

# **Bedingungen der Beständigkeit tonmineralischer Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen**

*Karl Josef Witt*

*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 begrenzen. Je nach Gefährdungspotenzial des Standortes empfehlen die Regelwerke eine tonmineralische Schicht als alleinige dichtende Systemkomponente oder in Kombination mit einer aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn. Der mineralischen Dichtung wird dabei die längere Funktionsdauer zugeordnet. Bei Biegebeanspruchung und bei klimatisch aufgeprägter Wassergehaltsschwankung können Risse im Mikro-, und Makromaßstab entstehen, welche die Dichtwirkung signifikant abmindern. Die bodenphysikalischen Zusammenhänge dieser schädlichen Effekte werden abgeleitet und erläutert. Zusammenfassend muss der Gesamtaufbau des Abdichtungssystems standortspazifisch eine ausreichende Schutzwirkung garantieren, so dass eine Durchwurzelung der Dichtung ausgeschlossen wird und ihr Wassergehalt zu keinem Zeitpunkt unter den Einbauwassergehalt sinkt. Zyklische Wassergehaltsschwankungen in einer tonmineralischen Dichtung, welche unter den Einbauwassergehalt alterieren, schwächen diese auf Dauer.

## **Einleitung**

Tonmineralische Dichtungen werden meist aus natürlichen, 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 Dichtung soll hinreichend flexibel sein, um sich den zu erwartenden Verformungen des Deponiekörpers rissfrei anpassen zu können. Sie darf nicht durchwurzelt werden und unter den wechselnden klimatischen Einwirkungen nicht austrocknen. Diese, über eine lange Lebenszeit gestellten hohen Anforderungen können tonmineralische Dichtungen nur dann erfüllen, wenn sie in dem System ausreichend geschützt eingebettet sind. Einem Oberflächenabdichtungssystem werden immer eine Dichtwirkung und eine Schutzwirkung zugeordnet. Die Zusickerung in den Deponiekörper wird bei einer tonmineralischen Dichtung durch deren geringe Wasserdurchlässigkeit begrenzt und eventuell durch eine zusätzliche Konvektionssperre ganz unterbunden, einer aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn (KDB). Die gesamte Überlagerung aus Dränageschicht, Rekultivierungsboden und Bewuchs, wie auch die Auflager- und Gasdränageschicht, müssen die Dichtungsschicht schützen.

In Sicherheitsnachweisen des Ingenieurwesens werden Beanspruchung und Beanspruchbarkeit gegenübergestellt. Die Beanspruchung einer tonmineralischen 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 des Deponiekörpers. Die Beanspruchbarkeit ist die Fähigkeit, wechselnden Temperatur- und Feuchteverhältnissen, Biege- und Scherverformungen schadfrei zu widerstehen. Der Beitrag behandelt zunächst die Beanspruchbarkeit tonmineralischer Dichtungen, hier im Wesentlichen die Widerstandsfähigkeit gegenüber zyklischen Feuchteschwankungen und leitet die Bedingungen ab, die daraus an die Schutzfunktion des Systems zu stellen sind.

## Materialien und Eigenschaften

Als mineralisches Dichtungsmaterial eignen sich verdichtete feinkörnige Böden geringer bis mittlerer Plastizität mit überwiegend kaolinitisch-illitischem Mineralbestand. Solche Böden haben erfahrungsgemäß Plastizitätszahlen  $I_p \leq 25$  %, die undrainierte Kohäsion liegt im Bereich  $c_u \leq 15$  kN/m<sup>2</sup>. Der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze  $w_s$  liegt bei diesen Böden etwa um den Wert  $0,22 I_p$  (3 bis 5 %) unter dem an der Ausrollgrenze. Im gesättigten Zustand kann nur eine geringe Zugfestigkeit von  $\sigma_t \leq 3$  kN/m<sup>2</sup> bei nur geringen Bruchdehnung  $\varepsilon_{qz} < 0,5$  % mobilisiert werden. Hier zeigt sich eine höhere Plastizität günstiger. Ausgeprägt plastische Böden sollten aber wegen der starken Quell- und Schrumpfeigenschaften nur dann verwendet werden, wenn periodische Wassergehaltsschwankungen ausgeschlossen werden können.

