

## CALCIUM-BENTONITMATTEN UNTER FEUCHTIGKEITSÄNDERUNGEN

Margit Siegmund

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität, Weimar

Karl Josef Witt

Bauhaus-Universität, Weimar

Newenka Alexiew

Huesker Synthetic GmbH & Co., Gescher

**KURZFASSUNG:** Die Erfüllung der Dichtfunktion einer Bentonitmatte (GTD) wird wesentlich von der globalen hydraulischen Situation im Systemaufbau bestimmt. Durch in-situ Messungen der Feuchteverhältnisse im Abdichtungssystem über mehrere Jahre hinweg lässt sich die Funktion eines Dichtungssystems belegen. Das Verhalten des Dichtungselementes „GTD“ unter extremen hydraulischen Beanspruchungen kann in Laborversuchen nachempfunden werden, ein Prüfverfahren zur laborativen Untersuchung von Bentonitmatten unter wechselnden Feuchteverhältnissen wird vorgestellt. Die Ergebnisse einer Versuchsreihe an einer schweren Calcium-Bentonitmatte werden erläutert. Schwerpunkte sind die Beschreibung des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens über mehrere Trocken- / Nasszyklen hinweg, insbesondere der Einfluss von Trocknungsgrad und Wiederbewässerung auf das Durchlässigkeitsverhalten. Der Wasserhaushalt und die Dichtigkeit einer vergleichbaren Ca-GTD unter Feldbedingungen werden beispielhaft am Lysimetermessfeld der Oberflächenabdichtung einer Thüringer Deponie behandelt. Messungen des Wasserhaushaltes über einen Zeitraum von 3 Jahren belegen eine zuverlässige Funktion dieses alternativen Dichtungssystems. Insbesondere konnten durch das Messfeld die permanente Durchfeuchtung der Bentonitmatte und damit deren Langzeit-Dichtwirkung dokumentiert werden.

### 1 EINLEITUNG

Zur Eignung von Bentonitmatten als Dichtungselement in alternativen Deponieoberflächenabdichtungs- bzw. -abdeckungssystemen wurden in den letzten Jahren an zahlreichen Anwendungsbeispielen Erfahrungen gesammelt. Berichte über den Bau und die Funktionsweise von Versuchsfeldern, über Aufgrabungen und zu Laboruntersuchungen sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene erweitern stetig die Kenntnis über die Dichtwirkung dieses Konstruktionselementes. Die Umsetzung dieses Wissens trägt dazu bei, eine zunehmend präzisere Beschreibung konkreter praktischer Anwendungen vornehmen zu können: die Wichtung von Einwirkungen und Widerständen im Sinne des Sicherheitskonzeptes, die Quantifizierung des Sicherheitsmaßes, aber auch Gleichwertigkeitsnachweise zwischen verschiedenen Systemvarianten.

Zur Beschreibung der Einflußgrößen auf die Dichtwirkung von GTD und zur Modellierung des Systemverhaltens eines Abdichtungssystems wird an dieser Stelle auf Siegmund et al. (1997) verwiesen. Die allgemeine Vorgehensweise im Rahmen der Modellierung von Einwirkungen und Widerständen und deren Wechselwirkungen werden in Abbildung 1 gezeigt.

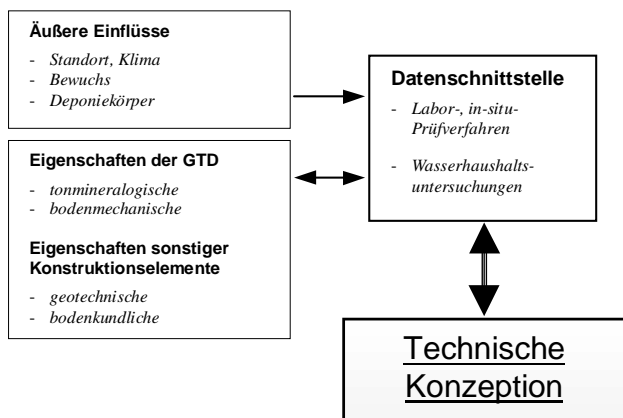


Abbildung 1 Vorgehensweise bei der Modellierung von Einwirkungen und Widerständen

Die hydraulischen Einwirkungen auf das Abdichtungssystem sind neben den Spannungsverhältnissen die wesentliche Einflussgröße. Als unveränderliche Standortbedingungen sind die klimatischen Verhältnisse und die Eigenschaften des Deponiekörpers anzusetzen. Beide Randbedingungen sind im Modell möglichst realistisch abzubilden.

Im Entwurfsprozess beeinflussbare Größen sind die technische Konzeption des Abdichtungssystems und damit auch die Eigenschaften der GTD. Als Beispiel für eine derartig funktionelle Gestaltung wird im Beitrag eine Bentonitmatte mit Calcium-Bentonit (Ca-GTD) beschrieben, die Teil eines auf den Standort abgestimmten alternativen Oberflächenabdichtungssystems ist. Schwerpunkte liegen hierbei in der Felduntersuchung der wechselnden Feuchteverhältnisse im Dichtungssystem und in der Beschreibung des Verhaltens einer Ca-GTD in extremen Austrocknungszyklen anhand von Laborversuchen.

### 2 UNTERSUCHUNGEN AN CA-GTD IN TROCKEN-NASS-ZYKLEN

#### 2.1 Ziel der Laborversuche

Austrocknungserscheinungen bei klassischen Tondichtungen und bei gering überdeckten Bentonitmatten, festgestellt in den letzten Jahren an Deponieoberflächen und Testfeldern (Henken-Mellies (2000); Herold (1997); Melchior (1993), (1996), (1999)), haben z. T. eine wesentliche Störung in der Dichtfunktion durch bleibende Schrumpfrisse verursacht. Deshalb ist es erforderlich, bei dünn-schichtigen alternativen Abdichtungen wie GTD Klarheit in bezug auf ihr Verhalten bei starken Wassergehaltsänderungen zu schaffen. Dies ist besonders bei der Einführung neuer Produkte oder bei Weiterentwicklungen wichtig, wie sie im konkreten Fall vorliegen. Es liegt nahe, im Labor diese Effekte unter definierten, reproduzierbaren feld-ähnlichen Bedingungen zu testen.

Im vorgestellten Versuch wird das Austrocknungs- und Durchlässigkeitsverhalten einer GTD mit Calcium-Bentonit im Laufe von mehreren Trocken- Nass- Zyklen detailliert aufgezeichnet und die Wirkungsweise der GTD unter immer

intensiveren Austrocknungsphasen über die Schwelle der ersten Rißbildung hinaus untersucht.

Eine naturnahe Simulation der Prozesse wurde bei der Versuchsdurchführung durch allmählich eintretende und langsam ablaufende Phasen von Trocknen, Befeuchten und Aufbringen der vorgegebenen Wassersäule erreicht.

