zu teuer, lösen nur ein Teilproblem oder sie geben eine zu späte und nicht orts aufgelöste Schadensmeldung. Erst das in diesem Projekt ausgearbeitete Meßverfahren zur Kontrolle der Dichtheit von Mülldeponen ermöglicht eine technologisch und ökonomisch zufriedenstellende Lösung der Aufgabe. Das neue Kontrollsystem basiert auf dem vom Forschungszentrum Karlsruhe patentierten *Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten TAUPE* (Brandelik et al., 1995). Es besteht aus feuchteempfindlichen Hochfrequenzkabeln, die in, unterhalb und oberhalb einer als Wassersperre dienenden tonmineralischen Abdichtungsschicht verlegt werden. Auf dem Demonstrationsobjekt Deponie Karlsruhe-West wurde so eine Gesamtfläche von ca. 2100 m² mit Sensoren bestückt und ein automatisches Meßsystem installiert. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Feuchte konnte die Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems nachgewiesen werden.

Die Meßergebnisse wurde durch eine Reihe von Aufgrabungen mit Bodenprobenentnahmen bestätigt. Ergänzend wurde ein weiterer am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelter Feuchtesensor *LUMBRICUS* eingesetzt, der die sonst notwendige Absolutkalibrierung von *TAUPE* durch gravimetrische Feuchtebestimmungen ersetzt. Zur Simulation von Undichtigkeiten im Abdichtungssystem wurde künstlich Wasser infiltriert und die Anzeige des Kontrollsystems beobachtet. Die Lage der Infiltrationsstelle konnte eindeutig identifiziert und somit der Nachweis einer ausreichenden Empfindlichkeit und Ortsauflösung des Kontrollsystems erbracht werden.

Mit Hilfe des Meßsystems *TAUPE* kann der Deponiebetreiber eine Gefährdung der Wasserundurchlässigkeit und damit der Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems frühzeitig erkennen und Schadstellen kleinräumig, d.h. kostengünstig reparieren. Die Investitions- und Installationskosten sowie die Aufwendungen für den Betrieb im ersten Jahr betragen ca. DM 8,- /m². Dabei ist das Kontrollsystem für eine Betriebsdauer von mehr als 20 Jahren ausgelegt.

Development and practical demonstration of a measuring system for large-area and long-term control of the containment of waste dumps

Summary

Waste dumps are equipped with barrier systems to prevent possible water and gas emission into the environment. In particular, the amount of water introduced and the leached into the ground water shall be kept on a negligibly small level. It is known that this also reduces the gas transmission to a sufficient degree. Many waste dumps are equipped with no or an insufficient bottom barrier system only. In these cases, the surface barrier has to fulfill an additional task. Its functionality must cover large areas and be frequently controlled. The water content and its change in the barrier are directly related to the hydraulic conductivity, to the leakage. Due to this fact most of the control systems measure the water content. According to the state of the art existing when we started our work, these control methods were either too expensive, limited to a partial problem only or the damage was notified too late and without any local resolution. We solved this problem by the use of the *Moisture sensor for extended layers TAUPE* patented at the Karlsruhe Research Center. On the demonstration site, Deponie Karlsruhe-West, moisture-sensitive high-frequency cables were buried cross led in, below and above the major water barrier, the clay-mineral sealing layer, on a total area of about 2100 m². An automatic measurement system recorded water content variations over time. This way it was possible to assess performance of the barrier system.

The measurement results have been confirmed by gravimetric sampling. Additionally the sensor *LUMBRICUS*, which has also been developed by the Karlsruhe Research Center was used for absolute calibration of the water content. In order to simulate a leakage in the barrier system, water was infiltrated at a certain point. The control system *TAUPE* was able to detect the leakage and its position with high sensitivity and good local resolution.

Using *TAUPE*, waste disposal operators can detect increasing water conductivity and the risk of leakages in their barrier system at a very early stage. This enables the operator to take precautions against the risk of water penetration and to efficiently repair damages on a small area at low costs. The installation is designed for an operating period of more than 20 years. The costs for the investment, installation and operation in the first year are about DM 8,-/m².

1 Einleitung

Seit Anfang der 70iger Jahre erkennt man weltweit und in immer stärkeren Maße, daß Mülldeponien die Umwelt belasten und gefährden. Viele Altlasten müssen deshalb erfaßt, untersucht und saniert werden. Bei neuen Deponien versucht man effektive, aber gleichzeitig ökonomische Schutzmaßnahmen vorzusehen, um gefährliche Emissionen zu verhindern. Insbesondere in den dichtbesiedelten Industrieländern treten diese Aufgaben immer mehr in den Vordergrund. Der Boden- und Grundwasserschutz ist Schwerpunkt der Umweltvorsorge des Landes Baden-Württemberg. Aus dieser Vorsorge entstand ein breites Feld der Tätigkeiten in dieser neuen Disziplin, der Abfallentsorgung. Das Teilgebiet Deponietechnik, soll helfen, die Umweltbelastungen durch Lagerung von Abfällen zu reduzieren. Insbesondere die Belastungen des Grundwassers und der Luft stehen im Mittelpunkt des Interesses. Den Schwerpunkt bilden dabei die Deponieabdichtungen, deren Aufgabe es ist, die Wasser- und Gasemission in die Umgebung zu verhindern. Insbesondere der Wassereintrag und der wäßrige Stoffaustrag sollen auf ein vernachlässigbares Maß begrenzt werden. Erfahrungsgemäß geht damit auch eine ausreichende Reduzierung der Gaswegigkeit einher. Viele Deponien haben jedoch keine oder eine nur unzureichend ausgestattete Basisabdichtung. In diesen Fällen kommt der Oberflächenabdichtung eine besondere Bedeutung zu.

