

Melchior, S. (2010):

**Langzeitverhalten einer Dränmatte
in einer Oberflächenabdichtung –
Ein Fallbeispiel**

In: HTWK – Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt und Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.). 6. Leipziger Deponiefachtagung. Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. 02./03. März 2010, 21 S.

(Layout gegenüber Druckfassung korrigiert, Inhalt identisch)



melchior + wittpohl
Ingenieurgesellschaft

www.mplusw.de

Langzeitverhalten einer Dränmatte in einer Deponieoberflächenabdichtung - ein Fallbeispiel

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft

Zusammenfassung

Das Fallbeispiel berichtet über ein Oberflächenabdichtungssystem, das in den 90er Jahren mit einem Schichtaufbau aus Rekultivierungsschicht, Dränmatte und Kunststoffdichtungsbahn hergestellt wurde. In den ersten Jahren nach Fertigstellung funktionierte das System planmäßig. Die Nachsorge ergab keine Auffälligkeiten. Nach gut fünf Jahren wurde in der Rekultivierungsschicht und in Schächten ein zunehmender Wassereinstau beobachtet. Die gemessenen Wasserstände gefährden die Standsicherheit einiger Böschungsabschnitte der Deponie. Es wurden umfangreiche Aufgrabungen und Laboruntersuchungen zur Schadenserkundung durchgeführt. Seit 2005 werden die Wasserstände im Oberflächenabdichtungssystem gemessen und es wurden unterschiedliche bauliche Maßnahmen zur Schadensbegrenzung getroffen. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der Aufgrabungen, Laboruntersuchungen und Wasserstandsmessungen vorgestellt und interpretiert. Sie zeigen, wie wichtig eine sorgfältige standortbezogene Bemessung, der Einsatz umfassend, auch in ihrem Langzeitverhalten eignungsgeprüfter Produkte, eine lückenlose Qualitätsüberwachung der Verlegung sowie eine sorgfältige Wahl von Material und Einbautechnik der Rekultivierungsschicht oberhalb einer Dränmatte ist.

1. Einführung

Die Entwässerungsschicht ist eine Komponente von Oberflächenabdichtungssystemen. Sie dient der Fassung und kontrollierten Ableitung des in der Rekultivierungsschicht versickernden Niederschlagswassers. Das Wasser soll in der Regel möglichst zügig von der jeweiligen, unter der Entwässerungsschicht angeordneten Abdichtungskomponente abgeführt werden, damit unerkannte Fehlstellen in der Abdichtung möglichst nur kurz und mit wenig Wasser beaufschlagt werden (mit Ausnahme bei Anordnung der Entwässerungsschicht über schrumpffempfindlichen feinkornmineralischen Abdichtungen, die möglichst feucht gehalten werden sollen). Außerdem soll in der Regel ein Wassereinstau und ein böschungsparalleles Durchströmen der Rekultivierungsschicht verhindert werden, um die Standsicherheit des Oberflächenabdichtungssystems zu erhalten und der Bildung von unkontrollierten Hangquellen vorzubeugen. Diese Aufgaben soll die Entwässerungsschicht langfristig erfüllen, weshalb sie unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen mit ausreichender Sicherheit vor möglicherweise schädlichen Einwirkungen wie Durchwurzelung oder Verockerung (Bildung von Inkrustationen) zu bemessen ist (siehe hierzu beispielsweise [1] und [2]).

Die abfallrechtlichen Regelwerke (TA Abfall und folgende) gehen traditionell von der Herstellung mineralischer Entwässerungsschichten aus Kies aus. In der aktuellen Deponieverordnung - DepV [3] werden ebenfalls die Anforderungen an eine mineralische Entwässerungsschicht beschrieben (Mächtigkeit $d \geq 0,30$ m, k_f -Wert $k \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s, Gefälle > 5 %). In der Fußnote zu Tabelle 2 im Anhang 1 wird ergänzend mitgeteilt: *„Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers Abweichungen von Mindestdicke, Durchlässigkeitsbeiwert und Gefälle der Entwässerungsschicht zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die hydrau-*

liche Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht dauerhaft gewährleistet sind.“

Seit den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts werden auch Entwässerungselemente aus Geokunststoffen auf dem Markt angeboten, im nachfolgenden als „Dränmatten“ bezeichnet. Die Produkte der verschiedenen Hersteller unterscheiden sich hinsichtlich konstruktivem Aufbau, Art und Rohstoffe der Einzelkomponenten sowie hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und hydraulischen Leistungsdaten. Sie werden als Rollenware geliefert, weisen eine im Vergleich zu mineralischen Entwässerungsschichten geringe Dicke auf und können sehr schnell verlegt werden. Sie bieten daher erhebliche Kostenvorteile. Außerdem hilft der Einsatz von Dränmatten, Kiesressourcen zu schonen und den Transportaufwand zu verringern. Dränmatten müssen jedoch auch die von der Entwässerungsschicht geforderte hydraulische Leistungsfähigkeit mit ausreichender Beständigkeit erfüllen.

Dränmatten sind im Vergleich zu Komponenten wie z.B. die Kunststoffdichtungsbahn noch immer relativ junge Produktentwicklungen. Sie werden in der DepV nicht als Regelbauweise beschrieben, der Begriff „Kunststoff-Dränelement“ fällt dort lediglich in der Regelung der Zuständigkeit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) für die Zulassung von Komponenten aus Geokunststoffen. Die BAM hat 2003 ihre Grundsätze zur Eignungsprüfung von Dränmatten veröffentlicht [4] und seither Eignungsgutachten zu einzelnen Produkten erstellt. Diese Eignungsgutachten haben den Stand der Technik von Dränmatten insbesondere im Hinblick auf die Wahl der Werkstoffe, deren mechanisches Langzeitverhalten und die Bemessung erheblich voran gebracht. Seither werden vermutlich in Deutschland überwiegend diese eignungsgeprüften Produkte eingesetzt. Vor den Eignungsgutachten der BAM kamen in Deutschland (und kommen im Ausland noch immer) auch andere Produkte zum Einsatz.

Es liegen bisher nur wenige Erfahrungen oder veröffentlichte Berichte zum Langzeitverhalten von ausgeführten Entwässerungssystemen mit Dränmatten vor. Im vorliegenden Beitrag wird über ein Fallbeispiel berichtet, bei dem der Einsatz einer Dränmatte, die bis vor einigen Jahren in Deutschland marktüblich war, unter den objektspezifischen Randbedingungen nicht erfolgreich war und zu erheblichen Problemen geführt hat. Der Beitrag soll nicht die Anwendung von Dränmatten diskreditieren. Die Erkenntnisse, die in diesem Fallbeispiel gewonnen wurden, können nicht ohne detaillierte Prüfung auf andere Produkte oder Anwendungsbeispiele übertragen werden. Sie werden dargestellt, um mögliche Fehler und Schwächen beim Einsatz von Dränmatten zu vermeiden und auf das erforderliche Zusammenwirken von Rekultivierungsschicht und Entwässerungsschicht / Dränmatte hinzuweisen.

2. Untersuchungsobjekt und Fragestellung

Die in Niedersachsen gelegene Deponie wurde bis 1986 auf einer Fläche von rund 32 ha mit ca. 3,4 Mio. m³ Siedlungsabfällen verfüllt. Von 1995 bis 1997 wurde die Deponie an ihrer Oberfläche abgedichtet. Das Oberflächenabdichtungssystem besteht aus den Komponenten Profilierungsschicht, Gasflächendränge (mit aktiver Entgasung), Schutzschicht, Bentonitmatte, Kunststoffdichtungsbahn (KDB), Dränmatte, Unterboden, Oberboden und Bewuchs. In den Jahren 2001 bis 2002 wurden auf der Deponie drei Windkraftanlagen und 2005 eine Photovoltaikanlage gebaut und in Betrieb genommen.

Die abgedichtete Deponie weist im höchsten Punkt eine Höhe von rund 64 mNN auf. Die umschließende Ringstraße der Deponie liegt auf Höhen zwischen 37 mNN und 55 mNN. Die Böschungen der Deponie sind unterschiedlich geneigt. Es überwiegen Flächen mit flachen

Böschungsneigungen von ca. 1 : 15 bis 1 : 13,3 (3,8° bis 4,3°). Diese bis zu 200 m langen Böschungen sowie eine kleinere Teilböschung mit einem Gefälle von 1 : 10 (5,7°) wurden mit einer glatten KDB abgedichtet. Die bis zu 150 m lange Nordostböschung mit einem Gefälle von 1 : 7,5 (7,6°), einige zwischen 20 m und 50 m lange Böschungen mit einem Gefälle von 1 : 5 (11,3°) sowie eine ca. 0,3 ha große, außerhalb der Ringstraße gelegene und 1 : 2,5 (21°) geneigte Sonderfläche erhielten eine raue KDB. Die Kunststoffdichtungsbahnen liegen auf dem Deckvlies einer vernadelten Bentonitmatte auf und haben an ihrer Oberseite Kontakt zum Stützvlies an der Unterseite der Dränmatte.

