Wechselwirkungen zwischen mineralischen Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen

Dr. habil. Stefan Melchior
melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft, Hamburg
www.mplusw.de

1 Einleitung 2
2 Stand der Technik und dessen Entwicklung 2
3 Langfristiges Zusammenwirken von Bewuchs und Rekultivierungsschicht 5
4 Wechselwirkungen zwischen Rekultivierungsschicht und Entwässerungssystem 8
5 Wechselwirkungen Deckschichten und mineralische Abdichtungen 10
6 Konsequenzen für den Systemaufbau 15
7 Literatur 17

1 Einleitung

Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten werden seit über 25 Jahren geplant, gebaut und nachgesorgt. Bundesweit wurde die Wirksamkeit ausgeführter Systeme in zahlreichen Testfeldern, teils über Jahrzehnte untersucht. Insbesondere in den 80er und 90er Jahren wurden umfangreiche Forschungsverbundvorhaben zur Deponieabdichtung öffentlich gefördert. Die Kunststoffdichtungsbahn hat sich als wichtigste Komponente des Abdichtungssystems durchgesetzt. Das gesamte Oberflächenabdichtungssystem besteht jedoch zusätzlich aus zahlreichen mineralischen Komponenten mit unterschiedlichen Aufgaben. In den letzten Jahren wurden vor allem technische mineralische Abdichtungsprodukte im Auftrag ihrer Hersteller untersucht, um ihre Eignung im Rahmen abfallrechtlicher Zulassungsverfahren nachzuweisen. Parallel dazu wurde das Abfallrecht fortgeschrieben, um Vorgaben aus der europäischen Gesetzgebung umzusetzen und aktuelle umweltpolitische Ziele zu verfolgen. In der aktuellen Deponieverordnung (DepV 2009) und ihren mitgeltenden Zulassungen der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) und der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) sind detaillierte technische Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme und deren Komponenten für unterschiedliche Deponieklassen enthalten. Für die mineralischen Komponenten sind insbesondere die Darlegungen des bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und die Eignungsbeurteilungen der LAGA maßgeblich. Deponiebetreibern, Sanierungsverpflichteten und Planern stehen somit umfangreiche technische und rechtliche Grundlagen für die Konzeption und technische Planung von Oberflächenabdichtungssystemen zur Verfügung.

Die Vorgaben von DepV, BAM und LAGA erleichtern den Planern die Festlegung der technischen Anforderungen an die Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems. Vor der Verabschiedung der DepV war es eine zentrale Aufgabe des Planers, aus verschiedenen Alternativen eine technisch und wirtschaftlich angemessene und vor allem genehmigungsfähige Abdichtung oder Kombination aus zwei Abdichtungen auszuwählen und zu begründen. Heute besteht die Herausforderung an eine technisch und wirtschaftlich gute Planung weniger in der Auswahl genehmigungsfähiger Abdichtungskomponenten, denn diese sind weitgehend vorgegeben, sondern vielmehr in der Berücksichtigung des Zusammenwirkens aller Komponenten eines Oberflächenabdichtungssystems zur Sicherung eines nachhaltigen Erfolgs der Maßnahme unter den im jeweiligen Projekt gegebenen Randbedingungen. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit ausgewählten Aspekten des Zusammenwirkens der mineralischen Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems.

2 Stand der Technik und dessen Entwicklung

Die Geschichte der Deponieabdichtung begann an der Deponiebasis mit dem Ziel, die Verlagerung von umweltgefährdenden Stoffen aus der Deponie ins Grundwasser zu unterbinden. Für die Basisabdichtung wurde vor gut 30 Jahren die Kombinationsdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn (KDB) als langzeitbeständige Konvektionssperre nach „BAM-Standard“ und schadstoffrückhaltende Tondichtung entwickelt, der sich für die Basisabdichtung bis

heute bewährt hat und als Stand der Technik gilt. Dieses Abdichtungssystem wurde in den 80er Jahren auch auf die Oberflächenabdichtung übertragen und hielt als Regelsystem für Deponien der Klassen II und III Eingang in die untergesetzlichen Regelwerke TA Abfall (1991) und TA Siedlungsabfall (1993). Für die Deponieklasse I wurde eine rein mineralische Abdichtung ohne KDB für ausreichend erachtet. TA-A und TA-Si legten im Wesentlichen die Mindestdicke der Komponenten Rekultivierungsschicht, Entwässerungsschicht und Dichtung fest und stellten Anforderungen an die Mindestdurchlässigkeit der Entwässerungsschicht sowie die maximal zulässige Durchlässigkeit und den Mindesttongehalt der mineralischen Dichtung. Spezielle Eignungsuntersuchungen zur Langzeitbeständigkeit der Komponenten wurden nicht gefordert, sondern vorausgesetzt. Alternative mineralische Dichtungen waren jedoch bei Nachweis ihrer Gleichwertigkeit zulässig, wobei der Vergleichsmaßstab, die Wertigkeit der mineralischen Regeldichtung, nur indirekt und unpräzise beschrieben wurde.

Gleichzeitig mit der Entwicklung und Verabschiedung der TA-Si wurden erste Forschungsergebnisse bekannt, die zeigten, dass die an der Deponiebasis bewährte Tondichtung im Oberflächenabdichtungssystem durchwurzelt und durch Austrocknung rissig und unwirksam werden kann. Dies führte in den 90er Jahren geradezu zu einem „Boom“ an alternativen mineralischen Abdichtungen (Kapillarsperre, Bentonitmatte, Bentokies, Trockendichtung, wasserglasvergütete Dichtung, Trisoplast), die als langfristig wirksamerer oder wirtschaftlicherer Ersatz der mineralischen Dichtung propagiert wurden. Da die unteren Abfallbehörden in diesem Zusammenhang in der Genehmigungspraxis mit technisch-wissenschaftlich sehr komplexen Anträgen konfrontiert wurden, beschlossen die Länder, das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) mit der länderübergreifenden Zulassung alternativer mineralischer Abdichtungen nach Baurecht zu beauftragen. Beherrschendes und sehr kontrovers diskutiertes Hauptthema bei der Erarbeitung der baurechtlichen Zulassungen des DIBt waren die Anforderungen, die zur Sicherung der Langzeitbeständigkeit an den Schutz der mineralischen Abdichtungskomponenten vor Pflanzenwurzeln, Austrocknungsrissbildung und Ionenaustausch zu stellen sind. Das DIBt entwickelte Grundsätze, nach denen die Eignung der Antragsgegenstände nachzuweisen war. In den DIBt-Grundsätzen wurde versucht, die Anforderungen an die Wirksamkeit der Abdichtung gegenüber TA-A und TA-Si quantitativ zu konkretisieren. Außerdem wurde ein Katalog an Nachweisen und Nachweismethoden zu den Kriterien Dichtwirksamkeit, mechanische Beständigkeit, Langzeitbeständigkeit und Herstellbarkeit entwickelt.

