

Tonmineralische Abdichtungselemente in Oberflächenabdichtungssystemen

Karl Josef Witt

1 Einleitung

Tonmineralische Dichtungen werden in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien aus natürlichen oder aus aufbereiteten verdichteten bindigen Böden hergestellt. In den aktuellen deutschen Regelwerken werden eine Schichtmächtigkeit von 50 cm und eine Wasserdurchlässigkeit $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (DK I, II) bzw. $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (DK III) gefordert. Regelwerke anderer Nationen legen vergleichbare Mindestanforderungen für mineralische Dichtungen fest. Neben der geringen Wasserdurchlässigkeit wird gefordert, dass das Gesamtsystem standsicher und beständig gegen Witterungseinwirkungen, Wühltiere und Erosion sein muss. Die mineralische Dichtungsschicht soll hinreichend flexibel sein, um sich den zu erwartenden Verformungen des Deponiekörpers schadfrei anpassen zu können. Sie darf nicht durchwurzelt werden und unter den wechselnden klimatischen Einwirkungen nicht austrocknen. Diese hohen Anforderungen können tonmineralische Dichtungen nur dann erfüllen, wenn sie in dem System ausreichend geschützt eingebettet sind. Einem Oberflächenabdichtungssystem wird daher eine Dicht- und eine Schutzfunktion zugeordnet. Die Zusickerung von Niederschlagswasser wird durch die geringe Wasserdurchlässigkeit der Dichtung begrenzt und bei einer Kombinationsdichtung durch eine zusätzliche Konvektionssperre unterbunden, einer aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn (KDB). Die gesamte Überlagerung aus Dränageschicht, Rekultivierungsboden und Bewuchs wie auch die Auflager- und Gasdränageschicht müssen den Schutz der mineralischen Dichtung garantieren.

Bei einer empirisch-ingenieurmäßigen Bemessung einer Oberflächenabdichtung und speziell der tonmineralischen Komponente werden Beanspruchung und Beanspruchbarkeit zu unterscheiden. Die Beanspruchung der Dichtung ergibt sich einerseits aus wechselnden klimatischen Einwirkungen des Standortes in Verbindung mit dem Wasserhaushalt in der Über- und Unterlagerung, andererseits aus den mechanischen Einwirkungen, der Überlagerungsspannung und der Zwangsverformung der Dichtung bei Setzungen und Sackungen. Die Beanspruchbarkeit einer tonmineralischen Dichtung ist ihre Fähigkeit, wechselnden Temperatur- und Feuchteverhältnissen, Biege- und Scherverformungen schadfrei zu widerstehen. Der Beitrag behandelt die Möglichkeiten, durch Materialauswahl und Einbaubedingungen die Beanspruchbarkeit, hier im Wesentlichen die Widerstandsfähigkeit gegenüber zyklischen Feuchteschwankungen, zu beeinflussen.

2 Materialien und Eigenschaften

2.1 Bodenmechanische Charakterisierung

Die Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen ist die Eigenschaft, infiltriertes Niederschlagswasser zu speichern oder abzuleiten um die Zusickerung in den Abfallkörper zu begrenzen. Als mineralisches Dichtungsmaterial eignen sich verdichtete feinkörnige Böden geringer bis mittlerer Plastizität mit überwiegend kaolinitisch-illitischen Mineralbestand. Ausgeprägt plastische Böden sollten wegen der starken Quell- und Schrumpfeigenschaften nicht verwendet werden, wenn Wassergehaltsschwankungen nicht ausgeschlossen werden können. Nach TA-Abfall, Anhang E soll der Tonanteil ($\leq 2 \mu\text{m}$) mindestens 20 % betragen. Solche Böden haben erfahrungsgemäß Plastizitätszahlen $I_p \leq 25 \%$. Erfahrungswerte für die undrained Kohäsion liegen im Bereich $c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$. Die Böden haben im gesättigten Zustand eine relativ geringe Zugfestigkeit $\sigma_t \leq 3 \text{ kN/m}^2$. Der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze w_s liegt bei diesen Böden etwa um den Wert $0,22 \cdot I_p$ (3 bis 5 %) unter dem an der Ausrollgrenze.

Die Gesamtporosität einer mineralischen Abdichtungsschicht setzt sich aus den Primärporen (Inner-Aggregatporen) in der Mikrostruktur der Tonpartikel und aus den Sekundärporen (Intra-Aggregatporen) zwischen den künstlich geformten Partikelaggregaten zusammen. Die Größenverteilung der Primärporen wird durch die Genese und den Mineralbestand beeinflusst. Die Sekundärporen hängen vom Bildungsprozess des Bodens ab, von der aus Verwitterung, Einbaubedingungen, Verdichtung, Konsolidation und Entwässerung resultierenden Makrostruktur. Von diesem Anteil der Porosität hängt auch das anfängliche Quell- und Schrumpfverhalten ab. Bei hohen Saugspannungen ist für diese Prozesse aber in zunehmenden Maße auch die Mikrostruktur maßgebend. Die Verteilung der Porengrößen lässt sich experimentell ermitteln, z. B. durch Quecksilberporosimetrie oder Elektronen-Raster-Mikroskopie.

Zur Beurteilung der Eignung von Böden als Abdichtung wird die im Labor nach DIN 18130 ermittelte gesättigte Wasserdurchlässigkeit herangezogen. Da alle Poren mit Wasser gefüllt sind, ergibt sich im gesättigten Zustand der maximal mögliche Wert, der stark von der Porenweitenverteilung der Sekundärporen, also von der Struktur und damit vom Einbauwassergehalt w_c und von der Verdich-

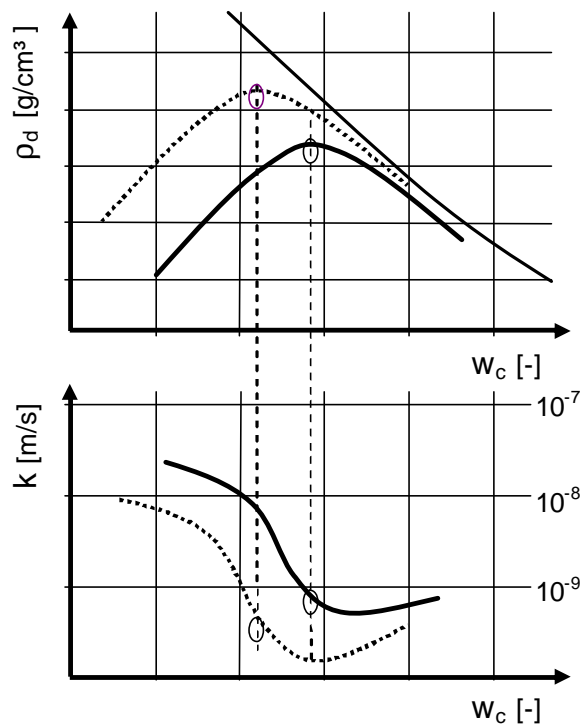


Abb.1: Qualitativer Einfluss der Verdichtungsenergie und des Einbauwassergehaltes auf die Wasserdurchlässigkeit