Die rechtlichen Grundlagen für Deponieabdichtungen können der TA-Siedlungsabfall (TA-Si) entnommen werden. So definiert die TA-Si unter Ziffer 10.4.1.4 für das Oberflächenabdichtungssystem Deponieklasse II ein sogenanntes Regelabdichtungssystem, die s.g. Kombinationsabdichtung (Doppeltes Dichtungssystem). Das System besteht aus (von unten angefangen) Ausgleichsschicht (ggf. Gasdränschicht), mineralischer Dichtungsschicht MA, Kunststoffdichtungsbahn KDB, Schutzschicht, Entwässerungsschicht, Rekultivierungsschicht und dem Bewuchs. Der Aufbau des Regelabdichtungssystems weist mit der Kunststoffdichtungsbahn (künstliches Produkt) ein s.g. Short Term Element (ca. 50 Jahre Dauerhaftigkeit wird unterstellt) und mit der Mineralischen Abdichtung (geogenes Material) ein Long Term Element auf. Die Mineralische Abdichtung MA soll nach Versagen der Kunststoffdichtungsbahn KDB die Abdichtungsfunktion alleine übernehmen können. Zunehmend werden auch alternative Abdichtungssysteme (die gleichwertig sein müssen) genehmigt und erstellt, so auch auf der Deponie Karlsruhe-West. In diesem Fall war es aufgrund der steilen Böschung nicht möglich ein Short Term Element in Form einer

Kunststoffdichtungsbahn einzusetzen. Weitere alternative Abdichtungssysteme bestehen aus Bentonitmatten, Asphalt, Kapillarsperren oder deren Kombination. Die Funktion der Rekultivierungsschicht/Wurzelboden als Long Term Element wird dabei zunehmend als wichtig angesehen. So ist z.B. der Wurzelboden auf der Deponie Karlsruhe-West mit 2 m Mächtigkeit besonders verstärkt ausgeführt. Nach der Erstellung der Deponieabdichtung tritt die Nachsorgephase ein. Die Dauer dieser Phase ist nach Ziffer 10.7.2 der TA-Si von der zuständigen Behörde festzulegen. Detaillierte Regelungen hierzu sind nicht vorhanden, jedoch sind die Kontrollergebnisse die Grundlage für die Entscheidungen der Behörde. Aufgrund des Abfallinventars wird bei Deponien für Siedlungsabfall ein hohes Gefährdungspotential unterstellt. Deshalb wird nach TA-Si eine langfristige und sichere Einkapselung und eine Kontrolle der Emissionen angestrebt. Unter Ziffer 10.6.6.1 wird gefordert: „Durch Kontrollen ist nachzuweisen, daß ... die Funktionstüchtigkeit der Deponieabdichtungssysteme ... sichergestellt ist. Darüber hinaus verweist man auf die TA Abfall bei der im Abschnitt 9.4.1.4 folgendes angegeben ist: „Das Deponieoberflächenabdichtungssystem ist so auszuführen, daß Undichtigkeiten für die Dauer der Nachsorgephase lokalisiert und repariert werden können. Im Anhang G, Absatz 3.2.1 heißt es darüber hinaus: „Die Funktion des Oberflächenabdichtungssystems ist regelmäßig zu kontrollieren. Bei festgestellten Leckagen sind diese unverzüglich zu reparieren“. Eine Kontrolle der Dichtigkeit von Oberflächenabdichtungen soll sicherstellen, daß kein Wasser in den Deponiekörper eindringen und somit keine Emissionen entstehen können. Die Kontrolle der Oberflächenabdichtung erscheint im Gegensatz zur Kontrolle von Basisabdichtungen auch deshalb sinnvoll, weil an der Oberfläche eine Reparatur wirtschaftlich machbar ist. Ausschlaggebend für die Emissionssituation ist die flächige und dauerhafte Wirkungsweise des Dichtungssystems und seine Kontrolle. Eine Kontrolle wird jedoch nur endlich lange durchführbar sein. Sie sollte mindestens so lange dauern, bis eine Entlassung aus der Nachsorgephase möglich ist.

Betrachtet man den Lebenszyklus einer Deponie so kann man einzelne Phasen unterschiedlich starker potentieller Umweltgefährdung unterscheiden. Die dazugehörige zeitliche Risikoentwicklung für das Versagen einer Deponieabdichtung ist in Abbildung 1 ersichtlich.

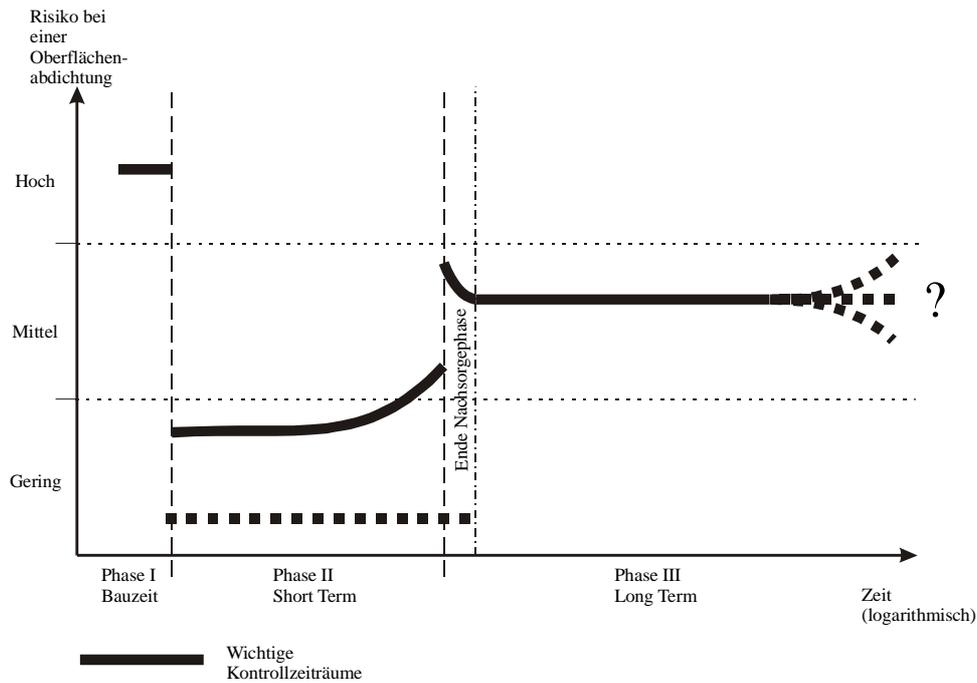


Bild 1: Zeitabhängiges Versagensrisiko einer Oberflächenabdichtung und wichtige Kontrollzeiträume

Man erkennt, daß das höchste Risiko in der Bauphase liegt. Falls kein Schaden in der Bauzeit auftritt, ist das Risiko zu Beginn der Phase II (Short Term) deutlich geringer, steigt aber bis zum Ende der Phase II zunehmend an. Das Ende der Phase II bedeutet das Versagen des Short Term Elements. Danach ist das Risiko grundsätzlich höher, da nur noch ein Dichtelement funktioniert. Für dieses Long Term Element wird sich nach der ersten Belastungsphase ein über eine längere Zeit unveränderlicher Risikozustand ergeben. Die Risikoentwicklung über sehr lange Zeiträume hinweg (mehrere hunderte Jahre) ist nur schwer schätzbar. Es gibt zwei wichtige Kontrollzeiträume; die Herstellungszeit und der Übergang zwischen Versagen des künstlichen Dichtelements und Beginn der Wirkung des geogenen Dichtelements Phase II/III. Wird der Nachweis der Wirksamkeit dieses geogenen Dichtelements erbracht, so kann die Nachsorgephase beendet werden. D.h., die Kontrolle ist die Entscheidungsgrundlage für die Entlassung der Deponie aus der Nachsorge. Eine kontinuierliche Kontrolle ist für die Behörde hilfreich, um die Länge der Nachsorgezeit an die individuelle Anlage anzupassen. Eine Verkürzung der Nachsorge spart dem Betreiber hohe laufende Kosten. Im Falle alternativer Abdichtungssysteme, wie z.B. auf der Deponie Karlsruhe-West, muß die zeitliche Entwicklung des Versagensrisiko entsprechend dem Vorhandensein von Short und Long Term Elementen angepaßt werden.