Die Gesamtporosität einer mineralischen Dichtung setzt sich aus den Primärporen (Intra-Aggregatporen) in der Mikrostruktur der Tonaggregate und aus den Sekundärporen (Inter-Aggregatporen) zwischen den künstlich geformten Partikeln 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. Die Wasserdurchlässigkeit im quasigesättigten Zustand einer mineralischen Dichtungsschicht wird wesentlich durch die Größenverteilung der Sekundärporen beeinflusst. Dieser Anteil der Porosität beeinflusst auch das anfängliche Quell- und Schrumpfverhalten bei Änderungen des Wassergehaltes bzw. der Saugspannungen. Bei hohen Saugspannungen ist für diese Prozesse aber in zunehmendem Maße auch die Mikrostruktur maßgebend.

Strukturbedingt wird die Wasserdurchlässigkeit eines verdichteten, nicht quellfähigen bindigen Bodens durch den Verdichtungsgrad und den Einbauwassergehalt beeinflusst. Beim Einbau oberhalb des Proctor-Optimums werden unter sonst gleichen Bedingungen deutlich geringere Durchlässigkeiten erreicht (RÜCKERT, 2006).

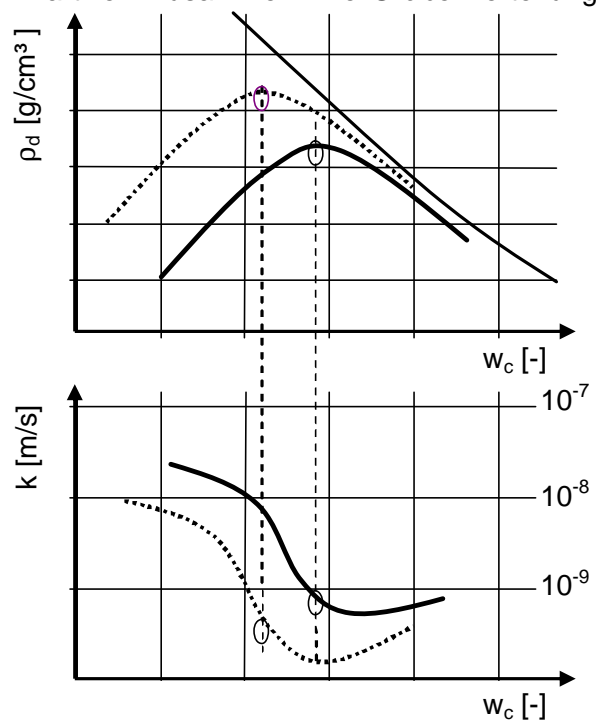


Abb. 1: Qualitativer Einfluss der Verdichtungsenergie und des Einbauwassergehaltes auf die Wasserdurchlässigkeit

Abb. 1 zeigt den qualitativen Verlauf dieser Abhängigkeit. 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 tonmineralische 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 beschriebenen 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 Sperrwirkung ist eine geringe Streuung der Porenweitenverteilung mit kleinen Engstellen. Bei bindigen Böden lässt sich dies nur durch eine kombinierte statische und knetende Verdichtung erreichen, dynamische Verdichtungsenergie ist wenig effektiv.

Im teilgesättigten Zustand, in dem sich eine Dichtung im Normalfall im Feld befindet, ist die Wasserdurchlässigkeit geringer, als im standardisierten Laborversuch unter gesättigten Verhältnissen ermittelt. 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.

Bindige Böden, wie sie für mineralische Dichtungen 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 Volumen und Wassergehalt  $V = f(w)$  oder auch der zwischen Porosität und Wassergehalt  $e = f(w)$  dargestellt wird (Abb. 3). Im teilgesättigten Zustand wirkt aufgrund kapillarer Effekte in der Porenstruktur ein gewisses Matrixpotenzial, hier als Saugspannung bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen

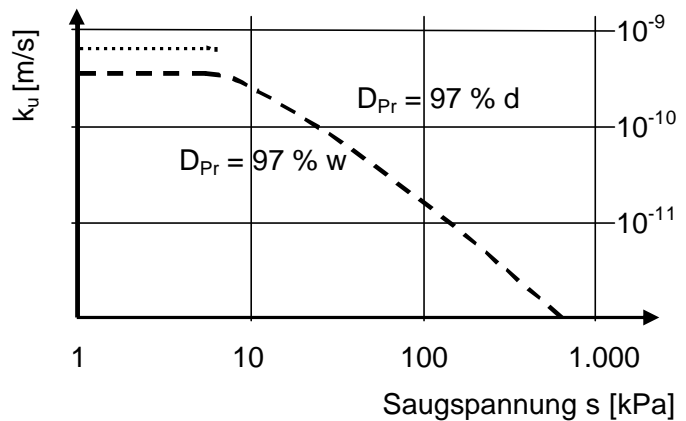


Abb. 2: Qualitativer Einfluss der Saugspannung auf die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit eines bindigen Bodens. Index d = trocken, Index w = nass vom Optimum

