

Wirkungsweise von Kapillarschutzschichten für mineralische Oberflächenabdichtungen

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt, Dipl.-Ing. Rainer M. Zeh,
Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar

Zusammenfassung

Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten sollen über lange Zeiträume hinweg die Infiltration von Niederschlagswasser sowie die Emission von Schadstoffen und Deponiegas auf ein vertretbares Maß begrenzen. Die Regelwerke sehen für Deponieklasse DK 1 rein mineralische Aufbauten vor. Als gleichwertige Alternative zur Kombinationsdichtung werden auch für höherwertige Deponien rein mineralische Dichtungssysteme gebaut. Durch klimatische Einwirkungen unterliegen solche Systeme einer saisonal schwankenden Bodenfeuchte. Bei einer sommerlich trockenen Rekultivierungsschicht werden auch mineralischen Dichtungen hohe Saugspannungen aufgeprägt, die zu Trockenrissen führen können. Eine 10 bis 15 cm starke Schicht aus Fein- bis Mittelsand, direkt auf der mineralischen Dichtung aufliegend, stellt einen wirkungsvollen Schutz gegen derart schädliche Einwirkungen dar. Eine solche Kapillarschutzschicht wirkt als Wasserspeicher und hält starke Saugspannungen, wie sie temporär in der Rekultivierungsschicht auftreten, von der Dichtung fern. Die Wirkungsweise wird durch Versuche belegt, numerische Simulationen erlauben eine Quantifizierung des Wasserhaushaltes unter Feldbedingungen bis hin zu einem ingenieurmäßigen Nachweis der Austrocknungssicherheit.

Einleitung

Mineralische Dichtungen werden in Oberflächenabdichtungssystemen für Deponien und Altablagerungen bei Regelaufbauten und bei Alternativen verwendet. Hierzu zählen auch geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD). Während bei einer Kombinationsdichtung bei Einhaltung der Überdeckung keine Austrocknungsgefahr für die Dichtung besteht und auch keine Durchwurzelung möglich ist, zeigen Test-

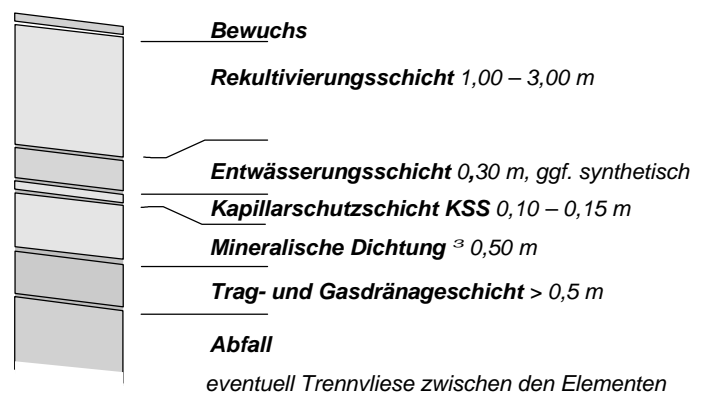


Abbildung 1:
Systemaufbau einer rein mineralischen Oberflächenabdichtung mit einer Kapillarschutzschicht

felder und Aufgrabungen rein mineralischer Aufbauten bei geringer Überdeckung an trockenen Standorten eine allmähliche Reduzierung der Dichtwirksamkeit [1, 2]. Ursache hierfür sind Risse infolge Austrocknung und Durchwurzlung.

Eine Maßnahme gegen diese zerstörenden Langzeiteinwirkungen ist eine an den Standort angepasste Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht, die durch die Verwendung qualifizierter Böden auch bei anhaltender Trockenheit als saisonaler Wasserspeicher über der Dichtung zur Verfügung steht. Als Ergänzung des Schutzes gegen Austrocknen einer mineralischen Dichtung wirkt eine dünne Kapillarschutzschicht (KSS) aus Feinsand, die zwischen Entwässerungsschicht und mineralischer Dichtung eingebaut wird. Abbildung 1 zeigt den Systemschnitt eines derartigen Aufbaus. Die KSS führt zu einer starken Dämpfung der saisonal schwankenden Saugspannungen und zur Verminderung des advektiven Wassertransportes nach oben. Die Dichtung bleibt dadurch ausreichend feucht und erfährt kein oder nur ein verträgliches Schrumpfen in Falle einer temporären Wassergehaltsabnahme. Die Widerstandsfähigkeit einer mineralischen Dichtung gegen Trockenrisse wird durch eine KSS deutlich erhöht. Über praktische Erfahrungen an Testfeldern und in Modellversuchen wurde bereits berichtet [3, 4]. In diesem Beitrag werden weitere Elementversuche und numerische Berechnungen vorgestellt, mit denen die Funktion analysiert und die relevanten Parameter abgeleitet werden. Die bodenmechanischen und bodenphysikalischen Grundlagen sowie Entwurfsgrundsätze werden erläutert.

Bodenphysikalische Grundlagen

In einer Oberflächenabdichtung, einem Mehrschichtsystem aus verschiedenen, nicht wassergesättigten Böden, stellt sich klimatisch bedingt eine wechselnde Bodenfeuchte ein. Einwirkungen aus Temperatur und zyklischer Infiltration bewirken in allen Schichten saisonale Schwankungen der Temperatur und der Potenzialgradienten, was zu anisothermen und isothermen Wasserbewegungen und somit zu einer wechselseitigen Beeinflussung der Bodenfeuchte führt. Unterstützt und überlagert werden diese Effekte durch tiefreichende Pflanzenwurzeln, die bei nicht ausreichendem Wasserdargebot der Rekultivierungsschicht auch der Dichtung Wasser entziehen können.

