

Eignungsanforderungen an Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen

Einleitung

Im Jahr 1995 wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik „Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ (DIBt-Grundsätze) [DIBt 1995] veröffentlicht. Darauf basierend wurden durch den DIBt-Sachverständigenausschuss „Deponieabdichtungen mit mineralischen Baustoffen“ speziell für Geosynthetische Tondichtungsbahnen – landläufig „Bentonitmatten“ genannt – „Zulassungsgrundsätze für geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklasse I“ [DIBt 1998] erarbeitet. Diese galten als Grundlage für die erforderlichen Eignungsnachweise zur Beurteilung von GTD in Oberflächenabdichtungen von Deponien der Deponieklasse I nach TA Siedlungsabfall (TA-Si) im Rahmen der Erteilung von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Das DIBt hat für drei Antragsteller im Jahr 1998 bauaufsichtliche Zulassungen für „GTD zur Verwendung in einem Oberflächenabdichtungssystem der Deponieklasse I nach TA-Siedlungsabfall“ erteilt. Danach hat das DIBt allerdings die Arbeit auf diesem Gebiet eingestellt. Teilweise wurde der Beratungsstand des DIBt-SVA auch in die „Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen, EAG-GTD“ [EAG-GTD 2002] eingebracht. Da die Zulassungen im Jahr 2003 ausgelaufen sind, hat sich in der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall eine Arbeitsgruppe (LAGA Ad-hoc-AG) konstituiert, die „Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme“ [LAGA 2005] erstellt hat. Innerhalb der LAGA Ad-hoc-AG gibt es eine Arbeitsgruppe von Sachverständigen, die „Bentonitmattengrundsätze“ (Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von GTD als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien) [LAGA 2007] für diesen Anwendungsfall erarbeitet hat, um damit den abfallrechtlichen Behörden zu ermöglichen, die Eignung dieser Bentonitmatten zu beurteilen.

Insbesondere die Nachweisführung der „Beständigkeit gegenüber maßgebenden Austrocknungsbeanspruchungen“ und die „Langzeitbeständigkeit der die Schubkraft übertragenden geotextilen Komponenten“ war zum Zeitpunkt der Erteilung der bauaufsichtlichen Zulassungen im Jahr 1998 nicht ausreichend geklärt. Vielmehr wurden die Antragsteller damals aufgefordert, Nachweise zu erbringen, die eine genauere Beurteilung des Langzeitverhaltens ermöglichen.

1 Kriterien für die Beurteilung von GTD in Deponie-Oberflächenabdichtungen

Nach den Zulassungsgrundsätzen für GTD [DIBt 1998] und ebenso nach den „Bentonitmatengrundsätzen“ [LAGA 2007] werden im Wesentlichen folgende Kriterien benannt:

- I. Dichtigkeit gegenüber infiltriertem Niederschlagswasser
- II. Mechanische Widerstandsfähigkeit
- III. Beständigkeit gegenüber infiltriertem Niederschlagswasser, Mikroorganismen, Pflanzen, Witterung und Wassergehaltsänderungen
- IV. Herstellbarkeit
- V. Qualitätssicherung der Herstellung und Verlegung

Nachfolgend wird auf die Punkte I. bis III. aber insbesondere auf die Langzeitbeständigkeit der geotextilen Komponenten, die Langzeit-Scherfestigkeit der GTD und das Austrocknungsverhalten der GTD eingegangen.

2 Dichtigkeit gegenüber infiltriertem Niederschlagswasser

Zum Nachweis der Dichtwirkung der GTD müssen folgende Einwirkungen berücksichtigt werden: infiltriertes Niederschlagswasser, Temperaturen und mechanische Einwirkungen aus Lasten und Verformungen. Nachzuweisen sind die Permittivität der produktionsfrischen GTD unter verschiedenen Auflasten, die Permittivität unter Berücksichtigung von Materialstreuungen, die Permittivität von Überlappungen, die Permittivität unter mehraxialen Zugverformungen, die Dichtigkeit von Anschlüssen und Durchdringungen, die Abschätzung der Auswirkung von Fehlstellen auf die Systemdurchlässigkeit, die Permittivität infolge von statischen Lastkonzentrationen, die Permittivität infolge von Wassergehaltsänderungen und die Permittivität infolge von Kationenaustausch.

3 Mechanische Widerstandsfähigkeit

Zum Nachweis der mechanischen Widerstandsfähigkeit sind projektbezogene Gleitsicherheitsnachweise in den Kontaktflächen zu angrenzenden Schichten zu führen. Darüber hinaus sind als Materialkennwerte folgende Angaben bereitzustellen: Innere Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Auflast, Kurzzeit-Festigkeit der Fasern und Fäden, die Verbundfestigkeit der GTD im Schäl- oder Zugscherversuch, das Verhalten der GTD beim Quellen mit und ohne Auflast sowie die Erosions- und Suffosionssicherheit bei Überströmungs- oder Turbulenztests.

Aus der Faserfestigkeit und der Anzahl der Fasern pro Quadratmeter lässt sich eine theoretische Schubfestigkeit berechnen. Unter Einbeziehung von Abminderungsfaktoren (Kriechen, chemische Beständigkeit) und Verbundfaktoren lässt sich eine theoretische maximale Schubfestigkeit abschätzen. Untersuchungen von Müller et al. [2004] haben beispielhaft gezeigt, dass es bei vernadelten GTD nicht zulässig ist, von Kurzzeit-Verbundfestigkeiten auf „Langzeit-Scherfestigkeiten“ Mithilfe von Abminderungsfaktoren zu schließen. Die Versagensmechanismen bei einer vernadelten GTD sind uneinheitlich. Wenn evtl. das Reißen der Fasern im Kurzzeit-Scherversuch maßgebend ist, so kann für die Standzeit im Langzeit-Scherversuch das Entschlaufen der Fasern maßgebend werden. Müller et al. [2004] zeigte z. B., dass GTD mit höherem Schälwiderstand deutlich geringere Standzeiten im Langzeit-Scherversuch aufwiesen (siehe Kapitel 6.3).

4 Beständigkeit

Kunststoffe kriechen und sind zudem Alterungsvorgängen unterworfen, die wiederum Auswirkungen auf die Festigkeit haben. Bei GTD, die aus Polyolefinen hergestellt werden, ist der maßgebliche Alterungsprozess die thermische Oxidation.

Hinsichtlich der chemischen Beständigkeit zeigen reine Polyolefin-Werkstoffe nur bei stark oxidierenden Medien Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften. Ansonsten ist die chemische Beständigkeit hervorragend. Die Verwendung für Langzeitanwendungen ist daher eng gekoppelt an die Entwicklung von Stabilisatoren zur Verhinderung der Oxidation. Die Lebensdauer ist darüber hinaus abhängig von der jeweiligen Anwendungstemperatur. Die DIBt-Zulassungsgrundsätze [1998] fordern eine Langzeitbeständigkeit der geotextilen Komponenten bei Temperaturen von 10 bis 25 °C. Geht man von sehr langen Funktionsdauern aus so erscheint einer Bemessungstemperatur von 15 °C gerechtfertigt.