Als Dränmatte kam ein Verbundprodukt mit einem Wirrgelegekern aus PP-Monofilamenten als Dränkörper (Flächengewicht $M \geq 600 \text{ g/m}^2$, Mindestdicke $d \geq 18 \text{ mm}$) sowie einem Filtervlies auf der Oberseite und einem Stützvlies an der Unterseite zum Einsatz (Filtervlies $M \geq 350 \text{ g/m}^2$, $d \geq 4 \text{ mm}$, Stützvlies $M \geq 250 \text{ g/m}^2$, $d \geq 2 \text{ mm}$; alle Angaben als „Richtwerte“ aus dem Datenblatt des Herstellers). Vliese und Dränkörper sind thermisch verbunden (durch punktuell Ultraschallschweißen). Die Unterlagen des Fremdprüfers weisen die Rollenlängen mit 25 m, die Breite der Matten mit 2 m aus, wobei die 2 m breiten Rollen werksseitig zu 4 m und 6 m breiten Matten vorkonfektioniert wurden. Dabei ragten Filter- und Stützvlies seitlich über den Dränkörper hinaus und wurden durch Warmgas thermisch geheftet. Die Verlegung auf der Baustelle erfolgte nach Verlegeanleitung des Herstellers und wurde fremdgeprüft.

Die Rekultivierungsschicht wurde gemäß Vorgabe mit einer Mindestmächtigkeit von 1,0 m aus örtlich verfügbarem Boden hergestellt. Sie besteht aus einem humusarmen Unterboden aus lehmigem Sand und einem zwischen 0,1 m und 0,3 m mächtigen, stark humosen Oberboden. Die flacheren Böschungen sind mit einem Gras-/Krautbewuchs bewachsen, der regelmäßig gemäht wird. Die steileren Böschungen tragen überwiegend Gehölzbestände.

Die Deponie wird seit Abschluss der Oberflächenabdichtung im Rahmen der Nachsorge überwacht. Dabei wurde festgestellt, dass in rund einem Viertel der Gasschächte ein Wassereinstau von mehreren Dezimetern zu beobachten ist, der insbesondere im Winterhalbjahr bei einigen Schächten bis zum Überlaufen führt. Im Sommer 2004 und im Winter 2004/2005 wurden daher mehrere Aufgrabungen samt Laboruntersuchungen durchgeführt sowie seither regelmäßig die Wasserstände in der Rekultivierungsschicht der Deponieoberflächenabdichtung mit Beobachtungspegeln untersucht, um den Ursachen, der Entwicklung und den Folgen dieses Wassereinstaus auf die Spur zu kommen. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird nachfolgend berichtet.

3. Durchgeführte Untersuchungen

Die melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft erhielt 2004 den Auftrag, die Ursachen und Folgen des in den Gasschächten im Winterhalbjahr beobachteten Wassereinstaus zu untersuchen. Folgende Untersuchungen wurden seither durchgeführt und in zahlreichen Berichten dokumentiert:

Aufgrabungen

Im Mai und im Dezember 2004 wurden insgesamt sieben Aufgrabungen im Oberflächenabdichtungssystem durchgeführt. Ein Teil der Schürfgruben wurden in Bereichen geöffnet, in denen aufgrund der Beobachtungen in benachbarten Schächten ein zeitweiser Wassereinstau vermutet wurde. Dabei wurde versucht, insbesondere die steileren Böschungen sowie die Aufstandsfläche der 2005 errichteten Photovoltaikanlage mit zumindest einer Schürfgrube zu untersuchen, soweit der Bewuchs dies ohne allzu großen Flurschaden erlaubte. Ande-

re Schürfe dienen der Erkundung der Entwässerung der Böschungen an deren Fußpunkt (Übergang von der Böschung zur randlichen Wasserfassung im Bereich der Ringstraße).

Für die Anlage der Schürfe wurde der Grasbewuchs zunächst als Soden gestochen und seitlich gelagert. Anschließend wurde der Oberboden und der obere Teil des Unterbodens mit dem Bagger ausgehoben und getrennt gelagert. Im letzten Schritt wurde der restliche Unterboden beprobt und bis zur Oberkante der Dränmatte vorsichtig in Handarbeit entfernt, so dass die Dränmatte auf einer Fläche von rund 2 m x 4 m begutachtet und beprobt werden konnte. Anschließend wurde in den Gruben eine neue Dränmatte verlegt und der Bodenaufbau wieder schichtgetreu hergestellt.

In den Schürfgruben wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bodenansprache der Rekultivierungsschicht nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung hinsichtlich Bodenart, Bodenfarbe, Bodengefüge, Humusgehalt, Carbonatgehalt, effektive Lagerungsdichte, Durchwurzelung und hydromorphe Merkmale
- Bestimmung der ungesättigten Wasserdurchlässigkeit der Rekultivierungsschicht im Feldversuch
- Entnahme von gestörten und ungestörten Proben aus der Rekultivierungsschicht (Unterboden)
- Visuelle Untersuchung der Dränmatte hinsichtlich Verockerung, Durchwurzelung, Dicke, Ausführung der Verlegung in den freigelegten Längs- und Querstößen
- Näherungsweise Bestimmung der Dicke der Dränmatte in situ unter Auflast durch seitliches Einpressen von Gips, Probenahme und Dickenmessung der vergipsten Matte nach Aushärtung
- Entnahme von ungestörten Proben aus der Dränmatte



Bild 1 Rekultivierungsschicht und Dränmatte in Schurf 5 (links) und 4 (rechts)

Laboranalysen

Die Proben aus der Rekultivierungsschicht wurden hinsichtlich der Parameter Korngrößenverteilung, Proctordichte, Trockendichte und Verdichtungsgrad, Wassergehalt, Porengrößenverteilung (Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität), gesättigte Wasserdurchlässigkeit, Glühverlust, Kalkgehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit sowie Gesamtgehalte und lösliche Anteile an Eisen nach den einschlägigen DIN-Normen untersucht.

An den Proben aus der Dränmatte wurden zunächst durch den bei der Herstellung der Oberflächenabdichtung beauftragten Fremdprüfer folgende kunststofftechnischen Parameter bestimmt: Schichtdicke und Flächenmasse sowie Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Filter- und Stützvlies, Schichtdicke und Flächenmasse des Dränkörpers.

An weiteren Proben der Dränmatte mit einer Größe von 30 cm x 30 cm wurde im Labor der melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft unter einer Auflast von 30,2 kN/m² und bei einem hydraulischen Gradienten von 0,1 in Anlehnung an DIN EN ISO 12958, 1999 das Wasserableitvermögen in der Ebene bestimmt (Bettung oben weich, unten hart).

Die vertikale Durchströmung der Dränmatten wurde an Proben mit 10 cm Durchmesser in Anlehnung an DIN EN ISO 11058, 1999 bestimmt (ohne Auflast). Dabei wurden Filtervlies und Dränkörper ohne Stützvlies mit geringen hydraulischen Gradienten durchströmt, um ein Maß für den möglichen Zustrom von Wasser aus der Rekultivierungsschicht in den Dränkörper zu erhalten.

Wasserstandsmessungen

Im Januar 2005 wurden 20 Beobachtungspegel in der Rekultivierungsschicht eingerichtet. 2007 und 2008 kamen 14 weitere Messstellen hinzu. Ein Teil der Pegel wurde am Böschungsfuß entlang der Ringstraße um die Deponie eingebaut, andere Pegel wurden auf ausgewählten Böschungen in unterschiedlichen Positionen entlang der Böschungfalllinie eingebaut („Transekte“).

Die Pegelrohre sind unten offen und von ihrer Unterkante aufwärts über mindestens 30 cm quergeschlitzt, so dass Wasser von unten und seitlich in die Pegelrohre eindringen kann. 19 der 34 Beobachtungspegel enden rund 20 cm über der Oberkante der Dränmatte. Die restlichen 15 Pegel wurden als Vergleichspegel bis auf die Oberkante der Dränmatte geführt. Auf diese Weise kann an ausgewählten Böschungspositionen, an denen beide Pegeltypen nebeneinander angeordnet sind, der Wasserdruck im Unterboden getrennt vom Wasserdruck in der Dränmatte bestimmt werden. Alle Pegel sind knapp unter der Oberkante des Unterbodens mit Flanschen ausgestattet, die verhindern, dass Wasser bevorzugt entlang der Außenwand des Pegelrohres versickern kann.

Zehn Pegel wurden 2005 mit automatischen Pegelsonden ausgestattet, die im Abstand von fünf Minuten den Wasserstand im Pegel messen und speichern. Die anderen zehn Pegel wurden in der Regel wöchentlich manuell mit dem Lichtlot gemessen. Die Pegel werden seit ihrer Herstellung in jedem Winterhalbjahr über einige Monate betrieben, wobei der Besatz mit automatischen Sonden örtlich wechselt und einige Messstellen seit 2007 nicht mehr betrieben werden. Einzelne Pegel werden mittlerweile ganzjährig automatisch gemessen.

