

Ergebnisse des Status-Workshops  
„Austrocknungsverhalten von mineralischen  
Abdichtungsschichten in Deponie-  
Oberflächenabdichtungssystemen“

Hans-Günter Ramke, Stefan Melchior, Ulrich Maier-Harth,  
Erwin Gartung, Karl-Josef Witt, Gunnar Heibroock, Klaus Bohne

Ergebnisbericht zum Status-Workshop

Austrocknungsverhalten von mineralischen  
Abdichtungsschichten in Deponie-  
Oberflächenabdichtungssystemen

Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter  
31. Januar/01. Februar 2002

veranstaltet von der  
Arbeitsgruppe 7 – Oberflächenabdichtungssysteme  
des Arbeitskreises 6.1 – Geotechnik der Deponiebauwerke  
der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik

und dem  
Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik  
Fachbereich Technischer Umweltschutz  
Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter

Tagungsband:

Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-  
Oberflächenabdichtungssystemen - Status-Wokshop

Herausgeber: Hans-Günter Ramke, Erwin Gartung, Gunnar Heibrock,  
Walter Lükewille, Stefan Melchior, Beate Vielhaber, Klaus Bohne,  
Ulrich Maier-Harth, Karl-Josef Witt

Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften,  
Band 03, ISBN 3-9807985-2-6

Eigenverlag: Fachbereich 8 (Technischer Umweltschutz)  
und Fachbereich 9 (Landschaftsarchitektur und Umweltplanung)  
der Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter  
An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter  
[www.fh-hoexter.de](http://www.fh-hoexter.de)

## **Ergebnisse des Status-Workshops „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“**

Hans-Günter Ramke, Stefan Melchior, Ulrich Maier-Harth, Erwin Gartung,  
Karl-Josef Witt, Gunnar Heibroock, Klaus Bohne

### **1 Einführung**

In den letzten Jahren sind die Kenntnisse über das Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen zwar stark angewachsen, es war bisher aber noch nicht möglich, die Langzeitwirksamkeit mineralischer Abdichtungsschichten abschließend zu beurteilen, da die Ergebnisse zahlreicher Forschungsvorhaben zum Teil erheblich divergieren.

Die Arbeitsgruppe „Oberflächenabdichtungssysteme“ des Arbeitskreises 6.1 – Geotechnik der Deponiebauwerke - der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) hat daher, zur Vorbereitung eines Empfehlungsentwurfes im Rahmen der GDA-Empfehlungen, einen Status-Workshop zum „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“ durchgeführt. Der Workshop fand am 31.01./01.02.2002 an der Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter statt.

Das Ziel des Workshops bestand darin, einen möglichst umfassenden Status des gegenwärtigen Kenntnisstandes aufzunehmen. Hierzu wurden die Forschungsergebnisse aus den drei Themenbereichen Felduntersuchungen, Laboruntersuchungen und Modellierungsansätze nach jeweils einheitlichen Schemata vorgestellt und anschließend in Arbeitsgruppen näher diskutiert.

Um innerhalb des gesetzten Zeitrahmens alle Aspekte des Austrocknungsverhaltens tonmineralischer Abdichtungsschichten zufriedenstellend diskutieren zu können, wurde auf die Berücksichtigung von Bentonitmatten verzichtet.

Die Einladung zum Workshop richtete sich an alle Forschungsgruppen, Institute, Ingenieurbüros und Behörden, die eigene Arbeiten in einem der drei genannten Bereiche durchgeführt haben.

Insgesamt wurden 33 Beiträge präsentiert. Neben den Referenten und Autoren waren Mitarbeiter des Umweltbundesamtes und verschiedener Landesumweltämter auf dem Workshop vertreten. Der Teilnehmerkreis wurde bewusst auf diesen Rahmen begrenzt, um einen intensiven fachlichen Austausch im kleineren Kreis zu ermöglichen. Aus ganz Deutschland haben 55 Fachleute an dem Status-Workshop teilgenommen.

Aus Gründen der Aktualität bzw. wegen des generellen Charakters wurden nachträglich zwei weitere Beiträge in den hier vorliegenden Tagungsband aufgenommen.

In der Tabelle 1.1 sind die Organisatoren und Moderatoren des Status-Workshops aufgeführt.

Tabelle 1.1: Wissenschaftliche Leitung des Status-Workshops

<p>Gesamtleitung und Organisation Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke  Dr.-Ing. agr. Walter Lükewille  Dr. Beate Vielhaber</p>	<p>Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter  IUP Umwelttechnik GmbH, Braunschweig  Abfallwirtschaftsbetrieb Hannover, Stellenleitung Bauplanung</p>
<p>Arbeitsgruppe 1: Felduntersuchungen  Dr. habil. Stefan Melchior   Dr. Ulrich Maier-Harth</p>	<p>melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft, Hamburg  Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz</p>
<p>Arbeitsgruppe 2: Laboruntersuchungen  Dr.-Ing. Erwin Gartung   Professor Dr.-Ing. Karl-Josef Witt</p>	<p>Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg  Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau</p>
<p>Arbeitsgruppe 3: Modellierungsansätze  Dr.-Ing. Gunnar Heibroek   Prof. em. Dr. habil. Klaus Bohne</p>	<p>Jessberger und Partner Büro Leipzig GmbH, Leipzig  Universität Rostock, Institut für Bodenkunde</p>

Nachfolgend werden die Beiträge zu den einzelnen Themenbereichen und die Ergebnisse der jeweiligen Arbeitsgruppen vorgestellt, bevor dann zusammenfassend der derzeitige Kenntnisstand resümiert wird und Empfehlungen zur Umsetzung in der Praxis ausgesprochen werden.

Dieser Ergebnisbericht wurde vor seiner endgültigen Veröffentlichung den Teilnehmern am Workshop zur Diskussion zugesandt. Die eingegangenen Stellungnahmen und Anmerkungen der Teilnehmer wurden nach eingehender Diskussion zwischen den Autoren des Ergebnisberichtes und den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Oberflächenabdichtungssysteme des AK 6.1 eingearbeitet. Ein generell abweichendes Votum wurde nicht abgegeben. Damit gibt der Ergebnisbericht die gemeinsame Auffassung der Workshop-Teilnehmer wieder.

Beiträge zum Workshop bzw. dieses Tagungsbandes werden im folgenden nur mit den Verfassernamen in Kapitälchen ohne Jahresangabe zitiert.

## **2 Ergebnisse von Felduntersuchungen**

### **2.1 Einführung**

Seit langem ist bekannt, dass die Wasserdurchlässigkeit von mineralischen Abdichtungen unter Deponiebedingungen stark von den im Labor bestimmten Werten abweichen kann. Zahlreiche physikalische, chemische und biologische Prozesse wirken im Feld auf die Abdichtungen ein und können ihre Wirksamkeit beeinflussen. Seit Mitte der 80er Jahre werden in Deutschland, ausgehend von mehreren Verbundforschungsvorhaben zur Altlastensanierung, Deponieoberflächenabdichtungssysteme unter Feldbedingungen untersucht. Schwerpunkt der Aktivitäten ist die direkte Messung der Durchsickerung der Abdichtungssysteme in Testfeldern, sogenannten Großlysimetern. Ergänzt werden diese aufwendigen und mindestens über mehrere Jahre laufenden Testfelduntersuchungen durch Momentaufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeiten nach Fertigstellung der Abdichtungen durch Aufgrabung und Begutachtung von ausgeführten Abdichtungen gewonnen werden.

### **2.2 Übersicht über die Beiträge**

In der Tabelle 2.1 sind die Beiträge zum Themenbereich „Felduntersuchungen“ aufgeführt. Die Beiträge können zwei Teilthemen zugeordnet werden:

- Untersuchungen an Testfeldern
- Aufgrabungen von Abdichtungen

Für eine erste Orientierung über die Beiträge wird in der Tabelle 2.2 eine vereinfachte Übersicht über die Randbedingungen und Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen gegeben. Die Reihenfolge der aufgeführten Beispiele entspricht der Reihenfolge der Nennungen in der Tabelle 2.1.