Bei bindigen Böden bewirkt jede Änderung des Wassergehaltes eine Volumenänderung. Entwässern führt zu Schrumpfen, bewässern zu Quellen. Dieser bekannte Zusammenhang ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Mit der Abgabe von Wasser erhöhen sich die Wasserspannungen, der Boden reduziert seine Porosität und damit sein Volumen, die Bodenaggregate rücken dichter zusammen. Aus der Kontraktion der Struktur ergeben sich besonders an den Kontakten grober Poren Zugbeanspruchungen zwischen den Bode-

naggregaten. Wird die Zugfestigkeit des Bodens bzw. der Bodenaggregate überschritten, bilden sich Risse, die sich je nach Dehnsteifigkeit und Isotropie der Feuchteverteilung vertiefen oder verzweigen. Während im Schrumpfversuch diese Risse erst bei dem sog. Restschrumpfen nahe der Schrumpfgrenze visuell wahrnehmbar sind, werden unter der Einspannung im Feld solche Risse bereits bei deutlich kleineren Volumendehnungen initiiert. Sie können im Mikro- wie Makrobereich verlaufen, sind u. U. visuell nicht erkennbar und führen zu einer stark erhöhten Wasserdurchlässigkeit der betroffenen Bodenschicht und damit zum Verlust der Dichtwirkung.

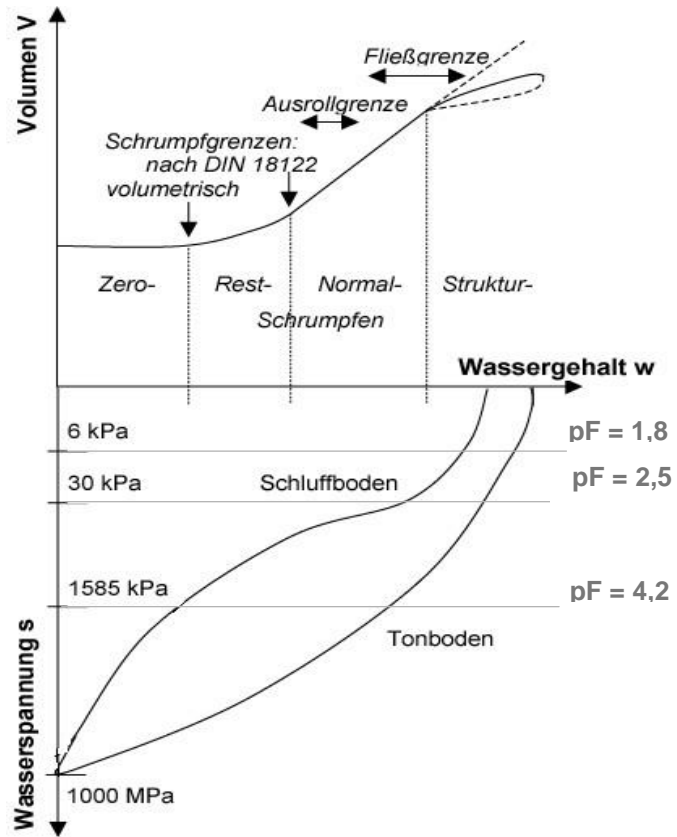


Abbildung 2:
 Schrumpfverhalten bindiger Böden, schematisch

Der Verlauf der Wasserspannungen im Zuge einer Schrumpfung und damit eine Wasser­gehaltsabnahme, hängen stark von der Bodenart und vom Mineralbestand ab. Weitere Faktoren sind die von dem Einbauwassergehalt, der Einbaudichte und der Einbauenergie abhängige Porenstruktur und der Verlauf der Entwässerung. Eine Strategie, Trockenrisse in mineralischen Dichtungen zu verhindern, liegt in der Begrenzung des Wasserentzugs auf ein verträgliches Maß, das vom Mineralbestand des Boden, von dessen Struktur und dessen Spannungszustand abhängt [5, 6]. Neben der pragmatischen Lösung, eine Kunststoffdichtungsdichtungsbahn als Konvektionssperre zu verwenden, kann ein schädlicher Wasserentzug aus der mineralischen Dichtung zum einen durch eine mächtige und qualifizierte Rekultivierungsschicht verhindert werden, zum anderen kann die mineralische Dichtung durch eine unmittelbar aufliegende dünne mineralische Schicht geschützt werden, mit der die Spitzen der Potenzialgradienten in der Dichtung stark abgemindert werden. Ein schädlicher Wasserentzug wird dadurch verhindert wird, dass die in der Rekultivierungsschicht bei Trockenheit wirkenden hohen Wasserspannungen nicht bis zur mineralischen Dichtung durchschlagen. Bodenphysikalisch verhindert solch eine Schutzschicht, dass das Matrixpotenzial der benachbarten Schichten auf die mineralische Dichtung vollständig aufgeprägt wird. Die Wirkungsweise und die Effekte einer derartigen Schicht werden mit den nachfolgend beschrie-

benen Laborversuchen und Berechnungen veranschaulicht. Details und Ergebnisse der umfangreichen Versuche wurden bereits in [7] berichtet.

Untersuchungen im Labor

Versuche und Materialien

Zur experimentellen Analyse der Wirkungsweise und der Effekte einer Kapillarschutzschicht wurden zwei unterschiedliche Versuchstechniken angewendet. In einer Festwandzelle wurden Trocken-/Nasszyklen gefahren. Die mit einer Schichtdicke von $d = 2,5 \text{ cm}$ bei unterschiedlichem Wassergehalt eingebauten Dichtungsmaterialien wurden mit und ohne KSS getestet. Nach einer definierten 5-tägigen

Trocknung durch Belüften wurden die Wassergehalte aller Schichten und die Wasserdurchlässigkeit des Dichtungsmaterials gemessen. Anschließend wurden die Proben definiert befeuchtet um die Wasserdurchlässigkeit nach der Regenerierung zu ermitteln. Die Zyklen wurden dann wiederholt. Diese für GTD entwickelte Versuchstechnik ist ausführlich in [3 u. 8] beschrieben, das Prinzip des Versuchsaufbaus ist in der Systemskizze in Abb. 4 dargestellt.

