

E Bentonitmatten als mineralisches Dichtungselement im Umweltschutz

Dr. Georg Heerten, Lemförde

1. Einleitung

Nach der Markteinführung durch die Naue Fasertechnik im Jahre 1989 wurden im Jahre 1994 vernadelte Bentonitmatten erstmalig im Rahmen der 10. SKZ-Tagung "Die sichere Deponie" dem breiten Deponie-Fachpublikum noch vorsichtig unter dem Titel *Geotextile Dichtungselemente als mineralische Dichtungskomponente in Oberflächenabdichtungen* als innovative Tondichtung von der Rolle präsentiert (HEERTEN 1994).

Heute, 10 Jahre danach, kann im Rahmen der 20. SKZ-Tagung

- a) auf eine erfolgreiche, engagierte langjährige Forschungs- und Entwicklungsarbeit zum Einsatz von geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD, Bentonimatte) zurückgeblickt werden und
- b) von einem weltumspannenden Anwendungserfolg und entsprechender Akzeptanz der geosynthetischen Tondichtungsbahnen berichtet werden.

Mit weiter steigender Tendenz werden zurzeit ca. 35 Mio. m² GTDs pro Jahr weltweit vor allem in Deponieprojekten verbaut. Ca. 95 % dieses Gesamtvolumens entfallen auf vernadelte GTDs begründet durch die dokumentierte technische und ökonomische Überlegenheit dieser Produktvariante. Vernadelte GTDs werden heute in Europa (D, UK, I, P, AUT), Nordamerika, Asien und Australien von verschiedenen Herstellern produziert. Viele anwendungstechnische Fragestellungen wurden vor allem in Europa und Nordamerika untersucht.

Die GTD stellt sich damit als eines der am sorgfältigsten untersuchten mineralischen Dichtungselemente im Umweltschutz dar und dabei ist man keiner der bislang in der Vergangenheit aufgetretenen Fragestellungen eine fachlich fundierte Antwort schuldig geblieben.

Die erarbeiteten Kenntnisse und Nachweise zu genehmigungsrechtlichen Randbedingungen, zur Dichtungswirksamkeit, Strukturheilung sowie zur Austrocknungssicherheit von Bentonitmatten für die Anwendung im Deponiebau in Deutschland werden ausführlich in (HEERTEN/REUTER 2002) beschrieben. Diese Aspekte basieren auf der Grundlage der für Bentofix® 1998 erteilten bauaufsichtlichen Zulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zur Verwendung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der Deponieklasse I nach TA-Siedlungsabfall. Vorliegend werden die neuesten Erkenntnisse aus Aufgrabungen und Zeitstandversuchen zur inneren Langzeitscherfestigkeit von schubkraftübertragenden, vernadelten geosynthetischen Tondichtungsbahnen gemäß der damaligen Zulassungsaufgaben des DIBt für eine Zulassungsverlängerung präsentiert. Dabei werden Aspekte zum technischen Stand der Entwicklung, Dichtungswirksamkeit und Standsicherheit über lange Zeit-

räume an Böschungen sowie ökologische und ökonomische Vorteile zum Einsatz von Bentonitmatten im Deponiebau verdeutlicht.

2. Stand der technischen Entwicklung von Bentonitmatten

Um den Einsatz von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien zu ermöglichen und einen einheitlichen Standard zu schaffen, der die Genehmigung solcher "Alternativsysteme" vor allem für die zuständigen Behörden erleichtern sollte, engagierten sich Hersteller solcher GTDs bereits 1994 um eine Zulassung vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt). Diese 1998 erteilten Zulassungen für doppelagige, austrocknungssichere Bentonitmattensysteme schafften es, die Bentonitmatte als alternatives Bauprodukt den Tondichtungen der Deponieklasse I nach TaSi gleichwertig zu stellen. Somit ist den genehmigenden Behörden, Betreibern und Planern die Möglichkeit gegeben worden, Alternativabdichtungssysteme unter Verwendung von Bentonitmatten für Deponieoberflächendichtungen zuzulassen, die den Anforderungen der Regelwerke entsprechen. Die Grundsätze der Zulassung und Bewertung der Dichtigkeitseigenschaften des DIBt (1998a) sind in HEERTEN/REUTER 2002 ausführlich dargelegt.

Es zeigte sich jedoch, dass je nach Behördenauffassung die Forderung nach Schutzprinzipien zum Wohle der Allgemeinheit (Nachhaltigkeit, Gefahrenabwehr, Vorsorge etc.) unterschiedlich ausgelegt wurde. Besonders ist hier die Diskussion über die Langzeitbeständigkeit der Komponenten (Kunststoffe und natürliches Natriumbentonitpulver) als auch des Gesamtproduktes der zugelassenen Bentonitmatte hinsichtlich der Langzeitscherfestigkeit unter Belastung geführt worden. In der damals erteilten Zulassung des DIBt wurden bereits "Hausaufgaben" an die Hersteller erteilt, weitere Nachweise und Informationen bezüglich des Alterungsverhaltens der geotextilen Komponenten und des Gesamtproduktes unter Einbaubedingungen im Kontext zur inneren Langzeitscherfestigkeit zu erbringen.

Zur Nachweisführung und Beantwortung dieser noch zu klärenden Fragestellung für die Bentofix[®]-Produkte der Naue Fasertechnik wurden in den vergangenen Jahren viele unabhängige Institutionen und Gutachter eingeschaltet, obwohl durch die Einstellung der Zulassungstätigkeit des DIBt für Deponiebauprodukte 1998 keine weitere Verlängerung der Zulassungen über die 5-jährige Laufzeit hinaus zu erwarten war. Alle Prüfaufträge und Untersuchungen wurden so erteilt bzw. umgesetzt, als wenn das DIBt seine Zulassungstätigkeit weiterhin aufrechterhalten hätte. Dies dokumentiert unsere Auffassung von Herstellerverantwortung und ist ein fester Bestandteil der Firmenphilosophie unseres Hauses als Hersteller von Bentonitmatten mit damaliger DIBt-Zulassung für Anwendungen im Umweltschutz. Drei Arbeits-

schwerpunkte standen in den vergangenen Jahren im Vordergrund (HEERTEN/REUTER 2002):