Die Langzeit-Beständigkeit der dichtenden Eigenschaften des Bentonits ist ebenfalls nachzuweisen. Natriumbentonit wandelt sich in der Praxis innerhalb von wenigen Jahren durch Kationenaustausch in Kalziumbentonit um. Dadurch verändern sich die Dichtungseigenschaften der GTD. Bisher gibt es kein standardisiertes Verfahren mit dem man den Kationenaustausch simuliert. Egloffstein [2001] beschreibt den Einfluss des Ionenaustauschs auf die Dichtwirkung von GTD in Deponie-Oberflächenabdichtungen. Er verwendete 0,1 bis 0,3 mol/l CaCl_2 -Lösungen und kommt zu dem Schluss, dass sich der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert einer GTD mit Natriumbentonit infolge reinen Ionenaustauschs um bis zu einer Zehnerpotenz erhöht. Voraussetzung ist hierbei, dass die GTD im trockenen Zustand mit elektrolytarmem Wasser vorgequollen ist. Eine GTD mit Ca-Bentonit bleibt vom Ionenumtausch unberührt. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert einer GTD mit Ca-Bentonit entspricht bereits dem einer GTD mit Na-Bentonit nach Ionenaustausch. Für die Prüfung der Beständigkeit gegen Kationenaustausch sollte eine Prüfmethode entwickelt werden. Die Prüfmedien, der Elektrolytgehalt und der pH-Wert sollten festgelegt werden. Meist werden CaCl_2 -Lösungen verwendet.

Die Prüfung der Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen (DIN EN 12225) erscheint entbehrlich bei reinen Polyolefin-Werkstoffen. Bentonit ist ebenfalls unempfindlich solange es sich um die mineralischen Bestandteile handelt. Eventuelle organische Zusätze müssten aber erst den Nachweis der mikrobiologischen Beständigkeit antreten. Ebenso sollten Beschichtungen z. B. aus Bitumen ihre Beständigkeit gegen Mikroorganismen unter Beweis stellen.

Bezüglich der Beständigkeit von GTD gegenüber Pflanzen – insbesondere Wurzeln – und gegenüber Nagetieren ist es klar, dass diese für GTD nicht gegeben ist. Da dies für alle mineralischen Dichtungen gilt, ist es auch kein Ausschlusskriterium für die Anwendung von GTD. Vielmehr müssen alle mineralischen Dichtungen in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen durch richtig dimensionierte Rekultivierungsschichten und sorgfältige Pflege des Bewuchses vor der Beanspruchung insbesondere durch Wurzeleinwüchse geschützt werden. Eine einfache Methode des Durchwurzelungstests wäre der „Lupinentest“ nach DIN CEN/TS 14416.

Bei der Witterungsbeständigkeit von GTD handelt es sich vorwiegend um Beanspruchungen innerhalb der Bauphase. Eine noch nicht überdeckte GTD ist prinzipiell vor Witterungseinflüssen wie UV-Strahlung und Niederschlag zu schützen. Dies ist dadurch gegeben, dass eine GTD ohnehin bis zum Einbau durch eine wasserdichte und lichtundurchlässige Verpackungsfolie vor dem vorzeitigen Quellen geschützt werden muss. Nach dem Einbau muss die GTD am selben Tag durch eine ausreichende Überdeckung mit Boden gesichert werden.

So wird ein auflastfreies Quellen vermieden. Danach bietet die Rekultivierungsschicht der GTD einen gewissen Frostschutz. Eine Gefahr des Auffrierens der GTD besteht dann, wenn die Tiefenlage der GTD bis zur kompletten Bodenüberdeckung nicht ausreichend wäre. Für diesen Fall ist die Frost-Beständigkeit durch Frost-Tau-Wechsel-Versuche nachzuweisen. DIN CEN/TS 14418 beschreibt beispielsweise einen solchen Versuch.

Die wesentliche Einwirkung auf die Beständigkeit einer GTD stellt die Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen dar. Dies ist der kritischste Angriff dem eine GTD in einem Deponie-Oberflächenabdichtungssystem widerstehen muss. Vornehmlich in den Sommermonaten ist die GTD einem Temperaturstress ausgesetzt, der dazu führt, dass der Bentonit in der GTD an Feuchtigkeit verliert und oberhalb einer kritischen Saugspannung Risse bekommt. Als Nachweis der Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten. Entweder wird nachgewiesen, dass die GTD im eingebauten Zustand nicht unzulässig bzw. unterhalb eines kritischen Wassergehalts austrocknet oder dass nach Austrocknungsvorgängen durch Wasseraufnahme stets wieder eine ausreichende Dichtigkeit erreicht wird (siehe Kapitel 7).

Werden GTD auch auf Deponien der Deponiekategorie II eingesetzt, so kann die Beständigkeit der GTD gegenüber Deponiegas ein Thema sein. Dies wäre zum einen eine Untersuchung der chemischen Beständigkeit der hydratisierten GTD gegenüber Deponiegas mit anschließender Prüfung der Wasserdurchlässigkeit und zum anderen u.U. eine Prüfung der Gasdurchlässigkeit der GTD (ISO/CD 10773) in Abhängigkeit des Wassergehalts des Bentonits. Eine Gasdichtigkeit – unabhängig vom Hydratationszustand der GTD – ist allerdings ohnehin durch die Verwendung einer Kunststoffdichtungsbahn gewährleistet.

5 Alterungsverhalten der geotextilen Komponenten

Unter Alterung bei GTD ist im Hinblick auf die „Langzeit-Scherfestigkeit“ der oxidative Abbau der eingesetzten Polyolefine der Geotextilien aber insbesondere der Garne oder Fasern zu verstehen. Darüber hinaus besteht in untergeordnetem Maße die Frage der Spannungsrissebeständigkeit der Garne und Fasern bei permanenter Zugbeanspruchung.

Zur Abschätzung insbesondere langer Funktionsdauern der geotextilen Komponenten bedarf es sowohl einer Immersion der Geotextilproben in heißem Wasser als auch der Prüfung im Umluftwärmeschrank. Da sich die Standzeiten mit zunehmender Temperatur drastisch verkürzen, prüft man häufig bei hohen Temperaturen oberhalb von 100 °C. Allerdings ändert

sich die Wirksamkeit der Stabilisatoren oberhalb von 100 °C stark und somit ist eine Arrhenius-Extrapolationen allein aufgrund von Ergebnissen, die bei hohen Prüftemperaturen (~100°C) gemessen wurden, auf Anwendungstemperaturen (<20°C) nicht zulässig. Man muss folglich bei niedrigeren Temperaturen als 100 °C messen und benötigt dadurch erheblich längere Prüfzeiten. Müller et al. [2003] bezeichnet eine Prüftemperatur von 80 °C als die höchste Temperatur, die eine Arrhenius-Extrapolation auf Anwendungstemperaturen möglich macht ohne dass damit morphologische Änderungen in den Materialien auftreten.

Im Rahmen der europäischen Normung wird vorgeschlagen, die Untersuchung der Oxidationsbeständigkeit insbesondere für Geotextilien unter erhöhter Sauerstoffkonzentration im Hochdruck-Autoklaven durchzuführen. Bei diesem Verfahren kann die limitierende Sauerstoffdiffusion weitgehend vermieden und gleichzeitig der Einfluss der Eluierbarkeit von Stabilisatoren studiert werden. Als Kriterium gilt eine Restfestigkeit von 50% nach der Inkubation. Im Rahmen der CE-Kennzeichnung müssen die geosynthetischen Komponenten der GTD die Anforderungen der DIN EN 13493 nach den Prüfbedingungen der DIN EN ISO 13438 erfüllen. Die darin beschriebenen Bedingungen erlauben eine Aussage über eine Nutzungsdauer von 25 Jahren. Für längere Lebensdauerprognosen sind die entsprechenden Prüfbedingungen noch zu entwickeln. Das Prüfverfahren bietet hierbei die Möglichkeit sowohl über die Variation der Prüftemperatur als auch über den Sauerstoffdruck ein zeitraffendes Oxidationsverhalten zu simulieren.

