

# Erfahrungen mit herkömmlichen und modifizierten mineralischen Oberflächenabdichtungen

Stefan Melchior <sup>1</sup>

<b>INHALT</b>	<b>Seite</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>2 ERFAHRUNGEN MIT HERKÖMMLICHEN MINERALISCHEN OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN .....</b>	<b>2</b>
<b>3 KONZEPTE ZUR MODIFIKATION MINERALISCHER DICHTUNGEN .....</b>	<b>6</b>
3.1 Zugabe von Tonmehl oder Bentonit .....	8
3.2 Zugabe von Montanwachs .....	8
3.3 Zugabe von flüssigem Natriumsilikat mit Gelbildnern.....	8
3.4 Zugabe von pulverförmigem Wasserglas .....	9
3.5 Reststoffdichtung.....	10
3.6 Bentokies.....	11
3.7 DYWIDAG-Mineralgemisch („Trockendichtung“).....	11
3.8 Trisoplast® .....	12
<b>4 FAZIT UND AUSBLICK.....</b>	<b>13</b>
<b>5 LITERATUR.....</b>	<b>15</b>

---

1



**melchior + wittpohl**  
Ingenieurgesellschaft

Karolinenstraße 6 • 20357 Hamburg • Tel.: 040 / 430 950-0 • Fax: 040 / 430 950-20 • melchior@mplusw.de

## 1 Einleitung

Tonhaltige Erdstoffe werden traditionell im Wasserbau als Dichtungen eingesetzt und haben daher auch im Deponiebau eine weite Verbreitung als sogenannte mineralische Dichtungen gefunden. Um sie von den ebenfalls mineralischen Kapillarsperren zu unterscheiden, werden sie auch als bindige mineralische Dichtungen bezeichnet. Die herkömmliche bindige mineralische Dichtung wird „auf dem nassen Ast“ der Proctorkurve eingebaut, d.h. der Wassergehalt liegt über dem im Proctorversuch ermittelten optimalen Wassergehalt. Die Anforderungen an die Materialeigenschaften, Herstellung und Qualitätssicherung von bindigen mineralischen Dichtungen sind z.B. in der TA Siedlungsabfall (1993) aufgelistet, die eine zweilagige bindige mineralische Dichtung als Regeloberflächendichtung für Deponien der Klasse I fordert. Bindige mineralische Dichtungen werden außerdem unter einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) in der Kombinationsdichtung eingesetzt (Deponieklasse II und Deponien nach TA Abfall, 1991).

Durch Untersuchungen in den letzten rund 15 Jahren und Praxiserfahrungen ist die herkömmliche bindige mineralische Dichtung begründet in die Kritik geraten. Mittlerweile gibt es aber auch eine Reihe von innovativen Ansätzen zur Lösung der bekannten Probleme durch eine Veränderung der Einbautechnik und der Materialzusammensetzung. Der vorliegende Beitrag will nach einer kurzen Zusammenfassung der Erfahrungen mit der herkömmlichen bindigen mineralischen Dichtung die derzeit verfügbaren modifizierten mineralischen Dichtungen vorstellen.

## 2 Erfahrungen mit herkömmlichen mineralischen Oberflächenabdichtungen

Im Deponiebau wurde die bindige mineralische Dichtung zunächst in der Basisabdichtung eingesetzt. Dort hat sie neben der Abdichtung gegen Wassertransport auch die Aufgabe der Schadstoffrückhaltung zu übernehmen. Als Anfang der 80er Jahre die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten stärker in den Vordergrund trat, wurden die in der Basisabdichtung bewährten Systeme (mineralische Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn) auch für diese Aufgabe herangezogen. Als Vorteil der bindigen mineralischen Dichtung wurde seinerzeit vor allem ihre vermeintliche Unempfindlichkeit gegen Verformung und die große Langzeitbeständigkeit des natürlichen Materials hervorgehoben. Wenig Beachtung fanden dabei die in der Oberflächenabdichtung im Vergleich zur Basis sehr unterschiedlichen Milieubedingungen, insbesondere die wasserungesättigten Verhältnisse, die Einwirkungen von Pflanzen und Tieren und der jahreszeitlich schwankende Temperaturverlauf.

1986 wurden auf der Deponie Hamburg-Georgswerder im Rahmen eines durch die Umweltbehörde Hamburg und das Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben umfangreiche In-situ-Untersuchungen an verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen in Testfeldern begonnen, die z.T. noch heute laufen (6 Testfelder mit bindigen mineralischen Dichtungen, Kombinationsdichtungen und der Kapillarsperre, seit 1994 auch Felder mit Bentonitmatten). Melchior (1993, 1996, 1998a,b und 1999b) und Vielhaber (1995) dokumentieren diese Testfelduntersuchungen ausführlich. Zur Überprüfung der Ergebnisse zur bindigen mineralischen Dichtung und ihrer Übertragbarkeit auf andere Fälle wurden zahlreiche Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Dichtungen durchge-

führt (Ergebnisse in Melchior 1996, 1998a und 1999a). Die Ergebnisse der Untersuchungen zur bindigen mineralischen Dichtung können wie folgt zusammengefasst werden:

- In den Testfeldern Georgswerder wurden Dichtungen aus Geschiebemergel untersucht. Das Material ist leicht plastisch, relativ tonarm mit weit gestuftem Kornaufbau und wurde auf der nassen Seite des optimalen Wassergehalts auf geringe Porenvolumina und eine geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit ( $2 \cdot 10^{-10}$  m/s) verdichtet. Die Dichtungen wurden mit einer Entwässerungs- und einer Rekultivierungsschicht (insgesamt 1,0 m) überdeckt.
- Die untersuchten mineralischen Dichtungen sind innerhalb weniger Jahre durch Wasserabgabe an die Deckschichten ausgetrocknet und haben ein Rissgefüge entwickelt, das sich auch bei Wiederbefeuchtung nicht mehr geschlossen hat. Die Wasserdurchlässigkeit hat sich dadurch um das 200fache bis 500fache auf Werte zwischen  $5 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s) und  $1 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s) erhöht. Jährlich sickern mittlerweile rund 200 mm/a durch die Dichtungen, das sind über 50 % des Wassers, das die Dichtung erreicht. Durch die Wasserentnahme von Pflanzenwurzeln, die z.T. massiv in die Dichtungen eingewachsen sind, haben sich die Schäden weiter verstärkt.
- Die seit 1994 unter einer geringeren Überdeckung (0,45 m) unter Zeitrafferbedingungen untersuchten Bentonitmatten haben sich ähnlich verhalten. Auch hier führten Austrocknung, Rissbildung und Durchwurzelung sehr schnell zu drastisch erhöhten Durchsickerungsraten. Die beobachteten Schäden waren irreversibel, u.a. weil die Quelfähigkeit des Bentonits durch Ionenaustausch (Natriumbentonit → Calciumbentonit) stark reduziert wurde.
- Die besten Ergebnisse wurden mit der Kombinationsdichtung erzielt, da die Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) fehlerfrei installiert wurden. Die mineralischen Dichtungen sind zudem unter den KDB vor einer Wasserabgabe an die im Sommer trockenen Deckschichten und vor Durchwurzelung geschützt. Es wurden lediglich sehr schwache jahreszeitliche Austrocknungszyklen beobachtet, die durch temperaturabhängige Wasserflüsse erklärt werden können und über viele Jahrzehnte für die mineralische Dichtung vermutlich unkritisch sind (Melchior 1993, Vielhaber 1995, Stoffregen et al. 1999). Sollte die KDB jedoch langfristig durch Alterung flächig versagen, so ist die mineralische Dichtung dann ebenfalls der Austrocknung und Durchwurzelung ausgesetzt, sofern diese Einwirkungen nicht durch die Wahl entsprechender Randbedingungen (Überdeckungsmächtigkeit) ausgeschlossen sind.