In Säulenversuchen wurden die thermisch-hydraulischen Prozesse in der Dichtung durch Aufbringen definierter Temperaturgradienten über eine Wärmequelle am Kopf der Säule beobachtet. Dichtungen ohne und mit KSS wurden im Maßstab 1:4 gegenüber einer realen Anwendung bei unterschiedlichen Wassergehalten in die isolierte Versuchsvorrichtung eingebaut und mit einer konstanten Temperatur beaufschlagt. Die Entwicklung des Temperaturgradienten und der Wasserspannungen innerhalb der Schichten wurde gemessen. Hierzu wurden auch neuartige Feuchtemesssensoren eingesetzt (Sisomop-Sensor, [9]). Die Versuchstechnik und Datenerfassung sind in [4 u. 10] beschrieben. Eine Systemskizze zur thermischen Beanspruchung ist aus Abb. 5 zu entnehmen.

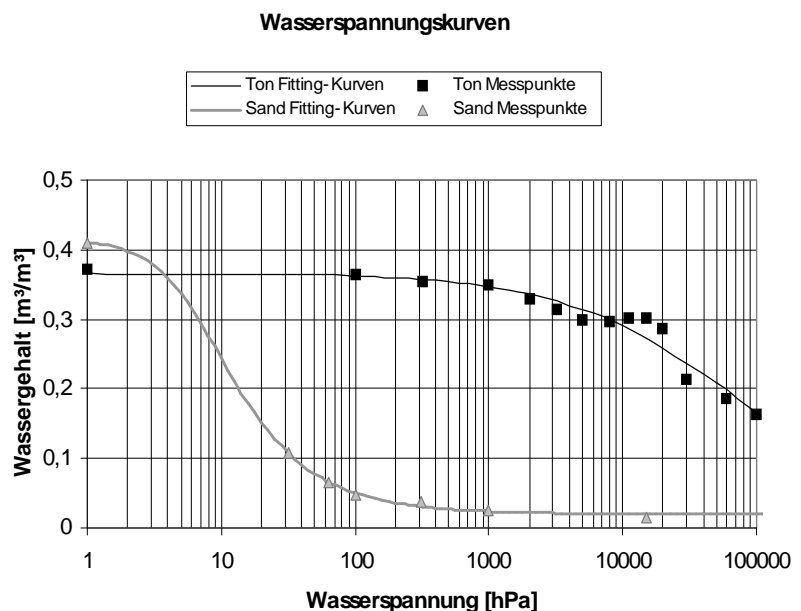


Abbildung 3:
Wasserspannungskurven für den Sand und den Ton Plessa

Kennwerte	Ton Plessa	Sand für KSS
Tonanteil [%]	39	
Schluffanteil [%]	61	2
Sandanteil [%]	0	98
d_{60} / d_{10} [mm]	0,006	0,8 / 0,22
Fließgrenze w_l [%]	44,9	
Ausrollgrenze w_p [%]	21,4	
Schrumpfgrenze w_s [%]	18,8	
Plastizitätszahl I_p [%]	23,5	
Konsistenzzahl I_c [-]	0,94	
Wasseraufnahme w_a [%]	116,5	
Glühverlust V_{Gl} [%]	4,47	
Proctorwerte ρ_{pr} [g/cm ³]	1,649	
$D_{Pr} = 1,0$ w_{pr} [%]	21,0	
w bei $D_{Pr} = 0,97$ [%]	16,6 / 24,4	
Wasserdurchlässigkeit k_f bei $D_{Pr} = 1,0$ [m/s]	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 1: Bodenkenngrößen der verwendeten Materialien

Mit diesen beiden Versuchstechniken wurden Dichtungsmaterialien konkreter Deponiebauprojekte untersucht. Hier werden exemplarisch die Ergebnisse von Versuchen am Ton Plessa dargestellt, einem mittelplastischen Ton. Für die Kapillarschutzschicht wurde ein eng gestufter Mittelsand verwendet. Die Kenngrößen beider Materialien sind in Tabelle 1 angegeben. Abb. 3 zeigt die Wasserspannungskurven der Entwässerung. Der Wassergehalt ist hier nach der Nomenklatur der Bodenphysik volumetrisch aufgetragen.

Versuchsergebnisse

Mit der Versuchstechnik in der Festwandzelle werden Veränderungen der Wasserdurchlässigkeit mineralischer Dichtungsmaterialien bei definierten Trocken - Nasszyklen ermittelt. Die Versuche dienen in erster Linie der Analyse von Effekten bei Trockenstress und anschließender Regenerierung als Folge extremer natürlicher klimatischer Einwirkungen [3, 8]. Weiterhin kann mit dieser Versuchstechnik direkt der Grenzwassergehalt oder die Saugspannung bei Beginn der Rissbildung ermittelt werden.

Mit den hier vorgestellten Versuchsergebnissen soll die schützende Wirkung einer KSS am Beispiel der Wassergehaltsänderungen bei der ersten 5-tägigen Trocknung aufgezeigt werden. Das Dichtungsmaterial Plessa wurde jeweils bei einem Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ unter- bzw. überoptimal (trocken/feucht) eingebaut. Bei beiden Einbauwassergehalten wurden Versuche mit und ohne Schutzschicht gefahren. Abbildung 4 veranschaulicht exemplarisch die Änderung des Wassergehaltes in der Dichtung infolge Trocknung. Die

Endpunkte sind Messergebnisse, der Verlauf wurde zur besseren Zuordnung linear angedeutet.

