

Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl J. Witt und Dipl.-Ing. Rainer M. Zeh,

Bauhaus-Universität Weimar

Sonderdruck des Beitrags zum: Vertiefenseminar Zeitgemäße Deponietechnik 2004, FEI, Universität Stuttgart, 18. März 2004

Bibliographie:

Witt, K. J. u. Zeh, R. M.: Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen. In Kranert (Hrsg.): Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 81, März 2004, S. 83-98

Zusammenfassung

Oberflächenabdichtungen mit einem rein mineralischen Aufbau werden als Regeldichtungen in Deponien der Klasse DK1 und als Alternative bei höherwertigen Deponien hergestellt. Durch klimatisch bedingte Schwankungen der Bodenfeuchte in der Rekultivierungsschicht kann es in Trockenphasen zur Vertiefung der Wurzeln und zu einem potenzialinduzierten Wasserentzug in der mineralischen Dichtung kommen. Wird dabei ein kritischer Wert der Wasserspannung überschritten, treten i. A. irreversiblen Trockenrisse auf. Das Bemessungskonzept sieht vor, den Aufbau eines Dichtungssystems so zu optimieren, dass auch in Trockenphasen die vorhandene Wasserspannung den bodenspezifischen Grenzwert in der Dichtung nicht übersteigt. Die bodenphysikalischen Zusammenhänge dieses Bemessungskonzeptes werden in dem Beitrag aufgezeigt. Das vorhandene Potenzial kann durch einen adäquaten Aufbau der Schichten begrenzt werden. Eine auf der Dichtung aufliegende kapillarbrechende Schicht aus Feinsand dämpft die saisonalen Schwankungen der Wasserspannung und schützt effektiv vor Austrocknen. Für die Dichtung sollen Böden mit einer geringen Schrumpfempfindlichkeit verwendet werden. Ein unteroptimaler Einbauwassergehalt erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen Wassergehaltsschwankungen. Mit den vorliegenden Kenntnissen kann der Aufbau einer Oberabdichtung auf der Grundlage von Erfahrungswerten bewertet werden. Der Wasserhaushalt kann mit numerischen Methoden prognostiziert und durch Messfelder verifiziert werden. Die Grenzzustände für eine ingenieurmäßige Bemessung sind formuliert, es fehlt aber noch an einfachen Versuchen zur Bestimmung der relevanten Parameter.

1 Einführung

Bindige, geringdurchlässige Böden werden als alleiniges Dichtungselement in Oberflächenabdichtungen von Deponien auch alternativ zu den kombinierten Regelaufbauten nach der DepV (2002) oder der EU-Richtlinie (1999) verwendet. Die mineralische Dichtung soll langfristig die Infiltration von Niederschlag in den Deponiekörper oder ins Grundwasser minimieren und bei einer aktiven Deponie vor Gasaustritten schützen. Auch nach Abschluss von umfangreichen Forschungsvorhaben wie z. B. August et al. (1998) oder BayForrest (2002) bestehen für mineralische Dichtungen

keine Bemessungsregeln, welche die besonderen Beanspruchungen aus der geringen Auflast, den Zwangsverformungen und der wechselnden Feuchte hinreichend genau berücksichtigen. Im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit ist die Austrocknungsgefahr einer mineralischen Dichtung von zentraler Bedeutung. Schon Anfang der 90iger Jahre berichtete Melchior (1993) über unerwartet hohe Durchlässigkeitsbeiwerte in Testfeldern für Oberflächenabdichtungen. Bei mehreren Aufgrabungen zeigten sich nach wenigen Betriebsjahren großflächig Risse im Makro- wie auch Mikrobereich sowie Durchwurzungen. Auch andere Autoren bestätigten die Austrocknungsproblematik der mineralischen Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen (Ramke et al. 2002a, 2002b). Dichtungselemente aus Geosynthetischen Tondichtungsbahnen und aus vergüteten mineralischen Böden sind je nach Randbedingung im gleichen Maße austrocknungsgefährdet.

Die Grundlagen des Austrocknungsverhaltens, Beobachtungen bei Aufgrabungen und an Testfeldern sowie die Möglichkeiten einer numerischen Simulation des Wasserhaushaltes in Oberflächenabdichtungen wurden in einem Workshop des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der DGGT zusammengetragen und durch Ramke et al. (2002a) publiziert. Diese Erkenntnisse werden hier durch eigene Untersuchungen und durch Feldmessungen ergänzt und zusammenfassend erläutert. Der Beitrag soll die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen einer ingenieurmäßigen Bemessung von mineralischen Dichtungen aufzeigen. Er will erläutern, mit welchen Strategien und Maßnahmen man bei der Konzeption von Oberflächenabdichtungen der Austrocknungsgefahr begegnen kann.

2 Feldbeobachtungen

Für die Staaten der EU und speziell für die Stilllegung von Deponien in Deutschland geltenden die Regelaufbauten für Oberflächenabdichtungen nach Tab. 1. Die Anforderungen richten sich nach der Deponieklasse, d. h. nach dem Schadstoffpotenzial der abgelagerten Abfälle. Für Deponien mit nicht gefährlichen Abfällen reicht eine mineralische Dichtung aus. Bei höherem Gefahrenpotenzial wird eine Kombinationsdichtung mit einer polymeren Dichtung (Kunststoffdichtungsbahn, KDB) auf einem mineralischen Block gefordert. Die Rekultivierungsschicht ist eine wirksame Komponente des Dichtungssystems (GDA E 2-31).