Da der Austrocknungs- und Schrumpffgefährdung der bindigen mineralischen Dichtungen besondere Bedeutung zukommt, seien nachfolgend die wichtigsten daran beteiligten Teilprozesse kurz erläutert:

- Die überdeckenden Schichten (Rekultivierungsschicht und Entwässerungsschicht) trocknen im Sommer infolge der Verdunstung stark aus, so dass hohe Wasserspannungen entstehen können, die einen Wassertransport in flüssiger Phase von unten nach oben antreiben.
- Wenn in den überdeckenden Schichten hohe Wasserspannungen auftreten, sinkt der relative Dampfdruck in der Bodenluft, so dass das Bodenwasser auch in die Bodenluft verdunstet

kann, sofern z.B. in grobkörnigen Entwässerungsschichten ein konvektiver Luftaustausch stattfindet.

- Bereits geringe Abnahmen des Wassergehalts verursachen in der bindigen mineralischen Dichtung sehr hohe Wasserspannungen (Kapillarkräfte), die als Zugspannungen auf die Bodenpartikel wirken und ein Reißen des Dichtmaterials an den Orten der geringsten Kohäsion bewirken können, so dass ein Absonderungsgefüge mit feinen Rissen zwischen den entstandenen Bodenaggregaten entsteht. Solche Risse stehen fortan als bevorzugte Wasserleitbahnen und als leicht zu erschließender Wurzelraum für die Pflanzenwurzeln zur Verfügung
- Pflanzenwurzeln, die in die Entwässerungsschicht und in die Dichtung reichen, können dort direkt Wasser aufnehmen und dem Boden entziehen. Die Messdaten und die Ergebnisse der Aufgrabungen zeigen jedoch, dass eine austrocknungsbedingte Schädigung einer mineralischen Dichtung bereits ausschließlich durch flüssige oder dampfförmige Wasserabgabe ohne direkte Einwirkung von Pflanzenwurzeln erfolgen kann.

Nach der Bildung der ersten Risse setzen weitere Prozesse ein, die die Rissbildung verstärken und eine Rückkehr der Dichtung zum unbeschädigten Ausgangszustand verhindern:

- Im Zuge der Austrocknung können sich die Partikel an der Oberfläche der Bodenaggregate aufgrund der veränderten Verteilung der Oberflächenladungen in ihrer Umgebung und aufgrund des Fehlens der zuvor risseitig herrschenden Kohäsion zu den benachbarten Partikeln neu einregeln.
- Bei der anschließenden Quellung können, ähnlich wie in natürlichen montmorillonitreichen Böden (Vertisolen), zwischen den Bodenaggregaten Scherbewegungen auftreten, die ebenfalls die Einregelung der Partikel an der Oberfläche der Gefügekörper verändern.
- Entlang der Risse kann verstärkt Bodenluft in die Dichtung eindringen. Dies kann zum einen die Austrocknung verstärken und zum anderen Sauerstoff heranzuführen und das Redoxpotential an der Oberfläche der Bodenaggregate erhöhen. Im Aggregatinneren gelöstes zweiwertiges Eisen gelangt durch Diffusion und konvektiv aufgrund des Matrixpotentialgradienten an die Aggregatoberfläche und fällt dann dort als dreiwertiges Eisen aus. Diese Eisenüberzüge stellen fortan Trennflächen dar, die die Quellung, den Wassertransport in die Bodenaggregate und das Schließen der Risse nach Quellung behindern.
- In den Rissen können Fremdstoffe mit dem Wasserfluss sowohl partikulär (Schluff und Feinsand, entsprechende Rissweiten vorausgesetzt) als auch im Wasser gelöst (Ton-Humus-Komplexe, Metalloxide, Carbonate) in die Dichtung eingetragen werden und sich dort auf den Aggregatoberflächen ablagern bzw. ausgefällt werden.
- In die Risse eingewachsene Pflanzenwurzeln stellen Fremdkörper dar, die ein Schließen der Risse nach Quellung behindern und nach ihrem Absterben ggf. abgebaut werden können, so dass entsprechende Hohlräume entstehen.

- Aufgrund der im Zuge der Schrumpfung herrschenden Zugspannungen rücken die Bodenpartikel im Inneren der Bodenaggregate dichter zusammen, so dass hier das Porenvolumen zugunsten der Schrumpfrisse abnimmt. Die Wasserleitfähigkeit nimmt im Inneren der Bodenaggregate im Zuge der Schrumpfung folglich ab.
- Die Bildung kontinuierlich durch die Dichtung reichender Risse verändert schließlich den gesamten Bodenwasserhaushalt der Dichtung. Im Winterhalbjahr in die Dichtung infiltrierendes Wasser befeuchtet diese nicht mehr gleichmäßig, indem es sich von der Oberfläche aus langsam entlang des Potentialgradienten verteilt, es versickert vielmehr schnell entlang der Risse in die Tiefe. Die Transportgeschwindigkeit ist entlang der wiederbefeuchteten Risse um ein Vielfaches höher als in die feinporigen und noch relativ trockenen Bodenaggregate hinein. Das Sickerwasser verlässt die Dichtung folglich relativ schnell, so dass die Zeit für eine Wassernachlieferung in das Aggregatinnere mit zunehmender Rissbildung immer kürzer wird.

Die genannten Prozesse bewirken mit zunehmender Dauer, Intensität und Anzahl von Trockenphasen, dass die gebildeten Risse während der Feuchtphasen immer weniger durch Quellung geschlossen werden können.

Die in den Untersuchungen auf der Deponie Georgswerder dokumentierte sehr schnelle Schädigung der bindigen mineralischen Dichtungen durch Austrocknung, Schrumpfung und Durchwurzelung war für die Fachöffentlichkeit überraschend, insbesondere auch weil die Randbedingungen der Untersuchung keineswegs als kritisch und austrocknungsfördernd einzustufen waren (Hamburg weist kein besonders trockenes Klima auf, die Testfelder sind nordexponiert, die Vegetation ist nicht besonders wasserverbrauchend, das Dichtmaterial enthält wenig stark quell- und schrumpffähige Tonminerale und ist gemischtkörnig, die Einbautechnik entsprach dem Stand der Technik und erfolgte qualitätsgesichert). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde kontrovers diskutiert. Mittlerweile liegen Befunde von zahlreichen anderen Deponien vor, die bestätigen, dass auch an anderen Standorten ähnliche Schäden auftreten können (siehe z.B. Rödl et al. 2000, Henken-Mellies 2001). Weitere Aufgrabungen zeigten, dass bei Weglassen der Entwässerungsschicht und in tonreicheren Dichtungen sogar gravierendere Schäden auftreten können (Melchior 1999a, Maier-Harth & Melchior 2001). Es gibt aber auch Standorte, an denen die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) positiver und die Wasserspeicherfähigkeit und Mächtigkeit der Deckschichten deutlich höher ist, so dass die Dichtungen vor den schädlichen Einwirkungen besser geschützt sind. (Die aufwendigere Gestaltung der Rekultivierungsschicht verursacht allerdings Kosten, die die Konkurrenzfähigkeit der bindigen mineralischen Dichtung zu anderen Systemen herabsetzt.)