Bei einer Auswertung der Tabelle 2.2 werden zwei Aspekte deutlich:

- die Untersuchungen wurden überwiegend an Deponien oder mit Versuchsfeldern durchgeführt, die nicht nach dem heutigen Stand des Wissens angelegt wurden
- bei den meisten Untersuchungen wurden Beschädigungen der mineralischen Abdichtungsschichten festgestellt

Gerade die Felduntersuchungen waren entscheidend dafür, die Austrocknungsproblematik zu erkennen und zu den nachfolgend formulierten Schlussfolgerungen zum Verständnis der Phänomene und zur Verbesserung der Systeme zu gelangen. Hinsichtlich der langfristigen Funktionsfähigkeit sei ausdrücklich auf die Untersuchungen von RÖDL/HEYER an zehn Deponien in Bayern hingewiesen, die ein positiveres Bild der Langzeitwirksamkeit mineralischer Abdichtungen als die Zusammenstellung in der Tabelle 2.2 ergeben.

Tabelle 2.1: Beiträge zum Themenbereich „Felduntersuchungen“

Teil 1: Testfelder
Großlysimeter Deponie Hamburg-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Abdichtungen <i>S. Melchior, K. Berger, B. Vielhaber, G. Miehlich</i>
Langzeitbeobachtung zum Verhalten einer verstärkten mineralischen Dichtungsschicht in einer kombinierten Oberflächenabdichtung <i>W. Breh, V. Giurgea, H. Hötzl</i>
Großversuche der Universität Trier mit einer mineralischen Abdichtungsschicht <i>J.-F. Wagner, C. Schnatmeyer</i>
Austrocknungsverhalten einer mineralischen Oberflächendichtung aus Hafenschlick: I Ergebnisse eines fünfjährigen Feldversuchs <i>A. Gröngröft, K. Tresselt, K. Berger, S. Melchior, M. Türk, G. Miehlich</i>
Wirksamkeit und Wasserhaushalt einer mineralischen Deponie-Oberflächenabdeckung: Ergebnisse von Langzeituntersuchungen an einem Großlysimeter <i>U. Henken-Mellies</i>
Felduntersuchungen zur temperaturinduzierten Austrocknungsgefährdung einer Kombinationsabdichtung im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Hamburg-Georgswerder <i>B. Vielhaber, S. Melchior, G. Miehlich</i>
Erfahrungen mit Testfeldern der Oberflächenabdichtung an der SAD Gerolsheim <i>S. Urban-Kiss, G. Rettenberger</i>
Auflastbedingte Konsolidation einer mineralischen Dichtschicht <i>H. Zepp, A. Hennig</i>
Feldversuchsaufbau für vergleichende Wasserhaushaltsbetrachtungen in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen <i>K.-J. Arlt, N. Wolsfeld</i>
Versuchsfelder auf der Altdeponie Kuhstedt für standortangepasste alternative Oberflächenabdichtungssysteme <i>K. Hupe, K.-U. Heyer, A. Unger, R. Stegmann</i>
Messfelder der UniBw München auf der Deponie Nord-West: Wirksamkeit der selbstheilenden mineralischen Dichtung bei einer Rekultivierungsschicht von ein bzw. zwei Metern Dicke <i>J. Schmid, H. Schulz</i>
Teil 2: Aufgrabungen
Untersuchung von Schrumpfrissen in einem mineralischen Abdichtungskörper <i>H. K. Neff</i>
Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht <i>S. Melchior, B. Vielhaber</i>
Feldstudien zum Langzeitverhalten mineralischer Deponieabdeckungen in Bayern <i>P. Rödl, D. Heyer, D. Ranis</i>
Überprüfung der Wirksamkeit der mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen <i>U. Maier-Harth, S. Melchior</i>
Oberflächenabdichtung der Deponie Eisenberg, Ist-Zustand <i>W. Fein</i>
Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungen mit Trisoplast – Zwischenergebnisse <i>S. Melchior, B. Steinert, D. Boels</i>

Tabelle 2.2: Vereinfachte Übersicht über die Ergebnisse von Testfeldern und Aufgrabungen (Auswahl der Beispiele in den Beiträgen)

Verfasser	Rekultivierungsschicht	Entwässerungsschicht	Abdichtungsschicht	Schäden/ Bemerkungen
MELCHIOR ET AL.	75 cm	25 cm; Kies 1/8	60 cm; Geschiebemergel	Austrocknung
	75 cm	25 cm; Kies 1/8	60 cm; Geschiebemergel	Austrocknung, Durchwurzelung
BREH ET AL.	100 cm	15 cm; Kies 2/32	60 cm;	starke Erhöhung Durchlässigkeit
WAGNER/ SCHNATMEYER	75 cm	40 cm;	30 cm; Ton	(keine)
	75 cm	-	30 cm; Ton	Austrocknung, Durchwurzelung
GRÖNGRÖFT ET AL.	20 cm	60 cm; Sand	150 cm; Hafenschlick	starke Erhöhung Durchlässigkeit
HENKEN- MELLIES	20 cm	-	150 cm; tu-Sand	nur Abdeckung
VIELHABER ET AL.	75 cm	25 cm; Kies	2,5 mm KDB; 60 cm BMD	keine
URBAN-KISS/ RETTENBERGER	40 cm	15 cm; Kies	60 cm; Lößlehm	Austrocknung, Durchwurzelung
MELCHIOR/ VIELHABER	30 cm	-	50 cm; Geschiebeboden	Gefügebildung, Durchwurzelung
MAIER-HARTH/ MELCHIOR	70 cm	-	30 cm; Ton, bentonitv.	Austrocknung, Durchwurzelung
	170 cm	-	30 cm; Löß, bentonitv.	Austrocknung, Durchwurzelung
FEIN	100 cm	1 cm; Dränmatte	70 cm; Klebsand	keine Schäden, erhöht. Durchl.
MELCHIOR ET AL.	55 cm	-	7,5 cm; TRISOPLAST	keine
	140 cm	30 cm; Sand	6 cm; TRISOPLAST	keine

## 2.3 Schlussfolgerungen

### 2.3.1 Generelle Schlussfolgerungen

Aus den verschiedenen Testfelduntersuchungen liegen umfangreiche Datensätze zum Wasserhaushalt und zu den Eigenschaften von Deponieoberflächenabdichtungssystemen vor. Zusammen mit den Ergebnissen der Aufgrabungen können die maßgeblichen Randbedingungen, die sich daraus hinsichtlich der Austrocknungs- und Rissgefährdung für bindige mineralische Oberflächendichtungen ergeben, wie folgt beschrieben werden:

- In Oberflächenabdichtungen herrschen wechselfeuchte Bodenverhältnisse vor. Die Schichten sind weitgehend wasserungesättigt. Der Abfluss aus kiesigen Entwässerungsschichten kommt im Sommerhalbjahr je nach Standort und Witterungsverlauf unterschiedlich lange zum Erliegen. Die im restlichen Jahresverlauf in der Entwässerungsschicht messbaren maximalen Wasseraufstauhöhen sind im Vergleich zu Basisabdichtungen gering und treten im Regelfall nur kurzfristig auf.
- In der Rekultivierungsschicht können je nach Standort, Witterungsverlauf, bodenhydrologischem Aufbau und Bewuchs zeitweise sehr hohe Wasserspannungen auftreten, die eine aufwärts gerichtete Wassernachlieferung aus den tieferen Schichten des Abdichtungssystems in flüssiger oder dampfförmiger Phase nach sich ziehen.
- Pflanzenwurzeln dringen in mineralische Abdichtungen ein und verschärfen Austrocknung und Rissbildung, sofern sie nicht in der Rekultivierungsschicht ausreichend Wasser finden oder durch Wurzelsperren (z.B. KDB) daran gehindert werden.
- Auf der Abdichtungsschicht liegende Elemente des Oberflächenabdichtungssystems führen nur zu einer geringen Auflast.
- Das eingesickerte Niederschlagswasser nimmt im Boden Stoffe (u.a. Ionen, Salze, Metallhydroxide, Huminstoffe) auf, die in der Abdichtung zu einem Ionenaustausch oder zu Ausfällungen auf Bodenaggregaten führen können. Beides kann das Quellvermögen der Tonminerale negativ beeinflussen.
- Solange noch organische Stoffe durch exotherme Prozesse im Abfallkörper abgebaut werden ist zu erwarten, dass über lange Zeiten im Jahresverlauf mit dem Deponiegas Wasserdampf an die Unterseite der mineralischen Abdichtung herangeführt wird. Mit dem Abkühlen des Deponiekörpers geht dieser Einfluss zurück.