1. *Nachweis, dass unter üblichen Systemrandbedingungen die schubkraftübertragenden, vernadelten Bentonitmatten das Heilungsvermögen besitzen, dass man den dicken erdbautechnisch verdichteten Tondichtungen jahrelang irrtümlich zugeschrieben hat, nämlich die Fähigkeit, nach Austrocknung und Rissbildung in ausreichendem Umfang die eingetretene Strukturbildung zu heilen und eine entsprechende Dichtungswirksamkeit sicherzustellen.*
2. *Die Suche nach Produktmodifizierungen, die eine Austrocknung innerhalb einer vernadelten GTD soweit verzögern oder vermeiden, dass unter den nach TA-Siedlungsabfall/DepV. gegebenen Randbedingungen keine nachteilige Reduzierung der Dichtungswirkung eintritt.*
3. *Die Erbringung weiterer Nachweise, dass die in den Zulassungen unter Berücksichtigung des Alterungsverhaltens der geotextilen Komponenten zur Standsicherheit getroffenen Festlegungen auf der sicheren Seite liegen.*

Zu allen drei Arbeitsschwerpunkten wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Forschungs- und Materialprüfungen vorgenommen. Eine Vielzahl von unabhängigen Institutionen und Gutachtern war in diese Fragen seit 1993 eingeschaltet und damit an den in Tabelle 1 aufgeführten Aufgrabungen und Lysimetern in Deutschland zur Bewerkstelligung der o.g. drei Arbeitsschwerpunkte für die GTD Bentofix® beteiligt.

Tab.1: Durchgeführte Aufgrabungen und Lysimeterversuche der letzten 10 Jahre zum Nachweis der Systemwirksamkeit von GTDs in Oberflächendichtungssystemen

Aufgrabungen Bentofix	Lysimeter
Deponie Grabow (1993 und 1996)	Essen (Aufgrabung 1996)
Deponie Wietze (1995)	Lemförde (2001)
Deponie Hohenbergen (1995)	Bundeswehr Universität München
Deponie Georgswerder (1995, 96 und 98)	Eschbelval
Deponie Hillern (1997)	Deponie Deetz
Deponie Leppe (1997)	Dillinger Hütte
Deponie Kapenberg (1998)	
Deponie Neurathjensdorf (2000)	
Deponie Tagewerben (2003)	

Die Bentonitmengen der aufgegrabenen GTD-Typen lagen zwischen 3 und 5 kg/m², die Beanspruchungsdauer unter Feldbedingungen betrug 15-72 Monate und die Überdeckung im Feld lag zwischen 0,40 m und 1,0 m. Über die ausführliche Aufarbeitung der Untersuchungsergebnisse bzgl. der Arbeitsschwerpunkte Nr. 1 und Nr. 2 ist in HEERTEN/REUTER (2002) berichtet worden. Dem Arbeitsschwerpunkt Nr. 3 und der damit offen gebliebenen Aufgabenstellung aus der in 1998 erteilten DIBt-Zulassung zur Erbringung des Nachweises für die Langzeitscherfestigkeit der vernadelten, schubkraftübertragenden Bentonitmatte unter Einbaurandbedingungen für Oberflächendichtungssysteme in Deponien wurde 1999 nach umfangreichen Vorabstimmungen für ein gemeinsames Untersuchungskonzept von der Naue Fasertechnik und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gezielt nachgegangen (BAM 2003). Hierzu wird im nachfolgenden Kapitel berichtet.

Insbesondere das nachgewiesene Gefügeheilungsvermögen der vernadelten GTD aus quellfähigem Natriumbentonit bei Wiedervernässung lieferte ein seinerzeit ungeahntes Leistungsmerkmal, dass von erdbautechnisch hergestellten Tondichtungen nicht erreicht wird und damit die Systemwirksamkeit von Oberflächendichtungssystemen unter Verwendung von Bentonitmatten im Vergleich zum herkömmlichen Aufbau gemäß Deponieverordnung enorm erhöht. Nach umfangreichen statistischen Auswertungen durch den Gutachter ICP, Karlsruhe, ist der Verlauf der Wiedervernässung bzw. die Abnahme der Durchlässigkeit ausgetrockneter, ionenausgetauschter vernadelter Bentofix[®] GTDs in Abhängigkeit von der Zeit wie im Bild 1 dargestellt anzugeben.

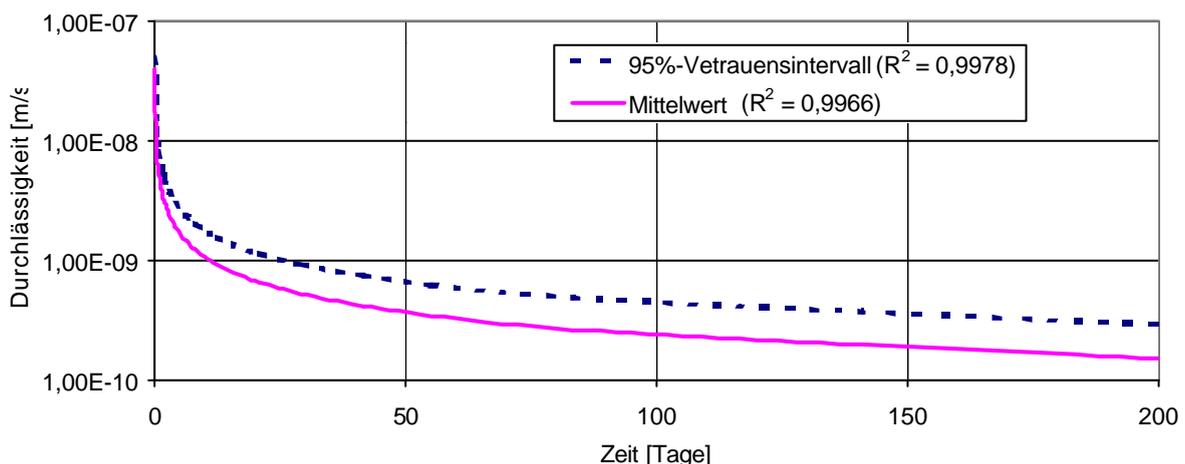


Bild 1: Einfluss der Strukturheilung auf die Durchlässigkeit von ausgegrabenen und ausgetrockneten Bentofix-Proben unter einer einheitlichen Auflast von 20 kN/m² bei einem hydraulischen Gefälle $i = 30$ nach Ionenaustausch (nach EGLOFFSTEIN 2000a)

