

# Entwicklung der geosynthetischen Tondichtungsbahn über die DIBt-Zulassung zum LAGA Eignungsnachweis

Dr. Thomas Egloffstein

## 1. Einleitung

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD, engl.: GCL Geosynthetic Clay Liner) oder Geosynthetic Barriers – Clay (GBR-C), auch Bentonitmatten genannt, sind industriell gefertigte hydraulische Dichtungselemente, die aus Bentonit oder einem anderen, gering durchlässigen Dichtungsmaterial bestehen, welches zwischen mindestens zwei Geotextilien fixiert und durch Vernadelung, Vernähung oder Verklebung zusammengehalten wird. Es gibt auch Geosynthetische Tondichtungsbahnen, bei denen der Bentonit auf einer Folie aufgeklebt ist (Definition nach Geosynthetic Research Institute Philadelphia (GRI) in: MAUBEUGE, K. V. 1994).

Bentonitmatten gibt es seit etwa Mitte der 80er Jahre. Vorläufer der geosynthetischen Tondichtungsbahnen waren seit ca. Anfang der 80er Jahre mit Bentonit gefüllte Wellkartonkonstruktionen (Volcaly Panels), die i. W. zur Abdichtung von Fundamenten und aufgehenden, erdberührten Wänden eingesetzt wurden und werden.

Seit Mitte der 80er Jahr gibt es auch erste Anwendungen in Deponieabdichtungen. In Deutschland beschränkt sich die Anwendung von Bentonitmatten i. W. auf die Oberflächenabdichtung von Deponien, in den USA und in von diesen beeinflussten Wirtschaftsräumen finden geosynthetische Tondichtungsbahnen auch verbreitete Anwendung als mineralische Komponente in Deponiebasisabdichtungen.

Neben Deponieabdichtungen haben Geosynthetische Tondichtungsbahnen einen breit gefächerten Einsatzbereich. Neben den oben bereits genannten Bauwerksabdichtungen, Wasserspeicherbecken, Deichen und Dämmen seien an dieser Stelle vor allem die RiStWag (Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten) und das Merkblatt über „Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen bei Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“, M TS E, beide von der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), genannt.

## **2. Von der TA Siedlungsabfall über die allgemeinen bauaufsichtliche Zulassungen für Geosynthetische Tondichtungsbahnen durch das DIBt bis zur bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilung und den bundeseinheitlichen Qualitätsstandards der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ – Ein Abriss**

Im Bereich Deponieabdichtungen gab es in Deutschland seit Ende der 70er Jahre Merkblätter der LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) sowie einzelner Bundesländer zum Thema Deponieabdichtungen. Erst die Verwaltungsvorschriften TA Abfall (1991) und TA Siedlungsabfall (1993) regelten u. a. bundeseinheitlich die Anforderungen an die Abdichtungssysteme von Deponien.

In beiden Verwaltungsvorschriften für Sonderabfall- und Siedlungsabfalldeponien wurde sowohl für die Deponiebasis als auch für die Deponieoberfläche eine sogenannte „Regelabdichtung“ als Standard festgelegt. Diese bestand aus einer mineralischen Abdichtung für die Deponieklasse DK I (Bauschuttdeponie) und einer Kombinationsdichtung aus mineralischer Abdichtung und einer Kunststoffdichtungsbahn für die Deponieklassen DK II (Hausmülldeponie) und DK III Sonderabfall(Industriemüll-)deponien. Der gleichlautende Anhang E der TA Abfall und der TAsi legte die Anforderungen an die Materialien und die Qualitätssicherung sehr detailliert fest.

Wollte der Deponiebetreiber von den Regelabdichtungen abweichen, so musste er die Gleichwertigkeit des alternativen Systems in einem Gleichwertigkeitsnachweis belegen, der von der zuständigen Genehmigungsbehörde anerkannt werden musste.

Es zeigte sich im Verlauf der 90er Jahre, dass für die zunehmend benötigten Oberflächenabdichtungen von Deponien die Regelabdichtungskomponente „mineralische Abdichtung“ für Oberflächenabdichtungen aufwendig und teuer herzustellen und zudem durch i. W. Austrocknungserscheinungen in ihrer dauerhaften Funktionsfähigkeit gefährdet war.

Gleichzeit drängten immer mehr „alternative Abdichtungen“ zur Regelabdichtungen auf den Markt, unter anderen die Bentonitmatten. Diese waren leicht und schnell zu verlegen und benötigten kein besonders stabiles Auflager, wie dies zur Verdichtung der mineralischen Abdichtung erforderlich ist. Sie waren damit in der Regel auch kostengünstiger und erfreuten sich eines regelrechten Booms. Allerdings musste für jede alternative Abdichtung zur Regelabdichtung nach TA Si ein Gleichwertigkeitsnachweis bei der zuständigen Genehmigungsbehörde im Rahmen der Genehmigungsplanung eingereicht werden, und diese musste die alternative Abdichtung genehmigen.

Aufgrund des föderalen Systems in Deutschland mit 16 Bundesländern und insgesamt ca. 40 Genehmigungsbehörden für Deponien (sog. Mittelbehörden, i. d. R. Regierungspräsidien bzw. Bezirksregierungen) war die Genehmigungspraxis z. T. höchst unterschiedlich. Die Genehmigung einer alternativen Abdichtung (z. B. Bentonitmatten oder auch Asphalt dichtungen statt mineralischer Abdichtung) war bei der einen Genehmigungsbehörde überhaupt kein Problem und bei einer anderen fast unmöglich oder mit hohen zusätzlichen Auflagen verbunden.