Wollte man versuchen, alle die Langzeitbeständigkeit betreffenden Prozesse wie Kriechen und Alterung in einem umfassenden Systemversuch abzuhandeln, so könnte man die einzelnen Einflüsse nicht mehr voneinander trennen. Für Lebensdauervorhersagen müssen die Prozesse deshalb in getrennten Laboruntersuchungen ablaufen.

6 Langzeit-Scherverhalten der GTD

6.1 Fachgremien

Die Untergruppe UG4 des Arbeitskreises AK 5.1 der DGGT hat in der Zeit von 1994 bis 2002 „Empfehlungen zu Geosynthetischen Tondichtungsbahnen“ [EAG-GTD 2002] erarbeitet. Eine Prüfmethode zur „Langzeit-Scherfestigkeit“ wird nicht vorgeschlagen. In jüngster Zeit hat sich die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ mit der Thematik befasst.

6.2 Innere Scherfestigkeit

Der Nachweis der übertragbaren Schubkräfte innerhalb der Mattenebene einer GTD erfolgt versuchstechnisch in einem direkten Scherversuch. Beim Scherversuch werden mittels Nagelplatten Schubkräfte in die Träger- und Deckgeotextilien eingeleitet. Diese Schubkräfte werden während des Versuchs bis zum Maximum gesteigert während jeweils eine konstante Druckspannung auf die Messprobe einwirkt. Unter dem Einfluss von Normal- und Scherkräften werden die „Bewehrungselemente“ (Garne oder Fasern) der GTD nicht nur allein auf Zug beansprucht sondern sie werden durch die Auflast darin behindert sich entlang der Zugrichtung auszurichten, sich zu „entschlaufen“ oder aus der „Verknotung“ zu lösen. Solche Einflüsse können mit Schäl- und/oder Zug-Scherversuchen nicht simuliert werden. Diese Versuche lassen auch keine direkten Rückschlüsse auf das Scherverhalten von GTD zu. Somit sind sie für Dimensionierungszwecke oder Standsicherheitsbetrachtungen nicht geeignet sondern dienen einzig und allein Qualitätssicherungszwecken.

Aus Versuchen zur Bestimmung der Kurzzeit-Scherfestigkeit von GTD ist bekannt, dass die Scherfestigkeit sich durch einen „inneren Reibungswinkel“ und eine ausgeprägte „Kohäsion“ darstellen lässt. Diese Versuche werden wegeregelt durchgeführt. Die Größe der Messproben beträgt 300 x 300 mm, um den Maßstabeffekten dieser Produkte gerecht zu werden. Die Trägergeotextilien sind durch geeignete Nagelplatten zu fixieren. Die Prüfung der Scherfestigkeit erfolgt wegen des starken Einflusses des gequollenen Bentonits unter Wasser. Die Methode ist in EAG GTD [2002] beschrieben.

6.3 Langzeit-Scherversuche

Zur Beschreibung der „Langzeit-Scherfestigkeit“ müssen für mehrere Normalspannungen die Langzeit-Schubspannungen bestimmt werden. Die „Langzeit-Scherfestigkeit“ kann für beliebige Nutzungsdauern bestimmt werden, da sie vom Kriechverhalten der Kunststofffasern abhängig ist.

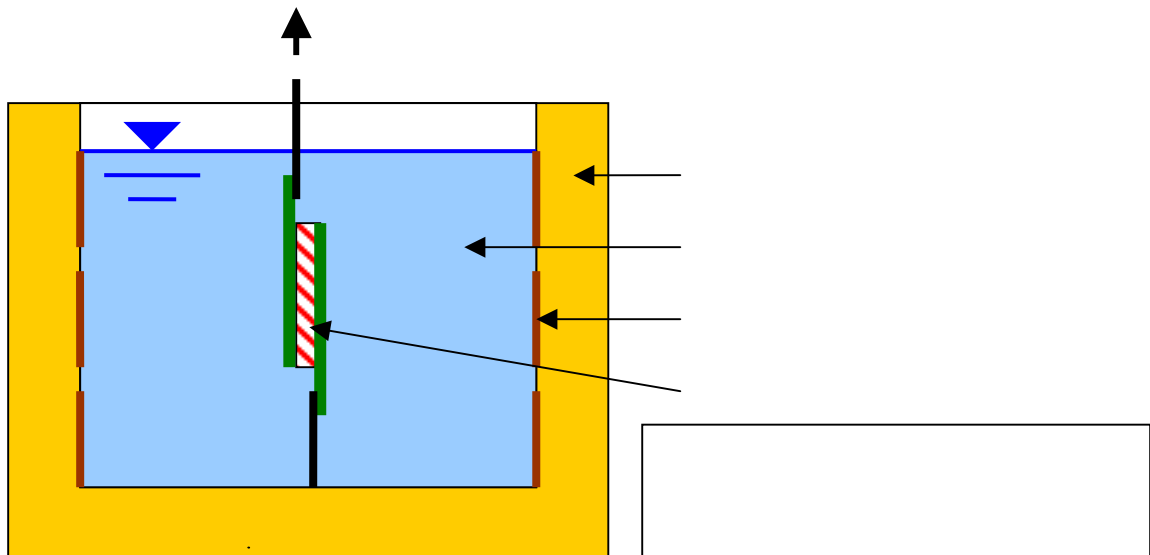


Bild 1: Zeitstand-Zug-Scherversuch mit einer GTD (GRI-Methode)

Hsuan und Koerner [2002] untersuchten GTD, die ausschließlich mit Schubspannungen jedoch ohne Normalspannungen belastet wurden (Bild 1). Da der versuchstechnische Aufwand und auch der zeitliche Umfang durch die Prüfung bei unterschiedlichen Normalspannungen sehr hoch ist, begnügt man sich derzeit damit festzustellen, ob für eine typische Normalspannung und einer zugehörigen Schubspannung das Langzeitverhalten gewährleistet ist.

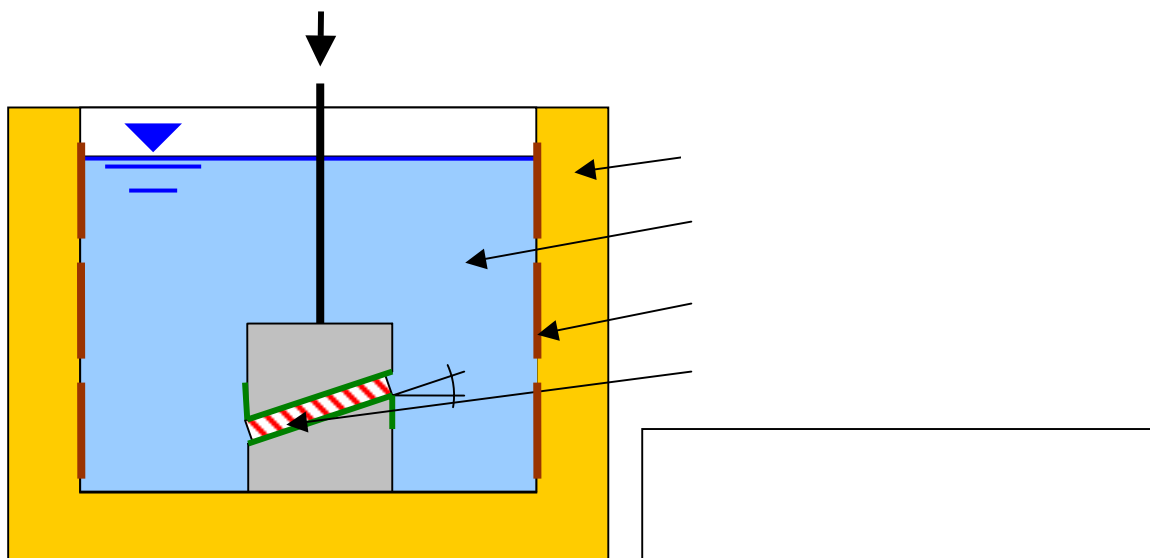


Bild 2: Langzeit-Scherkriechversuch mit einer GTD (BAM-Methode)