In der europäischen Praxis wird die Forderung einer Kombinationsdichtung häufig aus Kostengründen umgangen. Mit Bezug auf einen Nachweis der Gleichwertigkeit wird auf die KDB verzichtet, meist unter Ansatz der wasserspeichernden Wirkung der Rekultivierungsschicht. Eine andere Genehmigungspraxis von Oberflächenabdichtungen für Deponien mit Siedlungsabfällen ist die Duldung einer rein mineralischen Dichtung als temporäre Maßnahme, wenn die Gebrauchstauglichkeit und Funktion durch Messfelder beobachtet werden. International zeigen sich vergleichbare Tendenzen. In den USA, Kanada und auch in Asien werden ebenfalls häufig rein mineralische Oberflächenabdichtungen gebaut.

BRD (Deponieverordnung DepV, 2002)			EU-Richtlinie (1999)		
Systemelemente	DK 1	DK 2	DK3	nicht gefährlich	gefährlich
Oberfläche	Gefälle nach Abklingen der Setzungen $\geq 5\%$			k. A.	k. A.
Rekultivierungsschicht* $\geq 100\text{cm}$	oder Überdeckung mit gleicher Schutzwirkung, Ausbildung nutzungsabhängig		k. A.	$\geq 100\text{cm}$	$\geq 100\text{cm}$
Entwässerungsschicht $\geq 30\text{cm}$	vollflächig, $k_f \geq 1 \cdot 10^{-3}$			$\geq 50\text{cm}$	$\geq 50\text{cm}$
Schutzschicht	entfällt	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kunststoff-Dichtungsbahn $\geq 0,25\text{cm}$	entfällt	Zulassung erf., vorzugsweise Recyclingmaterial	Zulassung erf., kein Recyclingmaterial	-	ja
mineralische Dichtung $\geq 50\text{cm}$	$k_f \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, $D_{Pr} > 95\%$, feucht		$k_f \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, $D_{Pr} > 95\%$ feucht	undurchlässig	undurchlässig
Ausgleichsschicht $\geq 50\text{cm}$	grobkörniger Boden nach DIN 18196			k. A.	k. A.
Gasdränschicht $\geq 30\text{cm}$	entfällt	Kalziumkarbonatanteil $\leq 10 \text{ M}\%$		erforderlich	nicht erforderlich
Abfall	Abf AbIV §3, §4		Anhang D, TA-Abfall	Siedlungsabfall, nicht gefährl. Abfälle (restl.)	gefährliche Abfälle

DepV quantifiziert die erforderlichen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht genauer in Anhang 5 k. A. – keine Angaben

Tabelle 1: Regelaufbauten von Oberflächenabdichtungen

Die prinzipielle Schichtenfolge einer solchen Oberflächenabdichtung ist in Bild 1 dargestellt. Die Kenngrößen und Mächtigkeiten der einzelnen Schichten differieren in weitem Maße. Für diese standortspezifischen Varianten wird als Qualitätsziel meist eine jährliche Infiltrationsrate unter 150 mm/a (DK1) bzw. 15 mm/a (DK2) gefordert.

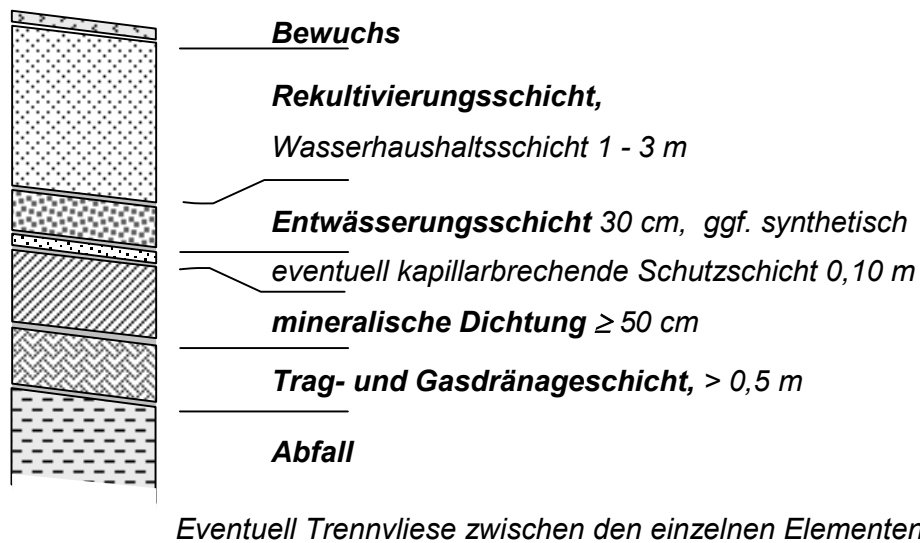


Bild 1: Prinzipschnitt zum Systemaufbau einer mineralischen Oberflächenabdichtung