Auch zur Durchführung von Felduntersuchungen an mineralischen Abdichtungssystemen konnten aus den vorliegenden Beiträgen eine Reihe von Empfehlungen zusammengestellt werden:

- Austrocknungsbedingte Schäden werden am besten durch Testfelduntersuchungen erkannt, da hierbei die Einbaubedingungen, ggf. vorhandene Inhomogenitäten und die sich aus dem Standort und dem Aufbau des gesamten Oberflächenabdichtungssystems ergebenden Einwirkungen auf die Abdichtung mit erfasst werden. Die Testfelder müssen so groß sein, dass der Einbau in für Großflächen repräsentativer Qualität möglich ist und die Bestimmung auch geringer Durchsickerungsraten der Abdichtung messtechnisch in ausreichender Auflösung und Sicherheit erfolgt. Dabei sind zusätzlich zur Bestimmung der Durchflussmengen auch Tracermethoden empfehlenswert.
- Zusätzlich zur Abdichtungsdurchsickerung sollte in Testfeldern auch der seitliche Abfluss in der Entwässerungsschicht gemessen und die Abdichtungsdurchsickerung auf die Dränspende (Summe aus Abfluss in der Entwässerungsschicht und Abdichtungsdurchsickerung) bezogen werden (Wirkungsgrad des Abdichtungselements).
- Der häufig praktizierte Bezug der Abdichtungsdurchsickerung auf den Niederschlagseintrag erfasst auch die von der Qualität der Rekultivierungsschicht und vom Bewuchs abhängige Verdunstung und kennzeichnet die Systemwirksamkeit.
- Im Zuge von Aufgrabungen sind Infiltrationsversuche am besten dazu geeignet, Abdichtungen auf Rissfreiheit zu untersuchen.
- Risse, die die Durchlässigkeit der Abdichtung erhöhen, sind nicht immer mit dem Auge erkennbar. Bei Aufgrabungen sollten daher auch mikroskopische Untersuchungsmethoden eingesetzt und in der Ansprache von Bodengefüge erfahrene Gutachter tätig werden. Die Abdichtungsoberfläche muss sorgfältig in Handarbeit präpariert werden, um Schäden erkennen zu können.

### 2.3.2 Schlussfolgerungen zur Gestaltung des Oberflächenabdichtungssystems

Die einzelnen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems beeinflussen die Austrocknung und Rissbildung der mineralischen Abdichtungskomponente wie folgt:

#### Auflager und Gasdränage

- Die Gefahr der Austrocknung mineralischer Abdichtungslagen in Kombinationsabdichtungen von unten her wird minimiert, wenn das Auflager aus feinkornhaltigen Materialien aufgebaut wird, die über eine gewisse Wasserhaltekapazität und eine geringe Luftwegsamkeit verfügen. Reine Kiese oder Kies-Sandgemische sind ungünstig.

- Da solche Materialien als Gasdränung ungeeignet sind, ist die Funktion von Gasdränschicht und Auflager (Tragschicht) zu trennen. Gegebenenfalls sind horizontale Gassammler einzubauen.

#### Mineralische Abdichtung

- Die Bildung von durchgehend wasserleitenden Schrumpfrissen wurde in mehreren Untersuchungen bei Wasserspannungen zwischen 200 hPa und 500 hPa festgestellt. Es sind jedoch in ihrer Zusammensetzung und ihrem Einbauverfahren modifizierte mineralische Abdichtungen bekannt, die weitaus höhere Wasserspannungen schadlos überstehen können.
- Austrocknungsbedingte Schäden entstehen vor allem infolge von Durchwurzelung. In Einzelfällen traten Schäden aber auch ohne direkte Wurzeleinwirkung auf.
- Ob und zu welchem Zeitpunkt austrocknungsbedingte Schäden auftreten, hängt vom örtlichen Klima, dem Witterungsverlauf im Sommer (Auftreten von extremen Trockenperioden), dem Schutz der mineralischen Abdichtung durch die Deckschichten sowie von den Materialeigenschaften und der Art des Einbaus der Abdichtung selbst ab.
- In den Untersuchungen, die austrocknungsbedingte Schäden der mineralischen Abdichtung ausweisen, traten die Schäden frühestens 2 bis 5 Jahre nach Einbau der Abdichtungen auf. Längere Untersuchungszeiträume wurden nur vereinzelt dokumentiert.
- Gering quellfähige Tone neigen weniger zu Schrumpfrissen als Abdichtungen mit hohen Anteilen aktiver Dreischichttonminerale.
- Eine polymervergütete Abdichtungsschicht (TRISOPLAST) zeigt in den dargestellten Untersuchungen bessere Eigenschaften hinsichtlich der Austrocknung als die untersuchten herkömmlichen mineralischen Abdichtungen, wie sie gemäß TA Abfall und TA Siedlungsabfall eingebaut werden – auch bei Durchwurzelung.
- Die Verdichtung des mineralischen Abdichtungsmaterials soll so erfolgen, dass die Bildung von Porenwasserüberdrücken verhindert und kein Porenwasser mobilisiert wird.
- Wasserbewegungen in Kombinationsabdichtungen beruhen auf jahreszeitlichen Änderungen des Temperaturgradienten und der absoluten Temperatur. Diese temperaturabhängige Wasserbewegung in Richtung abnehmender Temperatur ist zwar gering, kann aber an der Unterseite der Kunststoffdichtungsbahn zur Bildung von Kondenswasser führen, was ggf. die Verbundreibungswerte von KDB zu mineralischer Abdichtung reduziert.

- In mineralischen Abdichtungen, die nicht von einer KDB oder einer anderen Konvektionssperre überdeckt werden, ist die temperaturabhängige Wasserbewegung gegenüber dem konvektiven, von Wasserspannung und Schwerkraft abhängigen Wassertransport vernachlässigbar.

#### Kunststoffdichtungsbahn

- Die Kunststoffdichtungsbahn hat sich als „Isolator“ (z. B. Wurzelsperre, Gassperre) gut bewährt.

#### Entwässerungsschicht

- Entwässerungsschichten sind in Oberflächenabdichtungssystemen zur Wasserableitung und zur Unterbrechung des kapillaren Wasseraufstiegs erforderlich.
- Entwässerungsschichten aus Sand oder Sand-Kies-Gemischen führen zu einer verzögerten Abflussbildung, so dass die Abdichtung länger feucht gehalten wird. Lange, schwach geneigte Böschungen wirken in gleicher Weise günstig.
- Grobes Dränmaterial (z.B. Kies 16/32) ist in Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen zur Wasserableitung nicht erforderlich. Durch die grobe Körnung wird zwar der kapillare Aufstieg von Wasser aus der Abdichtung behindert, die sehr hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit führt jedoch im Sommerhalbjahr zu längeren abflusslosen Phasen, die für die Austrocknung der Abdichtung kritisch sind. Zudem bergen grobkörnige Entwässerungsschichten bei geringer Wassersättigung die Gefahr einer von Luftdruckschwankungen angetriebenen konvektiven Strömung der Bodenluft über der Abdichtung.
- Die Entwässerungsschicht muss gegenüber der Atmosphäre abgeschottet sein, damit keine wasserdampfgesättigte Luft auf der Abdichtungs-oberfläche ventilieren kann.
- Das Weglassen der Entwässerungsschicht löst die Austrocknungsproblematik nicht. Gerade in Systemen ohne Entwässerungsschicht wurden gravierende austrocknungsbedingte Risse festgestellt. Diese Beobachtungen sind auf eine gute kapillare Wassernachlieferung aus der Abdichtung in die sommerlich trockene und nicht ausreichend dimensionierte Rekultivierungsschicht zurückzuführen.

### Rekultivierungsschicht

- Die Rekultivierungsschicht muss oberhalb von schrumpfanfälligen mineralischen Abdichtungen so dimensioniert werden, dass eine Durchwurzelung der Abdichtung verhindert wird und der untere Bereich der Rekultivierungsschicht möglichst dauerhaft feucht bleibt.
- Voraussetzung und wichtigste Kenngröße hierfür ist die nutzbare Feldkapazität der Rekultivierungsschicht im effektiven Wurzelraum (nFKWe oder pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat). Die nutzbare Feldkapazität hängt von der Bodenart, dem Humusgehalt und der Trockendichte des Rekultivierungsmaterials ab.
- Der Einbau des Rekultivierungsmaterials muss im effektiven Wurzelraum so erfolgen, dass eine Überverdichtung und damit verbundene geringe nutzbare Feldkapazitäten und geringe Luftkapazitäten vermieden werden.