Die ungeschützte Dichtung zeigt bei der Trocknung erwartungsgemäß eine sehr starke Reduktion des Wassergehaltes. In den 2,5 cm dicken Proben sind nach dieser ersten Trocknung Risse visuell wahrnehmbar. Bei gleicher Trocknungsenergie bleiben dagegen die mit der dünnen KSS geschützten Dichtungen vollständig intakt. Der überoptimal eingebaute Ton verändern seinen Wassergehalt nicht signifikant, der unteroptimal eingebaute sättigt sich trotz Belüftung etwas auf, indem er der KSS und dem Auflager Wasser entzieht. Die Saugspannung in der Dichtung betrug nach Einbau ca. 10 kPa und nahm bei den ungeschützten Proben im Zuge der Trocknung der Entwässerungskurve zufolge auf Werte weit über 10 000 kPa zu. Bei den geschützten Proben gab es keine signifikanten Änderungen der Saugspannung, die Proben behielten den nahezu gesättigten Zustand oder näherten sich diesem.

Die Entwicklung der Wasserdurchlässigkeit verläuft in etwa parallel. Bei den geschützten Dichtungen nahm die Wasserdurchlässigkeit durch die Trocknung geringfügig zu (Faktor 2), regenerierte sich aber bei der Wiederbefeuchtung. Die Wasserdurchlässigkeit der ungeschützten Proben fiel aufgrund der Risse um 2 Größenordnungen ab, wobei

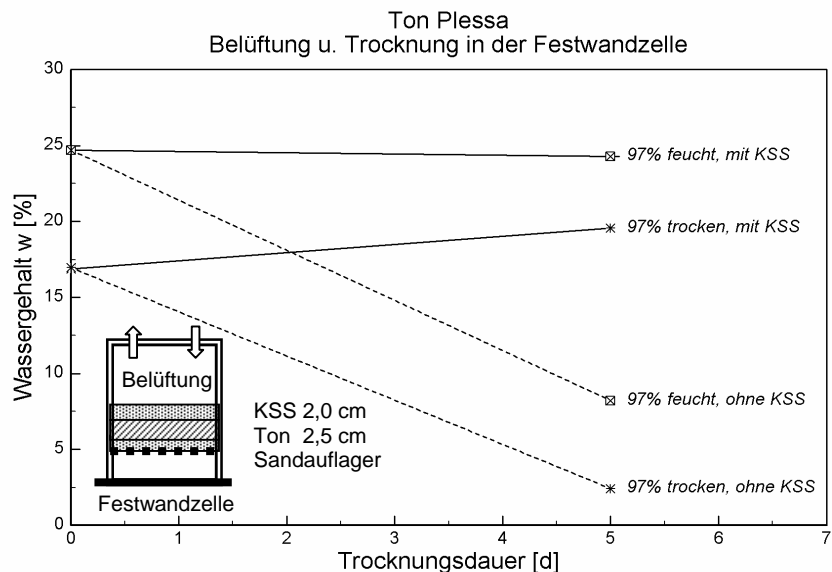


Abbildung 4:
 Verlauf der Wassergehalte der Dichtung mit und ohne KSS

auch hier eine geringe Regenerierung gemessen wurde. Bereits diese einfachen Versuche mit einer definierten Trocknung verdeutlichen die schützende Wirkung einer Schutzschicht. Obwohl die KSS und das Auflager bei der Belüftung Wasser abgaben, also in der Dichtung ein Wasserfluss initiiert wurde, zeigten die geschützten Dichtungen keine schädlichen Änderungen des Wassergehaltes, während die ungeschützten bei dieser Trocknungsenergie zerstört wurden. Die gleichen Ergebnisse haben sich bei zahlreichen Vergleichsversuchen mit anderen Dichtungsmaterialien und mit anderen feinsandigen und schluffigen Böden als KSS bestätigt.

In Säulenversuchen lassen sich eindimensionale thermische und hydraulische Effekte innerhalb eines Abdichtungssystems im Labormaßstab unter definierten Randbedingungen analysieren. Über erste Untersuchungen zur Entwicklung der Wasserspannungen in einer KSS geschützten Dichtungslage wurde in [4] berichtet. Die hier vorgestellten Versuche wurden mit einer neuen Messtechnik i. W. zur Verifikation und Kalibrierung numerischer Untersuchungen gefahren. Exemplarisch wird die Entwicklung des Wassergehaltes in einer Dichtung aus Ton Plessa bei einem aufgeprägten Temperaturgradienten vorgestellt. In dieser Versuchsreihe wurde eine ca. 14 cm dicke mineralische Dichtung mit unterschiedlichen Dichten eingebaut ($D_{Pr} = 0,94\text{-tr}; 1,01; 0,9\text{-f}$). Die Sandschutzschicht auf der Dichtung hatte eine Stärke von 3,8 cm. Der Temperaturgradient wurde durch eine Wärmequelle am Kopf aufgebracht und über einen Zeitraum von 10 Tagen bei $\Delta\vartheta = 8,6^\circ\text{K}$ konstant gehalten. Die zeitliche Änderung des Wassergehaltes ist für einen typischen Versuch dieser Reihe in Abbildung 5 dargestellt.