2 Bisherige Kontrollsysteme

Die direkte Kontrolle von Oberflächenabdichtungen im Sinne der TA-Si wird bisher nicht oder nur in Ausnahmefällen ausgeführt, weil keine genehmigungsrechtlichen Forderungen bestehen und weil vor allem die Technik der bisher verfügbaren Kontrollsysteme nicht ausgereift war. Zum Beispiel kann das an einigen Stellen eingesetzte System GEOLOGGER der Fa. Progeo (Rödel, A. und M. Arndt, 1997) lediglich eine Kontrolle der Phasen I und II übernehmen. Die für die Nachsorge entscheidende Phase III (Long Term) wird genauso wenig überwacht, wie der wichtige Übergang von Phase II zu Phase III. Es werden lediglich Leckagen detektiert, die jedoch noch kein Versagenskriterium für die Abdichtung sein müssen. Der GEOLOGGER ist ein typischer Vertreter von weltweit ca. 400 installierten Leckortungssystemen (Laine, 1997). Bei diesen Systemen verlegt man ober- und unterhalb der isolierenden Kunststoffdichtungsbahn elektrische Leitungen, die mit dem Boden in gutem Kontakt stehen müssen. Im Falle eines Durchbruchs der Kunststoffbahn wird der elektrische Widerstand zwischen einem oben- und einem untenliegenden Leitungspaar erheblich verringert und somit eine Lokalisierung der Schadstelle möglich. Für eine Erfassung von Wassergehaltsänderungen ist dieses Meßprinzip jedoch nicht geeignet, da der Widerstand eines feuchten Bodens von vielen weiteren Größen wie z.B. dem Salzgehalt beeinflusst wird. Außerdem kann sich dieser Widerstand vorzugsweise an Grenzflächen, trotz gleichbleibendem Wassergehalt mit der Zeit stark ändern. Abgesehen davon muß ein Leck in der Dichtungsbahn noch nicht das Versagen der darüber und darunter liegenden Wassersperren bedeuten. Insbesondere bei der nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall als Regelabdichtung vorgeschriebenen Kombinationsdichtung geht man davon aus, daß bei Beschädigung der KDB die MA die Funktion der Wassersperre übernimmt. Es wäre deshalb überflüssig und ökonomisch nicht zu vertreten, wenn bei defekter KDB und intakter MA eine Reparatur vorgenommen würde. Die Aufgabe der Kontrolle von Oberflächenabdichtungen darf sich deshalb nicht auf eine reine Leckortung an KDBs beschränken, sondern muß die Wasserwegigkeit des gesamten Abdichtungsaufbaus in den Mittelpunkt rücken. Abgesehen davon können bei alternativen Abdichtungen, bei denen auf eine KDB verzichtet wird (wie z.B. auf der Deponie Karlsruhe-West), Systeme der Art GEOLOGGER prinzipiell nicht eingesetzt werden.

Mit behördlicher Zustimmung kann in Einzelfällen bei einem Einsatz eines Kontrollsystems auf ein zweites Dichtelement verzichtet werden. Dieses wird damit begründet, daß die

Kontrolle selbst die Sicherheit des zweiten Dichtelements übernimmt. Allerdings wird aufgrund der Philosophie der TA-Si empfohlen, auf jeden Fall ein Long Term wirksames Element einzubauen. Deshalb kann mit dem Kontrollsystemen wie z.B. dem GEOLOGGER keine Elementensparung erzielt werden. Die Alternative ist der alleinige Einsatz eines Short Term Elements (z.B. Kunststoffdichtungsbahn) und dessen permanente Überwachung. Eine Entlassung aus der Nachsorge ist dann jedoch auf Dauer nicht möglich.

3 Das Dichtungskontrollsystem *TAUPE*

Im Gegensatz zu bisher bekannten Kontrollsystemen kann *TAUPE* alle Phasen der Nachsorge überwachen und zur eindeutigen Erkennung von Funktionsfehlern des Abdichtungssystems beitragen. Mit *TAUPE* kann der Wassergehalt in Bodenschichten flächig und kontinuierlich bestimmt werden. Durch Installation des Systems in unterschiedlichen Höhenlagen des Bodens lassen sich über die Wassergehaltsänderungen auch Wasserbewegungen und damit Wasserabflüsse bestimmen. Installiert man *TAUPE* in unter dem Dichtungselement liegenden Dränelementen, so können auch dort laterale Wasserabflüsse ortsgenau detektiert werden. Das System verwendet feuchteempfindliche Hochfrequenzmeßkabel, die kreuzweise und damit quasi flächig im Boden verlegt werden. An diesem Kabelnetzwerk werden redundante elektrische Messungen der Signalausbreitung im Zeit- und Frequenzbereich durchgeführt. Die daraus gewonnenen primären Meßgrößen lassen sich über den Dielektrizitätskoeffizienten des feuchten Bodens mit Hilfe bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten mit dem Wassergehalt verknüpfen. Die hohe Empfindlichkeit dieser Meßmethode beruht auf dem starken Kontrast zwischen der Dielektrizitätszahl von Wasser (80) und der von Luft (1) bzw. den Bodenkörner (2-8). Die Hochfrequenzkabel selbst bestehen aus Kupferleitern, die zum Korrosionsschutz vollständig mit Polyethylen (PE) gemäß den Richtlinien für Erdkabel umhüllt sind. Da kein metallischer oder leitfähiger Kontakt zum Boden, wie z.B. bei den Verfahren mit elektrischer Widerstandsmessung, notwendig ist, zeichnet sich die *TAUPE*-Kabel durch hervorragende Langzeitbeständigkeit aus.