### Bewuchs

- Das Tiefenwachstum von Pflanzen korreliert nicht mit der oberirdisch sichtbaren Phytomasse und ist nur zum Teil genetisch vorgeprägt. Auch unscheinbare Kräuter erreichen mehrere Meter Durchwurzelungstiefe, wenn die Standortbedingungen dieses erfordern und Konkurrenz und Veranlagung der Art es zulassen.
- Die nachträgliche Beseitigung von Tiefwurzlern setzt voraus, dass diese als solche erkannt werden. Sie ist äußerst mühsam und folglich nahezu aussichtslos. Gleichwohl kann ihnen durch gezielte Auswahl der Ansaat und durch Pflegemaßnahmen entgegengewirkt werden.
- Die beste bekannte Wurzelsperre ist die Kunststoffdichtungsbahn. Verdichtete gemischtkörnige Böden (Lehme, lehmige Sande) sind keine zuverlässigen Wurzelsperren.
- Die Menge an versickerndem Niederschlagswasser kann durch immergrüne Pflanzen (hohe Interzeption!) verringert werden.

## 2.4 Offene Fragen

Bei der Diskussion der Beiträge in der Arbeitsgruppe 1 wurden eine Reihe von Fragen kontrovers diskutiert bzw. konnten zwar formuliert, jedoch nicht abschließend beantwortet werden:

- Sind Randbedingungen realisierbar, bei denen auf dem nassen Ast der Proctorkurve eingebaute tonhaltige mineralische Abdichtungen aus natürlichen Böden langfristig rissfrei bleiben?

- Wird die Gefahr von Schrumpfrissen in der mineralischen Abdichtung generell minimiert, wenn bei Berücksichtigung aller Randbedingungen der Einbau der mineralischen Abdichtung auf dem trockenen Ast der Proctorkurve erfolgt?
- Welche Bauweisen stehen für den Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve zur Verfügung, welche Möglichkeiten gibt es, zu feuchtes Material gegebenenfalls zu trocknen?
- Der Einbau auf dem nassen Ast führt zur besseren Homogenisierung des mineralischen Abdichtungsmaterials und damit zu geringeren anfänglichen Wasserleitfähigkeiten. Bleiben beim Einbau auf dem trockenen Ast Grobporen und im Material bereits vorhandene Gefügestrukturen als potentielle Wasserleitbahnen offen?
- Die an einigen Standorten zumindest in trockenen Sommern sehr starken Unterschiede in der Wasserspannung von Rekultivierungsschicht und Abdichtung führen offenbar zu einem Wassertransport in dampfförmiger Phase und kapillar in flüssiger Phase, um diesen Energieunterschied auszugleichen. Wie kann dieser Potentialausgleich – außer durch die Anordnung einer Konvektionssperre für Gas und Wasser – verhindert werden?
- Reicht eine Entwässerungsschicht aus Sand oder eine Schluffschicht zwischen mineralischer Abdichtung und kapillARBrechender Schicht aus, um die Rissfreiheit und Plastizität des Einbauzustandes der mineralischen Dichtung langfristig zu erhalten?
- Welche Dränmatten wirken langfristig als kapillARBrechende Schicht und unterbinden folglich dauerhaft den kapillaren Wasseraufstieg?
- Sind Wassergehaltsänderungen in mineralischen Abdichtungskomponenten von Kombinationsabdichtungen langfristig ohne Auswirkung auf die Dichtwirkung?
- Welche Mindestmächtigkeiten sind bei welchen Dichtungssystemen und welchen Klimaten vor allem für die Rekultivierungsschicht erforderlich? Reicht eine Mindestmächtigkeit von 1,5 m in jedem Fall?
- Ist die Forderung nach einer nutzbaren Feldkapazität von mindestens 200 mm/m im Wurzelraum für alle Standorte richtig gewählt? Was ist zu tun, wenn hierfür geeignete Materialien am Standort nicht vorliegen?
- Wie lange müssen Feldversuche für neue Systeme mindestens durchgeführt werden und wer finanziert und bewertet diese?

### 3 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

#### 3.1 Einführung

Das Ziel einer fachgerechten Anwendung mineralischer Abdichtungen im Deponiebau besteht darin, ihre dauerhafte Wirksamkeit sicherzustellen, was u.a. den Ausschluss der Undichtigkeit infolge von Rissen beinhaltet. Um jegliche Rissbildung in mineralischen Abdichtungsschichten gezielt zu vermeiden, muss ein möglicher Entzug von Porenwasser so begrenzt werden, dass kritische, die Rissbildung verursachende Zugspannungen nicht auftreten. Zur Lösung dieser Aufgabe müssen zum einen die zu erwartenden Einwirkungen, welche die Zustandsänderung des mineralischen Abdichtungsmaterials bewirken, zutreffend prognostiziert werden. Zum anderen muss der kritische Zustand, zu dem ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden soll, bekannt sein.

Damit ergibt sich neben der Frage nach Prognosemodellen die Aufgabe, den kritischen Zustand, bei dem in mineralischen Abdichtungen Risse auftreten, experimentell zu ermitteln und quantitativ zu beschreiben. Hierfür werden die Eigenschaften und das Verhalten des mineralischen Abdichtungsmaterials in bodenmechanischen und bodenphysikalischen Laborversuchen untersucht.

Unterschiedliche Erdstoffe zeigen unterschiedliches Austrocknungsverhalten. Um das in Frage stehende mineralische Abdichtungsmaterial korrekt charakterisieren zu können, werden die in Tabelle 3.1 zusammengestellten Untersuchungen zur bodenphysikalischen Klassifizierung nach GDA E 3-1 durchgeführt.

Tabelle 3.1: Untersuchungen zur bodenphysikalischen Klassifizierung nach GDA E 3-1

Parameter	Norm
Korngrößenverteilung	DIN 18 123
Zustandsgrenzen (Fließ-, Ausroll-, Schrumpfgrenze)	DIN 18 122
Organische Bestandteile	DIN 18 128
Korndichte	DIN 18 124
Kalkgehalt	DIN 18 129
Wasseraufnahme	DIN 18 132
Wassergehalt	DIN 18 121
Dichte	DIN 18 125

Für die Bewertung des Austrocknungsverhaltens ist die Bestimmung der Schrumpfgrenze im Rahmen der Bestimmung der Zustandsgrenzen besonders hervorzuheben. Der Einbauwassergehalt soll so nahe wie möglich bei der Schrumpfgrenze liegen, damit das Schrumpfvermögen gering gehalten wird. Ferner ist zu beachten: Je größer die Plastizitätszahl (Differenz zwischen Wassergehalt an der Fließgrenze und Wassergehalt an der Ausrollgrenze), um so größer ist das

Schrumpfermögen des Bodens und damit seine Anfälligkeit gegenüber der Bildung von Austrocknungsrisen.

Die in Tabelle 3.2 genannten bodenmechanischen Versuche nach GDA E 3-1 werden benötigt, um die Durchlässigkeit, das Spannungs-Verformungsverhalten, die Festigkeit und die Einbaukriterien des mineralischen Abdichtungsmaterials zu ermitteln. Einige der bodenmechanischen Versuche können auch Hinweise auf Kenngrößen für Modellgesetze, mit denen die Rissbildung mathematisch beschrieben wird, geben.

Tabelle 3.2: Untersuchungen zur Bestimmung von Einbaukriterien, Spannungs-Verformungsverhalten, Festigkeit und Durchlässigkeit nach GDA E 3-1

Proctorversuch	DIN 18 127
Kompressionsversuch	DIN 18 135
Quellversuch	DGGT, FS 3, E 11
Triaxialversuch oder direkter Scherversuch	DIN 18 137
Einaxialer Druckversuch	DIN 18 136
Durchlässigkeitsversuch	DIN 18 130

Um Einbaukriterien auch für den Bodeneinbau mit möglichst geringem Wassergehalt, dafür mit höherer Einbauenergie zu gewinnen, ist es zweckmäßig, außer dem Standard-Proctorversuch auch den modifizierten Proctorversuch durchzuführen, bei dem eine definierte, höhere Verdichtungsenergie eingebracht wird.

Das üblicherweise für den Kompressionsversuch benutzte Ödometer kann bei entsprechenden Modifikationen in der Versuchsdurchführung zur Gewinnung von Parametern für Rissbildungs-Modelle eingesetzt werden. Auch im Triaxialversuch lassen sich, wenn Porenwasserdruck und Porenluftdruck separat gemessen werden, Parameter für Modellberechnungen bestimmen (HEIBROCK, 1996). Nach BRAUNS ET AL., 2000 lässt sich mit einer Serie von einaxialen Druckversuchen, bei denen der Wassergehalt variiert wird, diejenige statische Auflast ermitteln, die eine Rissbildung verhindert.

