

# Die Wirkung kapillarbrechender Schichten in Oberflächenabdichtungen von Deponien – erste Ergebnisse

## The Effect of Capillary Breaking Layers in Cover Lining Systems of Landfills – First Results

Rainer M. Zeh, Karl Josef Witt  
Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar

*ZUSAMMENFASSUNG: Kapillarbrechende Schichten (KBS) können als Schutz- bzw. Pufferschicht für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungssystemen für Deponien und Altablagerungen zur Reduzierung der Austrocknungsgefahr eingesetzt werden. Die hier vorgestellten Laborversuche an KBS auf einer mineralischer Dichtung belegen die Effektivität solcher Aufbauten. Ergänzende numerische Simulationsberechnungen bestätigen dies qualitativ. Die Untersuchungen werden derzeit auf weitere Materialien und Versuchsrandbedingungen ausgeweitet.*

*ABSTRACT: Capillary breaking layers (KBS) can be used as a protection or buffer layer for mineral sealing components to reduce the risk of cracks in cover lining systems of landfills. The laboratory tests on KBS overlying a mineral sealing presented here verify the effectiveness of such constructions. Further numerical calculations qualitatively confirm these results. The examinations are being extended to further materials and testing conditions.*

### 1 Einleitung

In Oberflächenabdichtungssystemen für Deponien und Altablagerungen werden vorwiegend mineralische Dichtungen bzw. geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) als Hauptdichtungskomponente verwendet, vgl. [1], [2]. In den letzten Jahren wurden jedoch in Testfeldern und bei Aufgrabungen eine starke Reduzierung der Dichtwirksamkeit ungeschützter mineralischer Dichtungskomponenten infolge austrocknungsbedingter Rissbildung bzw. Durchwurzelung festgestellt. Die Ursache war häufig die mangelnde Wasserspeicherfähigkeit der Rekultivierungsschicht in den klimatisch trockenen Jahreszeiten an ungünstigen Standorten und somit eine Austrocknung des gesamten Systems. Um diese Effekte zu minimieren bzw. zu verhindern sind für die Rekultivierungsschicht nun ausreichend qualifizierte Böden ( $n_{FK}$ ,  $\rho$ ) und standortangepasste Mächtigkeiten vorgeschrieben damit ein ausreichender Wasserspeicher ganzjährig zur Verfügung steht [3], [4]. Eine interessante Alternative bzw. Ergänzung ist der Einbau einer relativ dünnen kapillarbrechenden Schicht (KBS), z. B. aus Feinsand, zwischen Entwässerungsschicht und mineralischer Dichtung bzw. GTD in Oberflächenabdichtungssystemen. Die KBS soll für eine Unterbrechung bzw. Verminderung des kapillaren Flusses nach oben sorgen, in gewissen Umfang Wasser speichern und dieses in trockenen Jahreszeiten an die unterliegende mineralische Dichtung oder Tondichtungsbahn abgeben – die Dichtung bleibt somit ausreichend feucht, erfährt kein Schrumpfen infolge übermäßiger Wassergehaltsabnahme und bildet dadurch keine Risse die zu höheren Wasserwegigkeiten führen. Dieser Ansatz bestätigte sich in der Praxis in Testfelderergebnissen [5] für eine alternative Oberflächenabdichtung in Thüringen, bei der eine GTD mit einer KBS überdeckt wurde – die Messresul-

tate ergeben durchweg einen hohen Sättigungsgrad in der KBS und somit auch indirekt ein ausreichendes Wasserdargebot an die GTD.

Um die oben beschriebenen Vorstellungen zur KBS weiter zu verifizieren wurden zwei Laborversuche zur Untersuchung der Funktion der KBS entwickelt bzw. aus ähnlichen Versuchen modifiziert. Diese werden im folgenden vorgestellt und näher erläutert. Es handelt sich um Austrocknungs- / Befeuchtungsversuche in der sogenannten ‚Weimarer Festwandzelle‘ und um einen maßstäblichen Säulenversuch. Ergänzt werden die experimentellen Untersuchungen durch numerische Simulationsberechnungen.

Als Materialien für die kapillARBrechende Schicht sind Feinsande und leicht schluffige Sanden geeignet, auch geosynthetische Materialien (z. B. Vliese) oder spezielle Geocomposites sind vorstellbar. Als Schichtstärke werden vorerst bei den natürlichen Böden aufgrund der Einbaumöglichkeiten des Baubetriebs 10 – 15 cm vorgeschlagen. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Materialien sind in der Bearbeitung.

Bodenphysikalisch lässt sich die Funktion der KBS hauptsächlich über die starken Saugspannungsunterschiede zu den angrenzenden Komponenten und den jahreszeitlich verändernden Wasserbewegungen in einer Oberflächenabdichtung erklären. Wenn man von den normalen Einbaubedingungen bei der Errichtung einer Oberflächenabdichtung ausgeht sind alle Komponenten zu dieser Zeit in teilgesättigtem Zustand. Der Porenraum ist nur zum Teil mit Wasser gefüllt. Dadurch entstehen je nach Material unterschiedlich große Saugspannungen (vgl. [6]). Insbesondere die feinkörnigen, bindigen Böden der mineralischen Dichtungsschicht bauen bei den empfohlenen Einbaubedingungen (97 % Proctor, feucht) sehr hohe Spannungen auf. Die angrenzenden Schichten wie die KBS und das Auflager haben infolge der gröberen Bodenstruktur weit geringere Saugspannungen. Die Dichtung wird also immer versuchen Feuchtigkeit aus diesen Schichten zu holen und somit die Saugspannungsdifferenzen an den Schichtgrenzen zu reduzieren bzw. auszugleichen. Kommt noch ein mangelndes Wasserdargebot während klimatischen Trockenphasen dazu, erhöhen sich diese Effekte. Nach einer gewissen Zeit kann i. d. R. das Auflager wenig bis gar kein Wasser mehr abgeben – ein Gleichgewichtszustand tritt im Kontakt Auflager – Dichtung ein. Die KBS wird dagegen immer wieder durch versickerndes Niederschlagswasser ‚aufgefüllt‘ (Jahresverlauf des Wasserhaushalts) und kann somit einen gewissen Wasserspeicher für die untenliegende Dichtung bilden. Niederschlagsmengen aus der Entwässerungsschicht, die normalerweise durch die Sperrwirkung der Dichtung direkt lateral abgeführt werden, dringen in die KBS ein und werden gespeichert. Durch die (angenommene) anhaltende Versorgung der Dichtung mit Wasser treten bei einer ausgeglichenen Bemessung keine Risse aus einer möglichen Volumenreduzierung auf.