In der Folge begann eine Art „Wettrüsten“ zwischen Sachverständigen, die Anforderungen an die Beständigkeit stellten, und Herstellern, die meinten diese Anforderungen zu erfüllen oder nicht erfüllen zu müssen. Die Diskussionen wurden kontrovers und mit einer gewissen Heftigkeit geführt. Für die Untersuchung der Langzeitbeständigkeit der Dichtungen gegen die oben genannten Einwirkungen standen jedoch keine allgemein erprobten und wissenschaftlich anerkannten Laborprüfmethoden zur Verfügung, nach denen das Verhalten der Dichtungen unter für die Anwendungspraxis repräsentativen Bedingungen in absehbaren Zeiten hätte untersucht werden können. In der Folge wurden Fallbeispiele aus Freilanduntersuchungen (Testfeldern) herangezogen. Sofern die Dichtungen in den Untersuchungen Schäden zeigten, wurde seitens der Hersteller versucht, nachzuweisen, dass die Untersuchungen

entweder fehlerhaft durchgeführt wurden oder aufgrund der jeweils gegebenen Randbedingungen für die bundesweite Praxis irrelevant seien. Sofern dies nicht gelang, wurden andere Fallbeispiele bemüht, in denen keine Schäden auftraten, und die als Grundlage für die Zulassung dienen sollten. Die Sachverständigen forderten daraufhin, dass die beantragte Dichtung nicht nur in einem Fall, sondern bundesweit in allen Fällen funktionieren müsse. Im Ergebnis wurde durch Schutzmaßnahmen mit erhöhtem Aufwand (z. B. größere Dicke der Rekultivierungsschicht) „nachgerüstet". Um natürliche Prozesse von den Abdichtungen fernzuhalten, wurde der Aufbau des Gesamtsystems aufwändiger und komplizierter.

Aus Sicht des Autors war diese Zeit zwar durch fachlich sehr interessante Diskussionen und Untersuchungen geprägt, die den Erkenntnisstand voran brachten. Rückblickend waren die Diskussionen jedoch in dem Sinne kontraproduktiv, dass die Fokussierung auf immer aufwändigere Schutzmaßnahmen gegen natürliche Einwirkungen zum einen die Kosten und Komplexität der Systeme erhöht und zum anderen den Blick auf die positive Nutzung der natürlichen Prozesse zur Optimierung des Nutzens und der Beständigkeit des Oberflächenabdichtungssystems verstellt hat. Mit zunehmenden Kosten für die Erfüllung der Anforderungen stieg zudem die Energie von Bauherren, Planern und Ausführenden die vermeintlich unsinnigen und „akademischen" Anforderungen in der Praxis zu unterlaufen. In der Folge wurde viel Geld für Baumaßnahmen ausgegeben, die ihren eigentlichen Zweck nur kurz oder unvollständig erfüllten, und wenig Geld gespart, mit dem nachhaltigere Lösungen möglich gewesen wären.

Nach wenigen Jahren wurde dem DIBt Ende der 90er Jahre das Mandat der baurechtlichen Zulassungen der mineralischen Dichtungen von den Ländern wieder entzogen. Die LAGA wurde kurzfristig tätig, um die entstandene Lücke zu füllen und die unteren Abfallbehörden durch übergeordnete Einschätzungen der alternativen Dichtungen in ihrer Genehmigungspraxis zu unterstützen. Erst nach Verabschiedung der DepV (2002) nahm die LAGA jedoch 2003 durch Gründung der Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen" die Nachfolge des DIBt konsequent und seit 2009 mit „offiziellem" gesetzgeberischen Auftrag durch die neue DepV (2009) umfassend auf. Die LAGA Ad-hoc-AG hat die DIBt-Grundsätze fortgeschrieben sowie bundeseinheitliche Qualitätsstandards (BQS) und Eignungsbeurteilungen für mineralische Abdichtungskomponenten erarbeitet (siehe den Beitrag von Bräcker in diesem Band sowie die Veröffentlichungen auf der Internet-Seite der Gewerbeaufsicht Niedersachsen und der LAGA). Eignungsbeurteilungen der LAGA liegen für solche mineralischen Abdichtungskomponenten vor, für die ein Produkthersteller oder Patentinhaber einen Antrag gestellt hat. Andere Systemkomponenten, für die es keinen speziellen Produkthersteller gibt (Rekultivierungsschicht, Wasserhaushaltsschicht, Methanoxidationsschicht, Entwässerungsschicht, Kapillarsperre, mineralische Dichtung aus natürlichen Baustoffen), werden in den BQS behandelt. In den BQS und Eignungsbeurteilungen der LAGA wird ausführlich auf andere technische Regelwerke hingewiesen (z. B. GDA-Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, DIN-Normen, Fachberichte der Länder). Allen Dokumenten und Regelwerken ist gemein, dass sie sich jeweils mit einer einzelnen Komponente befassen und die Systemzusammenhänge in Bezug auf diese Komponente beschreiben.

3 Langfristiges Zusammenwirken von Bewuchs und Rekultivierungsschicht

Von technischen Produkten, die zur Abdichtung oder Entwässerung eingesetzt werden, wird erwartet, dass sie qualitätsüberwacht hergestellt und eingebaut werden und die ihr zugedachte Funktion sofort erfüllen. Diskutiert werden, neben den Kosten, allenfalls ihre Bemessung und ihre Langzeitbeständigkeit. Dies ist beim Bewuchs und bei der Rekultivierungsschicht grundsätzlich anders. Hier handelt es sich nicht um technisch hergestellte Produkte, die aus bekannten Komponenten mit klar definierten Eigenschaften hergestellt werden und nach anfangs planmäßiger Funktion durch Alterung in ihrer Wirksamkeit nachlassen. Der Bewuchs und die Rekultivierungsschicht sind vielmehr lebende bzw. belebte Systemkomponenten. In der Planung kann zwar im Grundsatz vorgegeben werden, welche Art von Bewuchs man erzeugen will und welche maßgeblichen Eigenschaften der Boden haben soll. Die genaue Artenzusammensetzung des Bewuchses ist jedoch nicht planbar, sondern unterliegt der natürlichen Entwicklung (Samendepot im Boden, Anflug von Samen aus der Umgebung, Konkurrenz). Auch die in der Maßnahme dann tatsächlich nach Marktlage und regionaler Verfügbarkeit eingesetzten Rekultivierungsböden sind in der Planung in der Regel nicht bekannt und hinsichtlich Mineralbestand, Humusqualität und Konsistenz beschreibbar. Hinzukommt, dass Bewuchs und Rekultivierungsschicht sich nach Abschluss des Erdbaus, anders als technische Produkte, erst über viele Jahrzehnte oder gar längere Zeiträume entwickeln und „reifen“. Ihre Eigenschaften und ihr Beitrag zur Wirksamkeit des Gesamtsystems werden in der Regel im Lauf der Zeit immer besser, sofern sie nicht durch Feuer, Schädlinge, Windwurf, Erosion oder Rutschung schlagartig geschädigt werden. Hier geht es im Rahmen der Planung und Herstellung also vor allem darum, möglichst gute Startbedingungen zu schaffen oder zumindest Fehler zu vermeiden, die die Systementwicklung über lange Zeiten stark verzögern können.

Die für viele Beteiligte schwer prognostizierbare Langzeitentwicklung dieser beiden Komponenten macht ihre Handhabung in der Planung und bei der Herstellung der Oberflächenabdichtungssysteme relativ kompliziert. Während es vergleichsweise klar verständlich ist, dass eine Dichtung eine bestimmte Dichtigkeit und eine Dränage eine gewisse Wasserdurchlässigkeit aufweisen muss, ist weniger bekannt und nachvollziehbar, welchen Einfluss z.B. die Luftkapazität der Rekultivierungsschicht auf das langfristige Systemverhalten hat und warum dieser Parameter wichtig ist (und ggf. den Einsatz relativ wenig leistungsfähiger Baugeräte rechtfertigt). Langfristig wird die Restwirksamkeit des Oberflächenabdichtungssystems nach Alterung der technischen Dichtung vermutlich jedoch wesentlich von einem hydrologisch gut funktionierenden und standortangepassten System Bewuchs / Boden abhängen. Daher sollten folgende Überlegungen und Zusammenhänge berücksichtigt werden:

- Jeder frisch eingebaute Boden erfährt durch die Auflast, der ihn überlagernden Horizonte und Schichten und durch natürliche Prozesse (Sackung, Partikelumlagerung) eine gewisse Verdichtung. Wird der Boden jedoch beim Einbau mit schweren Maschinen befahren, erfährt er in der Regel eine Überverdichtung. Diese Überverdichtung kann dazu führen, dass der Boden wenige oder keine durchgehenden Grobporen mehr aufweist, die Wasser dränieren und die Versorgung von Pflanzen-

wurzeln mit sauerstoffhaltiger Luft gewährleisten. Pflanzenwurzeln brauchen jedoch, mit Ausnahme weniger Arten, Sauerstoff. Stauwasser und Luftmangel für die Pflanzenwurzeln beeinträchtigen die Ausbildung des Wurzelsystems, die Verdunstungsleistung des Bewuchses und können weitere Schäden wie Erosion, Verockerung des Entwässerungssystems und Einschränkungen der Standsicherheit bewirken. Daher sollte die Rekultivierungsschicht eine Luftkapazität (Anteil an weiten Grobporen > 50 µm) von mindestens 8 Vol.-% aufweisen und die Grobporen, die die Luftkapazität ausmachen, sollten im Boden kontinuierlich verlaufen (daher kein lagenweiser Einbau).

- Auf verdichtet eingebauten gemischtkörnigen Böden mit bindigen Anteilen ist die Infiltrationskapazität gering. Bei ergiebigen Niederschlägen droht auf solchen Böden massive Erosion, solange sie noch nicht flächig bewachsen sind und eine ausreichend raue Oberfläche aufweisen. Für den Erosionsschutz ist eine schnelle und möglichst schnell flächendeckende Begrünung des Bodens entscheidend. Nicht überverdichtet eingebaute Oberböden haben nicht nur eine deutlich höhere Infiltrationskapazität, sie werden auch sehr viel schneller und dichter begrünt als überverdichtete Oberböden.
- Unsere heimischen Pflanzenarten lieben, mit Ausnahme weniger Spezialisten, die auf Trockenstandorten Konkurrenzvorteile suchen, gut mit pflanzenverfügbarem Wasser versorgte Oberböden, die einen reifen Humuskörper aufweisen („Mutterboden“ oder Oberboden im Sinne der VOB/C - DIN 18300). Sofern solche Böden nicht zur Verfügung stehen, sollten die verfügbaren, in der Regel weitgehend unbelebten Unterböden, mit gut durchgerottetem Grünschnittkompost in moderater Zugabemenge ausgestattet werden.
- Wird der Bewuchs auf Oberflächenabdichtungssystemen über viele Jahrzehnte „bis in alle Ewigkeit“ zwei- bis dreimal jährlich gemäht werden, um sicher zu stellen, dass keine Sträucher und Büsche aufwachsen? Wohl eher nicht. Warum wird dann nicht von vornherein so vorgegangen, dass die Voraussetzungen für die Etablierung eines standortangepassten Gehölzbewuchses geschaffen werden? Gehölze können aus gestalterischer und naturschutzfachlicher Sicht sehr attraktiv sein. Folgende Untersuchungen zeigen, dass Gehölze auf geeigneten Rekultivierungsschichten, schon nach wenigen Jahren erheblich mehr Wasser verdunsten als ein Grünlandbewuchs mit Gräsern und Kräutern. Da dieses verdunstende Wasser die tiefer liegende Dichtung gar nicht erst erreicht, kann es die langfristig ggf. gealterte Dichtung auch nicht durchsickern. Bild 1 zeigt eine Untersuchung auf der Deponie Georgswerder, in der auf zwei nebeneinander liegenden Testfeldern mit gleich aufgebauter Rekultivierungsschicht bestimmt wurde, wieviel Wasser jährlich von einem Gehölzbewuchs und wieviel von einer Grünlandvegetation verdunstet wurde. Die Gehölze (Feld F2 ab 1996) verbrauchten schon nach wenigen Jahren zwischen 50 mm und 200 mm mehr Wasser pro Jahr als das benachbarte Grünland (Feld F3, gemäht).

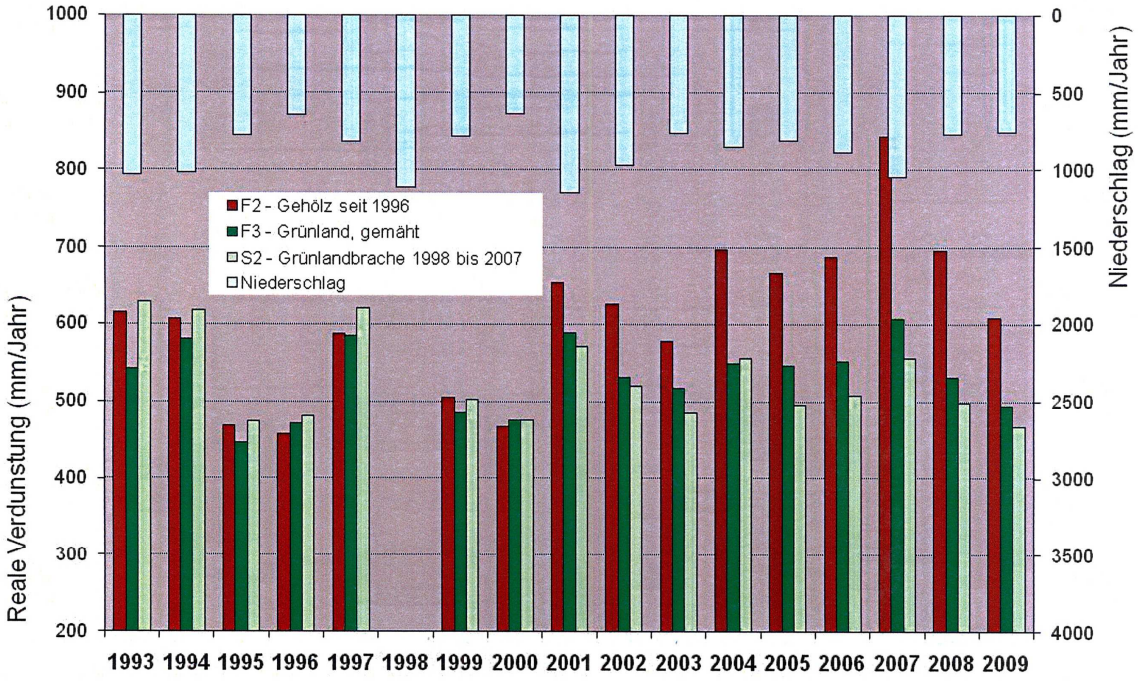

Bild 1 Jahressummen von Niederschlag (hängende Säulen oben, rechte Y-Achse) und Verdunstung (unten, linke Y-Achse) auf benachbarten Testfeldern der Deponie Georgswerder mit seit 1996 unterschiedlichem Bewuchs