Kennzeichnend für ein solches Mehrschichtsystem aus verschiedenen Böden ist eine klimatisch bedingte saisonal wechselnde Bodenfeuchte. Da die Bodenschichten i. A. nicht wassergesättigt sind, kommt es mit der Änderung des Wassergehaltes zu bodenspezifischen Schwankungen der Wasserspannungen und aufgrund der Potenzialgradienten zu einer wechselseitigen Beeinflussung der Bodenfeuchte. In der vegetationsfreien Zeit findet eine Aufsättigung des Systems mit fallenden Wasserspannungen und mit einer tendenziell zum Deponiekörper gerichteten Wasserbewegung statt. Es kommt zu lateralen Abflüssen in der Entwässerungsschicht. In den Trockenphasen der Sommermonate können dagegen insbesondere in der Rekultivierungsschicht sehr hohe Wasserspannungen auftreten, die aufgrund der Potenzialgefälle eine nach oben gerichtete Wasserbewegung und damit einen Wasserentzug aus der mineralischen Dichtung bewirken. Unterstützt und überlagert werden diese Effekte durch Pflanzenwurzeln, die bei nicht ausreichendem Wasserdargebot der Rekultivierungsschicht der Dichtung Wasser entziehen können. Ein weiterer Effekt, der zur Austrocknung der Dichtung führen kann, ist die Durchlüftung der Entwässerungsschicht, falls diese gegenüber der Atmosphäre nicht abgeschlossen ist und ungesättigte Luft zirkulieren kann.

Einzelheiten zu Ergebnissen aus Testfeldmessungen und Aufgrabungen in Deutschland finden sich u. a. in Vielhaber (1995), Maier-Harth & Melchior (2001),

Zeh & Witt (2002) sowie Henken-Mellies & Gartung (2002). Umfangreiche Feldbeobachtungen in verschiedenen Klimazonen wurden von Roesler & Benson (2002) publiziert. Aus den Feldbeobachtungen lassen sich für eine Oberflächenabdichtung mit einem rein mineralischen Aufbau im Hinblick auf Trockenrisse zwei Hauptprobleme ableiten:

- *Direkte Durchwurzelung der mineralischen Dichtung oder der Dichtungsoberfläche bei zu dünner oder zu trockener Rekultivierungsschicht.*
- *Trockenrissbildung in der mineralischen Dichtung durch periodischen Wasserentzug infolge zu hoher Wasserspannungen in den angrenzenden Schichten. Ursache kann ein kapillarer Aufstieg zur trockenen Rekultivierungsschicht oder ein konvektiver Wasserdampftransport in der durchlüfteten Entwässerungsschicht sein.*

Bei Kombinationsdichtungen mit obenliegender KDB kann es zu einem allmählichen Austrocknen der mineralischen Dichtung kommen, wenn das Auflager aus grobkörnigem Boden besteht und sich eine Gasströmung mit geringer Wassersättigung einstellt.

All diese Phänomene treten innerhalb einiger Jahre nach Fertigstellung auf. Physikalische Ursache der Trockenrisse ist die Unterschreitung einer kritischen Wasserspannung in der mineralischen Dichtung. Bereits Trockenrisse, die nicht mit dem Auge erkennbar sind ($< 0,1$ mm), führen zu einer deutlichen Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit und damit zu einem Verlust der Gebrauchstauglichkeit der Dichtung. Den Feld- und Labormessungen zufolge liegt diese kritische Saugspannung je nach Mineralbestand, Struktur, Dichte und Belastungsgeschichte des Bodens in der Größenordnung von 250 bis 500 hPa. In Bentoniten und in speziellen Böden werden auch höhere Grenzspannungen gemessen (Siegmond et al., 2001, Gröngröft et al., 2003).

3 Das Phänomen der Trockenrisse

Aus der Bodenmechanik und der Bodenphysik ist bekannt, dass ein bindiger Boden bei einer Wasserabgabe ein- oder mehrdimensional schrumpft (Bild 2). Mit der Abgabe von Wasser erhöht sich die Wasserspannung, der Boden reduziert sein Volumen, die Bodenaggregate rücken dichter zusammen. Bis zur Schrumpfgrenze besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Volumen. Ist diese Grenze überschritten, erhöhen sich zwar die Wasserspannungen weiter, gleichzeitig dringt aber immer mehr Porenluft in die Bodenstruktur ein. Wird dabei die Zugfestigkeit des Bodens überschritten, bilden sich Risse, die sich je nach Isotropie der Feuchteverteilung vertiefen oder verzweigen. Diese Risse können im Mikro- wie Makrobereich verlaufen, sind u. U. visuell nicht erkennbar und führen zu einer stark erhöhten Wasserdurchlässigkeit der betroffenen Bodenschicht.