Thies et al. [2002] und Müller et al. [2004] prüften mit „Schiefen Ebenen“ unter einer Neigung von 1:2,5 (Bild 2). Die aufgebrachte Normalspannung betrug ca. 50 kPa und die zugehörige Schubspannung ergab einen Wert von ca. 20 kPa. Als Prüfmedien wurden Leitungswasser als auch entionisiertes Wasser verwendet. Die vernadelten GTD wurden sowohl mit Geotextilien aus PEHD als auch aus PP getestet. Zudem waren die einen Messproben mit und die anderen ohne eine zusätzliche thermische Fixierung der Fasern an den Trägergeotextilien ausgestattet. Zur Beschleunigung der Scherkriech-Versuche wurden die Versuche mit erhöhten Wassertemperaturen gefahren.

Interessant war, dass die GTD-Messproben mit der zusätzlichen thermischen Fixierung die höchsten Schälwiderstände zeigten aber im Zeitstand-Scherkriech-Versuch die kürzesten Standzeiten hatten. Dies lässt den Schluss zu, dass man in Bezug auf die „Langzeit-Scherfestigkeit“ nicht von einer Kurzzeit-Scherfestigkeit auf eine „Langzeit-Scherfestigkeit“ schließen darf – auch nicht unter Zuhilfenahme von Abminderungsfaktoren. Außerdem hatten die GTD, die aus PP hergestellt waren, deutlich höhere Standzeiten aufzuweisen als die aus PEHD. Die Messproben ohne zusätzliche thermische Fixierung versagten zum Teil auch nach jahrelanger Prüfung nicht. Auch hier verhielten sich die PP-Messproben qualitativ besser als die PEHD-Messproben.

Weiterhin zeigte sich, dass bei den in Leitungswasser gelagerten GTD in kurzer Zeit ein Ionenaustausch erfolgte. Man konnte feststellen, dass sich die Standzeiten der GTD mit Kalziumbentonit verlängerten. Eine Prüfung mit entionisiertem Wasser stellt somit die kritischere Prüfung dar, aber da in der Realität Natriumbentonit sich ohnehin in Kalziumbentonit umwandelt, ist eine Prüfung in Leitungswasser gerechtfertigt.

Für die Abschätzung eines möglichen Versagensmechanismus einer GTD könnten unter Ansatz einer Aktivierungsenergie von 70 kJ/mol Funktionsdauern abgeschätzt werden. Nimmt man eine Anwendungstemperatur von 15 °C als zutreffend an, so ließe sich unter dem o.g. Ansatz aus einer Prüfdauer von 1 Jahr eine Funktionsdauer von 220 Jahren ableiten. Nach 2jähriger Prüfung ohne Zeitstandsversagen ergäbe sich bereits eine Funktionsdauer von 440 Jahren.

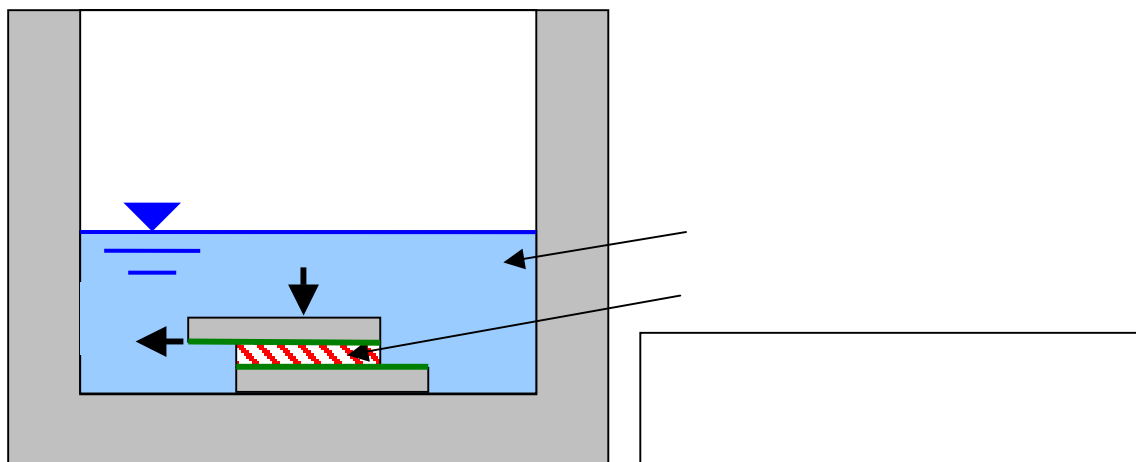


Bild 3: Zeitstand-Scherkriechversuch mit einer GTD (LGA-Methode)

Bei der in der LGA in Nürnberg [Zanzinger/Alexiew 1999] und auch an anderen Stellen in den USA [Trauger et al. 1996, Koerner et al. 2000] verwendeten Prüfvorrichtung (Bild 3) sind im Gegensatz zur „Schiefen Ebene“ (Bild 2) der BAM [Thies et al. 2002] die Normalkräfte und die Schubkräfte voneinander entkoppelt. Dadurch ist es möglich jedes beliebige Wertepaar aus Normalspannung und Schubspannung zu erzeugen (Bild 4).

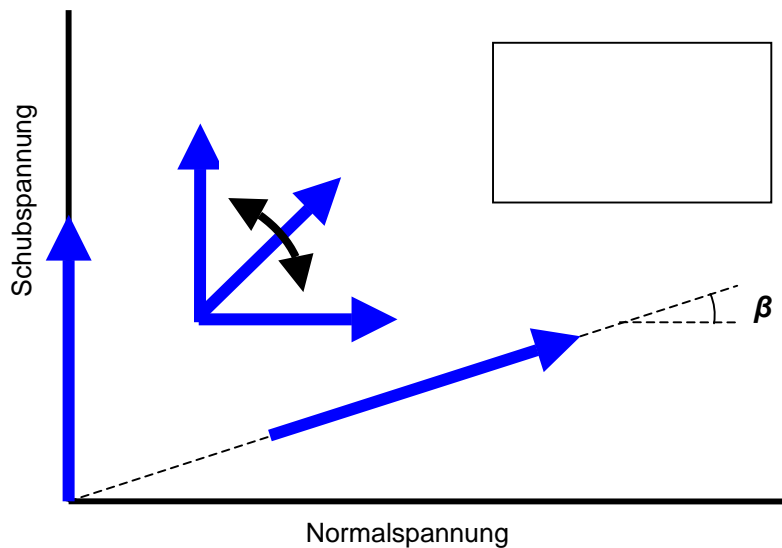


Bild 4: mögliche Spannungspfade verschiedener Scherversuche

Die Konsequenz aus den o.g. Prüfmethoden ist eine Kombination aus der LGA- und BAM-Methode (Bild 5). Zusätzlich zur Zeitraffung durch erhöhte Temperaturen (BAM-Methode) muss auch durch Variation der Schubspannungen (LGA-Methode) der Versuchsablauf beschleunigt werden. Damit lassen sich die gesamten Versuchszeiten verkürzen. Aus der Auftragung der Versagenszeitpunkte bei unterschiedlichen Schubspannungen kann somit auf jede beliebige Standzeit bei vorgegebener Schubspannung geschlossen werden.