Diese Erläuterung zeigt, dass für die Untersuchung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsmaterialien zunächst die üblichen bodenmechanischen Routineversuche durchgeführt werden und dass zusätzlich Sonderversuche, die sich durch spezielle Randbedingungen und Modifikation der Versuchsdurchführung von den Routineversuchen unterscheiden, zur Ermittlung von Modellparametern zweckdienlich sein können.

Der Schwerpunkt der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen liegt deshalb nach der Beschreibung der Anwendung bodenphysikalischer Methoden auf Versuchen zur Erfassung des Austrocknungsverhaltens.

### 3.2 Übersicht über die Beiträge

In der Tabelle 3.3 sind die Beiträge zum Themenbereich „Laborversuche“ zusammengestellt, die näherungsweise drei Teilbereichen zugeordnet werden können:

- generelle Untersuchungen
- Systemversuche und materialspezifische Untersuchungen
- Schlussfolgerungen

Tabelle 3.3: Beiträge zum Themenbereich „Laboruntersuchungen“

Teil 1: Generelle Untersuchungen
Hydraulische Eigenschaften von Abdichtungsmaterialien – Messmethode und Ergebnisse <i>H. Stoffregen, G. Wessolek</i>
Dynamik der pF-Kurve: Möglichkeiten der Bestimmung und Konsequenzen <i>Th. Baumgartl</i>
Methode zur Ermittlung des Wassergehaltes bei Schrumpfrisseintritt <i>A. Gebissa, T. Quandt, S. Berndt</i>
Untersuchung zum Rissverhalten geogitterbewehrter mineralischer Oberflächendichtungsschichten - Entwicklung einer automatisierten Labor-Versuchs- und Messanordnung <i>H. Thomas</i>
Teil 2: Systemversuche und materialspezifische Untersuchungen
Durchlässigkeitsentwicklung nach zyklischer Austrocknung <i>T. Quandt, S. Berndt, H. Didik</i>
Vergleichende Laboruntersuchung des Austrocknungs- und Durchwurzelungsverhaltens von bindigen mineralischen Abdichtungen aus Geschiebemergel und aus Trisoplast <i>B. Steinert, O. Flöter, S. Melchior</i>
Austrocknungsverhalten einer Oberflächendichtung aus Hafenschlick: II Ergebnisse von Laborversuchen zum Schrumpfungsverhalten <i>A. Gröngröft, K. Tresselt, M. Türk, G. Miehlich</i>
Durchlässigkeits- und Austrocknungsversuche mit gemischtkörnigen Abdichtungsmaterialien - Ergebnisse und versuchstechnische Probleme <i>D. Heyer, P. Rödl</i>
Teil 3: Schlussfolgerungen
Analyse des Austrocknungsverhaltens von mineralischem Bodenmaterial anhand von Laboruntersuchungen <i>R. Horn</i>
Folgerungen aus den Vorträgen im Status-Workshop zum Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten <i>H. K. Neff</i>

Die auf dem Workshop vorgestellten Untersuchungsmethoden lassen sich in die folgenden vier Kategorien zusammenfassen:

- bodenphysikalische Untersuchungen
- Durchwurzelungsversuche
- Versuche zur Rissbildungsempfindlichkeit
- Systemversuche zum Austrocknungsverhalten

Die beiden ersten Beiträge, die bodenphysikalische Untersuchungen zum Gegenstand haben, befassen sich mit der Bestimmung der Retentionsfunktion oder pF-Kurve. Für die Untersuchung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsmaterialien ist die Kenntnis der Retentionsfunktion, welche die Beziehung zwischen dem Matrixpotential bzw. der Wasserspannung und dem volumetrischen Wassergehalt des Bodens beschreibt, in jedem Fall erforderlich.

STOFFREGEN/WESSOLEK beschreiben Methoden zur Bestimmung der Retentionsfunktion und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von Abdichtungsmaterialien über einen weiten Bereich von Matrixpotentialen (-100 hPa bis -100.000 hPa). Die Funktionen sind die Grundlage von numerischen Wasserhaushaltsmodellen, mit denen die Wasserbewegung innerhalb der Deponieabdichtung berechnet werden kann.

Wie die hydraulische Leitfähigkeit, so ist auch die Retentionsfunktion vom Zustand des Bodenmaterials abhängig. Es kann daher für eine quantitative Aussage zum Austrocknungsverhalten erforderlich sein, die Retentionsfunktion unter verschiedenen Belastungs- und damit auch Verformungs- oder Volumenänderungszuständen zu ermitteln und, wie von BAUMGARTL in seinem Beitrag vorgeschlagen, im räumlichen Koordinatensystem (Feuchtezahl, pF, Porenzahl) darzustellen. In den meisten Fällen wird die pF-Kurve jedoch für das mineralische Abdichtungsmaterial nur unter den Bedingungen des Einbauzustands ermittelt und dient eher der qualitativen Beschreibung des Stoffverhaltens. Die Untersuchungen von BAUMGARTL und auch die von HORN veranschaulichen insbesondere den Einfluss der Belastungsgeschichte auf das Verformungs- und Rissverhalten. Ähnlich wie beim Druck-Setzungs-Versuch reagiert der Boden im teilgesättigten Zustand mit wechselnder Saugspannung auf eine Erst- und Wiederbefeuchtung unterschiedlich steif.

Die von GEBISSA ET AL. durchgeführten Arbeiten zielen in die Richtung der Entwicklung neuer Mess- und Prüfverfahren für die praktische Anwendung. GEBISSA ET AL., haben zur Messung der Rissbildung kleine Bodenproben, die außerhalb des Versuchsgerätes getrocknet werden, in einen festen Ring eingespannt, und den Beginn der Rissbildung bzw. der Ablösung vom Rand über die Beobachtung einer plötzlichen Zunahme der Gasdurchlässigkeit bestimmt (siehe Abb. 3.1). Nach dem Ausbau wird der Wassergehalt gravimetrisch bestimmt. Die Versuche können mit und ohne Auflast durchgeführt werden.

Dieser Versuch zur Beschreibung der Rissbildungsempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Wasserentzug könnte in Verbindung mit den Erfahrungen von GRÖNGRÖFT ET AL. zu einem Standardversuch weiterentwickelt werden. GEBISSA et al. stellten fest, dass der untersuchte Geschiebemergel bei 0,5 - 0,7 Gew.-% Wasserverlust Erstrisse zeigt, während sich bei einem Beckenschluff erst Risse zwischen 0,9 - 1,8 Gew.-% zeigten.

THOMAS beschreibt ein Versuchsgerät zur optischen Bestimmung der Rissbildung an Proben mit den Abmessungen 150 mm · 150 mm · 600 mm. Mit diesem automatisierten Biegezugversuchsgerät werden auf einen „Bodenbalken“ Verformungen aufgeprägt, um die Verbesserung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens von mit Geogittern bewehrten Abdichtungsschichten zu untersuchen. Die Rissbildung wird photogrammetrisch ausgewertet. Mit diesem Verfahren sind nicht nur Untersuchungen zur Wirkung von Geogittern, sondern auch grundlegende Untersuchungen zur Zugfestigkeit bindiger Erdstoffe möglich.

In den weiteren Beiträgen wird über Systemversuche berichtet, in denen das Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsmaterialien unter „realitätsnahen“ Bedingungen untersucht wird.

Die Frage, ob die Bildung eines initialen Risses bereits als bleibende Schädigung zu bewerten ist, wird von QUANDT ET AL. in einem Systemversuch experimentell bearbeitet. Die für diese Versuche entwickelte Methode erlaubt es, verdichtete Prüfkörper (40 cm · 40 cm · 6 cm) Austrocknungs-Wiederbefeuchtungs-Zyklen zu unterziehen. Neben der Realisierung von Auflastspannungen lässt sich im eingebauten Zustand die Durchlässigkeit bestimmen. Die Austrocknung – bewirkt durch Temperaturerhöhung auf der Probenoberfläche – wird durch TDR-Messungen kontrolliert. Erste Untersuchungen mit einem schluffigen Ton zeigten, dass im Initialschädigungszustand mit Selbstheilung von Rissen zu rechnen ist. Eine irreversible Durchlässigkeitserhöhung tritt erst nach weitergehender Austrocknung aufgrund der erheblichen Rissbreiten ein.