In dieser nicht befriedigenden Situation übernahm 1995 das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) in Berlin die Initiative und gründete den Sachverständigenausschuss „Deponieabdichtungen mit mineralischen Baustoffen“, um auf der Basis des Baurechts sogenannte „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen“ für bestimmte alternative Dichtungskomponenten zu erteilen. Diese konnten dann von den Genehmigungsbehörden als Grundlage für die Anerkennung der Gleichwertigkeit der Abdichtung für Ihre Genehmigung herangezogen werden.

Die 1995 vom DIBt veröffentlichten „Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen“ (DIBt 1995), definierten Anforderungen an die Leistungen von Deponieabdichtungen hinsichtlich ihrer Dichtigkeit, mechanischen und hydraulischen Widerstandsfähigkeit, Standsicherheit, Verformungssicherheit, Beständigkeit und Herstellbarkeit, die noch heute die Grundlage für bundeseinheitliche Eignungsbeurteilungen und bundeseinheitliche Qualitätsstandards bilden. So wurde die für Oberflächenabdichtungen entscheidende Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit aus der Regelabdichtung der TA Siedlungsabfall abgeleitet.

Unter der Annahme vom 30 cm Wasserüberstau auf der mineralischen Abdichtung bei einer Schichtdicke von 0,5 m und einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s ergibt sich eine Permeationsrate von  $q = 8 \cdot 10^{-9}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · s. Um unterschiedlich dicke Abdichtungssysteme besser miteinander vergleichen zu können, wurde bereits in den „Zulassungsgrundsätzen für geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklasse I“ (DIBt 1998) die Permittivität  $\psi$  (Psi) statt des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k$  verwendet. Die Permittivität ist dabei der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  geteilt durch die Dicke der Schicht  $l \Rightarrow \psi = k/l$  [1/s]. Mit der Permittivität werden so unterschiedlich dicke Abdichtungskomponenten wie z. B. eine mineralische Dichtung und eine Bentonitmatte direkt miteinander vergleichbar.

Zu den Anforderungen an die Permittivität von Geosynthetischen Tondichtungsbahnen siehe unten das Kapitel „Grundsätzliche Anforderungen und spezielle Anforderungen an Bentonitmatten beim Einsatz in Oberflächenabdichtungen von Deponien“.

Nach umfangreichen Vorarbeiten und Untersuchungen, u. a. auch auf der Grundlage der Ergebnisse und Erfahrungen aus den Bentonitmantentestfeldern auf der Deponie Georgswerder (Melchior 1996) (hierzu s. a. den Beitrag Dr. Melchior in diesem Tagungsband), erteilte das DIBt in den Jahren 1997 und 1998 den Geosynthetischen Tondichtungsbahnen der Typen Bentofix<sup>®</sup> D 4000 und BZ 6000 sowie DZ 6000 der Firma NAUE Fasertechnik, NaBento<sup>®</sup> NDB 01 R, der Fa. HUESKER Synthetic und der Bentomat SS, der Fa. CETCO Europe Limited eine allgemeinen bauaufsichtliche Zulassung zur Verwendung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der Deponieklasse I. Die Zulassungen waren auf 5 Jahre befristet.

Da das DIBt Aufgaben übernommen hatte, die zumindest teilweise in den Bereich der Hoheit der Bundesländer, Vertreten durch die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) fielen, konnte sich die LAGA und das DIBt nicht über eine Finanzierung der Fortführung der Arbeit des DIBt einigen und das DIBt zog sich von dieser Aufgabe zurück.

Da der Unterstützungsbedarf für die 40 Genehmigungsbehörden in Deutschland nach dem Auslaufen der vom DIBt erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (2002/03) jedoch nach wie vor bestand, gründete die LAGA 2004 die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“, die u. a. Eignungsbeurteilungen für Abdichtungskomponenten erstellen sollte.

Aufbauend auf den DIBt-Grundsätzen für den „Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen“ (1995) und den „Zulassungsgrundsätzen für geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklasse I“ (1998), gab die LAGA Ad-hoc-AG 2005 die „Allgemeinen Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten“ („Allgemeine Grundsätze“) für material- und systemunabhängige Anforderungen und Nachweisverfahren und 2009 die „Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien“ (sog. „Bentonitmantengrundsätze“) heraus.

Am 27.01.2009 wurde durch die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ den Bentonitmantentypen Bentofix<sup>®</sup> B 4000, BZ 6000 und NSP 4900 der Fa. NAUE sowie den Ty-

pen NaBento® RL-N und RL-C der Fa. HUESKER, die Eignung zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien durch die Eignungsbeurteilung attestiert.

Am 24.03.2009 folgte die vorläufige Eignungsbeurteilung für die Bentonitmatte Bentomat® GDA der Fa. CETCO Europe in Deutschland, vertreten durch die Fa. BECO Bermüller. Die älteren Eignungsbeurteilungen für die Bentofix® B 4000 und BZ 6000 finden sich noch auf der Homepage des <http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de>, die neueren bzw. aktualisierten Eignungsbeurteilungen von Bentomat® GDA und NaBento® RL-N und RL-C auf der Homepage der LAGA <http://www.laga-online.de>.