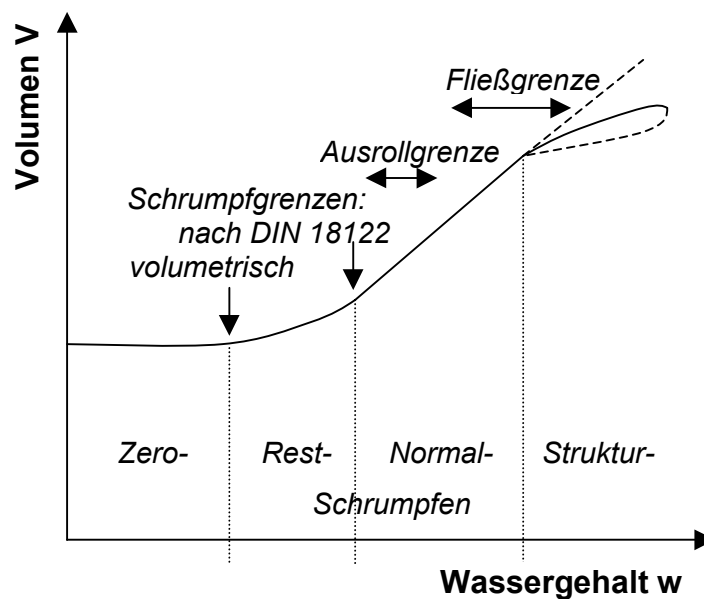


Bild 2: Typisches Schrumpfdiagramm für einen bindigen Boden

Während bei den Austrocknungsversuchen einer Bodenprobe nach DIN 18 122 (Bestimmung der Schrumpfgrenze) Risse frühestens am Ende der Normalschrumpfung (Wassergehalt an der Schrumpfgrenze) beobachtet werden, können im Feld, bedingt durch Spannungszustände und Verformungsbedingungen, bereits im Zuge der plastischen Deformation Risse auftreten, wenn das Potenzial in der mineralischen Dichtung einen kritischen Wert erreicht.

Das in der Dichtung vorhandene Potenzial Ψ_{vorh} ist Resultat der Wechselwirkung des lokalen Klimas mit dem speziellen Aufbau. Das kritische Potenzial Ψ_{crit} ist eine Kenngröße des Dichtungserdstoffes und hängt von den in Gl. 1 angegebenen Parametern und Randbedingungen ab:

$$\Psi_{\text{crit}} = f(\sigma_o, t_{\text{max}}, E, C_{\text{Mat}}, A_{\text{Riss}}) \quad (\text{Gl.1})$$

mit

$\sigma_o = \sum \gamma_i \cdot d_i$: Auflastspannung über Dichtung

$t_{\text{max}} = f(\sigma_o, c, \varphi, \psi)$: wasserspannungsabhängige Zugfestigkeit des Bodens

E = Young'scher Modul (Zugspannung zu Dehnung)

$C_{\text{Mat}} = f(\text{Tongehalt}, \rho_{\text{Einbau}}, \text{Energie}_{\text{Einbau}}, \text{Struktur})$: Material- und Einbaukonstante

$A_{\text{Riss}} = f(\text{Anzahl Risse, max. zul. Risstiefe, Risslänge})$: genormte Rissfläche.

Ein ingenieurmäßiger Nachweis der Risssicherheit kann durch Vergleich des vorhandenen mit dem kritischen Potenzial nach Gl. 2 geführt werden, wenn die Kenngrößen bekannt sind:

Nachweis der Risssicherheit: $\Psi_{\text{crit}} \leq \Psi_{\text{vorh}} \quad (\text{Gl. 2})$

Das vorhandene Potenzial lässt sich durch Messungen in Testfeldern oder durch Simulationsrechnungen mit angenommenen künftigen Klimaereignissen ermitteln. Für das kritische Potenzial liegen bisher Erfahrungswerte vor (250 - 500 hPa). Die Bestimmung von Ψ_{crit} ist insbesondere bezüglich der Parameter t , C_{Mat} , A_{Riss} nicht einfach, genormte Versuche bzw. Ansätze sind bisher nicht vorhanden. Des weiteren sind Aussagen z. B. zur Struktur und dem Aggregatgefüge nur mit aufwendigen Mitteln zu treffen. Aktuelle Forschungsvorhaben haben das Ziel, die physikalische Grenzbedingung abzusichern, zu erweitern und praktikable Laborversuche zur Bestimmung der Parameter des kritischen Risspotenzials Ψ_{crit} zu entwickeln (Heibrock et al., 2003, Zeh & Witt, 2004).

Bei mineralischen Dichtungen sind mehrere Ursachen bekannt, die ein Schrumpfen infolge hoher Wasserspannungen induzieren und Risse verursachen können. Den größten Einfluss haben klimatische Einwirkungen. In Wechselwirkung mit dem Bewuchs wird der jahreszeitliche Verlauf des Wasserumsatzes und der Infiltration gesteuert. Das Wasser wird im Boden, besonders in der Rekultivierungsschicht gespeichert und bei Bedarf von den Pflanzen über die Wurzeln wieder entzogen, verbraucht

und direkt bzw. indirekt an die Atmosphäre abgegeben. Der Wassereintrag und die im Boden gespeicherte Wassermenge variieren saisonal stark. Unter extrem trockenen Bedingungen verlassen die Wurzeln aufgrund von Trockenstress die Rekultivierungsschicht und wachsen bis an oder in die mineralische Dichtung, um dort Wasser zu entziehen. Hierdurch steigen die Wasserspannungen in der Dichtung an, was zu einer Reduzierung des Volumens, zu Schrumpfen der Dichtung führt. Die Volumenreduktion verläuft zunächst vertikal. Infolge der Änderung der Spannungszustände folgt jedoch eine Schrumpfphase in der Richtung der kleineren Hauptspannungen, die dann bei Überschreitung der Zugspannungen des Bodens zu vertikalen Rissen in der Dichtung führt. Des Weiteren entstehen Wurzelkanäle bzw. -röhren, die nach dem Absterben der Wurzeln bevorzugte Wasserwegsamkeiten bilden.