Ein weiterer Systemversuch wurde mit den von STEINERT ET AL. entwickelten Trocken-Nass-Prüfzellen beschrieben, in denen das Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungen aus Geschiebemergel und aus TRISOPLAST untersucht wurde. In den Trocken-Nass-Prüfzellen (siehe Abbildung 3.2) wird das Austrocknungsverhalten unter einer definierten Auflast im Wechsel von Bewässerung bzw. Durchlässigkeitsprüfung und Austrocknung untersucht. Die definierte Austrocknung der Probe wird im eingebauten Zustand der Probe über einen Luftstrom erreicht, der mit einem über eine Salzlösung eingestellten definierten Sättigungsdefizit über die Probe streicht. Der Grad der Austrocknung der Probe wird durch Messung der Wasserspannung in der Probe mittels Druckaufnehmer-Tensiometer verfolgt.

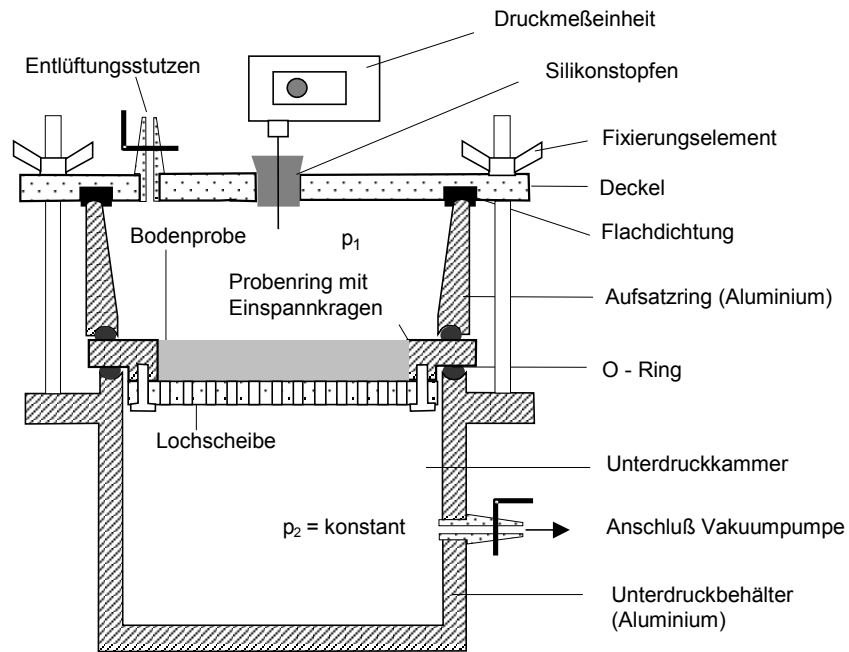


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Rissbildung nach GEBISSA ET AL.

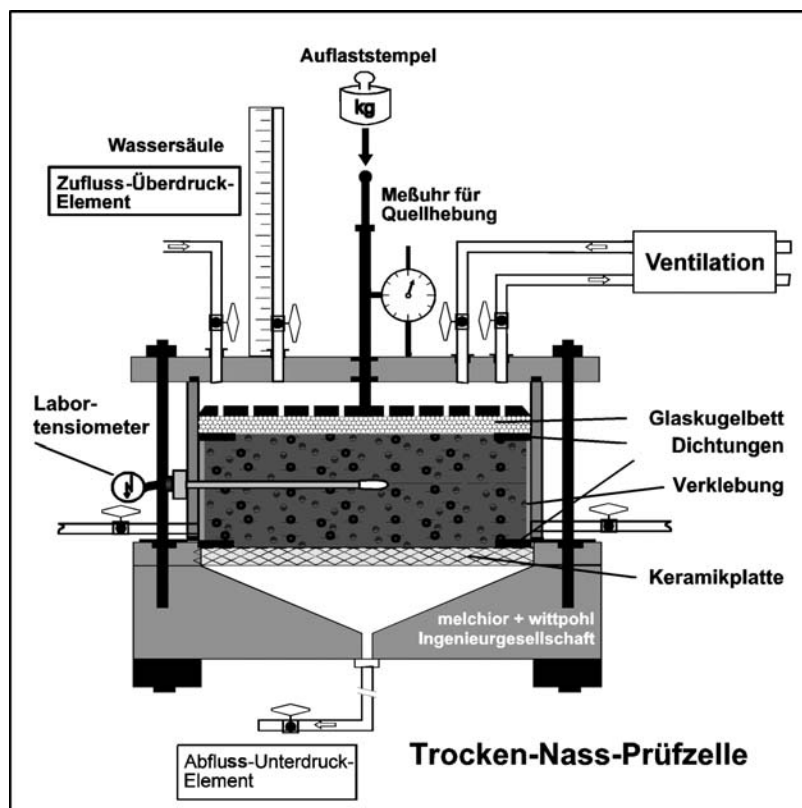


Abbildung 3.2: Systemversuch zum Austrocknungsverhalten nach STEINERT ET AL.

Ferner haben STEINERT ET AL. einen Durchwurzelungsversuch zum Vergleich des Austrocknungsverhaltens des Geschiebemergels und von polymervergüteten Böden (TRISOPLAST) durchgeführt. Sie leiten aus den Versuchsergebnissen ab, dass unter Einwirkungen, die bei Geschiebelehm zu weitgehender Austrocknung und ausgeprägter Rissbildung führen, TRISOPLAST nur an der Schichtoberfläche geringfügig Wasser abgibt ohne dass sich seine abdichtende Wirkung messbar ändert.

Die in diesem Beispiel angewandte Methodik der vergleichenden Untersuchung zweier Abdichtungsstoffe unter gleichen Randbedingungen und gleichen Einwirkungen wird auch von anderen Autoren angewendet. Sie kann dazu dienen, die Gleichwertigkeit alternativer Systeme mit einem akzeptierten Regelsystem nachzuweisen, obwohl die Versuchsergebnisse nicht unmittelbar so aussagefähig sind, dass sie die in-situ-Bedingungen präzise beschreiben können.

GRÖNGRÖFT ET AL. untersuchten das Schrumpfungsverhalten von Hafenschlick mit zwei Ansätzen. Im ersten Ansatz wurden 0,5 cm dicke Probenschichten unter Auflast unter in-situ-Bedingungen im Drucktopf entwässert und dabei die Veränderung der Probenstruktur mit einer Kamera erfasst. Dabei wurde Rissbildung bis 600 hPa nicht beobachtet, wohl aber nach Entwässerung bei 1000 hPa. Auch dieser Versuch ist ein interessanter Ansatz für einen Standardversuch zu Untersuchung der Neigung eines Bodens zur Rissbildung.

Im zweiten Ansatz – einem Durchwurzelungsversuch - wurde in einem Kastenversuch die Austrocknung von eingebautem Hafenschlick durch Vegetation simuliert. Hierzu wurde in einer Bodenschicht oberhalb der Abdichtung Getreide angesät. Die Wurzeln entwässerten während der Wachstumsphase die mineralische Abdichtungsschicht. Anschließende Wiederbefeuchtung führte zunächst zu einer Verbesserung der infolge der ersten Austrocknung beeinträchtigten Abdichtungswirkung. Bei nachfolgenden Trocknungs-Wiederbefeuchtungszyklen wurde jedoch eine Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit beobachtet, die bis zum praktischen Versagen der Abdichtung führte.

Praktische Hinweise für die Rezeptur und den Einbau gemischtkörniger Abdichtungen werden aus ersten Labor-Versuchsergebnissen von HEYER/RÖDL abgeleitet. Der von Ihnen benutzte Versuchsaufbau zur Untersuchung des Austrocknungsverhaltens und der Rissbildung besteht aus einem flachen Zylinder mit 57 cm Durchmesser, in den die 10 cm hohe Probe mit einer Randeinspannung eingebaut wird. Der gesamte Versuchsaufbau wird in einer Klimakammer getrocknet, der Masseverlust periodisch durch Wägung bestimmt und die Entwicklung von Rissen dokumentiert. Erste Untersuchungen zeigten, dass gemischtkörnige Böden zwar mehr, aber kürzere und weniger tiefe Risse zeigen als feinkörnige Böden.

Die Tabelle 3.4 gibt eine abschließende Übersicht über die Versuche zur Rissempfindlichkeit und die Systemversuche zum Austrocknungsverhalten.