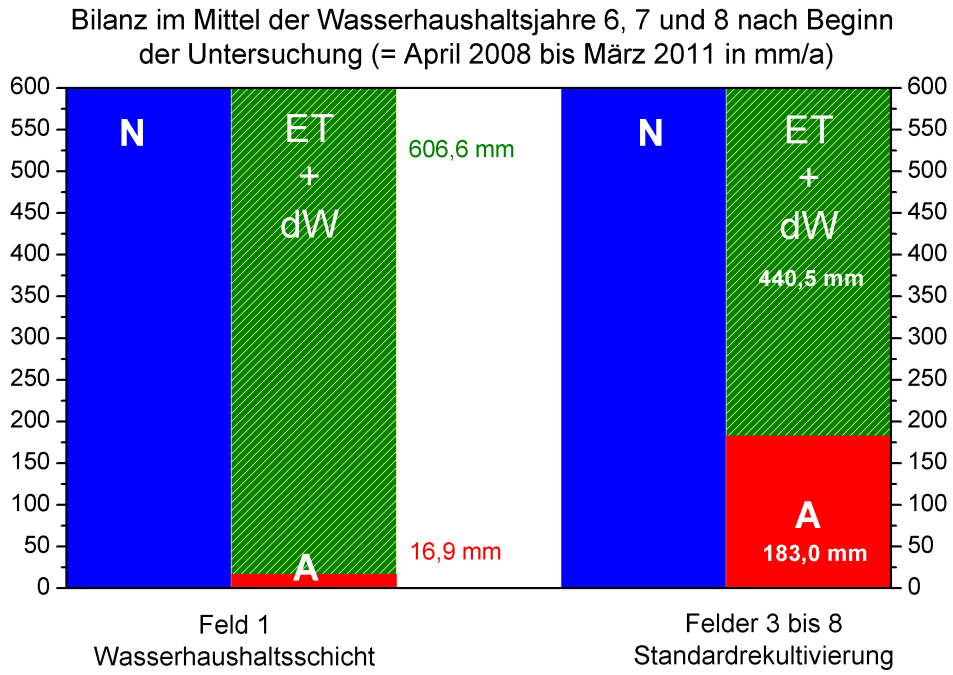

Bild 2 Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz: Vergleich von Verdunstung (ET + dW) und Dränspende (A) unter Wasserhaushaltsschicht mit Gehölzbewuchs (Feld 1 links) und Standardrekultivierungsschicht mit Grasbewuchs (Mittel Felder 3 bis 8, rechts)

Bild 2 zeigt für die Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz einen Vergleich der Dränspende unter einer Wasserhaushaltsschicht mit Gehölzbewuchs (Feld 1) mit der Dränspende unter der Standardrekultivierungsschicht mit Grasbewuchs der Felder 3 bis 8 (Mittelwerte ab dem 6. Jahr der Untersuchung). Unter der Standardrekultivierung versickerten im Mittel 183 mm/a oder 29,3 % des Niederschlags). Dieser Betrag liegt um das 10fache höher als die Dränspende unter der Wasserhaushaltsschicht (17 mm/a oder 2,7 % des Niederschlags). Diese durch die Verdunstungsleistung des Bewuchses verursachten Unterschiede sind sehr hoch, wenn man bedenkt, dass in Bezug auf die Dichtwirksamkeit von unterschiedlichen technischen Dichtungen schon Durchsickerungsbeträge von wenigen mm/a als entscheidend angesehen werden.

4 Wechselwirkungen zwischen Rekultivierungsschicht und Entwässerungssystem

Das Entwässerungssystem soll das aus der Rekultivierungsschicht absickernde Wasser (Dränspende) schnell von der Oberfläche der Dichtung ableiten. Je schneller das Wasser seitlich abgeleitet wird, desto weniger Wasser kann durch eine ggf. lokal defekte Dichtung sickern und desto weniger wahrscheinlich ist ein Wasserrückstau im System, der auf steilen Böschungen ggf. die Standsicherheit beeinträchtigen kann. Die Bemessung des Entwässerungssystems hängt u.a. von der Neigung und der Länge der Böschung sowie von der Höhe der Dränspende ab. Bezüglich der Dränspende wurden in der Vergangenheit Lastfälle von 10 mm/d und 25 mm/d diskutiert. Der Wert von 25 mm/d wurde in der aktuellen, im Internet noch nicht publizierten Fassung der GDA Empfehlung E2-20 festgeschrieben. Messwerte von Deponien zeigen, dass ggf. auch höhere Abflussraten aus Entwässerungsschichten auftreten können. Bild 3 zeigt das Beispiel einer Deponie in Norddeutschland, auf der unter keineswegs besonders kritischen Standortbedingungen so ergiebige Regenfälle auftraten, dass innerhalb von zehn Jahren viermal Werte von über 25 mm/d als Abfluss aus der mineralischen Entwässerungsschicht gemessen wurden (Spitzenwert knapp über 35 mm/d, den vier Ereignissen vorausgehende Niederschlagsereignisse zwischen 40 und 80 mm/d). In vielen Fällen liegt die maximal Dränspende unter 25 mm/d oder sogar unter 10 mm/d. Ein Lastfall von 10 mm/d würde jedoch nicht auf der sicheren Seite liegen. Auch bei Annahme einer maximalen Dränspende von 25 mm/d ist dies nicht an allen Standorten der Fall. Da die Nachweisverfahren aufgrund der verwendeten Rechenansätze jedoch weitere Sicherheiten enthalten, ist die Annahme der maximalen Dränspende von 25 mm/d in der Regel dennoch ausreichend, sofern nicht bestimmte projektspezifische Randbedingungen gegeben sind.

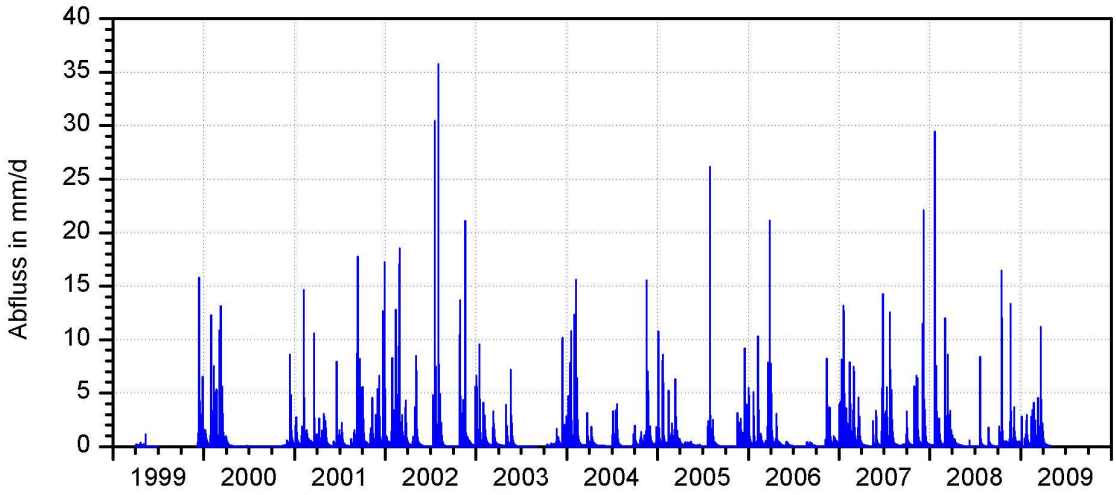

Bild 3 Tageswerte des Entwässerungsschichtabflusses unter einer Standardrekultivierungsschicht auf einer Deponie in Norddeutschland

Wenn ein Wasserrückstau in der Rekultivierungsschicht aus Standsicherheitsgründen zu vermeiden ist (Stauwasser auf verdichtet eingebauten Unterbodenlagen kann der Bildung von Muren Vorschub leisten und die Standsicherheit durch hydrostatische Drücke und Strömungsdrücke reduzieren) und das Entwässerungssystem nach ergiebigen Regenfällen Dränspenden von 25 mm/d bewältigen muss, hat dies zur Konsequenz, dass die Wasserdurchlässigkeit der Rekultivierungsschicht mindestens $k_f \geq 3 \times 10^{-7}$ m/s betragen muss, um dieses Wasser versickern zu lassen. Da sich die Wasserdurchlässigkeit von frisch eingebauten Rekultivierungsschichten in der Regel nach Einbau eher durch z.B. Sackungen verringert als erhöht, ist bei der Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach Einbau im einzuhaltenden Sollwert eine Reserve einzukalkulieren. Im Rahmen der Qualitätsüberwachung von mineralischen Entwässerungsschichten ist es gängige Praxis, im Laborversuch eine 10fach höhere Wasserdurchlässigkeit zu fordern als nach Bemessung als Mindestwert gefordert (z.B. 1×10^{-2} m/s statt 1×10^{-3} m/s). Die Wasserdurchlässigkeit der eingebauten Rekultivierungsschicht müsste bei analogem Vorgehen dann $k_f \geq 3 \times 10^{-6}$ m/s betragen.