Die normale Entwässerungsschicht (nach der DEPONIEVERORDNUNG) aus sehr grobkörnigen Material kann aufgrund der u. a. weit geringeren Wasserspeicherfähigkeit diese Funktion nicht erfüllen und ist daher als schützende Schicht ungeeignet.

## 2 Laborversuche

Die Laborversuche werden an zwei verschiedenen Aufbauten vorgenommen – an mehreren modifizierten ‚Weimarer Festwandzellen‘ [7], [8] sowie an einem maßstäblichen Säulenversuchsstand [9].

In den Festwandzellen,  $d = 20$  cm (vgl. Bild 1), werden Bodenproben aus Dichtungsmaterial konstant belastet ( $\sigma = 15$  kN/m<sup>2</sup>) und mit trockener Luft beaufschlagt um eine starke Austrocknung zu simulieren. Um Umläufigkeiten infolge Schrumpfen zu vermeiden wird die Dichtung zweilagig eingebaut – in der Mitte befindet sich ein in die Zelle hereinragender ‚Dichtungsring‘ (vgl. Bild 1). Die Temperatur wird konstant gehalten. Es werden reine Trocknungsversuche oder Trocken-Nass-Zyklen gefahren um Aussagen zur Rissentwicklung bzw. zeitlichen Veränderung der Durch-

lässigkeit des Dichtungsmaterials zu bekommen. Die Aufbauten i) Auflager + Dichtungsschicht bzw. ii) Auflager + Dichtung + KBS werden verglichen. Die Materialien werden dabei variiert. Aufgrund der Randbedingungen (Höhe Zelle, Lage Dichtungsring) hat jede Schicht eine Höhe von  $h = 2 \text{ cm}$ . Dies entspricht nicht ganz den Proportionen einer realen Oberflächenabdichtung, ist jedoch als Elementarversuch gut geeignet zur Untersuchung des Phänomens.

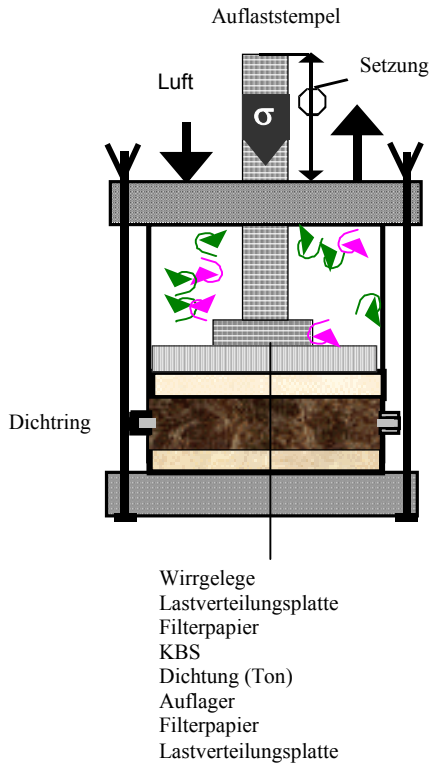


Bild 1: ‚Weimarer Festwandzelle‘, links Prinzipskizze, rechts Foto

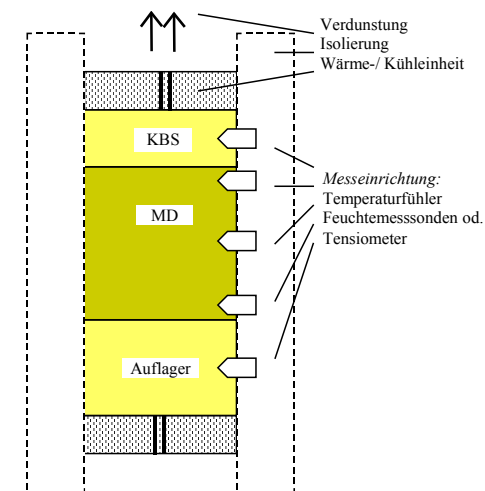


Bild 2: Prinzipskizze Säulenversuchsstand, links Skizze, rechts Foto Einbau

Vor, während und nach dem jeweiligen Versuch werden die einzelnen Gewichtsanteile / Wassergehalte wie Zelle insgesamt, Böden / Probenbereiche und Sickerwasser gemessen. Ein Vergleich der Anfangs- und Endwerte ist somit möglich.

Der Säulenversuchsstand (Bild 2) bildet im Maßstab 1:4 Teilbereiche bzw. eine ganze Oberflächenabdichtung ab. Der Durchmesser beträgt 15 cm, die Höhe lässt sich variieren. Folgende Mehrschichtsysteme werden untersucht: Auflager + Dichtung - 7,5 + 12,5 cm, Auflager + Dichtung + KBS - 7,5 + 12,5 + 4 cm. Von oben und unten lassen sich durch Temperaturelemente (Heizen oder Kühlen) unterschiedliche große zeitlich variable Temperaturgradienten aufbringen, die dann zu einem 1-dimensionalen Wasser und Temperaturtransport in der mehrschichtigen Probe führen [9]. Oben und unten sind zudem regelbare Ausgänge für Sickerwasser, Verdunstung usw. angebracht. Über Temperaturfühler, Tensiometer bzw.

Feuchtemesssonden sind kontinuierliche Messungen [10] der Bodenwasser- bzw. Temperaturverhältnisse möglich (Wasserspannungen, Wassergehalte, etc.). Über die Bestimmung der Wassergehalte beim Einbau und beim Ausbau des Mehrschichtsystems lassen sich zudem die gemessenen Ergebnisse vergleichen.