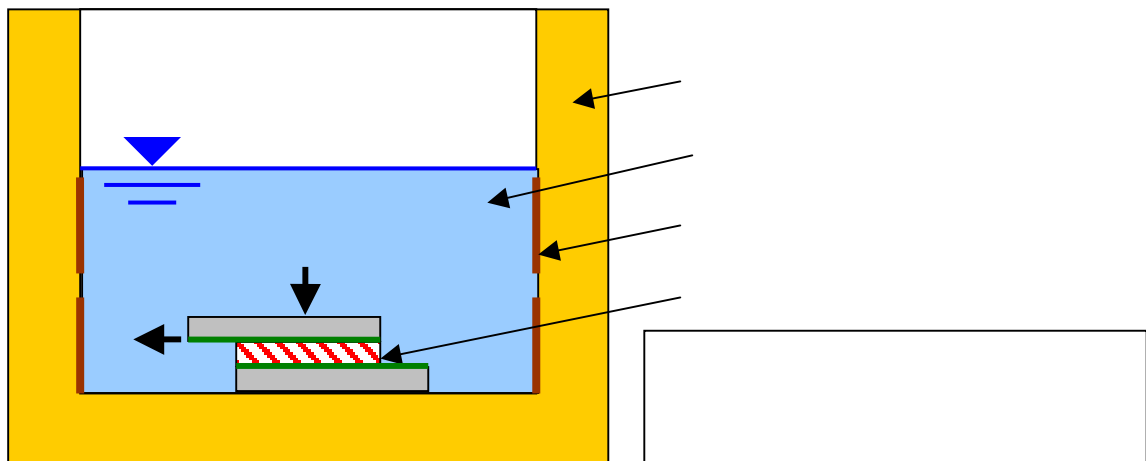


Bild 5: Zeitstand-Scherkriechversuch mit einer GTD (SKZ-Methode)

7 Austrocknungsverhalten der GTD

7.1 Testfelder Georgswerder

Im Jahr 1994 wurden auf der Deponie Hamburg-Georgswerder zwei Testfelder mit GTD eingebaut. Diese waren so konzipiert, dass die Einwirkungen aus Austrocknung und Durchwurzelung frühzeitig und mit hoher Intensität auftraten. Eine übliche Überdeckungsmächtigkeit der Dichtung beträgt ca. 1 m. Auf den Testfeldern in Georgswerder betrug die Bodenüberdeckung nur 45 cm. Folglich traten wie vermutet auch schon im Sommer 1995 nach der zweiten Trockenperiode hohe Durchsickerungsraten auf. Aufgrabungen in den Jahren 1996 und 1998 [Melchior 1999, Melchior 2002] zeigten, dass die Matten sehr stark ausgetrocknet waren. Die Wassergehalte des Bentonits lagen zwischen 40 und 100% [Gartung/Zanzinger 1998]. Sie wiesen eine deutliche Rissstruktur auf. Es war ein nahezu vollständiger Ionenaustausch von Natriumbentonit hin zu Kalziumbentonit erfolgt und es lag eine starke Durchwurzelung vor. Die Laborprüfungen in Festwandzellen belegten, dass die Permittivitäten der ausgegrabenen Proben aus den Jahren 1996 und 1998 gegenüber den beim Einbau ent-

nommenen Proben um vier bis fünf Zehnerpotenzen zugenommen hatten. Diese Durchlässigkeitsversuche belegten die hohen in den Testfeldern gemessenen Durchsickerungsraten. Die gemessenen Durchflüsse korrespondierten mit den in Festwandzellen ermittelten Permittivitäten. Hingegen zeigten die im Labor in Triaxialzellen gemessenen Permittivitäten Ergebnisse, die im Vergleich weitaus geringere Durchlässigkeiten zeigten. Durch den Kationenaustausch lässt sich eine Zehnerpotenz erklären. Die Ergebnisse der jahrelangen Feldmessungen ließen sich damit nicht erklären. Offensichtlich können Durchlässigkeitsversuche mit Triaxialzellen an stark ausgetrockneten GTD zu anderen Ergebnissen kommen. In den Testfeldern wurde unter den dort herrschenden Extrembedingungen keine Strukturheilung an den GTD festgestellt. Das ist unter gewissen Voraussetzungen wie neuwertigen Natrium-GTD [Sivakumar Babu et al. 2001] oder nur geringfügig umgewandelter Natrium-GTD der Fall. Aber für die Testfelder in Georgswerder galt dies nicht. In Georgswerder war der Temperaturstress so stark, dass der Bentonit in dem Fall nicht mehr in der Lage war die Risse zu schließen. Interessanter Weise ist dies in Laborversuchen mit Triaxialzellen gelungen. In Triaxialversuchszellen zeigten die auf den Testfeldern in Georgswerder entnommenen Proben diesen „Heilungseffekt“ in Festwandzellen zeigten dies aber nur diejenigen Proben, die nicht einem extremen Temperaturstress (Wassergehalte des Bentonits von 40%) unterzogen gewesen waren. In Festwandzellen mussten einzelne Messproben, die einem extremen Trockenstress unterzogen waren, mit Normalspannungen von bis zu 90 kPa belastet werden, um die vorhandenen Risse infolge einer Auflast zuzudrücken; nachdem der Quelldruck des Bentonits dazu nicht mehr in der Lage war.

7.2 Aufgrabungen

Trotz allem darf man die Testfelder in Georgswerder nicht zum Maßstab machen, denn die Realität auf deutschen Deponien sieht anders aus. Innerhalb der letzten zehn Jahre wurden in Deutschland sehr viele Aufgrabungen vorgenommen. Sporer [2002] berichtete von 8 Aufgrabungen von Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Die Überdeckungshöhen betragen zwischen 50 bis 100 cm. Die Abdeckungen waren 3 bis 6 Jahre alt und alle GTD, die ursprünglich mit Natriumbentonit eingebaut wurden, waren in der Zwischenzeit in Kalziumbentonit umgewandelt. Das Quellvolumen betrug zwischen 7 bis 10 ml und das Wasseraufnahmevermögen lag zwischen 200 bis 250%. Die Permittivitäten in Festwandzellen ergaben Werte zwischen $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ und $1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, die eindeutig auf die Kationenumwandlung zurückzuführen waren. Trotz der teilweise geringen Überdeckungshöhen wurden auch in Röntgenaufnahmen keine Risse festgestellt. Heyer [2000] gibt für die Deponie Winkel/Bischoffswiesen, die eine Überdeckungshöhe von 40 cm aufweist, eine in Triaxialzellen