3.1.1 Systementwicklung

Die feuchteempfindlichen Meßkabel wurden für Boden- und Schneefeuchtemessungen entwickelt (Hübner, 1999) und in Kooperation mit einem Kabelhersteller gefertigt. Abbildung 2 zeigt das Kabel und wie sich das dazugehörige Meßfeld in die Umgebung des Kabels ausdehnt. Das Kabel ist ca. 6 cm breit, 1,5 mm dick und vollständig mit Low Density Polyethylen (LDPE) umhüllt.

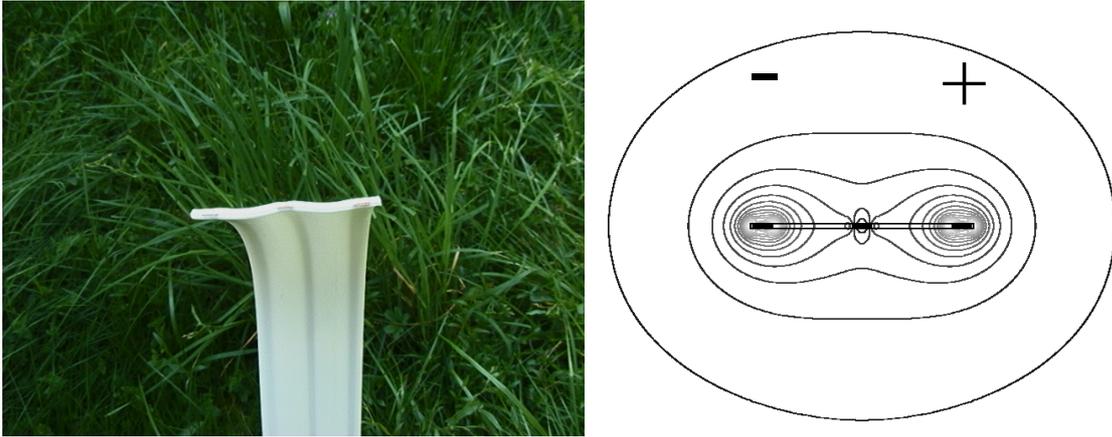


Bild 2: Ansicht des Kabels und des dazugehörigen elektrischen Meßfeldes

Die Signalausbreitung entlang des Meßkabels hängt in komplizierter Weise von dem Umgebungsmaterial und dessen Feuchte ab. Diese Abhängigkeit ist nach theoretischen Studien von Mischungsregeln (Priou, 1992), nach empirischen Messungen und durch eigene Feldberechnungen (Hübner et al., 1997) für diese Aufgabe bekannt. Die Verknüpfung geschieht in zwei Schritten. Mittels redundanter Messungen der Signalverzögerung, Dämpfung sowie der Phasendrehung in ausgewählten Frequenzbereichen und unter Zuhilfenahme des Übersprechens von benachbarten Kabeln berechnet man den Dielektrizitätskoeffizienten des feuchten Bodens. Diese redundante Messungen ermöglichen Kabellängen von mehr als 20 m, während vergleichbare am Markt angebotene Sensoren Maximallängen von etwa 0,4 m aufweisen und deshalb für die in diesem Projekt gestellte Aufgabe unbrauchbar sind. Die elektrische Kabelimpedanz ist so gewählt, daß in Luft als auch in hochverdichtetem und hochgesättigten mineralischen Material eine ausreichende elektrische Anpassung an konventionelle Meßgeräte gegeben ist. Unter dem gleichen Kriterium wurden die Zuleitungskabel ausgewählt. Für die Messung werden Zeitbereichs-Reflexionsmeßgeräte (**T**ime **D**omain **R**eflectometer) und vektorielle Netzwerkanalysatoren eingesetzt. Die damit aufgezeichneten Meßdaten werden über den zweistufigen Auswertalgorithmus erst in Dielektrizitätskoeffizienten und dann durch eine geeignete Mischungsregel (modifizierte Mischungsregel nach Birchak et al., 1974) in volumetrische Wassergehalte umgerechnet. Die Ergebnisse können dann wie z.B. in Bild 3 visualisiert werden.