Unmittelbar nach Aufbringen des Temperaturgradienten setzten eine Verdunstung in der KSS und ein zur kalten Seite (zum Auflager) gerichteter Wassertransport ein (fallende Kurve in Abb. 5). Der Wassergehalt der Dichtung und damit deren Sättigungsgrad nahmen etwas zu (steigenden Kurven in Abb. 5), während die anfangs feuchte KSS trocken fiel. Auch bei dieser isothermen Beanspruchung zeigt sich anfänglich die schützende Wirkung der KSS in der Trocknungsphase. Die Einbaudichte hatte keinen Einfluss auf den tendenziellen Verlauf der Bodenfeuchte. Bei einer parallelen Versuchsserie ohne KSS wurde dagegen der oben beschriebene Effekt beobachtet. Der temperaturinduzierte Wassertransport führt sofort zu einer Austrocknung der Dichtungsoberfläche, was sich mit länger anhaltendem Gradienten zur Tiefe hin fortsetzt und die Dichtung zerstört

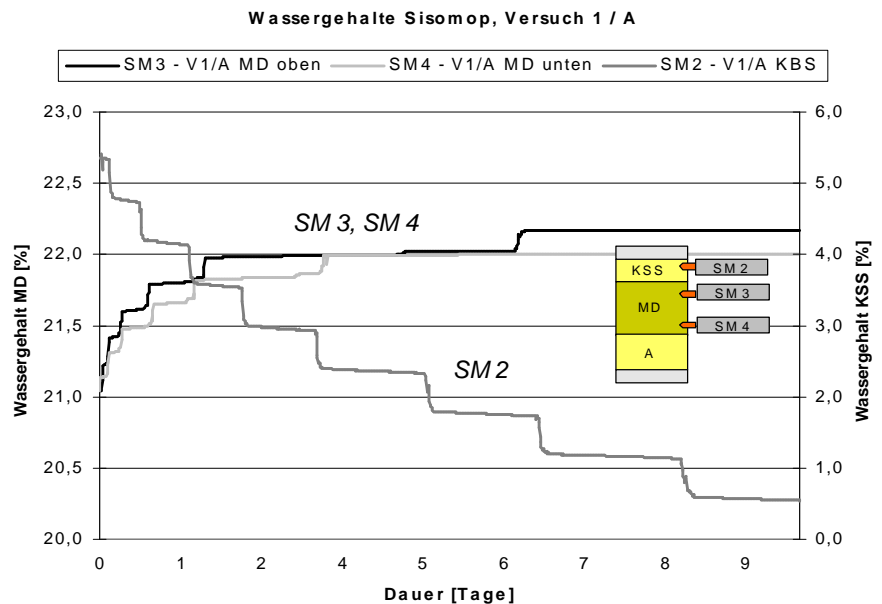


Abbildung 5:
 Verlauf der Wassergehalte in der geschützten Dichtung (steigend) und in der KSS (fallend)

anfänglich die schützende Wirkung der KSS in der Trocknungsphase. Die Einbaudichte hatte keinen Einfluss auf den tendenziellen Verlauf der Bodenfeuchte. Bei einer parallelen Versuchsserie ohne KSS wurde dagegen der oben beschriebene Effekt beobachtet. Der temperaturinduzierte Wassertransport führt sofort zu einer Austrocknung der Dichtungsoberfläche, was sich mit länger anhaltendem Gradienten zur Tiefe hin fortsetzt und die Dichtung zerstört

Mit diesen Säulenversuchen wurden Wasserspannungen, Wassergehalte und Wasserflüsse in der Dichtung und in der KSS gemessen. Die numerischen Modelle wurden mit den Ergebnissen kalibriert um dann die Langzeiteffekte durch eine numerische Simulation aufzeigen zu können.

Numerische Analysen

Die Bedingungen der Säulenversuche wurden mit dem Programm SUMMIT simuliert, mit dem der 1-dimensionale Wasser-, Wasserdampf- und Temperaturtransport in Bodenmehrschichtsystemen für beliebig lange Zeiträume berechnet werden kann [11]. Das Modell wurde an den Messungen der Säulenversuche unter Verwendung der ermittelten Kennwerte und Wasserspannungskurven der Materialien kalibriert. Die Berechnungen wurden daraufhin auf andere Temperaturgradienten und auf längere Zeiträume ausgedehnt. Als Ergebnis erhält man den zeitlichen Verlauf der Wasserspannungen und der Wassergehalte in den einzelnen Schichten.

Abbildung 6 zeigt das mit dieser Simulation berechnete Profil der Wasserspannung für eine ungeschützte Dichtung aus Ton Plessa bei einer Beaufschlagung mit einem konstanten Temperaturgradienten $\Delta\vartheta = 8,6^\circ \text{ K}$. Die Schichtstärken sind dem Bodenprofil neben der Ordinate zu entnehmen. Die Kurven geben den Verlauf der Wasserspannungen beim Einbau sowie nach einer Zeitdauer von 5, 10, 30 und 150 Tagen wieder (Versuch B). Die Ergebnisse der Simulation der Feuchteverhältnisse eines vergleichbaren Aufbaus mit einer KSS sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Ausgangswassergehalte unterscheiden sich einbaubedingt geringfügig, daher die ebenfalls unterschiedlichen Wasserspannungen im Ausgangszustand. Bei der ungeschützten Dichtung (Abb. 6) setzt unmittelbar nach Aufbringen des Temperaturgradienten ein nach unten gerichteter Wassertransport ein, der von oben nach unten gerichtet eine Entwässerung und damit eine Trocknung verursacht. Am Kopf der Dichtung nehmen die Wasserspannungen von Beginn der Einwirkung an zu, d. h. der Wassergehalt nimmt ab. Der gegen den Temperaturgradienten gerichtete Wassertransport führt anfangs zu einer Aufsättigung am Fuß. Mit anhaltendem Wassertransport trocknet jedoch auch hier allmählich die Dichtung aus. Bei dem Ton Plessa liegt je nach Einbaubedingungen ab einer Wasserspannung von ca. 200 kPa ein kritischer Zustand vor, ab ca. 1000 kPa sind Trockenrisse zu erwarten. Dieser Zustand wird unter den betrachteten Randbedingungen etwa nach 100 Tagen konstantem Temperaturgradient erreicht.