Stand sicherheitsberechnungen

Die im Verlauf der genannten Beobachtungen und Messungen gewonnenen Ergebnisse wurden genutzt, um die bei der Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems durchgeführten Stand sicherheitsberechnungen zu prüfen und neue Stand sicherheitsberechnungen

durchzuführen. Hierfür wurden auch zusätzliche Verbundscherversuche zwischen KDB und Dränmatte durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Aufbau und Eigenschaften der Rekultivierungsschicht

Im Unter- und Oberboden der Rekultivierungsschicht wurden sandige Böden aus der näheren Umgebung der Deponie eingebaut. Der Einbau erfolgte nach Auskunft des damaligen Bauleiters mit Raupen, wobei darauf geachtet wurde, dass die Dränmatte nicht verschoben wurde und die Raupe bei der Verteilung des Materials auf einer ausreichend dicken Bodenschicht fuhr. Die Ergebnisse der Aufgrabungen und Laborversuche zur Rekultivierungsschicht können wie folgt zusammen gefasst werden:

- Die Mächtigkeit der Bodenüberdeckung über der Dränmatte reichte in den insgesamt sieben Schürfen von 1,0 m bis 2,0 m. Im Mittel betrug sie rund 1,4 m, woraus sich für die Dränmatte eine Auflast von rund 30 kN/m² ergibt.
- Der Oberboden ist stark humos und weist eine lockere Lagerung auf. Seine Mächtigkeit schwankte in den auf den Böschungen gelegenen fünf Schürfen zwischen 0,1 m und 0,3 m. Aufgrund seiner lockeren Lagerung ist der Oberboden deutlich wasserdurchlässiger als der darunter liegende Unterboden. Insbesondere am Böschungsfuß der Ost- und der Nordost-Böschung ist der Oberboden der Abdeckung nach ergiebigen Niederschlägen wassergesättigt und es bilden sich bereichsweise Pfützen.
- Der Unterboden besteht aus lehmigem Sand, der Tongehalte zwischen 6 und 10 % sowie Schluffgehalte von 9 bis 17 % aufweist (im Rahmen der üblichen Spannweite der Bodenart von Rekultivierungsschichten ist der Unterboden als „leichter“ sandreicher Boden mit geringer Bindigkeit einzustufen). Der Boden ist schwach bis sehr schwach humos, carbonathaltig, verdichtungsfähig und wurde beim Einbau auf 92 bis 95 % D_{Pr} verdichtet. Die Luftkapazität des Unterbodens wurde in den Schürfen 1 und 2 untersucht und ist mit rund 7 Vol.-% ausreichend, der Vorrat an pflanzenverfügbarem Bodenwasser (nutzbare Feldkapazität) mit rund 8,5 mm/dm niedrig. Die Gesamtporenvolumina liegen bei rund 25 bis 30 Vol.-% und sind für einen Rekultivierungsboden somit sehr gering.
- Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens schwankt räumlich stark. Im Labor wurden Werte zwischen $3 \cdot 10^{-8}$ m/s und $5 \cdot 10^{-6}$ m/s gemessen. Vier von fünf Messwerten der gesättigten Wasserdurchlässigkeit liegen unter $2 \cdot 10^{-7}$ m/s, das harmonische Mittel aller Einzelwerte beträgt $7 \cdot 10^{-8}$ m/s. Natürliche Böden mit einer vergleichbaren Bodenart und Trockendichte weisen gemäß bodenkundlicher Kartieranleitung im Mittel eine deutlich höhere gesättigte Wasserdurchlässigkeit von rund $3 \cdot 10^{-6}$ m/s auf. Diese, gegenüber reifen, gut strukturierten natürlichen Böden reduzierte Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens ist typisch für junge, mit Raupen eingebaute Rekultivierungsböden.
- Der Unterboden zeigt in fast allen Schürfen Rostflecken und z. T. bis ca. 2 cm große, verhärtete Eisenkonkretionen, die aufgrund ihrer Verteilung im Bodenprofil vermutlich bereits mit dem Material angeliefert und nicht erst vor Ort gebildet wurden. Die Gesamtgehalte und die löslichen Anteile an Eisen und Mangan sind im Unterboden sehr hoch. Der Anteil an mobilem, leicht löslichem Eisen beträgt maximal 1,7 g/kg. Der Anteil an weniger mobilem, pedogen kristallisiertem Eisen beträgt 3,4 g/kg. Dieser hohe

Anteil an mobilisierbarem Eisen (und Mangan) verursachte im Bereich von Schurf 1 eine großflächige Verockerung im Filtervlies der Dränmatte. Die Mobilisierung von Eisen und Mangan erfolgt im Unterboden durch Reduktion von der dreiwertigen (Eisen) und vierwertigen Form (Mangan) in die mobile zweiwertige Form infolge von zeitweisem Wassereinstau. Andere Ursachen für die Mobilisierung von Eisen und Mangan (Versauerung, Bildung organischer Komplexe) sind angesichts des alkalischen pH-Wert und des geringen Anteil an organischer Substanz im Unterboden vernachlässigbar. Bereichsweise zeigt der Unterboden in den unteren Millimetern eine auffällige Graufärbung, die ebenfalls ein Indiz für ein reduzierendes anaerobes Milieu infolge von Staunässe ist. Nach Sauerstoffzutritt wird Eisen und Mangan wieder oxidiert und durch rot bzw. braunschwarz gefärbte Flecken oder Verhärtungen (Konkretionen) im Boden sichtbar.

- Der Oberboden war in allen Schürfen stark bis sehr stark durchwurzelt (11 bis 50 Wurzeln /dm²). Im Unterboden war die Durchwurzelungsintensität dagegen sehr schwach bis schwach (1 bis 5 Wurzeln /dm³). In einigen Schürfen reichten die Wurzeln bis zur Dränmatte, in anderen Schürfen dagegen nur bis ca. 0,5 m Tiefe.

4.2 Dränmatte

Die Dränmatte wurde in allen sieben Schürfen visuell begutachtet und im Labor untersucht. Die Ergebnisse der kunststofftechnischen Laborversuche lassen nur geringe Rückschlüsse auf Veränderungen der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Dränmatte zu, weshalb auf ihre Darstellung hier verzichtet wird. Auffälliger sind die Befunde der visuellen Prüfungen im Feld und der Laboruntersuchung des Wasserleitvermögens.

Verockerungen in Filter- und Stützvlies

Im Schurf S1 wurden großflächig schwarz-braune und rostrote Verockerungsfarben im Filtervlies und im Schutzvlies der Dränmatte festgestellt, die auf die Inkrustation von Mangan- bzw. Eisenverbindungen zurückzuführen sind (Bild 2). Diese in natürlichen Böden als „hydro-morph“ bezeichneten Merkmale sind typisch für wechselfeuchte Standortbedingungen. Bei anaeroben Verhältnissen (Staunässe) werden Eisen und Mangan in der Rekultivierungsschicht mobilisiert. Bei Austrocknung und Sauerstoffzufuhr fallen sie als schwerlösliche Oxide und Hydroxide wieder aus.

Die Inkrustationen im Filtervlies der Dränmatte von Schurf 1 reduzieren den für die Wasserbewegung zur Verfügung stehenden Porenraum. Somit kann eine flächenhafte Verockerung auch die Absickerung von Wasser aus dem Rekultivierungsboden in die Dränmatte behindern. Die vertikale Wasserdurchlässigkeit des Filtervlieses (gemessen als Permittivität) beträgt bei der Dränmatte aus Schurf 1 nur 9 % des Wertes der vom Hersteller der Dränmatte im objektspezifischen Datenblatt der Dränmatte angegeben wurde und liegt ebenfalls erheblich unter den Messwerten, die an den Dränmattenproben aus den anderen Schürfen bestimmt wurden.

In den anderen Schürfen wurde keine Verockerung der Dränmattenvliese festgestellt. Die vertikale Wasserdurchlässigkeit des Filtervlieses der Dränmatte ist allerdings auch in diesen Schürfen geringer als sie seinerzeit durch den Hersteller der Dränmatte im Datenblatt angegeben und im Zuge der Bemessung angesetzt wurde. Sie beträgt zwischen 18 und 53 % des Ausgangswertes für die fabrikneue Matte.

Die Gesamtschau der Befunde zeigt allerdings, dass die in Schurf 1 festgestellte Verockerung des Filtervlieses für den beobachteten Wassereinstau in der Rekultivierungsschicht nicht verantwortlich sein kann, denn der Wassereinstau tritt auch in Bereichen auf, in denen

keine Verockerung des Vlieses aufgetreten war. Außerdem ist selbst die vertikale Wasserdurchlässigkeit des verockerten Vlieses von Schurf 1 noch um mehrere Zehnerpotenzen höher als die Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens (unter der Annahme einer Dicke des Filtervlieses von 1 mm errechnet sich aus der gemessenen Permittivität ψ ein vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert $k_v = 3 \cdot 10^{-4}$ m/s). Dennoch ist eine Verockerung von mineralischen Entwässerungsschichten und Dränmatten langfristig unerwünscht und stellt ein Risiko dar.