Die Austrocknungsgefährdung der mineralischen Dichtung hat aber auch weitere Konsequenzen. Bislang wurde bei der Untersuchung und Abschätzung der rissfreien Verformbarkeit der mineralischen Dichtung immer von wassergesättigten Verhältnissen ausgegangen. Diese Annahme liegt jedoch nicht auf der sicheren Seite, es ist vielmehr davon auszugehen, dass die Verformung durch äußere Lasten oder Setzungsdifferenzen auf eine wasserungesättigte Dichtung mit einer höheren Festigkeit einwirkt, die sich möglicherweise spröde verhält.

Neben den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zeigen die Erfahrungen in der Praxis, dass der Einbau der mineralischen Dichtung sehr witterungsanfällig und mithin zeitaufwendig ist.

Zusammenfassend können die Hauptproblembereiche der herkömmlichen bindigen mineralischen Dichtung daher mit folgenden Stichworten umrissen werden:

- witterungsempfindlicher und zeitaufwendiger Einbau
- hoher Massenbedarf (Gewinnung, Transport und Lagerung) sowie Materialschwankungen in natürlichen Vorkommen (Eignungsprüfung und Qualitätssicherung)
- Rissgefährdung durch Austrocknung und Schrumpfung
- Gefährdung durch Pflanzenwurzeln und Bodentiere
- Rissgefährdung durch Verformung
- Reduktion des Quellvermögens durch Ionenaustausch, Gefügebildung sowie Eintrag oder Verlagerung von Oxiden, Carbonaten und Huminstoffen

Diese Probleme sind die Ansatzpunkte für die Entwicklung modifizierter mineralischer Dichtungen, die im folgenden vorgestellt werden sollen.

### **3 Konzepte zur Modifikation mineralischer Dichtungen**

Seitdem Zweifel an der langfristigen Beständigkeit von bindigen mineralischen Dichtungen in der Oberflächenabdichtung aufgekommen sind und die Herstellung einschließlich Materialgewinnung und –transport kritisch hinterfragt wird, wird versucht, der Austrocknungs- und Schrumpungsgefährdung durch technische Neuentwicklungen zu begegnen. Außerdem werden Ansätze verfolgt, Reststoffe in der mineralischen Dichtung einzusetzen. Diese unterschiedlichen Entwicklungen werden unter dem Begriff der modifizierten mineralischen Dichtungen zusammengefasst.

Die Modifikationen gegenüber der oben beschriebenen herkömmlichen bindigen mineralischen Dichtung können wie folgt klassifiziert werden:

- **Veränderung der Einbautechnik**

Ein Problem der herkömmlichen mineralischen Dichtung ist ihr Einbau auf dem nassen Ast der Proctorkurve. Die Einbauwassergehalte liegen damit in der Regel über den minimalen Wassergehalten, denen die Dichtung später ausgesetzt ist. Drei neue Systeme (DYWIDAG Mineralgemisch, Bentokies, Trisoplast®) setzen u.a. bei der Einbautechnik an und bauen das Material auf dem trockenen Ast der Proctorkurve ein. Dabei wird erwartet, dass die Dichtungen sozusagen „vorgespannt“ sind, d.h. bereits beim Einbau und im Zuge der Erstbefeuchtung nach Einbau hohe initiale Wasserspannungen erfahren und somit gegen spätere Jahreschwankungen der Wasserspannung weniger anfällig sind, solange die initialen Wasserspannungen nicht erreicht und überschritten werden.

- **Veränderung des Kornaufbaus**

An die Korngrößenverteilung und die Art der Körner werden bei der herkömmlichen mineralischen Dichtung kaum Anforderungen gestellt, einzig der Gesamttongehalt muss mindestens

20 Gew.-% betragen (wobei die Art der Tonpartikel offen bleibt). Bei drei modifizierten Dichtungen (Chemoton, DYWIDAG Mineralgemisch, Bentokies) werden spezielle weitgestufte Mischungen mit definierten Massenanteilen der einzelnen Größenklassen eingesetzt. Auf diese Weise sind sehr geringe Porenvolumina möglich, so dass für Schrumpfprozesse wenig Raum besteht. Diese Materialien und auch Trisoplast® werden in Mischanlagen qualitätsgesichert hergestellt, so dass eine viel genauere Steuerung der Materialeigenschaften als beim Einsatz natürlicher Böden möglich ist.

- **Vergütung mit Additiven**

Als Additive sind Tonminerale (u.a. Bentonite), Wachse (Montanwachs), pulverförmiges Natriumsilikat (System Kügler/Belouschek), flüssige Wasserglaslösungen mit Gelbildnern (DynagROUT, Chemoton) und Polymere (Trisoplast®) auf dem Markt. Durch den Einsatz von Additiven können einerseits Erdstoffe (oder Reststoffe), die allein nicht ausreichend dichtwirksam sind, entsprechend vergütet werden. Die Additive können aber auch die Materialeigenschaften der Mischungen so weitreichend verändern, dass sie sich von natürlichen Tonen grundsätzlich unterscheiden. Die Zugabe und Mischung der Additive erfolgen im einfachsten Fall durch Ausstreuen und Einfräsen („mixed-in-place“). In anderen Fällen werden die Stoffe in separaten Anlagen gemischt („mixed-in-plant“).

- **Einsatz von Reststoffen**

Es ist ein naheliegender Gedanke, Massenreststoffe, die aufgrund ihrer Schadstoffgehalte schlecht zu verwerten sind, in Deponieabdichtungen einzusetzen. In Hamburg werden beispielsweise sehr gute Erfahrungen mit Dichtungen aus teilentwässertem Gewässerschlamm (Hafenschlick) gemacht. Andernorts werden Schlämme aus der Papierherstellung zu Abdichtungszwecken eingesetzt. Die Eigenschaften solcher Schlämme sind mit denen herkömmlicher mineralischer Dichtungen kaum vergleichbar.

Es gibt außerdem eine Fülle von anderen Reststoffen, die für sich allein zwar noch keine ausreichende Dichtwirkung erwarten lassen, aber in Kombination mit anderen Stoffen durchaus eine interessante Dichtungsvariante darstellen können. Kügler & Belouschek haben sich diesen Ansatz zueigen gemacht und bieten ihre Wasserglasvergütung gezielt für sogenannte Reststoffdichtungen an, in denen Abfälle und Reststoffe wie Aschen, Stäube, behandelte Böden oder entwässerte Schlämme als Gerüst- oder Füllstoffe eingesetzt und mit Wasserglas vergütet werden.

Die oben geschilderten vier Ansätze für die Modifikation mineralischer Dichtungen können natürlich auch kombiniert werden. In der Praxis ist das auch der Fall. So werden mehrere Verfahren unter bestimmten Handelsnamen oder Typenbezeichnungen vermarktet, die sowohl bestimmte Additive enthalten als auch industriell mit definierten Korngrößenverteilungen in Mischanlagen hergestellt und mit speziellen, auf diese Mischungen zugeschnittenen Techniken eingebaut werden. Im folgenden werden diese Systeme gesondert vorgestellt.