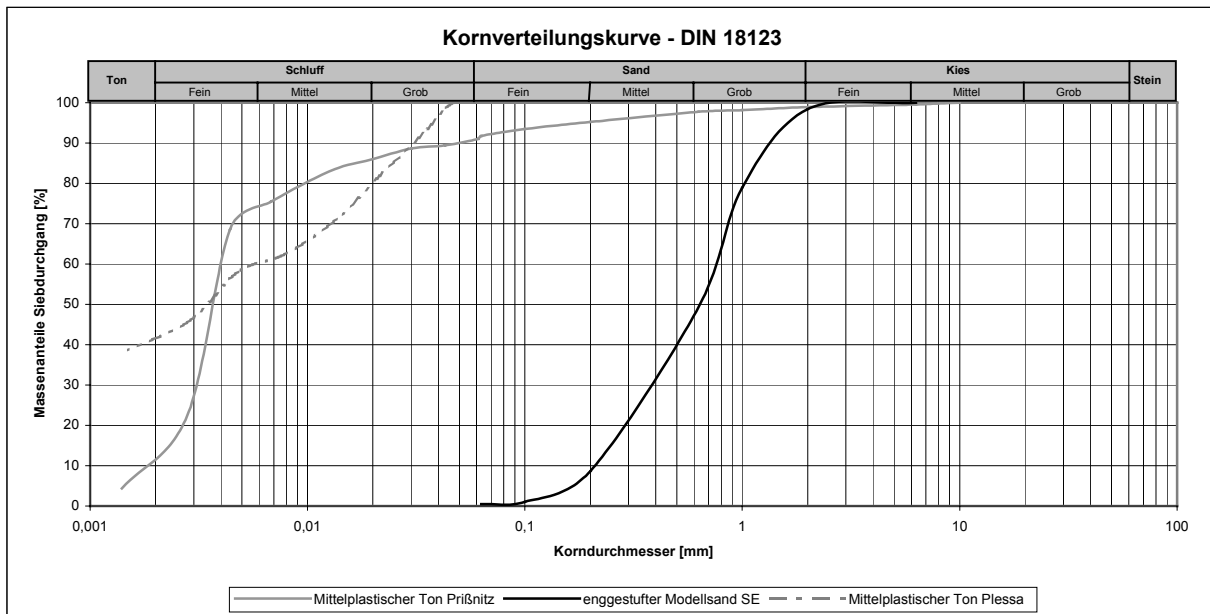


Bild 3: Kornverteilungskurve der Versuchsböden [7]

Kennwerte	Ton Plessa	Ton Prißnitz	Modellsand
Tonanteil	39 %	13 %	0 %
Fließgrenze $w_l$	44,9 %	46,0 %	-
Ausrollgrenze $w_p$	21,4 %	21,3 %	-
Plastizitätszahl $I_p$	23,5 %	24,7 %	-
Konsistenzzahl	0,94	1,06	-
Wasseraufnahme $w_a$	116,5 %	96,2 %	-
Glühverlust $V_{Gl}$	4,47 %	6,57 %	-
Proctor: 100 %	1,649 g/cm <sup>3</sup> , w = 21,0 %	1,751 g/cm <sup>3</sup> , w = 19,4 %	1,735 g/cm <sup>3</sup> , w = 10,2 %
97 %	1,600 g/cm <sup>3</sup> , w = 16,6 % / 24,4 %	1,700 g/cm <sup>3</sup> , w = 22,9 % / 15,2 %	-

Tabelle 1: Kennwerte der Versuchsböden

Als Temperaturfühler kommen mehrere vom Typ PT 100 zum Einsatz. Bei den Tensiometern handelt es sich um Miniatur-Druckaufnehmer-Tensiometer T5 der Firma UMS. Die Feuchtemesssensoren Sisomop sind eine Neuentwicklung [11], die durch die Bestimmung der Dielektrizitätskonstante des Bodens die Feuchtegehalte berechnen. Eine Messung der Temperatur ist zudem mit diesen Sonden möglich. Alle Messwerte werden über Datenlogger (DL 101, UGT) bzw. direkt am Rechner kontinuierlich aufgezeichnet.

Für die hier beschriebenen Versuche werden für die Auflagerschichten bzw. die kapillarbrechende Schicht KBS ein SE (Modellsand) benutzt. Dichtungsmaterial war ein TM (Ton Plessa). Bild 3 zeigt die Kornverteilungslinie der Böden, Tabelle 1 die wichtigsten Bodenparameter. Bei den Versuchen in der Festwandzellen wurde als Dichtungsmaterial zwei TM (Ton Plessa, Ton Prißnitz) untersucht.

### 3 Ergebnisse der Laberversuche

#### 3.1 Versuche in der Festwandzelle

Die Versuche in den Festwandzellen eignen sich besonders um relativ schnell Aussagen zum Verhalten der unterschiedlichen Komponenten bzw. Materialien unter extremen Randbedingungen zu erhalten. Eine Rissbildung bzw. eine Durchlässigkeitserhöhung lässt sich unter den verschiedenen Randbedingungen untersuchen. Das Dichtungsmaterial kann über mehrere Trocken-Nass-Zyklen beobachtet werden.

Aufbau	$w_{\text{einbau}}$ in [%]	$w_{\text{ausbau}}$ in [%]	$\Delta w$ in [%]
<b>Ton Prißnitz</b>			
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % feucht)	23,96	7,82	-16,14
Auflager	10,74	0,30	-10,44
KBS	10,74	0,71	-10,03
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % feucht)	23,96	24,66	+ 0,71
Auflager	10,74	2,40	-8,34
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % trocken)	14,98	3,22	-11,76
Auflager	9,98	0,42	-9,56
KBS	9,98	0,60	-9,38
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % trocken)	14,97	20,02	+5,04
Auflager	9,98	0,95	-9,0
<b>Ton Plessa</b>			
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % feucht)	24,71	8,22	-16,48
Auflager	10,74	0,30	-10,44
KBS	10,74	0,63	-10,11
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % feucht)	24,71	24,28	-0,42
Auflager	10,74	3,76	-6,98
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % trocken)	16,97	2,43	-14,54
Auflager	10,13	0,58	-9,55
KBS	10,13	0,45	-9,68
Dichtung ( $\rho_{\text{pr}}$ 97 % trocken)	16,89	19,58	+2,69
Auflager	10,13	0,95	-9,18