tungsenergie abhängt. Eine systematische Untersuchung für ein Dichtungsmaterial wird in RÜCKERT (2006) vorgestellt. Bei einem Einbau oberhalb des Proctor-Optimums werden kleiner Porenradien und damit deutlich geringere Durchlässigkeiten erreicht (Abb. 1). Unter sonst gleichen Bedingungen und unter der Annahme einer Analogie der Porenströmung als Poiseuille'sche Rohrströmung, wirkt die Sekundär-Porosität kubisch auf die Wasserdurchlässigkeit nach Sättigung ein (CHAPUIS ET AL., 2006). Quellfähige Tone, z. B. Bentonite in Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD), zeigen nicht diese ausgeprägte Abhängigkeit und erreichen auch bei unteroptimalem Einbau und geringer Überlagerungsspannung eine hohe Dichtwirkung.

In Regelwerken zur Praxis des Deponiebaus verschiedener Länder werden für Dichtungsschichten in Oberflächenabdichtungen üblicherweise ein Verdichtungsgrad von $D_{pr} \geq 97\%$ (bezogen auf einfache Proctordichte) bzw. $D_{pr} \geq 95\%$ (bezogen auf verbesserte Proctordichte), ein Wassergehalt im Bereich des Proctor-Optimums oder geringfügig darüber und gelegentlich eine Mindestwassersättigung von $S_r \geq 90\%$ bzw. ein Luftporengehalt von $n_a \leq 5\%$ gefordert. Mit diesen Werten erreicht ein bindiger Boden der oben beschrieben Charakterisierung unter baupraktischen Aspekten die optimale Dichtwirkung bei relativ geringen Saugspannungen im Bereich $s \leq 200$ kPa ($pF \leq 3,3$). Physikalischer Hintergrund dieser optimalen Dichtigkeit ist eine geringe Sekundärporosität bei gleichzeitig geringer Streuung der Porenweitenverteilung. Bei bindigen Böden lässt sich dies nur durch eine kombinierte statische und knetende Verdichtung erreichen, während dynamische Verdichtungsenergie wenig effektiv ist.

Im teilgesättigten Zustand, in dem sich eine Dichtung üblicherweise im Feld befindet, ist die Wasserdurchlässigkeit geringer als im standardisierten Laborversuch unter gesättigten Verhältnissen. Zwei Effekte überlagern sich hierbei. Zum einen entwässern zuerst die großen Poren, so dass mit abnehmendem Wassergehalt der Fluss in kleineren Poren stattfindet, in denen größere Fließwiderstände wirken. Zum andern erhöht sich mit der Entwässerung der Widerstand durch den Zuwachs der Saugspannung. Die Abhängigkeit wird über die van Genuchten Beziehung oder vergleichbare Ansätze modelliert. Abb.2 zeigt die Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit von der Saugspannung für ein reales Dichtungsmaterial bei unterschiedlichem Einbauwassergehalt. Bei kleinen Gradienten, so auch bei der Einsickerung von Niederschlagswasser unter Eigengewicht, kann in überkonsolidierten expansiven Böden sogar eine totale Sperrwirkung aufgrund der Wasserbindekräfte auftreten.

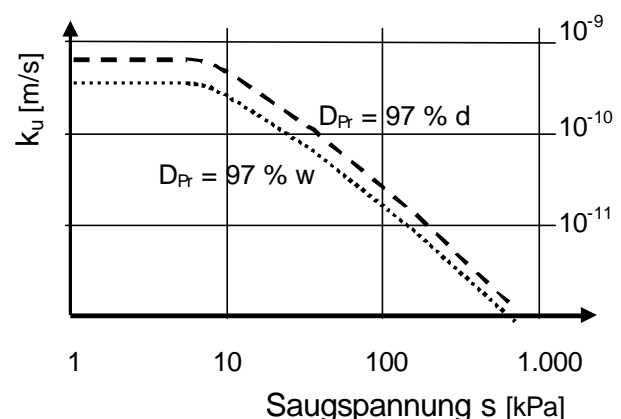


Abb.2: Qualitativer Einfluss der Saugspannung auf die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit eines bindigen Bodens

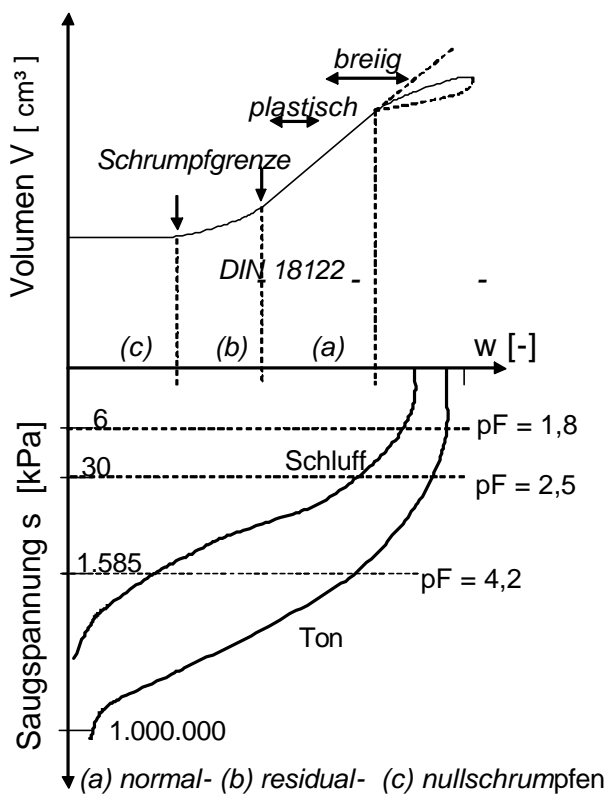


Abb. 3: Qualitativer Verlauf der Schrumpfkurve mit typischen Entwässerungskurven

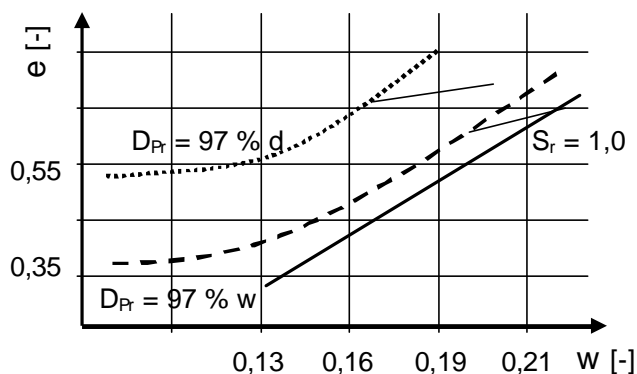


Abb. 4: Schrumpfkurven eines Dichtungsmaterials (TM) bei unterschiedlichem Einbauwassergehalt (nach Zeh, 2007)