Die untersuchte GTD NaBento® RL-C zeichnet sich durch eine große Flächenmasse von ca. 10000 g/m<sup>2</sup> Calcium-Bentonit aus. Das Bentonit ist zwischen zwei Gewebe-Lagen eingeschlossen, die mit einer Rauigkeitsschicht ausgerüstet sind. Der Scherverbund der GTD-Komponenten wird durch Vernähung in engen Abständen gewährleistet. Bei dem Ca-Bentonit wird die Ionenbelegung der Montmorillonit-Kristalle von Ca-Ionen dominiert. Somit ist ein Ionenaustausch mit Änderung der Bentonit-Ionenbelegung und Verschlechterung der Eigenschaften, wie dies bei Na-Bentoniten unter Zufuhr von Ca-Ionen bekannt ist, praktisch nicht möglich. Auf diese Weise wird zudem die ungünstige Überlagerung von Ionenaustausch und Austrocknung (Alexiew (1999), (2000); Dobras und Elzea (1993); James et al. (1997)) vermieden, die bei spärlich überdeckten Na-GTD stattfinden und zu einer starken Abnahme der Dichtigkeit führen kann. Die große Bentonitmasse, die die etwas höhere Wasserdurchlässigkeit des Ca-Bentonits kompensiert, gewährleistet auch eine bessere Pufferwirkung der dickeren Bentonitschicht gegen äußere Einwirkungen.

## 2.2 Beschreibung der Versuchstechnik

Die Versuchsreihe zur Untersuchung des Verhaltens der Ca-GTD unter Austrocknungsbedingungen wurde in den an der MFFPA Weimar entwickelten GTD-Prüfzellen (Festwandzellen) durchgeführt. In Abbildung 2-1 ist die schematische Darstellung dieser Prüfeinrichtung skizziert. Abbildung 2-2 zeigt ein Foto eines Versuchsaufbaus. Die Festwandzelle hat einen Innendurchmesser von 190 mm, das entspricht einer wirksamen Prüffläche von 283,5 cm<sup>2</sup>.

Die GTD-Prüftöpfe eignen sich sowohl für Bestimmungen der Wasserdurchlässigkeit nach E DIN 60500-4 (1997-02), für Austrocknungsversuche als auch zur Simulation des Verhaltens verschiedener mineralischer und/oder geosynthetischer Aufbauten.

Das Kernstück der Festwandzelle ist ein zwischen Fuß- und Kopfplatte eingespanntes Plexiglasrohr mit Flansch. Durch die Einspannung des geosynthetischen Prüflings in diesem Flansch sind etwaige Randumläufigkeiten im Versuch ausgeschlossen. Die unmittelbaren Auflager- und Deckschichten des Prüflings werden je nach Anforderung des speziellen Anwendungsfalles gestaltet.

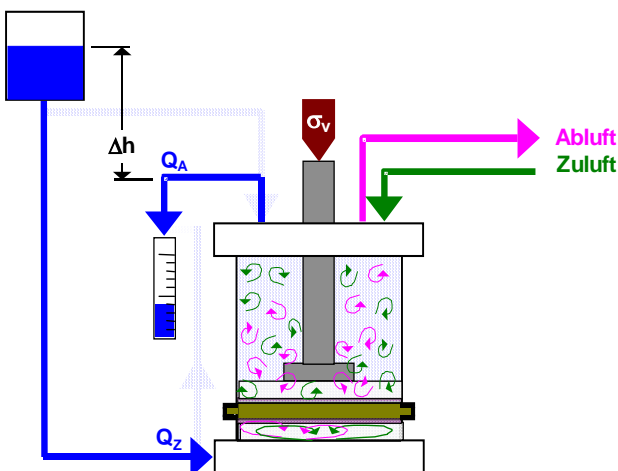


Abbildung 2-1 Schematische Darstellung der Festwandzelle zur Simulation von Trocken-Nass-Zyklen-



Abbildung 2-2 Foto des Versuchsaufbaus

Die statische Auflast wird über einen durch die Kopfplatte geführten pneumatischen Druckstempel aufgebracht. Gelochte Plexiglasplatten ober- und unterhalb des zu prüfenden Aufbaus sorgen für eine gleichmäßige Lastverteilung auf den Prüfling.

Die Trocknung mit zirkulierender Luft oder die Durchströmung mit Wasser werden durch unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten in der Kopf- bzw. Fußplatte realisiert.

## 2.3 Versuchsdurchführung

Der wesentliche Anspruch an die Untersuchungen bestand in der möglichst realistischen Abbildung der unter Feldbedingungen auf die GTD einer Oberflächenabdichtung einwirkenden Größen. Mit den GTD-Prüfzellen ist es möglich, nahezu alle maßgebenden Beanspruchungsfälle von Bentonit-matten in Oberflächenabdichtungssystemen zu simulieren:

- Nachbildung der in-situ Lagerungsbedingungen der GTD im Schichtpaket des Dichtungssystems.
- Bestimmung der Permittivität unter den im Abdichtungssystem herrschenden statischen Auflasten und hydraulischen Gradienten.
- Trocknung der gequollenen GTD unter Auflast durch Luftzufuhr an der Oberseite bis auf einen beliebigen vorgegebenen Wassergehalt.
- Ermittlung des Austrocknungsgrades ohne Ausbau der Proben.
- Einleitung und Durchführung der Permittivitätsprüfung nach dem Trocknen durch sukzessiven Wasseraufstau direkt auf den Prüfling.
- Wiederholung mehrerer „Trocken-Nass-Zyklen“ von beliebiger Intensität.

Mit einer Einspannung der Ränder des Prüflings in der Wand der Versuchseinrichtung wurde der aus Auflast und elastischer Bettung resultierende Spannungszustand in Verbindung mit den bei wechselndem Feuchtedargebot möglichen Quell- und Schrumpfvorgängen unter Ausschluss von Randumläufigkeiten berücksichtigt.

Die hier beschriebenen Versuche wurden unter einer statischen Auflast von 15 kN/m<sup>2</sup> durchgeführt, was einer Überdeckung von etwa 0,75 – 1,0 m Mächtigkeit entspricht. Die Prüflinge verblieben über den gesamten Versuchsablauf von 5 Trocken-Nass-Zyklen in der Prüfeinrichtung unter der vorgegebenen statischen Belastung eingebaut. Als Grundlage für

die Festlegung des hydraulischen Gradienten diente die Annahme eines Wasseraufstaus auf der GTD in Höhe von 0,30 m bis 0,40 m.

Zur Trocknung wurde der Festwandzelle Raumluft in kontinuierlichem Volumenstrom zugeführt. Der mit einem Gebläse erzeugte Luftstrom wird hierzu über eine Öffnung in der Kopfplatte in die Prüfwelle eingeleitet. Ein spezieller Verteiler führt den Luftstrom bis in eine Höhe von ca. 5 cm über den Prüfling heran und sorgt für eine seitliche und gleichmäßige Verteilung des Luftstroms. Die mit Feuchtigkeit angereicherte Luft kann über weitere Öffnungen in der Kopfplatte entweichen.

Das Eintreten eines Regenereignisses nach einer Trockenphase wird mit dem Bewässerungsregime simuliert. Zum Befeuchten wurde hierbei die für eine hydraulische Auflast von  $\Delta h = 3$  cm erforderliche Wassermenge zugegeben. In den folgenden Tagen wurde die Wasserzugabe wiederholt und der Aufstau schrittweise bis auf 30 cm Wassersäule erhöht.