Tabelle 2: Austrocknungsversuche, Ton Plessa und Prißnitz, [7] modifiziert

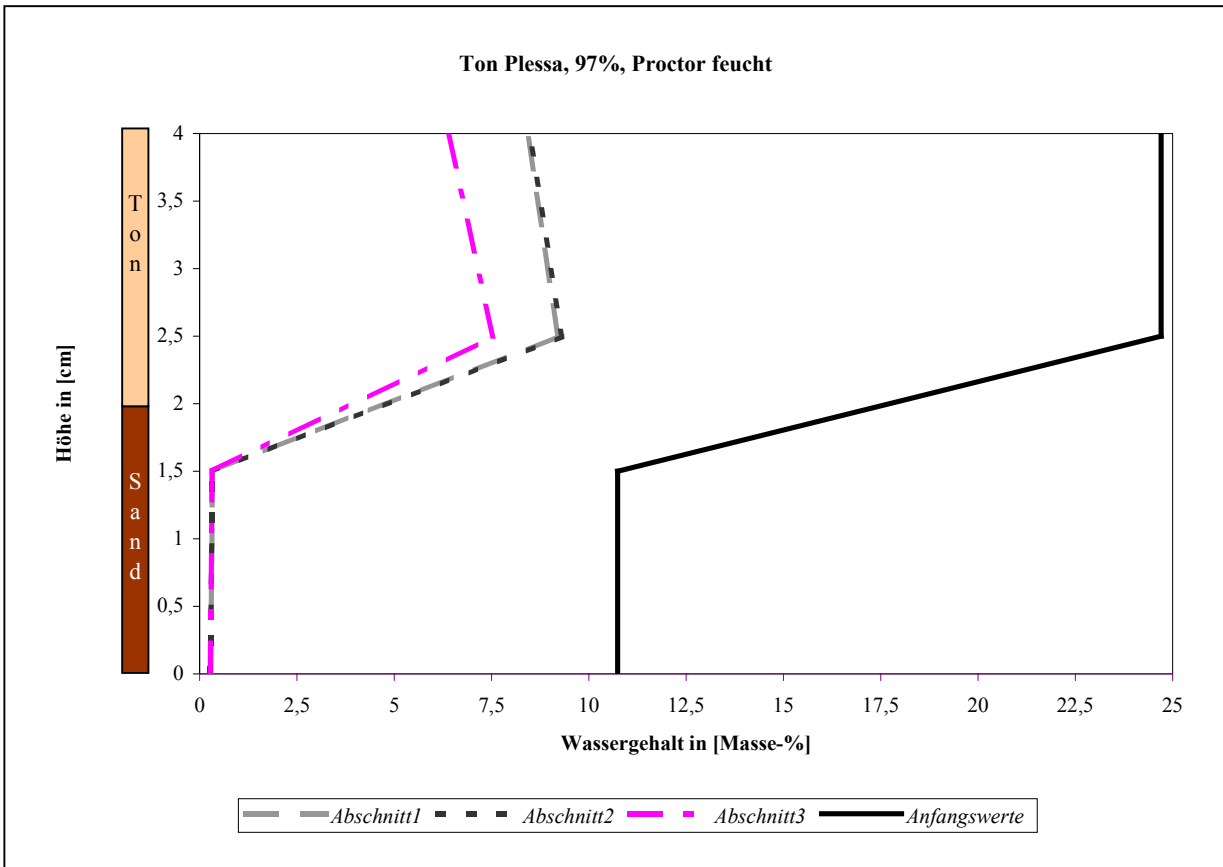


Bild 4: Austrocknungsversuche, Ton Plessa, Wassergehaltsänderungen, [7] modifiziert

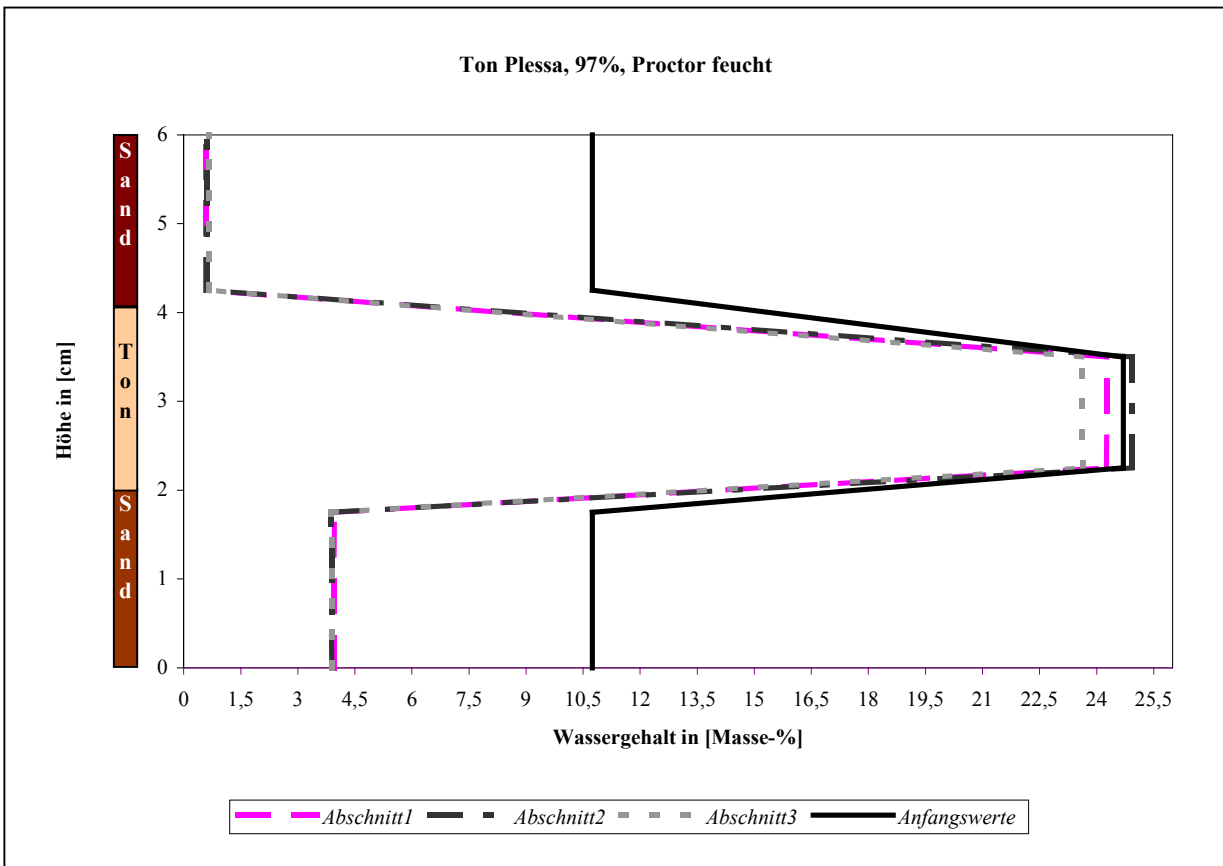


Bild 5: Austrocknungsversuche, Ton Plessa, Wassergehaltsänderungen, [7] modifiziert

Die erste Versuchsserie war als reiner Austrocknungsversuch (5 Tage) mit den beiden Tonen als Dichtungskomponente konzipiert. Es werden jeweils der Ton Plessa und der Ton Prißnitz bei 97 % er Proctordichte unter- bzw. überoptimal eingebaut. Des weiteren werden die Versuche jeweils mit und ohne aufliegende kapillarbrechende Schicht KBS gefahren.

Die Ergebnisse als Wassergehaltsänderungen (Masse-%) für den Ein- und Ausbau sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Bilder 4 und 5 zeigen typische Verläufe der Wassergehaltsänderungen in den Schichten für den Ton Plessa, der auf dem feuchten Ast der Proctorkurve eingebaut wurde. Die Abschnitte bezeichnen unterschiedliche Probebereiche beim Ausbau.

Beide Tone verhalten sich ähnlich. Bei den Versuchen ohne KBS reduziert sich der Wasseranteil massiv in der Dichtung. Risse bilden sich aus und die Probe löst sich teilweise von der Wandung (siehe Bild 6). Bei den Versuchen mit KBS unterscheiden sich die Ergebnisse etwas je nach Einbaubedingung der Tone: Auf dem trocken Ast erhält man eine klare Feuchtigkeitszunahme in der Dichtung, bei den auf dem feuchten Ast eingebauten Dichtungen erhält man keine signifikanten Änderungen der Feuchte. Eine starke Abnahme des Wassergehalts im Auflager wie in der KBS ist in beiden Fällen wie erwartet zu beobachten.