Im Hinblick auf die langfristige Beständigkeit des Entwässerungssystems sind vor allem zwei Alterungsprozesse relevant: Durchwurzelung und Verockerung. Beide Prozesse sind bekannt und wurden fallweise dokumentiert. In der Bemessung der Systeme spielen sie bislang eine untergeordnete Rolle. Dies ist vermutlich so, weil die Zusammenhänge kompliziert und schlecht quantitativ prognostizierbar sind. Hierzu einige Anmerkungen und Vorschläge:

- Durchwurzelung: Die Wurzelverteilung im Boden und die maximale Wurzeltiefe kann nach aktuellem Kenntnisstand nicht bemessen werden. Dies hat mehrere Gründe. Erstens ist das Wurzelsystem von Pflanzen nicht oder nur in grobgen Zügen genetisch vorbestimmt. Konkret wird es wesentlich durch die Konkurrenz zwischen den vorhandenen Pflanzenarten, die Qualität der Rekultivierungsschicht sowie von den

aktuellen Witterungsbedingungen bestimmt (Pflanzenwurzeln können bei Bedarf dem Wasser sehr schnell hinterher wachsen). Zweitens kann nicht sicher vorhergesagt werden, welche Pflanzenarten sich auf der Rekultivierungsschicht langfristig ansiedeln und durchsetzen werden und welche unerwünschten Arten man mit welchen Maßnahmen fernhalten kann. Drittens gibt es in der heimischen Flora zahlreiche, z.T. oberirdisch sehr unscheinbare Arten, die problemlos mehrere Meter Boden durchwurzeln können. Viertens sind mit Ausnahme der KDB keine langfristig wirksamen Wurzelsperren bekannt. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Rekultivierungsschicht so gestaltet werden sollte, dass die Pflanzen möglichst wenig Anreiz dafür haben, in große Tiefen zu wurzeln. Das Entwässerungssystem sollte außerdem ausreichende hydraulische Reserven aufweisen, damit eine gewisse Durchwurzelung nicht sofort zum Versagen führen kann. Austrocknungs- und wurzelempfindliche Dichtungen müssen durch geeignete konstruktive Maßnahmen (z.B. Bedeckung mit einer KDB) langfristig geschützt werden.

- Entwässerungssysteme können im Oberflächenabdichtungssystem durch Ausfällung von Eisen- und Manganoxiden oder –hydroxiden sowie durch Carbonate verockern. Die Quelle solcher Stoffe ist in der Regel die Rekultivierungsschicht. Den größten Einfluss haben dabei Eisenverbindungen. Bislang gibt es jedoch keine allgemein akzeptierten, verbindlichen Grenz- oder Richtwerte, die in der Rekultivierungsschicht einzuhalten wären, um der Verockerung des Entwässerungssystems vorzubeugen. Eine Begrenzung des Gesamtgehalts an Eisen wäre dabei nicht zielführend, da Eisen in vielen Bindungsformen sehr schwer löslich ist und nur teilweise und unter bestimmten Bedingungen mobilisiert und verlagert wird (Mobilisierung in Abhängigkeit vom Redoxpotential und vom pH-Wert in zweiwertiger Form, Fällung als dreiwertiges Eisen). Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass von Böden, die einen Anteil an oxalatlöslichem Eisen von über 1,5 g/kg aufweisen, häufig eine Verockerungsgefahr ausgeht. Die Entwicklung einer breiteren Datenbasis hierzu wäre wünschenswert.

5 Wechselwirkungen Deckschichten und mineralische Abdichtungen

Wenn mineralische Abdichtungen ohne bedeckende Kunststoffdichtungsbahn eingesetzt werden, unterliegen sie vielfältigen Einwirkungen aus den Deckschichten. Die wichtigsten sind:

- Eindringen von Pflanzenwurzeln und Rissbildung durch Austrocknung
- Austrocknung durch flüssige oder dampfförmige Wassertransporte
- Beeinträchtigungen des Quellvermögens und der Dichtwirksamkeit durch Ionenaustausch (Eintrag von Calciumionen und Austrag von Natriumionen)
- Beeinträchtigung der Erstquellung bentonithaltiger Abdichtungen durch im Bodenwasser gelöste Salze mit der Folge reduzierter Dichtwirksamkeit der Dichtung

Bereits in den 90er Jahren wurde bekannt, dass Pflanzenwurzeln in tonhaltige Dichtungen und Bentonitmatten einwachsen und diese massiv schädigen können. Die Wurzeln schädigen die Dichtungen nicht nur durch mechanische Perforation, sondern vor allem auch durch Wasserentnahme und dadurch verursachte Schrumpfrissbildung. Kapillare Wasserabgabe an im Sommer ausgetrocknete Deckschichten kann ebenfalls die Bildung von Trockenrissen verursachen. Durch Felduntersuchungen an Bentonitmatten auf der Deponie Georgswerder wurde bekannt, dass Ionenaustausch das Quellvermögen der Bentonitmatten reduziert und zusätzlich zu Austrocknung und Durchwurzelung deren Dichtwirkung reduziert. Die Befunde an tonhaltigen Dichtungen und Bentonitmatten wurden ausführlich publiziert und diskutiert. 2002 fand ein Workshop der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik zum Austrocknungsverhalten von mineralischen Dichtungen statt, in dessen Tagungsband der Kenntnisstand detailliert dokumentiert wurde.

Eine in der Praxis umfassend erprobte und allgemein akzeptierte Methodik der Nachweisführung für einen ausreichenden Schutz von tonhaltigen mineralischen Dichtungen vor Durchwurzelung, Austrocknung und Ionenaustausch konnte bislang nicht gefunden werden. Hauptursache hierfür ist die nicht prognostizierbare Entwicklung des Bewuchses und seiner Wurzelverteilung (siehe oben). Es ist jedoch bekannt, dass die verschiedenen tonhaltigen Materialien und Systeme sehr unterschiedlich auf Austrocknung und Ionenaustausch reagieren. Wir haben daher in den letzten rund zehn Jahren vergleichende Untersuchungen in sogenannten „Trocken-Nass-Prüfzellen“ durchgeführt (Bild 3, vgl. Steinert et al. 2002), in denen Proben aus mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten unter permanenter Auflast und unter Einwirkung ionenhaltigen Prüfflüssigkeiten zyklisch ausgetrocknet und wiederbefeuchtet wurden, so dass im Zuge der Wiederbefeuchtung geprüft werden konnte, ob die Dichtwirkung der Proben nachgelassen hatte. Die Auflast wurde in den Versuchen mit 16 kN/m² auf den mineralischen Dichtungen und 26 kN/m² bei den Bentonitmatten eingestellt. Als Prüfflüssigkeit wurde Wasser aus der Oberflächendränage der Deponie Georgswerder mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 1130 µS/cm (pH 7,8, Sulfat 314 mg/l, Calcium 203 mg/l) eingesetzt. Es wurden bis zu neuen Trocken-/Nasszyklen unterschiedlicher Dauer und Intensität durchfahren.