Der signifikante Vorteil des Austrocknungs- und Wiedervernässungsverhaltens von Bentonitmatten gegenüber erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtungen kann über die erforderliche Wassermenge dargestellt werden. Der hochquellfähige Bentonit saugt Wasser aus den umgebenden Bodenschichten an und es wird nur ca. 1 Liter/m² Wasser benötigt, um die Bentonitschicht wieder aufquellen und dichtwirksam zu lassen. Eine erdbautechnisch hergestellte Tondichtung nimmt vergleichsweise wesentlich verzögert wieder Wasser auf. In Abhängigkeit von der Schichtdicke der Tondichtung werden hierfür 20 bis 40 Liter Wasser pro m² benötigt. Diese bedeutet, dass diese Menge überhaupt erst einmal zur Verfügung stehen muss, um den Vorgang der Wiedervernässung reversibel zu gestalten. Nach Untersuchungen aus dem Deponiebau ist nicht davon auszugehen, dass ausgetrocknete, erdbautechnisch hergestellte mineralische Dichtungen nach Trockenstress je ihre Dichtwirksamkeit wieder erlangen. Bei Bentonitmatten ist das sichergestellt und nachgewiesen, da Wasseraufnahme und Wasserabgabe entsprechend den einwirkenden Randbedingungen nachhaltig reversibel erhalten bleiben. Wenn angenommen wird, dass die mineralische Dichtung in einer steifen Konsistenz ($l_c = 1,0$) eine höhere Durchlässigkeit als in einer geringen Steifigkeit ($l_c = 0,75$) aufweist, dann kann die erforderliche Wassermenge, die zum Erlangen der ursprünglichen Undurchlässigkeit benötigt wird wie folgt berechnet werden:

Tab.2: Vergleichsberechnung zur erforderlichen aufzunehmenden Wassermenge für eine erfolgreiche Wiedervernässung für Tondichtung und GTD

Mineralische Tondichtung (d = 0,50 m)	Geosynthetische Tondichtungsbahn
Wassergehalt (trocken) = 11,5%	Wassergehalt (trocken) = 45,9%
Optimaler Wassergehalt = 20,4%	Maximaler Wassergehalt = 162,4%
Differenz $\Delta W = W_{\text{opt}} - W_{\text{trock}}$ = 20,4% - 11,5% = 8,9%	Differenz $\Delta W = W_{\text{max}} - W_{\text{trock}}$ = 162,4% - 45,9% = 116,5%
Erforderliche Wiedervernässung W_{erf} [%] zum Wechsel von $l_c = 1$ (steif) zu $l_c = 0,75$ (weich):	
$W_{\text{erf}} [\%] = (l_{c, \text{steif}} - l_{c, \text{weich}}) \cdot \Delta W$ = 0,25 · 8,9% = 2,23%	$W_{\text{erf}} [\%] = (l_{c, \text{steif}} - l_{c, \text{weich}}) \cdot \Delta W$ = 0,25 · 116,5% = 29,13%
Erforderliche Wassermenge: $V_{\text{erf}} = d [\text{m}] \cdot \gamma [\text{kN/m}^3] \cdot W_{\text{erf}} [\%] / 100$ = 0,50 m · 19,5 kN/m ³ · 0,0223 = 21 kg/m ² = 21 l/m ²	Erforderliche Wassermenge: $V_{\text{erf}} = m_A [\text{kg/m}^2] \cdot W_{\text{erf}} [\%] / 100$ = 5 kg/m ³ · 29,13 / 100 = 1,5 kg/m ² = 1,5 l/m ²

3. Neue Erkenntnisse zur Dichtungswirksamkeit und Standsicherheit über lange Zeiträume

Die Geltungsdauer der DIBt-Zulassung endete im März 2003. Unter Berücksichtigung der zahlreichen Praxiserfahrungen und speziellen Eignungsuntersuchungen die seinerzeit vom DIBt für die Zulassungsverlängerung gefordert wurden, ist eine Beurteilung der Zulassungsäquivalenz nach den Kriterien der damaligen DIBt-Zulassung für die Bentonitmatte Bentofix® B4000 erfolgreich erfolgt (WITT/ZEH 2003). Dabei wurde zum einen die Dichtigkeit unter Labor- und Feldbedingungen (Ionenaustausch, Trocknung und Wiederbefeuchtung, Beschädigungen, Wirksamkeit gegenüber verschiedener flüssiger Medien und Gasdurchlässigkeit) und zum anderen die Langzeit-Standsicherheit (Geokunststoffverhalten sowie äußere und innere Scherfestigkeit) erfolgreich als zulassungsäquivalent nachgewiesen und beurteilt. Als Konzept gegen Austrocknen sieht der DIBt-zugelassene Aufbau eine zweilagige Verlegung der GTD vor. Bisher durchgeführte langjährige Feldversuche belegen aber auch die volle Wirksamkeit einlagig verlegter schubkraftübertragender, vernadelter Bentonitmatten, so dass die bauaufsichtliche Zulassung nach der Prüfung von standortspezifischen Randbedingungen, z.B. die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Überlagerung, auf einlagig eingebaute Produkte übertragen werden kann und dabei den Grundsätzen des DIBt voll entsprochen wird (WITT/ZEH 2003).

3.1. Aktuelle Aufgrabungsergebnisse

Im Rahmen des Projektes "Aufgrabungen und Untersuchungen auf der Deponie Tagewerben an einem alternativen Oberflächenabdichtungssystem (Bentonitmatte)" wurde vom Fachgebiet Geotechnik/Deponiebau der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig in Zusammenarbeit mit der pedotec GmbH, Berlin im Herbst 2003 eine Aufgrabung an dem 1998 ausgeführten alternativen Oberflächenabdichtungssystem auf der Deponie Tagewerben in Abstimmung mit dem Landesamt für Umweltschutz (LAU) durchgeführt (KILCHERT/MARKWARDT 2003). Die Bentonitmatte wurde 1998 auf einer gasgängigen Ausgleichsschicht unterhalb eines geosynthetischen Dränsystems und einer 1,40 m mächtigen Rekultivierungsschicht eingebaut.