Bild 2 Verockerung der Dränmatte (Filtervlies im Schurf 1)

Durchwurzelung der Dränmatte

In den meisten Schürfen haben die Pflanzenwurzeln die Dränmatten erreicht und diese bis an die Unterseite des Stützvlieses durchwurzelt, bereichsweise mit großer Dichte. Für die hydraulische Leistungsfähigkeit der Dränmatten ist diese Einwirkung bisher allerdings noch nicht kritisch.



Bild 3 Wurzelgeflecht an der Unterseite der Dränmatte in Schurf 4

Verlegefehler

Bild 4 (oben) zeigt wie die Überlappungen der Dränmatte beim Bau des Oberflächenabdichtungssystems planmäßig ausgeführt werden sollten (der untere Teil von Bild 4 zeigt im Ver-

gleich dazu die aktuellen Vorgaben für ähnlich konstruierte Matten nach BAM-Gutachten). Bei den Aufgrabungen der sieben Schürfe wurden insgesamt zehn Überlappungen inspiziert, deren Aufbau in Bild 5 dargestellt ist (2 Überlappungen sind nicht dargestellt, da sie mit anderen Überlappungen identisch sind). Fünf dieser Überlappungen lagen in den Schürfen 1 und 2 (Mai 2004). Ihre Ausführung entsprach nicht den Vorgaben der beim Bau geltenden Verlegeanleitung und war zumindest in drei Fällen mit erheblichen, die Funktion beeinträchtigenden Mängeln behaftet. So ist an einem Querstoß beispielsweise Feinboden aus dem Unterboden in den Dränkörper der Matten und z. T. sogar bis auf die Oberfläche der KDB eingespült worden. Dieser Feinboden kann die Dränmatte verstopfen und für einen Schmierfilm zwischen KDB und Stützvlies sorgen. Bei Längsüberlappungen lagen die Dränkörper der beiden Matten z. T. nicht wie gefordert lückenlos aneinander. Auch bei den Aufgrabungen der Schürfe 3 bis 7 wurden fünf Überlappungen der Dränmatte angetroffen. Nur eine dieser Überlappungen entsprach den Vorgaben der Verlegeanleitung. Alle anderen Überlappungen zeigten die oben beschriebenen Mängel oder verliefen schräg zum Böschungsgefälle und waren dabei so ausgeführt, dass Wasser unter den seitlich überlappenden Filtervliesüberstand ohne Passage des Vlieses in den Dränkörper gelangen und Feinboden in diesen eintragen konnte. Somit wiesen neun von zehn Überlappungen erhebliche Abweichungen von den Vorgaben der Verlegeanleitung auf, wobei sieben Abweichungen vom Soll auch die Funktion der verlegten Dränmatte beeinträchtigen. Inwieweit es sich im Einzelnen um Mängel handelt, die bei der werksseitigen Vorkonfektion¹, bei der Verlegung auf der Baustelle oder beim Überschütten mit dem Unterboden verursacht wurden, kann nicht zweifelsfrei entschieden werden.

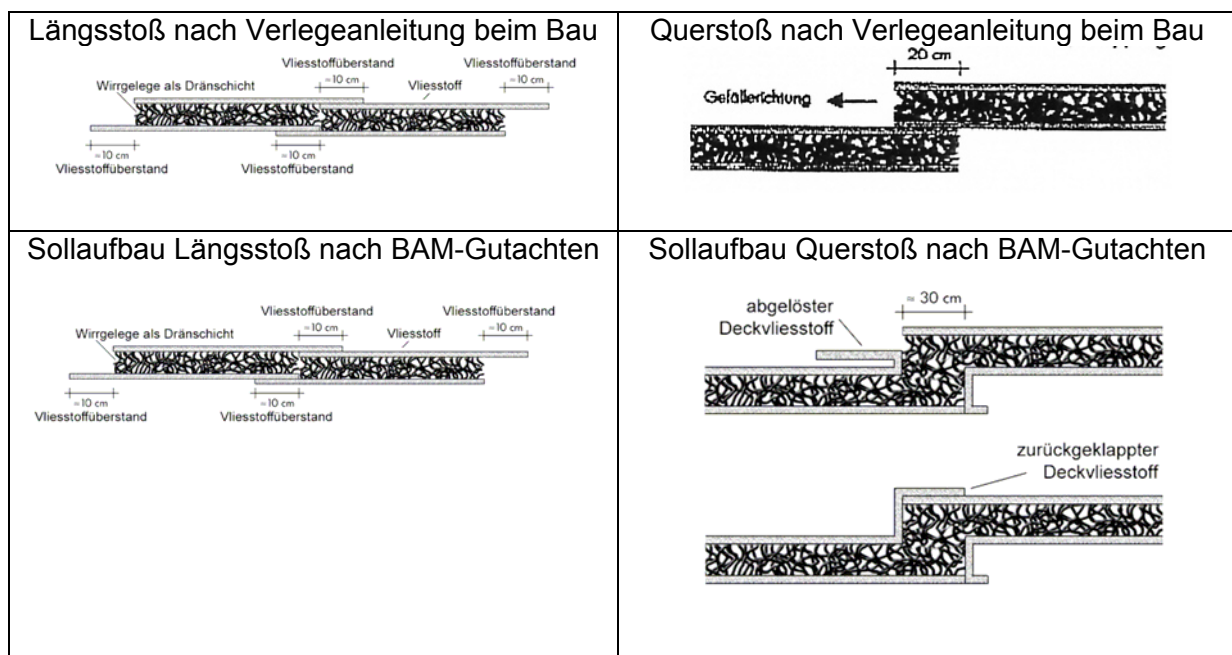


Bild 4 Längs- und Querstöße der Dränmatte nach Verlegeanleitung beim Bau der Oberflächenabdichtung (oben) und nach aktuellem BAM Gutachten für ein Produkt mit ähnlichem konstruktivem Aufbau (unten)

¹ Jeweils zwei bis drei 2 m breite Bahnen wurden vor der Auslieferung werksseitig durch thermische Heftung miteinander verbunden.

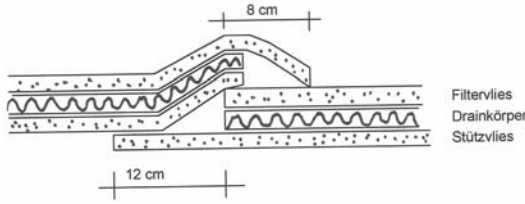
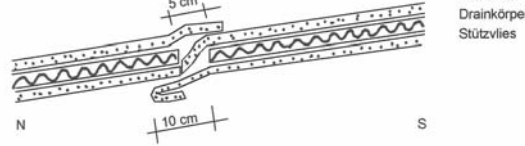
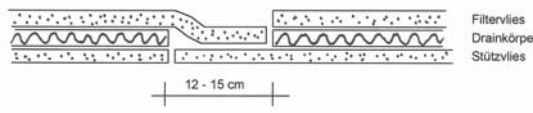
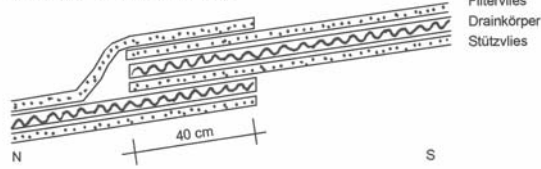
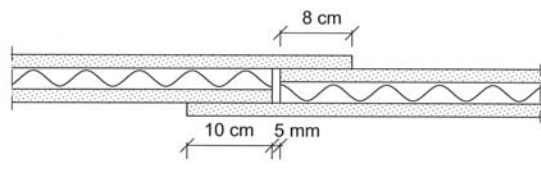
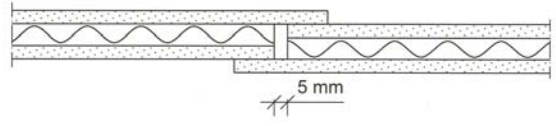
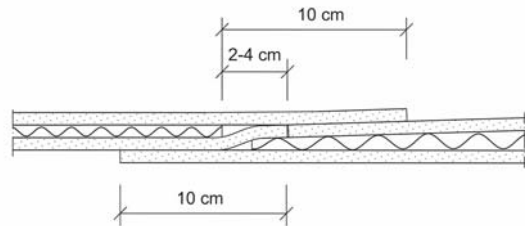
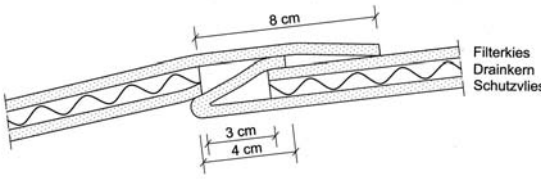
Ist-Zustand Längsstöße	Ist-Zustand Querstöße
<p>Schurf V12 Querschnitt durch den Längsstoß Ü4</p>  <p>Filtervlies Drainkörper Stützvlies</p>	<p>Schurf V9 Querschnitt durch den Querstoß Ü1-a (Überlappung in Gefällerrichtung)</p>  <p>Filtervlies Drainkörper Stützvlies</p>
<p>Schurf V9 Querschnitt durch den Längsstoß Ü2</p>  <p>Filtervlies Drainkörper Stützvlies</p>	<p>Schurf V9 Querschnitt durch den Querstoß Ü3 (Überlappung in Gefällerrichtung)</p>  <p>Filtervlies Drainkörper Stützvlies</p>
<p>Schurf S5 Querschnitt durch den Längsstoß S5 LÜ</p> 	<p>Schurf S5 Querschnitt durch den Querstoß S5 QÜ</p> 
<p>Schurf S6 Querschnitt durch den Längsstoß S6 LÜ</p> 	
<p>Schurf S7 Querschnitt durch den Längsstoß S7 LÜ</p>  <p>Filtervlies Drainkörper Schutzvlies</p>	