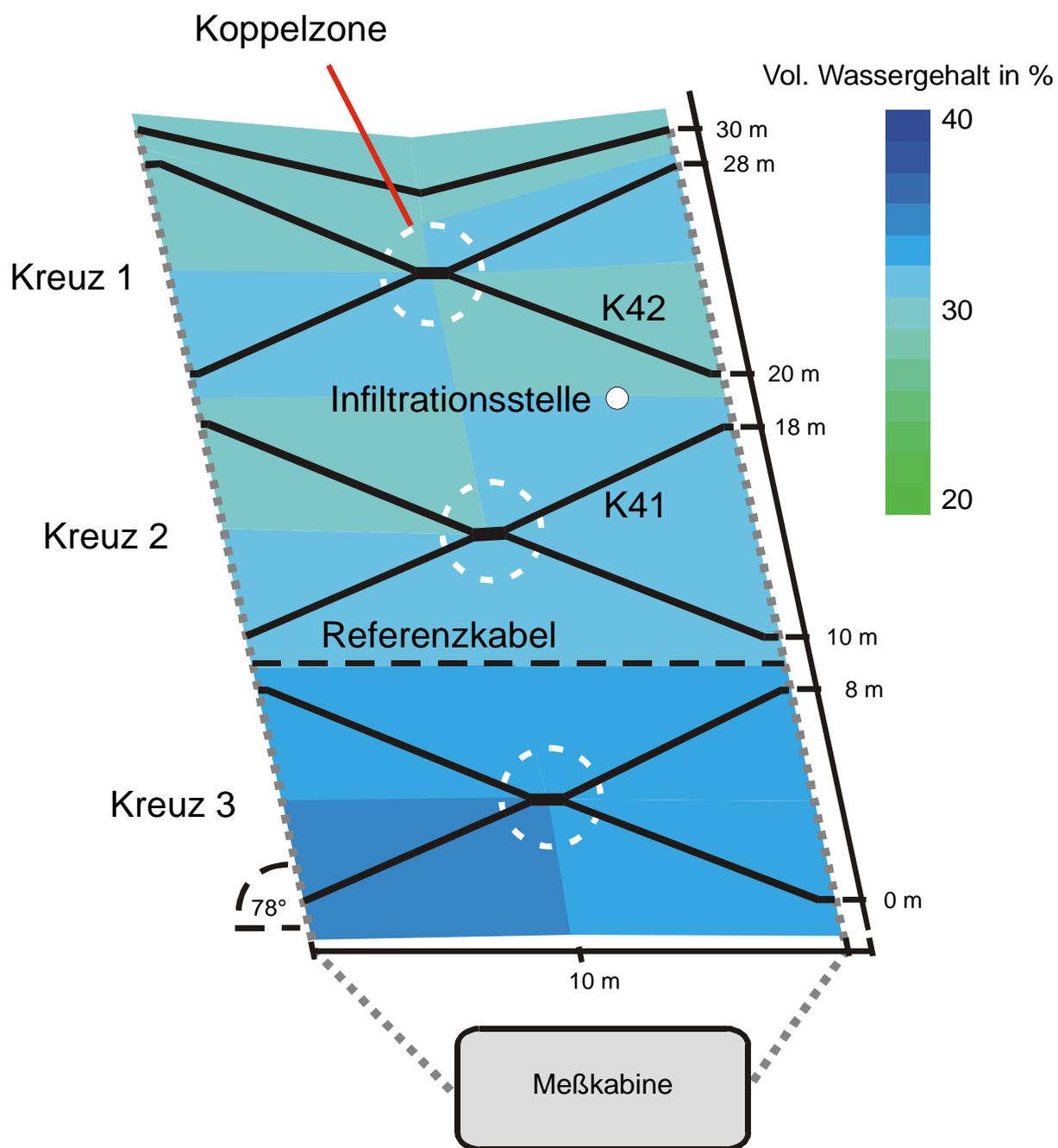


Bild 3: Visualisierung von Messergebnissen im Lageplan des Demonstrationsfeldes der Deponie Karlsruhe-West.

Dabei werden die gemessenen Wassergehalte in dem Lageplan der Kabel gezeigt. Das ebenfalls in Bild 3 eingezeichnete Referenzkabel dient bis jetzt nur zur Kompensation von Temperatureffekten. Temperatur- und Feuchteunterschiede zwischen in mehreren Ebenen angeordneten Kabelnetzwerken lassen jedoch auch auf die Herkunft der Feuchtigkeit, von oben oder von unten z.B. durch Müllverrottung, schließen.

3.1.2 Installation der Demonstrationsanlage auf der Deponie Karlsruhe-West:

Zur Installation des Meßsystems wurden die Kabel im Feld kreuzweise verlegt (siehe Bild 4).



Bild 4: Kreuzweise Verlegung der Meßkabel auf der Deponie Karlsruhe-West

Das Verlegen wurde wie in Bild 5 gezeigt mit Unterstützung eines Baggers zügig durchgeführt.



Bild 5: Entspannte Verlegung des Kabels in der Baggerfurche

Durch die lose Einbettung ist eine später durch Setzungen induzierte Streckung der Meßkabel möglich. Nach der Verlegung wurde wie in Bild 6 gezeigt erneut verdichtet.



Bild 6: Wiederverdichtung nach dem Kabelverlegen

Die Qualität dieser Verdichtung wurde durch Aufgrabungen kontrolliert und ergab wie zuvor eine Proctordichte von über 95%. Des weiteren konnte eine vollständige Umschließung der Meßkabel mit dem umgebenden Boden festgestellt werden.

Durch die Verlegeart nach Abbildung 3 kann die Gesamtabdichtungsfläche einer Deponie in Teilflächen von ca. 700 m² aufgeteilt werden. Jede Teilfläche ist mit 7 Einzelkabeln à ca. 20 m bestückt. Durch die gewählte Verlegung (Kreuzverlegung) werden jeweils Flächenanteile von 45 m² durch ein Kabel erfaßt. Innerhalb eines Kabels ist dann eine Lokalisierung auf ca. 4 m genau möglich.

Das Kabelnetzwerk wurde wie in Bild 7 eingezeichnet in 3 verschiedenen Ebenen der Abdichtung eingebaut (Oberseite der MA, Mitte der MA und in der Sandschicht unterhalb der MA). Damit werden weitergehende Untersuchungen zur Quantifizierung von Wasserdurchflüssen möglich. Die Verlegearbeiten waren baupraktisch unproblematisch und in kurzer Zeit (geringe Unterbrechung der Abdichtungsarbeiten) möglich.

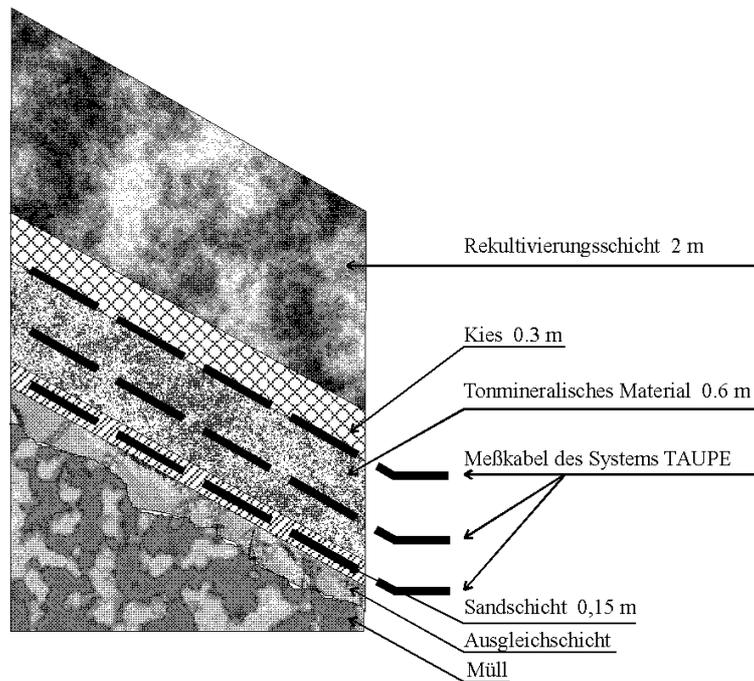


Bild 7: Querschnitt der Oberflächenabdichtung auf der Deponie Karlsruhe-West mit den einzelnen Meßlagen von *TAUPE*

Die Zuleitungskabel zu den Sensoren werden gebündelt in einer Meßkabine geführt (Bild 8). Darin befindet sich die zentrale Meßeinrichtung (Bild 8).