Die zweite Versuchsserie untersucht die sich ändernde Durchlässigkeit der Dichtungsschicht nach Austrocknungs- / Feuchtzyklen. Ein Zyklus besteht aus 5 Tage trocknen, 1 Tag Durchlässigkeitsmessung / ‚bewässern‘ bei  $i = 15$ , zwei Tage bewässern bei  $i = 1$ , nochmals Durchlässigkeitsmessung,  $i = 15$ . Dann teilweise eine Wiederholung des Zyklus. Beide Tone wurden auf dem nassen Ast der Proctorkurve eingebaut, einmal mit und einmal ohne aufliegender KBS. Eine Versuchsreihe

Aufbau	1. Zyklus, nach Trocknung		2. Zyklus, nach Trocknung	
	$k_{f, \text{Anfang}}$ [m/s]	$k_{f, \text{Ende}}$ [m/s]	$k_{f, \text{Anfang}}$ [m/s]	$k_{f, \text{Ende}}$ [m/s]
<b>Ton Prißnitz</b>				
Dichtung Auflager	7,115 E-06	3,329 E-07	-	-
KBS				
Dichtung Auflager	6,423 E-08	2,967 E-08	-	-
Dichtung Auflager	3,520 E-06	1,127 E-08	2,502 E-06	8,281 E-08
KBS				
Dichtung Auflager	5,139 E-07	4,622 E-07	1,177 E-06	8,445 E-07
<b>Ton Plessa</b>				
Dichtung Auflager	1,531 E-06	2,150 E-07	-	-
KBS				
Dichtung Auflager	2,944 E-07	2,333 E-07	-	-
Dichtung Auflager	1,198 E-06	3,269 E-08	2,922 E-06	1,580 E-06
KBS				
Dichtung Auflager	2,319 E-8	1,620 E-8	2,815 E-8	2,711 E-8

Tabelle 3: Durchlässigkeitsbeiwerte in Trocken-Nass-Zyklen, [7] modifiziert

wurde nach dem ersten Trocken-Feucht-Zyklus ausgebaut, die zweite nach zwei gleichen Zyklen. Tabelle 3 gibt die Ergebnisse der zeitlichen Veränderung der Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  an.

Man kann sehr gut erkennen, dass bei den Aufbauten mit KBS nur eine geringe Durchlässigkeitszunahme zu verzeichnen ist. Die Variation der Werte ist sehr klein. Bei den Aufbauten ohne KBS ist dagegen eine Zunahme um fast 2 Magnituden nach der Austrocknung feststellbar. Die Durchlässigkeit reduziert sich zwar relativ rasch wieder beim Bewässern, jedoch ist eine irreversible Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit über die Zyklen zu erkennen.

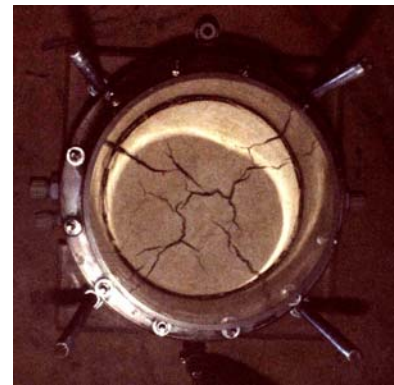


Bild 6: Festwandzelle mit Ton Plessa ohne KBS beim Ausbau [7]

### 3.2 Säulenversuche

Im Säulenversuch sollen über längere Zeiträume die 1-dimensionale Entwicklung der Temperatur und der Feuchtigkeit in den einzelnen Bodenkomponenten unter verschiedenen Randbedingungen wie Temperaturgradienten, Boden- und Materialparameter, ‚OAD-Aufbau‘ usw. untersucht werden.

Erste Versuche wurden jeweils mit den Komponenten Auflager, Dichtung (Ton Plessa, 99 % Proctor, feucht) und KBS (alle Böden wie oben) mit einem Temperatur-Gradienten von  $0^\circ$  und ca.  $5^\circ\text{K}$  über längere Zeiträume durchgeführt [9]. Weitere Versuche sind z. Z. nach der Modifizierung der Meßtechnik (teilweise Ersatz der Tensiometer durch Feuchtemesssonden, s. u.) in der Bearbeitung. Der fast lineare Temperatur-Gradient von ca.  $5^\circ\text{K}$  wurde über die obere Wärmeeinheit geregelt (vgl. Bild 7). Temp 3 liegt im oberen Bereich der KBS, Temp 1 in dem unteren Bereich des Auflagers und Temp 2 geometrisch genau dazwischen in der Dichtung.