### **3.1 Zugabe von Tonmehl oder Bentonit**

In der einfachsten Form werden natürliche Böden durch die Zugabe von Bentonit vergütet, um die Mindestforderung nach 20 Gew.-% Ton und die geforderten Durchlässigkeitsbeiwerte zu erfüllen. Natriumbentonit ist hierbei das am häufigsten eingesetzte Additiv, weil es aufgrund seiner gegenüber anderen Tonmineralen überragenden Quellfähigkeit bei gleicher Applikationsmenge die geringsten Durchlässigkeitsbeiwerte erwarten lässt (näheres siehe Koch 1995). In den Niederlanden wurden z.B. Sand-Bentonit-Dichtungen bereits frühzeitig in Feldversuchen untersucht und haben lange Zeit den Markt dominiert (vgl. Hoeks et al. 1987). Allerdings ist Natriumbentonit auch entsprechend austrocknungs- und schrumpfunggefährdet und kann durch Ionenaustausch einen erheblichen Teil seiner Quellfähigkeit einbüßen.

Gelegentlich werden auch andere Tonminerale als Additive zu Mineralstoffen genutzt, die bereits selbst eine relativ geringe Durchlässigkeit erwarten lassen.

Durch die Zugabe von Tonmineralen allein wird im Vergleich zur herkömmlichen mineralischen Dichtung nicht notwendigerweise eine bessere Qualität und Beständigkeit der modifizierten Dichtung erzielt. Wirtschaftlich kann dieses Vorgehen jedoch durchaus interessant sein, insbesondere wenn kostengünstige Gerüststoffe zur Verfügung stehen. Technisch-wissenschaftlich interessant wird die Zugabe von Tonmineralen jedoch erst in Kombination mit weiteren Modifizierungsmaßnahmen.

### **3.2 Zugabe von Montanwachs**

Montanwachs ist fossiles Pflanzenwachs aus dem Tertiär und wird als Nebenprodukt beim Braunkohleabbau gewonnen. Es wird für verschiedene Zwecke verwertet. Mitte der 90er Jahre wurde versucht, das Material unter den Handelsnamen Montax und Terran zur Vergütung von Erdstoffen zu bindigen mineralischen Dichtungen zu vermarkten. Montanwachs sollte demnach mit einem Anteil von rund 20 % als Dispersion zu einem gemischtkörnigen Boden zugegeben und die Mischung dann nach herkömmlicher Art auf dem nassen Ast der Proctorkurve verdichtet werden (näheres siehe Bilkenroth 1991). Montanwachs hat hydrophobe Eigenschaften, geht mit dem Korngerüst adhäsive Bindungen ein und kann daher Poren im Boden für den Wassertransport blockieren. Insofern hat das Additiv vielversprechende Eigenschaften. Die Zugabe von Montanwachsen zur Vergütung von mineralischen Dichtungen hat sich allerdings bislang nicht etablieren können. Dem Autor sind keine Referenzfälle bekannt, an denen Herstellung, Einbau, Wirksamkeit, Beständigkeit und sonstige Eigenschaften einer mit Montanwachs modifizierten Oberflächendichtung demonstriert worden wären.

### **3.3 Zugabe von flüssigem Natriumsilikat mit Gelbildnern**

Flüssige Natriumsilikatlösungen (Wasserglas) werden zusammen mit organischen und anorganischen Gelbildnern (Phosphate, Silane, Ammoniumchloride) als Injektionsmittel und Dichtmassen im Spezialtiefbau für verschiedene Zwecke genutzt. Sie unterscheiden sich je nach Anwendungszweck und Hersteller in ihrer Rezeptur und werden z.B. unter den Handelsnamen DynagROUT und Poly-Quat angeboten (siehe z.B. Hass & Orlia 1992). In der einfachen Anwendungsform werden



flüssiges Wasserglas und Gelbildner natürlichen gemischtkörnigen Böden zugegeben, deren Korngrößenverteilung sich der Fullerkurve anlehnt. Im Boden entsteht eine amorphe Netzstruktur aus polymeren Silikaten, zwischen die Bodenwasser eingelagert wird. Dieses Hydrosilikatgel verstopft die wasserleitenden Poren und reduziert dadurch die Durchlässigkeit dieser Böden. Zur Gelbildung tragen jedoch nicht nur die bewusst zugesetzten Gelbildner bei, sondern auch andere im Boden vorhandene Stoffe (Metalloxide, Carbonate, Huminsäuren), die auch unerwünschte Reaktionen, etwa die Schrumpfung des Gels (Synärese) bewirken können. Bei der Vergütung natürlicher Böden sind daher entsprechende Vorversuche und Eignungsnachweise zu führen. Üblicherweise werden folglich vorkonfektionierte Mineralgemische bekannter Zusammensetzung in Anlagen gemischt und mit Hydrosilikatgelen vergütet. Ein solches Gesamtsystem wird unter dem Namen Chemoton angeboten (Lauf & Kostiak 1995).

Chemoton besteht aus drei Grundkomponenten: einem kaolinitischem Tonmehl (> 12 % der Festsubstanz), einem Mineralgemisch (je nach Größtkorn als GK 8, 16 oder 32 bezeichnet) und dem DynagROUT-Gel. Der Gelgehalt orientiert sich dabei am Proctorversuch und liegt auf dem nassen Ast der Kurve. Das Gel besteht aus über 80 % aus Wasser. Chemoton wurde 1998 durch das Deutsche Institut für Bautechnik bauaufsichtlich für die Anwendung in Deponieabdichtungen nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall zugelassen (DIBt 1998b). Der Zulassung können die einzuhaltenden Eigenschaften und die erforderlichen Angaben zu Bemessung, Herstellung, Einbau und Qualitätssicherung detailliert entnommen werden. Als Mindestschichtdicke fordert die Zulassung bei der Oberflächenabdichtung 30 cm, einbaubar in zwei Lagen.

Positiv ist bei Chemoton hinsichtlich der Schrumpfunggefährdung zu bewerten, dass als Tonmehl ein Kaolinit und kein Bentonit eingesetzt wird. Dieser Vorteil wird allerdings dadurch kompensiert, dass das Material relativ feucht eingebaut wird und das Gel Wasser abgeben und schrumpfen kann. Allerdings ist es denkbar, dass die Wasserabgabe durch die Füllung der Poren mit dem Gel im Vergleich zur herkömmlichen mineralischen Dichtung verzögert wird. Entsprechende Nachweise wurden bislang aber nicht geführt.

Haupteinsatzgebiet von Chemoton ist die Basisabdichtung. Bei der Oberflächendichtung hat sich das Verfahren bislang vermutlich aus wirtschaftlichen Gründen nicht etablieren können.

### **3.4 Zugabe von pulverförmigem Wasserglas**

Wasserglas kann auch pulverförmig in den zu vergütenden Boden zugegeben werden. Ziel ist die Bildung einer 5 %igen Wasserglaslösung im Bodenwasser. Dazu werden in der Regel pro Lage und Quadratmeter 2,5 kg bis 4,0 kg Wasserglaspulver eingefräst. Das Pulver wird im Bodenwasser langsam gelöst und anschließend im Zusammenwirken mit den natürlicherweise im Boden vorhandenen Gelbildnern zu Kieselsäuresol und -gel kondensiert. Dieses von Kügler & Belouschek propagierte Vorgehen wird seit vielen Jahren durchgeführt, um an sich nicht hinreichend geeignete Erdstoffe als Dichtmaterialien verwenden zu können. Belouschek & Kügler (1993) nennen Durchlässigkeitsbeiwerte um  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s.