Die Ergebnisse dieser Aufgrabungen sollen die Grundlagen für die Bewertung der Wirksamkeit des realisierten Oberflächenabdichtungssystems unter den konkreten Standortbedingungen mit extrem niedrigen mittleren Jahresniederschlägen (mittlerer Jahressummeniederschlag von ca. 500 mm/a) liefern. Dabei wurden u.a. wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich Austrocknungsverhalten und Wiedervernässung der Bentonitmatte durchgeführt und eine Bewertung des Alternativsystems Dränmatte-Bentonitmatte in Verbindung mit Wasser-

haushaltsmodellierungen unter Berücksichtigung der bodenkundlichen und vegetationspezifischen Bedingungen für den Standort vorgenommen.

Nach behutsamen Abtrag der Rekultivierungsschicht und Freilegen der Bentonitmatte, sowohl durch Baugerät als auch von Hand, wurde das Probematerial zum einen an das Zentrum Geotechnik, Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München zur Durchführung von Durchlässigkeitsprüfungen und zum anderen an die Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda u. Partner (ICP), Karlsruhe, zur Durchführung von geochemischen und mineralogischen Untersuchungen gesandt. Für die einlagig verlegte Bentofix® Tondichtungsbahn wurden folgende Ergebnisse aus den Durchlässigkeitsuntersuchungen sowie geochemischen und mineralogischen Untersuchungen dokumentiert (KILCHERT/MARKWARDT 2003):

- Den Angaben der TU München zufolge beträgt der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert der Prüflinge bei $i = 30$ im stationären Zustand $1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Bei $i = 10$ wurde als mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert aus zwei Prüflingen $1,1 \cdot 10^{-10}$ m/s bei einer angenommenen Dicke der Bentonitmatte von 0,01 m ermittelt.
- Im Rahmen der bisher von ICP durchgeführten geochemischen Untersuchungen ist festgestellt worden, dass der Ionenaustausch der Natriumbentonitmatte (Natrium wird in Calcium umgewandelt) weitestgehend abgeschlossen ist.
- Es wird deutlich darauf hingewiesen, dass die Bentonitmatte auch unter den außergewöhnlich niederschlagsarmen Bedingungen des Sommers 2003 am Standort Tagewerben nicht ausgetrocknet war. Diese Aussage wird auch durch die bei der Aufgrabung festgestellten Wassergehalte von 120-130 % bestätigt. Wenn der Wassergehalt einer Bentonitmatte unter 100% fällt (EGLOFFSTEIN 2000), ist mit einer Abnahme der Dichtwirkung durch beginnender Gefügebildung bei üblichen Vertikalspannungen in Oberflächendichtungssystemen zu rechnen.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen wurden für einen repräsentativen Zeitraum von 10 Jahren unter Berücksichtigung des o.g. vorhandenen Oberflächendichtungssystems (Variante 1 mit 1,40 m Rekultivierungsschicht, Dränmatte, Bentonitmatte) und eines Aufbaus der DK 1 gemäß DepV. (Variante 2 mit 1 m Rekultivierungsschicht, 0,30 m mineralische Dränschicht und 0,50 m mineralische Dichtung) durchgeführt.

Die ermittelten Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Oberflächenabfluss, aktuelle Verdunstung, Dränschichtabfluss, Versickerung und Bodenfeuchteänderung in der Rekultivierungsschicht sind in zusammengefasster Form in Tabelle 3 (vorhandenes Oberflächenabdichtungssystem) und Tabelle 4 (Deponieklasse DK I) dargestellt.

Tab.3: Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnung für das vorhandene Oberflächenabdichtungssystem (Variante 1) der Deponie Tagewerben (KILCHERT/MARKWARDT 2003)

Jahr	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	Mittel 91-00
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm) / (%)
Niederschlag	303	513	587	613	562	462	548	562	492	512	515 / 100
Oberflächenabfluss	0	2	2	5	2	2	2	2	1	1	2 / 0
aktuelle Verdunstung	378	479	535	556	509	422	572	478	495	514	494 / 96
Dränabfluss (über min. Dichtung)	1	0	0	21	7	0	1	1	11	5	5 / 1
Versickerung (durch min. Dichtung)	20	4	2	60	44	2	22	9	59	42	26 / 5
Dränschichtabfluss (Dränmatte)	13	2	1	41	29	1	14	6	39	27	17 / 3
Versickerung (Bentonitmatte)	7	1	1	19	15	1	8	3	20	15	9 / 2
Bodenfeuchteänd.	-97	28	49	-29	1	33	-45	73	-74	-50	(-111)

Tab.4: Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnung für das Oberflächenabdichtungssystem DK I (Variante 2) der Deponie Tagewerben (KILCHERT/MARKWARDT 2003)

Jahr	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	Mittel 91-00
	(mm)	(mm) / (%)									
Niederschlag	303	513	587	613	562	462	548	562	492	512	515 / 100
Oberflächenabfluss	0	3	2	7	3	2	2	2	1	1	2 / 0
Akt. Verdunstung	324	450	517	502	493	404	477	458	445	464	453 / 88
Dränschichtabfluss	9	23	24	105	18	32	40	62	28	60	40 / 8
Versickerung	10	13	24	39	15	21	33	41	21	34	25 / 5
Bodenfeuchteänd.	-40	25	44	-39	33	0	-1	-1	-4	-48	(-54)

Im 10-jährigen Mittel versickern bei der Variante 1 (vorhandenes Oberflächenabdichtungssystem mit Bentonitmatte) ca. 9 mm/a (2% des Niederschlags) in den Deponiekörper. Für die Variante 2 (Oberflächenabdichtungssystem DK I) ist für den 10-jährigen Simulationszeitraum eine mittlere jährliche Versickerung von 25 mm/a (5% des Niederschlags) als Eintrag in den Deponiekörper ermittelt worden. Berücksichtigt wurde dabei ein Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f, \text{Ton}} = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s und eine Ableitkapazität der Dränschicht $k_{h, \text{Drän}} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

3.1.1. Fazit

Die Ergebnisse aus den Wasserhaushaltsmodellierungen verdeutlichen anhand der geringeren Durchsickerung durch die Bentonitmatte im Vergleich zur Tondichtung, dass mit einem geosynthetischen Aufbau des Oberflächendichtungssystems im Vergleich zum Aufbau gemäß Deponieverordnung eine höhere Wirksamkeit gegeben ist.