Bild 5 In den Schürfen angetroffene Längs- und Querstöße der Dränmatte (Beispiele)



Bild 6 Fehlerhafte Überlappungen der Dränmatte mit Eintrag von Feinboden aus der Rekultivierungsschicht

Dicke der Dränmatte und Flächendeckung des Dränkörpers

Zur Dicke der Dränmatte gibt es Angaben im Datenblatt des Herstellers, Informationen des Fremdprüfers aus dem Probefeld, bei der Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems und bei Aufgrabungen im Jahr 2000 sowie eigene Messungen und Messungen des Fremdprüfers bei den Schürfen 2004. Die Veränderungen der Schichtdicke der Dränmatte ist in Tab. 1 dargestellt (Mittelwerte in mm), wobei die Bestimmungen ex-situ durch eine Entspannung der Proben beeinflusst sein können und bei den Messungen in-situ von der Profilwand nur eine relativ geringe Probenfläche mit Gips injiziert werden konnte.

Tabelle 1 Entwicklung der Dicke der Dränmatte

Angaben in mm	Datenblatt Hersteller	Probefeld (Fremdprüfer)	1996 (Fremdprüfer)	2000 (Fremdprüfer)	2004 ¹⁾ (Fremdprüfer)	2004 ²⁾ (m+w)
Filtervlies	≥ 4	k. A.	4,5	4,4	4,3	0,7
Dränkörper	≥ 18	k. A.	20,6	12,8	11,0	≤ 4,7
Stützvlies	≥ 2	k. A.	2,4	2,2	2,5	0,7
Gesamtdicke	≥ 25	20 (ohne Last) ca. 10 – 15 (eingebaut)	27,5 (ohne Last)	19,4 (ohne Last) ca. 10 (eingebaut)	17,8	6,1 (Last 30 kN/m ²)

k.A.: keine Angabe ¹⁾ Messdaten ex-situ nach DIN EN 964-1 ²⁾ Messdaten nach in-situ Injektion mit Gips unter Last

Unter Auflast ist die Dränmatte acht Jahre nach Einbau nur noch rund 6 mm dick, wobei ein Teil dieser Schichtdicke den beiden Vliesen zuzuordnen sind, die zusammen unter Auflast rund 1,5 mm ausmachen und erheblich weniger wasserleitend sind als der Dränkörper zwischen den Vliesen. Auf großen Flächenanteilen der Matte wird das Filtervlies außerdem in die Zwischenräume zwischen den Monofilamenten des Dränkörpers gedrückt, so dass in diesen Bereichen kein Dränkörper mehr für die schnelle Wasserbewegung zur Verfügung steht und der Abfluss vermutlich auf Umwegen (tortuos) erfolgt (siehe Bild 7).



Bild 7 Dicke der Dränmatte und Flächendeckung des Dränkörpers

Wasserableitvermögen der Dränmatte in der Ebene

Im Labor wurde das horizontale Wasserableitvermögen der Dränmatte an sieben 30 cm x 30 cm großen Proben aus den Schürfen ermittelt. Die Auflast und die Bettung der Proben wurden so gewählt, dass die in-situ herrschenden Randbedingungen bestmöglich nachgebildet wurden: Auflast 30,2 kN/m² (entsprechend der mittleren Bodenüberdeckung von 1,4 m), Bettung unten hart (KDB) und oben weich (Unterboden). Die Streuung der Ergebnisse der sieben Proben aus den Schürfen ist relativ gering. In Tab. 2 sind sie als Wasserableitvermögen, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Transmissivität und Abflussleistung in den jeweiligen Einheiten aufgelistet.

Laut objektspezifischem Datenblatt des Herstellers soll die eingebaute Dränmatte bei einer Auflast von 20 kN/m² einen horizontalen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert in der Ebene von $1,3 \cdot 10^0$ m/s und eine Transmissivität in der Ebene von $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/s aufweisen. Diese Daten gingen auch in den projektspezifischen hydraulischen Nachweis der Leistungsfähigkeit der Dränmatte ein und sind rund 50fach höher als die Werte, die an den aus den Schürfen

entnommenen Proben unter der im Feld herrschenden Auflast von 30 kN/m² Werte gemessen wurden. In den rund acht Jahren Liegezeit wurde die Dränmatte stark zusammengedrückt und hat in der Folge ein gegenüber dem Erwartungswert laut Datenblatt sehr reduziertes Wasserableitvermögen, wobei zu beachten ist, dass der Einfluss der Bettung auf die Bestimmung des Wasserableitvermögens von Dränmatten erst später systematisch untersucht wurde und die Werte des Datenblatts vermutlich auf Messungen mit der Bettung hart/hart beruhen und auch deshalb das Wasserableitvermögen überschätzen.

Tabelle 2 Messergebnisse zum Wasserableitvermögen der Dränmatte in der Ebene

Parameter	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Harmon. Mittel
Durchfluss Q in m ³ /s	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$6,80 \cdot 10^{-6}$
Wasserableitvermögen in m ² /s	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} in m/s	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$3,35 \cdot 10^{-2}$
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{20} in m/s	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$4,34 \cdot 10^{-2}$
Transmissivität Θ in m ² /s	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$
Abflussleistung q in l/(m·s)	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$

Vertikale Wasserdurchlässigkeit der Dränmatte

Für die Funktion der Dränmatte ist auch das vertikale Eindringen des Wassers durch das Filtervlies in das Wirrgelege der Dränmatte von erheblicher Bedeutung. Die vertikale Wasserdurchlässigkeit des Filtervlieses zum Dränkern wurde an Proben aus sechs Schürfen als Permittivität in Anlehnung an DIN EN ISO 11058, 1999 bestimmt. Tab. 3 zeigt die Ergebnisse.

Die Dränmatte aus Schurf 1 zeigte die stärksten Verockerungen des Filtervlieses. Die Probe aus diesem Schurf ergab erwartungsgemäß die niedrigste Permittivität. Auch die Proben aus den Schürfen 6 und 7, die unter der Straßentragsschicht entnommen worden waren und keine visuell auffälligen Verockerungen aufwiesen, fielen unerwartet etwas niedriger aus als die Proben aus den Schürfen 3 bis 5 (Entnahme unter Rekultivierungsschicht, ohne Verockerungen).

Tabelle 3 Permittivität von Filtervlies und Dränkörper der Dränmatte

Parameter	S1	S3	S4	S5	S6	S7	Harmonisches Mittel
Permittivität (ψ) in s ⁻¹ bezogen auf 10°C Wassertemperatur	0,30	1,22	1,32	1,71	0,79	0,58	1,39 (S3 bis S5) 0,97 (S3 bis S7)

Der vertikale Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v des Filtervlieses der gelieferten Dränmatte beträgt laut objektspezifischem Datenblatt des Herstellers im fabrikneuen Zustand $k_v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ (Angabe für eine Auflast von 2 kN/m^2). Im gleichen Datenblatt wird die Schichtdicke des Filtervlieses mit $4,0 \text{ mm}$ angegeben. Aus diesen Angaben errechnet sich eine Permittivität $\psi = 3,25 \text{ s}^{-1}$. Dieser Wert liegt 2fach bis 10fach über den Messwerten an den Proben aus den Schürfen S1 bis S7 .