bestimmte Permittivität der ausgegrabenen Probe von $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ an. Heerten und Maubeuge [1997] berichten von Ausgrabungen auf drei Deponien. Die GTD waren allesamt einem Ionenaustauschprozess unterzogen. Prüfungen in Triaxial- und in Festwandzellen ergaben Permittivitäten zwischen 10^{-9} s^{-1} und 10^{-8} s^{-1} . Die Überdeckungshöhen der GTD betragen 60 bis 100 cm. Neben vielen weiteren Aufgrabungen der letzten Jahre beschreibt Heerten [2004] eine Aufgrabung auf der Deponie Tagewerben im Herbst 2003 – also nach einem extrem heißen Sommer. Die Deponie befindet sich zudem an einem sehr trockenen Standort (mittlerer Jahressummenniederschlag 500 mm/a). Allerdings misst die Rekultivierungsschicht 140 cm. Es wurde festgestellt, dass in der einlagigen GTD der Ionenaustausch nach 5jähriger Liegezeit abgeschlossen war und die in Triaxialzellen gemessene Permittivität $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ betrug. Eine Austrocknung konnte trotz des heißen Sommers nicht festgestellt werden. Die Wassergehalte des Bentonits lagen bei ca. 125%.

GTD sind auf einer Deponie i.d.R. durch einer ausreichend mächtige Bodenschicht von ca. 1 m geschützt. Man kann bei diesen Anwendungen davon sprechen, dass GTD einem gewissen Trockenstress ausgesetzt sind. Von einer Austrocknung – sprich bei der auch Risse auftreten – kann aber nicht generell die Rede sein.

Meer und Benson [2007] berichten dagegen von vier Oberflächenabdichtungen in den USA. Sie stellten fest, dass unter den sehr unterschiedlichen nordamerikanischen klimatischen Bedingungen nicht einmal eine 75 bis 100 cm dicke Bodenüberdeckung oder eine mit Boden bedeckte KDB einen ausreichenden Schutz gegen Ionenaustausch oder gegen eine starke Zunahme der Wasserdurchlässigkeit bietet.

7.3 Feldmessungen

Bei Aufgrabungen können die Zustände der GTD festgestellt werden. Nähere Informationen zum kompletten Systemverhalten können nur Testfelder und Lysimeter liefern, die kontinuierlich über Jahre alle Wasserhaushaltsgrößen erfassen und registrieren. Hierzu wurden in den letzten 12 Jahren eine ganze Reihe von Anstrengungen unternommen, um die Überprüfung der Wirksamkeit von GTD in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen zu verifizieren. Siegmund et al. [2001] berichtet von einem 3 Jahre alten Testfeld, bei der eine 8000 g/m² schwere GTD mit Kalziumbentonit, die mit 110 cm Boden überdeckt war, nur geringe Wassergehaltsschwankungen erfuhr, so dass eine Austrocknungsgefahr nicht bestand. Weitere Testfelder und Lysimeter mit GTD wurden u.a. auf der Deponie Aurach [Henken-Mellies 2005], in Essen [Heerten/Maubeuge 1997], in Lemförde [Blümel et al. 2006], in München (U-

niversität der Bundeswehr), in Eschbelval, auf der Deponie Deetz, auf der Deponie Kuhstedt und auf der Deponie der Dillinger Hütte [Arlst/Wolsfeld 2004] eingerichtet. Die Messungen auf den Testfeldern zeigen gute Systemwirksamkeiten von weit über 95%. System- und Materialundichtigkeiten wie auf den Testfeldern Georgswerder wurden an anderen Testfeldern nach mehr als 7 Jahren nicht festgestellt. Ein Ionenaustausch trat immer auf. Der Grad der „Austrocknung“ hängt von vielen Faktoren ab wie der Auflast aus der Rekultivierungsschicht, dem Wasserspeicherraum der Rekultivierungsschicht, der Dränschicht, den Wurzeln im Boden und den Eigenschaften der angrenzenden Schichten [Sivakumar Babu et al. 2002].

Benson et al. [2007] gibt eine sehr detaillierte Beschreibung eines Lysimeters auf einer Deponie in Wisconsin, USA. Konventionelle GTD zeigten 4 bis 15 Monate nach Einbau infolge von Kationenaustausch und Dehydrierung sehr hohe Durchsickerungsraten. Nach erneutem Aufbau unter Verwendung einer GTD, die zusätzlich eine dünne Folie enthielt, zeigte der Lysimeter jedoch zufriedenstellende Durchsickerungsraten.

7.4 Austrocknungsversuche im Labor

Nicht alle Erkenntnisse kann man aus Feldversuchen gewinnen, weil diese zum einen sehr zeit- und kostenintensiv sind und zum anderen einzelne Einflüsse sich häufig nicht von anderen zufällig auftretenden trennen lassen, die sich alle in der Wirkung überlagern. Eine Reproduzierbarkeit von Feldversuchen ist äußerst schwierig. Eine einfache Methode eines Nass-Trocken-Wechseltests an GTD ist in DIN CEN/TS 14417 beschrieben.

Im Rahmen des DIBt-Zulassungsverfahrens wurde eine ganze Reihe von Laboruntersuchungen entwickelt, die zum Ziel hatten, die Austrocknungssicherheit beurteilen zu können. Eine Prüfmethode galt dem Nachweis der Entkopplung des Wasserhaushalts bei zwei aufeinander liegenden GTD. Damit sollte nachgewiesen werden, dass ein zwischen zwei Bentonitschichten liegendes Geotextil eine kapillarbrechende Funktion aufweist. Dahinter stand der Gedanke, dass eine bentonitfreie Vliesstoffschicht den Wasserhaushalt der beiden Bentonitschichten entkoppelt. Nach dem vorherrschenden Gedankenmodell würde durch die sommerliche Austrocknung von der Oberseite her der GTD Wasser entzogen. Durch die Entkopplung mit der Vliesstoffschicht sollte dieser Prozess verzögert werden.

Sporer und Gartung [2001, 2002a] simulierten mit temperaturinduzierten Austrocknungsversuchen (Bild 6) den Einfluss von Wasser, Wasserdampf und Temperatur auf den Wassertransport. Sie zeigten, dass der Feuchtigkeitstransport sowohl nach oben als auch nach un-

ten erfolgt. Wasserdampf bewegt sich aufgrund des Unterschieds im Wasserdampfdruck der Bodenluft. Wärme wird durch Temperaturgradienten transportiert. Wenn kein Temperaturgradient vorliegt, erfolgt der Feuchtigkeitstransport nur nach oben. Steigt der Temperaturgradient, so bewegt sich die Feuchtigkeit entlang des Temperaturgradienten – also nach unten. Der zweite Prozess ist mit zunehmender Trocknungstemperatur dominant. Demnach wird bei einer doppellagigen GTD die untere von der oberen mit Feuchtigkeit versorgt. Die obere GTD-Lage verhindert demnach nicht die Wasserbewegung aus der unteren Lage aber der Wasserverlust in der unteren Lage wird ausgeglichen durch die Wasserbewegung aus der oberen GTD nach unten.