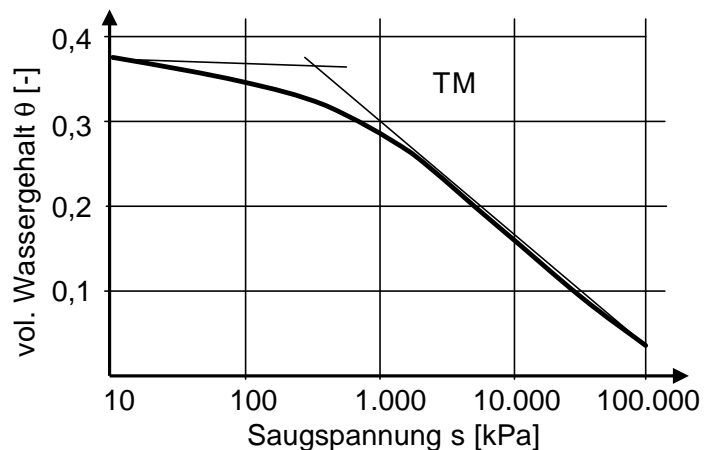


Abb. 3: Entwässerungskurve (SWCC) eines Abdichtungsmaterials (ZEH, 2007)

der Saugspannung  $s$  und dem gravimetrischen Wassergehalt  $w$  oder dem volumetrischen Wassergehalt  $\theta$  wird in der materialspezifischen Entwässerungskurve  $s = f(w)$  bzw.  $s = f(\theta)$  dargestellt (Soil-Water-Characteristic-Curve, SWCC, Abb. 3). In der Bodenmechanik geläufiger ist die Charakterisierung der Entwässerung durch die Darstellung des Sättigungsgrades  $S_r$  als Funktion der Saugspannung  $s$  (CHAPUIS ET AL., 2006)

Liegen konstante Auflastbedingungen und konstante Temperaturen vor, wird die Entwässerung oder Trocknung einer mineralischen Dichtung entweder durch den Wasserentzug von Wurzeln ausgelöst oder durch eine aufgeprägte Saugspannung benachbarte trockenen Schichten, in denen ein höheres Matrixpotenzial herrscht, so dass ein Potenzialgefälle und somit ein konvektiver Wassertransport entstehen. Solch eine aufgeprägte Saugspannung kann durch eine saisonal trockene Rekultivierungsschicht oder eine Durchlüftung der groben Dränage 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 der 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. 4). 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 bei unbehindertem Schrumpfen parallel zur Sättigungslinie. Die Saugspannung nimmt bei konstantem Sättigungsgrad zu.

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 Hysterese der Ent- und Wiederbewässerungskurve und wegen der durch Schrumpfen geänderten Dichte und Porenstruktur des Bodens ein gegenüber der Erstschrumpfung flacherer Pfad. Der Effekt wird bei einer Dehnungsbehinderung durch Reibungseffekte verstärkt. Das Dichtungsmaterial reagiert aufgrund der zuvor erfahrenen Kompression bei wiederholter Be- und Entwässerung steifer (HORN U. JUNGE, 2002). In Abb. 4 ist ein derartiger Pfad durch die Pfeile qualitativ angedeutet.