4.3 Konstruktiver Aufbau der Wasserfassung am Böschungsfuß

Mit zwei Schürfen wurde überprüft, ob das im Oberflächenabdichtungssystem in die Dränmatte absickernde Wasser im Randbereich der Abdeckung ungehindert in die unter der Ringstraße der Deponie angeordnete Dränage abfließen kann. Dabei galt es insbesondere zu prüfen, ob die Dränmatten ohne Verlegefehler oder Beeinträchtigungen bei ihrer Überschüttung durchgängig und hydraulisch wirksam in die Ringdränage geführt wurden, und ob es ggf. durch Zutritt von Luftsauerstoff in der Zwischenzeit zu Verockerungen gekommen ist, die den Abfluss aus der Dränmatte am Übergang zur Ringdränage behindern. Beide Schürfe zeigten, dass der Einbau der Dränmatte und der anderen Komponenten des Abdichtungssystems im Randabschluss zur Ringdränage planmäßig erfolgt war. Es wurden keinerlei Hinweise auf Verockerungen vorgefunden. Der Fließquerschnitt erweitert sich kontinuierlich und lückenlos von der Dränmatte zur kiesummantelten Ringdränage. Es gibt keine Hinweise dafür, dass der beobachtete zeitweise Wassereinstau im Abdecksystem auf eine beeinträchtigte Wasserableitung im Randabschluss zurückzuführen wäre.

4.4 Wasserstandsmessungen im Oberflächenabdichtungssystem

Seit Januar 2005 wird jeweils über mehrere Monate im Winterhalbjahr der Wasserstand im Abdecksystem oberhalb der Dränmatte in Beobachtungspegeln gemessen, um Informationen zur maximalen Höhe und zur räumlichen Verteilung der Wasserstände in der Rekultivierungsschicht sowie zu den Ursachen der Stauwasserbildung zu sammeln. Die Pegel wurden teils automatisch, teils manuell gemessen.

Neun der insgesamt 34 Pegel zeigen keine oder sehr geringe Wasserstände an. Bei acht Pegeln liegt der maximale Wasseraufstau auf der Dränmatte zwischen 30 und 70 cm . In elf Pegeln stand in einzelnen Jahren das Wasser maximal zwischen 70 cm über der Dränmatte und der Geländeoberkante. Sechs Pegel wiesen sogar Druckwasserstände über der Geländehöhe auf (in der Regel sind dies Pegel, die direkt den in der Dränmatte herrschenden Wasserdruck anzeigen).

Bild 8 zeigt exemplarisch Ergebnisse eines Pegelpaares, bei dem ein Pegel im Unterboden der Rekultivierungsschicht 26 cm über der Oberkante der Dränmatte endet und der Nachbarpegel in gleicher Böschungsposition bis auf die Oberkante der Dränmatte reicht. Dargestellt sind Messdaten einer durchgehenden Messreihe von Februar bis Mitte April 2006. Die Messreihe zeigt zwei Ereignisse mit erheblichen Pegelwasserständen. Zwischen den Ereignissen liegt der Wasserstand unterhalb der Einbautiefe der im jeweiligen Pegel eingebauten Sonde, die in dieser Zeit daher keinen Wasserstand anzeigt.

Nach ergiebigen Niederschlägen Anfang Februar steigt der Wasserdruck in der Dränmatte innerhalb eines Tages auf einen Maximalwert von knapp 100 cm Wassersäule an (die Rekultivierungsschicht ist an dieser Position knapp 80 cm dick). Im Unterboden, 26 cm über der Dränmatte sind die ersten Wasserstände 20 Stunden später als in der Dränmatte zu messen

und es wird ein wesentlich niedrigerer Maximalwert von 44 cm über der Dränmatte erreicht. Der Rückgang des Wasserstandes erfolgt im Unterboden dann ebenfalls zeitverzögert zum Wasserdruck in der Dränmatte.

Dieses Verhalten wiederholt sich Ende März und ist typisch für dieses und andere Pegelpaare. Nach entsprechenden Niederschlagsereignissen ist das Wasser in der Dränmatte artesisch gespannt. Die Zeitverläufe beweisen, dass der Einstau im Unterboden von unten nach oben erfolgt. Der Wassereinstau ist somit eindeutig darauf zurückzuführen, dass der Abfluss in der Dränmatte bereichsweise nicht schnell genug erfolgt. Nachgeordnet trägt die in Teilbereichen geringe Wasserleitfähigkeit des Unterbodens zur Höhe und zur Dauer des Wassereinstaus bei.

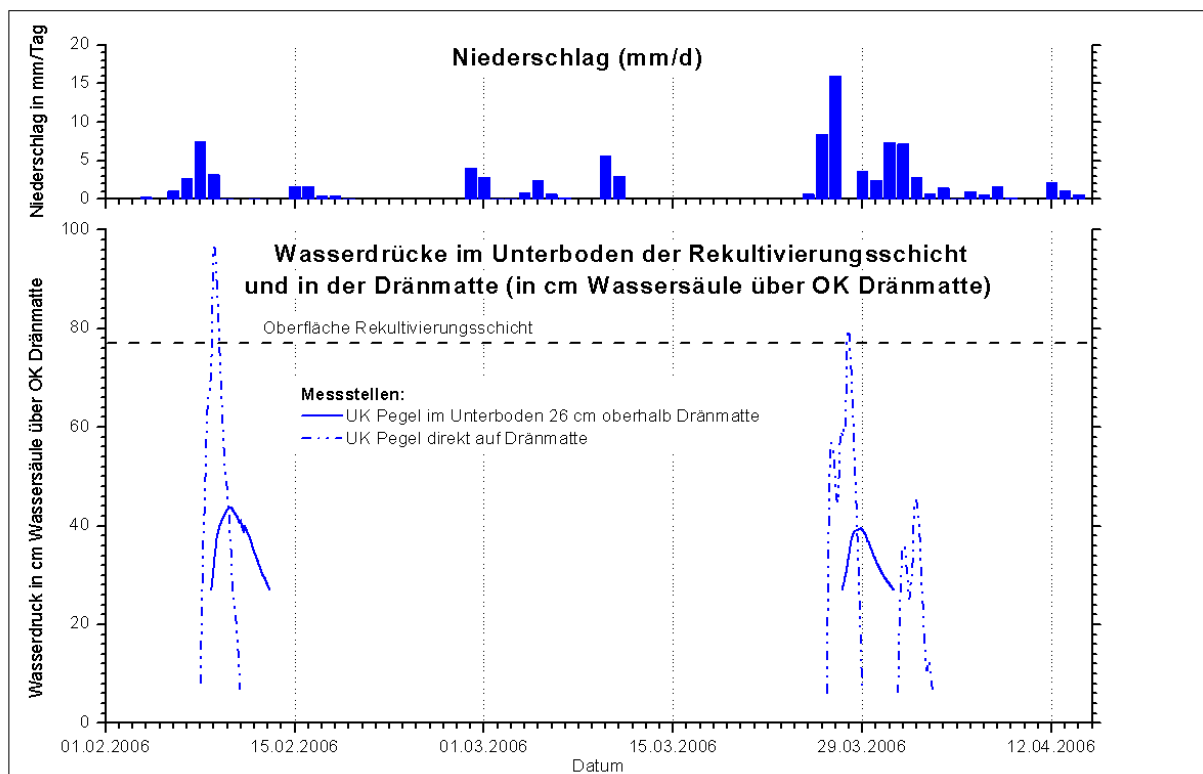


Bild 8 Niederschlag und Wasserstände in Rekultivierungsschicht und Dränmatte (Ausschnitt aus der Messreihe Anfang 2006 - benachbarte Vergleichspegel im Unterboden und auf der Dränmatte)

Im Messzeitraum im Jahr 2006 wurden das Oberflächenabdichtungssystem der Deponie und die darin eingebaute Dränmatte mit erheblichen Wassermengen belastet. Die maximal gemessene Niederschlagsintensität von 8,7 mm/15 min hat eine Wiederkehrzeit T von weit über 100 Jahren. Ähnliche Verhältnisse wiederholten sich 2007. Vor Ort wurden zwei Tage nach dem „Jahrhundertregen 2006“ zahlreiche aktuelle Austrittsstellen von Druckwasser aus der Rekultivierungsschicht an die Bodenoberfläche und in die randlichen Gräben festgestellt. An mehreren Stellen hatten sich große Pfützen gebildet. Das in der Dränmatte und im Unterboden gespannte Wasser suchte sich die Bodenbereiche mit dem geringsten Strömungswiderstand, um sich zu entlasten. Bild 9 zeigt eine solche Austrittsstelle am Böschungsfuß, an der das Wasser entlang eines Maulwurfsganges austrat und dabei humosen Oberboden und sandigen Unterboden ausgewaschen hat.