Außer der Verringerung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte werden die bodenmechanischen Eigenschaften der Böden durch die Wasserglaszugabe nicht notwendigerweise verbessert. Die Dich-

tungen bleiben schrumpfanfällig und können weiterhin durchwurzelt werden. Möglicherweise wird die Wasserabgabe der Dichtung verzögert. Nachweise hierfür liegen allerdings nicht vor, Laborversuche in der Arbeitsgruppe des Autors ergaben diesbezüglich keine Hinweise. Belouschek & Kügler (1993) setzen sich mit der Schrumpfanfälligkeit mineralischer Dichtung auseinander und schlagen ein System zur aktiven Rissicherung vor, das die Bewehrung der Dichtung durch ein Gewebe und den Einbau eines fließfähigen „Infiltrationsbodens“ mit geringer Kohäsion oberhalb der Dichtung vorsieht, aus dem Partikel ausgeschlämmt werden sollen, um dann in die Risse zu infiltrieren und diese zu verschließen. Dieses Konzept vermag insgesamt nicht zu überzeugen, u.a. da Schrumpfrisse bereits ab einer Breite von 10 µm als für die Dichtung kritische Grobporen anzusehen sind (mit dem Auge sind solche Risse noch nicht wahrnehmbar!) und Grobschluff und Feinsandpartikel aufgrund ihrer Größe in solche Risse nicht hineinpassen. Auch für das Konzept der aktiven Rissicherung sind noch belastbare Nachweise zu führen.

Das Verfahren nach Kügler/Belouschek ist kostengünstiger als die Zugabe von flüssigem Natriumsilikat, z.B. beim Chemoton. Es bietet aber auch weniger Kontrolle über die Gelbildung. Die Herstellung durch Einfräsen ist weniger aufwendig aber auch weniger homogen als die Mischung in Zwangsmischern.

### **3.5 Reststoffdichtung**

Die Verwertung von Reststoffen in Deponieabdichtungen ist insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht, aber auch im Sinne des Recyclings und des Schutzes natürlicher Ressourcen interessant. So häufen sich in den letzten Jahren die Berichte über den Einsatz von Aschen, Stäuben und Schlämmen als Gerüst- oder Füllstoffe in Dichtungen. Belouschek & Kügler vermarkten ihr System der Wasserglasvergütung zunehmend unter der Überschrift *Reststoffdichtung* in Verbindung mit der Verwertung von Massenreststoffen (siehe z.B. Belouschek et al. 1998).

Die Verwertung von Reststoffen in Dichtungen ist aus den genannten Aspekten zu begrüßen, sie führt jedoch nicht zwangsläufig zu Dichtungen, deren Eigenschaften denen der herkömmlichen mineralischen Dichtung überlegen sind. Es gibt jedoch auch Hinweise darauf, dass dieses der Fall sein kann. Möglicherweise können die in manchen Stoffen ablaufenden chemischen Reaktionen gezielt genutzt werden, um die Eigenschaften der aus ihnen aufgebauten Dichtungen zu verbessern (siehe z.B. Arlt 1999). In Hamburg wurden in aufwendigen Feldversuchen sehr gute Erfahrungen mit der Verwendung von teilentwässertem Gewässerschlamm (Hafenschlick) in Oberflächenabdichtungen nachgewiesen (Tresselt et al. 1998, Tresselt 2000). Die Hafenschlickdichtungen sind sehr viel mächtiger (1,5 m) als herkömmliche Dichtungen und weisen aufgrund ihres hohen Wassergehalts und ihrer Zusammensetzung grundsätzlich andere Eigenschaften auf als die im Deponiebau bekannten mineralischen Dichtstoffe. Sie waren zudem mit einer relativ feinkörnigen Entwässerungsschicht (Mittelsand) bedeckt.

Auch dieses Beispiel zeigt, dass der Einsatz von Abfällen und Reststoffen z.B. als Füll- oder Gerüststoffe in sogenannten Reststoffdichtungen nicht pauschal bewertet werden kann. In jedem Einzelfall sind die Herstellverfahren, die Wirksamkeit und die Beständigkeit solcher Dichtungen stoffspezifisch genau zu prüfen und die Technischen Regeln der LAGA (1995) zu beachten.

### 3.6 Bentokies

Die Bentokiesdichtung wird bereits seit vielen Jahren eingesetzt. Sie ist eine gemischtkörnige Dichtung, die in einer stationären Zwangsmischanlage aus den Komponenten Kies, Füllstoff (z.B. Tonmehl) und Bentonit hergestellt wird. Der Bentonitanteil beträgt rund 3 %. Die Kornsummenkurve der Mischung wird der Fullerkurve angenähert, um eine gute Porenfüllung und sehr niedrige Porenvolumina (ca. 18 %) zu erreichen. Durch die Herstellung in Zwangsmischern weist die Bentokiesdichtung eine kontrollierte und prüfbare Materialzusammensetzung mit geringer Streuung auf. Die Reibungswinkel der Bentokiesdichtung sind durch den gestuften Kornaufbau entsprechend hoch ( $> 30^\circ$ ). Der hohe Grobkornanteil verleiht dem Bentokies allerdings auch eine hohe Festigkeit und einen entsprechenden Widerstand gegen Verformung. Durch das geringe Porenvolumen sind die Trockendichte hoch und die gesättigte Wasserleitfähigkeit gering. Der Einbau erfolgt auf dem trockenen Ast der Proctorkurve. Dadurch quellen ein Teil der im Korngemisch enthaltenen Bentonite erst im Porensystem der eingebauten Dichtung. Durch Schrumpfvorgänge können in der Bentokiesdichtung folglich nur geringe Porenanteile für den Wassertransport geöffnet werden. Der hohe Grobkornanteil und die geringen Porenanteile machen die Bentokiesdichtung vermutlich relativ unempfindlich gegen das Eindringen von Wurzeln und Bodentieren. Hierüber liegen jedoch ebenso wie zum Verhalten bei Austrocknung keine Nachweise oder Erfahrungen aus dem Einsatz im Feld vor.

Entscheidend für die Qualität der Bentokiesdichtung ist eine homogene Mischung, die über den gesamten Herstellungs- und Einbauprozess gewährleistet sein muss. Weitere Details zu den Eigenschaften und zur Herstellung der Bentokiesdichtung können Horn (1989) entnommen werden. Bentokies zählt nicht zu den sehr kostengünstigen Dichtungsvarianten.

### 3.7 DYWIDAG-Mineralgemisch („Trockendichtung“)

Das DYWIDAG-Mineralgemisch, häufig auch als „Trockendichtung“ bekannt, unterscheidet sich von der herkömmlichen mineralischen Dichtung, wie Bentokies auch, durch den speziellen Kornaufbau und die Einbautechnik. Das DYWIDAG-Mineralgemisch wird jedoch sehr viel trockener (Wassergehalt max. 2 Gew.-%) eingebaut als Bentokies und nutzt ein vom Hersteller als „Schluffkornprinzip“ bezeichnetes Verfahren zur Optimierung des Kornaufbaus mit dem Ziel, den Porenanteil zu minimieren (Porenvolumen nach DIBt 1998a  $< 23\%$ ). Bei diesem Verfahren werden 50-70 % Kies 16/32, 20-35 % Sand 0/2 und 8-12 % Bentonit so zusammengestellt, dass die Kornsummenkurve sich nicht an die Fullerkurve anlegt, sondern einen stufenartigen Verlauf nimmt, da das Material nahezu keine Körner im Schluffkornbereich und im Kornbereich 2 mm bis 8 mm enthält. Dadurch entsteht ein sogenanntes „schwimmendes“ Grobkorngefüge, in dem die Körner der Grobkiesfraktion im Sand eingebettet sind, ohne untereinander Kornkontakt zu haben. Der Bentonit bringt dann die eigentliche Abdichtung im Porenbereich des Sandes. Der im Labor bestimmte Durchlässigkeitsbeiwert liegt nach DIBt (1998a) unter  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s. Die Reibungswinkel werden mit  $> 27^\circ$  angegeben. Der Einbau erfolgt unter dynamischer Verdichtung.