Das Phänomen der trockenungsbedingten Erhöhung der Wasserspannung wird durch hydrothermale Effekte überlagert. Der Temperaturgradient zwischen der Oberfläche und dem Deponiekörper bewirkt in allen Schichten einen Wassertransport in Richtung des kälteren Randes. Die Größe, die Richtung und die Dauer dieses Wassertransportes hängen von der Temperatur im Deponiekörper in Relation zum Verlauf der Lufttemperatur ab. Als ungünstigste Phase sind bei bereits abgekühltem Abfallkörper die Sommermonate anzusehen. In der mineralischen Dichtung tritt ein nach unten gerichteter Feuchtetransport auf. Der umgekehrte Fall, eine kalte Oberfläche bei aktivem Abfallkörper, ist bei einer rein mineralischen Dichtung allenfalls in Verbindung mit einer Belüftung infolge grob durchlässiger Auflagerschicht problematisch. Bei einer Kombinationsdichtung kann ein nach oben gerichteter Wassertransport zum Aufweichen der Kontaktzone zwischen KDB und mineralischer Dichtung führen.

Die physikalischen Zusammenhänge des Wasserhaushaltes lassen erkennen, dass im Hinblick auf Trockenrisse die Rekultivierungsschicht und die Eigenschaften der mineralischen Dichtung von zentraler Bedeutung sind. Nach der DepV (2002) und der GDA 2-31 (2000) sind für die Rekultivierungsschicht nur Böden mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität ($> 200\text{mm/m}^3$) und einer niedrigen Lagerungsdichte geeignet. Bei den in Zentraleuropa vorherrschenden klimatischen Verhältnissen mit regelmäßigen Niederschlägen kann eine solche Rekultivierungsschicht einem angepassten Bewuchs über das ganze Jahr ein ausreichendes Wasserdargebot garantieren.

Die Schichtmächtigkeit sollte in Abhängigkeit vom Bewuchs, Standort usw. gewählt werden (vgl. Zeh & Witt, 2002). Bei der in den Regelwerken angegebene Mindestdicke von 1 m ist jedoch bei trockenen Standorten mit ungünstiger Exposition mit einer saisonalen Austrocknung des unteren Bereiches zu rechnen.

4 Maßnahmen und Entwurfsgrundsätze

Die Kombinationsabdichtungen nach TASI, DepV (Tab. 1, DK2, DK3) oder nach EU-Richtlinie sind nach allen bisherigen Erfahrungen im Hinblick auf die Austrocknungsgefährdung unproblematisch. Eine Durchwurzelung wie auch ein Wasserverlust der Dichtung infolge zu trockener Rekultivierungsschicht ist ausgeschlossen. Lediglich bei einer groben, stark gasgängigen Tragschicht kann langfristig ein hydrothermal bedingter Wassertransport ungünstige Veränderungen in der mineralischen Dichtung hervorrufen. Dieser Effekt ist jedoch bei einem Aufbau nach den Regelwerken für praktische Anwendungen von untergeordneter Bedeutung. Eine aufliegende Kunststoffdichtungsbahn wirkt dauerhaft als Wurzelsperre und verhindert konvektiven Wassertransport aus der mineralischen Dichtung. Die Kombinationsdichtung ist damit die zuverlässigste Maßnahme gegen Trockenrissbildung. Besonders bei trockenen Standorten ($N < 600$ mm) sollte dies trotz aller Hoffnung auf kostengünstigere Lösungen bedacht werden.

Bei allen rein mineralischen Aufbauten von Oberflächenabdichtungen müssen beim Entwurf zwei korrelierte Gefährdungen durch die Materialauswahl, die Abfolge und die Mächtigkeit der Schichten beherrscht werden:

- der Gefahr, dass Wurzeln bis an die mineralische Dichtung reichen
- der Gefahr, dass die mineralische Dichtung infolge zu großer Potenzialgefälle zu den angrenzenden Schichten hin unverträglich entwässert.

Die Entwicklung der Wurzeln hängt ab von der Art und der Pflege des Bewuchses, von den klimatischen Bedingungen, der Exposition des Standortes und von der Qualität der Rekultivierungsschicht. Lediglich für Kunststoffdichtungsbahnen und vergleichbare geosynthetische Trennelemente liegen bisher abgesicherte Erfahrungen als Wurzelsperre vor. Will man auf diese Elemente verzichten, müssen der Bewuchs und die Schichtenfolge so abgestimmt werden, dass auch in den trockenen Sommermonaten der untere Bereich der Rekultivierungsschicht feucht bleibt. Die Min-

destmächtigkeit einer Rekultivierungsschicht beträgt mit dieser Forderung für Standorte mit durchschnittlichen klimatischen Standortbedingungen 1,5 m. Für trockene Standorte muss die Rekultivierungsschicht mächtiger sein. Hinweise zur Qualität und zum Einbau finden sich in den GDA Empfehlungen E 2-31 und E 2-32.