Bei der durch die KSS geschützten Dichtung entwickelt sich die Änderung der Bodenfeuchte günstiger (Abb. 7) Die Dichtung sättigt sich erwartungsgemäß etwas auf, solange die KSS Wasser liefern kann. Bei der Simulation mit einer Stärke der KSS von 5 cm wird innerhalb des betrachteten Zeitraumes von 150 Tagen der Ausgangswassergehalt in der Dichtung

nicht unterschritten bzw. die Ausgangswasserspannung nicht überschritten. Bei noch längeren Zeiträumen trocknet die KSS völlig aus, so dass ab dann kein wesentlicher Unterschied zur ungeschützten Dichtung besteht. Für praktische Anwendungen ist eine derart lange Einwirkung bei kontinentalem humiden Klima nicht zu erwarten.

Das Programm SUMMIT berechnet die Feuchteänderungen bei einem konstanten Temperaturgradienten. Wechselnde klimatische Einwirkungen, Verdunstung oder eine Infiltration von Niederschlagswasser, wie dies unter Feldbedingungen auftritt, lassen sich damit nicht untersuchen.

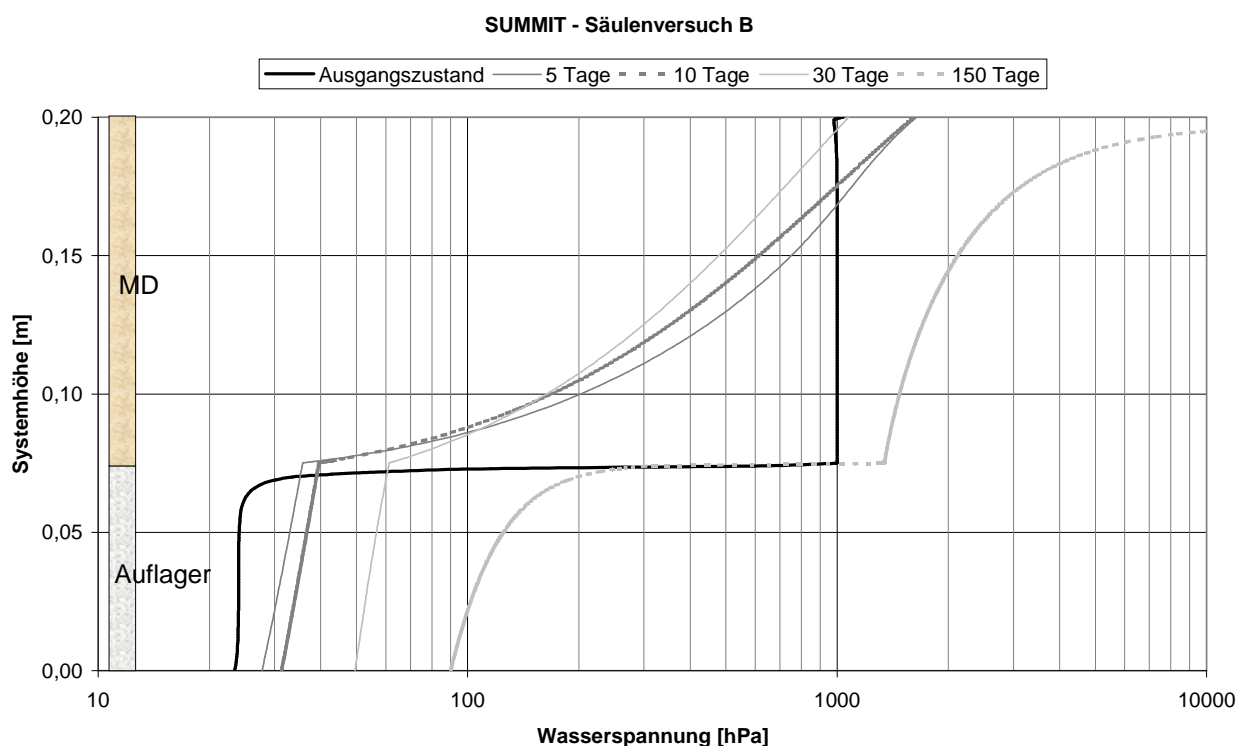


Abbildung 6:

Simulation der zeitlichen Entwicklung der Wasserspannung, Temperaturgradient

$\Delta\vartheta = 8,6^\circ\text{K}$, Ton Plessa ungeschützt

Zur Berechnung von saisonalen Schwankungen des Wasserhaushaltes werden in Deutschland vor allem die Modelle HELP und BOWAHALD angewendet [12]. Eine Gegenüberstellung der Modelle und deren Möglichkeiten findet sich z. B. in [13 u. 14].