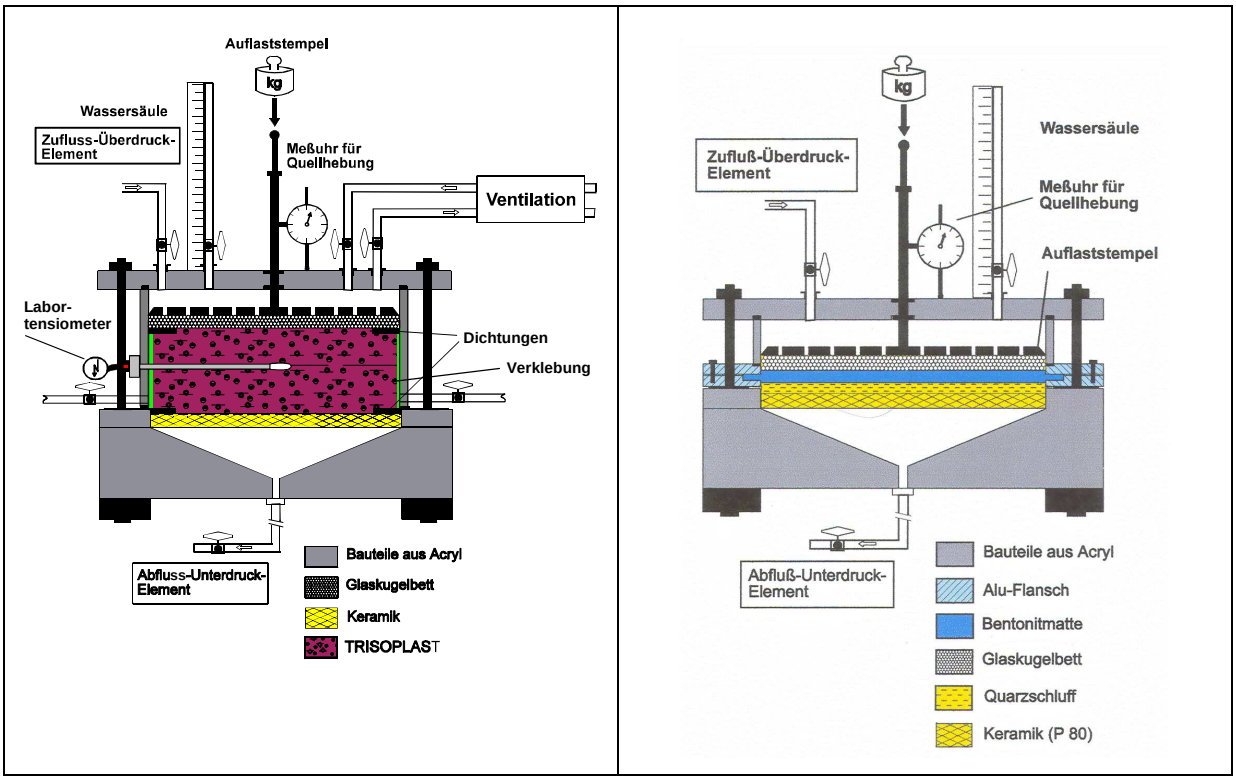

Bild 4 Aufbau der Trocken-Nass-Prüfzellen zur Untersuchung des Austrocknungsverhaltens von mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten unter Auflast und bei Beaufschlagung ionenreicher Prüfflüssigkeiten

Die Ergebnisse der Versuche in den Trocken-Nass-Prüfzellen können wie folgt zusammengefasst werden:

- In den Laborversuchen konnte das in den Testfeldern auf der Deponie Georgswerder festgestellte Austrocknungs- und Schrumpfverhalten der Geschiebemergeldichtung reproduziert werden. Austrocknungsbedingte Risse traten in den Laborproben nach Erreichen gleicher Wasserspannungen (600 hPa) auf, wie sie im Feld gemessen wurden. Die Risse bewirkten sehr hohe Wasserdurchlässigkeiten (Ausgangswert k_f = 2 x 10^{-10} m/s, Durchströmung zu Beginn der Wiederbefeuchtung 2 x 10^{-4} m³/(m²xs), nach 10 Tagen konstant k_f = 3 x 10^{-7} m/s). Die Schäden waren irreversibel. Dieser Vergleich zeigt, dass die Versuchsanlage für den Nachweis solcher Prozesse geeignet ist.
- Der smektitreiche Schlieper Ton verhielt sich während der Austrocknung annähernd wie der Geschiebemergel (Ausgangswert k_f = 9 x 10^{-12} m/s, Durchströmung nach Austrocknung auf 600 hPa bis 800 hPa zu Beginn der Wiederbefeuchtung 4 x 10^{-4} m³/(m²xs)). Die Schäden waren jedoch nicht irreversibel und die Probe zeigte nach sehr langer Zeit (viele Tage bis Wochen) eine Rückquellung. Unter Feldbedingungen reichen Wasserangebot und Zeit vermutlich jedoch nicht für eine erfolgreiche Rückquellung aus.

- Die untersuchten Bentonitmatten wiesen nach der Entwässerung zunächst wie der Geschiebemergel und der Schlieperton extrem hohe Durchströmungsraten auf (1 x 10^{-6} m³/(m²xs) bis 1 x 10^{-4} m³/(m²xs)), die im Zuge der Bewässerung nach den ersten Entwässerungsphasen zunächst über mehrere Tage und Wochen durch Quellungsprozesse wieder zurückgingen. Die untersuchte Ca-Bentonitmatte erreichte ihre niedrige Ausgangsdurchlässigkeit allerdings nicht wieder (k_f > 1 x 10^{-6} m/s). Bei der untersuchten Na-Bentonitmatte lies die anfänglich noch schnelle und ausgiebige Rückquellung mit steigender Zahl an Trockenphasen und fortschreitendem Ionenaustausch nach, so dass in der Wiederbefeuchtungsphase jeweils einige Millimeter Wasser durch die Probe strömten, bevor sie wieder dichtwirksam wurde. Der Ionenaustausch war nach dem letzten Zyklus der Untersuchung noch nicht abgeschlossen.
- Trisoplast hat sich in den Versuchen als einziges Material als unempfindlich gegen Austrocknung und Schrumpfung erwiesen. Die Trockenphasen waren zum Teil sehr lang (bis zu einem Jahr). Es wurden Wasserspannungen von mindestens 1.500 hPa schadlos überstanden (Wasserdurchlässigkeit auch am Ende der Versuche noch bei k_f = 6 x 10^{-11} m/s.

In den letzten Jahren wurde in Freilandversuchen beobachtet, dass bestimmte bentonithaltige Dichtungen ihre im Labor gemessene und in den jeweiligen Eignungsbeurteilungen der LAGA positiv bewertete Dichtwirksamkeit nicht entfalten können, wenn ihre Erstquellung mit ionenreichem Bodenwasser erfolgt. Ionenreiche Bodenwässer (auch als „Bodenlösung“ bezeichnet) sind nicht ungewöhnlich, denn sowohl natürliche Böden als auch Rekultivierungsschichten enthalten eine große Zahl von Stoffen als gelöste Ionen und Moleküle oder dispergierte Kolloide. Relevant sind insbesondere Calcium, Natrium, Chlorid, Sulfat und Carbonat, die wesentlich die elektrische Leitfähigkeit der Bodenlösung steuern, sowie Eisenverbindungen und Huminstoffe. In natürlichen Böden schwankt die elektrische Leitfähigkeit der Bodenlösung in der Regel zwischen 100 µS/cm und 2.000 µS/cm). In Entwässerungsschichtabflüssen von realisierten Oberflächenabdichtungssystemen haben wir häufig vor allem direkt nach der Herstellung höhere elektrische Leitfähigkeiten zwischen 1.000 µS/cm und 5.000 µS/cm gemessen. Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse führen wir seit einigen Jahren in den schon genannten Trocken-Nass-Prüfzellen Versuche durch, bei denen wir die Proben gezielt mit unterschiedlich konzentrierten Prüflösungen quellen lassen und auf ihre Durchlässigkeit prüfen. Wir setzen dabei Salzlösungen aus $CaCl_2$ mit einer Molarität von 0,005 mol/l $CaCl_2$, 0,025 mol/l $CaCl_2$ und 0,05 mol/l $CaCl_2$ ein, die elektrische Leitfähigkeiten von etwa 1.000 µS/cm, 5.000 µS/cm bzw. 10.000 µS/cm aufweisen, um die in der Realität mögliche Spannweite abzudecken und für die verschiedenen Abdichtungsprodukte vergleichend zu ermitteln bis zu welcher Salzbelastung der Bodenlösung sie noch planmäßig abdichten. Bislang können wir aus den Untersuchungen folgendes Zwischenfazit ableiten:

- Trisoplast überstand die Einwirkungen durch die Prüflösungen mit einer Molarität von 0,005 mol/l $CaCl_2$ und 0,025 mol/l $CaCl_2$ (entspricht mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 1.000 µS/cm und 5.000 µS/cm) ohne Probleme. Bei höheren Salzgehalten war

das Quellvermögen so beeinträchtigt, dass erhöhte Durchlässigkeiten gemessen wurden.

- Die von uns untersuchten Bentonitmattenprodukte überstanden alle die geringen Einwirkungen mit einer Molarität von 0,005 mol/l $CaCl_2$ (elektrische Leitfähigkeit 1.000 µS/cm), wurden durch die Prüfflüssigkeit mit einer Molarität von 0,025 mol/l $CaCl_2$ (Leitfähigkeit 5.000 µS/cm) jedoch alle bereits kritisch beeinflusst. Im Detail unterschieden sich die Ergebnisse. Das Quellverhalten der Matten hängt von Art, Masse und Verteilung des Bentonits in der Matte sowie von ihrer Konstruktion ab.

Die LAGA befasst sich im Rahmen ihrer Eignungsbeurteilungen selbstverständlich mit diesen Zusammenhängen (vgl. Grundsätze der LAGA). Bild 5 zeigt, welche Schutzmaßnahmen gegen die beschriebenen Einwirkungen bei den unterschiedlichen bindigen mineralischen Abdichtungen für die Deponieklasse I nach den erteilten LAGA Eignungsbeurteilungen zu realisieren sind. Je nach Austrocknungs- und Rissgefährdung der jeweiligen Abdichtungskomponente sowie deren Empfindlichkeit gegen gelöste Salze werden unterschiedlich mächtige und salzbelastete Rekultivierungsschichten sowie zusätzliche Schutzschichten zum Feuchthalten der Dichtungsoberfläche gefordert.

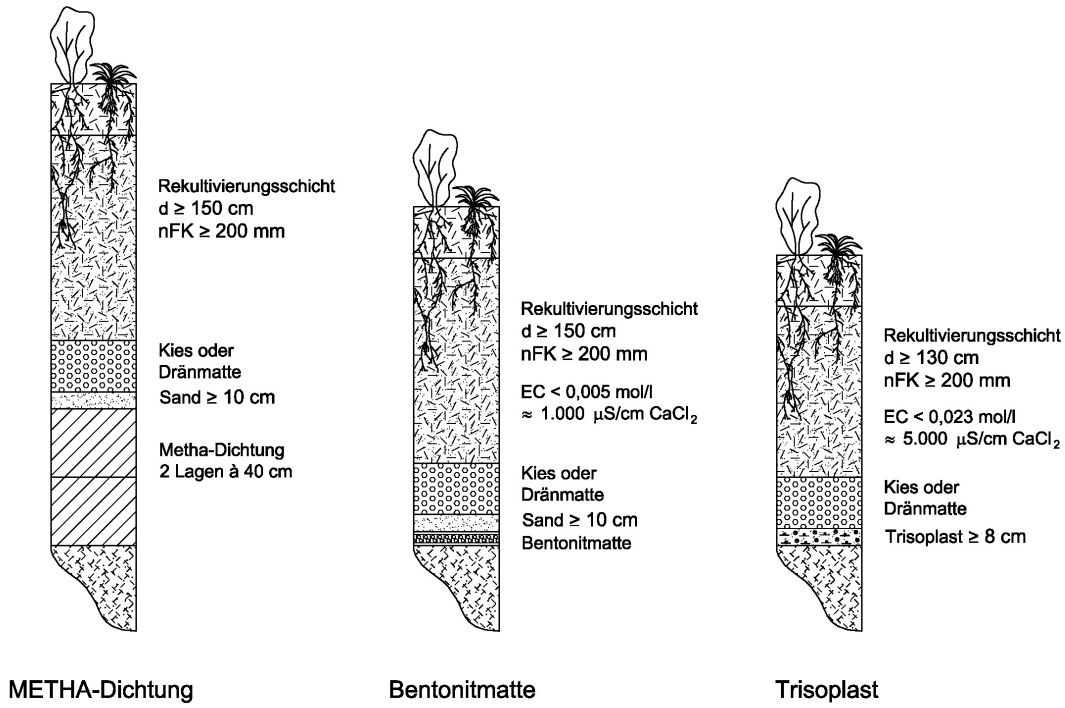

Bild 5 Mindestforderungen zum Schutz von mineralischen Abdichtungskomponenten nach den Eignungsbeurteilungen der LAGA

Bei Abdichtungssystemen, in denen die mineralische Abdichtungskomponente durch eine aufliegende KDB geschützt wird, wird demgegenüber in der Regel davon ausgegangen, dass die in der DepV (2009) genannten Mindestanforderungen an Rekultivierungs- und Entwässerungsschicht an allen Standorten in der Bundesrepublik Deutschland ausreichen (u.a. Mächtigkeit 1 m, nutzbare Feldkapazität 140 mm).

6 Konsequenzen für den Systemaufbau

Die Leistungsfähigkeit und Beständigkeit der technischen Abdichtungskomponenten stehen meist im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit bei der Weiterentwicklung von Oberflächenabdichtungssystemen. In einem möglichst langfristig wirksamen System müssen jedoch auch die anderen Systemkomponenten funktions- und standortgerecht bemessen werden und gut zusammenwirken, wobei sich die Frage stellt, wie lange Oberflächenabdichtungssysteme wirksam sein sollen. In anderen Ländern werden Rücklagen für die Erneuerung von Oberflächenabdichtungssystemen gebildet. Da das bei uns nicht der Fall ist, sollte das jetzt investierte Geld möglichst in ein System angelegt werden, das so lange wie möglich wirksam ist. Für den Systemaufbau können diesbezüglich aus Sicht des Autors folgende Konsequenzen abgeleitet werden:

- Es gibt derzeit noch immer kein allgemein anerkanntes Verfahren zum Nachweis der langfristigen Sicherheit einer tonhaltigen mineralischen Abdichtungskomponente vor Austrocknung und Durchwurzelung, sofern die mineralische Dichtung nicht durch eine Kunststoffdichtungsbahn vor den Einwirkungen aus den Deckschichten geschützt wird. Da die Vegetationsentwicklung und somit auch die Wurzelentwicklung nicht zuverlässig geplant werden kann und man in der Regel nicht willens ist, mehrere Meter mächtige Rekultivierungsschichten zu bauen, wird sich an der Schwierigkeit der Nachweisführung auch nichts ändern. Die LAGA hat für mineralische Abdichtungskomponenten in den jeweiligen Eignungsbeurteilungen Mindestanforderungen an den Schutz vor Austrocknung formuliert. Erstaunlicherweise werden diese Schutzmaßnahmen nicht gefordert, wenn die mineralische Abdichtungskomponente im System für die Deponieklassen II oder III unter einer KDB liegt. Daraus kann gefolgert werden, dass die mineralische Abdichtungskomponente unter einer KDB nicht länger wirksam sein muss als die KDB. Warum wird sie dann gefordert und gebaut? Wenn es nur um die zusätzliche Abdichtung von einbaubedingten Fehlstellen in der KDB geht, würde es vermutlich reichen, die zweite Abdichtungskomponente unter der KDB nur dort einzubauen, wo viel Wasser fließt (am Böschungsfuß und vor allem unter den Randgräben zur Fassung des Dränabflusses). Warum wird das in die zweite Abdichtungskomponente fließende Geld nicht besser in die Optimierung von Bewuchs und Rekultivierungsschicht gesteckt (oder eingespart)?
- Trocken oder relativ trocken eingebaute bentonitgestützte mineralische Abdichtungskomponenten müssen quellen, um ihre Dichtwirksamkeit zu entfalten. Diese Erstquellung erfolgt im eingebauten Oberflächenabdichtungssystem nicht mit destilliertem Wasser, sondern durch Bodenwasser, das gelöste Salze enthält und ggf. eine erhebliche elektrische Leitfähigkeit aufweist. Diese gelösten Salze beeinflussen die Erstquellung unterschiedlicher tonhaltiger mineralischer Abdichtungen. Die Produkte reagieren auf diese Einwirkung unterschiedlich. Feldversuche haben gezeigt, dass solche bentonitgestützten Systeme u.U. sehr viel schlechter funktionieren als man das aufgrund der Erkenntnisse aus Laborversuchen erwartet. In der Vergangenheit wurde bei der Eignungsprüfung von mineralischen Dichtungsprodukten vor allem der Ein-

fluss von Ionenaustausch auf die Dichtigkeit geprüft, wobei die Proben zunächst mit demineralisiertem Wasser oder mit Leitungswasser gequollen wurden, bevor der Ionenaustausch durchgeführt wurde. In der Zukunft sind Versuche durchzuführen, bei denen bereits die Erstquellung und die resultierende Dichtwirkung bei Zugabe unterschiedlich konzentrierter Bodenlösungen untersucht werden.

- Rekultivierungsschicht und Entwässerungssystem müssen aufeinander abgestimmt sein. Dies gilt in zweierlei Hinsicht:
  - Bei der hydraulischen Bemessung des Entwässerungssystems wird als Lastfall eine Dränspende von mindestens 25 mm/d angesetzt. Es sind Beispiele bekannt, bei denen auch höhere Dränspenden gemessen wurden. Auf steilen Böschungen kann der Rückstau von Wasser im Entwässerungssystem oder in der Rekultivierungsschicht die Standsicherheit des Oberflächenabdichtungssystems beeinträchtigen. Um dies zu verhindern, muss sowohl das Entwässerungssystem die genannte Dränspende ohne Volleinstau auf der gesamten Böschungslänge ableiten können als auch die Rekultivierungsschicht so wasserdurchlässig sein, dass es keinen Rückstau in der Rekultivierungsschicht geben kann. Bei Ansatz einer Dränspende von 25 mm/d und einer Alterungsreserve von einer Zehnerpotenz muss die Durchlässigkeit der Rekultivierungsschicht dann mindestens $k_f \geq 3 \times 10^{-6}$ m/s betragen.
  - Um der Verockerung des Entwässerungssystems vorzubeugen, sollte der Gehalt an oxalatlöslichem Eisen in der Rekultivierungsschicht begrenzt werden. Wir haben die Erfahrung gemacht, dass Rekultivierungsböden mit einem Anteil an oxalatlöslichem Eisen von über 1,5 g/kg erheblich Eisen freisetzen können. Eine Verbesserung der Datenlage wäre zur Ableitung eines diesbezüglichen Grenzwertes wünschenswert.
- Langfristig gehen wir davon aus, dass technische Systeme irgendwann durch Alterungsprozesse ihre Wirksamkeit einbüßen. Es stellt sich dann die Frage, ob und wann das Versagen des Systems bemerkt werden wird und ob sich jemand für die Instandsetzung der Oberflächenabdichtung verantwortlich fühlen wird. Letzteres wird eher der Fall sein, wenn die Fläche wirtschaftlich genutzt wird, sei es zum Anbau nachwachsender Rohstoffe, zur Energiegewinnung, für andere gewerbliche Zwecke oder zur Freizeitgestaltung und Naherholung. Sollte kein Nachnutzer oder anderweitig Sanierungspflichtiger für die Instandsetzung verantwortlich sein, wird die Infiltration von Wasser durch die beschädigte Dichtung in den schadstoffbelasteten Deponiekörper vor allem davon abhängen, wieviel Wasser durch den Rekultivierungsboden zwischengespeichert und durch den Bewuchs verdunstet wird. Gehölze sind diesbezüglich wesentlich leistungsfähiger als Grünland. Sie sind in der Regel auch aus gestalterischer Sicht attraktiv. Der gegenwärtig weit verbreitete Ansatz, das Oberflächenabdichtungssystem ohne weitere Nachnutzung dauerhaft zu pflegen und einen Gras-/Krautbewuchs ohne Gehölze durch Mahd bis in alle Ewigkeit aufrecht zu erhalten erscheint ein wenig weltfremd und sollte überdacht werden.

Die Systemzusammenhänge sollten nicht nur berücksichtigt werden, um schädliche Einwirkungen aus natürlichen Prozessen zu vermeiden. Die natürlichen Prozesse sollten vielmehr in der Gestaltung der Systeme standortgerecht und mit Bezug auf gewünschte Folgenutzung positiv genutzt werden. Auf diese Weise können unnötige Komponenten vermieden, die Funktionsdauer des Gesamtsystems erhöht und attraktive Folgenutzungen gut vorbereitet werden.

7 Literatur

DEPV - DEPONIEVERORDNUNG (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager BGBI. I, Nr. 22, S. 900

DGGT - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2010): GDA Empfehlung E2-20 Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen. (www.gdaonline.de – dort noch Stand 2003; aktueller Stand 2011 noch nicht online verfügbar)

LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNISCHE VOLLZUGSFRAGEN“ (bis 2009): Grundsätze und Eignungsbeurteilungen von mineralischen Komponenten von Deponieoberflächenabdichtungssystemen (www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de)

LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (ab 2010): Bundeseinheitliche Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen von mineralischen Komponenten von Deponieabdichtungssystemen (www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de und www.laga-online.de)

MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation an der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 S. und Anhang.

MELCHIOR, S., V. SOKOLLEK, K. BERGER, B. VIELHABER & B. STEINERT (2010): Results from 18 Years of In Situ Performance Testing of Landfill Cover Systems in Germany. Journal of Environmental Engineering, 136, 8, 815 – 823.

MELCHIOR, S., B. STEINERT & S. RAABE (2010): Ergebnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz. Tagungsband 21. Nürnberger Deponieseminar, 105-118

RAMKE, H.-G. et al. (2002): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Status-Workshop der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik 31.01./01.02.2002 in Höxter. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, 3, 474 S.

STEINERT, B., O. FLÖTER & S. MELCHIOR (2002): Vergleichende Laboruntersuchungen des Austrocknungs- und Durchwurzelungsverhaltens von bindigen mineralischen Dichtungen aus Geschiebemergel und Trisoplast. In RAMKE et al. (2002) Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, 3, 317 – 330.

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl
Ingenieurgesellschaft

Karolinenstraße 6, 20144 Hamburg
T.: 040 / 430 950 - 10
E-Mail: melchior (at) mplusw.de **www.mplusw.de**