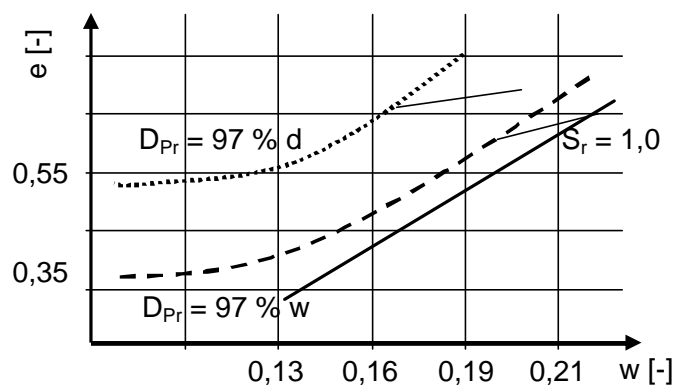


Abb. 4: Schrumpfkurven eines Dichtungsmaterials (TM) bei unterschiedlichem Einbauwassergehalt nach ZEH, 2007. Index  $d$  = trocken, Index  $w$  = nass vom Optimum

Abbildung 5 veranschaulicht die Charakteristik und die Zusammenhänge zwischen Dichte, Einbauwassergehalt, Wassersättigung und Saugspannung in dem in der Baupraxis geläufigen Proctor-Diagramm. Ergänzend zur bekannten Darstellungsweise sind Linien gleicher Saugspannung eingetragen. Die Kennwerte wurden für ein typisches Dichtungsmaterial in ZEH (2007) ermittelt. Bei einem Einbau auf der nassen Seite der Proctorkurve (überoptimal) wirken in solchen Böden vergleichsweise geringe Saugspannungen  $s < 100$  kPa bzw. Sättigungsgrade  $S_r = 90\%$ , unteroptimaler Einbau impliziert bereits nach dem Einbau deutlich höhere Saugspannungen in der Größenordnung  $s > 250$  kPa bei einer Sättigung  $S_r = 80\%$ . Beim erstmaligen, unbehinderten Entwässern, z. B. bei einer von außen aufgeprägten hohen Saugspannung, 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 Lufteintrittes und 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- bzw. 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 deutlich geringer ist. Soweit sich das Dichtungsmaterial im Bereich des Normalschrumpfens befindet, bedeutet dies auch einen geringeren Volumenverlust. Insgesamt ist der Schrumpf- und Quellpfad jedoch wegen der damit verbundenen Strukturveränderung des Bodens wesentlich komplexer und hängt stark von den wechselnden mechanischen und hydraulischen Bedingungen im Feld ab.