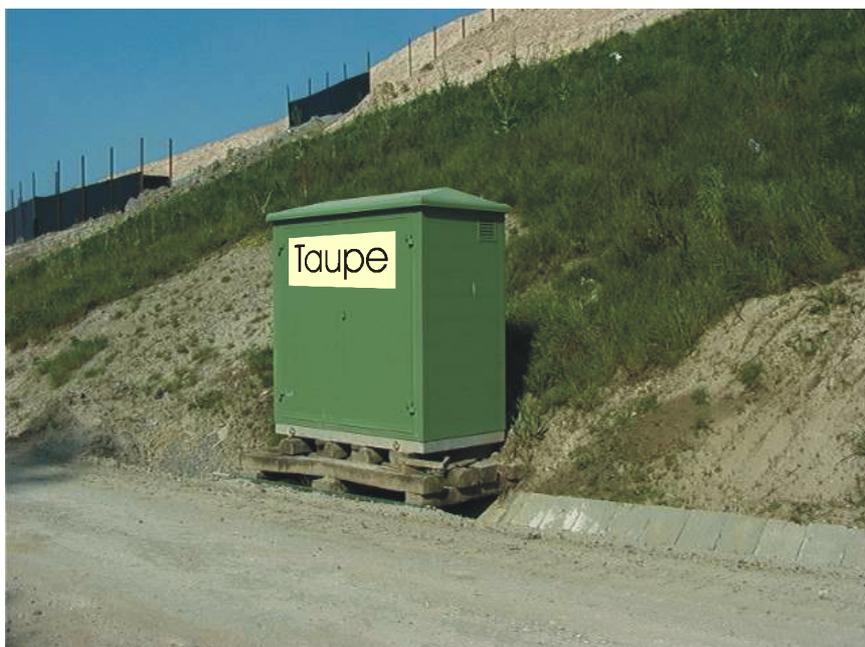


Bild 8: Meßkabine auf der Deponie Karlsruhe-West

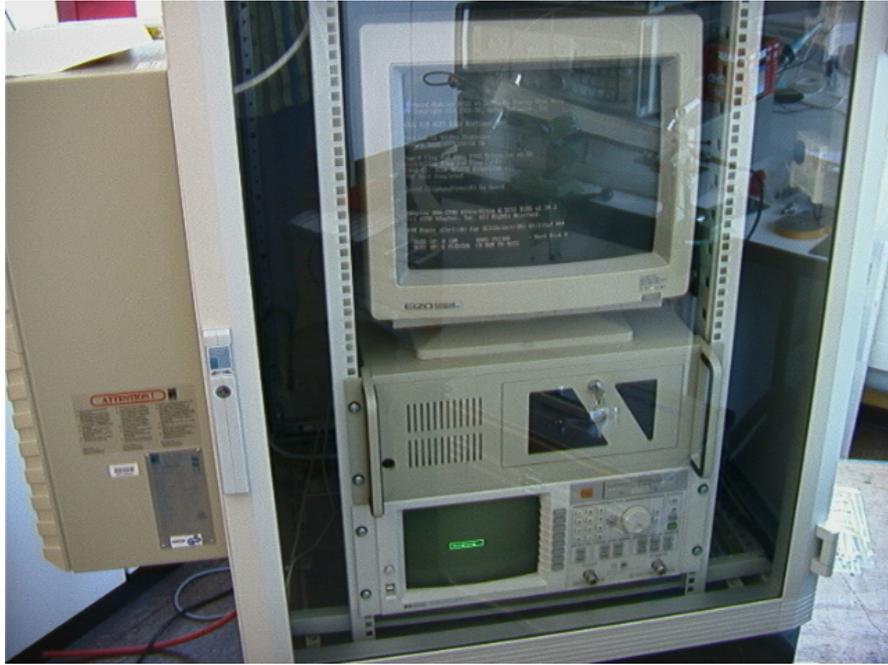


Bild 9: Steuerrechner und Meßelektronik in der Meßkabine auf der Deponie Karlsruhe-West

Die Messungen werden automatisch in wählbaren Zeitabständen vorgenommen. Aktuelle und zurückliegende Meßergebnisse können vor Ort visualisiert werden (z.B. Zeitreihen für die Feuchtentwicklung). Das gesamte Meßsystem ist für die rauen Umgebungsbedingungen des Deponiebetriebs ausgelegt.

3.1.3 Meßergebnisse

Der automatische Meßbetrieb mit *TAUPE* wurde am 27.7.1998 aufgenommen. In der Probephase bis Ende Februar 1999 wurden die Software zur Steuerung und die Auswertalgorithmen ausgetestet und verbessert. Die Meßfrequenz wurde auf 4 Messungen pro Tag erhöht. Bisher arbeitet das System störungsfrei. Ein typisches Meßergebnis ist in Bild 10 zu erkennen. Es zeigt den zeitlichen Verlauf des Wassergehalts für die Meßkabel in der Mitte der MA (bezeichnet mit L17 bis L32).

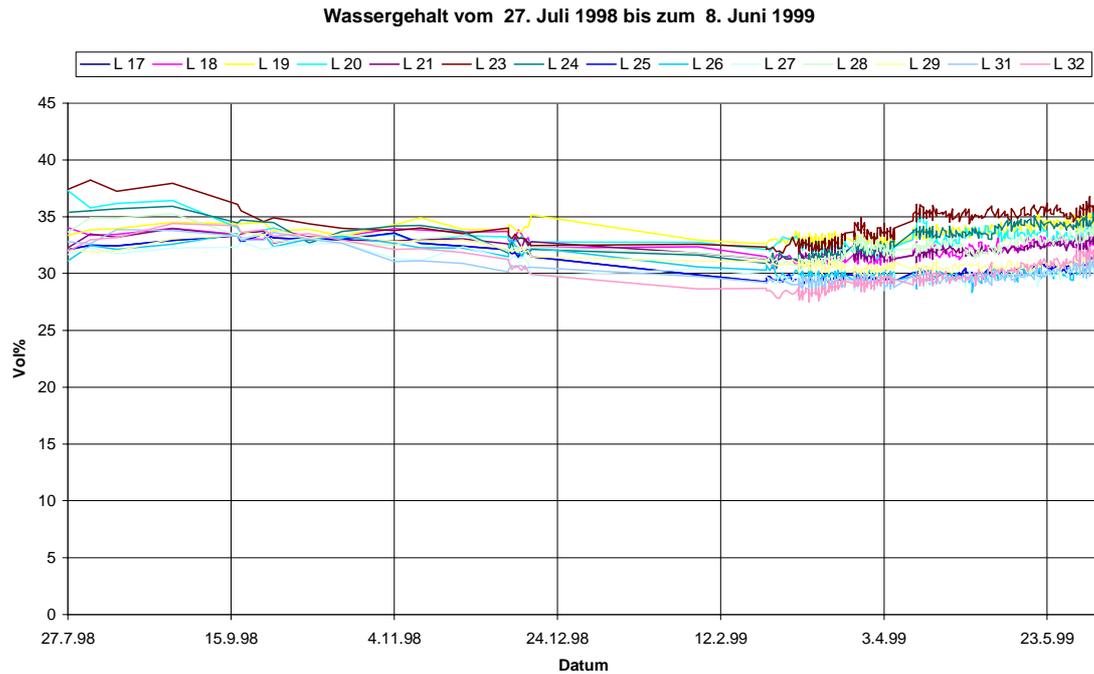


Bild 10: Wassergehaltsganglinien in der Mitte der MA. Ab Ende Februar 1999 wurde die Meßfrequenz auf 4 Messungen pro Tag erhöht (der etwas unruhigere Kurvenverlauf zeigt die statistischen Schwankungen von Messung zu Messung).