Entsprechend der Erfahrungen mit Bentonitmatten aus natürlichem Natriumbentonitpulver wurde in den Aufgrabungen erneut bestätigt, dass die eingesetzte Bentonitmatte mit einem geprüften Durchlässigkeitsbeiwert von $1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s trotz des vollständig abgeschlossenen Ionenaustausches eine außerordentlich hohe langfristige Dichtwirkung erzielt. Die niedrige Permittivität - auch im ionenausgetauschtem Zustand - bestärkt die konsequente Verwendung eines qualitativ hochwertigen natürlichen Natriumbentonits für vernadelte Bentonitmatten. Die besten Dichteigenschaften weisen Tonminerale mit möglichst guter Parallellagerung senkrecht zur Durchströmungsrichtung auf, da hierbei enge Strukturporen entstehen, so wie das beim Natriumbentonit der Fall ist. Aus diesem Grund muss der Fließweg bei geosynthetischen Tondichtungsbahnen mit Calciumbentoniten erhöht werden, d.h. die Calciumbentonitschicht muss dicker gemacht, bzw. die flächenbezogene Bentonitmasse mindestens verdoppelt werden, was zu einem Flächengewicht von $\geq 8.000 \text{ g/m}^2$ führt (EAG-GTD 2002). Bei einem Ionenaustausch in der natürlichen Umgebung von eingebauten Bentonitmatten reduziert sich das Wasseraufnahmevermögen und Quellvolumen des ursprünglichen Natriumbentonits. Damit erhöht sich zwar Permittivität des umgewandelten Natriumbentonits gegenüber dem Wert des natürlichen Natriumbentonits um das 5- bis 8-fache, aber der Wert liegt immer noch unterhalb der Permittivität eines natürlichen Calciumbentonits. Diese bessere Permittivität des umgewandelten Natriumbentonits liegt in der optimalen Ausbildung einer dichten, dispersen Struktur des quellfähigen Tonminerals Montmorillonit beim ersten Aufquellen begründet. Die langen Fließwege um die Struktur der Tonmineralplättchen werden zwar beim ausgetauschten Natriumbentonit durch dünnere Schichtpakete reduziert, was zu einer höheren Permittivität führt, aber die Struktur eines Calciumbentonits wird dabei nicht erreicht.

3.2. Nachweis der inneren Langzeitscherfestigkeit der GTD für Deponien

Vernadelte, schubkraftübertragende Bentonitmatten enthalten eine faserarmierte Bentonitschicht, bei der die geotextilen Komponenten die stark eingeschränkte Schubfestigkeit des gequollenen Bentonits (Schmierfettkonsistenz) ausgleichen und über die gesamte Gebrauchsdauer sicherstellen müssen (Bild 2). Deck- und Trägerschicht der Bentonitmatte sind durch die im Vernadelungsprozess transportierten Fasern schubfest miteinander verbunden.

bunden. Eine gute, kontrollierte Vernadelung hält Deck- und Trägerschicht auch gegen den Druck des quellenden Bentonits sicher schubfest verbunden.

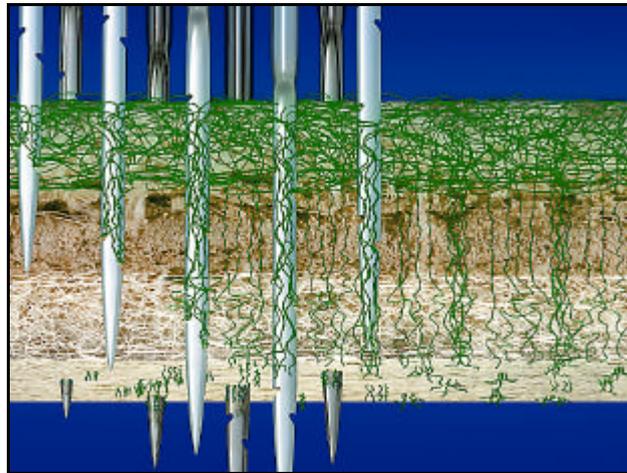


Bild 2: Fasermodell einer schubkraftübertragenden vernadelten geosynthetischen Tondichtungsbahn

Wird eine vernadelte Bentonitmatte in großflächigen Abdichtungen auf mehr oder weniger steil geneigten und langen Böschungen in mehrschichtigen Dichtungssystemen eingebaut, so hängt die Standsicherheit des ganzen Abdichtungsbauwerkes nicht nur von den Reibungskräften zwischen der vernadelten Bentonitmatte und den benachbarten Komponenten der Abdichtung ab, sondern vor allem auch von ihrer eigenen inneren Scherfestigkeit. Diese wird bestimmt durch die langfristig wirksame Festigkeit der Fasern selbst, die Träger- und Deckgeotextil miteinander verbinden, und zum anderen durch die Festigkeit von deren Verankerung oder Einbettung der geotextilen Trägerschicht. Die Problematik der Langzeit-Scherfestigkeit stellt sich generell bei allen aus mehreren Komponenten sandwichartig aufgebauten Geokunststoffen, wie z.B. auch Dränmatten oder mehrschichtigen Filtermatten. Die innere Kurzzeit-Scherfestigkeit kann in einem Scherversuch mit Kastenschervergerät ermittelt werden. Die noch zulässigen Langzeit-Scherfestigkeiten lassen sich nicht mit Abminderungsfaktoren erfassen, wenn die Funktionsdauer des geotechnischen Bauwerkes im Bereich der bisher durch Erfahrung gesicherten Lebensdauer von Geokunststoffen liegt oder diese sogar übertreffen soll, wie das bei Deponiebauwerken der Fall ist. Das Kriechverhalten und die inneren Veränderungen der Bentonitmatten infolge Alterungsvorgängen und deren Rückwirkung auf die Langzeit-Scherfestigkeit sind daher in Zeitstandversuchen gesondert zu überprüfen, wie vom DIBt als Zulassungsaufgabe formuliert.

In Zeitstandsversuchen wird das zu prüfende Bauteil über längere Zeit der mechanischen Beanspruchung unter erhöhter Temperatur in einem flüssigen oder gasförmigen Prüfmedium ausgesetzt. In Abhängigkeit von den Prüfbedingungen wird die Zeitdauer bis zum Versagen, die so genannte Standzeit ermittelt. Durch die Variation der Prüfbedingungen erhält man einen funktionalen Zusammenhang zwischen Standzeiten und diesen Bedingungen, der dann zur Extrapolation (ARRHENIUS – Extrapolation) einer Funktionsdauer unter Anwendungsbedingungen oder umgekehrt zur Extrapolation einer noch zulässigen Beanspruchungen bei einer vorgegebenen Funktionsdauer verwendet werden kann. Das Prüfverfahren zur Bestimmung der "Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten" wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung auf der SKZ-Tagung in 2002 ausführlich beschrieben (MÜLLER/SEEGER/THIES 2002).