Das Mineralgemisch wurde 1998 durch das Deutsche Institut für Bautechnik bauaufsichtlich für die Anwendung in Deponieabdichtungen nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall zugelassen (DIBt

1998a). Der Zulassung können die einzuhaltenden Eigenschaften und die erforderlichen Angaben zu Bemessung, Herstellung, Einbau und Qualitätssicherung detailliert entnommen werden. Als Mindestschichtdicke fordert die Zulassung bei der Oberflächenabdichtung 20 cm, einbaubar in einer Lage.

Das Mineralgemisch überzeugt durch sein in sich stimmiges Konzept. Es setzt die Modifikation des Kornaufbaus und der Einbautechnik noch etwas konsequenter um als die Bentokiesdichtung. Es entsteht ein aus ausgesuchten Komponenten industriell gefertigtes Bauprodukt mit bis ins Detail kontrollierbaren Eigenschaften. Das trocken eingebaute Material hat in diesem Zustand eine fast unendlich hohe Wasserspannung, die im Zuge der Befeuchtung langsam sinkt. Entsprechend langsam quillt der Bentonit im Porenraum der Dichtung. Anders als bei feucht eingebauten Dichtungen kann die Quellung des Bentonits im Mineralgemisch nur in die geringen Porenanteile der Dichtung und gegen die Auflast erfolgen. Durch Schrumpfung können daher später auch nur geringe Porenanteile geöffnet werden. Wegen der Quellung des Bentonits unter dem Einfluss der Wasserspannung ist bei einer späteren Schrumpfung nicht zu erwarten, dass sich die Mikrostruktur des Korngefüges maßgeblich verändert. Insgesamt ist aufgrund des Trockeneinbaus zu erwarten, dass das DYWIDAG-Mineralgemisch kaum schrumpffgefährdet ist und die Bildung schnell wasserleitender Risse durch Austrocknung sehr unwahrscheinlich ist. Entsprechende Nachweise wurden bisher allerdings nicht geführt. Im Grundsatz nachteilig gegenüber der Bentokiesdichtung ist allerdings der deutlich höhere Bentonitgehalt des Mineralgemischs. Der hohe Grobkornanteil und die geringen Porenanteile machen das Mineralgemisch vermutlich relativ unempfindlich gegen das Eindringen von Wurzeln und Bodentieren. Auch hierüber liegen jedoch keine Nachweise oder Erfahrungen vor. Der hohe Grobkornanteil verleiht dem Mineralgemisch allerdings auch eine hohe Festigkeit und einen entsprechenden Widerstand gegen Verformung.

Eingesetzt wurde das Mineralgemisch im Deponiebau bislang nur in der Basisabdichtung. Vermutlich stehen die recht hohen Kosten des Verfahrens bislang der Anwendung in der Oberflächenabdichtung entgegen.

### **3.8 Trisoplast<sup>®</sup>**

Ein weiteres, sehr vielversprechendes Verfahren kommt aus den Niederlanden und wird dort seit 1992 unter dem Namen Trisoplast<sup>®</sup> vermarktet. Dabei handelt es sich um ein in Mischanlagen hergestelltes Produkt aus drei Komponenten: Sand ( $\leq 89,1$  Gew.-%), Bentonit ( $\geq 10,7$  Gew.-%) und Polymer ( $\geq 0,2$  Gew.-%). Zunächst werden Bentonit und Polymer trocken gemischt, bevor Sand und etwas Wasser zugegeben werden. Bei der Befeuchtung reagieren die funktionellen Gruppen des Polymers mit dem Bentonit und dem mineralischen Zuschlagstoff und gehen adsorptive, Wasserstoffbrücken und sehr stabile spezifische Bindungen ein. Das Mischgut ist rieselfähig und wirkt sehr körnig. Trisoplast<sup>®</sup> wird dann, ähnlich wie Bentokies, auf dem trockenen Ast der Proctorkurve mit konventionellem Erdbaugerät eingebaut (näheres in Weitz et al. 1997, Kühle-Weidemeier 1998, TD Umwelttechnik 2000, 2001). Aufgrund seiner sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerte, der im Vergleich zu natürlichen Materialien äußerst geringen Streuung des in Mischanlagen aus qualitätsgesicherten Komponenten hergestellten Materials, seiner gut kontrollierbaren Einbaubar-

keit ohne störendes Grobkorn und seiner guten Verformbarkeit wird Trisoplast® in geringer Schichtstärke (7 cm bis 12 cm) eingesetzt.

Die Polymermodifizierung führt zu einem bodenmechanischen Verhalten der Mischung, das sich von dem herkömmlicher Erdstoffen fundamental unterscheidet (vgl. Boels & van der Wahl 1999). Die Mischung hat im eingebauten Zustand eine zähplastische, kaugummiartige Konsistenz. Sie kann extreme Verformungen rissfrei überstehen. Durch den hohen Sandanteil weist Trisoplast® außerdem eine ausreichende Festigkeit gegen Scherverformung auf. Die nach Einbau messbaren Durchlässigkeitsbeiwerte schwanken um  $1 \cdot 10^{-11}$  m/s und korrelieren im Gegensatz zu herkömmlichen mineralischen Dichtmassen erstaunlicherweise kaum mit der Trockendichte oder dem Einbauwassergehalt.

Trisoplast® ist um Größenordnungen weniger anfällig gegen Austrocknung und Schrumpfung als herkömmliche mineralische Dichtungen. Melchior et al. (2001) führen seit 1999 vergleichende Laborversuche mit Trisoplast® und dem in Georgswerder eingesetzten Geschiebemergel in speziellen Austrocknungs- und Perkolationszellen durch. Dabei fiel zunächst auf, dass es um ein Vielfaches länger dauerte, Trisoplast® auf eine bestimmte Wasserspannung (600 hPa) auszutrocknen, als bei der Geschiebemergeldichtung. Trisoplast® gibt sein Wasser äußerst langsam ab. Nachdem die genannte Wasserspannung erreicht war, bei der seinerzeit in den Feldversuchen auf der Deponie Georgswerder die ersten Rissbildungen in der Geschiebemergeldichtung festgestellt worden waren, wurden die Mergelproben und die Trisoplast®-Proben wieder befeuchtet und durchströmt. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Erhöhung der Durchlässigkeit beim Geschiebemergel. Dies zeigt, dass die Laborapparatur die Bedingungen im Feld reproduziert. Die Durchlässigkeit von Trisoplast® hat sich demgegenüber im Versuchsverlauf nicht erhöht. Derzeit wird der Versuch mit höheren Wasserspannungen ( $\gg 1.000$  hPa) fortgesetzt. Es ist bisher nicht gelungen, Trisoplast® so weit auszutrocknen, dass sich durchlässigkeitserhöhende Risse gebildet hätten. Diese Erkenntnisse wurden durch Aufgrabungen von 5 bis 6 Jahre alten Oberflächenabdichtungen mit Trisoplast® in den Niederlanden bestätigt.