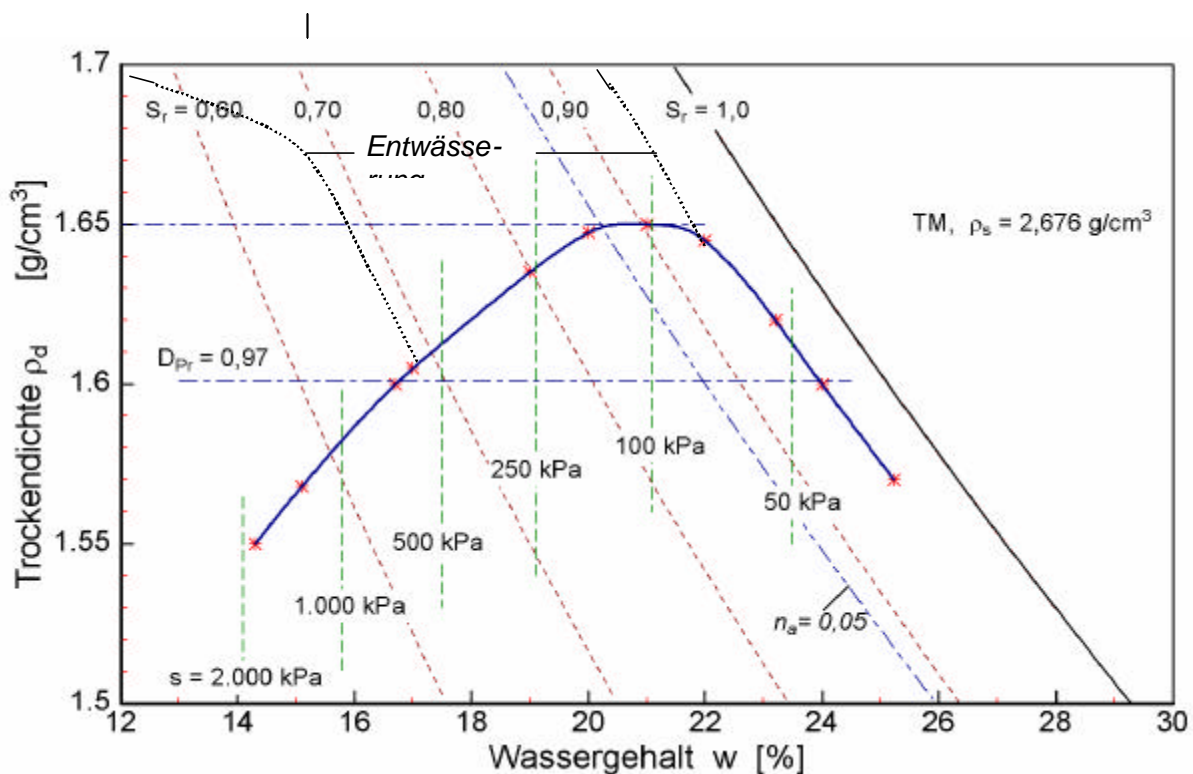


Abb. 5: Proctor-Diagramm eines Abdichtungsbodens (TM) mit zugehörigen Sättigungslinien, Saugspannungen beim Einbau u. Pfade bei unbehinderter Erstentwässerung (gepunktete Linien)

Bereits aus diesen fundamentalen bodenphysikalischen Grundlagen zur Entwässerungscharakteristik tonmineralischer Dichtungsmaterialien kann geschlossen werden, dass jede Unterschreitung des Einbauwassergehaltes  $w_0$  wegen des damit verbundenen Volumenverlustes lokale Zugbeanspruchungen und damit eine Rissgefährdung bedingt und umgekehrt Austrock-

nungssicherheit einer mineralischen Dichtung immer dann gegeben ist, wenn sichergestellt ist, dass der Einbauwassergehalt, respektive die nach Einbau wirkende Saugspannung  $s_0$ , im Laufe der Nutzung nicht unterschritten bzw. überschritten wird. Die Sicherheitsreserve besteht bei jeder Unterschreitung dieser Anfangsbedingungen allein in der horizontalen Vorspannung infolge des Überlagerungsdrucks und in der Zugfestigkeit des Dichtungsmaterials.

Die Zugfestigkeit teilgesättigter Dichtungsmaterialien mit unterschiedlichen Einbauwassergehalten wurde in ZEH (2007) untersucht (ZEH U. WITT, 2007). Abb. 6 zeigt exemplarisch die Zunahme der Zugfestigkeit mit der Entwässerung für das oben im Proctor-Diagramm dargestellte Dichtungsmaterial. Der qualitative Verlauf ist auf andere tonmineralische Dichtungsmaterialien übertragbar. Für die Rissbildung relevant ist der Beginn der Entwässerung bis zu einer Saugspannung von  $s < 10^4$  kPa, was bei den hier behandelten relevanten Dichtungsmaterialien einer Wasserabgabe bis zu einem Sättigungsgrad von ca. 50 % entspricht.

Bei Quasisättigung haben natürliche, leicht- bis mittelplastische bindige Böden nur sehr geringe Zugfestigkeiten in der Größenordnung  $\sigma_t \leq 3$  kN/m<sup>2</sup> (kPa), die auch schon bei geringen Dehnungen erreicht werden. Mit der Entwässerung nimmt der Zugwiderstand um bis zu zwei Größenordnungen zu, während die Bruchdehnung nur wenig ansteigt. Aufgrund der günstigeren Porenstruktur lassen sich in überoptimal verdichteten Proben deutlich höhere Zugfestigkeiten mobilisieren. In gleichem Maße nimmt die Dehnsteifigkeit mit der Entwässerung nahezu proportional zu, wobei sich hier der Verdichtungszustand nicht so stark auswirkt (ZEH, 2007).