Die in den Beiträgen zum „Workshop Höxter“ mitgeteilten Messergebnisse aus unterschiedlichen Laborversuchen an den verschiedensten Erdstoffen sind zur Orientierung sehr hilfreich. Für die speziellen, im Versuch vorgegebenen Randbedingungen quantifizieren und verdeutlichen sie den maßgebenden Einfluss, den Zustandsänderungen auf die hydraulische Leitfähigkeit und damit auf die Wirksamkeit mineralischer Abdichtungen ausüben.

Der Tabelle 3.5 kann entnommen werden, welche Materialien im einzelnen auf welche Parameter untersucht wurden.

Tabelle 3.4: Übersicht über die Versuche zur Rissempfindlichkeit und Systemversuche zum Austrocknungsverhalten

Verfasser	Abmessungen	Zustände	Bemerkungen
Versuche zur Rissempfindlichkeit			
GEBISSA ET AL.	∅ = 10 cm; h = 2,5 cm	T	Auflast
GRÖNGRÖFT ET AL.	∅ = 11 cm; h = 0,5 cm	T	Auflast, Kamera
Systemversuche zum Austrocknungsverhalten			
QUANDT ET AL.	□ = 40 cm; h = 6,0 cm	T, W	Auflast, $K_f$ -Wert-Messung
STEINERT ET AL.	∅ = 10 cm; h = 7,0 cm	T, W	Auflast, $K_f$ -Wert-Messung
HEYER/RÖDL	∅ = 57 cm; h = 10 cm	T, (W)	Randeinspannung

T: Trocknung W: Wiederbefeuchtung

Tabelle 3.5: Übersicht über untersuchte Materialien und Untersuchungsparameter

Verfasser	Materialien	Untersuchungen
STOFFREGEN/WESS.	bindige Böden	pF-Kurven, ungesättigte Leitfähigkeit
GEBISSA ET AL.	Geschiebemergel, Schluff	Risseintritt, abh. v. Wassergehalt
QUANDT ET AL.	Tessiner Ton	Risseintritt, abh. v. Wassergehalt
STEINERT ET AL.	Geschiebemergel, Trisoplast	Risseintritt, abh. v. Wasserspannung
GRÖNGRÖFT ET. AL.	Hafenschlick	Risseintritt, abh. v. Wasserspannung
HEYER/RÖDL	gemischtkörnige Böden	Kennwerte, Rissentwicklung

### 3.3 Schlussfolgerungen

#### 3.3.1 Schlussfolgerungen zur Versuchsdurchführung

Die Beiträge zum Themenbereich Laboruntersuchungen zeigten, dass bodenmechanische und bodenphysikalische Laborversuche als Teilaufgabe für die Untersuchung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsschichten eine wichtige Rolle spielen. Sie tragen zum grundsätzlichen Verständnis des Phänomens „Austrocknung und Rissbildung“ bei, dienen zur Ermittlung von Modellparametern, bilden die Basis für praktische Entwurfsentscheidungen und Qualitätsanforderungen für die Bauausführung. Sie sind zur Charakterisierung der maßgebenden Bodeneigenschaften unverzichtbar. Neben den etablierten Standardversuchen werden neue Versuchsmethoden entwickelt, um die wesentlichen Parameter, mit denen Austrocknung und Rissbildung beschrieben werden, einfach und zutreffend erfassen zu können.

Die Diskussionen ergaben folgende Übereinstimmungen und Empfehlungen:

- Laborversuche zur Materialbeschreibung (Indexversuche)

Zur Beschreibung und Kennzeichnung der wesentlichen bodenmechanischen und bodenphysikalischen Merkmale des mineralischen Abdichtungsmaterials sind die in GDA E 3-1 (siehe Tabelle 3.1) zusammengestellten Untersuchungen zur bodenphysikalischen Klassifizierung durchzuführen.

Hierbei ist besonders auf die Ermittlung der Schrumpfgrenze nach DIN 18122 hinzuweisen.

Zur Eignungsbeurteilung von Abdichtungsmaterial für Oberflächenabdichtungen ist die Kenntnis der pF-Charakteristik erforderlich. In die GDA-Empfehlung E 3-1 soll daher die Bestimmung der pF-Kurve nach DIN 11274, ggf. ergänzt um spezielle Erfordernisse für den Deponiebau, aufgenommen werden.

- Laborversuche zur Bestimmung der Eigenschaften des Abdichtungsmaterials im Gebrauchsfall

Zur Ermittlung der Einbaukriterien, des Spannungs-Verformungsverhaltens, der Festigkeit und der Durchlässigkeit sind die in GDA E 3-1 genannten Versuche erforderlich (siehe Tabelle 3.2).

Die erforderlichen Proctorversuche nach GDA E 3-1 sind ggf. zu ergänzen um Verdichtungsversuche mit höherer Verdichtungsenergie (z.B. modifizierte Proctordichte nach DIN 18127) bei geringen Werten des Wassergehalts. Hierfür sind ergänzende Laborversuche zur Bestimmung der Eigenschaften des Abdichtungsmaterials im Gebrauchsfall durchzuführen.

Hinsichtlich der Durchführung von Untersuchungen zur Rissbildungsempfindlichkeit und zu Systemversuchen zum Austrocknungsverhalten herrscht noch Forschungsbedarf, der im folgenden Kapitel definiert wird.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen geben aber einige Anhaltspunkte für Versagenskriterien :

- HOLZLÖHNER, 1993: über Auflast (Seitendruck  $\leq 0$ )
- HEIBROCK, 1996: Modifizierter Scherfestigkeitsansatz
- RAHARDJO ET AL., 1995: modifizierter Triaxialversuch
- empirisch: 300- 500 hPa bei üblichen Auflasten

Die empirischen Angaben zur Wasserspannung beziehen sich auf tonmineralische Abdichtungen, die auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve eingebaut werden. Materialspezifische Annahmen sollten nicht nur auf die Wasserspannung, sondern auch auf den akzeptablen Wasserverlust abstellen.

### 3.3.2 Schlussfolgerungen zur Materialauswahl und zum Einbau

Die nachfolgenden Schlussfolgerungen zur Materialauswahl und zum Einbau der mineralischen Abdichtungen wurden in dem bodenphysikalisch orientierten Beitrag von HORN und unter bodenmechanischen Gesichtspunkten von NEFF formuliert. Sie beziehen sich auf tonmineralische Abdichtungen aus natürlichen Materialien.

Basierend auf der Analyse des Schrumpfungsverhaltens von Böden mit und ohne Aggregatstruktur kommt HORN zu folgenden Überlegungen und Empfehlungen:

- die Intensität der Vortrocknung des einzubauenden mineralischen Materials muss größer sein als die im eingebauten Zustand zu erwartenden Austrocknungen, um keine weitere Schrumpfrissbildung zu riskieren
- auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve verdichtete Proben sind aufgrund der wirksamen Knetung sehr viel weniger stabil als die vorgeschrumpften (durch Aggregierung, Austrocknung, Partikeleinlagerung stabilisierten) Proben, die erst nach Überschreitung dieser Eigenstabilität wiederum Normalschrumpfungsverhalten zeigen
- auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve liegende Substrate, vorgeschrumpfte Aggregatpackungen oder nur partiell angefeuchtete Bodenvolumina können trotz dynamischer Belastung als stabil und auch als mechanisch und hydraulisch widerstandsfähig eingestuft werden

Diese Vorschläge von HORN zum Einbau mineralischer Abdichtungen, die auf der Deponie Haferteich, Schleswig, umgesetzt wurden, sind noch einer breiteren praktischen Erprobung zu unterziehen.

Auf der Basis der Beiträge zum Workshop sowie basierend auf seinen Erfahrungen im Erdbau hat NEFF im Nachgang zur Veranstaltung praktische Hinweise für den Aufbau eines aus seiner Sicht dauerhaft funktionsfähigen mineralischen Oberflächen-Abdichtungssystems formuliert.