Trisoplast® wurde in den Niederlanden durch eine unabhängige Kommission geprüft und auf der Grundlage zahlreicher Untersuchungen für die Abdichtung von Deponien zugelassen. In Belgien ist die Zulassung ebenfalls erfolgt. Trisoplast® hat in beiden Länder einen sehr großen Marktanteil erobert. Die Übertragbarkeit der holländischen Prüfergebnisse auf die in Deutschland im Deponiebau gestellten Anforderungen wird derzeit durch einen Arbeitskreis, dem Vertreter der Abfallbehörden der Länder und externe Sachverständige angehören, geprüft. Für bauwerksübliche Anwendungszeiträume (rund 30 Jahre) sind dabei keine Probleme zu erwarten. Zur Beständigkeit über ungewöhnlich lange Zeiträume ( $> 100$  Jahre) bestehen, wie bei allen anderen Dichtungen auch, noch Fragen, beispielsweise zur Alterung des Polymers (siehe hierzu BAM 2000).

#### **4 Fazit und Ausblick**

Oberflächenabdichtungssysteme sollen den Kontakt von Organismen mit Schadstoffen und die Ausbreitung von umweltgefährdenden Stoffen durch Sickerwasser oder Gas verhindern. Die Systeme bestehen im Regelfall aus mehreren Schichten. Als Dichtungen können Kunststoffbahnen,

Asphalt, tonhaltige Erdstoffe, Bentonitmatten und in Kapillarsperren auch Sande und Kiese eingesetzt werden. Modifizierte mineralische Dichtungen stellen eine interessante Alternative dar, die sich im Wettbewerb mit den anderen technischen Lösungen befindet. Sie muss wirtschaftlich und technisch herstellbar, ausreichend wirksam und über eine für Ingenieurbauwerke ungewöhnlich lange Funktionsdauer beständig gegen zahlreiche physikalische, chemische und biologische Einwirkungen sein.

Die TA Abfall (1991) und die TA Siedlungsabfall (1993) schreiben den technischen Aufbau der Oberflächenabdichtungssysteme unterschiedlicher Deponieklassen detailliert vor. Alternative Systeme sind im Geltungsbereich der genannten abfallrechtlichen Regelwerke nur bei Nachweis ihrer Gleichwertigkeit genehmigungsfähig. Allerdings sind weder die Kriterien für die Nachweisführung klar und verbindlich festgeschrieben noch existiert eine länderübergreifende Institution, die durch die Landesabfallbehörden für die Erteilung von Zulassungen autorisiert wäre. Die Führung dieses Gleichwertigkeitsnachweises wird weiterhin dadurch erschwert, dass das Regelsystem für die Deponieklasse I, die herkömmliche, auf dem nassen Ast der Proctorkurve eingebaute, bindige mineralische Dichtung an vielen Standorten nicht so gut funktioniert wie es sich die Autoren der Regelwerke erhofft haben. Der Maßstab für die Gleichwertigkeit ist daher nicht klar definiert. Wenn alternative Dichtungen nur so gut sein müssen wie die herkömmliche Dichtung nach ihrer ersten Alterung in der Praxis häufig ist, dann sind nahezu alle alternativen Lösungen genehmigungsfähig. Wird die von den Autoren der Regelwerke avisierte Wirksamkeit der Regeldichtung zum Maßstab erhoben, wie die meisten Genehmigungsbehörden dies vernünftigerweise tun, wird die Sache schon schwieriger, denn zunächst muss diese „Sollwirksamkeit“ der Regeldichtung definiert werden, bevor die alternative Lösung bewertet werden kann. Von der alternativen Lösung ist dann zu fordern, dass sie ein deutlich besseres Alterungsverhalten hat als die Regeldichtung (siehe hierzu beispielsweise DIBt 1995).

Wenngleich das Führen eines allgemeinen Gleichwertigkeitsnachweises sehr aufwendig ist und im Rahmen dieses Beitrags nicht näher erläutert werden soll, so sind doch aus den Ausführungen zu den einzelnen modifizierten mineralischen Dichtungen folgende Tendenzen ableitbar:

- Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist vor allem der Einsatz von Reststoffen interessant. Unter bestimmten Randbedingungen können Reststoffdichtungen ohne die Zugabe von Additiven bereits ausreichend wirksam sein (Beispiel Hafenschlickdichtung). In anderen Fällen ist die Zugabe von Additiven (z.B. Tonminerale, Wachs, Wasserglas) erforderlich, um die geforderte Wirksamkeit zu erzielen. All diesen Lösungen ist gemein, dass die Dichtung, wie bei der Regeldichtung für die Deponieklasse I auch, vor den kritischen Einwirkungen Austrocknung, Verformung und Durchwurzelung ausreichend geschützt werden muss (z.B. durch ausreichend mächtige Überdeckung), da die Alterungsbeständigkeit der modifizierten Dichtung nicht grundsätzlich höher ist als die der Regeldichtung. Der Nachweis hierfür kann nur standortbezogen geführt werden. Da die Eigenschaften der Reststoffe für die Wirksamkeit der Dichtung wesentlich sind und streuen können, werden außerdem in der Regel einzelfallspezifische Verwendbarkeitsnachweise gefordert.

- Andere Systeme sind aus technisch-wissenschaftlicher Sicht innovativ und zeichnen sich dadurch aus, dass sie grundsätzlich andere und im Hinblick auf die möglichen Gefährdungen weniger empfindliche Eigenschaften besitzen. Das DYWIDAG-Mineralgemisch, Bentokies und Trisoplast® werden alle auf dem trockenen Ast der Proctorkurve eingebaut. Es wird erwartet, dass diese Materialien sozusagen „vorgespannt“ sind, da sie bereits im Zuge der Erstbefeuchtung hohen Wasserspannungen ausgesetzt sind und daher gegen spätere Schwankungen des Wassergehalts im Jahresverlauf weniger anfällig sind. Den geringsten Einbauwassergehalt hat das DYWIDAG-Mineralgemisch. Alle drei genannten modifizierten mineralischen Dichtungen haben einen genau definierten und industriell in Mischanlagen hergestellten Kornaufbau. Alle drei Ansätze können für sich den Vorteil eines standardisierten Aufbaus und einer qualitätsgesicherten Herstellung in Anspruch nehmen. Vor allem das DYWIDAG-Mineralgemisch, aber auch Bentokies sind allerdings relativ kostenaufwendig. Das polymervergütete Trisoplast® ist demgegenüber aufgrund des im Vergleich zum DYWIDAG-Mineralgemisch und zu Bentokies sehr viel kleineren Größtkorns, seiner einfachen und gut kontrollierbaren Verarbeitbarkeit und der geringen Wasserdurchlässigkeit bereits in geringer Schichtstärke wirksam einsetzbar und dann wirtschaftlich interessant. Trisoplast® ist, vermutlich sowohl aufgrund des relativ trockenen Einbaus als auch aufgrund der Eigenschaften des Polymers nachgewiesenermaßen sehr beständig gegen Wasserabgabe und Schrumpfung. Die überragende, in einem extrem weiten Bereich rissfreie Verformbarkeit des Materials erlaubt außerdem den erfolgreichen Einsatz auch auf sehr setzungsgefährdetem Untergrund, so dass bei vielen Altdeponien auf den zusätzlichen Einsatz einer temporären Dichtung oder Abdeckung verzichtet werden kann.