Am 16.07.2009 trat in Deutschland die neue Deponieverordnung in Kraft, die sich in einem Paradigmenwechsel von der Vorgabe einer Regelabdichtung abwandte und für die verschiedenen Deponieklassen nur noch die Anforderungen an die Abdichtungskomponenten und die erforderliche Anzahl für die jeweilige Deponiekategorie definiert (1. / 2. Abdichtungskomponente erforderlich / nicht erforderlich). Die Abdichtungskomponenten sollen über eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung nach einem bundeseinheitlich gewährleisteten Qualitätsstandard für Deutschland verfügen, wie dies bei den Eignungsbeurteilungen der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“, seit 2010 in LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ umbenannt, der Fall ist.

Die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ veröffentlichte zwischenzeitlich (Stand Januar 2014) auf ihrer Homepage 22 Bundeseinheitliche Qualitätsstandards (BQS), von denen zwei für Geosynthetische Tondichtungsbahnen von unmittelbarer Bedeutung sind. So regelt der BQS 5-5 „Mineralische Oberflächenabdichtungen – Übergreifende Anforderungen“ (LAGA 2010) die grundsätzlichen Anforderungen und ersetzt damit die „Allgemeinen Grundsätze“ (LAGA 2005) und der BQS 5-5 „Geosynthetische Tondichtungsbahnen“ (LAGA 2012), der die „Bentonitmattengrundsätze“ von 2009 ersetzt.

### **3. Grundsätzliche Anforderungen und spezielle Anforderungen an Bentonitmatten beim Einsatz in Oberflächenabdichtungen von Deponien**

Aufbauend auf den DIBt-Grundsätzen von 1995 und 1998 hat die LAGA Ad-hoc-AG 2005 „Allgemeine Grundsätze“ und 2009 spezielle „Bentonitmattengrundsätze“ veröffentlicht, die bis zum Erscheinen der BQS 5-0 „Mineralische Oberflächenabdichtungen – Übergreifende Anforderungen“ (LAGA 2010) und BQS 5-5 „Geosynthetische Tondichtungsbahnen“ (LAGA 2012) Grundlage der Eignungsbeurteilung für geosynthetische Tondichtungsbahnen waren.

Die „Allgemeinen Grundsätze für den Eignungsnachweis“ und die „Bentonitmatten-grundsätze“ stehen nach wie vor auf der Homepage <http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/>, und es ist für den Anwender nur sehr schwer erkennbar, wie der Zusammenhang bzw. die gegenseitige Abgrenzung der sehr ähnlich aufgebauten Papiere zueinander ist.

Nachfolgend möchte sich der Verfasser auf die beiden Punkte Dichtigkeit und Dichtigkeit nach Ionenaustausch beschränken, die wesentlicher Bestandteil vieler, in den letzten Jahren durchgeführter, Untersuchungen waren.

### 3.1 Dichtigkeit

Basierend auf den Anforderungen an den Durchlässigkeitsbeiwert für die mineralische Oberflächenabdichtung von  $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$  m/s gemäß TA Siedungabfall (1993) bzw. Deponieverordnung (2009), ergeben sich, wie in den „Allgemeinen Grundsätzen“ (1995/2005) beschrieben, bei einer Schichtdicke von 0,5 m (für die mineralische Abdichtung) eine Permeationsrate ( $q$ ) für die Deponieklasse I und II von  $q \leq 8 \cdot 10^{-9}$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · s) und bei einem angenommenen hydrostatischen Aufstau auf der Abdichtung von 0,3 m Wassersäule eine zulässige Permittivität  $\psi$  von:

$$\psi_{zul} = \frac{q}{h} = \frac{8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,3 \text{ m}} = 2,7 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{s}}$$

Diese Anforderung an die Permittivität muss unter Berücksichtigung des Einflusses der Veränderungen der Dichtungseigenschaften des Bentonits infolge Kationenaustausch von der Natrium- in die Calciumbelegung bei max. 150 cm Wassersäule und einer Auflast von 30 kN/m<sup>2</sup> gewährleistet werden. Der Ionenaustausch ist im Durchlässigkeitsversuch gemäß BQS 5-5, Anhang 3: „Bestimmung der Permittivität nach Erstquellung unter Salzeinwirkung und Ionenaustausch“ mit Calciumchloridlösungen der Konzentration  $c = 0,005; 0,01; 0,025$  und  $0,05$  mol/l CaCl<sub>2</sub> bis zum vollständigen Umtausch der Natriumionen gegen Calciumionen am Bentonit, durchzuführen. Bei 150 cm Oberwasserdruck dauert der vollständige Ionenaustausch, abhängig von der Permittivität bzw. Durchlässigkeit der Probe, bei der höchsten Konzentration von  $0,05$  mol/l CaCl<sub>2</sub> etwa 6 Monate und bei der geringsten Konzentration von  $0,005$  mol/l etwa 1 - 2 Jahre, ggf. auch länger.

Entscheidend für die Länge der Versuchsdauer ist, wie schnell der durch den Ionenaustausch verursachte Anstieg der Durchlässigkeit um den Faktor ca. 5 bis 8 stattfindet, da nach diesem Anstieg im Vergleich zur Durchlässigkeit vor dem Anstieg die ca. 5 – 8 fache Menge der Prüflösung pro Zeiteinheit durch die Probe fließen kann und der Ionenaustausch etwa um diesen Faktor beschleunigt wird.