Für die Permittivitätsprüfung wurde in allen Zyklen deionisiertes Wasser verwendet. Die Permittivitätsbestimmungen am fabrikneuen Material und nach der ersten Trocknung wurden in Anlehnung an E DIN 60500-4 (1997-02) bei Durchströmung des Prüflings von unten nach oben durchgeführt. Im Hinblick auf die Simulation feldähnlicher Bedingungen wurde im weiteren Versuchsablauf ab der zweiten Trocknung eine Durchströmung nur mit dem Wasseraufstau bewirkt, so dass sich eine Durchsickerung von oben nach unten einstellte. Damit wurde zumindest in der Anfangsphase der Prüfung ein ungesättigter Zustand im Bentonit berücksichtigt. Eine Vergleichsmessung beider Prüfbedingungen zeigte bei Durchströmung von oben nach unten eine Erhöhung der Permittivität um den Faktor 4 (siehe Tabelle 2-1).

#### 2.4 Versuchsergebnisse

Die Versuchsreihe an 3 Prüflingen erstreckte sich über 5 Trocken-Nass-Zyklen. Abschließend wurde nur an 2 Prüflingen die Permittivität bestimmt. Der 3. Prüfling wurde nach dem fünften Trocknen bei einem Wassergehalt von nur 21 % im Bentonit ausgebaut und untersucht. Die extreme Rissbildung im Bentonit ist in Abbildung 2-3 zu erkennen. Weiteren Aufschluss über die Entwicklung von Rissen geben die Röntgenbilder der Prüflinge, die nach jedem Trocknungszyklus angefertigt wurden. Im ersten Trocknungszyklus wurde zusätzlich die Entstehung von Rissen in einzelnen Trocknungsschritten verfolgt. Dabei konnten erste Risse bei Wassergehalten im Bentonit zwischen 82 und 86 % beobachtet werden.

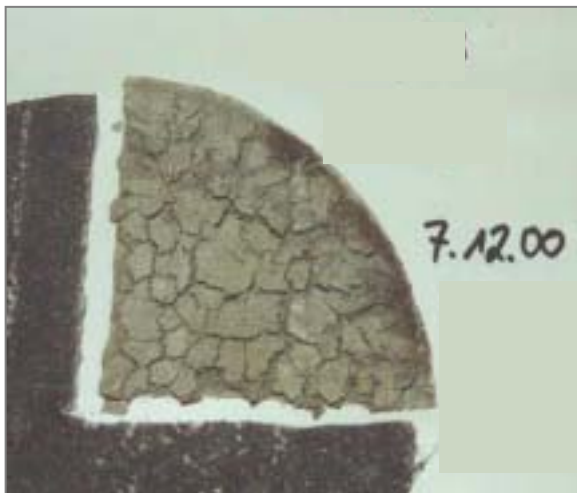


Abbildung 2-3 Rissbildung im Bentonit der Ca-GTD bei einem Wassergehalt  $w = 21$  %

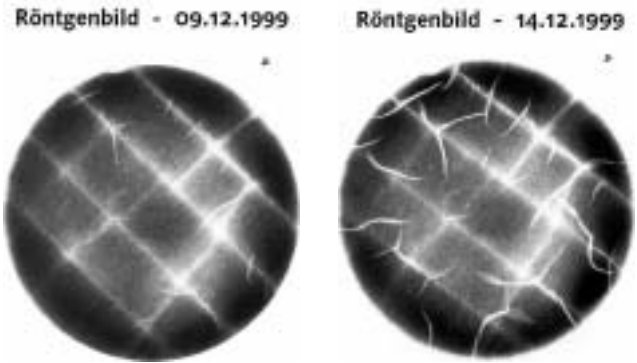


Abbildung 2-4 Röntgenaufnahmen der Ca-GTD nach Trocknung

Tabelle 2-1 Trocknungswassergehalte und Permittivitäten

	Prüfling 1	Prüfling 2	Mittelwert	$P_n / P_0$
fabrikneue GTD				
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_0^*$	9,7E-09	8,8E-09	9,3E-09	1
1. Trocknung				
Bentonitwassergehalt $w$ %	71	81		
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_1^*$	1,4E-09	1,8E-09	1,6E-09	0,2
2. Trocknung				
Bentonitwassergehalt $w$ %	61	35		
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_2^*$	1,6E-09			
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_2$	6,6E-09	5,9E-09	6,3E-09	0,7
3. Trocknung				
Bentonitwassergehalt $w$ %	32	22		
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_3$	4,6E-09	6,0E-09	5,3E-09	0,6
4. Trocknung				
Bentonitwassergehalt $w$ %	35	18		
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_4$	2,4E-08	2,6E-08	2,5E-08	2,7
5. Trocknung				
Bentonitwassergehalt $w$ %	22	22		
Permittivität $\psi_{10}$ [1/s] $P_5$	3,8E-08	4,4E-08	4,1E-08	4,4

\* Durchströmung von unten nach oben

In Abbildung 2-4 ist die sich in Abhängigkeit der Trocknung einstellende Rissbildung zu erkennen. Das Bentonit hatte am 09.12.1999 einen Wassergehalt von  $w = 82$  %, am 14.12.1999 von  $w = 73$  %. Die Risse im rechten Bild sind im Gegensatz zum optischen Eindruck sehr fein, die im Röntgenbild sichtbare Breite rührt von einem schrägen Verlauf der Risse durch den Querschnitt der GTD. Die weitere Entwicklung des Rissbildes im Verlauf der Trockenphasen vollzieht sich von einer relativ gleichmäßigen, feinen Struktur bei etwa 70 % Wassergehalt (Abb. 2-4 rechts) bis hin zu einem engmaschigen Netz breiter Risse mit feinen Verästelungen unterhalb von 30 % Wassergehalt im Bentonit.

Der zeitliche Versuchsablauf mit den Ergebnissen der Permittivitätsprüfungen und den Wassergehalten in den Trocknungsphasen ist am Beispiel des Prüflings 1 in Abbildung 2-5 dargestellt. Die Abbildungen 2-6 und 2-7 zeigen als Detail das Verhalten der Prüflinge beim Wiederbefeuchten nach dem 2. bzw. 5. Trocknungszyklus. In Tabelle 2-1 sind die Wassergehalte am Ende des jeweiligen Trocknungszyklus und die daraufhin erreichte Permittivität zusammengefasst. Es fällt auf, daß die Permittivität nach dem ersten bis dritten Trocknungszyklus niedriger ist als die des fabrikneuen Materials. Es ist nicht auszuschließen, dass das eingesetzte deionisierte Wasser eine Abnahme der Konzentration der Porenlösung verursacht hat. Über ähnliche Effekte auf die Plastizitätszahl von Na-Bentonit wird in Lin und Benson (2000) berichtet.

Bei Einleitung der Permittivitätsprüfung nach dem ersten und zweiten Trocknungszyklus trat eine Durchsickerung der Prüflinge erst auf, nachdem innerhalb von 3 Tagen ein Wasseraufstau von  $\Delta h = 30$  cm aufgebracht war; dies gilt auch für den bereits im 2. Zyklus auf 35 % getrockneten Prüfling.