SUMMIT - Säulenversuch A

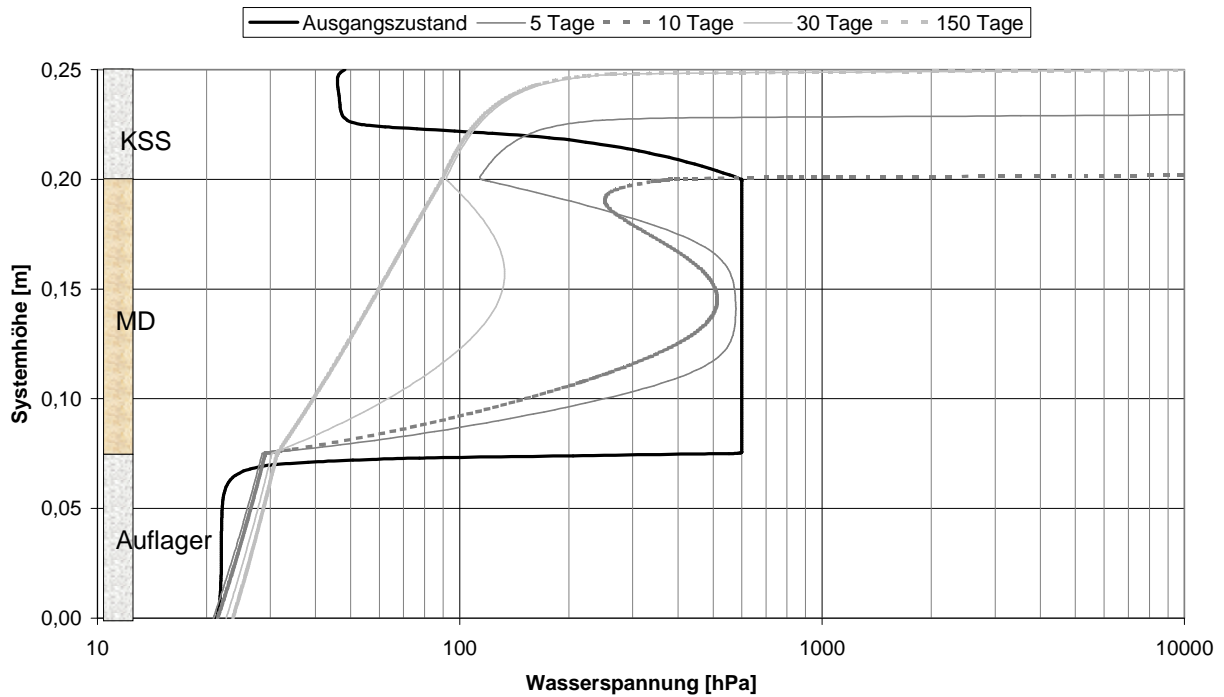


Abbildung 7:
 Simulation der zeitlichen Entwicklung der Wasserspannung, Temperaturgradient
 $DJ = 8,6^\circ K$, Ton Plessa mit KSS

Zur Untersuchung der Wirkungsweise einer KSS unter konkreten Standortbedingungen und verschiedenen Dichtungsaufbauten wurde das Programm BOWAHALD angewendet, da sich damit direkt die Wassergehalte der einzelnen Bodenschichten auslesen lassen. Die Ergebnisse dieser Analyse für die Klimaverhältnisse im relativ trockenen Thüringer Becken wurden in [7] publiziert und werden hier nur zusammenfassend dargestellt. Betrachtet wurden die Mindestanforderungen des Regelaufbaus nach DEP V DK 1, ein zusätzlicher Schutz durch eine 15 cm starke KSS aus Mittelsand sowie eine Verstärkung der Rekultivierungsschicht auf 1,5 m. Als Ergebnis wurde die langjährige Schwankung des Wassergehaltes in der mineralischen Dichtung bewertet.

Die numerische Analyse ergab für den untersuchten Standort, dass für die gewählten Materialien der Regelaufbau auch ohne KSS hinreichend austrocknungssicher ist, wenn gleich auch saisonal Wassergehaltsschwankungen zu erwarten sind. Mit dem Schutz der Dichtung durch eine KSS werden diese Ausschläge jedoch signifikant abgedämpft, die Einwirkung auf die Dichtung damit deutlich abgeschwächt. Der gleiche Effekt kann auch durch eine Verstärkung der Rekultivierungsschicht erreicht werden. Für das untersuchte Beispiel hatte die KSS den gleichen Effekt, wie eine Verstärkung der Rekultivierungsschicht von 1,0 auf 1,5 m.

Schlussfolgerungen

Die Wirkungsweise einer Kapillarschutzschicht (KSS) aus einem Fein- bis Mittelsand, die auf einer mineralischen Dichtung aufliegt, wurde mit den Versuchen in der Festwandzelle belegt. Die gleiche Trocknungsenergie, die bei einer ungeschützten Dichtung zu Rissen und zu einem irreversiblen Verlust der Dichtwirkung führt, erzeugt in einer durch eine KSS geschützten mineralischen Dichtung keine schädlichen Wasserspannungen. Der Wasserhaushalt in der mineralischen Dichtungskomponente bleibt stabil und ausgeglichen. Die KSS gibt das gespeicherte Wasser an die Dichtung ab, dämpft gleichzeitig die Amplitude der Einwirkungen aus extremen Wasserspannungen der Überlagerung und verhindert so eine Austrocknung der mineralischen Dichtung. Auch bei einem thermisch induzierten Wassertransport in der Dichtung, wie dies bei einer geringmächtigen Überlagerung in den Sommermonaten fallend, in den Wintermonaten steigend auftreten kann, wirkt eine KSS ausgleichend, stellt das Wasser für den anisothermen Wassertransport bereit und verhindert so eine Schädigung der Dichtung.

Die in den Laboruntersuchungen aufgezeigten Phänomene wurden durch numerische Berechnungen mit den gängigen Programmen verifiziert. In der Gesamtbetrachtung ergab die Analyse des Wasserhaushaltes, dass der Effekt einer KSS stark von den Randbedingungen, von den Schichtstärken und Kennwerten der Materialien sowie von dem lokalen Klima abhängt. Diese hier nicht im Detail dargestellte Analyse bestätigt, dass die Wasserdurchlässigkeit des Dichtungsmaterials und die Hysterese Ent- und Bewässerungskurve stark den langfristigen Trend von Wassergehaltsschwankungen beeinflussen. Dichtungen mit extrem geringer Wasserdurchlässigkeit, z. B. der oben beschriebene Ton Plessa, sind während einer Trockenperiode stärker gefährdet und regenerieren schlechter, als Böden mit geringem Tonanteil und einer Wasserdurchlässigkeit in der Größenordnung um $k \sim 5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Die numerische Analyse ergab nicht nur, dass Böden mit hohem Tongehalten und hoher Plastizität einen Schutz gegen Austrocknen benötigen, sondern auch, dass eine KSS in Verbindung mit einer angepassten Rekultivierungsschicht gerade für solche Böden eine wirkungsvolle Maßnahme gegen die Austrocknungsgefährdung ist. Dies gilt sinngemäß auch für Dichtungen, bei denen als mineralische Komponente eine GTD verwendet wird. Eine KSS ist somit zumindest eine konstruktive Maßnahme, welche die Austrocknungsgefahr einer mineralischen Dichtung deutlich reduziert, indem sie die klimatischen Einwirkungen dämpft und den Wasserentzug puffert. Diese Maßnahme wirkt allen ungünstigen klimatischen Einwirkungen, Temperaturgradienten und Saugspannungen, entgegen und erhöht so die Beanspruchbarkeit und Widerstandsfähigkeit einer mineralischen Dichtung. Dies gilt nicht nur für die in den hier dargestellten Versuchen verwendeten Materialien, auch für andere bindige Dichtungsmaterialien und für sandig schluffige Schutzschichten wurde die Schutzwirksamkeit gegen