### 3.2 Dichtigkeit vor und nach Ionenaustausch, Abminderungsfaktoren

Fabrikneue Natrium-Bentonitmatten haben heute eine Permittivität im Bereich von  $\psi \approx 2,0 \cdot 10^{-9}$  1/s, abhängig i.W. von der Art und Qualität des Bentonits und der Art des Verbundes (vernadelt oder vernäht).

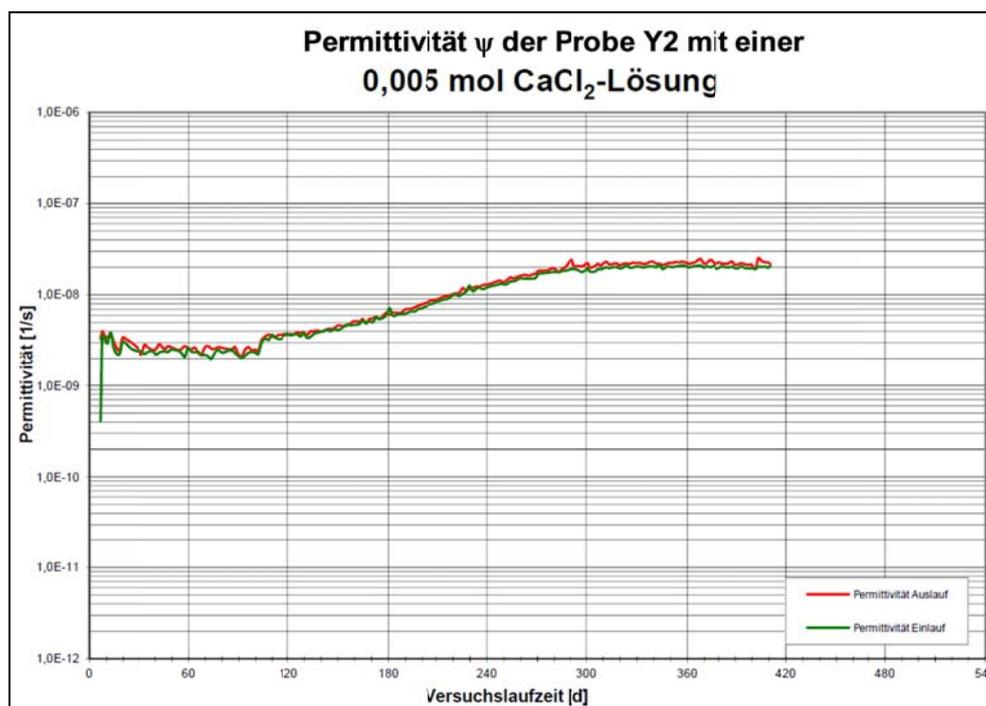
Für frisch verlegte geosynthetische Tondichtungsbahnen ist die Einhaltung der o. g. Anforderung an die Permittivität von  $\psi \leq 2,7 \cdot 10^{-8}$  1/s keine Herausforderung, sondern ist mit großem Sicherheitsabstand einzuhalten. Aus früheren Untersuchungen (Egloffstein 2000) war für die Eignungsbeurteilungen von Bentonitmantentypen ein Anpassungs- bzw. Abminderungsfaktor  $A_2$  für den Ionenaustausch von 6,0 bis zu einer Salzbelastung von 0,005 mol/l festgelegt worden, d.h. die in der Eignungsbeurteilung angegebenen Permittivität der neuen geosynthetischen Tondichtungsbahn durfte nach erfolgtem Ionenaustausch um den Faktor 6 höher sein. Zusätzlich gibt es noch den Abminderungsfaktor  $A_1$  für die veränderte Dichtigkeit an Überlappungen / Fügstellen = 1,05. Der einzuhaltende Wert für die Permittivität nach Ionenaustausch erniedrigt sich dadurch auf  $\psi \leq 2,57 \cdot 10^{-8}$  1/s.

Nachdem die ersten Eignungsbeurteilungen für geosynthetische Tondichtungsbahnen des Typs Bentofix® für NAUE auf der Grundlage der früheren Untersuchungen in Egloffstein (2000), d.h. der Einhaltung der o. g. Anforderung auf der Basis des 95 %-Fraktilwertes aus der statistischen Auswertung der Produktüberwachung nach Abminderung um die beiden Anpassungsfaktoren  $A_1$  und  $A_2$ , erteilt wurden, musste dies für weitere Eignungsbeurteilungen der Typen NaBento® RL-N von HUESKER und Bentomat® GDA von CETCO versuchs-technisch nachgewiesen werden. Dies führte zu einer ersten, breit angelegten Versuchsserie in den Jahren 2008/09 (Egloffstein 2010) mit der Durchströmung mit  $\text{CaCl}_2$ , in den mit den Herstellern abgesprochenen Konzentrationsbereichen von 0,01 bis 0,03 mol/l (elektr. Lf. ca. 2.000 bis 6.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Calciumkonzentration ca. 400 bis 1.200 mg/l).

Bei dieser Versuchsserie wurde die Erstquellung des Bentonit mit entmineralisiertem Wasser durchgeführt.