Nach der 3. bis 5. Trocknung war, im Vergleich zum 1. und 2. Trocknungszyklus, ein längerer Abschnitt bis zur Beaufschlagung mit der maximalen hydraulischen Auflast erforderlich.

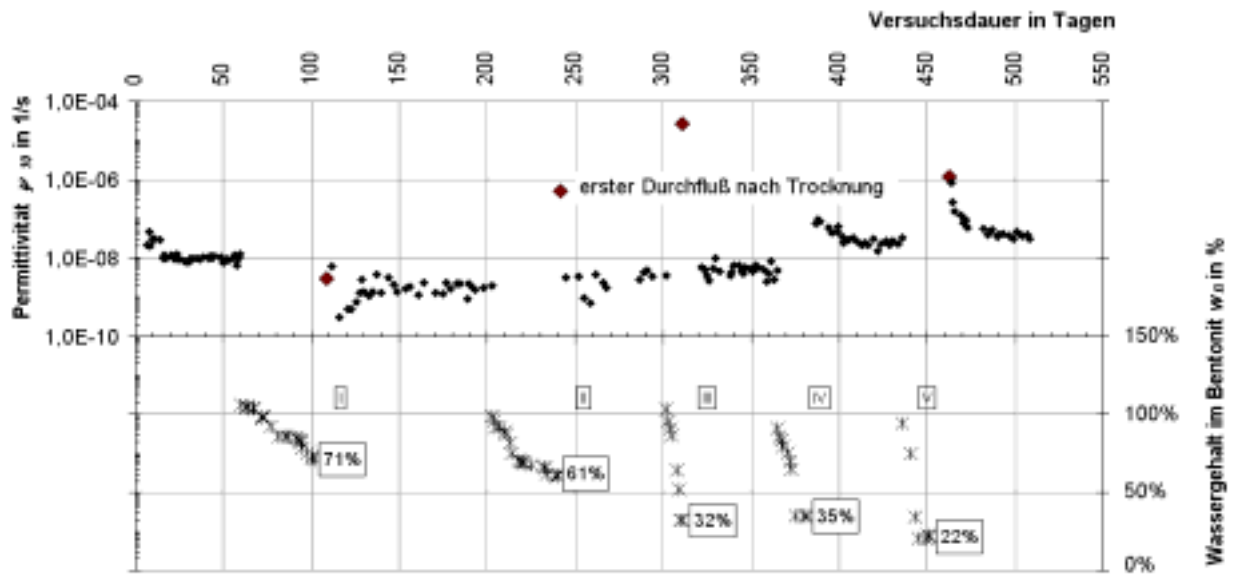


Abbildung 2-5 Versuchsablauf Prüfling 1

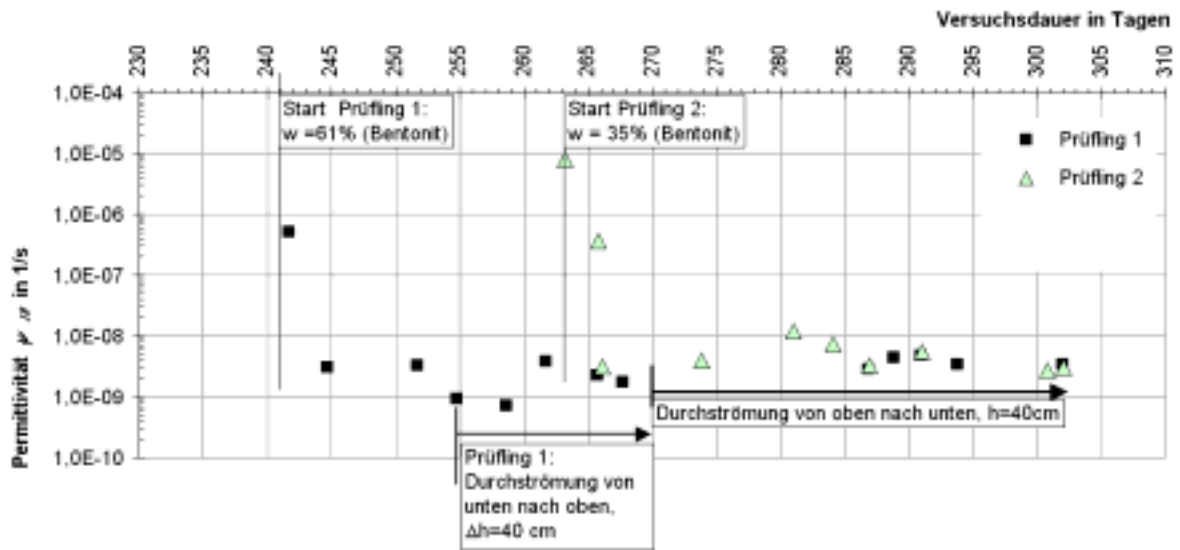


Abbildung 2-6 Permittivitätsprüfung nach 2. Trockenzyklus

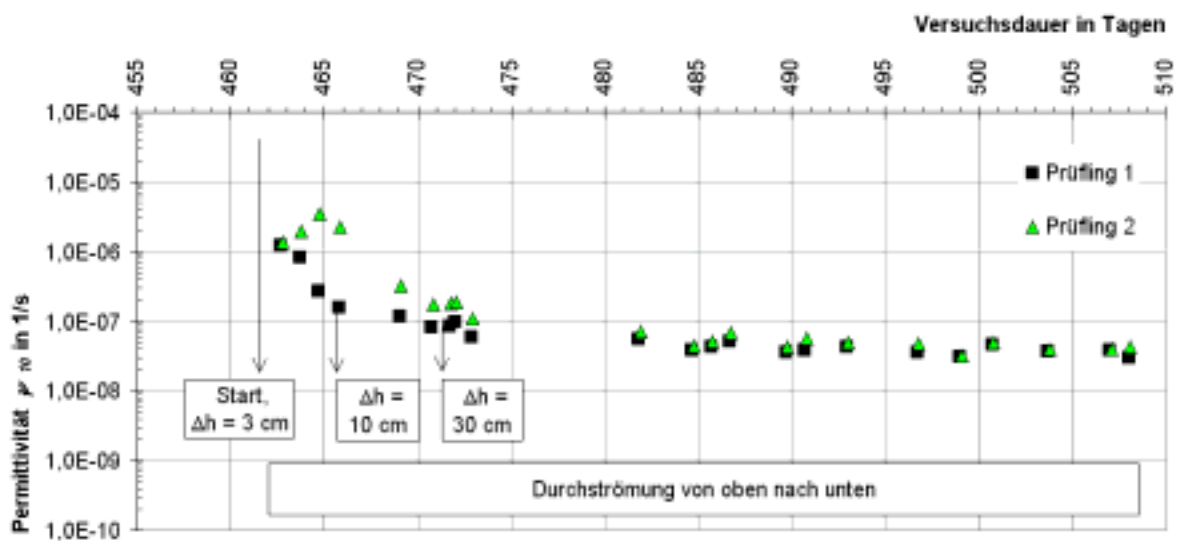


Abbildung 2-7 Permittivitätsprüfung nach 5. Trockenzyklus

Die ersten Messpunkte nach Wiederbewässerung stellen keine Permittivität im eigentlichen Sinne dar, sondern sind durch Regenerierungseffekte im Bentonit beeinflusst. Eine weitere schrittweise Erhöhung der hydraulischen Druckhöhe war jedoch selbst nach der extremen 5. Trocknung problemlos möglich. In der Darstellung der Anfangsphase der Permittivitätsprüfungen nach dem 4. und 5. Trocknungszyklus ist das Selbstheilungsvermögen des Bentonites zu erkennen (Abbildung 2-5).