Dem Problem der potenzialinduzierten Austrocknung von mineralischen Dichtungen kann nach den oben beschriebenen physikalischen Zusammenhängen mit zwei Strategien begegnet werden:

- Begrenzen des vorhandenen Potentials in den angrenzenden Schichten
- Erhöhen des Grenzpotentials des mineralischen Dichtungsmaterials

Das Potenzial der angrenzenden Schichten lässt sich durch den Aufbau, die Schichtenfolge und die Schichtdicken begrenzen. Zur Prognose und zur Optimierung eignen sich bei gutem Erfolg Simulationsrechnungen des Wasserhaushaltes wie sie in der Empfehlung E 2-30, in Berger (2002) und Heibroek (2002) beschrieben sind. Die Prognosen lassen sich durch Testfelder überprüfen. Ein weiterer Einflussfaktor ist die mineralische Entwässerungsschicht, für die in den Regelwerken eine Mindeststärke von 30 cm und eine Wasserdurchlässigkeit von $k > 10^{-3}$ m/s gefordert ist. Die häufig eingesetzte Körnung 16-32 mm ist hierfür zu grob. Sie begünstigt die Luftzirkulation in der Schicht. Ein Fein- bis Mittelkies der Körnung 4 - 8 mm erfüllt alle Anforderungen. Der gänzliche Verzicht auf eine Entwässerungsschicht ist im Hinblick auf die Durchwurzelungsproblematik und die Standsicherheit problematisch (Ramke et al. 2002b). Hinweise zum Einsatz von geosynthetischen Dränagen (Dränmatten) finden sich in GDA E 2 -20.

Eine sehr effektive Maßnahme gegen die Austrocknung einer mineralischen Dichtung ist eine aufliegende kapillarbrechende Schicht (KBS) aus Feinsand oder aus schluffigem Sand zwischen Entwässerungsschicht und Dichtung (siehe Bild 1). Als Puffer dämpft sie stark die Übertragung saisonaler Schwankungen der Wasserspannungen, die Extrema einer trockenen Rekultivierungsschicht werden nicht der Dichtung aufgeprägt (Zeh & Witt, 2003). Sie unterbricht oder reduziert den konvektiven Wassertransport nach oben, speichert in gewissem Umfang Wasser und reguliert die Feuchte in der zu schützenden mineralischen Dichtung oder Tondichtungsbahn. Das Dichtungselement bleibt auch bei extrem trockenen Bedingungen hinreichend feucht,

eine unverträgliche Wassergehaltsabnahme wie auch kritisches Schrumpfen werden verhindert. Als Materialien für die kapillarbrechende Schicht haben sich natürliche Böden, Feinsande und leicht schluffige Sande, bei Schichtstärken von 10 – 20 cm bewährt. Als eine erste systematische Anwendung solch einer Schutzschicht sei hier eine alternative Oberflächenabdichtung mit einer Bentonitmatte auf der Deponie Mengersgereuth-Hämmern in Südthüringen aufgeführt. Die gestuft zusammengesetzte Rekultivierungsschicht hat eine Gesamtstärke von 85 cm, die Entwässerungsschicht ist 15 cm dick. In mehrjährigen Testfeldmessungen wurde selbst unter extremen Witterungsbedingungen die hinreichende Schutzwirkung einer 10 cm starken KBS nachgewiesen (Siegmond et al., 2001). Die Durchsickerungsmengen durch die GTD betragen 0,5 % bzw. 0,65 % des Jahresniederschlags. Bei aktuellen Beobachtungen an einem weiteren Messfeld dieser Deponie, bei dem eine mineralische Dichtung mit einer KBS geschützt wird, wurden im extremen Sommer 2003 in der KBS maximale Wasserspannung von 510 hPa gemessen (Grap, 2003). Der Wassergehalt in der mineralischen Dichtung reduzierte sich dabei temporär lediglich um 0,4 %.

Die bisher behandelten Maßnahmen zielen im Sinne des Bemessungskonzeptes nach Gl. 2 auf eine Reduzierung der Beanspruchung der Dichtung, auf eine Begrenzung des maximal auftretenden Potentials ψ_{vorh} . Auf Seiten des Dichtungsmaterials gilt es, die Beanspruchbarkeit, die Widerstandsfähigkeit gegen Schrumpfen zu erhöhen. Das Grenzpotenzial ψ_{crit} des mineralischen Dichtungsmaterials wird zum einen durch die Materialauswahl, zum anderen durch die Einbautechnik beeinflusst. Das kritische Potenzial bindiger Böden ist stark mit der Plastizität, der Dichte und dem Einbau Wassergehalt korreliert. Für rein mineralische Aufbauten sollten für Dichtungen aus natürlichen Böden, die Wassergehaltsschwankungen ausgesetzt sind, nur leicht-mittelplastische Böden mit folgenden Kenngrößen verwendet werden.

Wassergehalt an der Fließgrenze $w_L < 40 \%$

Wassergehalt an der Schrumpfgrenze $w_S < 20 \%$

Wasseraufnahme nach Enslin-Neff $w_A < 70 \%$

Solche natürliche Böden haben eine geringe Schrumpfeempfindlichkeit und überstehen unter den üblichen Einbaubedingungen erfahrungsgemäß temporäre Wasserspannungen in der Größenordnung bis zu 500 hPa schadfrei. Sie bestehen überwie-

gend aus nicht quellfähigen Tonen. Die Kationenaustauschkapazität KAK, indirekter Parameter des Mineralbestandes, sollte nicht mehr als 20 mmol(eq)/100 g betragen.