Die 2008/09 durchgeführten Versuche liefen z. T. sehr lange (186 bis 511 Tage), im Mittel etwas über 400 Tage. Die Grundanforderung, eine Permittivität von  $\psi \leq 2,57 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$  zu erreichen, wurde durch alle Bentonitmattentypen im Mittel der Parallelproben erreicht, einzelne Proben zeigten zum Teil eine etwas höhere Permittivität, wobei hinzugefügt werden muss, dass die  $\text{CaCl}_2$ -Konzentration 4 – 6-fach über der damaligen Anforderung von 0,005 mol/l lag.

Die Wahl der „richtigen“ Calciumchlorid-Konzentration war nicht ganz einfach. Bei zu niedrig gewählter Konzentration resultiert eine sehr lange Versuchsdauer, bei zu hoch gewählter Konzentration kann ein negativer Einfluss auf die Permittivität bzw. den Durchlässigkeitsbeiwert nicht ausgeschlossen werden. Ähnliches gilt für die Wahl des Oberwasser- bzw. Durchströmungsdruckes. Eine gewisse Beschleunigung ist durch höhere hydraulische Gradienten erreichbar, wobei Gradienten über  $i \gg 150$  nicht empfohlen werden. Abbildung 1 zeigt ein charakteristisches Beispiel für die ungefähre Versuchsdauer bei geringen Konzentrationen der Austauschlösung.



**Abb. 1:** Zunahme der Permittivität und des Durchlässigkeitsbeiwertes einer geosynthetischen Tondichtungsbahn, mit einem Flächengewicht im Bereich von  $4.500 \text{ g/m}^2$  Bentonit, durch den Ionenaustausch mit einer  $0,005 \text{ mol/l}$   $\text{CaCl}_2$ -Lösung. Der Anforderungswert von  $\psi \leq 2,57 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$  wurde bei dieser Probe knapp eingehalten.

Ziel der Versuche ist es, einen möglichst vollständigen Ionenaustausch mit einem verbleibenden Natriumanteil von lediglich ca. 0,5 bis < 3 % der Kationenaustauschkapazität zu erreichen. Da dies erst nach Abschluss der Versuchsdauer und Ausbau der Probe ermittelt werden kann, hat es sich bewährt, über die Perkulationsmenge [ml], die Konzentration der Lösung [mol(eq)/l] und die Kationenaustauschkapazität des Bentonits (ca. 70 mmol(eq)/100 g), den Anteil Natrium an der KAK (i. d. R. ca. 60 – 90 %), die Bentonitmenge in der Probe und wie viele mmol(eq) Calcium die Probe durchströmt haben, zu errechnen und wie weit der Ionenumtausch somit bereits (theoretisch) fortgeschritten ist. Ein rechnerisch mindestens dreimaliger, besser fünfmaliger Austausch der Ionenbelegung am Bentonit sollte erreicht sein, bevor der Versuch ausgebaut wird. Zur Kontrolle wird das Perkolat im chemischen Labor auf sein Natrium/Calcium-Verhältnis analysiert.

Bei einer Kationenaustauschkapazität des Bentonits von 70 mmol(eq)/100 g, einem Belegungsgrad mit Natrium (+ Kalium) von 75 %, einem Flächengewicht von 4.500 g Bentonit/m<sup>2</sup>, einer Permittivität von  $\psi = 5 \cdot 10^{-9}$  1/s und einem hydraulischen Gradienten  $i = 150$  sowie einer Konzentration der Austauschlösung von 0,05 mol/l CaCl<sub>2</sub>, dauert es rechnerisch 36 Tage, bis die Austauschlösung die austauschfähig gebundenen Natriumionen einmal ausgetauscht hat. Bei gleichbleibend niedriger Durchlässigkeit würde ein dreimaliger Austausch ca. 134, ein 5-maliger Austausch in diesem Rechenbeispiel ca. 231 Tage dauern.