Letztlich ist das jeweils beste System vor dem Hintergrund der im Einzelfall gegebenen Randbedingungen zu ermitteln. Bei der Variantenstudie im Zuge der Planung und beim Verwendbarkeitsnachweis für eine alternative Dichtung sind zahlreiche standortspezifischen Faktoren zu berücksichtigen. Durch den Einsatz von kostengünstigen Baustoffen, die Wahl von effektiven Einbautechnologien und die fachkompetente Dimensionierung der Einkomponenten und ihres Zusammenwirkens im Gesamtsystem können leistungsfähige und wirtschaftlich vertretbare Lösungen gefunden werden. Modifizierte mineralische Dichtungen stehen hierfür zur Verfügung und bereichern die Palette der Möglichkeiten.

## 5 Literatur

**Arlt, K.-J. (1999):** Einsatzmöglichkeiten von eisenhüttenmännischen Nebenprodukten in Abdichtungen für Monodeponien. In: Egloffstein, T., G. Burkhardt & H. Görg (Hrsg.): Abfallverwertung oder Abfallbeseitigung, Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 137-167.

**BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (2000):** Gutachtliche Stellungnahme zu Trisoplast als mineralische Abdichtungsschicht von Deponien. Berlin, 8 S. + Anlage.

**Belouschek, P., J. U. Kügler & D. Reichert (1998):** TA-Si konforme Oberflächenabdichtung mittels Dichtsysteeme aus industriellen Massenreststoffen und wasserglasvergüteten Klärschlämmen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 109, 229-252.

**Belouschek, P. & J. U. Kügler (1993):** Wasserglasvergütete mineralische Dichtsysteeme in der Deponietechnik. Wasser + Boden, 11, 855-861.

**Bilkenroth, K. D. (1991):** Einsatzmöglichkeiten von Montanwachssystemen und Polymer-Silikaten bei der Altlastensanierung. In: Jessberger, H.L. (Hrsg.): Erkundung und Sanierung von Altlasten. Balkema Verlag, Rotterdam, 45-54.

**Boels, D. & K. van der Wahl (1999):** Trisoplast: New Developments in Soil Protection. Proceedings Sardinia 99, 77-84.

**DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (1995):** Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. 81 S.

**DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (1998a):** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-68.12-2 vom 20.01.1998; Zulassungsgegenstand: DYWIDAG-Mineralgemisch DMG 16/32 zur Verwendung in Deponieabdichtungssystemen von Deponien nach TA Siedlungsabfall und TA Abfall. 13 S. + 4 Anlagen.

**DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (1998b):** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-68.12-7 vom 06.05.1998; Zulassungsgegenstand: Vergütetes Mineralgemisch CHEMOTON zur Verwendung in Deponieabdichtungssystemen von Deponien nach TA Siedlungsabfall und TA Abfall. 14 S. + 4 Anlagen.

**Hass, H. J. & W. Orlia (1992):** Das Dynagrout-System. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. EF-Verlag, Berlin, 203-226.

**Henken-Mellies, U. (2001):** Langzeituntersuchungen an einer mineralischen Oberflächenabdeckung: Großlysimeter auf der Deponie „Im Dienstfeld“/Lkr. Ansbach. In: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 119. Erich Schmidt Verlag, Berlin, S.141-152.

**Hoeks, J., J. Glas, J. Hofkamp & A. H. Ryhiner (1987):** Bentonite Liners for Isolation of Waste Disposal Sites. In: Waste Management & Research, 5, 93-105.

**Horn, A. (1989):** Mineralische Deponie-Flächendichtungen aus gemischtkörnigen Böden. In: Bautechnik, 66, 9, 311-318.

**Koch, D. (1995):** Bentonitvergütete Abdichtungen. In: Burghardt, G. & T. Egloffstein (Hrsg.): Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und der Altlastensicherung. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 30, 24-65.

**Kühle-Weidemeier, M. (1998):** Verbesserte mineralische Abdichtungen aus einem polymervergüteten Bentonit-Sand-Gemisch. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 109, 173-193.

**LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1995):** Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln

**Lauf, G. & M. Kostiak (1995):** Chemoton – Anwendungsbereiche bei Deponieabdichtungen. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 35, 18 S.

**Maier-Harth, U. & S. Melchior (2001):** Überprüfung der Wirksamkeit der 10 Jahre alten mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen. In: Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien, Mainz, Germany, S. 121-182.

**Melchior, S. (1993):** Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arb., 22, 330 S. und Anhang.

**Melchior, S. (1996):** Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse von mehrjährigen In-Situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponie-Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30. Mai 1996 in Bingen-Büdesheim/Rhein. Selbstverlag, Mainz, 40 S.



- Melchior, S. (1998a):** Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg von 1986 bis 1997. Habilitationsschrift. Zusammenfassung 132 S. + 15 Anlagen. Selbstverlag.
- Melchior, S. (1998b):** In-situ Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen. In: Stegmann, R. & G. Rettenberger (Hrsg.): Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik. Economica Verlag, Bonn. 179-196.
- Melchior, S. (1999a):** Felduntersuchungen und Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen. In: Landesamt für Umweltschutz Bayern (Hrsg.): Neue Erkenntnisse zur Austrocknung und Durchwurzelung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Seminar am 21.10.1998 in Wackersdorf, S. 3-30.
- Melchior, S. (1999b):** Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen. In: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hrsg.): Die sichere Deponie. 15. Fachtagung am 18./19. Februar in Würzburg. 34 S.
- Melchior, S., B. Steinert & O. Flöter (2001):** Cohesive Soil Barriers of Landfill Covers: A Comparison of Traditional Clay Barriers and the Polymer-modified Material Trisoplast. In: Christensen, T.H. et al. (Hrsg.): Sardinia 2001- Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. Proceedings, Bd. III, S. 55-64.
- Rödl, P., D. Heyer & D. Ranis (2000):** Aufgrabungsergebnisse an mineralischen Oberflächenabdichtungen in Bayern. In: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 116. Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 167-178.
- Stoffregen, H., P. Döll, G. Wessolek, S. Melchior, B. Vielhaber, U. Holzlöhner, R. Horn, T. Baumgartl, W. Gräsle, K. Bohne & M. Schmidt (1999):** Rißgefährdung von Kombinationsdichtungen durch temperaturabhängige Austrocknung. In: Müll und Abfall, 1, 29-35.
- TA Abfall (1991):** Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/ physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Gemeinsames Ministerialblatt, 42. Jg., Nr. 8, S. 139-214, Bonn, 12. März 1991
- TA Siedlungsabfall (1993):** Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger 99a, 14. Mai 1993
- TD Umwelttechnik (2000):** Merkblatt Qualitätssicherung bei Abdichtungen aus Trisoplast.. Erstellt durch IGB mbH in Bearbeitung durch Melchior, S. & M. Kühn. Stand 01.02.2001. 5 Teile + Anhang.
- TD Umwelttechnik (2001):** Dokumentation Trisoplast. Stand 05.08.2001. 50 S.
- Tresselt, K., G. Miehlich, A. Gröngröft, S. Melchior, K. Berger & C. Harms (1998):** Harbour Sludge as Barrier Material in Landfill Cover Systems. In: Water Science Technology, 37, 6-7, 307-313.
- Tresselt, K. (2000):** Feldversuche zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit Dichtungen aus Hafenschlick. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arb., 46, 280 S. und Anhang.
- Vielhaber, B. (1995):** Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen - Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahn. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften. Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 29, 200 S. + 15 S. Anhang.
- Weitz, A. M., D. Boels, H. J. J. Wieggers, J. J. Evers-Vermeer (1997):** Application of Trisoplast for Lining of Landfills. Staring Centre (SC-DLO), Report 142. Wageningen. 50 S. + Anlage.