Austrocknung in Versuchen nachgewiesen. Als Wurzelsperre ist eine KSS nur bedingt geeignet, sie verhindert eine Durchwurzelung lediglich durch das Wasserdargebot. Ist dies aufgezehrt, gehen die Wurzeln dennoch zur Dichtung.

Die numerische Modellierung mit den Programmen HELP oder BOWAHALD erlaubt eine weitergehende Optimierung realer Systeme. Sind die Klimadaten, die Kennwerte der Materialien und die Grenzbedingungen der Trockenrissbildung bekannt, lässt sich der Effekt einer KSS quantitativ darstellen. Damit kommt man einer standortspezifischen wirtschaftlichen Optimierung und einer ingenieurmäßigen Bemessung eines Dichtungssystems näher.

Dank

Die Autoren danken der Abteilung Geotechnik der Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar (MFPA Weimar) unter der Leitung von Dipl.-Ing. K. Lemke für die Unterstützung bei der Entwicklung der Versuchstechnik sowie für die Begleitung und Durchführung der Laborversuche. Besonderer Dank gilt der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen.

Literatur

[1] **Ramke, H.-G. et al. (2002):**

Ergebnisse des Status-Workshops ‚Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen‘, in RAMKE, GARTUNG, HEIBROCK, LÜKEWILLE, MELCHIOR, VIELHABER, BOHNE, MAIER-HARTH & WITT (Hrsg.): Tagungsband - Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Heft 03

[2] **Roesler, A. C., Benson, C. H. (2002):**

Field Hydrology and Model Predictions for Final Covers in the Alternative Assessment Program – 2002. Geo Engineering Report No.02-08, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, <http://www.acap.dri.edu/>

[3] **Siegmund, M., Witt, K. J., Alexiew, N. (2001):**

- Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsänderungen, 7. Informations- und Vortragsveranstaltung über ‚Kunststoffe in der Geotechnik‘, März 2001 München, DGGT
- [4] **Zeh, R. M., Witt, K. J. (2003):**
Die Wirkung kapillarbrechender Schichten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponie – erste Ergebnisse. in WITT & KATZENBACH (Hrsg.): 1. Symposium Umweltgeotechnik der DGGT, 08.-09.10.2003 Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10, Band 1, Bauhaus-Universität Weimar, S. 197 – 208
- [5] **Witt, K. J., Zeh, R. M. (2004):**
Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen. in KRANERT (Hrsg.): *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*, Band 81, März 2004, S. 83 – 98
- [6] **Witt, K. J., Zeh, R. M., (2005):**
Cracks due to desiccation in cover lining systems – Phenomena and design strategy. Int. Workshop „Hydro-Physico-Mechanics of landfills“ LIGRIM, Grenoble University, March 2005
- [7] **Witt, K. J., Zeh, R. M., Fabian, F. (2004):**
Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. *Müll und Abfall*, Heft 11/2004, Erich Schmidt Verlag
- [8] **Köditz, J., Witt, K. J. u. v. Maubeuge, K. P. (2004):**
Laboratory tests on the effect of static load to the desiccation of GBR-C. Proc. 3rd Europ. Geosynthetics Conf., Munich 2004
- [9] **Becker, R., Hübner, C. (2003):**
Messgeräteentwicklung der „Soil Moisture Group“. Kolloquium mit Workshop Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Karlsruhe, 3.-4. Jul 2003
- [10] **Fabian, F. (2004):**
Analytische und numerische Betrachtungen zur Wasserbewegung in Boden-Mehrschichtsystemen von Oberflächenabdichtungen. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

- [11] **Döll, P. (1996):**
Modeling of moisture movement under the influence of temperature gradients: desiccation of mineral liners below landfills. Diss. Bodenökologie und Bodengenese, TU Berlin, Heft 20
- [12] **GDA Empfehlung E 2-30 (1998):**
Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien. Bautechnik 75 (9), S. 616 – 626 . Version 2004 siehe www.gdaonline.de
- [13] **Berger, K., Dunger, V. (2000):**
Vergleichende Simulationsrechnungen mittels der Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD, Proceedings zum Weiterbildungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden- und Deponiewasserhaushalt, 7/8. April 2000, Dresden
- [14] **Zeh, R.; Witt, K. J. (2002):**
Water Balance Models and Programmes - Comparisons and Calculation Results, in DE MELLO & ALMEIDA (eds): Environmental Geotechnics (4th ICEG), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 113 – 118

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt, Dipl.-Ing. Rainer M. Zeh
Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau,
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11c, D-99423 Weimar
Tel.: 03643-584560 Fax: 03643-584564
Mail: kj.witt@bauing.uni-weimar.de ; rainer.zeh@bauing.uni-weimar.de
Web: www.uni-weimar.de/geotechnik