Als Ergebnis der Versuchsreihe lässt sich feststellen, daß die Ca-Bentonitmatte nach jedem der 5 Trockenzyklen, die bis auf einen Wassergehalt von  $w = 22\%$  gefahren wurden, ihre Funktion erhalten konnte. Die sich nach einer Regenerierungsphase einstellenden Permittivitäten weichen in ihrer Größenordnung nur wenig vom Ausgangswert der fabrikkneuen Ca-GTD ab. Nach Trocknungsphasen, die zum Schluss einen Wassergehalt von  $w = 22\%$  im Bentonit erreichten, wiesen die Prüflinge nach 5 Trockenzyklen im Vergleich zum Ausgangswert 4- bis 5fach größere Permittivitäten auf. Bei Ansatz der konkreten Werte und der Probendicken nach dem Versuchsende entspricht dies einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  der Prüflinge von  $k = 5,5 \cdot 10^{-10}$  bzw.  $k = 6,6 \cdot 10^{-10}$  m/s.

### 3 FELDUNTERSUCHUNG

#### 3.1 Lysimetermessfeld

Die Hausmülldeponie Mengersgereuth-Hämmern, Landkreis Sonneberg, wurde im 1. Schließungsabschnitt 1997 mit einer alternativen Oberflächenabdichtung auf der Grundlage einer Planung der Jena GEOS GmbH rekultiviert. Der Standort liegt im Thüringer Wald, die Höhe beträgt ca. 850 m ü. NN. Der Regelaufbau des Systems ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Kennzeichnend für den Aufbau ist die Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht unter Verwendung der im Umfeld anstehenden Böden. Damit konnte erreicht werden, dass sich die rekultivierte Fläche durch den entstehenden Bewuchs, einen Trockenrasen, in die natürliche Umgebung integriert. Für die Funktion des Aufbaus ist besonders die Drainageschicht cC2 aus Kalkschotter und die darunter folgende Wasserspeicherschicht cC3 hervorzuheben, die aus einer Lage schwach schluffigem Sand besteht. Diese Schicht hat neben der mechanischen Schutzwirkung die Aufgabe, eine möglichst gleichmäßige Durchfeuchtung der GTD zu garantieren, also eine Entkoppelung der Wasserhaushaltsschwankungen von den darüber liegenden Schichten. Da bei den im Aufbau verwendeten Redzina-Böden mit einer Entkalkung und somit mit Ca-Ionen im Sickerwasser zu rechnen ist, wurde gezielt eine GTD mit Ca-Bentonit als Dichtungselement gewählt. Es handelt sich um die Bentonitmatte CAN 8000 der Firma HUESKER Synthetic, ein Vorläuferprodukt der im Labor getesteten Bentonitmatte NaBento<sup>®</sup>RL-C.

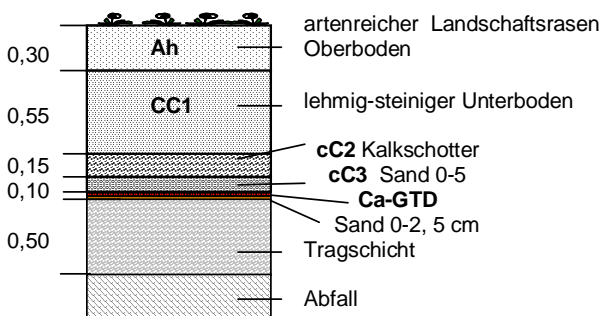


Abbildung 3-1 Aufbau der Oberflächenabdichtung

Der Aufbau des Abdichtungssystems wurde durch Simulationsrechnung mit dem HELP-Modell des EPA optimiert. Dabei wurde eine mittlere globale Durchsickerungsrate von  $q = 5 \cdot 10^{-10}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/s angestrebt, was bei permanentem Einstau der GTD einer Jahreseinsickerung von 15,8 mm entspricht. Zur Verifizierung der prognostizierten Daten des Wasserhaushaltes, insbesondere der Durchsickerungsrate und der Wasserhaushaltsbedingungen in der Wasserspeicherschicht cC3, beauftragte das Landratsamt Sonneberg den Bau eines Lysimetermessfeldes. Das im November 1997 in Betrieb genommene Messfeld hat eine Grundfläche von 9,6 x 23,5 m. Es ist auf einem 1:3 geneigten Abschnitt in das Abdichtungssystem der Deponieoberfläche integriert. Im Jahre 1998 wurde das Messfeld im Auftrag der Firma HUESKER Synthetic um weitere Messsonden ergänzt. Zur permanenten Überwachung des Wasserhaushaltes wurden in unterschiedlichen Tiefen Tensiometer (teils mit Temperaturmessung) und FDR-Sonden mit automatischer Datenerfassung eingebaut. Die Abbildung 3-2 zeigt eine Lageskizze, aus der die Anordnung der Messtechnik zu entnehmen ist. Ein Regelquerschnitt des bergseitigen Teils des Messfeldes ist ebenfalls dieser Abbildung zu entnehmen.

Die Durchsickerung wurde über eine unterlagernde Kunststoffdichtungsbahn erfasst. Der Oberflächenabfluss wurde mittels Kippzähler ermittelt. Weitere Messgrößen waren die Klimadaten einschließlich Globalstrahlung, Windstärke und Windrichtung. Details zum Aufbau, bodenkundliche und bodenmechanische Daten der einzelnen Schichten sowie Erläuterungen zur Simulationsrechnung sind Mühlfriedel (2001) zu entnehmen.

#### 3.2 Meßergebnisse

Im Rahmen dieses Beitrages sollen nur einige Zusammenhänge vorgestellt werden, die für das Feuchteverhalten der Ca-GTD unmittelbar relevant sind. Der Auswertung liegen die Daten der kontinuierlichen Messungen des Zeitraums von 1998 bis 2000 zugrunde. Die klimatischen Verhältnisse in diesem Messzeitraum werden hinsichtlich der Temperatur und der Globalstrahlung als mittelfristig durchschnittlich angesehen. Der Jahresniederschlag lag 1998 deutlich über dem Durchschnitt, während der Standort im Jahre 1999 außergewöhnlich wenig Niederschläge hatte (vgl. Tabelle 3-1).

Als summarisches Ergebnis zeigt Abbildung 3-3 die Ganglinien von Niederschlag (N) und Durchsickerung (D).