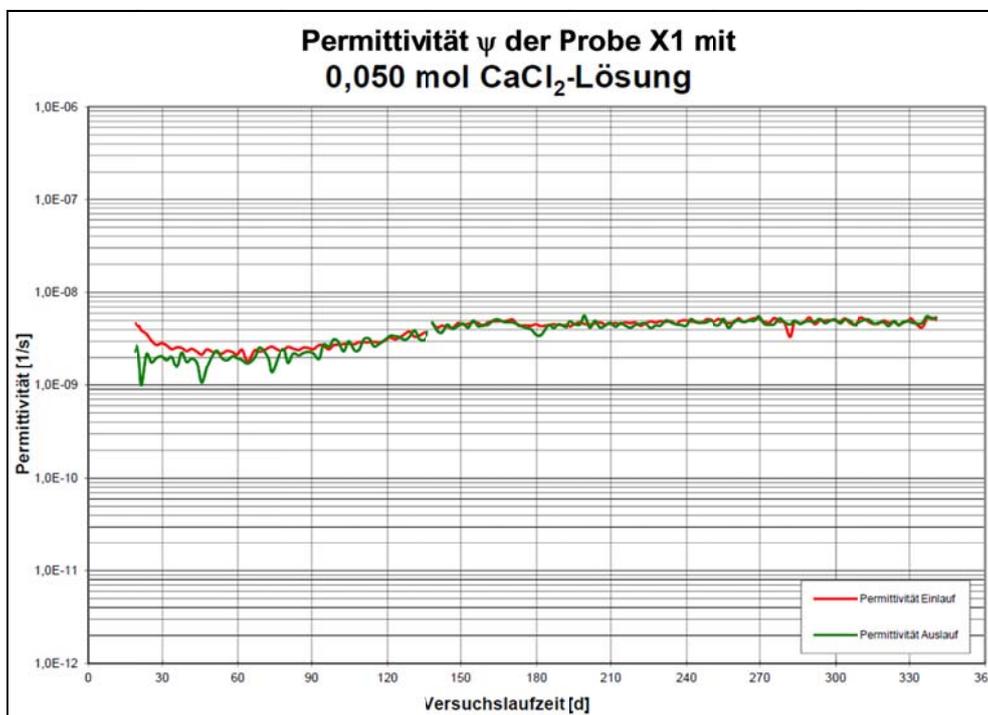
Da durch den Ionenaustausch der Durchlässigkeitsbeiwert in der Regel zwischen dem ersten und dem letzten Drittel der Versuchszeit ansteigt, verkürzen sich durch den dadurch bedingten höheren Durchfluss der Austauschlösung die Austauschzeiten in diesem Zeitraum in der gleichen Größenordnung wie die Permittivität bzw. Durchlässigkeit ansteigt (bei  $\approx$  ca. 5 - 8 fachen Anstieg für diesen Zeitraum auf von  $\psi$  auf  $\approx$  1/5 – 1/8-tel).

Auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen aus der ersten Versuchserie zur Dichtigkeit nach Ionenaustausch, wurde vom Verfasser ein Entwurf für den Anhang 3 des BQS 5-5 verfasst, der anschließend noch von den externen Sachverständigen der LAGA Ad-hoc-AG in einem iterativen Abstimmungsprozess durch weitere Details und zusätzliche Prüflösungen ergänzt bzw. erweitert wurde.

Die Konzentrationen der Prüflösungen wurden aus Untersuchungen des LANUV NRW (2009) abgeleitet, bei denen ca. 316 Messungen der elektrischen Leitfähigkeit von Wässern aus Rekultivierungs- und Entwässerungsschichten eingeflossen sind. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein relativ guter Indikator für den Elektrolytgehalt des Sickerwassers (Bodenlösung) aus Rekultivierungsböden, der für Böden des humiden Klimas in Mitteleuropa über-

wiegend von Calcium und Magnesium ( $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \gg \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ) bestimmt wird. Alle weiteren Kationen in der Bodenlösung wie Natrium, Kalium, Eisen, Aluminium, Ammonium, ggf. Schwermetalle, spielen aufgrund ihrer, in der Regel sehr viel geringeren Konzentration und der z. T. geringeren Wertigkeit ( $\text{Na}^+, \text{K}^+$ ), nur eine untergeordnete Rolle.

Eine Prüflüssigkeit von 0,005 mol/l Calciumchlorid entspricht etwa einer Leitfähigkeit von 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , die von 0,05 mol/l etwa 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Etwa 70 % der gemessenen Leitfähigkeiten lagen unter 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , das 90 % Perzentil lag bei ca. 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und das 95 % Perzentil bei ca. 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Die höchsten gemessenen Werte ( $\approx 2\%$ ) lagen über 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Abb. 2:** Beispiel der Zunahme der Permittivität einer geosynthetischen Tondichtungsbahn mit einem Flächengewicht im Bereich von 6000  $\text{g}/\text{m}^2$  durch den Ionenaustausch mit einer 0,05 mol/l  $\text{CaCl}_2$ -Lösung gemäß BQS 5-5, Anhang 3.

### 3.2.1 Fazit zur Durchlässigkeit nach Ionenumtausch

Die Anforderung an die Permittivität von geosynthetischen Tondichtungsbahnen nach Ionenumtausch und dem Abminderungsfaktor  $A_1$  für die Überlappungen ( $\psi \leq 2,57 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$ ) liegt relativ nahe an der Grenze des Erreichbaren für dieses Dichtungselemente. Alle bisher nach BQS 5-5, Anhang 3, geprüften Typen aller drei Hersteller mit Eignungsbeurteilung der LAGA haben diese Anforderung mit der höchsten Konzentration der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung von 0,05 mol/l erfüllt. Der sog. „Sicherheitsabstand“ zum Anforderungswert ist insbesondere bei Typen mit „normalen“ Flächengewichten ( $\approx 4000 - 4500 \text{ g Bentonit/m}^2$ ) zum Teil nicht sehr groß. Höhere Flächengewichte, d.h. höhere Bentonitgehalte, verringern die Permittivität in gewissen Grenzen, verteuern jedoch das Produkt geosynthetische Tondichtungsbahn. Ob dies für alle Anwendungsfälle erforderlich ist, muss die Diskussion in der Zukunft erweisen.