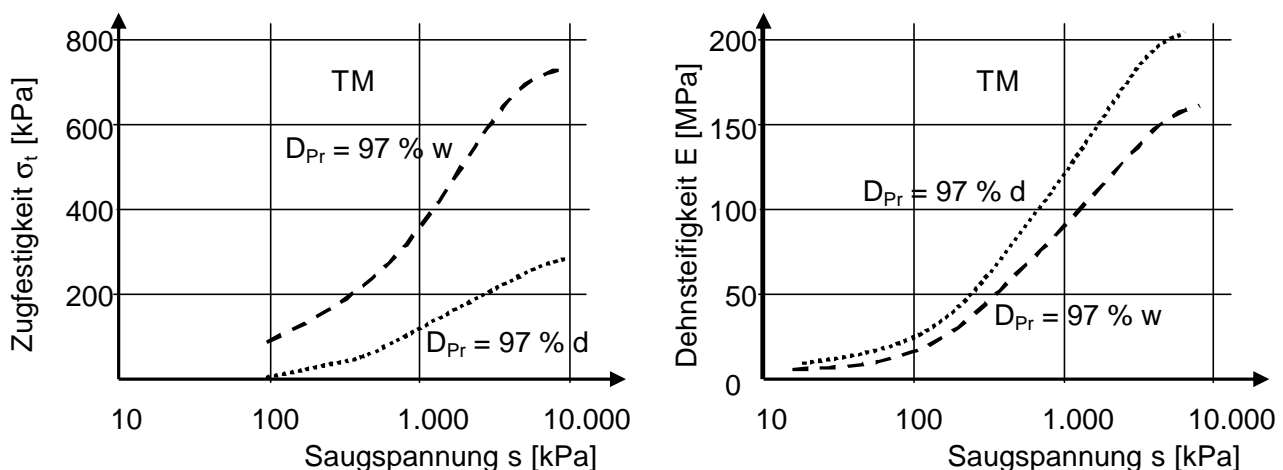


Abb. 6: Verlauf der Zugfestigkeit und der Dehnsteifigkeit eines über- und unteroptimal verdichteten Bodens TM als Funktion der Saugspannung (ZEH, 2007)

## 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  $\varepsilon_{zq}$  des Dichtungsmaterials der aufgeprägten Randfaserdehnung  $\varepsilon_{RF}$  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 muss. Großflächige Setzungen der geneigten Oberfläche des Deponiekörpers mindern den Vorspanneffekt ab.

Eine weitere Rissgefährdung ergibt sich während der Herstellung mineralischer Dichtungsschichten. 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.

## **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 Dichtungsschicht können Saugspannungen, welche das anfängliche Matrixpotenzial des Bodens übersteigen, aus einer saisonal trockenen Reaktivierungsschicht, 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 oben beschriebenen 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 komprimier-

ten 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 Entwässerung 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 nehmen mit der Rissinitiation trotz der insgesamt geringeren Porosität des ungerissenen Bodens insgesamt die Wasserdurchlässigkeit zu und die Festigkeit ab.

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 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 ergibt. Ist eine Struktur durch Mikrorisse geschwächt, weiten sich diese im Laufe der wiederholten Beanspruchung zu größeren, tiefern 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 in 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 und die Querdehnung des Dichtungsmaterials, die 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 speziell hierzu an der MFPA-Weimar entwickelten Versuchsgertes. Der Boden wird unter definierten Verdichtungsbedingungen in eine Festwandzelle eingebaut und dann beliebigen Trocken-



Nasszyklen ausgesetzt. Der Überlagerungsdruck ist während der Versuchsdurchführung konstant. In den Nasszyklen wird die Wasserdurchlässigkeit des Bodens ermittelt, während der Trocknung wird der Wassergehalt kontinuierlich gemessen. Der Grenzwassergehalt bei der 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.

Mit diesem Eignungsversuch kann für jedes beliebige Dichtungsmaterial in Abhängigkeit von der Überlagerungsspannung und dem Einbauwassergehalt die Beanspruchbarkeit in Form eines Grenzwassergehaltes oder einer Grenzsaugspannung 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 Trockenrissegefährdung experimentell ermitteln. Im Feld sind die Bedingungen wegen der Dehnungsbehinderung etwas günstiger.