Bindige Böden, wie sie für mineralische Abdichtungen verwendet werden, zeigen bei einer Reduktion des Wassergehaltes immer eine Volumenreduktion. Bodenmechanisch wird dieser Effekt ausgehend von der Wassersättigung als Schrumpfkurve beschrieben, mit der der Zusammenhang zwischen Probenvolumen und Wassergehalt $V = f(w)$ oder auch zwischen Porosität und Wassergehalt $e = f(w)$ dargestellt wird (Abb. 3, 4). Im teilgesättigten Zustand, in dem sich Dichtungsmaterialien nach dem Einbau befinden, wirkt aufgrund kapillarer Effekte in der Porenstruktur ein gewisses Matrixpotenzial, hier als Saugspannung bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen der Saugspannung s und dem gravimetrischen Wassergehalt w oder dem volumetrischen Wassergehalt θ wird in der materialspezifischen Entwässerungskurve $s = f(w)$ bzw. $s = f(\theta)$ dargestellt (Soil-Water-Characteristic-Curve, SWCC). In der Bodenmechanik üblich ist auch die Charakterisierung der Entwässerung durch die Abhängigkeit des Sättigungsgrades S_r als Funktion der Saugspannung s .

Herrschen konstante Auflastbedingungen und konstante Temperaturen wird eine Entwässerung oder Trocknung einer mineralischen Dichtung dann ausgelöst, wenn entweder durch Wurzeln Wasser entzogen oder aber durch benachbarte Schichten ein höheres Matrixpotenzial aufgeprägt wird, so

dass ein Potenzialgefälle und somit ein konvektiver Wassertransport entsteht. Solch eine aufgeprägte Saugspannung kann durch eine saisonal trockene Rekultivierungsschicht oder eine Durchlüftung der groben Drainage ausgelöst werden. Jeder Wasserentzug, jede Erhöhung der Saugspannung hat in bindigen Böden eine Volumenreduktion und damit ein abnehmendes Porenvolumen zur Folge.

Die im Laborversuch nach DIN 18122 aus der Schrumpfkurve ermittelte Schrumpfgrenze eines Bodens stellt nicht etwa, wie in der Praxis oft vermutet, den Wassergehalt dar, bei dem eine Dichtung unter Feldbedingungen reißt, sondern den Wassergehalt, bei dem keine weitere Kompression, keine weitere Abnahme der Porosität mehr möglich ist, den Übergang zwischen Residual- und Nullschrumpfen (Abb. 3). Bei den hier betrachteten mineralischen Dichtungsmaterialien wirkt an der Schrumpfgrenze etwa eine Saugspannung in der Größenordnung von $s = 10^4$ bis 10^5 kPa. Die Rissinitiation in einer Dichtung ist konsequente Folge der Volumenreduktion und tritt je nach Einbauwassergehalt bereits bei wesentlich geringeren Saugspannungen im Bereich des Normalschrumpfens ein. Im Gegensatz zur im Labor ermittelten Schrumpfkurve, zu deren Ermittlung der Boden bis zur Fließgrenze aufbereitet und in diesem Zustand gesättigt eingebaut wird, liegt im Feld bereits zu Beginn einer Entwässerung ein teilgesättigter Zustand vor. Die Entwässerung findet zuerst in den größeren Makroporen statt und setzt sich dann zu den sukzessiv feineren fort. Die anfängliche Volumenabnahme ist daher geringer, als die Wasserabgabe, verläuft aber dann im Bereich des Normalschrumpfens parallel zur Sättigungslinie, d. h. bei konstantem Sättigungsgrad und zunehmender Saugspannung.

Da der Einbauzustand die Porenstruktur beeinflusst, zeigen unter- und überoptimal verdichtete Böden unterschiedliche, aber etwa parallele Schrumpfkurven (Abb.4). Im Falle der Wiederbewässerung, z. B. infolge saisonaler Infiltration von Niederschlagswasser, ergibt sich aufgrund der bekannten Hysterese der Entwässerungskurve und wegen der durch Schrumpfen geänderten Porenstruktur des Bodens ein gegenüber der Erstschrumpfung flacherer Pfad der Wiederbewässerung. Das Dichtungsmaterial reagiert aufgrund der zuvor erfahrenen Kompression bei der Quellung wie auch bei wiederholter Schrumpfung steifer. In Abb.4 ist ein solcher Pfad durch Pfeile qualitativ angedeutet.

Abbildung 5 veranschaulicht zusammenfassend die Charakteristik und die Zusammenhänge zwischen Dichte, Einbauwassergehalt, Wassersättigung und Saugspannung in dem in der Baupraxis geläufigen Proctor-Diagramm. Die Kennwerte wurden für ein typisches Dichtungsmaterial in ZEH (2007) ermittelt. Bei einem Einbau auf der nassen Seite des Proctor-Astes (überoptimal) wirken vergleichsweise geringe Saugspannungen $s < 100$ kPa, unteroptimaler Einbau impliziert bereits nach dem Einbau deutlich höhere Saugspannungen. Beim Entwässern, z. B. bei aufgeprägter Saugspannungserhöhung, folgt das Dichtungsmaterial im Bereich des Normalschrumpfens zunächst dem Pfad $S_r = \text{konst.}$ parallel zur Sättigungslinie (gepunktete Linien in Abb. 5). Erst mit Beginn des Residualschrumpfens geht der Pfad in einen zur Wasserabgabe unterproportionalen Zuwachs der Dichte (unterproportionaler Volumenverlust) über und erreicht etwa beim Wassergehalt an der Schrumpfgrenze Volumen- und Dichtekonstanz. Die Darstellung zeigt auch, dass die Wasserabgabe infolge Zunahme der Saugspannung unter sonst gleichen Bedingungen bei einem unteroptimal eingebauten Dichtungsmaterial gegenüber dem überoptimalen Einbau sehr viel geringer ist. Soweit sich das Material im Bereich der Normalschrumpfens befindet bedeutet dies auch einen geringeren Volumenverlust.

während die Bruchdehnung nur wenig ansteigt. Aufgrund der günstigeren Porenstruktur lassen sich in überoptimal verdichteten Proben deutlich höhere Zugfestigkeiten mobilisieren. Im gleichen Maße nimmt die Dehnsteifigkeit mit der Entwässerung nahezu proportional zu, wobei sich hier der Verdichtungszustand nicht so stark auswirkt (ZEH, 2007).