Bild 9 Bodenauswaschung nach Ausströmen von Druckwasser entlang eines Maulwurfganges am Böschungsfuß

5. Zusammenfassende Bewertung der Befunde

Bei den Aufgrabungen, Laboruntersuchungen und Wasserstandsmessungen im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie wurden mehrere Ursachen für die zeitweise stark verzögerte Entwässerung des Oberflächenabdichtungssystems festgestellt:

- Die Dränmatte wird durch die überdeckenden Bodenschichten zusammengedrückt und weist nach ca. acht Jahren Liegezeit unter Auflast in-situ nur noch eine Dicke von rund 6 mm auf. Da das Wirrgelege der Monofilamente im Dränkörper der Matte nicht flächig vorhanden ist, werden Filtervlies und Stützvlies der Matte bereichsweise direkt

zusammengepresst, so dass der schnelle Wassertransport im Dränkörper der Matten nur auf Umwegen (tortuos) erfolgen kann. Das horizontale Wasserableitvermögen der Dränmatte ist gegenüber den Angaben im objektspezifischen Produktdatenblatt und gegenüber den Rechenansätzen im 1995 geführten hydraulischen Nachweis auf rund ein Fünfzigstel des Sollwerts reduziert und beträgt im harmonischen Mittel $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ l}/(\text{m} \cdot \text{s})$. Zur Orientierung: Wenn auf einer 200 m langen Böschung im stationären Zustand mehr als $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ oder 10,4 mm/d aus der Rekultivierungsschicht in die Dränmatte versickern, so kann diese Zusickerung durch die Dränmatte nicht mehr vollständig abfließen. Die Dränmatte ist somit nicht mehr so wirksam wie bei Planung und Herstellung erwartet, jedoch keinesfalls wirkungslos.

- In den Schürfen wurden insgesamt zehn Überlappungen der Dränmatte angetroffen, die längs oder quer zur Verlegerichtung der Matten verliefen. Neun der zehn Überlappungen entsprachen nicht den Vorgaben der Verlegeanleitung, in sieben Fällen waren die Mängel für die Funktion der Dränmatte erheblich (Eintrag von Feinboden in die Dränmatte, fehlende Anschlüsse der Wirrgelege im Dränkern). Derartige Mängel tragen bereichsweise zu den behinderten Abflüssen in der Dränmatte und zum Wassereinstau in der Rekultivierungsschicht bei.
- In einem der Schürfe wurden erhebliche Verockerungen der Dränmattenvliese, in vielen Schürfen das Eindringen von Pflanzenwurzeln in die Dränmatten festgestellt. Beide Einwirkungen sind unerwünscht und stellen langfristig ein Risiko dar. Aktuell scheiden sie jedoch als Erklärung für die beobachtete Stauwasserbildung im Abdeckungssystem aus.
- Der Unterboden der Rekultivierungsschicht aus lehmigem Sand weist hohe Trockendichten, sehr geringe Porenvolumina und geringe Wasserdurchlässigkeiten auf. Die Laborbestimmungen der gesättigten Wasserdurchlässigkeit liegen zwischen $3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ und $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ mit einem harmonischen Mittel von nur $7 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Diese, gegenüber reifen, gut strukturierten natürlichen Böden reduzierte Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens ist typisch für junge, mit Raupen eingebaute Rekultivierungsböden. Die Wasserdurchlässigkeit ist im Mittel 14fach niedriger als sie 1995 im projektspezifischen hydraulischen Nachweis angesetzt wurde. Die Bodenstruktur des Unterbodens ist homogen und kompakt. Kontinuierliche Grobporen, die bevorzugte Leitbahnen für die Versickerung von Wasser bilden würden, waren visuell nicht erkennbar. Der Unterboden hat somit nach ergiebigen Regenfällen eine wasserstauende Wirkung.
- Der Oberboden ist deutlich lockerer gelagert und hat daher bereits augenscheinlich eine sehr viel höhere Wasserdurchlässigkeit als der Unterboden. Dies hat bereichsweise zur Folge, dass nach intensiven Niederschlägen im Oberboden ein Wasserstau auf dem Unterboden und ein seitlicher Wassertransport in Gefällerrichtung der Böschung einsetzt, der sich u. a. in Pfützen am Böschungsfuß auswirken kann. Die Spannweite der Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens ergibt umgerechnet eine Spanne von 2 mm/d bis 406 mm/d, der harmonische Mittelwert beträgt 6 mm/d. Höhere Niederschläge können nach Aufsättigung des Porensystems im Oberboden zu einem Wasserstau auf dem Unterboden führen, der in Richtung Böschungsfuß zusätzlich durch seitlich vom Oberhang zusickerndes Wasser gespeist wird.
- Die in den Beobachtungspegeln durchgeführten Wasserstandsmessungen beweisen, dass die Beobachtungen zur Staunässe nicht allein auf einem Abfluss im Oberboden oberhalb des Unterbodens beruhen. In mehreren Pegeln wurden über viele Tage an-

haltende und zum Teil über die Bodenoberfläche reichende Wasserstände gemessen. Die direkt auf der Dränmatte verfilterten Pegel zeigten dabei einen schnelleren Anstieg und als Maximum höhere Werte als die Vergleichspegel, die rund 20 cm über der Dränmatte im Unterboden der Rekultivierungsschicht enden. Unter diesen Druckbedingungen fließt das Wasser aus der Dränmatte aufwärts in die Rekultivierungsschicht. Dies zeigt, dass die hydrostatischen Drücke, die aufgrund des zu langsamen lateralen Dränabflusses in der Dränmatte auftreten, für den Wassereinstau in der Rekultivierungsschicht verantwortlich sind und nicht die geringe Wasserleitfähigkeit des Unterbodens der Rekultivierungsschicht.

Zusammenfassend sind an der Stauwasserbildung im Abdecksystem zwei Prozesse beteiligt. Zum einen staut Wasser nach intensiven Niederschlägen auf dem relativ gering durchlässigen Unterboden im Oberboden auf und kann dort in Böschungsgefällrichtung sickern. Zum zweiten ist die Abflussleistung der zusammengedrückten Dränmatte gegenüber dem fabrikneuen Zustand stark reduziert, was im Zusammenwirken mit möglichen Mängeln in Überlappungsbereichen der Dränmatte dazu führt, dass das aus der Rekultivierungsschicht nachsickernde Wasser nicht immer und überall rückstaufrei abgeführt wird.

Die 1995 im hydraulischen Nachweis zur Leistungsfähigkeit der Dränmatte getroffenen Annahmen zum horizontalen Durchlässigkeitsbeiwert und zur vertikalen Durchlässigkeit des Filtervlieses waren zu hoch. Setzt man in die damalige Berechnung für beide Parameter die harmonischen Mittelwerte der Daten ein, die an den aus den Schürfen gewonnenen Proben bestimmt wurden, so sind sowohl das tatsächliche horizontale Wasserableitvermögen der Dränmatte als auch das tatsächliche vertikale Ableitvermögen geringer als die für den Bemessungsregen jeweils erforderlichen Werte. Nach der Logik der damaligen Nachweisführung erfüllt die Dränmatte die Anforderungen demnach nicht (wobei die in den Überlappungsbereichen festgestellten Mängel noch gar nicht berücksichtigt werden). Im hydraulischen Nachweis wurde durch die ausführende Baufirma außerdem ein Gleichwertigkeitsnachweis für die Dränmatte im Vergleich zur mineralischen Entwässerungsschicht nach TA Siedlungsabfall geführt. Im Ergebnis wurde ausgesagt, dass die Dränmatte 43fach leistungsfähiger als die mineralische Entwässerungsschicht sei. Das ist nicht der Fall. Bei Einsatz der aktuellen Werte für die gealterte Dränmatte beträgt die Leistungsfähigkeit der Dränmatte jedoch noch immerhin 68 % der Leistungsfähigkeit der mineralischen Entwässerungsschicht. Sie wäre jedoch auch dann nicht als gleichwertig einzustufen wenn man die Mängel in den Überlappungsbereichen bei der Bewertung unberücksichtigt ließe.

6. Objektspezifische Konsequenzen

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Aufgrabungen, Laboruntersuchungen und Wasserstandsmessungen wurden der bei der Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems durchgeführte Standsicherheitsnachweis überprüft sowie zusätzliche Verbundscherversuche zwischen KDB und Dränmatte und neue Standsicherheitsberechnungen durchgeführt.

Vor der Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems wurde davon ausgegangen, dass die Leistungsfähigkeit der Dränmatte ausreicht, so dass kein Wassereinstau in der Rekultivierungsschicht auftritt. Unter diesen Bedingungen weist die Standsicherheit überall die nach damals gültigem Sicherheitskonzept erforderliche Sicherheit von $\eta \geq 1,3$ auf.

Die Ergebnisse der 2004 und 2006 durchgeführten Standsicherheitsberechnungen zeigen, dass der bei Wassereinstau in der Rekultivierungsschicht hangparallel auf das Korngerüst wirkende Strömungsdruck und der artesische Druck des gespannten Wassers in der Drän-

matte einen erheblichen Einfluss auf die Standsicherheit der Oberflächenabdichtung oberhalb der KDB haben. So geraten die rechnerischen Standsicherheiten für Böschungen, die ohne Wasser noch einen erheblichen Abstand zur Mindeststandsicherheit von $\eta = 1,3$ aufweisen, in den Bereich dieser Mindeststandsicherheit oder sogar darunter (bei Einstauhöhen von 0,8 m liegt die „Sicherheit“ in einigen Böschungsbereichen sogar bei $\eta < 1$).