Zwischen Juli 1998 und Februar 1999 ist eine leichte Abnahme des Wassergehalts festzustellen. Dieses Verhalten ist von anderen Testfeldern her bekannt. Im Zeitraum danach steigt der Wassergehalt wieder leicht an. Er blieb jedoch während des ganzen Beobachtungszeitraums im Rahmen der zu erwartenden natürlichen Schwankungsbreite. Erst bei einer Unterschreitung des Wassergehalts unter einer von den Bodenfachleuten in Abhängigkeit der Materialeigenschaften angegebenen Grenze besteht Gefahr. So können sich Schrumpfrisse bilden und zu einer Kluftdurchlässigkeit führen. Üblicherweise wird jedoch auf der nassen Proctorseite eingebaut, so daß in Abhängigkeit des Einbauwassergehalts in der Regel eine Sicherheitsreserve vorhanden ist. Innerhalb der relativ kurzen Beobachtungszeit war selbstverständlich nicht mit einer Schädigung des Abdichtungssystems zu rechnen. Das Langzeitverhalten kann jedoch nur durch die regelmäßige Kontrolle mit *TAUPE* beurteilt werden. Aus Bild 10 erkennt man auch, daß zwischen den einzelnen Kabeln nur geringe Feuchtigkeitsunterschiede ausmacht werden können. Dies deutet darauf hin, daß die MA in der vorgeschriebenen Qualität eingebaut wurde. Die gemessenen Wassergehaltswerte wurden durch Aufgrabungen mit Bodenprobenahme (Fremdüberwachung) bestätigt. Die Genauigkeit der Feuchtebestimmung mit *TAUPE* liegt danach bei ca. $\pm 1\%$ bezogen auf den

volumetrischen Wassergehalt. Weitere Messungen mit dem ebenfalls am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Bodenfeuchtemeßgerät *LUMBRICUS* bestätigten diese Angabe.

Zur Demonstration der Ortung von Schadstellen mit TAUPE wurde in einem zusätzlichen Versuch eine künstliche Wasserinfiltration in den Flächenfilter durchgeführt. Das Wasser wurde in der Böschung unterhalb des Kabels K42 und oberhalb des Kabels K41 aufgegeben (siehe Bild 3). Man erkennt in den Meßergebnissen (Bild 11) deutlich die Detektion der Zunahme des Wassergehaltes bei Kabel K41, das in Fließrichtung liegt. Das Zeitverhalten des Wassergehaltes spiegelt das langsame Ein- und Ausdringen der Wasserfront in den Meßbereich des Kabels wieder. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann man Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Flächenfilters ziehen. Bei dem oberhalb der Infiltrationsstelle liegenden Kabel K42 ist wie zu erwarten keine Reaktion erfolgt. Der Wassereintritt (Undichtigkeit) konnte also eindeutig detektiert und lokalisiert werden.

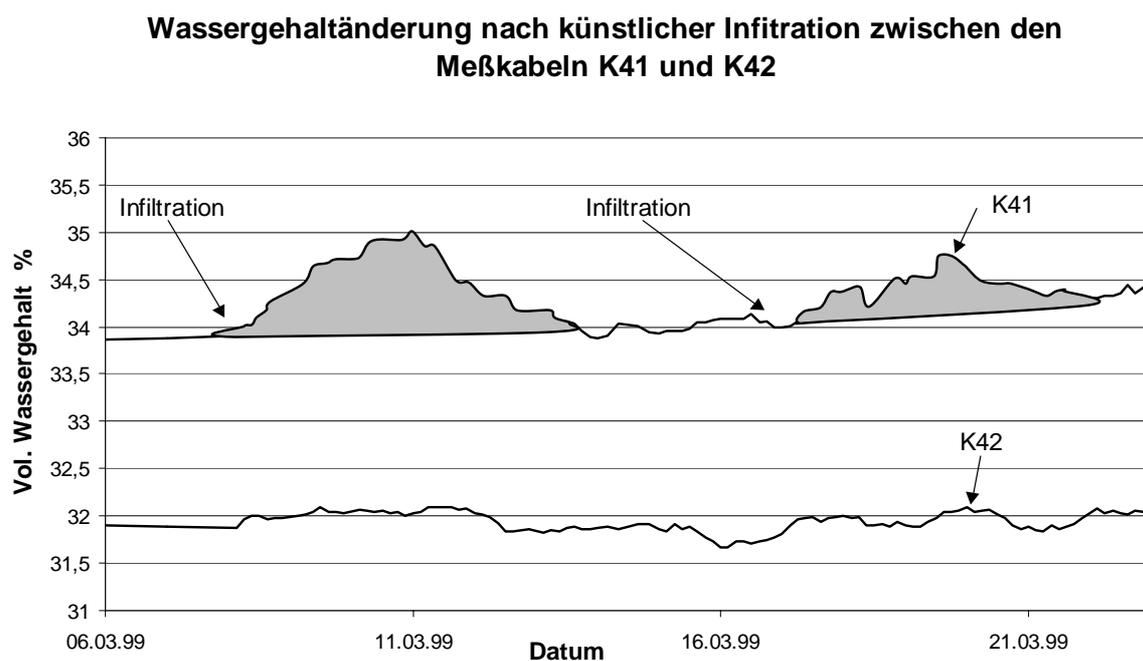


Bild 11: Detektion einer Leckage

3.1.4 Kostenbetrachtung

Aufgrund der Erfahrungen beim Bau des Testfelds errechnen sich spezifische Kosten um etwa DM 8,- / m² und Einbauebene. Bei Verlegung der Sensorkabel auf größeren Flächen ab etwa

2 ha ist eine weitere Kostenreduktion machbar. Für eine Modelldeponie mit 10 ha ergeben sich die Gesamtkosten der Kontrolle über einen Zeitraum von 10 Jahren wie folgt:

Randdaten: -Oberflächenabdichtung 10 ha = 100.000 m²
- Kontrollmessungen (ca. 35.000,- DM/a)
- Kontrollzeitraum bis zum Ende der Deponienachsorge: ca. 30 Jahre

Lieferung und Einbau: 10.000 m² x 4,00 DM/m² (eine Ebene) = 400.000 DM

Messungen: 35.000 DM/a

Kosten(mit Invest)=(35.000 DM / 100.000 m² x 30 Jahre)+ 400.000 DM = 1.450.000 DM

Entspricht 0,48 DM/m² pro Jahr

Diese Kosten sind im Vergleich mit anderen Kontrollverfahren wesentlich niedriger.