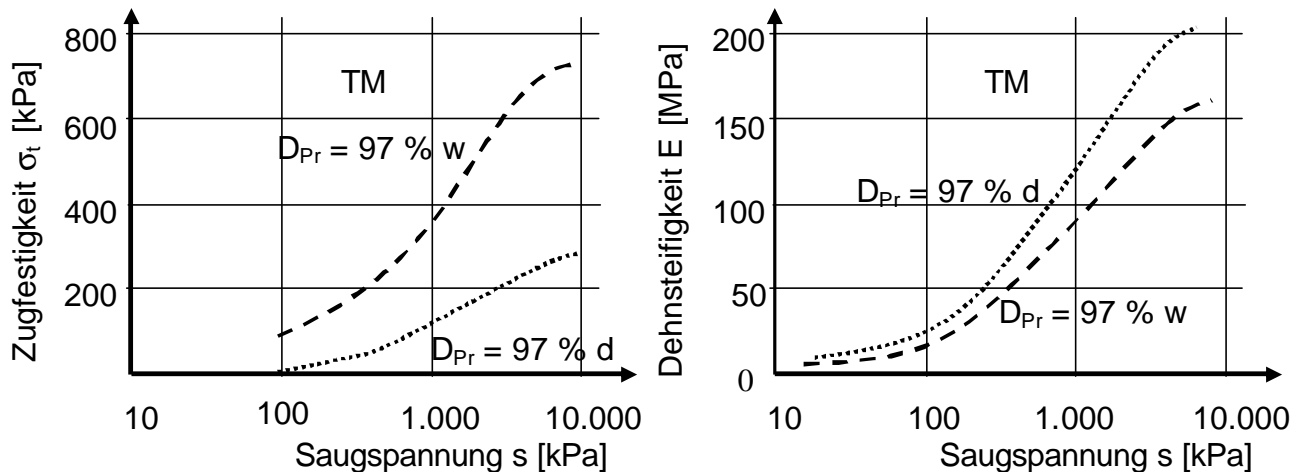


Abb. 6: Verlauf der Zugfestigkeit und der Dehnsteifigkeit eines über- und unteroptimal verdichteten Bodens TM als Funktion der Saugspannung (ZEH, 2007)

2.2 Biegerissgefährdung

Während geringe, gleichmäßige Setzungen des Deponiekörpers eine laterale Kompression der Oberflächenabdichtung bewirken, verursachen lokale Setzungen und Sackungen eine muldenförmige Zwangsverformung und damit eine Biegebeanspruchung der Dichtungsschicht. THOMAS (2004) hat in seinen anschaulichen Modellversuchen gezeigt, dass in unbewehrten Dichtungsschichten die neutrale Faser im Gegensatz zur Theorie des ebenen Querschnitts eines Biegebalkens nahe am gedrückten Rand verläuft. Wegen der geringen Bruchdehnung leicht- und mittelplastischer Böden kommt es somit bereits bei einer relativ geringen Biegebeanspruchung zu Strukturrissen oder gar zu offenen Rissen in einer tonmineralischen Dichtung. Die GDA E 2-13 empfiehlt ein Nachweisverfahren, bei dem die experimentell zu ermittelnde Bruchdehnung ε_{zq} des Dichtungsmaterials der aufgeprägten Randfaserdehnung ε_{RF} der Schicht gegenübergestellt wird. Beispielrechnungen und Erfahrungswerte eigener Laborversuche zeigen, dass eine signifikante Zunahme der Wasserdurchlässigkeit bei leicht- bis mittelplastischen Böden bereits ab einer plastischen Dehnung von $\varepsilon_{pl} \approx 0,2\%$ zu erwarten ist. Hieraus ergeben sich erfahrungsgemäß Grenzdicken einer Durchbiegung von $r = 150$ m. Günstige Einwirkungen aus der Überlagerungsspannung, Querdehnung und Vorspannung infolge Verdichtung sind dabei nicht berücksichtigt. Höhere Materialwiderstände sind bei Böden mit einer höheren Plastizität oder höheren Verdichtung zu erwarten. THOMAS (2004) konnte in seinen Experimenten den günstigen Einfluss einer beidseitigen Bewehrung belegen, die aber in der Praxis wegen der geringen Grenzdehnung vorgespannt werden müsste.

Eine weitere Rissgefährdung ergibt sich während der Herstellung mineralischer Dich-

tungsschichten. Besonders bei hoher Verdichtung, wie dies für den Einbau auf der trockenen Seite der Proctor-Kurve erforderlich ist, können in den spröde reagierenden geringplastischen Böden Walzrisse entstehen, die zunächst nicht visuell erkennbare und auch nicht zwingend bei der baubegleitenden Qualitätssicherung feststellbar sind. Solche Mikrorisse in der granularen Struktur des Bodens sind bei späteren Volumenänderungen oder Biegebeanspruchungen Initialpunkte von Bruchflächen und Schrumpfrissen. Die exakten Grenzbedingungen sind nicht bekannt, eine visuelle Beurteilung einer eventuellen Durchbiegung unter der Bandage des Verdichtungsgerätes ist ein Hilfskriterium. Aus Analogien zur Grundbruchgleichung kann abgeleitet werden, dass neben der Tragfähigkeit des Auflagers eine undrained Kohäsion des Dichtungsmaterials von $c_u > 30$ kPa zur Vermeidung dieser Rissbildung zu fordern ist. Geringplastische bindige Böden werden diesen Wert nicht erreichen. Eine intensive Verdichtung kann daher trotz vermeintlich gutem Erfolg irreversible Strukturschäden erzeugen.

Im Hinblick auf die Walz- und Biegerissgefährdung sind bindige Böden geringer Plastizität ungünstiger als höherplastische Materialien. Mittel- bis ausgeprägt plastische Böden bieten hier höhere Materialwiderstände. Eine gleichmäßige Verdichtung und ein Einbau auf der nassen Seite des Proctor-Optimums sind im Hinblick auf diese Gefährdung günstiger.

2.3 Trockenrissgefährdung

Feinkörnige Böden, wie sie für tonmineralische Dichtungen verwendet werden, schrumpfen bei jeglichem Wasserentzug. Ursache einer solchen Entwässerung ist immer ein Potenzialgefälle im Boden, das sich aus einer auf die Oberfläche aufgeprägten höheren Saugspannung ergibt. In einem System mit einer tonmineralischen Dichtung können Saugspannungen, welche das anfängliche Matrixpotenzial des Bodens übersteigen, aus einer saisonal trockenen Rekultivierungsschicht, aus einer trockenen Luftströmung in der Entwässerungsschicht oder aus einem Wasserentzug durch tief reichende Wurzeln des Bewuchses kommen. Als Ursache für einen konvektiven Wasser- und Wasserdampftransport aus einer teilgesättigten Dichtungsschicht kommen außerdem lange anhaltende Temperaturgradienten in Frage. Diese Entwässerung findet in Richtung des kälteren Randes der Dichtung statt.