Der offen gebliebenen Aufgabenstellung aus der in 1998 erteilten DIBt-Zulassung zur Erbringung des Nachweises für die Langzeitscherfestigkeit der vernadelten, schubkraftübertragenden Bentonitmatte unter Einbaurandbedingungen für Oberflächendichtungssysteme in Deponien wurde 1999 nach umfangreichen Vorabstimmungen für ein gemeinsames Untersuchungskonzept von der Naue Fasertechnik und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gezielt nachgegangen. Im September 1999 wurde der Auftrag für ein dreijähriges Prüfprogramm erteilt. Der Stand der Ergebnisse wurde im Dezember 2003 beurteilt und wird nachfolgend zusammengefaßt (BAM 2003).

Die 1999 beauftragten Zeitstand-Scherversuche für die Bentonitmatte mit damaliger DIBt-Zulassung wurden bei der BAM in Anlehnung an die Anforderungen für die Langzeit-Scherfestigkeit nachträglich strukturierter Kunststoffdichtungsbahnen beurteilt. Nach der Zulassungsrichtlinie der BAM für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen müssen strukturierte Kunststoffdichtungsbahnen im Zeitstand-Scherversuch bei 80°C eine Mindeststandzeit von einem Jahr erreichen, was von einer Bentonitmatte ebenso erreicht werden muss.

Nach der für BAM-Zulassungen üblichen Verfahrensweise zur Spezifikation der Rezeptur der eingesetzten Synthesefasern wurden die detaillierten Faserwerkstoffkennwerte sowohl für die Fasern der Deck- und Trägergeotextilien und für das verwendete natürliche Natriumbentonit der Bentonitmatte bei der BAM vertraulich hinterlegt. Ergebnisse und Folgerungen aus der untersuchten Bentonitmatte gelten nur für Fasern, die nach gleichen Produktionsverfahren mit dem hinterlegten definierten Rohstoff bzw. den entsprechenden Stabilisatoren produziert wurden. Übertragungen der Ergebnisse auf Produkte, die aus anderen Rohstoffen

und/oder Stabilisatoren hergestellt wurden, sind nicht zulässig. Wie bei Kunststoffdichtungsbahnen müssen andere Produkte individuell untersucht werden.

3.2.1. Versuchsdurchführung

Proben aus der Bentonitmatte wurden zwischen zwei Stahlkeile in einem entsprechenden Böschungswinkel von $1:n = 1:2,5$ ($\beta = 21,8^\circ$) montiert. Die Verbindung von Träger- und Deckgeotextil zu dem jeweiligen Keil wurde dabei durch flächiges Verhaken mit einem auf dem oberen und unteren Keil fest montierten Reibungspartner hergestellt (Kunststoffdichtungsbahn an Unterseite und Reibeblech zur Oberseite der Bentonitmatte gerichtet). Als Reibungspartner wurde eine BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahn Carbofol® Karo-Noppe/Megakron mit geprägter Struktur verwendet. Es wurde davon ausgegangen, dass die geprägte Struktur im Vergleich zur nachträglich auf die Oberfläche der KDB aufgetragenen Struktur nicht versagen kann und somit der kritische Weg für ein potentiell Versagen der GTD gezielt durch Scherversagen in der Bentonitschicht vorgegeben war.

Über ein Hebelmechanismus wurde eine für Oberflächenabdichtungssysteme flächenbezogene Auflast des Probekörpers von 50 kN/m^2 aufgebracht, was einer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von ca. $d = 2,50 \text{ m}$ entspricht und demnach als Obergrenze angesehen werden kann. Diese Auflast entspricht zudem einer Hangabtriebskraft bezogen auf die Flächeneinheit von ca. 20 kN/m^2 . Dieser hangparallele Anteil der Auflast wird dabei als Scherspannung zwischen Ober- und Unterlage in den geotextilen Verbund eingetragen.

In Tabelle 5 sind die Laufzeiten und Prüfbedingungen der Zeitstand-Scherversuche an Bentofix® B 4000 aufgeführt.

Tab.5: Laufzeiten und Prüfbedingungen der Zeitstand-Scherversuche an Bentofix® B 4000 (BAM 2003)

Probe Nr.	Prüflast (bez. auf Probenfläche [kPa])	Winkel des Prüfkeils [°]	Reibungspartner unten	Reibungspartner oben	Standzeiten am 10. Dez. 2003	Bemerkung
18	46	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	616	läuft weiter
33	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	202	läuft weiter
43	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	414	läuft weiter
51	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	325	läuft weiter
75	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	278	läuft weiter
53	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	415	abgebrochen
57	50	21,8	Strukt. KDB	Reibeblech	415	abgebrochen

3.2.3 Fazit

Folgende Schlussfolgerungen zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in die Praxis und zum langfristig sicheren Einsatz von Bentofix®-Bentonitmatten in Oberflächendichtungssystemen von Deponien werden gezogen:

In Deutschland müssen Kunststoffdichtungsbahnen als Dichtungselement im Umweltschutz von der BAM gemäß Vorsorgeprinzip zugelassen werden. Für die GTD Bentofix® B 4000 – seinerzeit durch eine Bauart-Zulassung des DIBt baurechtlich für Oberflächendichtungssysteme nur unter der Auflage bestätigt, dass ergänzend ein Nachweis der Langzeit-Scherfestigkeit erbracht wird – wird mit den vorliegenden Versuchsergebnissen der geforderte Nachweis gemäß Vorsorgeprinzip erbracht.

Die Befunde aus den Zeitstandversuchen bei der BAM zeigen, dass bei der Anwendung in Deponieoberflächenabdichtungen die innere Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix® B4000 deutlich ausreicht, um einen langfristig standsicheren Dichtungsaufbau zu gewährleisten. Grundlage für diese Beurteilung bildet die Anforderung, dass für den Nachweis von Funktionsdauern von mindestens 100 Jahren bei typischen Anwendungstemperaturen im Erdbau von 15-20° C erreicht werden müssen. Diese Anforderung wird von der Bentonitmatte Bentofix® B4000 deutlich erfüllt (BAM 2003).