Tabelle 3-1 Jahreswerte Niederschlag (N) und Durchsickerung (D)

Parameter	1998	1999	2000
Niederschlag [mm]	1190	634	822
Durchsickerung absolut [l/m <sup>2</sup> ]	3,64	4,90	5,28
relativ zu N [%]	0,31	0,77	0,64
Durchflussrate [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s]	$1,15 \cdot 10^{-10}$	$1,55 \cdot 10^{-10}$	$1,67 \cdot 10^{-10}$

Während der Niederschlag saisonaltypisch relativ konstant verteilt ist, findet eine Durchsickerung nur sporadisch mit Spitzen in der vegetationsfreien Zeit statt. Die summierten Jahresmittel sind in Tabelle 3-1 angegeben. Die Durchsickerungen des ersten Jahres sind zwangsläufig durch Anlauf- bzw. Sättigungseffekte nach der Bauphase beeinflusst.

Die Feld-Permittivität der GTD wurde für die Phasen der Durchsickerung berechnet. Dabei wurde eine Sättigung der Wasserspeicherschicht ( $\Delta h = 10$  cm) und eine Dicke der GTD von  $d = 15$  mm angenommen. Die Rückrechnung führt auf eine mittlere Permittivität von  $\psi_{10} = 1,3 \cdot 10^{-8}$  l/s, was einer Wasserdurchlässigkeit von  $k_{10} = 2 \cdot 10^{-10}$  m/s entspricht.

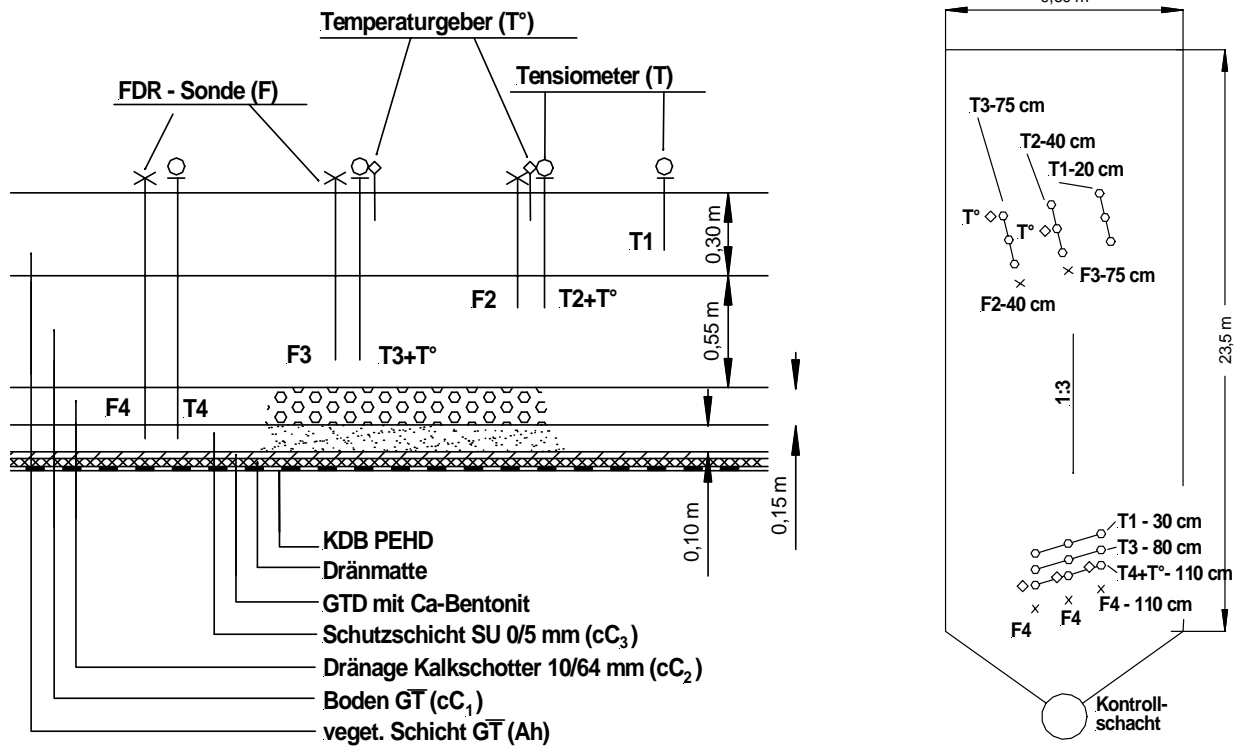


Abbildung 3-2 Lysimetermessfeld: Lageplan und Systemschnitt mit messtechnischer Instrumentierung