Die Entwässerung einer tonmineralischen Dichtungsschicht, eine Abnahme des Wassergehaltes, beginnt immer an der Oberfläche durch eine Verdunstung des Porenwassers und setzt sich überwiegend eindimensional ins Innere der Schicht fort. Zunächst entwässern die größeren Primärporen zwischen den Aggregaten. Die zunehmenden Saugspannungen an den Partikel- bzw. Aggregatskontakten bewirken eine anfangs isotrope Kompression des Bodens. Das Porenvolumen nimmt unter anfangs konstanter Sättigung in der komprimierten Zone ab, gleichzeitig erhöhen sich die Steifigkeit und die Zugfestigkeit. Dieses Zusammenziehen beginnt immer an diskreten Punkten der Oberfläche. Infolge einer gewissen horizontalen Dehnungsbehinderung durch Scherwiderstände wird der Boden zwischen den sich zusammenziehenden Zonen gedehnt. Bei Überschreiten der spannungsabhängigen Zugfestigkeit des Materials treten senkrecht zur Entwässerungsrichtung Risse auf, die sich mit fortschreitender Entwäs-

serung zu einem engeren, überwiegend pentagonalen Netz verzweigen. Anfangs entstehen je nach Porenstruktur, Entwässerungsgeschwindigkeit und Potenzialgradient visuell nicht feststellbare Mikrorisse, welche sich später als Schwachstelle erweisen oder aber diskrete Risse in größeren Abständen von Zentimetern bis Dezimetern. In jedem Fall nimmt mit der Rissinitiation trotz der insgesamt geringeren Porosität des ungerissenen Bodens die Wasserdurchlässigkeit der Schicht zu, während die Festigkeit abnimmt.

Bei einer Wiederbewässerung, wie das in Dichtungsschichten saisonal zu erwarten ist, sättigen sich zunächst die gerissenen Bereiche auf. An den Risswurzeln liegen die geringste Dichte, eine gröbere Porenstruktur, die höchste lokale Sättigung und die geringste lokale Scher- und Zugfestigkeit vor. Bei nicht quellfähigen Böden, und nur solche werden hier betrachtet, verbleiben an den Risswurzeln immer Schachstellen. Umgekehrt zeigt der Boden zwischen den Rissufern infolge der Kompression und geänderter Porenstruktur höhere Festigkeiten als im originären Zustand. Bei jeder sich zyklisch wiederholenden Be- und Entwässerung setzen Schrumpfvorgänge daher wiederum an den Risszonen an, was bei einer Überschreitung der dort geschwächten Zugfestigkeit zu einer sukzessiven Vertiefung und Aufweitung der Risse führt. Aus dieser einfachen Überlegung wird geschlossen, dass sich bei zyklischer Überschreitung der Zugfestigkeit eines Dichtungsmaterials immer eine allmähliche Verschlimmerung der Schädigung eintritt. Ist eine Struktur durch Mikrorisse geschwächt, weiten sich diese im Laufe der wiederholten Beanspruchung zu größeren, tieferen Rissen oder zu einem engeren Netz auf. In einer tonmineralischen Dichtung setzt sich die Rissbildung im Laufe der Zeit zumindest im Mikromaßstab bis in die Tiefe fort, bis zu der eine Wechselbeanspruchung infolge alternierender Saugspannung besteht.

Der genaue Vorgang der Rissinitiation in einer tonmineralischen Dichtung ist außerordentlich komplex, die Grenzbedingungen lassen sich bisher noch nicht geschlossen mathematisch mit der erwünschten Schärfe quantifizieren. Bodenmechanische Ansätze zur Berechnung der Grenzspannung oder Grenzdehnung finden sich (MITCHELL, 1976, MORRIS, 1992, BABU ET AL., 2002, KHALILI ET AL. 2004, UND IN ZEH, 2007). Die Beanspruchung ist immer eine auf die Oberfläche der Dichtungsschicht aufgeprägte Änderung der Saugspannung. Maßgebend ist dabei das Inkrement der Saugspannung, der Zuwachs gegenüber den Spannungsverhältnissen nach dem Einbau. Bei gleicher aufgeprägter Saugspannung durch benachbarte Schichten ist eine höhere Initialspannung der Dichtung, wie dies zum Beispiel beim Einbau trocken vom Proctor-Optimum der Fall ist, immer günstiger, da so keine oder auf jeden Fall nur geringere Gradienten entstehen (vgl. Abb. 5). Die Beanspruchbarkeit eines Dichtungsmaterials hängt zum einen von der Partikel- und Porenstruktur sowie von der Aggregatsfestigkeit ab, da sich hieraus die Kompressions- und Dehnsteifigkeiten ergeben. Weitere Einflussfaktoren der Rissinitiation sind der Überlagerungsdruck, die von der Saugspannung abhängige Zugfestigkeit, die Querdehnung des Dichtungsmaterials, dessen Wasserdurchlässigkeit und die Dauer der Beanspruchung. Wie oben qualitativ gezeigt wurde, zeigt eine tonmineralische Dichtung auf der nassen Seite des Proctor-Optimums verdichtet wegen der günstigeren Porenstruktur im Vergleich zum trockenen Einbau höhere Widerstände.

Der Wassergehalt bzw. die Saugspannung bei Rissinitiation lassen sich für dünne Bodenschichten (bis ca. 5 cm) experimentell in einer Festwandzelle gut reproduzierbar unter beliebigen Randbedingungen ermitteln (KÖDITZ ET AL., 2004). Abb. 7 zeigt eine Prinzipskizze des an der MFPA-Weimar entwickelten Versuchsgerätes. Der Boden wird unter definierten Verdichtungsbedingungen in eine Festwandzelle eingebaut und kann dann beliebigen Trocken-Nasszyklen ausgesetzt werden. Der Überlagerungsdruck ist während der Versuchsdurchführung konstant. In den Nasszyklen wird die Wasserdurchlässigkeit des Bodens ermittelt, während der Trocknung wird der Wassergehalt kontinuierlich gemessen. Die Rissinitiation wird über die Luftdurchlässigkeit der Schicht, über eine sog. pneumatische Falle, festgestellt, in dem ein geringer Unterdruck unter der Probe angelegt und kontinuierlich gemessen wird.