Da die Prüfung unter Wasser stattfindet, hat der Bentonit einen Wassergehalt von deutlich über hundert Prozent und damit eine nur sehr geringe innere Scherfestigkeit. Unter diesen Bedingungen werden also die Fasern, die die innere Scherfestigkeit herstellen, maximal beansprucht. Bei den Einwirkungen im Feld, wo das Auflager und die aufliegende Schicht in der Regel nicht eben sein werden und der Bentonit kaum so hohe Wassergehalte erreicht, sind daher gegenüber den Laborbeanspruchungen noch Sicherheitsreserven unbekannter Größe enthalten. Die aufgeführten Ergebnisse gelten nur für Bentofix®-Produkte mit Fasern und Bentonit, wie bei der BAM vertraulich hinterlegt, und sind auf andere Bentonitmattenprodukte nicht übertragbar. Hier bedarf es jeweils gezielter Produktuntersuchung wie z.B. auch bei strukturierten Dichtungsbahnen praktiziert.

Als wichtigstes Ergebnis der BAM-Untersuchungen zur Langzeitscherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten wird in (MÜLLER/SEEGERS/THIES 2003) betont, dass Geokunststoffprodukte, die aus hochwertigen Materialien gefertigt und optimal gestaltet sind, auch unter kritischen Prüfbedingungen extrem lange Standzeiten erreichen.

4. Ökologische und ökonomische Aspekte

Üblicherweise wird der Vergleich zwischen mineralischen Tondichtungen und GTD anhand von technischen Argumenten sowie Material- und Einbaukosten durchgeführt. Die Vorteile, die sich daraus durch die Verwendung von Bentonitmatten ergeben sind in Tabelle 6 aufgeführt. Gelegentlich werden sogar die Ersparnisse des Minderaushubs, bzw. das zusätzlich zur Verfügung stehende Müllvolumen berücksichtigt.

Tab.6: Vergleich der mechanischen/physikalischen Eigenschaften und Einbaukriterien

Erdbautechnisch hergestellte Tondichtung	Bentonitmatte
MECHANISCHE / PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	
Stark setzungsempfindlich	Weniger setzungsempfindlich, kann auf Verformungen reagieren
Empfindlich gegen Frost	Weniger frostempfindlich
Kaum reversible Trocken-Nass-Eigenschaften	Trockenrisse quellen bei Wasserzutritt wieder zu (reversibler Vorgang)
Weniger homogene Produkteigenschaften	Homogene Produkteigenschaften
Einbau und Standsicherheit an steilen Böschungen begrenzt	Steilere Böschungen möglich
EINBAUKRITERIEN	
Baustellenmäßig herzustellende Dichtung	Weitgehend werkseitig herzustellende Dichtung
Großes Volumen, Gewicht	Geringes Volumen, Gewicht
Baustellennahe, genehmigte Gewinnung erforderlich (LKW-Verkehr)	Rollenware über lange Distanzen transportierbar
Schweres Einbaugerät	Leichtes Einbaugerät
Korrekte Herstellung aufwendig	Korrekte Herstellung leicht ausführbar
Witterungsabhängiger Einbau	Einbau bei Frost möglich
Größere konstruktive Aufbaudicke erforderlich	Geringe konstruktive Aufbaudicke möglich
Schwer zu reparieren	Leicht zu reparieren
Kontrolle stichpunktartig	QS-Systeme für kontrollierbare Qualität
Hohe variable Kosten	Gut kalkulierbare Kosten

Ausgehend von einem Oberflächenabdichtungssystem bestehend aus den geosynthetischen Komponenten Bentonitmatte, Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und Dränmatte mit einer Gesamtdicke von etwa 2,0 cm kann die Gesamtdicke des Systems im Vergleich zum herkömmlichen System nach TaSi oder Dep.-V. (vgl. Bild 6), um etwa 0,80 m reduziert werden. Daraus ergibt sich bei einer 10 ha großen Deponie ein Mehrvolumen von etwa 80.000 m³, welches mit Müll oder anderen zu entsorgenden Stoffen verfüllt werden könnte. Die hieraus resultierenden finanziellen Möglichkeiten werden hier nicht weiter betrachtet, sind aber u. U. eine beachtenswerte Kostenkomponente für den Deponiebetreiber.

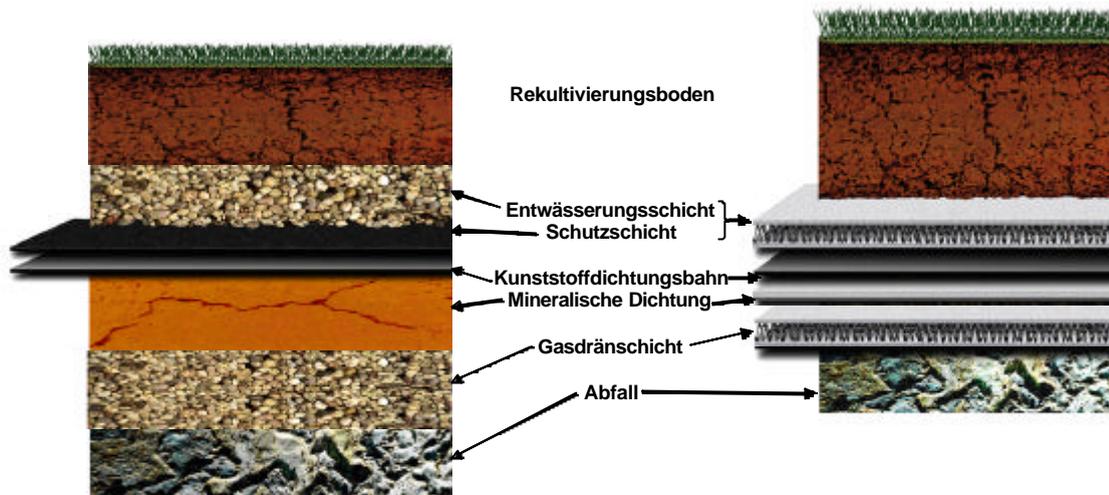


Bild 4: Vergleich eines Oberflächenabdichtungssystem nach TaSi/Dep.-V. mit (links) und ohne Bentonitmatte und geosynthetischem Dränelement (rechts)