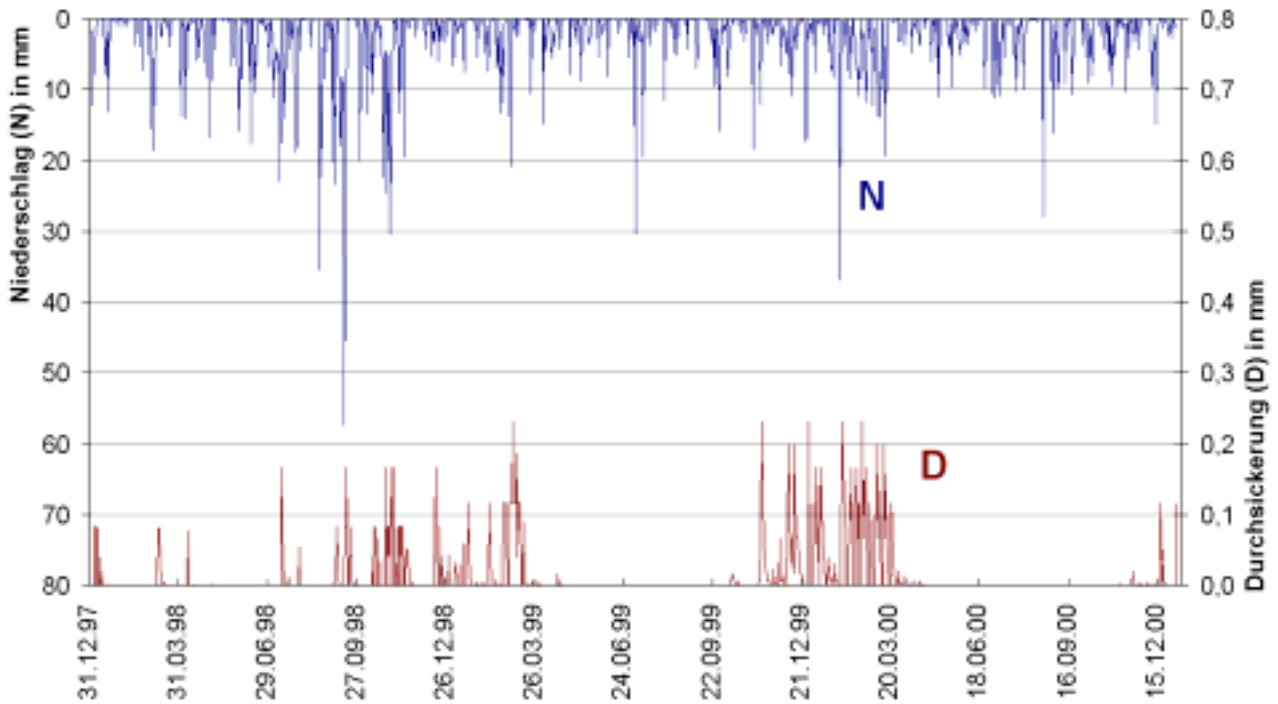


Abbildung 3-3 Niederschlag (N) und Durchsickerung (D) durch die Ca-GTD

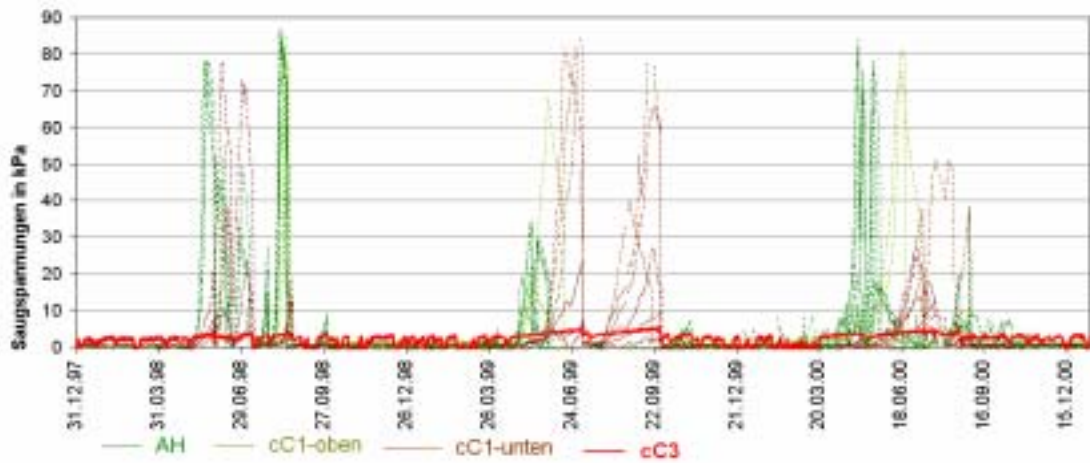


Abbildung 3-4 Verlauf der Saugspannungen im Gesamtaufbau des Lysimetermessfeldes

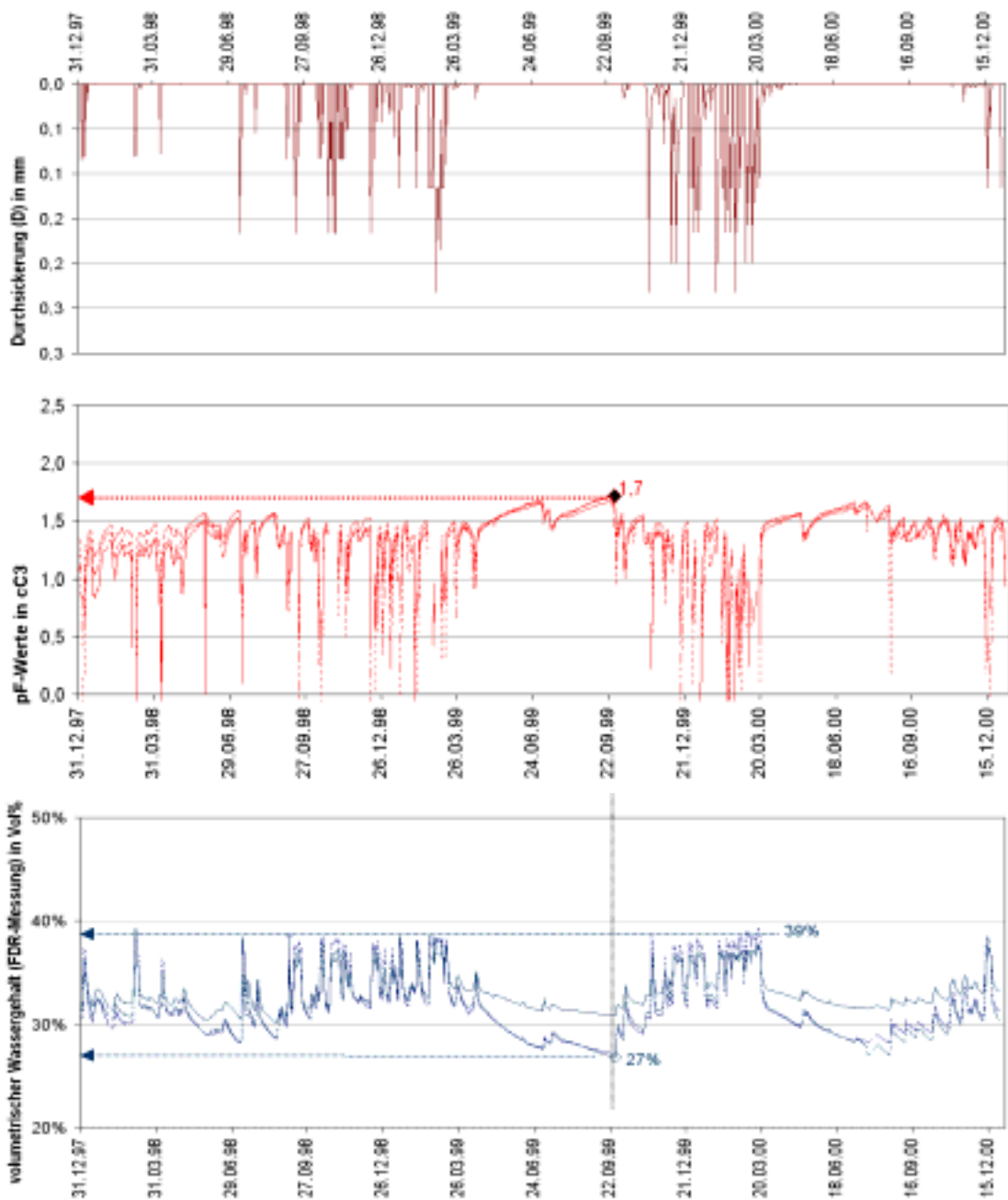


Abbildung 3-5 Durchsickerungen, pF-Werte und volumetrische Wassergehalte in der Schicht cC3

Schwerpunkt des hier behandelten Themas ist die Frage nach der Wirksamkeit der Wasserspeicherschicht bzw. der Austrocknungsgefahr der GTD. Abbildung 3-4 zeigt den Verlauf der mit den Tensiometern gemessenen Saugspannungen in unterschiedlichen Tiefen des Aufbaus. Während im Oberboden und in der Wasserhaushaltsschicht cC1 deutliche Spannungsspitzen in den Sommermonaten zu verzeichnen sind, verläuft die Saugspannung in der Wasserspeicherschicht cC3 wesentlich gleichmäßiger mit geringen Amplituden. Neben den bodenkundlichen Eigenschaften ist dies insbesondere auf die entkoppelnde Wirkung der Schotterdränage cC2 zurückzuführen. Die Trennfunktion dieser Schicht zeigte sich auch in dem hier nicht dargestellten Temperaturprofil. Die Temperatur folgt in der Wasserspeicherschicht cC3 nur träge der sich rasch ändernden Lufttemperatur und Globalstrahlung und verläuft in einer flachen Kurve mit den Extrema 12°C (Februar) und 30°C (Juli-August).