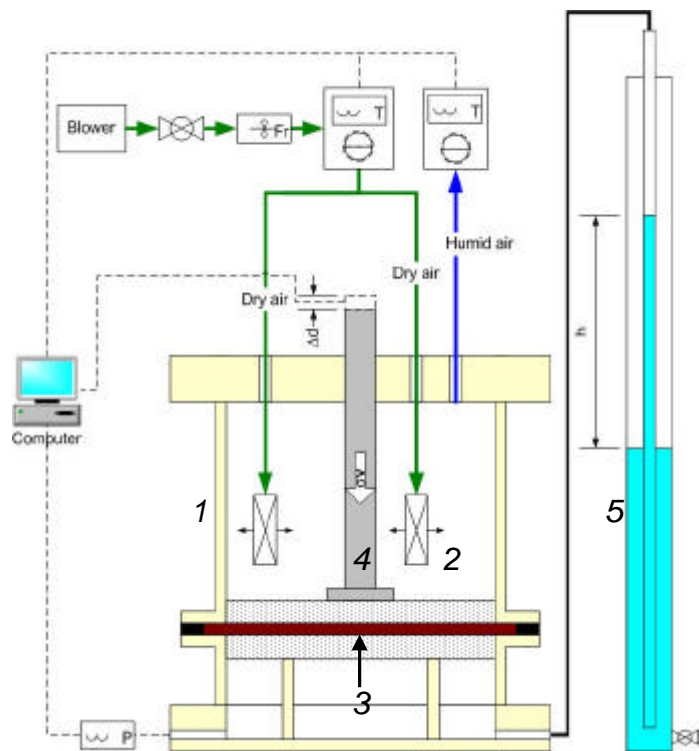


Abb. 7: Systemskizze der Festwandzelle zur Ermittlung des Grenzwassergehaltes bei Rissinitiation (KÖDITZ ET AL., 2004). 1= Zelle; 2 = Belüftung zur Trocknung; 3= Probe; 4 = Belastung; 5 = Unterdruck Vorlage

Mit diesem Eignungsversuch kann für jedes beliebige Dichtungsmaterial in Abhängigkeit von der Überlagerungsspannung und dem Einbauwassergehalt die Beanspruchbarkeit in Form eines Grenzwassergehaltes oder einer Grenz-Saugspannung als charakteristischer Materialkennwert ermittelt werden. Die Schutzwirkung des gesamten Abdichtungssystems muss dann sicherstellen, dass dieser Wassergehalt im Lebenszyklus der Dichtung nicht unterschritten, bzw. die zulässige Saugspannung nicht überschritten wird (WITT, 2005). Auf der sicheren Seite liegend lassen sich so die Grenzbedingungen der Trockenrissgefährdung experimentell ermitteln. Im Feld sind die Bedingungen wegen der Dehnungsbehinderung etwas günstiger. Als weitere Sicherheitsreserve ist die Mächtigkeit der Schicht anzusehen. Die Risse reichen höchstens bis in die Tiefe, bis zu der Änderungen der Saugspannungen stattfinden.

3 Bedingungen der Beständigkeit

Die Verwendung tonmineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten resultiert aus den Erfahrungen, die beim Bau der Basisdichtungen von Deponien gewonnen wurden. Mit der Verwendung von natürlichen, geringdurchlässigen Böden, die über geologische Zeiträume in der Natur beständig als geohydraulische Sperrschicht gewirkt haben, ist die Hoffnung verbunden, ein witterungsbeständiges, natürliches Material zu haben, das die zgedachte Funktion als Dichtung bleibend erfüllt. Diese Erwartung ist nicht unberechtigt. Natürliche tonmineralische Böden, als Residualboden oder Sediment am Ende einer Verwitterungskette angekommen, bieten sehr gute Voraussetzungen für ein Dichtungsmaterial. Sie sind gering wasserdurchlässig, im granularen Maßstab beständig, sind unter günstigen Spannungszuständen plastisch verformbar, lassen sich leicht einer nahezu beliebigen Morphologie oder Abschnittsgrenze anpassen und sind darüber hinaus meist günstig zu beschaffen. Eine lagenweise eingebaute Schichtdicke von ca. 50 cm, wie dies in den meisten Regelwerken im internationalen Vergleich gefordert wird, hinterlässt den Eindruck einer robusten Konstruktion und im abgedeckten Zustand das Gefühl der zuverlässigen Funktion. Diese Erwartungen an die Vorteile einer tonmineralischen Dichtung werden tatsächlich erfüllt, wenn einige grundlegende Bedingungen zum Schutz vor Austrocknung und vor schädlichen Verformungen der Dichtungsschicht eingehalten werden. Bei allen dem Autor bekannten Aufgrabungen, bei denen eine Schädigung nachgewiesen wurde, wurden diese Schutzbedingungen im Gesamtaufbau des Abdichtungssystems nicht eingehalten (vgl. auch HENKEN-MELLIES, 2007).

Bindige Böden, wie sie für Dichtungen in Bauwerken der Umweltgeotechnik verwendet werden, besitzen eine vernachlässigbar geringe Elastizität ($\epsilon_{el} \approx 10^{-4}$ bis 10^{-5}) und auch plastisch sind sie bei den in Oberflächenabdichtungen vorherrschenden Spannungszuständen nur wenig verformbar. Die einaxiale Bruchdehnung liegt je nach Plastizität und Wassersättigung in der Größenordnung $\epsilon_t < 5 \cdot 10^{-3}$. Da in Oberflächenabdichtungen nur eine geringe Überlagerungsspannung wirkt, können bei lokalen Setzungen oder Sackungen in den Mulden Zugdehnungen auftreten, welche eine Überschreitung der Festigkeit des Dichtungsmaterials bewirken.

Auf Seiten der Beanspruchung lässt sich die Biegerissgefährdung nur durch eine Begrenzung der Verformung, durch einen homogenen Aufbau des Deponiekörpers und durch einen möglichst späten Bau der Abdichtung nach Abklingen der Hauptsetzungen erreichen. Der in GDA E 2-13 empfohlene Nachweis wird in der Genehmigungspraxis meist nicht geführt. Als Planungsgrundlage eines Abdichtungssystems werden präzisere Verformungsmessungen der Oberfläche als heute üblich benötigt, welche aus den zurückliegenden Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten eine zuverlässige Prognose der weiteren Entwicklung erlauben. In der Nachsorgephase muss die Entwicklung der Verformungen weiter verfolgt und mit den in der Planung festgelegten Grenzwerten der Durchbiegung verglichen werden. Im Rahmen der Unterhaltung der Deponie und deren Oberflächenabdichtung können so erforderlichenfalls Aufgrabungen zur Funktionsprüfung durchgeführt und geschädigte Bereiche repariert werden.

Der Widerstand gegen Biegebeanspruchung lässt sich nur geringfügig durch die Aus-

wahl des Dichtungsmaterials beeinflussen. Hier sind eine möglichst hohe Plastizität und eine gute Verdichtung auf der nassen Seite des Proctor-Optimums zur Erzielung einer dichten, gleichmäßigen Struktur vorteilhaft. Die plastischen Eigenschaften nehmen mit dem Anteil toniger Bestandteile zu. Ziel muss es hier sein, die Bruchdehnung ε_{zq} des Materials unter Beachtung der Anforderungen an die Trockenrissgefährdung zu optimieren.