Die beobachteten Wasserverhältnisse treten zwar nur zeitweilig und örtlich begrenzt auf, es können jedoch noch ungünstigere Situationen nicht ausgeschlossen werden. Die bei Wassereinstau berechnete Verringerung der Standsicherheit ist im wesentlichen auf die hydraulischen Drücke in der Dränmatte zurückzuführen. Die Einflüsse des Strömungsdruckes sind vergleichsweise gering.

Aus diesen Berechnungen wurde eine Übersicht über den Gefährdungsgrad einzelner Böschungsabschnitte abgeleitet. Der jeweilige Gefährdungsgrad ist im wesentlichen abhängig von der Struktur der eingebauten KDB sowie von Böschungsneigung, Böschungslänge und den örtlichen Wasserverhältnissen. Trotz der Anfang 2006 und Anfang 2007 extremen Belastung des Entwässerungssystems infolge der Jahrhundertniederschläge und der hohen Drücke, die am Böschungsfuß in den Pegeln gemessen wurden, traten auch auf den rechnerisch nicht standsicheren Böschungen keine Rutschungen auf.

Zur Schadensprävention wurden 2005 und 2006 linienförmige Entlastungsdränagen (Rigolen) hergestellt. Die seither durchgeführten Wasserstandsmessungen zeigen, dass die Rigolen eine flächenhafte Entwässerungsschicht wie sie in Oberflächenabdichtungssystemen nach Abfallrecht gefordert wird, nicht ersetzen können. Sie tragen jedoch dazu bei, den artesischen Druck in der Dränmatte linienhaft zu entspannen, die Wasserabführung zu beschleunigen und so das Entwässerungssystem in den hydraulisch kritischen Böschungsfußbereichen zu entlasten.

Zusätzlich wurden Entwässerungsmulden in den Bereichen oberhalb der Rigolen sowie oberhalb von gefährdeten Böschungen hergestellt, um Oberflächenabfluss und seitlichen Zwischenabfluss im Oberboden frühzeitig zu fassen und auf diese Weise die Böschungen zusätzlich hydraulisch zu entlasten.

Ergänzend zu diesen baulichen Maßnahmen werden die Wasserstände im Oberflächenabdichtungssystem an ausgewählten Beobachtungspegeln weiterhin gemessen und ausgewertet, um herauszufinden, ob sich der Wassertransport in Dränmatte und Rekultivierungsschicht verändert. Außerdem werden regelmäßig Ortsbegehungen durchgeführt, um an der Oberfläche und im Bewuchs erkennbare Veränderungen des Oberflächenabdichtungssystems der Böschungen möglichst frühzeitig zu erkennen.

7. Projektunabhängige Schlussfolgerungen

Der Deponiebetreiber muss die Risiken und Kosten, die mit der unzureichenden Entwässerung des Oberflächenabdichtungssystem verbunden sind, tragen. Er hat Maßnahmen zur Schadensvorbeugung getroffen. Darüber hinaus lassen die in diesem Fallbeispiel gemachten Erfahrungen einige allgemeine Schlussfolgerungen zur Planung und Herstellung von Entwässerungssystemen in Oberflächenabdichtungssystemen zu.

Dränmatten haben unbestreitbare wirtschaftliche Vorteile. Sie helfen, den Verbrauch und Transport von Kies zu vermeiden. Sie müssen allerdings auch die ihnen zugewiesene Aufgabe im Entwässerungssystem langfristig zuverlässig und mit ausreichenden Sicherheitsreserven erfüllen.

Häufig werden Fachdiskussionen unter der Fragestellung geführt, ob mineralische Entwässerungsschichten oder Dränmatten „besser“ sind. Diese Diskussionen sind aus Sicht des Autors nicht zielführend. Der Einsatz einer Dränmatte als alleinige Komponente des Entwässerungssystems ist hinsichtlich der Herstellkosten günstiger als eine Entwässerungsschicht aus Kies. Mineralische Entwässerungsschichten haben bei der nach Abfallrecht geforderten Mindestdicke und Wasserdurchlässigkeit technische Vorteile. So enthalten Sie bei einer Gesamtdicke von 30 cm mindestens einen Porenraum, der einer Höhe von rund 10 cm entspricht. Ein Entwässerungselement mit 10 cm „Luft“, die in ein stabiles Korngerüst „eingebettet“ ist, muss zwangsläufig über größere Alterungsreserven gegenüber Einwirkungen wie Zusammendrückung, Durchwurzelung oder Verockerung verfügen als eine nur 1 bis 2 cm dicke Dränmatte. Der Kies ist zudem weniger anfällig für „Verlegefehler“. Die Frage ist daher nicht, welches System besser ist, sondern wie gewährleistet werden kann, dass das wirtschaftlichere System langfristig technisch ausreichend wirksam ist. Die technische Entwicklung von Dränmatten ist diesbezüglich noch nicht abgeschlossen. Mineralische Entwässerungsschichten können technisch nicht weiterentwickelt werden, sondern allenfalls hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit durch Reduzierung der Anforderungen z. B. an ihre Dicke verbessert werden.

Die im dargestellten Fallbeispiel 1995 bis 1997 eingebaute Dränmatte entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Seit einigen Jahren gibt es technisch bessere Produkte, deren Eignung durch die BAM untersucht und bewertet wurde. Insbesondere bei der Wahl der Werkstoffe, hinsichtlich der langfristigen mechanischen Beständigkeit und bezüglich der Bemessung hat die Tätigkeit der BAM Verbesserungen der Produktqualität der BAM-geprüften Dränmatten bewirkt. Auffällig bleibt jedoch, dass die Hersteller auch die nicht BAM-geprüften Produkte weiter vermarkten, zumindest im Ausland und im Inland bei Objekten, die nicht dem aktuellen Abfallrecht mit der Zuständigkeit der BAM für die Eignungsprüfung von Geokunststoff-Komponenten unterliegen. Dies ist u. a. auch dem Preiswettbewerb geschuldet. Wünschenswert wäre es, wenn veralteten Produkte vom Markt verschwänden und durch dickere, leistungsfähigere, beständigere und sicherer zu verlegende Produkte ersetzt würden. Die Hersteller sind gefordert, auch die bereits BAM-geprüften Produkte diesbezüglich weiter zu entwickeln.

Für Bauherrn, Planer und ausführende Firmen kann der Einsatz von Entwässerungselementen, die mit zu geringen Reserven bemessen wurden und anfällig gegen Verlegefehler sind, im Nachhinein teuer werden. Wird das Entwässerungssystem jedoch im Zusammenhang mit der Rekultivierungsschicht und unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen (Niederschlag, Böschungsgeometrie) sowie der langfristig erforderlichen Reserven richtig bemessen, können Dränmatten darin durchaus erfolgreich und wirtschaftlich eingesetzt werden. Grundvoraussetzung für den technischen Erfolg ist dabei nach sorgfältiger, objektbezogener Bemessung der Einsatz von zugelassenen, dem Stand der Technik entsprechenden Produkten sowie eine einwandfreie, qualitätsgesicherte Verlegung. Auch das Material und die Einbautechnik der Rekultivierungsschicht müssen passen. Auf steilen Böschungen können ggf. zusätzliche Maßnahmen zur Schadensprävention erforderlich sein. Die Fremdprüfung darf sich bei Dränmatten nicht nur auf die kunststofftechnischen Belange konzentrieren, sondern muss die gesamte Verlegung einschließlich der Überschüttung und der Herstellung der Anbindung der Dränmatte an die Wasserfassung mit hydrologischem und bodenmechanischem Sachverstand betreuen und prüfen. Die technischen Regelwerke zu Entwässerungsschichten, Dränmatten und Rekultivierungsschichten, z. B. [1], [2], [4] und [5], bieten hierzu wesentlich bessere Grundlagen als es noch in den 90er Jahren der Fall war.

Literatur

- [1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik DGGT e.V. (2003): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“, GDA E 2-20, Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen. In: Bautechnik, 2003, Heft 9
- [2] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik DGGT e.V. (2006): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“, GDA E 2-31, Rekultivierungsschichten. In: Bautechnik, 2006, Heft 9
- [3] DepV - Deponieverordnung (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager. (= Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009). BGBl. I, Nr. 22, S. 900
- [4] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - BAM (2003): BAM-Richtlinie Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. Berlin, 21 S.
- [5] Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, Zentrale Unterstützungsstelle Abfallwirtschaft, Gentechnik und Gerätesicherheit (2008): Dränelemente aus Kunststoff als Entwässerungsschicht in Deponieoberflächenabdichtungen. AbfallwirtschaftsFakten 5.2. Hildesheim, 7 S.

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft, Karolinenstraße 6, D-20357 Hamburg

Tel.: 040 430950-11, melchior@mplusw.de

www.mplusw.de