### 3.3 Weitere Anforderungen des BQS 5-5 an Geosynthetische Tondichtungsbahnen

Gemäß Punkt 5, „Schutzmaßnahmen“ unter dem Punkt Entwässerungsschicht und im Anhang 1 „Schutzmaßnahmen gegen schädliche Wasserspannungen in geosynthetischen Tondichtungsbahnen“, wird gefordert:

- „Es ist eine mindestens 10 cm dicke Wasser speichernde Sandschicht (SE, SW, SU) auf der Geosynthetischen Tondichtungsbahn... als untere Lage der Entwässerungsschicht zur Erhöhung des Schutzes gegen Austrocknen der GTD einzubauen.“

Die Anforderung, auf der geosynthetischen Tondichtungsbahn eine 10 cm dicke wasserspeichernden Sandschicht (DE, SW, SU) Sand zur Erhöhung des Schutzes gegen Austrocknung aufzubringen, ist nach Ansicht des Verfassers zu unspezifisch und in ihrer Wirksamkeit zu wenig belegt, um diese bautechnisch sehr aufwendig umzusetzende Anforderung zu begründen. Zumindest enggestufter (SE) bzw. weitgestuft (SW) Sand hat per se und ohne weitere Spezifikationen nicht automatisch ein gutes Wasserspeichervermögen.

Üblicherweise kommt auf eine Bentonitmatte als Entwässerungsschicht eine geotextile Entwässerungsschicht (Dränmatte), welche nach Einschätzung des Verfassers keine negativen Auswirkungen auf das Austrocknungsverhalten einer Bentonitmatte hat. Die Anforderung an die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von  $\geq 1,5 \text{ m}$  und an die nutzbare Feldkapazität von mindestens 200 mm, sollten nach Erfahrungswerten in Standardfällen genügen, um eine schädliche Austrocknung der Bentonitmatte zu verhindern. Der Einbau einer 10 cm dicken Sandschutzschicht, z. B. im Böschungsbereich i. d. R. mit Langarmbagger, ist sehr aufwen-

dig und birgt die Gefahr der Verletzung der Geosynthetischen Tondichtungsbahn. Diese Schutzmaßnahme sollte zumindest als pauschale Anforderungen noch einmal überdacht werden und /oder ggf. auf spezielle Anwendungsfragen beschränkt werden.

#### **4. Resümee und Ausblick**

Geosynthetische Tondichtungsbahnen sind in den letzten ca. 25 Jahren in Deutschland als Abdichtungskomponente für Oberflächenabdichtungen von Deponien, aber auch außerhalb von Deponien für Lärmschutzwälle, RistWag-Maßnahmen etc. auf dem stetigen Vormarsch und haben weiterhin das Potential, andere Abdichtungskomponenten zu ersetzen.

Im Bereich von Oberflächenabdichtungen für Deponien wird diese Zunahme aufgrund des Kostenvorteils und der einfachen Genehmigungsfähigkeit aufgrund der erteilten bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen der LAGA für alle drei großen Hersteller noch ausgeprägter der Fall sein, als dies schon bisher der Fall war.

International, insbesondere in von den USA beeinflussten Wirtschaftsräumen, ist es durchaus üblich Bentonitmatten, meist in Kombination mit Kunststoffdichtungsbahnen, auch als Basis- und Zwischenabdichtungen ein zusetzen. Diesen Trend sieht der Verfasser auch für Deutschland und Europa. Dadurch, dass in Deutschland und in vielen Kernländern der EU nur noch inerte mineralische Abfälle abgelagert werden dürfen, hat sich die Sickerwasserqualität deutlich verbessert und ist vor allem vorhersagbarer geworden. Zwischenzeitlich liegen auch mehr belastbare Untersuchungen mit diversen Sickerwässern, Eluaten und Salzlösungen vor, die das Durchlässigkeitsverhalten von Bentonitmatten unter Sickerwasserbeaufschlagung kalkulierbarer machen. Insbesondere die den Durchlässigkeitsbeiwert bzw. die Permittivität relativ stark beeinflussende Wirkung höherer Auflasten kompensiert zumindest teilweise die etwas höhere Durchlässigkeit durch höhere Salzkonzentrationen (anorganisches Sickerwasser). Hinzu kommt durch die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS 2-0 bis 2-3 für Basis- als auch BQS 5-0 bis 5-3 für Oberflächenabdichtung) eine Erschwernis für den Einsatz von mineralischen Dichtungsmaterialien.

Außerhalb von Deponien gewinnt das Merkblatt M TS E (2009) der FGSV, über „Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“, insbesondere bei Oberflächenabdichtungen für Lärmschutzwällen mit Z2-Materialien immer mehr an Bedeutung (Egloffstein et al. 2014). Hier mangelte es in der Vergangenheit an geeigneten Standards und es wurden z. T. Lösungen

ausgeführt (Neigungen, Beschaffenheit und Mächtigkeit der Überdeckung, oft ohne Entwässerungsschicht), die nach heutigem Kenntnisstand so nicht mehr ausgeführt werden sollten.

Eine neuere Entwicklung sind Bentonitmatten mit einer zusätzlichen PE-Beschichtung oder einer mit einem Kleber aufgetragenen Folie (meist 0,2 bis 1 mm Dicke), die durchaus Vorteile im Austrocknungsverhalten und gegen Durchwurzelung gegenüber „normalen“ Bentonitmatten haben können, auch wenn die Folien für gestandene Deponiebauern im Vergleich zu einer Kunststoffdichtungsbahn sehr dünn sind.

Das Produkt Geosynthetische Tondichtungsbahn, wie auch andere artverwandte Produkte, welche Dichtungs- oder auch Adsorptionsmaterialien in geotextilen Containern als Rollenware beinhalten, lassen auch für die Zukunft noch die eine oder andere interessante Entwicklung erwarten.