Bei den Bedingungen zur Beständigkeit gegen Trockenrisse sind die Phänomene Durchwurzelung und klimatisch induzierte Verdunstung von Porenwasser aus der Dichtungsoberfläche zu unterscheiden. Der potenziellen Durchwurzelungsgefahr einer tonmineralischen Dichtung kann nur durch eine mächtige Rekultivierungsschicht mit einer zuverlässigen, den lokalen Verhältnissen angepassten Wasserhaushaltsfunktion oder durch eine künstliche Wurzelsperre begegnet werden. Nach allen Erfahrungen mit technischen Wurzelsperren ist eine Kunststoffdichtungsbahn das Mittel der Wahl. Eine einfachere, dünnere Ausführung, eine Überlappung der Bahnen anstatt einer aufwändigen Fügetechnik, eine Kombinationsdichtung mit geringeren Anforderungen an die polymere Komponente, würde dem gerecht werden.

Der Beanspruchung durch periodischen Wasserentzug infolge saisonal aufgeprägter hoher Saugspannungen, also der potenziellen Gefahr des Verdunstens von Porenwasser aus der tonmineralischen Dichtung, muss mit einer ausreichenden Schutzwirkung des Gesamtaufbaus begegnet werden. Hier sind für die trockenen, zentraleuropäischen Standorte mächtigere Rekultivierungsschichten mit Wasser speichernder Funktion als Schutzmaßnahme aufzuführen. Eine Gesamtmächtigkeit von 1,8 bis 2 m ist für solche Standorte angemessen. Dies kommt auch einer Vergleichmäßigung der thermischen Beanspruchung einer Dichtung entgegen. Ist dies nicht umsetzbar, werden zusätzliche Schutzschichten zur Dämpfung der saisonalen Einwirkung auf die Dichtungsschicht benötigt. Auch hier ist eine als Konvektionssperre wirkende Kunststoffdichtungsbahn, die nicht zwingend die Qualität einer selbständigen Dichtung aufweisen muss, die beste der derzeit existierenden Lösungen. Falls die Durchwurzelungsproblematik beherrscht wird, reichen aber bereits einfachere Schutzmaßnahmen wie eine Kapillarschutzschicht, ein dickes Schutzvlies oder eine Entwässerungsschicht mit feinerer Körnung aus, um die saisonal schwankenden Saugspannungen der Rekultivierungsschicht von der Oberfläche der tonmineralischen Dichtung fernzuhalten (WITT u. ZEH, 2005).

Im Gegensatz zu den effektiven Möglichkeiten, die Beanspruchung der Dichtung über die Schutzwirkung des Systems zu steuern, lässt sich auch bei dieser Art von Gefährdung die Beanspruchbarkeit über die Materialwiderstände nur in rel. geringem Maße durch die Materialauswahl beeinflussen. Die obigen Ausführungen belegen, dass gering- bis mittelplastische Böden bei Wassergehaltsschwankungen weniger Volumenänderungen erfahren und somit ein geringeres Schrumpfpotenzial aufweisen. Die Zugfestigkeit bindiger Böden nimmt zwar im relevanten Bereich nahezu proportional mit der Saugspannung zu, der Widerstand bleibt aber in Relation zu den möglichen Beanspruchungen bei einer Austrocknung gering. Insbesondere sind selbst bei plastischen Böden die Bruchdehnungen so klein, dass schon bei einer moderaten Schrumpfung

Risse oder zumindest Schwächungen auftreten. Wird eine nicht quellfähige tonmineralische Dichtung wiederholt mit einer Saugspannungen beaufschlagt, welche eine Verdunstung von Porenwasser aus deren Oberfläche auslöst, tritt sukzessive eine Schwächung ein, die über den Lebenszyklus hinweg zu einem Verlust der originären Dichtwirkung führen muss.

Die zielführende Strategie beim Einsatz tonmineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen kann nur sein, die Schutzwirkung des Systems so zu gestalten, dass der initiale Wassergehalt der Dichtung zu keinem Zeitpunkt unterschritten wird. Ein Einbau geringfügig unter dem optimalen Wassergehalt der einfachen Proctordichte, ein anfänglicher Sättigungsgrad von $S \approx 75 - 80\%$ und ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ garantieren, dass bereits beim Einbau in der Dichtung eine hohe Saugspannung in der Größenordnung $s = 250 \text{ kPa}$ wirkt. Bei der erstmaligen Beaufschlagung mit infiltriertem Niederschlagswasser sättigt sich dann die Dichtung auf und erhält so eine Art Vorspannung. Künftige Schwankungen des Wassergehaltes liegen auf dem flacheren Pfad zwischen der Erstentwässerung und Wiederbewässerung, auf dem nur geringe Volumendehnung auftreten. Feldmessungen zufolge wird selbst bei den heute üblichen Regelaufbauten diese initiale Saugspannung an der Oberfläche der Dichtung nicht unterschritten (ALBRIGHT ET AL., 2006; HENKEN-MELLIES, 2007). Über Erfahrungen mit dem Einbau von bindigen Böden auf der trockenen Seite des Proctor-Optimums wird in Vielhaber et al. (2006) berichtet. Diese Vorgehensweise ist aber nur bei Materialien angemessen, bei denen unter diesen Bedingungen auch die geforderte Wasserdurchlässigkeit erreicht wird und keine Walzrisse entstehen.

Aus den Bedingungen der Beständigkeit bei Zwangsverformungen und Trockenrissegefährdung ergeben sich konträre Anforderungen an das Dichtungsmaterial. Soweit die Problematik der Zwangsverformungen beherrscht wird, die Setzungen also weitestgehend abgeschlossen sind, sind leichtplastische und mittelplastische Böden vorteilhaft, da diese entgegen ausgeprägt plastischen Materialien ein geringeres Schrumpfpotenzial aufweisen. Können Verformungen mit geringen Biegeradien auf der Deponieoberfläche nicht ausgeschlossen werden, ist ein ausgeprägt plastischer Ton vorteilhafter. Die obigen Ausführungen gelten dann in gleichem Maße, in diesem Fall muss aber die Schutzwirkung des Systems erhöht werden, da in solchen Böden selbst bei unteroptimalem Einbau geringere initiale Saugspannungen wirken.

5 Zusammenfassung

Tonmineralische Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen, einst als Ideallösung in den Regelwerken empfohlen, sind zunehmend in die Kritik geraten. Die Erwartung, mit natürlichen Böden Oberflächenabdichtungen mit unbegrenzter Funktionsdauer bauen zu können, wurde enttäuscht. Bei Aufgrabungen wurden vereinzelt schon nach wenigen Jahren Trockenrisse in der Oberfläche solcher Schichten nachgewiesen. Der daraus abgeleitete Schluss, dass tonmineralische Dichtungen generell unbeständig sind, ist jedoch falsch. Ursache der Schäden waren entweder eine Durchwurzelung oder ein Wasserentzug infolge einer für die Standortbedingungen nicht hinreichend Wasser speichernde Überdeckung. Die Schutzwirkung des Systems war in Hinblick

auf die lokal vorherrschenden klimatischen oder thermischen Einwirkung zu gering.