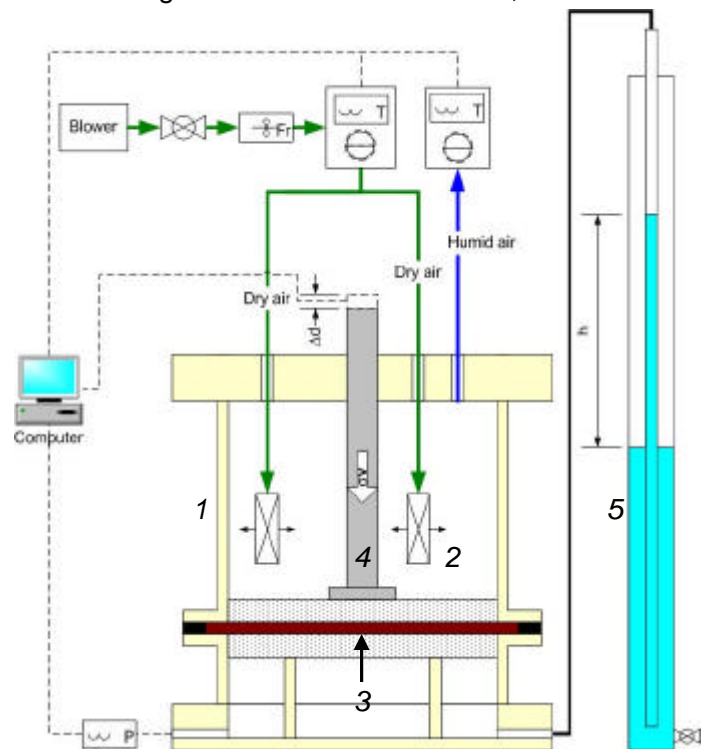


Abb. 7: Systemskizze der Festwandzelle zur Ermittlung des Grenzwassergehaltes bei Rissinitiation (KÖDITZ ET AL, 2004). 1= Zelle; 2 = Belüftung zur Trocknung; 3= Probe; 4 = Belastung; 5 = Unterdruck Vorlage

## 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 zugedachte Funktion als Dichtung bleibend erfüllt. Diese Erwartung ist nicht unberechtigt. Natürliche tonmineralische Böden, als Residualboden oder Sediment am Ende der Verwitterungskette angekommen, bieten sehr gute Voraussetzungen für ein Dichtungsmaterial. Sie sind gering wasserdurchlässig, im granularen Maßstab beständig, sind unter günstigen Spannungsbedingungen 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 gering 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 präzise Verformungsmessungen der Oberfläche 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 Auswahl 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  $\epsilon_{zq}$  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 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 anstatt einer aufwändigen Fügetechnik der Bahnen, also eine Kombinationsdichtung mit geringeren Anforderungen an die polymere Konvektionssperre, würde dieser Funktion bereits gerecht werden.

Die Beanspruchung durch periodischen Wasserentzug infolge saisonal aufgeprägter hoher Saugspannungen, also die potenzielle Gefahr des Verdunstens von Porenwassers aus der tonmineralischen Dichtung, muss mit einer ausreichenden Schutzwirkung des Gesamtaufbaus beherrscht 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 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 Abdichtung 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, die Werte sind 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, eine Wassersättigung von  $S_r \approx 75 - 80\%$  und ein Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 97\%$  garantieren, dass bereits beim Einbau eine hohe Saugspannung in der Dichtung 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 Trockenrissgefährdung 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.

Die Bedingungen der Beständigkeit sind bekannt und lassen sich im Sinne einer Optimierung planerisch umsetzen. Die Grenzen der Beanspruchbarkeit eines tonmineralischen Dichtungsmaterials lassen sich in der Eignungsprüfung experimentell ermitteln. Die Beanspruchung, i. e. die klimatische Einwirkung auf das Abdichtungssystem und dessen Schutzwirkung, lassen 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 zeitliche Veränderungen der Rekultivierungsschicht und klimatische Veränderungen berücksichtigt werden (BENSON ET AL., 2007). Der Zustand der Dichtung lässt sich durch einfache Feuchtemessung im Sinne einer Früherkennung von kritischen Zuständen ständig kontrollieren. Unter diesen Bedingungen sind tonmineralische Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien und Altlasten eine zuverlässige Lösung.

## **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 Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD, Proc. Weiterbildungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden- und Deponiewasserhaushalt, 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 Abdichtungsschichten. In Neff (Hrsg.): GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 135 - 140, Ernst & Sohn
- GDA Empfehlung E 2-30, 2004: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien. Bautechnik 75 (9), S. 616 – 626. Version 2004, [www.gdaonline.de](http://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 Mülldeponien mit mineralischen Dichtschichten. Egloffstein/Burkhardt/Czurda (Hrsg.), 2002: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung 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. 3<sup>rd</sup> Europ. Geosynthetics Conf., Munich 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

**Zitat:**

Witt, Karl Josef, 2007: Bedingungen der Beständigkeit tonmineralischer Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen. In Henken-Mellies, W. U. (Hrsg.): 18. Nürnberger Deponieseminar 2007, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 86, S. 115-134