## 5. Literatur

Bräcker, W. (2009): Ergebnisse der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“

Abfallwirtschaftsfakten 18, Hildesheim, April 2009

<http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de>.

Bräcker, W. (2011): Aktueller Stand der Erarbeitung bundeseinheitlicher Qualitätsstandards, Eignungsbeurteilungen und Zulassung für Komponenten der Deponieabdichtungssysteme. In: Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.), Tagungsband zum 23. Karlsruher Deponieseminar. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2013. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 21, Karlsruhe.

DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2002): Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen EAG-GTD. Ernst & Sohn, Berlin.

DIBt Deutsches Institut für Bautechnik (1995): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. In: DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.) GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten (Anhang). Ernst & Sohn, Berlin, 3. Auflage 1997.

DIBt Deutsches Institut für Bautechnik (1997/98): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Geosynthetische Tondichtungsbahnen zur Verwendung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der Deponieklasse I nach TA Siedlungsabfall. NAUE Bentofix D 4000, BZ 6000, DZ 6000; CETCO Europe Limited Bentomat SS, HUESKER NaBento NBD 01R, Berlin, 1997/98.

- DIBt Deutsches Institut für Bautechnik (1998): Zulassungsgrundsätze für geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklasse I; Sachverständigenausschuss "Deponieabdichtungen mit mineralischen Baustoffen"; Berlin, Januar 1998.
- DIN EN 16416 (2013): Geosynthetische Tondichtungsbahnen – Bestimmung der Durchflussrate – Triaxialzellen-Methode mit konstanter Druckhöhe; Deutsche Fassung EN 14146: 2013. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag, Berlin.
- Egloffstein, Th. (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. Diss., Band 3, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe.
- Egloffstein, Th. (2010): Investigations carried out concerning suitability assessment for geosynthetic clay liners as surface sealings at landfills. Conference proceedings of 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners (GBR-C 2k10). Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg.
- Egloffstein, Th., Burkhardt, G. (2013): Erste Erfahrungen mit der Umsetzung der bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) in der Praxis. In: Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.) Tagungsband zum 23. Karlsruher Deponieseminar. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2013. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 23, Karlsruhe.
- Egloffstein, Th., Kalsow, J., Maubeuge, K. v., Ehrenberg, H. (2012): Multi-component Geosynthetic Clay Liners A Product with New Possibilities. – Third Symposium on Current and Future Practices for the Testing of Multi-Component of Geosynthetic Clay Liners, June 29, 2012, San Diego, CA. ASTM International. Publication STP1562, Editor(s): K. P. von Maubeuge; J. P. Kline. W. Conshohocken, PA, USA, Published 2013.
- Egloffstein, Th., Vollmert, L., v. Maubeuge, K. (2014): Technische Sicherungsmaßnahmen mit Abdichtungskomponenten aus Geokunststoffen für die sichere Verwertung von umweltrelevanten Baustoffen. TAE Technische Akademie Esslingen. 9. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, 15.01.2014, Esslingen.
- Herold, C. (1998) Die bauaufsichtlichen Zulassungen von Bentonitmatten als Dichtungselement für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien nach Deponieklasse I der TA-Siedlungsabfall. Müll und Abfall, MUA 05.1998, Erich Schmidt Verlag
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (2010): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 5-0 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten - Übergreifende Anforderungen“ vom 16.08.2010. [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de).
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (2010/11/13): Bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung für Geosynthetische Tondichtungsbahnen. CETCO Bentomat GDA; HUESKER NaBento RL-N, RL-C; NAUE NSP 4900. [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)

- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (2012): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 5-5 „Oberflächenabdichtungskomponenten aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen“ vom 02.08.2012. [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de).
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2005): „Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten“ („Allgemeine Grundsätze“) (19.04.2005).
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2009): Eignungsbeurteilung von Bentofix® B 4000, BZ 6000, NSP 4900 sowie NaBento® RL-N und RL-C zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien (27.01.2009).
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2009): Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien „Bentonitmattengrundsätze“ (19.01.2009).
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2009): Vorläufige Eignungsbeurteilung von Bentomat® GDA zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien (24.03.2009).
- LANUV NRW Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2009): Leitfähigkeitsmessungen von Sickerwässern aus Rekultivierungsschichten (unveröffentlicht).
- Melchior, S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung – Ergebnisse von mehrjährigen in-situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Georgswerder. In: Maier-Harth (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung – Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponieseminar des Geologischen Landeamtes Rheinland Pfalz am 30.05.1996 in Binge-Büchsheim/Rhein, GLA Selbstverlag, Mainz.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1991): Gesamtfassung der zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, Bonn, 12. März 1991.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1993): TA Siedlungsabfall. Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, Bundesanzeiger Verlags-Ges., Köln, 1. Juni 1993.

Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009/13): Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, Artikel 1: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 22, Bonn, 29. April 2009 und 2. Änderungsverordnung zur DepV vom 31.05.2013.

M T S E FGSV Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (2009): Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau.

RiStWag FGSV Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (2002): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten RiStWag.

von Maubeuge, K. v. (1994): Bentonitmatten als Oberflächenabdichtung. In: Burkhardt, G., Egloffstein, Th. (Hrsg.) Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung. Schr.Angew.Geol. Karlsruhe, Bd. 30.