Wie alle technischen Systeme haben auch tonmineralische Dichtungen eine spezifische Beanspruchbarkeit, die sich nur in geringem Maße durch die Einbaubedingungen beeinflussen lässt. Die Einflussfaktoren, die Bedingungen und die relativ engen Grenzen der Beständigkeit eines tonmineralischen Dichtungsmaterials wurden oben qualitativ und quantitativ erläutert. Sie lassen sich für jeden Boden im Zuge der Eignungsprüfung ermitteln. Ein robuster Systemaufbau, in besonderem Maße die Mächtigkeit, die Wasserspeicherfähigkeit der Rekultivierungsschicht sowie der Bewuchs, müssen garantieren, dass die auf die Dichtungsoberfläche aufgeprägten Wasserspannungen auch bei extremen klimatischen Einwirkungen im verträglichen Maß bleiben. Zyklische Wassergehaltsschwankungen in einer tonmineralischen Dichtung, welche periodisch unter den Einbauwassergehalt alterieren, schwächen diese auf Dauer.

Die Beanspruchung, i.e. die im Funktionszeitraum zu erwartende klimatisch aufgeprägten Wasserspannungen auf das Abdichtungssystem, lässt sich mit Wasserhaushaltsmodellen im Zuge der Planung simulieren und im Feld jederzeit messtechnisch überwachen (GDA E 2-30; BERGER ET AL., 2000; BENSON, 2007). Dabei können auch Alterungseffekte der Rekultivierungsschicht und klimatische Veränderungen berücksichtigt werden (BENSON ET AL., 2007). Zusätzliche Schutzkomponenten wie eine aufliegende Konvektionssperre oder eine mineralische Schutzschicht dämpfen die Beanspruchung sehr stark ab und können zu diesem Zwecke eingesetzt werden.

Zusammenfassend muss der Gesamtaufbau des Abdichtungssystems standortspezifisch sicherstellen, dass die tonmineralische Dichtung nicht durchwurzelt wird und ihr Wassergehalt nicht periodisch unter den Einbauwassergehalt sinkt. Die in den Regelwerken empfohlenen Mindestdicken für die Rekultivierungsschicht bringen für trockene Standorte nicht die erforderliche Schutzwirkung. Größere Mächtigkeiten bis zu 2 m in Verbindung mit einer gezielten Wasserspeicherfunktion werden benötigt. Unter diesen Bedingungen sind tonmineralische Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien und Altlasten eine über lange Zeiträume hinweg zuverlässige und robuste Lösung.

6 Literatur

- Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W. and Rock, S. A., 2006: Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.* Vol. 132, No.11, 2006, pp.1393 -1403.
- Babu, G. L. S., Sporer, H. and Gartung, E., 2002: Desiccation behaviour of selected geosynthetic clay liners. Zanzinger, Koerner & Gartung (eds), *Clay Geosynthetic Barriers*, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp 295 - 302
- Benson, C. H., 2007: Modeling Unsaturated Flow and Atmospheric Interactions. Schanz, T. (Ed.): *Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics*. Springer

- Proc. in Physics, Vol. 113, pp185 - 200
- Benson, C. H., Sawangsuriya, A., Trzebiatowski, B. and Albright, W. H., 2007: Postconstruction Changes in the Hydraulic Properties of Water Balance Cover Soils. ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng. Vol. 133, No 4, 2007, pp. 349 - 359
- Berger, K., Dunger, V., 2000: Vergleichende Simulationsrechnungen mittels der Depo- nie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD, Proc. Weiterbil- dungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden- und Deponiewasserhaus- halt, 7/8. April 2000, Dresden
- Chapuis, R. P., Mbonimpa, M., Dagenais, A.-M. und Aubertin, M., 2006: A linear graphical method to predict the effect of compaction on the hydraulic conductivity of clay liners and covers. Bull. Eng. Geol. Env. 65 (2006), pp. 93 - 98
- GDA Empfehlung E 2-13, 1997: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungs- schichten. In Neff (Hrsg.): GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 135 - 140, Ernst & Sohn
- GDA Empfehlung E 2-30, 2004: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächen- abdichtungssystemen von Deponien. Bautechnik 75 (9), S. 616 – 626. Version 2004, www.gdaonline.de
- Henken-Mellies, W. U., 2007: Water Balance and Effectiveness of Mineral Landfill Covers - Results of Large Lysimeter Test-Fields. Schanz, T. (Ed.): Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proc. in Physics , Vol. 112, pp. 369 - 376
- Horn, R. u. Junge, T., 2002: Wege zur langfristig sicheren Abdichtung von Mülldepo- nien mit mineralischen Dichtschichten. Egloffstein/Burkhardt/Czurda (Hrsg.), 2002: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in For- schung und Praxis Bd. 125, Erich-Schmidt-Verlag. S. 167 – 182
- Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G. E., 2004: "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence." ASCE Int. J. Geomech., June 2004, pp 115 – 126.
- 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., Mu- nich 2004
- Mitchell J. K., 1976: Fundamental of soil behaviour. John Wiley & Sons, New York
- Morris P.H., Graham J., Williams D.V., 1992: Cracking of drying soils. Can. Geotech J, 29:263 - 277
- Rückert, H., 2006: Kennwerte eines künstlich verdichteten schwachbindigen Bodens. Bautechnik 83 (2006), Heft 5, S. 365 - 373.

- Thomas, H., 2004: Zum Einfluss von Geogitterbewehrungen auf das Rissverhalten von mineralischen Deponieabdichtungen. Dissertation Fakultät Agrar- und Umweltwissenschaften, Universität Rostock
- Vielhaber, B., Locker, J., Hütteroth, D., Junge, T. u. Melchior, S., 2006: "Trockener" Einbau von mineralischen Dichtungsschichten; Grundlagen und Praxiserfahrungen. Henken-Mellies, W. U. (Hrsg.): 17. Nürnberger Deponieseminar 2006, Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 85, S. 129 - 146
- Witt, K. J., 2005: Plädoyer für eine angemessene Betrachtung des Langzeitaspektes bei der Planung und der Genehmigung von Oberflächenabdichtungen. Egloffstein et al. (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2005, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 135, S. 81 - 100, Erich Schmidt Verlag
- Witt, K. J., Zeh, R., 2005: Wirkungsweise von Kapillarschutzschichten für mineralische Oberflächenabdichtungen. Henken-Mellies, W. U. (Hrsg.): 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 84, S. 233 - 246
- Zeh, R., 2007: Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium der Rissgefährdung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar 2007. Schanz, T. u. Witt, K. J. (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik Weimar, Heft 13, 2007
- Zeh, R. u. Witt, K. J., 2007: The Tensile Strength of Compacted Clays as Affected by Suction and Soil Structure. Schanz, T. (Ed.): Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proc. in Physics, Vol. 112, pp. 219 – 226

Autor

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