Ausgehend von der Verteilung der Aggregatsgrößen und vom Mineralbestand wird die mikromorphologische Struktur und damit das Schrumpfverhalten bindiger Böden maßgeblich durch die Genese beeinflusst. Bei der Herstellung einer mineralischen Dichtung sind daher Aggregatsgröße, Einbautechnik und Einbauwassergehalt relevante Parameter. In den Regelwerken wird ein überoptimaler Einbauwassergehalt (auf dem feuchten Ast der Proctorkurve) gefordert (DepV, 2002). Dies resultiert aus Erfahrungen, die eine gute Verarbeitbarkeit und eine geringere Wasserdurchlässigkeit erwarten lassen. Ein Boden befindet sich bei diesem relativ hohen Einbauwassergehalt im sog. Normalschrumpfungsbereich und hat ein hohes spezifische Schrumpfpotenzial (Tariq & Durnford, 1993, Horn, 2002). Bei einem unteroptimalen Einbauwassergehalt lassen sich aufgrund der Struktur und der höheren Verdichtungsenergie höhere Grenzpotenziale mobilisieren. Der Boden zeigt dann bei Wassergehaltsänderungen geringere Zugdehnungen und somit eine geringere Rissempfindlichkeit.

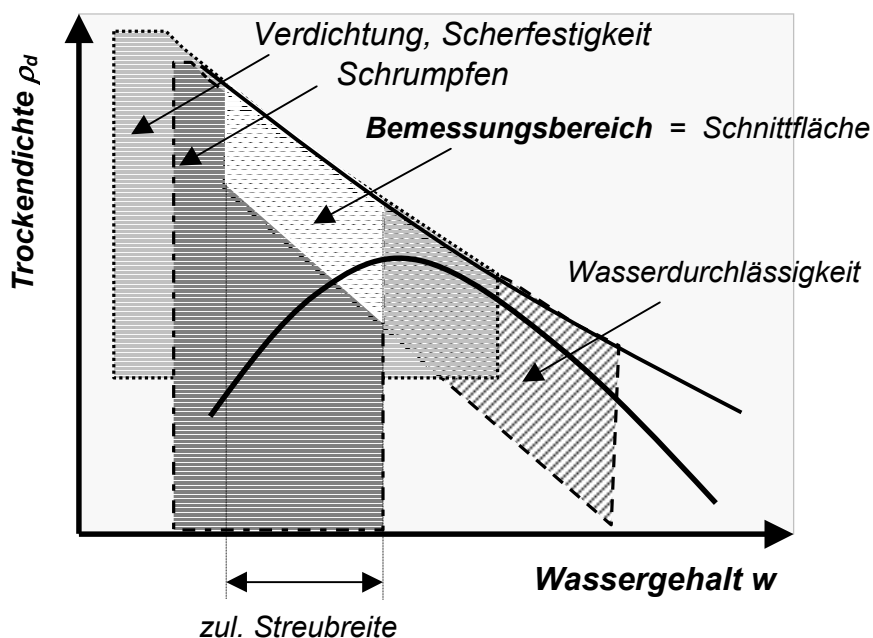


Bild 3: Schematische Darstellung der parameterspezifischen Bemessungszone einer mineralischen Abdichtung (Zeh & Witt, 2002)

Die Forderung nach unteroptimalem Einbau zur Verbesserung der Schrumpfanfälligkeit konkurriert mit anderen bodenmechanischen Anforderungen (siehe Bild 3). Neben der Wasserdurchlässigkeit sind die Kriterien Verdichtungsgrad, die für die Standsicherheit erforderliche Scherfestigkeit und die baupraktische Handhabbarkeit zu beachten. Die Forderung nach unteroptimalem Einbau muss daher dahin gehend relativiert werden, dass der bindige Boden so trocken wie möglich einzubauen ist, jedoch alle bodenmechanischen Kriterien befriedigt sein müssen. In Bild 3 ist dies als Schnittfläche der konkurrierenden Bereiche veranschaulicht, aus der sich die zulässige Streubreite des Wassergehaltes ergibt. Ein unteroptimaler Einbau erfordert eine höhere Verdichtungsenergie zur Erreichung eines vergleichbaren Verdichtungsgrades. Die Verdichtungsenergie im Feld liegt immer über der Verdichtungsarbeit des Laborversuches nach DIN 18127 ($0,6 \text{ MN/m}^3$). Die im Labor ermittelte Proctorkurve ist daher nur als Orientierung und Vergleichsmaß anzusehen. Unter der im Feld eingebrachten Arbeit würde sich eine andere Kurve einstellen, das Optimum verschiebt sich zur trockenen Seite hin.

Die Diskussion der möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Rissgefährdung zeigt zusammenfassend, dass bei einer rein mineralischen Dichtung zwei Größen beeinflussbar sind: Der Wasserhaushalt im Dichtungssystem als Reaktion auf die klimatischen Bedingungen und die Rissempfindlichkeit des Dichtungsmaterials. Im Nachweiskonzept nach Gl. 2 wird eine ungünstige Wasserspannung ψ_{vorh} mit der Widerstandsfähigkeit des Dichtungsmaterials ψ_{crit} im Sinne einer zulässigen Wasserspannung verglichen. Die Parameter lassen sich derzeit noch nicht mit der gewünschten Genauigkeit ermitteln, so dass hinsichtlich des physikalischen Modells und hinsichtlich der langfristig wirksamen Kenngrößen Unsicherheiten verbleiben. Mit Hilfe von empirischen Kenngrößen und mit der numerischen Simulation des Wasserhaushaltes ist jedoch bereits heute eine Einordnung und Beurteilung des Entwurfs einer rein mineralischen Oberflächenabdichtung möglich. Die Kriterien wie auch die experimentelle Ermittlung der relevanten Parameter werden im Zuge der laufenden Untersuchungen präzisiert.