Wird weiterhin von o. g. Systemvergleich ausgegangen, so ergibt sich hinsichtlich der Baukosten beider Systeme eine Kostenersparnis bei der Geokunststofflösung von ca. 40% (je nach Verfügbarkeit und Lage der Baumaßnahme variabel). Nicht mitgerechnet sind Einbauerschwernisse, wie sie sehr häufig bei Altdeponien vorzufinden sind, denn Böschungsneigungen steiler als $1:n = 1:3$ sind beinahe an der Tagesordnung. Bei Neigungen von $1:n = 1:2,5$ und steiler wird der Einbau herkömmlicher mineralischer Dichtungspakete nicht nur durch die Erfordernis einer Seilwindensicherung erschwert, sondern sogar z. T. unmöglich. Die Gewährleistung der Dichtungsqualität (z. B. geforderte Proctordichte) ist dann nicht mehr gegeben. Zugleich nimmt die Tagesleistung des Einbaus rapide ab. Im Vergleich zum fremdgutachterlich sehr aufwendigen und äußerst witterungsabhängigen Einbau von Tondichtungen ergeben sich bei der Verlegung von Bentonitmatten Tagesleistungen von bis zu 2000 m² einhergehend mit erheblichen Ersparnissen aus deutlich verkürzten Bauzeiten.

Zwar sind die öffentlichen Kassen heute mehr denn je vom Geldmangel geplagt und auch private Entsorger und Betreiber müssen ihre Ausgaben aufgrund der gebildeten Rückstellungen sparsam bewirtschaften, dennoch sollten auch weitere umweltwirtschaftliche Aspekte in die Genehmigung eines Oberflächenabdichtungssystems mit Geokunststoffen einfließen. Da ein den Vorschriften entsprechend beladener LKW lediglich 24 m² Dichtungston für eine Einbaudicke von 0,50 m transportieren kann, ergeben sich für die Abdichtung von 100.000 m² Deponieoberfläche bereits 4170 LKW-Fahrten. Mit einer Fahrt desselben LKW können ca. 4500 m² werksseitig hergestellte Bentonitmatten gleich bleibender überwachter Qualität

zur Baustelle transportiert werden, so dass mit lediglich 22 LKW-Fahrten die o.g. Abdichtungsfläche hergestellt werden kann. Die Ersparnisse und die Minderbeanspruchung der örtlichen Infrastruktur sowie die verringerte Schadstoff- und Lärmemission aus den nicht erforderlichen 4148 LKW-Fahrten bleiben leider zu häufig unberücksichtigt.

5. Schlußfolgerung

Obwohl bereits zum Jahreswechsel 1997/1998 erkennbar war, dass die Zulassungstätigkeit für Bentonitmatten beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) kurzfristig beendet sein könnten und damit zumindest in Frage gestellt werden musste, ob die angeregten Untersuchungen – unabhängig von ihren fachlichen Ergebnissen – zur Erteilung einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung führen würden, hat die Naue Fasertechnik den größten Teil dieser Projekte noch danach bei unabhängigen Gutachtern und Prüfinstituten in Auftrag gegeben bzw. selbst umgesetzt. Alle Prüfaufträge wurden so erteilt bzw. umgesetzt, als wenn das DIBt seine Zulassungstätigkeit weiterhin aufrecht erhalten hätte. Die wichtige Frage zur inneren Langzeitscherfestigkeit von Bentofix® B4000 an Böschungen von Oberflächendichtungssystemen ist mit dem im Dezember 2003 erstellten Gutachten der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM 2003) erfolgreich und deutlich beantwortet.

Eine wichtige Schlussfolgerung ist, dass ausgewählte Geokunststoffprodukte, die aus hochwertigen Materialien gefertigt und optimal gestaltet sind, auch unter kritischen Prüfbedingungen extrem lange Standzeiten erreichen. Daraus folgt, dass die konsequente Verwendung hochwertigster Rohstoffe zur Herstellung von Bentonitmatten für die Deponieabdichtungen von heute der Forderung nach Nachhaltigkeit und Zukunftsverantwortung gerecht wird und dies nicht unberücksichtigt bleiben darf.

Nach über 10 Jahren engagierter Entwicklung und Forschung an Bentonitmatten als mineralisches Dichtungselement in Oberflächendichtungen von Deponien wird nunmehr das Ziel erreicht, die verbliebenen wichtigen Fragestellungen hinsichtlich der inneren Scherfestigkeit als Maß der Funktionsdauer erfolgreich und fundiert beantworten zu können und damit gleichzeitig das bestehende Maß der Lebensdauer von Geokunststoffen im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen im eingebauten Zustand neu zu hinterfragen.

Ist der Nachweis der Gleichwertigkeit von Bentonitmatten als Dichtungselement gegenüber erdbautechnisch eingebauten mineralischen Dichtungen nicht sogar umgekehrt zu erbringen? Sind andere mineralische Dichtungselemente des Deponiebaus überhaupt gleichwertig zur vernadelten Bentonitmatte?

6. Literatur

BAM (2003): Gutachten zur Beurteilung der Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix® B 4000, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

DIBt (1995): "Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen", Anhang zu den GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage '97, Verlag Ernst & Sohn

DGGT (2002): "EAG- GTD Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen", Ernst & Sohn Verlag, Berlin

EGLOFFSTEIN, T. (2000a): "Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien", ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3, Karlsruhe

EGLOFFSTEIN, T. (2000b): Bentonitmatten als Oberflächenabdichtung von Deponien – 10 Jahre Erfahrungen mit diesem Dichtungselement, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 63, Eigenverlag

EHRENBERG H.; VON MAUBEUGE, K. (1999): "Langzeitbeständigkeit von Geokunststoffen", Informationsbroschüre der Naue Fasertechnik, Eigenverlag

HEERTEN, G. (1994): "Geotextile Dichtungselemente als mineralische Dichtungskomponente in Oberflächenabdichtungen", Tagungsband 10. Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg

HEERTEN, G.; REUTER, E. (2002): "Die Bedeutung der DIBt- Zulassungen für die Qualitätsanforderungen an Bentonitmatten heute und morgen", Tagungsband 18. Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg

KILCHERT, M; MARKWARD, N. (2003): Gutachterliche Stellungnahme zu den "Aufgrabungen und Untersuchungen auf der Deponie Tagewerben"

MÜLLER, W.; SEEGER, S.; THIES, M. (2003): "Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten", Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg

WITT, K.J.; Zeh, R. (2003): Beurteilung der Zulassungs-Äquivalenz der geosynthetischen Tondichtungsbahn Bentofix[®] B 4000 nach den Grundsätzen des DIBt, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar