

Oberflächenabdichtungen mit Bentonitmatten

1 Einführung und Stand der Technik

1.1 Allgemeines

Als Regelabdichtungssysteme an der Oberfläche von Deponien sind mineralische Dichtungsschichten (für Deponieklasse DK I nach gültiger Deponieverordnung DepV) oder Kombinationsdichtungen (für DK II und DK III nach DepV) in Verbindung mit Entgasungs-, Entwässerungs- und Rekultivierungsschichten vorgesehen. Alternative Dichtungselemente sind möglich, wenn das damit hergestellte Abdichtungssystem eine gleichwertige Systemwirksamkeit besitzt. Eine Möglichkeit zur Herstellung alternativer Abdichtungssysteme liegt in der Verwendung von Bentonitmatten (häufig auch als geosynthetische Tondichtungsbahnen GTD bezeichnet) als Ersatz für lagenweise, erdbautechnisch eingebaute tonmineralische Dichtungselemente.

Erste Informationen über Hersteller, Produkte und Verwendungsmöglichkeiten bietet der Industrieverband Geokunststoffe e.V. (IVG) unter www.ivgeokunststoffe.com. Der durchgängige Qualitätskreislauf der im IVG organisierten Anbieter „vom Rohstoff bis zur Baustelle“ erfüllt alle üblichen Anforderungen an Bauprodukte. Bentonitmatten sind unter den Aspekten der Ressourcenschonung und reduzierter Transportkosten und Emissionen auch als ökologisch sinnvolle Alternative zu tonmineralischen Abdichtungsschichten anerkannt (EGLOFFSTEIN 2006).

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat sich im Rahmen der Aktivitäten ihrer Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ seit 2005 um länderübergreifende Eignungsbewertungen von Bentonitmatten für Deponieoberflächenabdichtungssysteme bemüht. Die entsprechende Arbeitsgruppe besteht aus Behördenvertretern der Länder und externen Sachverständigen. Über den aktuellen Stand der Arbeitsergebnisse wird in Kap. 3 sowie im Beitrag "Deponietechnische Vollzugsfragen" von Herrn Dipl.-Ing. W. Bräcker berichtet.

1.2 Produktformen und Eigenschaften im Überblick

Bei den von verschiedenen Herstellern für den Deponiebau in Deutschland angebotenen Bentonitmatten handelt es sich um industriell gefertigte Geokunststoffprodukte, die als mechanisch erzeugtes Verbundsystem aus

- einer oder mehreren pulverförmigen oder granulierten Bentonitschichten zwischen zwei oder mehreren miteinander vernadelten Geotextillagen
- einer Schicht aus pulverförmigem oder granuliertem Bentonit zwischen zwei oder mehreren Geotextilien, die miteinander vernäht sind,

bestehen (Abb.1).

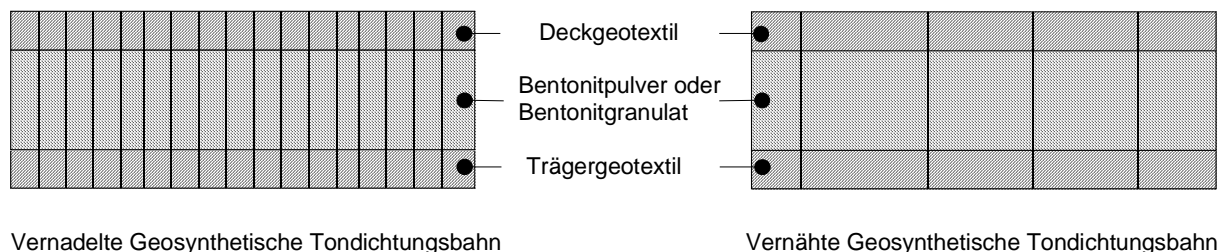


Abb. 1: Aufbau von Bentonitmatten/Geosynthetischen Tondichtungsbahnen
(EAG-GTD 2002)

Die Verbundstruktur der Bentonitmatten verhindert eine Umverteilung des Bentonits durch äußere mechanische Einwirkungen im Verarbeitungs- und Gebrauchszustand. Die Dicken der Produkte bewegen sich im trockenen Zustand im Bereich von 5 mm bis 10 mm.

Der verwendete Bentonit ist ein industriell aufbereiteter spezieller Ton. Je nach Art der in der Kristallstruktur austauschfähig gebundenen Ionen werden Natrium- oder Calciumbentonite unterschieden. Material- und Systemanforderungen an Geotextilien, Bentonit und den Verbund werden in EAG-GTD (2002) gestellt.

Als Dichtungsmaterial wird je nach Produkt Natrium- oder Calciumbentonit in Pulver- oder Granulatform verwendet. Ihre dichtende Eigenschaft erlangen Bentonitmatten durch Quellung des Bentonits bei Wasserzutritt unter Auflast und unter der Geotextil-Verbundwirkung. Die von den Herstellern zugesicherten Durchlässigkeitsbeiwerte (ab Werk) liegen für alle Produkte, die die Mindestanforderungen nach EAG-GTD (2002) erfüllen, unter $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s. Bei Langzeitanwendungen, wie sie im Deponiebau vorliegen, ist bei Natriumbentoniten

von einem vollständigen Ionenaustausch von Natrium- gegen Calciumionen auszugehen. Infolge Ionenaustausch nimmt die Wasserdurchlässigkeit erfahrungsgemäß um maximal ca. eine halbe Zehnerpotenz zu (EGLOFFSTEIN 2000). Dies ist gegebenenfalls bei der Prognose von Sickerraten und bei Wasserhaushaltsmodellierungen zu beachten.

Natrium-Bentonitmatten sind die einzigen tonmineralischen Abdichtungselemente, für die unter Deponiebedingungen ein Selbstheilungsvermögen nach Trockenrissbildung nachgewiesen worden ist, da sie bei Wiedervernässung innerhalb weniger Tage regenerieren und wieder ausreichend dichtwirksam werden (EGLOFFSTEIN 2000). Für die erforderliche Replastifizierung benötigen Bentonitmatten typischerweise nur ca. 1-2 l/m² bzw. mm Wasser (REUTER/EHRENBERG 1998). Das Potential zur Selbstheilung bei Wiedervernässung ist eine verlässliche Produkteigenschaft und in Labor- und mehrjährigen Feldversuchen nachgewiesen (REUTER 2005, HEERTEN/ REUTER 2006, MELCHIOR/STEINERT 2006). Sie stellt eine bedeutende, zusätzlich anwendungstechnische Sicherheit dar, solange verlässliche Ansätze für austrocknungssichere mineralische Dichtungssysteme nicht vorliegen (HEERTEN/KOERNER 2008). Diese Selbstheilung tritt mit einer zeitlichen Verzögerung ein, so dass das in dieser Phase aus der Rekultivierungsschicht sickende Porenwasser aufgrund des noch vorhandenen Trockenrissgefüges in den Deponiekörper eindringen kann. In dieser Phase ist auch mit einer vorübergehend reduzierten Gasdichtigkeit zu rechnen.

Die Geotextil-Verbundwirkung dient neben der Unterstützung des Quellgedrucks der kurzfristigen Übertragung von Einbauschubkräften und der langfristig standsicheren Übertragung der Schubkräfte auf Böschungen. Als Geokunststoffkomponenten kommen Vliesstoffe, Gewebe und Vliesstoff-Gewebe-Kombinationen zum Einsatz. Aus Gründen der Langzeitbeständigkeit werden für die zum Einsatz kommenden Kunststoffe nur Formmassen eindeutiger Herkunft und Zusammensetzung aus Polypropylen oder Polyethylen hoher Dichte verwendet, deren Langzeitverhalten aufgrund jahrelanger physikalisch-chemischer Werkstoffprüfungen auch über Jahrhunderte sicher prognostizierbar ist. Die verwendeten Geotextilien ermöglichen die Beibehaltung der Dichtwirksamkeit auch bei großen Verformungen, was insbesondere für den Einsatz auf Altdeponien oder in temporären Abdecksystemen spricht. Umfangreiche Eignungsprüfungen dokumentieren langfristige Produktfestigkeiten, die bei Böschungsneigungen bis 1:3 und Überdeckungen von 1-2 m keine zusätzlichen Maßnahmen wie z. B. den Einsatz von Geogittern erforderlich machen. Gemäß Anforderungskatalog der LAGA müssen diesbezüglich z. B. im Rahmen der LAGA-Eignungsbeurteilungen Langzeitversuche zur Scherkraftübertragung für einen mindestens 100jährigen Zeitraum nachgewiesen werden.

Eine besondere Aufmerksamkeit bei der Planung erfordert die funktionsgerechte Gestaltung des Systemaufbaus. Insbesondere zur Erzielung einer dauerhaft verlässlichen Selbstheilung nach Wiedervernässung ist eine projekt- und standort-spezifische Entwurfsbearbeitung notwendig. Alternativ liegen Entwurfshinweise für Systemaufbauten mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen vor Austrocknung vor.

Letztlich wird im Zusammenhang mit tonmineralischen Abdichtungsschichten immer auf deren Durchwurzelungsempfindlichkeit und die Gefahr bleibender Makroporen nach dem Absterben der Pflanzenwurzeln hingewiesen. Im Unterschied zu 50 cm mächtigen Tondichtungen, die erdbautechnisch üblicherweise bei steifplastischer bis halbfester Konsistenz verdichtet werden, besitzen ionenausgetauschte Natrium- ähnlich wie auch Calciumbentonitmatten bei typischen Wassergehalten von rund 100 % eine geringe Festigkeit, die für ein duktileres Verformungsverhalten und eine dichtungswirksame Einbettung der Pflanzenwurzeln – wie auch der geotextilen Verbindungen von Deck- und Trägergeotextilien - sorgt. Als zusätzliche Sicherheit sollte der Aufbau von Dichtungssystemen mit Bentonitmatten Durchwurzelungen der Bentonitmatten weitgehend verhindern.

Bentonitmatten werden in Deutschland seit über 20 Jahren bei Infrastrukturmaßnahmen und im Deponiebau eingesetzt. Angestoßen durch die Testfeldergebnisse auf der Deponie Hamburg-Georgswerder förderten insbesondere die Zulassungstätigkeiten des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) seit Mitte der neunziger Jahre aber auch die technisch-wissenschaftlichen Arbeiten in den Gremien der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), z. B. im AK 5.1 „Kunststoffe in der Geotechnik“ und im AK 6.1 „Umweltgeotechnik“, das Bewusstsein für einen produktspezifischen Umgang mit Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen auf Deponien. Aktuelle Ausschreibungen bestätigen, dass die spezifischen Kosten für die Lieferung und Verlegung geeigneter Bentonitmatten inklusive Fremdüberwachung erfahrungsgemäss in einer Größenordnung von deutlich unter 10 €/m² liegt.

1.3 Dichtungswirkung von Bentonitmatten unter Deponiebedingungen

1.3.1 Dichtungswirkung fabrikneuer Produkte und Ionenaustausch

Mit Bentonitmatten kann im Vergleich zu mineralischen Dichtungsstoffen eine gleichwertige Dichtungswirkung bei geringerer Schichtdicke erzielt werden. Die Dichtungswirkung beruht vor allem auf dem Quellvermögen des Bentonits. Das Quellen des Bentonits bewirkt eine Volumenzunahme. Die Größe der Volumenzunahme wird durch die Art und den Mengenanteil der in der Kristallstruktur des Bentonits vorhandenen Ionen beeinflusst; z. B. besitzen zweiwertige Ionen wie Calcium größere molekulare Bindungskräfte, was zu einer geringeren Volumenzunahme führt als bei gleichem Anteil von einwertigen Ionen wie Natrium.

Wird die Volumenzunahme mechanisch behindert, bei Bentonitmatten z. B. durch die textile Verbindung der Deck- mit den Trägergeotextilien, entsteht ein Quellgegendruck, der die freie (vertikale) Volumenzunahme einschränkt und die Packungsdichte erhöht. Dadurch werden das Porenvolumen und die Wasserdurchlässigkeit reduziert.

Die Größe der Verbundfestigkeit der Geotextilien und die Art der Verbindungstechnik beeinflusst die Packungsdichte der Bentonitteilchen während der Erstquellung und damit die Dichtungswirkung einer Bentonitmatte, bevor die Überschüttung mit der Entwässerungs- bzw. Rekultivierungsschicht abgeschlossen ist. Vernadelte Produkte verfügen über eine flächige, gleichmäßige Verbundwirkung; bei vernähten Produkten bestimmt vor allem der Nahtabstand ob und in wieweit der erforderliche Quellgegendruck auftritt.

Darüber hinaus ist die Dichtungswirkung von Bentonitmatten von der Bentonitmenge (Abb. 2) und der Auflast abhängig (Abb. 3). Die Auflast aus überlagernden Bodenschichten – im Deponiebau Rekultivierungs- und Entwässerungsschichten - kann je nach Mächtigkeit, Art und Lagerungsdichte der Deckschichten variieren. Sie beträgt bei Umsetzung der Regelabdichtungssysteme der Deponieverordnung erfahrungsgemäß mindestens 20 kN/m². Die von allen im IVG organisierten Anbietern in Deutschland garantierten Durchlässigkeitsbeiwerte liegen für alle Produkte, die die Mindestanforderungen nach EAG-GTD (2002) erfüllen, unter $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s (ab Werk).

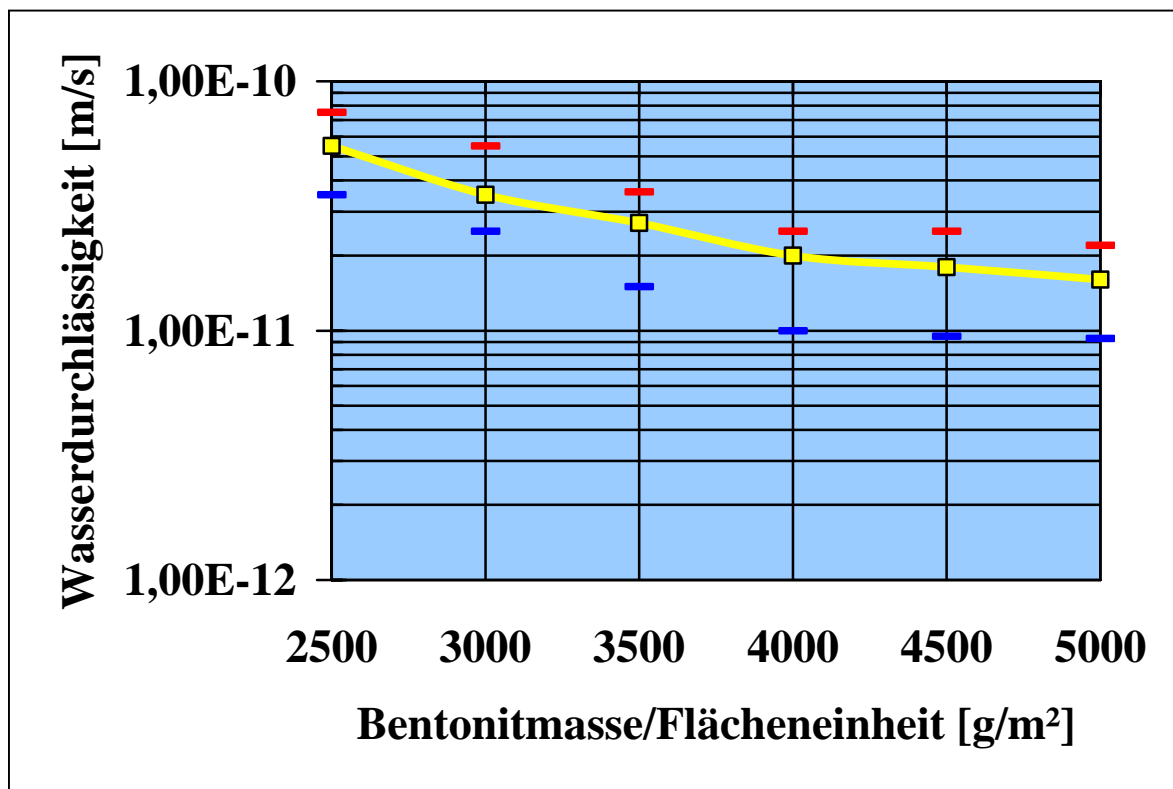


Abb. 2: Abhängigkeit des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes einer vernadelten Bentonitmatte von der Bentonitmenge (NAUE 2006)

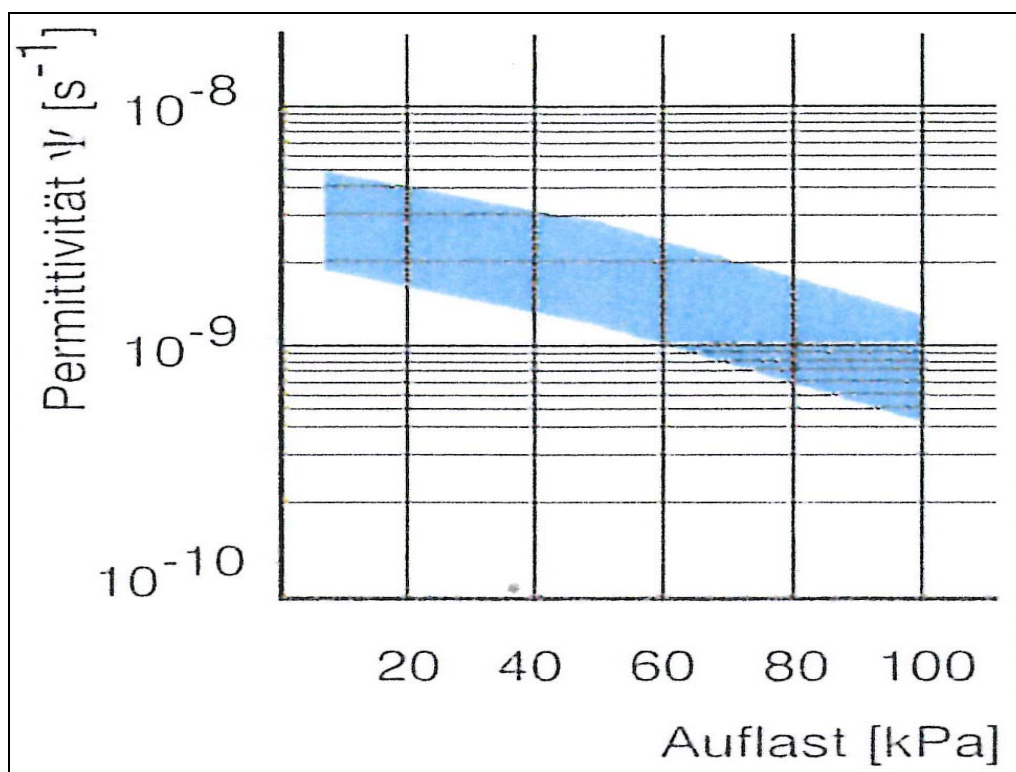


Abb. 3: Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit – hier angegeben als Permittivität (s.u.) einer vernähten Bentonitmatte von der Auflast (HUESKER 2006)

Für den Nachweis der Dichtungswirkung von Bentonitmatten wird üblicherweise die Permittivität Ψ (1/s) des Produktes im Labor (Durchlässigkeitsversuch) bestimmt. Die Permittivität ist definiert als das Wasservolumen, das in Abhängigkeit von der Auflast pro Zeiteinheit, Höhendifferenz und Flächeneinheit durch die Bentonitmatte hindurchtritt.

$$\Psi = \frac{V_w}{\Delta t \cdot \Delta h \cdot A} = \frac{k}{d}$$

Permittivität	Ψ	[1/s]
Wasservolumen	V_w	[m ³]
Messzeitspanne	Δt	[s]
Differenz der Standrohrspiegelhöhen	Δh	[m]
Querschnittsfläche	A	[m ²]
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert senkrecht zur Schichtebene	k	[m/s]
Schichtdicke	d	[m]

Bei einer angenommenen Schichtdicke einer gequollenen Bentonitmatte von ca. 1 cm wird als Durchlässigkeitsbeiwert somit das Hundertfache der Permittivität angegeben.

Für Langzeitanwendungen von Natriumbentonit im Erdbau ist von einem vollständigen Austausch der Natrium- gegen bevorzugt Calciumionen auszugehen. Durch die unterschiedliche Ionenbelegung verändern sich wichtige bodenphysikalischen Eigenschaften des Bentonits (z. B. sein Quellvermögen) und nähern sich denen eines Calciumbentonits (REUTER 1986, REUTER 1997).

Infolge Ionenaustausch nimmt die Wasserdurchlässigkeit bzw. Permittivität zu. Die ersten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Ionenaustausches auf Abdichtungselemente aus Bentonit in Deutschland sind ca. 25 Jahre alt und wurden Ende der siebziger Jahre an der TU Braunschweig im Rahmen des DIBt-Zulassungsverfahrens für die sogenannten VOLCLAY-Panels durchgeführt (SIMONS/MESECK 1981). Für Auflasten, wie sie bei Oberflächenabdichtungen üblich sind, sind entsprechende Auswertungen von Langzeitdurchlässigkeitsversuchen an Bentonitmatten in Abb. 4 dokumentiert und extrapoliert. Im Einzelfall sind produktspezifische Nachweise vom Hersteller einzuholen.

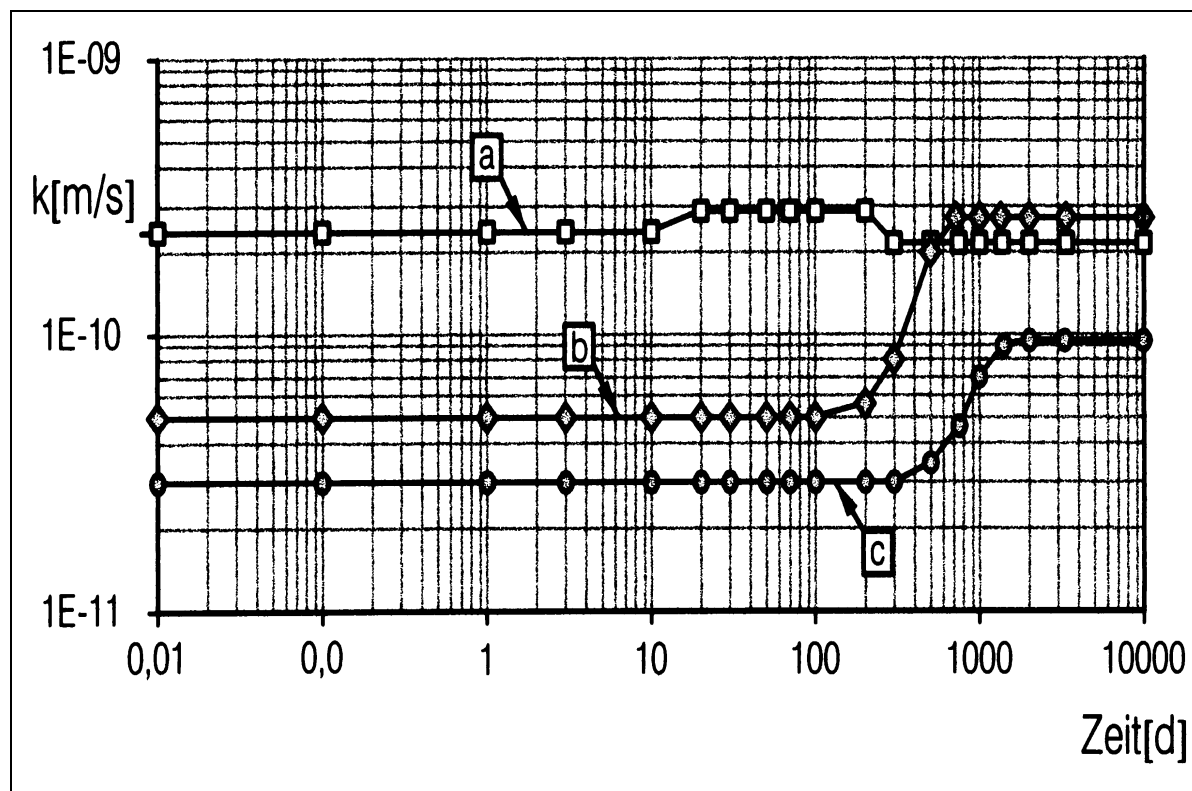


Abb. 4: Typische Durchlässigkeitsbeiwerte für Bentonitmatten als Funktion über die Zeit, hydraulische Druckhöhe: 30 bis 45 cm Wassersäule (EGLOFFSTEIN 2000)

- (a) Schwere Calciumbentonitmatten (8000 g/m² Bentonit)
- (b) Mittelschwere Natriumbentonitmatten (5000 g/m² Bentonit) bei Ionenaustausch
- (c) Schwere Natriumbentonitmatten (8000 g/m² Bentonit) bei Ionenaustausch

Nach Deponieverordnung (DepV), Anhang 5, ist jede Rekultivierungsschicht so zu bemessen, dass „die Dichtung vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung geschützt wird“. Diese Forderung gilt auch für Oberflächenabdichtungen mit Bentonitmatten.

1.3.2 Dichtwirkung bei Trockenstresseinwirkung

Die Dichtwirkung von Bentonitmatten ist unmittelbar an den Wasserhaushalt und das feuchte Milieu der Umgebung gebunden. Für das Aufrechterhalten einer optimalen Dichtwirkung ist grundsätzlich eine Mindestfeuchte erforderlich. In der Regel ist die Bentonitmatten in einem Oberflächenabdichtungssystem jedoch von Böden umgeben, die sich in teilgesättigten Zuständen befinden bzw. in denen nur zeitweise mit dem Anfall von freiem Porenwasser zu rechnen ist. In Abhängigkeit von den örtlichen klimatischen Verhältnissen und dem Wasserhaushalt des jeweiligen Dichtungssystems sind Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungs-

zyklen zu beachten, die zu wechselnden Wassergehalten im Bentonit führen. Dabei kann es zu Strukturveränderungen im Bentonit kommen, die eine temporäre Verschlechterung der Permittivität des Produktes bewirken.

Ursächlich hierfür ist die Eigenschaft, dass die Wasserabgabe und Wasseraufnahme von Bentoniten einer Hysterese unterliegt, die eine vollständige, alleinige Rückquellung bis zum ursprünglichen Volumen vor der Schrumpfung verhindert. Einhergehend mit der Wiedervernässung findet jedoch eine Plastifizierung des Bentonits infolge Wasseraufnahme statt und eine Abnahme der Festigkeit. In Verbindung mit der Auflast aus überdeckenden Bodenschichten – in der Regel Drän- und Rekultivierungsschicht – führt diese Plastifizierung zu einer Annäherung der durch Trockenstresseinwirkung entstehenden Aggregate (EGLOFFSTEIN, 2000). Dieser Quell- und Konsolidationsprozess verläuft auflast- und zeitabhängig und kann innerhalb weniger Tage zu einer Verbesserung der Dichtwirkung nach Trockenstress (Abb. 5) führen. Hinweise auf die wachsende Akzeptanz dieses „Selbstheilungsvermögens“ von Bentonitmatten finden sich mittlerweile in verschiedenen Regelwerken der Umweltgeotechnik, z. B. DWA (2005), GDA E 2-36 (2007), ANS (2007), FGSV (2008), aber auch in den Kommentaren des BMU zur neuen DepV (2007).

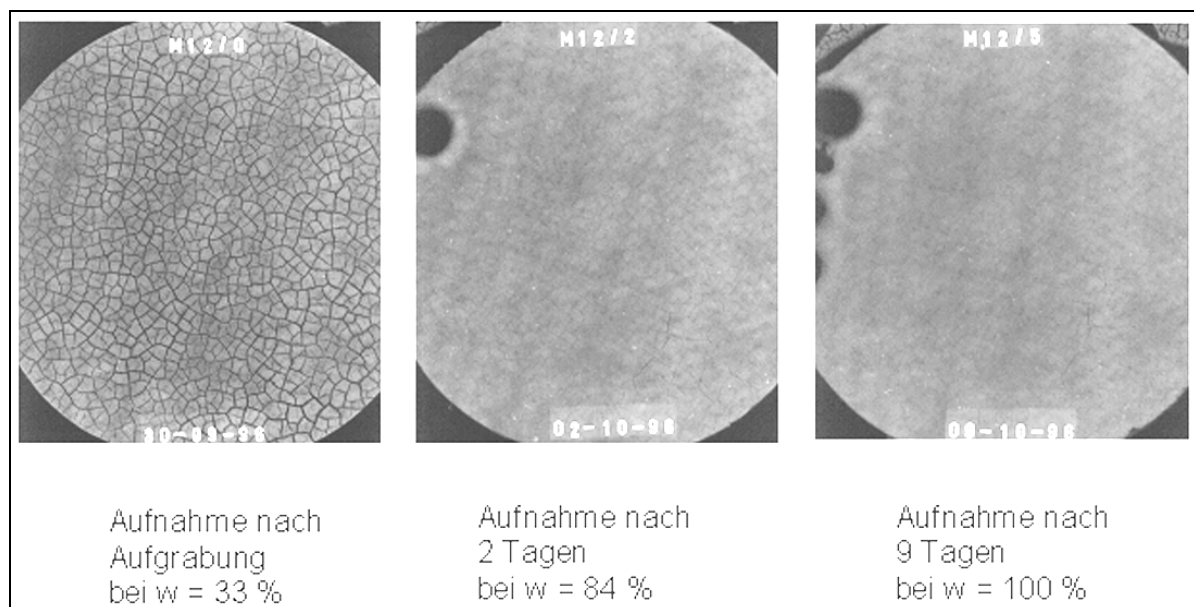


Abb. 5: Röntgenaufnahmen einer ausgegrabenen vernadelten Bentonitmatte in unterschiedlichen Phasen der Wiedervernässung bei 20 kN/m² Auflast (HEERTEN/REUTER 2002)

Abb. 5 dokumentiert diese produktspezifische Eigenschaft durch begleitende Röntgenuntersuchungen an vernadelten Bentonitmatten bei unterschiedlichen Wassergehalten nach Trockenstresseinwirkung. Dazu wurde ein stark ausgetrocknetes Produktmuster aus einer Aufgrabung geröntgt und anschließend in einen Kompressionsapparat (Oedometerzelle) eingebaut und bei einer Auflast von 20 kN/m² bewässert.

Die zeitliche Verzögerung, mit der die Gefügeheilung abläuft, wird nicht zuletzt von der Aggregatstruktur bestimmt, die der Bentonit in einer Bentonitmatte bei Wasserentzug einnimmt. Erfahrungen aus der Entwicklung von wasserundurchlässigem Beton zeigen, dass unter sonst gleichen Bedingungen (Bentonitmenge, Auflast, Konsistenz etc.) davon ausgegangen werden kann, dass viele kleine und gleichmäßig verteilte rissartige Gefügestörungen schneller heilen als wenige große rissartige Gefügestörungen.

Feldversuche belegen, dass die Durchlässigkeit von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen infolge von Trockenstresseinwirkungen kurzfristig um mehrere Zehnerpotenzen ansteigen kann; allerdings hat EGLOFFSTEIN (2000) auf der Basis statistisch abgesicherter Durchlässigkeitsversuche, die an ausgegrabenen vernadelten Bentonitmatten durchgeführt worden sind, nachgewiesen, dass sich diese Durchlässigkeitserhöhung bei Wiedervernässung unter 20 kN/m² Bodenauflast innerhalb weniger Tage reduziert und nach ca. 2 bis 4 Wochen eine Größenordnung von 10⁻¹⁰ m/s erreicht (Abb. 6).

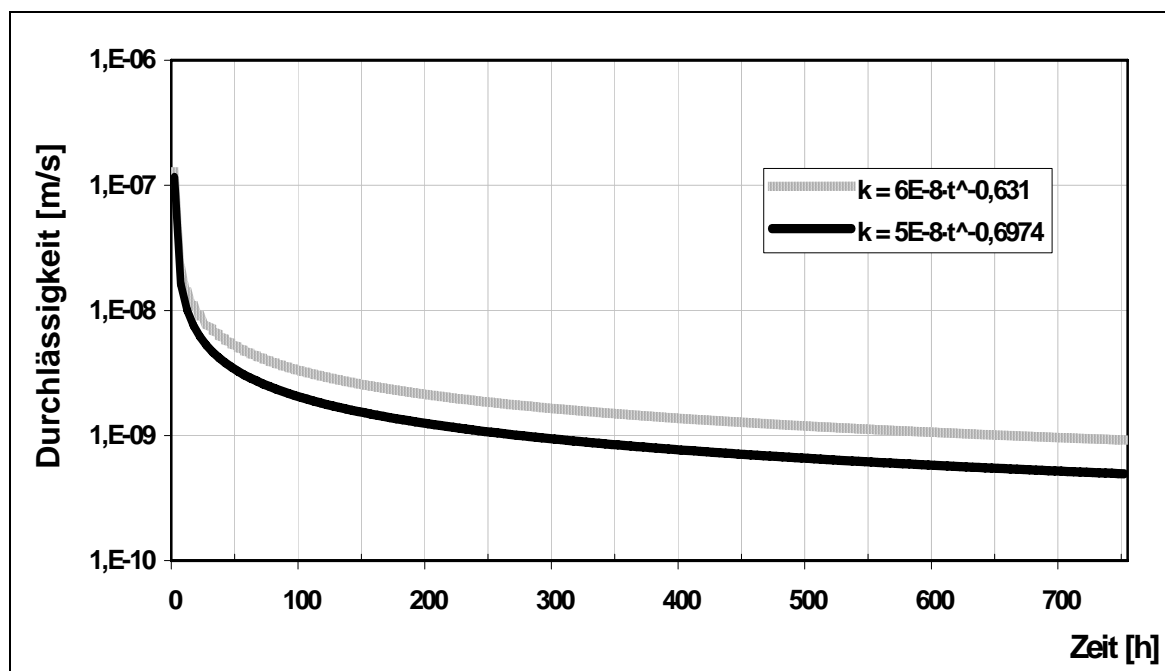


Abb. 6: Statistische Auswertung von Durchlässigkeitsversuchen an ausgegrabenen, ione-
 nausgetauschten vernadelten Bentonitmatten bei einer Auflast von 20 kN/m²; $i=30$
 (47 Proben, 8 Deponien, max. 6 Jahre nach Herstellung der Oberflächenabdichtung,
 alle Ausgangswassergehalt $w \ll 100\%$) (EGLOFFSTEIN, 2000)

Für einen weiteren Nachweis der langfristig vorhandenen Dichtungswirkung unter Deponie-
 bedingungen hat die Firma NAUE 1998 eine spezielle Lysimeteranlage gebaut, die aus 6
 Einzellysimetern besteht und bis heute - wissenschaftlich und technisch begleitet durch das
 Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau an der Universität Hannover
 (Prof. Blümel) - ununterbrochen betrieben wird. Aufbau und erste Messergebnisse sind de-
 tailliert in BLÜMEL et al. (2002) beschrieben.

Ziel der Untersuchungen ist es, dass Langzeitverhalten von vernadelten Bentonitmatten un-
 ter in-situ-Bedingungen langfristig untersuchen zu können. Dazu wurden in Lemförde sechs
 sogenannte Ringschacht-Lysimeter mit jeweils 2 m Durchmesser installiert. Drei dieser Ly-
 simeter sind so aufgebaut, dass in ihnen die kompletten Oberflächenabdichtungssysteme
 einschließlich der 1 m mächtigen Rekultivierungsschichten hergestellt werden konnten, wie
 sie im Deponiebau üblich sind („Deponielysimeter“). Die Lysimeter sind mit einem Erdhügel
 umgeben, um sich den Randbedingungen von Oberflächenabdichtungen in-situ besser an-
 zunähern als mit freistehenden Konstruktionen. Zudem sind die Dichtungskomponenten bei
 dieser Bauweise vor seitlichen Trockenstresseinwirkungen geschützt. Im Inneren des Hügels
 ist ein Raum integriert, welcher die Einrichtungen zur Messung der Drän- sowie der Durchsi-

ckerungswassermengen enthält. Abb. 7 zeigt einen Schnitt durch die Lysimeterkonstruktion der Fa. NAUE.

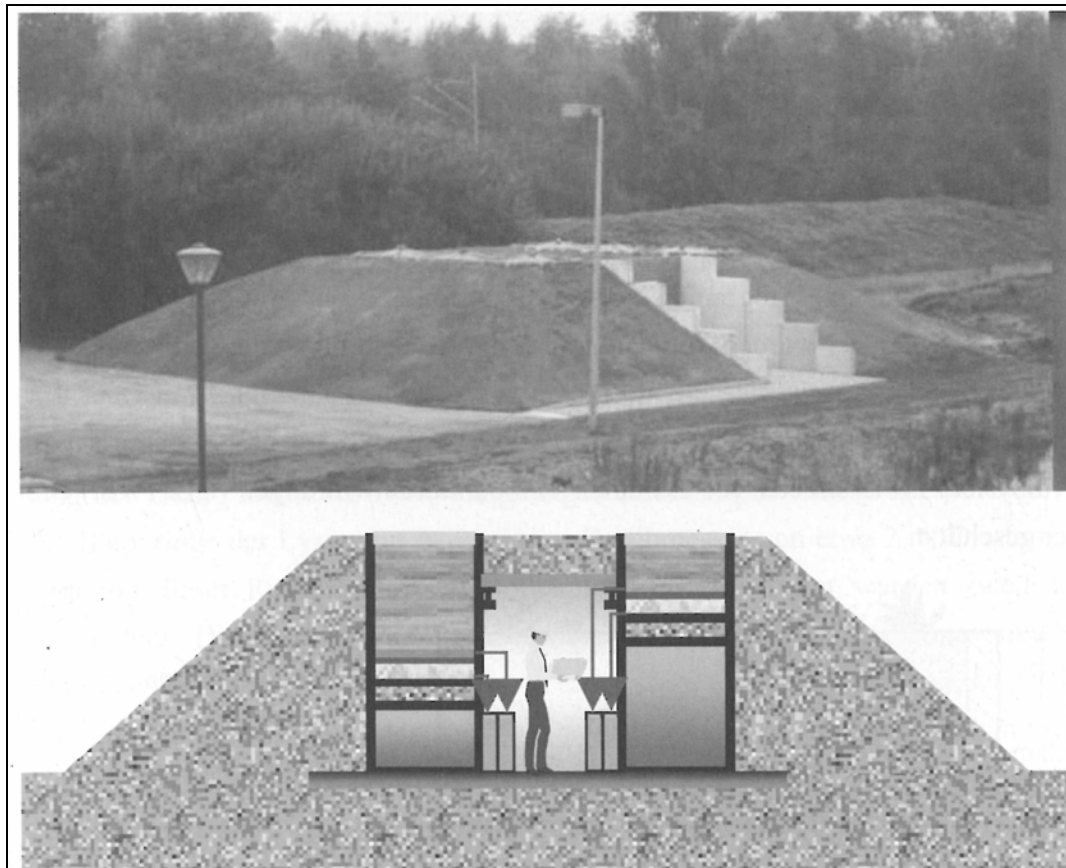


Abb.7: Ansicht und Schnitt der Lysimeter innerhalb eines Erdhügels in Lemförde (BLÜMEL et al. 2002)

Abb. 8 gibt einen aktuellen Überblick über die gemessenen Niederschlags-, Drainage- und Sickerwasserabflussmengen für die drei Deponielysimeter mit jeweils 1 m Rekultivierungsschicht.

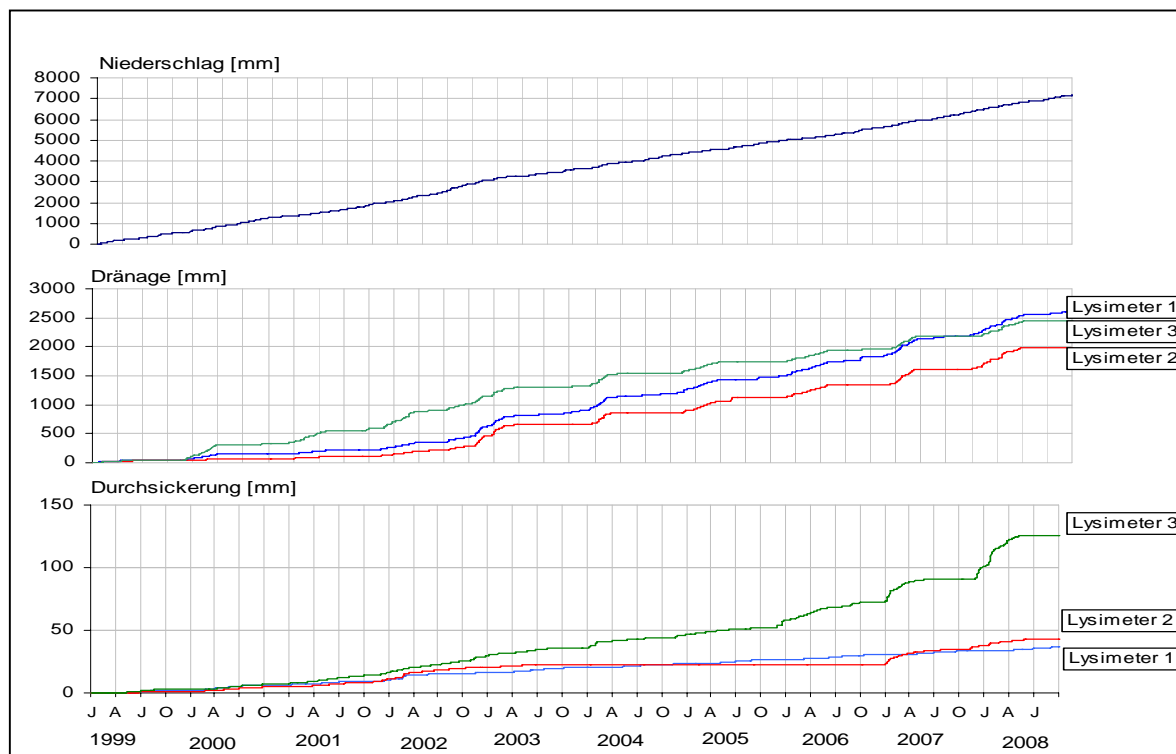


Abb. 8: Abflusssummenkurven für Lysimeter 1-3 in Lemförde bei 1,2 – 1,3 m Überdeckung (BLÜMEL/MÜLLER-KIRCHENBAUER 2008)

Die Daten in Abb. 8 – Lysimeter 3 – stammen von einer mit Natrium-Bentonitgranulat gefüllten Bentonitmatte. In den Lysimetern 1 und 2 wurden dagegen unterschiedliche Bentonitpulvervarianten eingebaut. Trotz der verschiedenen Arten der verwendeten Rekultivierungsschichten (Sand- bzw. Lehmboden) vermitteln diese Daten zumindest einen näherungsweisen Eindruck der langzeitigen Dichtungswirkung dieser Produkte unter Deponiebedingungen. Im Mittel ergaben sich im Feldversuch über eine Laufzeit von nunmehr ca. 10 Jahren Restdurchsickerungsmengen von ca. 4 mm/Jahr bei den Bentonitpulvervarianten.

Technisch wird die Dichtungswirkung des gesamten Systems jedoch in erster Linie durch die Eigenschaften der zwei Komponenten bestimmt, die hinsichtlich ihres Wasserhaushaltes bzw. Durchlässigkeitsverhaltens als hydraulisch instationär d. h. zeitlich veränderlich einzustufen sind: Hier ist zum einen die Rekultivierungsschicht im Zusammenhang mit der Vegetation zu nennen, deren bodenphysikalisch hydrologischen Eigenschaften unter dem Einfluss der dynamischen Einflussgrößen Niederschlag, Speichervermögen und Evapotranspiration täglich wechseln können. Demzufolge werden sich auch täglich wechselnde Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht (Dränspenden) ergeben, was seinerseits wiederum Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt und die Zustandsform der darunter befindlichen Bentonitmatte hat.

Diese Zusammenhänge werden sehr deutlich, wenn man die Wirkungsgrade der Komponenten „Rekultivierungsschicht“ (einschließlich Vegetation) und „Bentonitmatte“ bezüglich ihrer Dichtungswirkung getrennt bilanziert. Hierzu werden Berechnungen der Wirkungsgrade der Rekultivierungsschicht nach WOLSFELD (2005) angesetzt. Abb. 9 dokumentiert graphisch die Spannweiten der Wirkungsgrade des Gesamtsystems, der Granulat-Bentonitmatte und der Rekultivierungsschicht am Beispiel des Lysimeters 3 für den Zeitraum 1998 bis 2006 (IWA 2007).

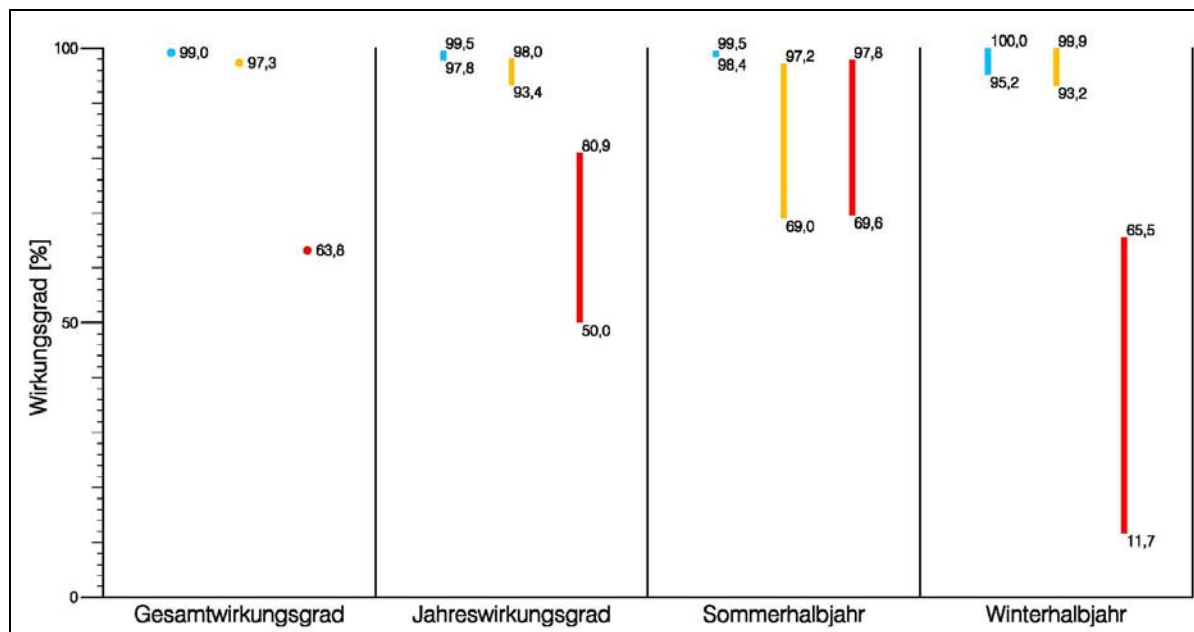


Abb. 9: Ringschachtlysimeter 3 Lemförde: Spannweiten der errechneten Wirkungsgrade des Gesamtsystems (blau), der Granulat-Bentonitmatte (gelb) und der Rekultivierungsschicht (rot) bei unterschiedlichen Bilanzperioden (IWA 2008)

Die Abbildung zeigt, dass die untersuchte Granulat-Bentonitmatte im Gesamtzeitraum (9 Jahre) einen mittleren Wirkungsgrad (Abdichtungsvermögen bezogen auf den durch die Rekultivierungsschicht sickernden Niederschlagsanteil) von ca. 97 % besitzt. In den einzelnen Jahren variiert dieser Wirkungsgrad aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Einwirkungen zwischen ca. 93 und 98 %. In den 9 Winterhalbjahren beträgt die Dichtungswirkung stets zwischen ca. 93 und 100%. Extreme Trockenstresseinwirkungen, die zu einer signifikanten Reduzierung führen können, sind dagegen häufig in den 9 Sommerhalbjahren zu verzeichnen, was sich in einer Spreizung der Wirkungsgrade zwischen ca. 69 und 97 % bemerkbar macht.

In den Sommerhalbjahren war für die Rekultivierungsschicht, die in den Winterhalbjahren lediglich Wirkungsgrade von ca. 12 bis 66 % erreicht (Anteil der Niederschlagsmenge, die infolge von Verdunstung und Speicherung in der Rekultivierungsschicht zurückgehalten wird), durch verstärkte Evapotranspiration in der Vegetationsperiode regelmäßig eine Steigerung ihres Wirkungsgrades auf bis zu ca. 98 % zu beobachten. Bentonitmatte und Rekultivierungsschicht bilden offensichtlich ein redundantes System, was über alle 9 Jahre gesehen letztlich in einem Wirkungsgrad von ca. 99 % für das Gesamtsystem resultiert.

Noch deutlicher wird das Zusammenwirken von Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte, wenn man die Wirkungsgrade auf Monatsbasis bilanziert und graphisch wie in Abb. 10 gesehen über die gesamte Auswerteperiode in getrennten Zeitreihen aufträgt.

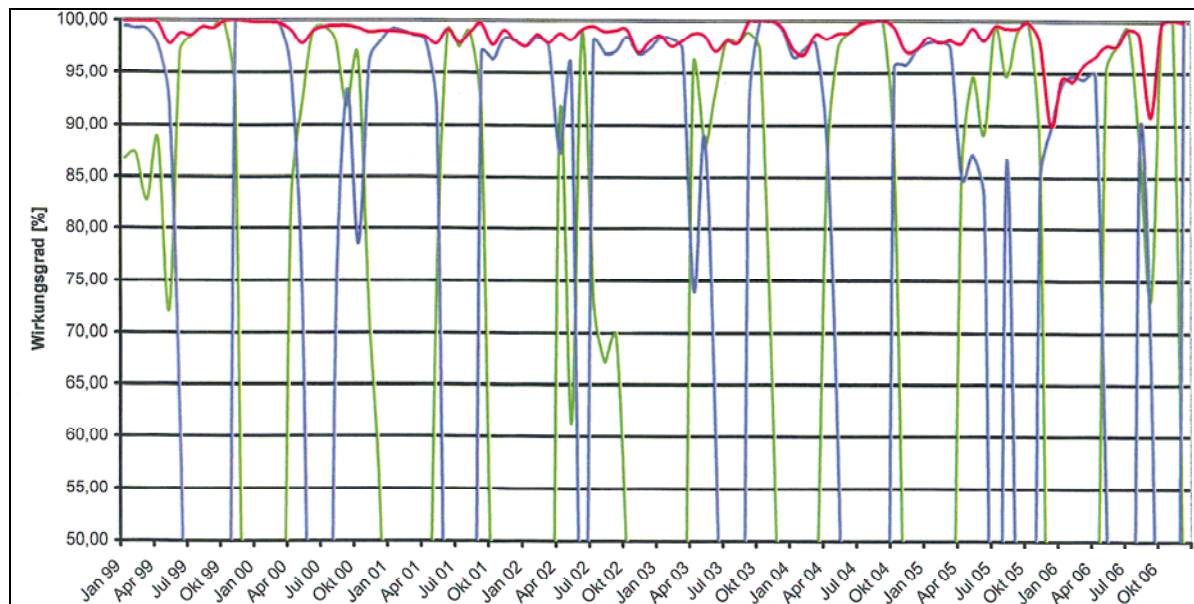


Abb.10: Systemwirksamkeit des gesamten Aufbaus und Wirkungsgrade von Rekultivierungsschicht und Granulat-Bentonitmatte im Lysimeter 3 der Firma NAUE mit monatlicher Auflösung für den Zeitraum 1999 – 2006 (Rot = Systemwirksamkeit, Grün = Rekultivierungsschicht, Blau = Granulat-Bentonitmatte) (IWA 2008)

Abb. 10 verdeutlicht, in welcher Form sich die beiden Komponenten Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte hydraulisch ergänzen: In den verdunstungsreichen Sommermonaten bestimmt der Wirkungsgrad der Rekultivierungsschicht die Systemwirksamkeit (Rückhaltevermögen von Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte bezogen auf den Niederschlag), was sich in Abb. 10 dadurch ausdrückt, dass die rote Linie von der grünen „getragen“ wird. In den verdunstungsarmen Wintermonaten wäre ohne die Bentonitmatte praktisch keine Dichtungswirkung im System zu erzielen. Jetzt liegt die rote Systemlinie auf der blauen Linie auf!

Ferner erkennt man, dass das Jahr 2006 am Standort Lemförde klimatisch zwei extreme Besonderheiten aufwies: zum einen war der Winter-/ Frühjahrszeitraum durch langandauernde Frosttemperaturen gekennzeichnet, an das sich dann praktisch ohne Übergang ein warmer, niederschlagsarmer, trockener Sommer anschloss. Beides führte zu einer Unterversorgung der Bentonitmatte mit Feuchtigkeit im Hinblick auf einen optimalen Wasserhaushalt. Darüber hinaus ergab sich im Jahr 2006 neben der sommerlichen Austrocknung eine zusätzliche späte Trockenphase im November/Dezember, was in der bisherigen Beobachtungsreihe einmalig war und den Wirkungsgrad der Bentonitmatte entsprechend reduzierte. Doch selbst unter diesen Worst-Case-Bedingungen wurde im Dezember 2006 (letzter Auswertemonat) wieder ein Wirkungsgrad der Bentonitmatte von 100 % registriert!

2 Entwurfsgrundsätze und Systemanforderungen

2.1 Allgemeines

Bereits frühzeitig hatte man beim DIBt während der Zulassungsverfahren für Bentonitmatten in den neunziger Jahren erkannt, dass die in den abfallrechtlichen Regelwerken für die tonmineralische Regeldichtung geforderte Dichtheit von Bentonitmatten erreicht werden kann, wenn „entweder Austrocknungen nicht stattfinden oder auf Dauer wirksame Selbstheilungseigenschaften berücksichtigt werden können“ (DIBT 1996). Bezogen auf die aktuellen Diskussionen ist im Planungsentwurf demnach zu unterscheiden, ob das vorgesehene Produkt und der geplante Systemaufbau ausreichend vor Wassergehaltsänderungen in der Bentonitmatte schützen soll oder ob durch Produkt und Systemaufbau zwar temporär erhöhte Wasserdurchlässigkeiten nicht ausgeschlossen, aber anschließend durch Ausnutzung des Potentials zur Selbstheilung nach Wiedervernässung bei langfristiger Betrachtung eine ausreichende Dichtungswirkung des Oberflächenabdichtungssystems sichergestellt werden soll.

2.2 Entwurfskonzept 1: „Schutz vor unzulässigen witterungsbedingten Austrocknungen“

Die Sicherstellung eines ausreichenden Schutzes vor witterungsbedingten Austrocknungen bedingt, dass in den angrenzenden Schichten zur Bentonitmatte – vorzugsweise in der überlagernden Entwässerungsschicht – dauerhaft eine ausreichende Feuchtigkeit vorhanden ist, die ein Wassergehaltsniveau des Bentonits von ca. 100% ermöglicht und dadurch Trocken-

stresseinwirkungen auf die Bentonitmatte verhindert. In Anbetracht dieser besonderen Anforderung wurden zur Umsetzung dieses Entwurfskonzepts bereits in den DIBt-Zulassungen der neunziger Jahre umfangreiche Anforderungen an den Systemaufbau verankert.

Unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse wurden diese Anforderungen im Rahmen der LAGA-Eignungsbeurteilungen in der Unterarbeitsgruppe „Bentonitmatten“ der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ zwischen Behördenvertretern und externen Sachverständigen diskutiert und als sogenannte „Bentonitmattegrundsätze“ fortgeschrieben. Die gültigen Anforderungen wurden für alle Bentonitmatten gleichermaßen definiert und liegen zur Zeit mit Arbeitsstand vom 10.12.2008 vor.

Detaillierte Erläuterungen zum Stand der LAGA-Eignungsfeststellungen finden sich bei BRÄCKER (2009):

Die einzelnen Bentonitmatteprodukte unterscheiden sich in ihren Komponenten und in ihrem Aufbau. Dies wird in den Eignungsbeurteilungen entsprechend berücksichtigt. Im Einzelfall kann es daher erforderlich sein, die konstruktive Gestaltung des Abdichtungssystems entsprechend den Hinweisen in den Eignungsbeurteilungen anzupassen bzw. den Einsatz auf bestimmte Produkte zu beschränken.

Firma HUESKER hatte die Eignungsbeurteilung ihrer Produkte NaBento[®] RL-N und NaBento[®] RL-C beantragt. Hierbei handelt es sich gegenüber dem seinerzeit vom DIBt bauaufsichtlich zugelassenen Produkt um Neuentwicklungen, so dass es umfangreicher Untersuchungen und Nachweise bedurfte. Die Eignungsbeurteilungen wurden von der Ad-hoc-AG mit Datum vom 23.12.2008 verabschiedet.

Im Auftrag der Firma NAUE wurden zunächst die Produkte Bentofix[®] B 4000 und Bentofix[®] BZ 6000 beurteilt. Für beide Produkte hatte das DIBt bauaufsichtliche Zulassungen für den Einsatz in Oberflächenabdichtungen von Deponien der Klasse I erteilt. Sie werden seit dem unverändert produziert. Schwerpunkte der Eignungsbeurteilungen waren daher der Nachweis der inneren Langzeitscherkraftübertragung und die Einhaltung der Dichtigkeitsanforderungen gemäß den Anforderungen der Allgemeinen Grundsätze sowie der Bentonitmattegrundsätze.

Für den Nachweis der Langzeitscherkraftübertragung hatte Firma NAUE bereits vor Beginn der Arbeiten entsprechende Untersuchungen bei der BAM veranlasst. Da die Versuchsmethode als eine von zwei Möglichkeiten den Vorgaben der Bentonitmattegrundsätze entsprach, konnten die Ergebnisse unmittelbar in die Eignungsbeurteilung einfließen.

Die Eignungsbeurteilungen wurden von der Ad-hoc-AG auf ihrer 14. Sitzung am 12./13.12.2007 verabschiedet. Die LAGA hat sie auf ihrer 90. LAGA-Sitzung am 16./17.04.2008 in Leipzig zur Kenntnis genommen. Sie galten zunächst ausschließlich für den Einsatz dieser Bentonitmatten auf Deponien der Klasse I.

Für den Einsatz auf Deponien der Klasse II in Kombination mit einer Kunststoffdichtungsbahn wurden im Jahr 2008 noch weitere Nachweise vorgelegt.

Neben den seinerzeit vom DIBt zugelassenen Produkten hat Firma NAUE auch die Beurteilung der Eignung ihres Produktes Bentofix[®] NSP 4900 beantragt. Hierbei handelt es sich um eine Modifikation der Bentonitmatte Bentofix[®] B 4000. Die Nachweise und Prüfungen konnten sich daher auf die Punkte beschränken, in denen sich diese Produkte unterscheiden.

Die auch auf den Anwendungsbereich für Deponien der Klasse II fortgeschriebenen Eignungsbeurteilungen sowie die Eignungsbeurteilung für Bentofix[®] NSP 4900 wurden von der Ad-hoc-AG am 23.12.2008 verabschiedet.

Wesentliches Merkmal aller Eignungsbeurteilungen ist die im Unterschied zu den früheren DIBt-Zulassungen nunmehr zulässige einlagige Verlegung der Bentonitmatten auf DK I und DK II-Deponien in einem in den LAGA-Gremien abgestimmten Regelaufbau (Abb.11). Ein vergleichbarer Systemaufbau wurde von BRÄCKER bereits 2008 für alle mineralischen Dichtungen aus natürlichem Ton gefordert, sofern nicht durch eine besondere Materialzusammensetzung und Einbautechnik nachweislich ein ausreichender Schutz gegen schädliche Wasserspannungen gegeben ist.

Gegenwärtig wird in den zuständigen LAGA-Gremien der in Abb. 11 dargestellte Systemaufbau noch einmal überdacht, da kurzfristig bekannt wurde, dass Elemente dieser Anordnung mit Schutzrechten belegt sind. Da bis zur Fertigstellung dieses Beitrages noch kein abschließendes Votum der LAGA veröffentlicht wurde, wird empfohlen, die weitere Entwicklung hierzu z. B. durch die aktuellen Hinweise unter www.gewerbeaufsicht-niedersachsen.de zu verfolgen.

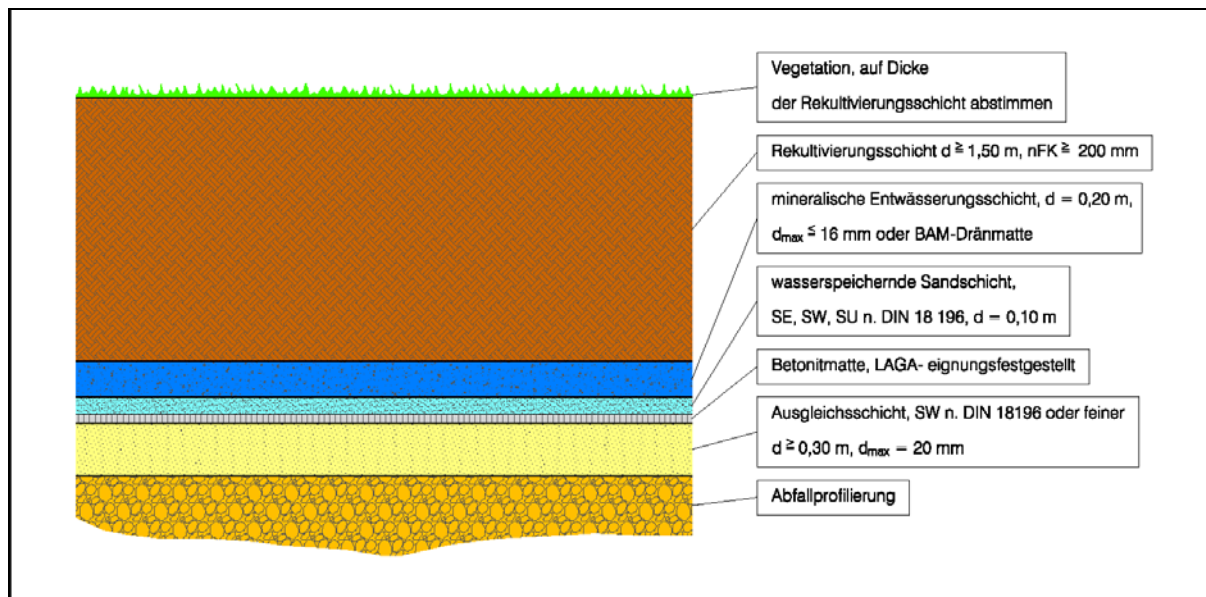


Abb.11: Regelaufbau für LAGA-eignungsfestgestellte Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen der Deponieklassen DK I und DK II

Weitere Produkt- und Systemhinweise finden sich in den jeweiligen Eignungsbeurteilungen. Der genaue Wortlaut aller Eignungsbeurteilungen kann ebenfalls unter www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de eingesehen werden.

2.3 Entwurfskonzept 2: „Produktauswahl und Systemaufbau zur Sicherstellung der erforderlichen Selbstheilung nach Wiedervernässung“

Das zweite Entwurfskonzept setzt alternativ auf das Potential einer dauerhaften Selbstheilung nach Wiedervernässung in einem geeigneten Systemaufbau. Es wurde in den früheren Zulassungsverfahren beim DIBt parallel zum ersten Entwurfskonzept als möglicher Verfahrensweg anerkannt (DIBT 1996). Mittlerweile stehen für einzelne Produkte Prognoseinstrumente zur Beurteilung der Dichtungswirkung entsprechender Systeme unter Berücksichtigung des austrocknungsbedingten, instationären Durchlässigkeitsverhaltens zur Verfügung (REUTER/MARKWARDT 2003).

Im Ergebnis derartiger Berechnungen ergeben sich Angaben zur mittleren langfristigen Sickerwasserneubildung bei Oberflächenabdichtungen mit Bentonitmatten, die lediglich die nach DepV erforderliche Mindestdicke der Rekultivierungsschicht von 1 m aufweisen – im Gegensatz zu der nach LAGA erforderlichen Mindestdicke von 1,5 m (Kap. 2.2). Je nach Standortbedingungen kann so der Nachweis geführt werden, dass sich in diesem Fall zwar

geringfügig erhöhte Sickerwasserraten ergeben, diese jedoch noch unterhalb des Betrages liegen, der sich durch Vergleichsberechnungen aus den Regelanforderungen der DepV ableiten lässt. Hierdurch können sich je nach Randbedingungen Einsparungen im mittleren fünfstelligen Bereich je Hektar Deponiefläche ergeben.

Allerdings setzt die optimale Nutzung des Selbstheilungsvermögens nach Wiedervernässung neben der Einhaltung der Produkthanforderungen nach EAG-GTD (2002) zwei weitere wichtige Planungsgrundlagen voraus:

- Zum einen muss die Überdeckung der Bentonitmatte mindestens eine Auflast von 20 kN/m² bewirken. Je nach Art und Lagerungsdichte der Deckschichten entspricht dies einer Mächtigkeit von 1 bis 1,3 m.
- Darüber hinaus ist im Bauablauf dafür Sorge zu tragen, dass die im Anschluss an die Verlegephase geplante Überschüttung kurzfristig durchgeführt wird. Die von vielen Herstellern vorgeschriebene 30 cm dicke Mindestüberschüttung ist in erster Linie als Schutz vor mechanischen Beschädigungen während der Verlegung zu verstehen (s. Kap.4). Eine optimale und dauerhafte Dichtungswirkung kann nur erreicht werden, wenn die gesamte Überschüttung (z. B. Drän- und Rekultivierungsschichten) abschnittsweise innerhalb weniger Tage nach Verlegung der Bentonitmatten aufgebracht wird, bevor schädliche Witterungseinflüsse (Trocken-Nass-Zyklen) zu einer anfänglichen Rissbildung und erhöhten Anfangsdurchlässigkeiten führen können (GDA E 2-36 2006).

Grundsätzlich ist der Einsatz solcher Prognoseberechnungen auf Basis instationärer Durchlässigkeitsbeiwerte bei allen Oberflächenabdichtungen erforderlich, bei denen Dichtungskomponenten eingesetzt werden, die mehr oder weniger austrocknungsempfindlich sind (z. B. alle tonmineralischen Dichtungen, Bentonitmatten, Polymer-Bentonit-Sand-Mischungen, Hafenschlick etc) und bei denen keine besonderen Vorkehrungen zur nachweislichen Vermeidung von Trockenrissen (hierzu s. BRÄCKER 2008) getroffen werden.

3. Herstellung der Abdichtungsschicht

Bentonitmatten sind industriell hergestellte Bauprodukte von gleichmäßiger Beschaffenheit, die als Rollenware verpackt zum Einbauort geliefert werden. Typische Rollenabmessungen sind ca. 3,5 bis 5 m Breite und 20 bis 40 m Länge. Die Rollengewichte liegen überwiegend bei ca. 1to, so dass zum Verlegen auf der Baustelle entsprechende Hebezeuge vorhanden sein müssen.

Wie alle Abdichtungselemente müssen auch Bentonitmatten auf der Baustelle so verarbeitet werden, dass sie die in den Eignungsprüfungen nachgewiesenen Leistungen mit ausreichender Sicherheit im eingebauten Zustand erbringen. In EAG-GTD (2002) sind ausführliche Hinweise für eine ordnungsgemäße Bauausführung enthalten. Im wesentlichen werden folgende Hinweise gegeben:

- **Transport und Kennzeichnung**
Alle Rollen müssen gekennzeichnet, die Verpackung darf nicht beschädigt sein. Die Lieferscheine sind zu prüfen. Als Verlade- und Transporthilfen eignen sich besonders Transversen.
- **Lagerung**
Die Lagerung auf der Baustelle erfolgt gestapelt auf ebenem, sauberem Untergrund ohne Wasserpfützen. Es sollten nicht mehr als 3 Rollen übereinander gelagert werden. Punktlagerungen sind zu vermeiden.
- **Verlegeplanum**
Das Verlegeplanum muss gemäß den Einbauanleitungen der Hersteller verdichtet, eben und frei von scharfkantigen Gegenständen sowie von Oberflächenwasser und Eis sein. Kleinere Unebenheiten bis 2 cm sind unbedenklich. Als Auflagermaterial sind alle Bodengruppen der DIN 18196 mit Ausnahme der enggestuften Kiese (GE), Steine etc. geeignet, sofern sie über eine ausreichende Tragfähigkeit im Hinblick auf das gesamte Abdichtungssystem verfügen.
- **Verlegung**
Die Verlegung kann unabhängig von der Temperatur bei jeder trockenen Witterung erfolgen. Die Verlegung muss faltenfrei erfolgen. Bereits verlegte Bahnen dürfen nicht befahren werden. Ein Begehen ist problemlos möglich. Bei unterschiedlichem Aufbau zwischen Deck- und Trägergeotextil dürfen Ober- und Unterseite nicht verwechselt werden.
- **Überlappungen**
Die Herstellung einer funktionsgerechten Überlappung ist produktabhängig. Die entsprechenden Hinweise der Verlege- und Einbauanleitungen sind zu beachten. Folgende Varianten zur Sicherstellung der Dichtigkeit im Überlappungsbereich sind gebräuchlich:
 - werksseitige Bentonitfüllung des unteren Deckgeotextils im Überlappungsbereich oder komplett, so dass vor Ort weiteren Tätigkeiten entfallen können
 - händisches Einbringen von Bentonitpulver oder -paste im Überlappungsbereich zwischen den Lagen
 - Verkleben des Überlappungsbereiches

- **Überschüttung**

Die Überschüttung der Bentonitmatte erfolgt abschnittsweise. Sie muss vor dem Quellen des Bentonits abgeschlossen sein. Vor dem Hintergrund aktueller Erfahrungen aus Testfeldern ergeben sich nach Ansicht der Verfasser folgende zusätzliche Hinweise: Aufgrund ihrer großen Saugspannungen bei Erstquellung können Bentonitmatten ihren maximalen Wassergehalt (vgl. Abb.4) allein im Kontakt mit erdfeuchten Böden innerhalb von wenigen Wochen erreichen (JAHANGIR 1994). Gequollene Bentonitmatten müssen deshalb frühzeitig gegen schädliche Wassergehaltsänderungen geschützt werden. Die in den Verlegeanleitungen der Hersteller angegebene Mindestüberdeckung von in der Regel 30 cm ist als Schutzmaßnahme gegen Witterungseinflüsse nicht geeignet. Sie unterstützt lediglich die Dichtungswirkung während der Erstquellung und schützt vor mechanischen Beschädigungen. Eine optimale Dichtwirkung wird erreicht, wenn zwischen dem Aufbringen der Mindestüberdeckung von 30 cm in der Verlegephase und dem Aufbringen der weiteren Deckschichten in einer Mächtigkeit von mindestens 1 m nicht mehr als zwei bis drei Wochen vergehen. Beim Einsatz von Raupen o.ä. im Bereich von Überlappungen ist während der Überschüttung darauf zu achten, dass es nicht zu Verdrückungen oder Verschiebungen kommt (eventuell separat durch Bagger überschütten).
- **Reparaturen**

Ist eine Reparatur erforderlich, kann ein Stück der Bentonitmatte auf die defekte Stelle gelegt werden, wobei die Ränder wie bei einer Überlappung zu behandeln sind.

Detaillierte Einbau- und Verlegeanleitungen liefern alle im IVG organisierten Hersteller. Darüber hinaus stehen die Fachberater der Firmen für Unterstützung vor Ort zur Verfügung.

4. Qualitätsmanagement

4.1 Qualitätsmanagement bei Herstellung

Das Qualitätsmanagement unterliegt zumindest bei den im Industrieverband Geokunststoffe (IVG) zusammengeschlossenen Geokunststoffherstellern in Deutschland sehr hohen Ansprüchen. Hinsichtlich der Herstellung existiert ein geschlossener Qualitätskreislauf vom Rohstoff bis zum Produkt gemäß DIN 18200 und DIN EN ISO 9001 mit z. B. werkseigener Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Dokumentation.

Seit 2001 gibt es eine allgemeine CE-Kennzeichnungspflicht für Geotextilien gemäß europäischer Bauproduktenrichtlinie. Seit Februar 2007 dürfen Bentonitmatten auf Deponien für feste Abfallstoffe nur noch eingebaut werden, wenn sie die strengen Anforderungen des 2+ erfüllen. Abb. 11 zeigt, welche Prüfungen von den Herstellern bzw. Fremdüberwachern in den unterschiedlichen Konformitätsbescheinigungsverfahren (1+ bis 4) zu erfüllen sind (grau hinterlegt).

		Elemente der Konformitätskontrolle	Systeme nach BPR Anhang III							
			2(i)		2(ii)-1		2(ii)-2		2(ii)-3	
			1+	1	2+	2	3	4		
Hersteller	1	Erstprüfung des Produkts								
	2	Prüfung von im Werk entnommenen Proben nach festgelegtem Prüfplan								
	3	Stichprobenprüfung („audit-testing“) von im Werk, auf dem offenen Markt oder auf der Baustelle entnommenen Proben								
	4	Prüfung von Proben aus einem zur Lieferung anstehenden oder gelieferten Los								
	5	Werkseigene Produktionskontrolle								
notifizierte Stelle	6	Erstprüfung des Produkts								
	7	Prüfung von im Werk entnommenen Proben nach festgelegtem Prüfplan								
	8	Stichprobenprüfung („audit-testing“) von im Werk, auf dem offenen Markt oder auf der Baustelle entnommenen Proben								
	9	Prüfung von Proben aus einem zur Lieferung anstehenden oder gelieferten Los								
	10	Erstinspektion des Werkes und der werkseigenen Produktionskontrolle								
	11	Laufende Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle								

Abb.11: Elemente der Konformitätskontrolle - System 2+ gilt für die Herstellung von Bentonitmatten (DIBT 2005)

Eine ausführliche Übersicht zu Prüfverfahren, Prüfumfang etc. enthält EAG-GTD (2002).

4.2 Qualitätsmanagement bei der Verlegung

Bentonitmatten werden unter den üblichen, wechselhaften Baustellenbedingungen des Erdbaus verarbeitet. Das Qualitätsmanagement auf der Baustelle unterliegt in der Regel nicht oder nur in geringem Umfang der Einflussnahme des Lieferanten. Die vertragsgerechte Ausführung der Verlegearbeiten wird üblicherweise durch die örtliche Bauüberwachung kontrolliert. Die Grundleistungen der örtlichen Bauüberwachung gemäß Honorarordnung für Archi-

tekten und Ingenieure (HOAI) umfassen auch die Überwachung der Übereinstimmung der Ausführung mit den Ausführungsplänen und den allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Darüber hinaus wird auch bei der Verlegung von Bentonitmatten eine Eigenüberwachung der bauausführenden Firma und eine vom Bauherrn veranlasste Fremdüberwachung erforderlich. EAG-GTD (2002) gibt Anhaltswerte für den Prüfumfang der Eigen- und der Fremdüberwachung.

Die Ergebnisse aus Eigen- und Fremdüberwachung sind nachverfolgbar zu dokumentieren. Dazu gehört auch das Anfertigen von Bestandsverlegplänen.

5. Literaturverzeichnis

In der Reihenfolge ihrer Nennung im schriftlichen Beitrag wurden folgende Quellen verwendet:

EGLOFFSTEIN, T. (2006): „Energiebilanz zur Verwendung mineralischer und polymerer Werkstoffe bei der Herstellung von Deponieabdichtungen“; 22. Fachtagung „Die sichere Deponie“, AK GWS / Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg

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

EGLOFFSTEIN, T. (2000): „Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien“, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3

REUTER, E./EHRENBERG, H. (1998): „Untersuchungen zum Schrumpf- und Quellverhalten vernadelter geosynthetischer Tondichtungsbahnen“, Braunschweiger Deponieseminar 1998, in: Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 56

HEERTEN, G./REUTER, E. (2006): Erfahrungen mit Geokunststoff-Alternativen und mineralischen Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 83

- MELCHIOR, S./STEINERT, B. (2006) : „Feld- und Laboruntersuchungen zum Langzeitverhalten von tonhaltigen Oberflächenabdichtungen“; Tagungsband Deponieworkshop Zittau-Liberec, Hochschule (FH) Zittau/Görlitz, Heft 91
- HEERTEN, G./KOERNER, R.M. (2008). "Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten", 24. Fachtagung „Die sichere Deponie“, AK GWS / Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg
- NAUE (2006): Allgemeine Produktinformationen zur Produktreihe Bentofix® der NAUE GmbH & Co. KG, Espelkamp
- HUESKER (2006): Allgemeine Produktinformationen zur Produktreihe NaBento® der HUESKER Synthetik GmbH, Gescher
- REUTER, E. (1986) : „Die Beeinflussung der Quelleigenschaften handelsüblicher Bentonite durch chemische Lösungen“; WASSER + BODEN, Heft 11, 38. Jahrgang, S. 563-568
- REUTER, E. (1997) : „Einsatz von Bentoniten und Bentonitmatten im Deponiebau“; Wasser & Boden; Heft 11, 49. Jahrgang, S. 62-64
- SIMONS, H./MESECK, H. (1981) : „Abschlussbericht über die Untersuchung der bautechnischen Eigenschaften des VOLCLAY-Abdichtungssystems“; unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Hücker & Rasbach GmbH, Flörsheim/Main, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig
- DWA (2005): „Dichtungssysteme in Deichen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), DWA-Arbeitsgruppe WW-7.3, Vertrieb: DWA Hennef
- GDA E 2-36 (2007) : „Oberflächenabdichtungssysteme mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen“; Empfehlung des AK 6.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Bautechnik 84, S. 607-611
- ANS (2007): „Stellungnahme des Arbeitskreises für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V. (ANS) zum Entwurf einer „integrierten Deponieverordnung“, in: Müll und Abfall, Heft 8, S. 402-405

FGSV (2008): „Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“ (Entwurf Dezember 2008), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, AK 5.5.2 (Veröffentlichung in Vorbereitung)

BMU (2007): „Entwurf einer integrierten Deponieverordnung“, Arbeitsentwurf in der Fassung vom 05.02.2007 mit Kommentaren

HEERTEN, G./REUTER, E. (2002) : „Die Bedeutung der DIBt-Zulassungen für die Qualitätsanforderungen an Bentonitmatten heute und morgen“; 18. Fachtagung „Die sichere Deponie“, AK GWS / Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg

BLÜMEL, W./MÜLLER-KIRCHENBAUER, A./EHRENBERG, H./VON MAUBEUGE, K. (2002) : „Langzeituntersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten in Lysimetern“, Karlsruher Deponieseminar 2002, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 125, Erich Schmidt Verlag, Berlin

BLÜMEL,W./MÜLLER-KIRCHENBAUER,A. (2008): Aufbereitung und Dokumentation der Messwerte der NAUE-Lysimeteranlage, Leibniz-Universität Hannover, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Status-Bericht im Auftrag der Fa. NAUE vom 07.11.2008/11/2008 (unveröffentlicht)

WOLSFELD, N. (2005) : „Bodenphysikalische Eignung mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme für Monodeponien der Stahlindustrie“; Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Heft 43

IWA (2008): „Aufbereitung und Bewertung der Messdaten aus dem Testfeld „Bentofix® BZ 6000“ der Dillinger Hüttenwerke“, Gutachterliche Stellungnahme der IWA Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Abfallwirtschaft Minden im Auftrag der NAUE GmbH & Co.KG vom 25.01.2008 (unveröffentlicht)

DIBT (1996): Jahresbericht 1996; Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Eigenverlag

BRÄCKER, W. (2009): „Ergebnisse der LAGA Ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen“; 6. Geokunststoff-Kolloquium der NAUE Unternehmensgruppe Espelkamp-Fiestel, 22./23.01.2009, Eigenverlag

- REUTER, E./MARKWARDT, N. (2003): „Abgleich von Modell- und Messwerten für Oberflächenabdichtungen mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen“, Beiträge zum Karlsruher Deponieseminar 2002, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- BRÄCKER, W. (2008): „Schutz mineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien“, Abfallwirtschaftsfakten 16, www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de
- LAGA (2005): “Grundsätze für die Eignungsprüfung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien - Bentonitmattengrundsätze”; LAGA Ad-hoc AG „Deponietechnische Vollzugsfragen, Entwurf vom 5.10.2005
- WITT, K.J./ ZEH, R. M./FABIAN, F. (2004): „Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen“; Müll und Abfall, Heft 11/2004, S. 540-546
- LAGA (2004 a) : „Allgemeine Grundsätze für die Eignungsprüfung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme“; LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“, Stand: 10.09.2004, geändert durch ATA-Beschluss am 31.01.2005
- REUTER, E. (2006): „Überlegungen zum Eignungsnachweis von Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen für Altdeponien“; Tagungsband Deponieworkshop Zittau-Liberec, Hochschule (FH) Zittau/Görlitz, Heft 91
- ZANZINGER, H. (2006): „Bewertung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen für Oberflächenabdichtungssystemen im Deponiebau“; Seminar Lebensdauer von Geokunststoffen, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg
- LAGA (2004 b): „Fachliche Eckpunkte für die Beurteilung von Ausnahmeanträgen nach §14 Absatz 6 Deponieverordnung“; Beratungsergebnisse der LAGA Ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen, 4.02.2004
- JAHANGIR, M. A. (1994): „Containment of Petroleum Hydrocarbons by Geosynthetic Clay Liners Using Natural Soil-Moisture“; Thesis, University of Texas at Austin, August 1994
- DIBT (2005): „Die Aufgaben des DIBt im Rahmen der europäischen Harmonisierung“; DIBt Mitteilungen, 36. Jahrgang, Nr.5