5 Literatur

- August, H., Holzlöhner, U. u. Meggyes, T. (1998):** Optimierung von Oberflächenabdichtungssystemen, BAM, Springer-Verlag, Berlin, 1998
- BayForrest (2002):** Statusbericht, Berichtsheft 13, Berichte des Bayrischen Forschungsvverbands für Abfallforschung und Reststoffverwertung, 2002
- Berger, K. (2002):** Anwendung des HELP-Modells für die Simulation des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen, in: Handbuch der Altlastensanierung, 30. Erg.-Lfg. 2. Aufl., Kennzahl 5588, August 2002
- Deponieverordnung DepV (2002):** Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Änderung der Abfallablagerungsverordnung, BUM Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil 1 Nr. 52, 29. 07. 2002
- Europäische Gemeinschaft, EG (1999):** Richtlinie über Abfalldeponien, Richtlinie 1999/31/EG Des Rates, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 182 vom 26.04.1999
- GDA Empfehlung E 2-20 (2000):** Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen, in: Bautechnik 9/2000
- GDA Empfehlung E 2-30 (2003):** Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, überarbeitete Fassung, www.gdaonline.de
- GDA Empfehlung E 2-31 (2000):** Rekultivierungsschichten, in: Bautechnik 9/2000
- Grap, T. (2003):** Stellungnahme zum aktuellen Zustand des Dichtungssystems der Deponie Mengersgereuth-Hämmern, Zwischenbericht vom 21.08.2003, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- Gröngröft, A., Berger, W., Tresselt, K. u. Miehlich, G. (2003):** Abdichtung von Deponien mit aufbereitetem Baggergut: Ergebnisse eines mehrjährigen Feldversuches. In: Katzenbach u. Witt (Hrsg.): 1. Symposium Umweltgeotechnik der DGGT, Weimar, 2003, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10, Universitätsverlag Bauhaus-Universität Weimar, S. 311-323
- Heibrock, G. (2002):** Modellierung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen mit dem Modell SUMMIT, in Ramke et al. (2002a)
- Heibrock, G., Zeh, R. M. u. Witt, K. J. (2003):** Tensile Strength of Compacted Clays. In Schanz (ed): From Experimental Evidence Towards Numerical Modelling of Unsaturated Soil. ICSMGE Conference, 18/19.10.2003, Weimar, Germany. Springer, Berlin, in print
- Henken-Mellies, U. u. Gartung, E. (2002):** Wirksamkeit einfacher Deponieoberflächenabdeckungen: Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach. Müll und Abfall, Heft 1 2002
- Maier-Harth, U. u. Melchior, S. (2001):** Überprüfung der Wirksamkeit der 10 Jahre alten mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Spremlingen – Kreis Mainz-Bingen, in: Maier-Harth (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz, 28.03.2001, Mainz
- Melchior, S. (1993):** Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten, Diss., Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 22, 1993
- Ramke, H.-G., Gartung, E., Heibrock, G., Lükewille, W., Melchior, S., Vielhaber, B., Bohne, K., Maier-Harth, U., Witt, K. J., Hrsg. (2002a):** Tagungsband - Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Heft 03

Ramke H.-G., Melchior, S., Maier-Harth, U., Gartung, E., Witt, K. J., Heibroek, G., Bohne, K. (2002b): Ergebnisse des Status-Workshops ‚Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen‘, in Ramke et al (2002a):, S. 9-52

Roesler, A. C. u. Benson, C. H. (2002): Field Hydrology and Model Predictions for Final Covers in the Alternative Assessment Program - 2002, Geo Engineering Report No.02-08, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, unter: <http://www.acap.dri.edu/>

Siegmund, M., Witt, K. J. u., Alexiew, N. (2001): Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsänderungen, 7. Informations- und Vortragsveranstaltung über ‚Kunststoffe in der Geotechnik‘, März 2001 München, DGGT

Horn, R. (2002): Verbesserung der Langzeitbeständigkeit von Oberflächenabdichtungen durch modifizierte Abdichtsysteme, in Müll und Abfall, Heft 4, S. 181-186

Tariq, A. u. Durnford, D. S. (1993): Analytical Volume Change Model for Swelling Clay Soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 57: pp. 1183-1187

Vielhaber, B. (1995): Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen – Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahn, Diss., Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 29, 1995

Zeh, R. M. u. Witt, K.J. (2002): Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen von Hausmülldeponien, Endbericht – Ergebnisse und Empfehlungen, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar, www.uni-weimar.de/geotechnik/D/index.html

Zeh, R. M. u. Witt, K. J. (2003): Die Wirkung kapillarbrechender Schichten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponie – erste Ergebnisse , 1. Symposium Umweltgeotechnik der DGGT, Weimar, 2003. In: Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10, Universitätsverlag Bauhaus-Universität Weimar

Zeh, R. M. u. Witt, K. J. (2004): Tensile Strength of Compacted Clays as a Criteria of Crack Initiation in Clay Liners of Landfills. In Sarsby (ed): 4th Int. Symposium on Geotechnics Related to the Environment, Wolverhampton (UK), 2004, in print

Anschrift der Autoren:

*Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Dipl.-Ing. Rainer M. Zeh
Professur Grundbau
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11C
99421 Weimar*

*tel: (03643) 58-4560 fax: (03643) 58-4564
net: www.uni-weimar.de/geotechnik*