3.1.5 Erreichte Ziele

In der Aufgabenstellung zu Beginn des Projekts wurde eine Reihe von Zielen definiert, die nun mit dem Ergebnissen am Projektende verglichen werden:

- Detektion von Wassergehaltsunterschieden von ca. $\pm 3\%$:
TAUPE ist Lage Wassergehaltsunterschiede von sogar $\pm 1\%$ zuverlässig zu detektieren. Diese Genauigkeit ist vorwiegend von der etwas schlechteren relativen Genauigkeit der Dichteerfassung bestimmt, die für die Umrechnung des gemessenen volumetrischen Wassergehalts in den gravimetrischen Wassergehalt notwendig ist.
- Lokalisation dieser Unterschiede auf 6 m genau:
TAUPE hat eine Ortsauflösung von 4 m nachgewiesen.
- Großflächige Messung:
Die Kreuzverlegung ermöglicht eine gute Näherung einer flächigen Messung. Die Verlegung erfolgte auf einer Fläche von 700 m² dreilagig, also auf einer **Gesamtfläche von 2100 m².**

- Die Installation soll eine langzeitige Kontrolle der Dichtheit einer realen Deponieabdichtung einschließlich aller beeinträchtigenden Umstände, wie rauhe Umgebungsbedingungen aber auch z.B. die kostenneutrale Kooperation mit den Baufirmen erlauben:

Die Hardware-Komponenten des Systems, insbesondere die Meßkabel, die Zuleitungskabel und die Kabelverbindungen wurden nach den Empfehlungen der Kabelhersteller, die **langzeitbeständige Erdkabel** seit langer Zeit fertigen und einsetzen, ausgewählt. Die Meßkabel wurde so verlegt, daß sie eine Streckung, die durch Setzen der gesamten Deponieabdichtung zu erwarten ist, aufnehmen können. Ein einzelner, durch Setzungen verursachter Scherriß kann ein Meßkabel zerreißen, die Meßmöglichkeiten an diesem Kabel bleiben jedoch erhalten. Es ist sogar möglich, den Ort der Bruchstelle mit einer Genauigkeit von ca. 0,5 m anzuzeigen. Mehrfache Scherrisse können einen Teil des Kabels von der Messung ausschließen, haben aber keine Folgen für die Messungen an den anderen Kabeln. Die in den vorangegangenen Abschnitten gezeigten Bilder zeigen die Installation auf einer realistischen Deponie. Durch die Installationsarbeiten entstand der Baufirma **kein Zeitverlust**.

- Die Installationskosten sollen nicht mehr als DM 8,- pro m² betragen.

Die Installationskosten betragen DM 8,- pro m² bzw. bei Flächen > 2 ha deutlich weniger.

Die Vorteile von *TAUPE* gegenüber anderen Kontrollsystemen, insbesondere dem GEOLOGGER lassen sich wie folgt zusammenstellen:

- Im Gegensatz zu Ja/Nein-Aussagen bisheriger Kontrollsysteme gibt *TAUPE* den zahlenmäßigen Wassergehalt im Bereich von ca. 3% bis 50% an. Im Online-Betrieb kann man langsame Entwicklungen, die später zu bedrohlichen Situationen führen können, rechtzeitig erkennen und vorbeugende Maßnahmen einleiten.
- Es besteht keine Korrosionsgefahr, da die Meßkabel im Gegensatz zu den auf einer Widerstandsmessung beruhenden Verfahren vollständig von langzeitbeständigem Kunststoff umhüllt sind.
- Die Kosten für den Einsatz von *TAUPE* in Mülldeponien liegt deutlich unter denen anderer Systeme.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kontrollsystem *TAUPE* bietet als einziges System die Möglichkeit sowohl künstliche (Kunststoffdichtungsbahn) als auch geogene (MA) Barrieren zu überwachen. Der technische Einbau und der Betrieb des Systems zeigen sich unproblematisch, wirtschaftlich machbar, robust und zuverlässig. Die Fähigkeiten von *TAUPE* zur genauen Wassergehaltsbestimmung und die Lokalisierung von Leckagen wurden demonstriert. *TAUPE* bietet die Basis für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden, die Länge des Nachsorgezeitraums zu definieren, ohne den Betreibern der Anlagen durch überzogene Vorgaben (Besorgnisprinzip) unzumutbare Kosten aufzubürden.

Die Möglichkeiten von *TAUPE* wurden im Rahmen dieses Projekts noch nicht vollständig ausgenutzt. Durch die Messung des Wassergehalts in 3 Ebenen ist eine lysimeterartige Wasserbilanzierung möglich, mit der man direkt auf die primär interessierende Größe Durchfluß schließen könnte. Die Projektbearbeiter sind bestrebt diesen Ansatz und weitere Ideen in einem Anschlußvorhaben weiterzuentwickeln.

5 Danksagung

Die Ausführenden danken dem Projektrat, insbesondere Herrn Prof. S. Eberle, für die Unterstützung des Vorhabens. Herrn Prof. F. Fiedler danken wir für die Erlaubnis zur Durchführung des Projekts an seinem Institut für Meteorologie und Klimaforschung. Besonderer Dank gebührt der Stadt Karlsruhe und ihren engagierten Mitarbeitern für die Bereitstellung des Testfeldes. Die Unterstützung des Ingenieurbüros Roth & Partner sowie des Lehrstuhls für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe hat maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen.

6 Literatur

Birchak, J. R., Gardner, C. G., Hipp, J. E. and J. M. Victor, 1974, High Dielectric Constant Microwave Probe for Sensing Soil Moisture, Proceedings of the IEEE, 62, 93-98.

Brandelik, A., Hübner, C. und R. Schuhmann, 1995, *Feuchtesensor für Schichten*, Deutsches Patent Nr. 19501196.

Hübner, C., 1999, *Entwicklung hochfrequenter Meßverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung*, Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH).

Hübner, C., Brandelik, A., Wunderle, S. und D. Beppler, 1997, *Ground Truth for Soil and Snow Moisture Sensing*, Proceedings of the 7th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, April 7-11, 1, Balkema, 281-286.

Laine D., L., et al., 1997, *How to locate liner leaks under waste*, Geotechnical Fabrics Report, Vol. 15 No.6.

Priou, A., 1992, *Dielectric Properties of Heterogeneous Materials*, Elsevier.

Rödel A. und M. Arndt, 1997, *Produktexpose des Leckortungssystems GEOLOGGER*, Progeo, Berlin.