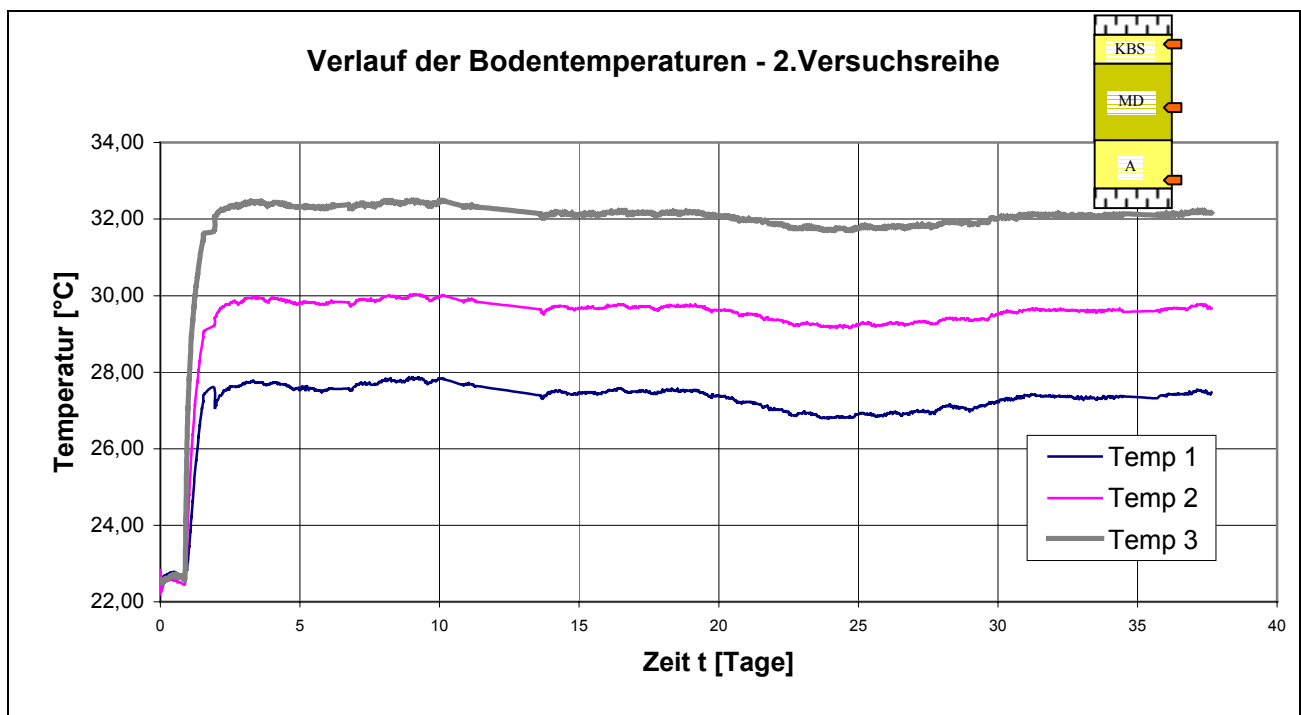


Bild 7: Verlauf der Bodentemperaturen [9]



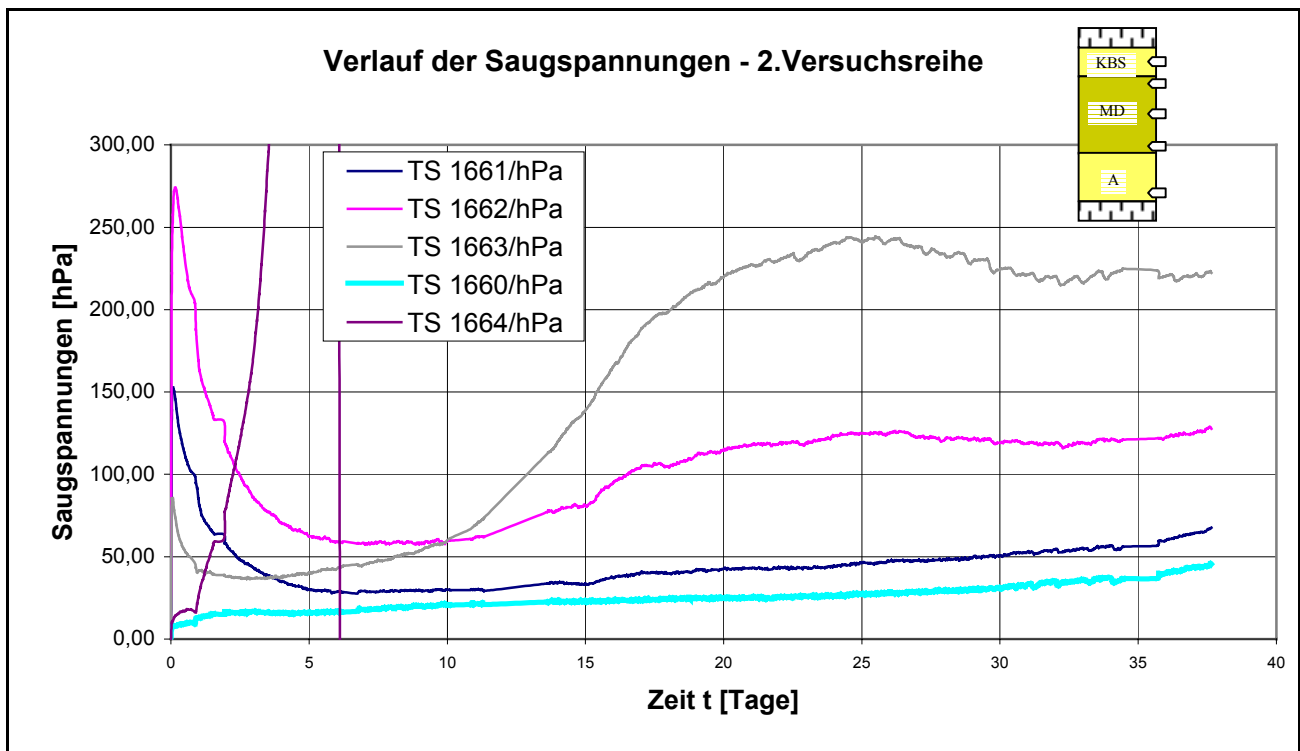


Bild 8: Verlauf der Saugspannungen [9]

Schicht	Auflagerschicht	Dichtung			KBS
Material	Sand	Ton Plessa (TM)			Sand
Einbauhöhe [cm]	7,5	12,5			5
Proctor [%]	97,0	99,0			96,0
Tensiometer	TS 1660	TS 1661	TS 1662	TS 1663	TS 1664
Wassergehalt-Einbau [%]	12,76	22,68			6,85
Wassergehalt-Ausbau [%]	3,66	25,75	24,73	25,18	0,71
Wassergehalt-Differenz [%]	-9,10	3,07	2,05	2,5	-6,14

Tabelle 4: Wassergehalte und Kennwerte, [9] modifiziert

Die Verläufe der Saugspannungen und die Wassergehaltsänderungen von Einbau zu Ausbau sind in Bild 8 bzw. Tabelle 4 dargestellt. Die Tensiometer TS 1660 bis 1664 sind von unten nach oben angeordnet.

Eine Bilanzierung aller Wasseranteile nach Ausbau ergab ein Verdunstungsanteil von ca. 10,7 % der Gesamtwassermenge über den Ausgang der oberen Wärmeeinheit. Der Anteil an Sickerwasser (Kondensat am Ausgang der unteren Wärmeeinheit) betrug ca. 3,7 %.

Das in der KBS eingebaute Tensiometer TS 1664 zeigt direkt nach Versuchsbeginn einen Saugspannungswert von ca. 10 hPa an, der auf den Einbauwassergehalt und die Einbaudichte zurückzuführen ist. Anschließend steigen die Saugspannungswerte innerhalb der nächsten 24 h leicht an – ein ‚Einspielen des Tensiometers‘ erfolgt. Ab dem Beginn der Aufheizphase (nach 24 h), die relativ schnell ein konstantes vertikales Temperaturfeld auf das Bodensystem erzeugt, steigen bei dieser Meßstelle die Saugspannungswerte stark an bis über die Messgrenze (ca. 900 hPa.). Der Anstieg ist zunächst durch die einsetzende vertikal nach unten gerichtete Wasserbewegungen des in der kapil-

larbrechenden Schicht (KBS) befindlichen Wassers in den darunter liegenden Ton, durch den angestrebten Potentialausgleich im System, zu erklären. Der erzeugte Temperaturgradient verursacht einen Dampfdruckgradienten in gleicher Richtung. Aufgrund der Porengrößenverteilung im Sand der KBS stellt sich durch die Temperaturerhöhung ein höherer Dampfdruck im Luftporenraum ein, der das in der Schicht befindliche Wasser in Wasserdampf (Gasphase) übergehen lässt. Der Sättigungsdampfdruck steigt somit an. Das gemessene Matrixpotential in der kapillarbrechenden Schicht (KBS) steigt deshalb ebenfalls zunehmend an. Außerdem wird durch diesen Dampfdruckgradienten ein sogenannter diffusiver Wasserdampftransport in Richtung des Dampfdruckgradienten ausgelöst. Es setzt somit ein Wassertransport von oben nach unten ein. Allerdings geht auch ein Teil des Wassers über die Verdunstung nach oben weg (durch Auslaß obere Wärmeeinheit) wie die Gesamtbilanz zeigt (Tabelle 4).

Der Verlauf der im Ton installierten Tensiometer TS 1661, TS 1662 und TS 1663 ist überraschend. Sie fallen erst nach der Installation in den Boden stark ab und steigen dann mehr oder weniger kontinuierlich bis zu einem konstanten Wert. Keiner der Tensiometer übersteigt den Grenzwert (ca. 900 hPa) wie es eigentlich zu erwarten gewesen wäre bei den Einbaubedingungen des Tons. Gründe können der sofort eintretende Dampftransport im Porenraum durch den angelegten Temperaturgradienten sein oder auch die beim Einbau der Tensiometer verwendete bodengleiche (feinere Körnung) Einschlämpfpaste mit ihrem hohen Wassergehalt. Die Werte sind somit nicht als repräsentativ anzusehen. Qualitativ zeigen sie jedoch die zu erwartende Tendenzen, der obere Bereich des Tones gibt Wasser ab.

Als Konsequenz dieser Versuche wird in den folgenden Versuchen die Tensiometer in bindigen Bodenschichten durch Feuchtemesssonden ersetzt.

Der Sand im Auflager trocknete von einem Einbauwassergehalt von 12,76 % auf einen mittleren Ausbauwassergehalt von 3,66 % aus. Im untersten Bereich des Auflagers, etwa in einer Höhe von 0,5 cm, war eine Durchfeuchtung festzustellen, da die Wasseroberfläche des angefallenen Sicker- bzw. Kondenswassers im Systemaufbau bis zu dieser Höhe reichte. Darüber war das Material fast völlig trocken. Die gemessenen Saugspannungen des Tensiometers im Auflager stiegen während des Versuches leicht an. Das im Anfangsstadium des Versuches fallende Matrixpotential im Auflagersand ist zum Teil auf einen kapillaren Aufstieg des Wassers in den Tonboden und auf den oben genannten temperaturinduzierten Dampfdruckgradienten zurückzuführen. Da aber die Temperatur in der Auflagerschicht niedriger ist als in den darüber befindlichen Schichten, sind auch die Auswirkungen des Dampfdruckzusammenhanges auf die Saugspannungen in diesem Bereich nicht so erheblich.

Das gesamte System wurde nach dem Versuche auf die Umgebungstemperatur im Labor (ca. 23 °C) abgekühlt, dann ausgebaut und untersucht. Beim Abkühlen kondensierte ein Teil des Wasserdampfes was die Wassergehalte in den Bodenschichten leicht erhöhte.

Man erkennt an diesen Ergebnissen (Tabelle 4) Parallelen zu den Versuchen aus den Festwandzellen. Eine starke Wasserabnahme in den Sandschichten und eine Zunahme in der Dichtungsschicht, auch bei einem geringen Temperatur-Gradient.

#### **4 Numerische Simulationsberechnungen**

Zum Vergleich des Säulenversuchs wurde mit dem Modell COMPASS [12] numerische Berechnungen und Parameterstudien durchgeführt. COMPASS kann das thermische, hydraulische, chemische und mechanische Verhalten teilgesättigter Böden simulieren. Einige angenommene Bodenkennwerte finden sich in Tabelle 5. Die Wassergehalts- / Saugspannungsbeziehung wird über eine modifizierte Van Genuchten-Beziehung errechnet, ebenso die ungesättigte Leitfähigkeit. Bild 9a

Kennwerte	Sand	Ton Plessa
Porenanteil n	0,321	0,522
Dichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,63	2,66
Wärmekap. [10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> ]	1500	900
Wärmeleitf. [W/m K]	0,5 – 2,1	0,7 – 1,7
$k_{f, \text{sat}}$ [m/s]	0,00013	8 E-10
Saugspan., <sub>initial</sub> [Pa]	-5500	-6000000

Tabelle 5: Kennwerte Numerik

zeigt den Temperaturverlauf (ausgehend von 293°K) nach einem Tag, Bild 9b die Saugspannungen in Pa für 7 Tage und 28 Tage.

Der Temperaturverlauf aus den Berechnungen entspricht dem der Säulenversuche. Ausgehend von den initialen Saugspannung zeigt sich in Bild 9b links (nach 7 Tagen) eindeutig eine Austrocknung der KBS und der oberen

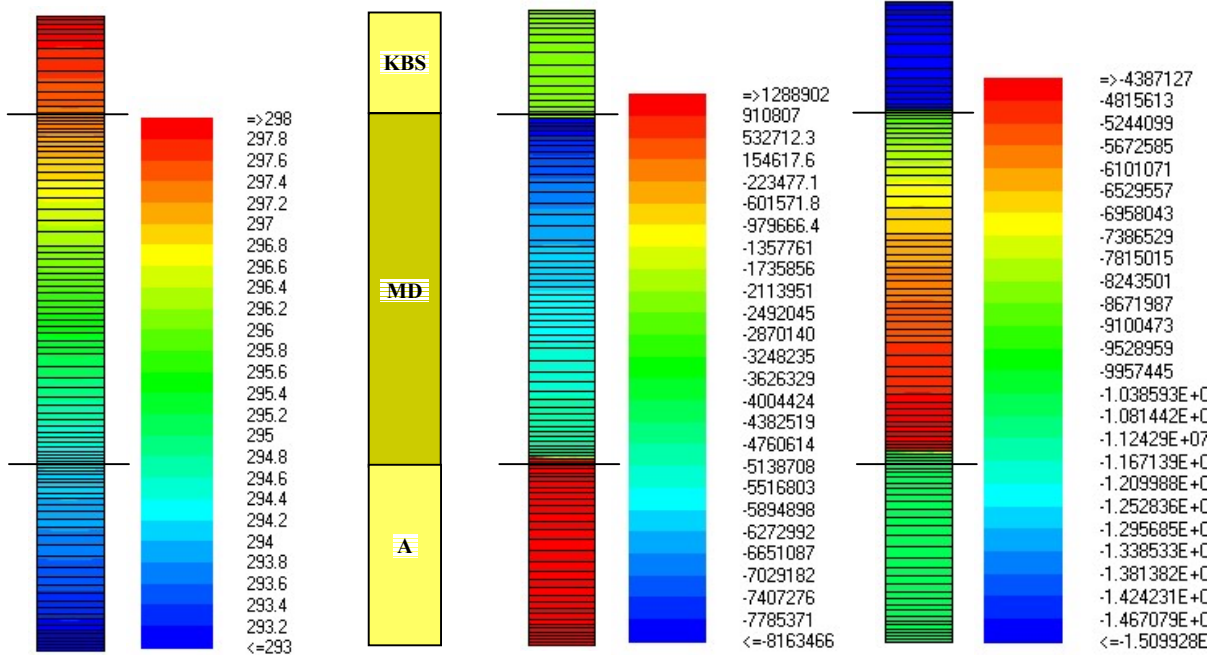


Bild 9: Temperaturverlauf (°K), nach einem Tag

Bild 9: b) Saugspannungsverlauf (Pa), links 7 Tage, rechts 28 Tage

Schichten der Dichtung (höhere Saugspannungen = niedrigeren Wassergehalt) sowie eine Feuchtigkeitszunahme im Auflager – insgesamt also ein Wassertransport nach unten, wie zu erwarten war. Das Bild 9b zeigt rechts, dass nach 28 Tagen beide Sandschichten fast völlig trocken sind. Die Dichtung ist im unteren Bereich feuchter als am Versuchsbeginn, der obere Teil etwas trockener. Im Vergleich mit den Ausbauwassergehalten des Säulenversuchs erhalten wir, bis auf dem oberen Teil der Dichtung, tendenziell eine gute Übereinstimmung.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Die kapillarbrechende Schicht als zusätzliche Komponente in Oberflächenabdichtungssystemen ist nach ersten praktischen Erfahrungen in Testfeldern [5] und nach numerischen Wasserhaushaltsberechnungen [1] für einen ausgesprochenen trockenen Standort über einen Zeitraum von 15 Jahren

eine hoch wirksame Schutzschicht für mineralische Dichtungskomponente. Die hier vorgestellten Laborversuche bestätigen diese Erfahrungen. Der Vergleich von Aufbauten ohne und mit KBS in den Versuchen mit der ‚Weimarer Festwandzelle‘ zeigt eine deutliche Austrocknung der Dichtung und eine damit einhergehende irreversible Durchlässigkeitszunahme durch Risse bei Verzicht auf die KBS. Im Hinblick auf die Feldbedingungen gewinnt diese Erkenntnis an Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass Risse in mineralischen Dichtungskomponenten schon bei relativ kleinen Wassergehaltsreduzierungen (2 – 3 Masse-%) auftreten und die Langzeitfunktion hierdurch entschieden beeinträchtigt wird.

In den Säulenversuchen wird zudem gezeigt in wieweit die KBS bei Temperaturgradienten auf den Wassertransport in einem Oberflächenabdichtungssystem einwirkt. Auch hier kann die Schutzfunktion der KBS gezeigt werden.

Die Versuche und numerischen Simulationen belegen die Effektivität solcher Schutzschichten. Für die Ableitung einer allgemeinen Bemessungsregel reichen die Ergebnisse jedoch nicht aus. Im Zuge weiterer Untersuchungen – im Labor wie auch mit numerischen Modellen – wird sich zeigen wie sich Randbedingungen zur Materialauswahl, Schichtdicken usw. auf die Funktion der KBS auswirkt und welche Empfehlungen sich für die Praxis ableiten lassen.

## Dank

Unser besonderer Dank gilt der Abteilung Geotechnik der Materialforschung und –prüfanstalt Weimar (MFPA Weimar) bei der alle beschriebenen Laborversuche durchgeführt wurden.

Der erste Autor bedankt sich zudem herzlich für die Unterstützung seitens des Deutschen Akademischen Austausch Dienstes DAAD, der ihm einen Aufenthalt am Geoenvironmental Research Centre GRC, Cardiff University, Großbritannien ermöglicht hat. Ein weiterer Dank gilt Prof. H. R. Thomas und Dr. P. J. Cleall für deren Unterstützung und Betreuung während der Zeit in Cardiff.

## Literatur

- [1] Zeh, R. M., Witt, K. J.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen von Hausmülldeponien. Endbericht – Ergebnisse und Empfehlungen. Professur Grundbau. Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [2] Zeh, R. M., Witt, K. J., Wilhelm, L.: An Approach To The Assessment Of Cover Lining Systems. in: *Proceedings Sardinia 2001*, 8. International Waste Management and Landfill Symposium, CISA, Cagliari, 2001
- [3] Deponieverordnung DepV: Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Online-Version. Bundesumweltamt, Berlin, 2002
- [4] GDA Empfehlung E 2-31: Rekultivierungsschichten, in: *Bautechnik* 77 (9), S. 617 – 626, 2000
- [5] Siegmund, M., Witt, K. j., Alexiew, N.: Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsänderungen. 7. *Informations- und Vortragsveranstaltung über ‚Kunststoffe in der Geotechnik‘*, München, 2001
- [6] Fredlund, D.G.; Rahardjo H.: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, New York, 1993
- [7] Hoßfeld, L.: Untersuchungen zum Verhalten bindiger Dichtungsböden unter Schutzschichten mit der modifizierten ‚Weimarer Festwandzelle‘, Diplomarbeit, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar, unveröffentlicht, 2003
- [8] Witt, K. J., Siegmund, M.: Laboratory Testing of GCL under Changing Humidity. in:

*Proceedings Sardinia 2001*, 8. International Waste Management and Landfill Symposium, CISA, Cagliari, 2001

- [9] Fabian, F.: Einrichtung eines Säulenversuchsstandes zur Untersuchung von Transport- und Austrocknungsprozessen in Bodenmehrschichtsystemen, Studienarbeit, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar, unveröffentlicht, 2003a
- [10] Fabian, F.: Eignung und Untersuchung von Feuchtemesssonden zur Beobachtung von Wassergehaltsänderungen in Böden, Studienarbeit, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar, unveröffentlicht, 2003b
- [11] Becker, R., Hübner, C.: Messgeräteentwicklungen der ‚Soil Moisture Group‘, Kolloquium mit Workshop *Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis*, Karlsruhe, 3.-4. Juli 2003
- [12] Thomas, H. R., Cleall, P. J., Seetharam, S. C.: Numerical modelling of the thermal-hydraulic-chemical-mechanical behaviour of unsaturated clay. *Environmental Geomechanics*. Monte Verità, pp. 125 – 136, 2002