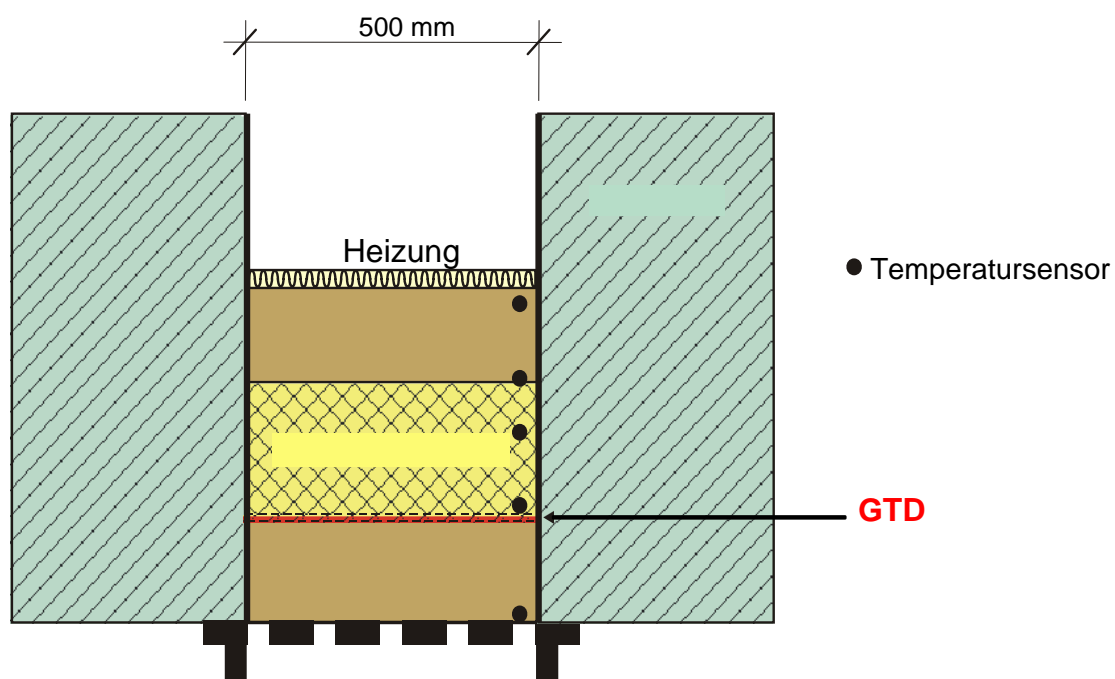


Bild 6: Austrocknungsversuch im Labor [Sporer/Gartung 2001]

Mit Laborversuchen kann man nicht die komplexe Wirklichkeit abbilden. Aber die Randbedingungen sind in Laborversuchen eindeutig definiert und man kann damit verschiedene Systeme miteinander vergleichen. Der von Sporer und Gartung [2001, 2002a] beschriebene Versuchsaufbau (Bild 6) erlaubt es, komplette Oberflächensysteme aus Deponien abzubilden. Die Austrocknung wird mittels eines eindimensionalen (vertikalen) Temperaturgradienten erzeugt. Der Feuchtigkeitstransport kann nach oben und nach unten erfolgen. Es sind verschiedene Aufbauten möglich. Ionenaustausch wäre möglich. Die Temperatur kann zur Zeitraffung genutzt werden. Durch den Einsatz einer Heizung auf der Oberseite des Versuchs ist jedoch eine gleichzeitige Durchwurzelung nicht sinnvoll. Der für die Austrocknung

am maßgeblichsten verantwortliche Einflussfaktor lässt sich aber wirklichkeitsnah abbilden. Für ein projektspezifisches System kann der für die Austrocknung einer GTD kritische Wassergehalt bestimmt werden bzw. es kann der Zeitpunkt ermittelt werden bis der kritische Wassergehalt während einer Trockenperiode erreicht wird.

Reuter und Ehrenberg [1998] berichten von Versuchen zum Nachweis der Austrocknungssicherheit. Hier wurde versucht mit gezielter Belüftung eine hohe Wasserspannungen von mehr als 300.000 hPa in der GTD zu erzeugen, um damit eine Trockenstress auf die GTD auszuüben. Die Vorgehensweise lässt aber nur schwerlich Übertragungen auf die Wirklichkeit zu. In einer Deponie wird die GTD auch nicht durch hohe Luftströmungen ausgetrocknet sondern infolge hoher Temperaturen und dadurch erzeugter Wasserspannungen. Zudem ist die Wassergehaltsverteilung an der Messprobe stark davon abhängig wo die Luft einströmt und wo sie wieder ausströmt. Die Austrocknung erfolgt unkontrolliert.

In weiteren Versuchen an der MFPA Weimar wurden durch Luftzuführung in einer Prüfzelle Trockenstressbedingungen an GTD geschaffen [Heerten/Reuter 2002]. Die Untersuchungen ergaben für GTD nach Ionenaustausch kritische Wassergehalte von 95 bis 100%. Trocken-Nass-Zyklen einer Natriumbentonit-GTD in derselben Prüfzelle ergaben Veränderungen der Durchlässigkeit um mindestens zwei Zehnerpotenzen.

Sporer und Gartung [2002b] stellten an einer Kalziumbentonit-GTD schon nach dem ersten Trocken-Nass-Zyklus große Veränderungen im Quellvermögen fest, die aber nicht auf einen Ionenaustausch zurückzuführen sind sondern auf eine irreversible Veränderung in der Struktur des Bentonits. Sie kommen zu dem Schluss, dass eine Austrocknung unterhalb des „kritischen Wassergehalts“ zu vermeiden ist. Die Fähigkeit eines Bentonits Wasser zu binden hängt von der Struktur und der Art der Tonminerale und von der „Spannungsgeschichte“ ab, d.h. dem Maß der Austrocknung bzw. der maximalen Saugspannung, die der Bentonit erfahren hat.

8 Zusammenfassung

Die wesentlichen Nachweise für lange Funktionsdauern von GTD sind die „Beständigkeit gegenüber maßgebenden Austrocknungsbeanspruchungen“ und die „Langzeitbeständigkeit der die Schubkraft übertragenden geotextilen Komponenten“. Darüber hinaus muss die Langzeit-Dichtigkeit gegenüber infiltriertem Niederschlagswasser nachgewiesen werden.

Für Standsicherheitsbetrachtungen sind Gleitsicherheitsnachweise in den Kontaktflächen – auch unter Einbeziehung der Inneren Scherfestigkeit der GTD – zu führen. Die thermische Oxidation von Geotextilen ist der maßgebende Alterungsprozess von Polyolefinen.

Die „Langzeit-Scherfestigkeit“ einer GTD hängt vom Kriechverhalten der geotextilen Komponenten ab. Die Scherfestigkeit des Bentonits erhöht sich infolge der Kationenumwandlung. Es darf nicht von einer Kurzzeit-Scherfestigkeit auf eine „Langzeit-Scherfestigkeit“ geschlossen werden. Zur Zeitraffung muss die Prüfung des Langzeit-Scherkriechverhaltens bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden. Eine Erhöhung der Schubspannung bewirkt eine Beschleunigung des Kriechvorgangs. Damit lassen sich die gesamten Versuchszeiten verkürzen.

Ein Kationenaustausch ist auf Dauer unvermeidlich aber eine Austrocknung unterhalb des „kritischen Wassergehalts“ muss vermieden werden. Messungen auf Testfeldern zeigen gute Systemwirksamkeiten von weit über 95%. Zahlreiche Ausgrabungen belegen, dass in unseren klimatischen Gegebenheiten in Deutschland in den meisten Fällen eine Überdeckung der GTD mit mindestens 100 cm und anderen günstigen Randbedingungen ausreichend ist, um eine Austrocknung zu vermeiden. Damit ist in vielen Fällen bei richtiger Wahl der Deckschichten auch die Gefahr der Durchwurzelung gemindert.