In der GTD selbst konnten im Feld weder die Wasserspannungen noch die Wassergehalte zerstörungsfrei und kontinuierlich gemessen werden. In Elementversuchen wurde daher im Labor nachgewiesen, dass die Bentonitmatte kein Wasser abgibt, solange die darüber liegende Wasserspeicherschicht nicht unter die Feldkapazität entwässert. In Mühlfriedel (2001) wurde dieser Grenzwassergehalt in der Schicht cC3 zu ca.  $w = 15\%$  ( $pF=1,8$ ) ermittelt. Kritische Zustände, d.h. ein Trocknen der Bentonitmatte auf Wassergehalte  $w < 100\%$ , treten erst bei einem betragsmäßig deutlich höheren Matrixpotenzial in der Speicherschicht auf.

In Abbildung 3-5 sind der mit den Tensiometern gemessene  $pF$ -Verlauf in der Wasserspeicherschicht cC3, die Durchsickerung und der aus den Messungen der FDR-Sonden berechnete volumetrische Wassergehalt dieser Schicht über den Messzeitraum aufgetragen. Die Ganglinien belegen, dass zu keinem Zeitpunkt, auch nicht in Zeiten extremer Trockenheit, die Speicherschicht unter die Feldkapazität entwässert. Vielmehr schwankt der Wassergehalt saisonal zwischen Vollsättigung in den vegetationsfreien Wintermonaten und einem Sättigungsgrad  $S_R > 85\%$  bei länger andauernder sommerlicher Trockenheit. Als Minimum wurde bisher am 22.9.1999 eine Feuchte von  $w = 27\%$  Vol.% gemessen ( $pF = 1,72$ ), was etwa einem gravimetrischen Wassergehalt von  $w = 15\%$  entspricht. Eine kritische Entwässerung der Speicherschicht ist bei den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen nicht zu erwarten. Die saisonalen Feuchtigkeitsänderungen in der verwendeten GTD können somit nicht zu kritischen Zuständen hinsichtlich der Dichtwirkung (Schrumpfrissbildungen) führen.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beurteilung der Austrocknungsgefahr einer alternativen Oberflächendichtung wurden Laborversuche an einer Ca-GTD und Felduntersuchungen an einem Lysimetermessfeld einer Deponie durchgeführt. Bei der untersuchten Abdichtung handelt es sich um eine schwere Calcium-Bentonitmatte, die mit einer 10 cm starken Wasserspeicherschicht aus schluffigem Sand gegen Austrocknen geschützt ist. Die GTD im Dichtungssystem wird durch eine mineralische Dränschicht und durch eine Wasserhaushaltsschicht überlagert.

Die Durchlässigkeitseigenschaften der GTD bei wechselnder Feuchte wurden durch definierte Trocken-Nass-Zyklen in speziellen Laborversuchen untersucht. Für das untersuchte Produkt wurde nachgewiesen, dass sich selbst nach einer extremen Austrocknung beim Wiederbewässern unter 15 kN/m<sup>2</sup> Auflast eine Regenerierung ohne wesentlichen Verlust der Dichtwirkung einstellt. Die Dauer der Regenerierungsphase, wie auch das Durchlässigkeitsverhalten bei der Wiederbewässerung hängen vom Grad der Trocknung ab.

In einem Messfeld der Oberflächenabdichtung wurde über einen Zeitraum von drei Jahren in den einzelnen Schichten der Wasserhaushalt mit verschiedenen Meßsystemen erfasst, alle Klimawerte und die Durchsickerung der Dichtung wurden

ermittelt. Während der Wasserhaushalt im Oberboden und in der Rekultivierungsschicht kurzfristig und mit starken Amplituden den klimatischen Einwirkungen folgt, wirkt die über der GTD angeordnete Speicherschicht als Puffer und reagiert nur träge auf die jahreszeitlichen Schwankungen. Diese Schutzschicht behielt stets einen hohen Sättigungsgrad, die Feuchte unterschritt zu keinem Zeitpunkt des Messzeitraumes die Feldkapazität. Durch Elementversuche wurde nachgewiesen, dass die derart geschützte Ca-GTD nur geringe Wassergehaltsschwankungen erfährt, die jeweils weit außerhalb einer Rissgefahr liegen und keine Austrocknungsgefahr im Feld besteht. Mit den Labor- und Felduntersuchungen konnte somit die planmäßige und zuverlässige Funktion dieser auf den Standort optimierten Oberflächenabdichtung mit einer Ca-GTD als Dichtungselement nachgewiesen werden.

Die Verfasser danken dem Landkreis Sonneberg und der Fa. Huesker Synthetic für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen und für die Bereitschaft zur Veröffentlichung der Ergebnisse.

#### 5 LITERATUR

- Alexiew, N. (1999): Neue Perspektiven für Geosynthetische Tondichtungsbahnen durch die Verwendung von Calcium-Bentonit. 6. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, März 1999, Geotechnik Sonderheft 1999
- Alexiew, N. (2000): New Perspectives for Geosynthetic Clay Liners using Calcium Bentonite. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, 2000, Bologna
- Dobras, T.; Elzea, J. (1993): In-Situ Soda Ash Treatment for Contaminated Geosynthetic Clay Liners. Conference Proceedings Geosynthetics '93, Vancouver, Canada 1993
- Egloffstein, Th. (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3, Karlsruhe 2000
- Henken-Mellies, U. (2000): Langzeituntersuchung an einer mineralischen Oberflächenabdeckung: Großlysimeter auf der Deponie "Im Dienstfeld"/Lkr. Ansbach, Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2000, Egloffstein, Burkhardt, Czurda, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2001
- Herold, C. (1997): Besondere Aspekte bei der Zulassung von Bentonitmatten für Oberflächen-Abdichtungssysteme von Deponien der Deponiekategorie I. Veröffentlichung des LGA Bayern Grundbauinstitutes, Heft 76, Eigenverlag LGA Bayern 1997, 13. Nürnberger Deponieseminar, Geotechnische Fragen beim Bau neuer und bei der Sicherung alter Deponien
- James, A.; Fullerton, D.; Drake, R. (1997): Field Performance of GCL under Ion Exchange Conditions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 10, October 1997
- Lin, L.-C.; Benson, C. H. (2000): Effect of Wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, Nr. 1, January 2000
- Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdeckungssysteme für Deponien und Altlasten, Dissertation Universität Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22
- Melchior, S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung-Ergebnisse von mehrjährigen In-situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Deponie Georgswerder (Hamburg), Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung-Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung, 3. Deponie-Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30. Mai 1996, Bingen-Büdesheim/Rhein
- Mühlfriedel, F. (2001): Wasserhaushaltsbedingungen in Deponieoberflächendichtungen mit Mehrschichtsystemen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universitätsverlag Bauhaus-Universität (in Vorbereitung)
- Siegmund, M.; Weiss, W.; Baumbusch, J. (1997): Die Feuchteverhältnisse als eine maßgebende Einflussgröße für die Funktionstüchtigkeit von Geokunststoff-Ton-Dichtungselementen. 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, März 1997, Geotechnik Sonderheft 1997