Literatur

- [1] Arlst, K.J. und Wolsfeld, N. (2004): Angepasste Oberflächenabdichtungs-Systeme für Monodeponien der Stahlindustrie – 2 Jahre Monitoring der 12 Testfelder am Standort Dillinger Hütte. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2004, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 241-257.
- [2] Benson, C.H., Thorstad, P.A., Jo, H.-Y. and Rock, S.A. (2007). Hydraulic performance of geosynthetic clay liners in a landfill final cover. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. July 2007: 814-827.
- [3] Blümel, W., Müller-Kirchenbauer, A., Ehrenberg, H. und von Maubeuge, K. (2006): Experimentelle Nachweise zur Funktionsdauer von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten. 22. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.

- [4] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (1998): Zulassungsgrundsätze für geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklasse I
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. GDA-Empfehlung Geotechnik der Deponien und Altlasten. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (Hrsg.). Berlin: Ernst & Sohn 1995.
- [6] DIN CEN/TS 14416 „Geosynthetische Dichtungsbahnen – Prüfverfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Wurzeln“
- [7] DIN CEN/TS 14417 „Geosynthetische Dichtungsbahnen – Prüfverfahren zur Bestimmung des Einflusses von Nass-Trocken-Wechselbeanspruchungen auf die Durchlässigkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen“
- [8] DIN CEN/TS 14418 „Geosynthetische Dichtungsbahnen – Prüfverfahren zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen auf die Durchlässigkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen“
- [9] DIN EN 12225 „Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdingrabversuch“
- [10] DIN EN 13493 „Geosynthetische Dichtungsbahnen – Eigenschaften, die für die Anwendung beim Bau von Deponien oder Lagerungsstellen für feste Abfallstoffe erforderlich sind“
- [11] DIN EN ISO 13438 „Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit“
- [12] EAG-GTD (2002): Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (Hrsg.). Berlin: Ernst & Sohn.
- [13] Egloffstein, T. (2001): Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. 7. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“. Geotechnik Sonderheft 2001, DGGT, Essen, S. 79-83.
- [14] Gartung, E and Zanzinger, H. (1998): Engineering Properties and use of geosynthetic clay liners. Geotechnical engineering of landfills, Proceedings of the symposium held at the Nottingham Trent University, Dixon, N., Murray, E.J. and Jones, D.R.V. (eds.), Thomas Telford, London, S. 131-149.
- [15] Heerten, G. (2004): Bentonitmatten als mineralisches Dichtungselement im Umweltschutz. 20. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [16] Heerten, G. und Reuter, E. (2002): Die Bedeutung der DIBt-Zulassungen für die Qualitätsanforderungen an Bentonitmatten heute und morgen. 18. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.

- [17] Heerten, G. und von Maubeuge, K.P. (1997): Auswirkungen von Wassergehaltsschwankungen in vernadelten Geosynthetischen Tondichtungsbahnen auf ihre Wirksamkeit als Dichtungselement. 5. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“. Geotechnik Sonderheft 1997, DGGT, Essen, S. 193-200.
- [18] Henken-Mellies, W.U. (2005): Oberflächenabdichtungen in Test-Versuchsfeldern auf der Deponie „Im Dienstfeld“. 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Eigenverlag LGA.
- [19] Heyer, D. (2000): Bentonitmatten als Dichtungselement in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien. 16. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [20] Hsuan, Y.G. and Koerner, R.M. (2002): Durability and lifetime of polymer fibers with respect to reinforced geosynthetic clay barriers; i.e., reinforced GCLs. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 111-117.
- [21] ISO/CD 10773 (draft 2007) „Clay geosynthetic barriers – Determination of permeability to gases.
- [22] Koerner, R.M., Soong, Te-Yang, Koerner, G.R. and Gontar, A. (2000): Creep Testing and Data Extrapolation of Reinforced GCL's. „Hot Topics in Geosynthetics – I“, proceedings of the GRI-14 Conference, S. 189–210.
- [23] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall eine Arbeitsgruppe (LAGA Ad-hoc-AG) (2005a): Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von GTD als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien „Bentonitmattegrundsätze“
- [24] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall eine Arbeitsgruppe (LAGA Ad-hoc-AG) (2005b): Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme
- [25] Meer, S.R. and Benson, C.H. (2007). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. May 2007: 550-563.
- [26] Melchior, S. (1999): Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen. 15. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [27] Melchior, S. (2002): Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 321-330.
- [28] Müller, W., Büttgenbach, B., Jakob, I. and Mann, H. (2003): Comparison of the oxidative resistance of various polyolefin geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, 21(2003), S. 289-315.
- [29] Müller, W., Seeger, S., Thies, M. and Gerloff, C. (2004): Long-term shear strength of multilayer geosynthetics. Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference, EuroGeo3, S. 429-434.

- [30] Reuter, E. und Ehrenberg, H. (1998): Untersuchungen zum Schrumpf- und Quellverhalten vernadelter geosynthetischer Tondichtungsbahnen. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 56, Eigenverlag.
- [31] Siegmund, M., Witt, K.J. und Alexiew, N. (2001): Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsveränderungen. 7. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“. Geotechnik Sonderheft 2001, DGGT, Essen, S. 97-104.
- [32] Sivakumar Babu, G.L., Sporer, H., Zanzinger, H. and Gartung, E. (2001): Self-Healing Properties of Geosynthetic Clay Liners. Geosynthetics International, Vol. 8, No. 5, S. 461-470.
- [33] Sivakumar Babu, G.L., Sporer, H., Zanzinger, H. and Gartung, E. (2002): Desiccation behaviour of selected geosynthetic clay liners. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 295-302.
- [34] Sporer, H und Gartung, E. (2001): Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten von geosynthetischen Tondichtungen. Geotechnik 24 (2001), DGGT, Essen, S. 273-279.
- [35] Sporer, H. (2002): Exhumed clay geosynthetic barriers. Präsentation auf dem „International Symposium IS Nuremberg 2002 on Clay Geosynthetic Barriers“, unveröffentlicht.
- [36] Sporer, H. and Gartung, E. (2002a): Laboratory tests on desiccation of geosynthetic clay liners. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 331-338.
- [37] Sporer, H. and Gartung, E. (2002b): Examinations on the self-healing capacity of geosynthetic clay liners. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 339-343.
- [38] Thies, M., Gerloff, C., Müller, W. and Seeger, S. (2002): Long-term shear testing of geosynthetic clay liners. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 97-104.
- [39] Trauger, R.J., Swan, R.H. and Zehong, Y. (1996): Long-Term Shear strength Behavior of a needlepunched Geosynthetic Clay Liner. "Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, ASTM STP 1308, Larry W.Well, ed., ASTM, Philadelphia, USA, S. 103–120.
- [40] Zanzinger, H. and Alexiew, N. (2002): Long-term internal shear testing on clay geosynthetic barriers. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 111-117.
- [41] Zanzinger, H. und Alexiew, N. (1999): Scherfestigkeit einer vernähten GTD im Kurzzeit- und Langzeitversuch. 6. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“. *Geotechnik Sonderheft 1999, DGGT, Essen, S. 217-225.*