NEFF legt dar, dass die Größe des Schrumpfpotentials mineralischer Abdichtungsschichten davon abhängt, wie weit der Einbauwassergehalt  $w_n$  über dem Schrumpfgrenzen-Wassergehalt  $w_s$  des Bodens liegt:

$$w_{SP} = w_n - w_s$$

$w_{SP}$	= Schrumpfpotential	[% TS]
$w_n$	= Einbauwassergehalt	[% TS]
$w_s$	= Schrumpfgrenzenwassergehalt	[% TS]

Die bodenphysikalischen und erdbautechnischen Bedingungen zur Reduzierung des Schrumpfpotentials sind gemäß dieser Gleichung nach NEFF:

- Begrenzung des Schrumpfwassergehaltes auf  $w_s < 20$  %, was beim Einsatz von Böden mit einer Wasseraufnahme  $w_A < 70$  % (Fließgrenze  $< 40$  %) zu erreichen ist
- Reduzierung des Einbauwassergehaltes auf der „nassen Seite“ der Proctorkurve und gleichzeitige Abminderung des Einbauwassergehaltes durch Erhöhung der Verdichtungsarbeit auf 100 % modifizierte bzw. verbesserte Proctordichte
- die höheren Verdichtungswerte der verbesserten Proctordichte erfordern bei reduziertem Einbauwassergehalt einen dünnlagigen Einbau bei gleichzeitiger Erhöhung der Anzahl der Verdichtungsübergänge mit Erdbaugeräten, die auf die einzubauende Bodenart im Versuchsfeld optimal einzustellen sind

Dieser Ansatz von Neff stellt somit den Wassergehalt bei der Schrumpfgrenze und die Verdichtungsenergie in den Mittelpunkt der Betrachtung, eine Verknüpfung mit dem für die Gefügebildung wesentlichen Parameter Zugfestigkeit steht noch aus.

Der Vergleich der bodenphysikalisch und bodenmechanisch begründeten Ansätze zeigt, dass hinsichtlich der Forderung, die Proben so trocken wie möglich, d.h. möglichst auf dem trockenen Ast bzw. dem Scheitel der Proctorkurve einzubauen, Konsens besteht. Auch in Hinblick auf eine anzustrebende möglichst hohe Trockendichte der eingebauten Abdichtung besteht Übereinstimmung zwischen beiden Ansätzen, da beide Überlegungen nachvollziehbar dahin gehen, das Schrumpfpotential zu verringern, was auf eine Reduktion des Einbauwassergehaltes hinausläuft. Gleichzeitig muss die Trockendichte erhöht werden, um die geforderte zulässige Durchlässigkeit nicht zu überschreiten. Eine Ausnahme können technische Mischungen mit definiertem Kornaufbau und vergütete Abdichtungsmaterialien darstellen.

Dissens herrscht bezüglich der anzuwendenden Einbautechnik, da die Bedeutung der Aggregatstruktur der mineralischen Abdichtung unterschiedlich gesehen wird.

Die von NEFF empfohlene Erhöhung der Verdichtungsarbeit ist die zwangsläufige Folge der Verringerung des Wassergehaltes, wenn eine möglichst hohe Lagerungsdichte bei gleichzeitiger geringer Durchlässigkeit erreicht werden muss und entspricht der erprobten Vorgehensweise im Erdbau. Der Ansatz von HORN, die Bodenaggregate beim Einbau möglichst nicht zu zerstören, oder Bodenvolumina nur partiell anzufeuchten, ist dagegen bisher nicht gängige Praxis.

Die Arbeitsgruppe „Oberflächenabdichtungssysteme“ des AK 6.1 wird bei der Erstellung des Entwurfs der Empfehlung zum „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungssysteme“ versuchen, die bodenphysikalisch und bodenmechanisch begründeten Ansätze zu „harmonisieren“ und in einem geschlossenen physikalisch begründeten Kontext darzustellen.

Die Vorschläge von NEFF hinsichtlich der Anforderungen an die Eigenschaften von bindigen natürlichen Abdichtungsmaterialien sollten intensiv diskutiert und mit einer möglichst breiten Datenbasis auch von Dritten durchgeführter Projekte untermauert werden. Die vorliegenden Erfahrungen beim großflächigen Einbau der mineralischen Abdichtung nach dem Ansatz von HORN auf der Deponie Haferteich, Schleswig könnten im Zuge dieser Arbeit bewertet werden.

### 3.4 Offene Fragen

Die Diskussionen zeigten, dass sowohl zur Vertiefung der Kenntnisse über die grundlegenden bodenphysikalischen Zusammenhänge wie auch in Hinblick auf praxisgerechte Untersuchungsmethoden weiterhin Forschungsbedarf besteht:

- Definition und Untersuchung der Rissbildung

Die Rissbildung in einer mineralischen Abdichtungsschicht wird durch die Überschreitung eines materialspezifischen Wasserverlustes und der damit einhergehenden Wasserspannung  $\Psi_{\text{krit.}}$  ausgelöst. Es gibt derzeit noch kein abgestimmtes Modell, das den Grenzzustand der Rissbildung physikalisch formuliert. Grundsätzlich gilt:

$$\Psi_{\text{krit.}} = f(\sigma, \text{Materialeigenschaften, Verformungs-, Belastungsgeschichte})$$

Zur Bildung einer abgestimmten fachlichen Meinung sind weitere Forschungsarbeiten zum Verständnis der Phänomene wie auch zur Klärung der Frage des physikalischen Risskriteriums notwendig.

Für praktische Zwecke ist es wünschenswert, über einen einfachen, standardisierten Versuch zur Charakterisierung der Rissbildungsempfindlichkeit zu verfügen. Hierzu können die von GEBISSA et al., und GRÖNGRÖFT et al. beschriebenen Versuche weiterentwickelt werden.

- Systemversuche zum Austrocknungsverhalten

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge, aber auch, um verschiedene Materialien unter praxisgerechten Bedingungen miteinander vergleichen zu können, fehlen anerkannte Systemversuche zum Austrocknungsverhalten.

Von besonderem Interesse ist die experimentelle Untersuchung der Kombination von Wasserspannungen und mechanischen Einwirkungen, aber auch die Einbeziehung von Trocken-/Nasszyklen.

Die von STEINERT ET AL. vorgestellten Systemversuche erscheinen wegen der relativ kleinen Abmessungen und der Steuerung der Austrocknung über Luft mit definierter Feuchte geeignet, zu einem Praxisstandard entwickelt zu werden, um verschiedene Abdichtungsmaterialien miteinander zu vergleichen. Der von QUANDT ET AL. beschriebene Versuchsstand hat größere Abmessungen, die Austrocknung wird über Temperaturgradienten gesteuert. Dieser Versuchstyp eignet sich wegen seiner Komplexität, aber auch wegen der Dimensionen, die eine phänomenologische Betrachtung erlauben, sehr gut für Grundlagenuntersuchungen.

## 4 Ergebnisse der Modellierungsansätze

### 4.1 Einführung

Mineralische Abdichtungsschichten können durch die austrocknungsbedingte Schrumpfung und die damit einhergehende Rissbildung erhebliche Verminderungen ihrer Abdichtungswirkung erfahren. Die Austrocknung der mineralischen Abdichtungsschichten kann neben der Durchwurzelung auf vier weitere Prozesse zurückgeführt werden:

- den kapillaren Aufstieg flüssigen Wassers aus einer mineralischen Abdichtungsschicht in die darüber angeordnete Rekultivierungsschicht
- den kombinierten flüssigen und dampfförmigen Transport von Wasser bei isothermen Bedingungen in einer grobkörnigen Entwässerungsschicht
- den thermisch induzierten flüssigen und dampfförmigen Wassertransport in der mineralischen Abdichtungsschicht und der Entwässerungsschicht
- den konvektiven Wasserdampftransport in der Entwässerungsschicht

STOFFREGEN, 1998 gibt eine ausführliche Beschreibung der Theorie des Dampftransportes im Boden, der neben den bekannten Prozessen des flüssigen Wassertransportes bei der Austrocknung mineralischer Abdichtungsschichten eine wesentliche Rolle spielt.

Das Ziel einer standortspezifischen Auslegung eines Oberflächenabdichtungssystems muss darin bestehen, unter den jeweiligen klimatischen Bedingungen ein System zu entwerfen, das langfristig eine weitgehende Sicherheit gegen Austrocknung erwarten lässt. Hierzu kann die Modellierung der für die Austrocknung maßgeblichen Prozesse beitragen.

Die Auswirkungen der lokalen klimatischen Randbedingungen auf das Abdichtungssystem (Wasserspannungen/Wassergehalte und Zusickerungen in die Entwässerungsschicht) können durch eine Modellierung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht erfasst werden. Zur Abschätzung des Austrocknungsverhaltens der mineralischen Abdichtung sind dann weitere numerische Modelle nötig, da wegen der komplexen Wechselwirkungen der Einzelprozesse eine einfache Berechnung nicht möglich ist.

Während die Modellierung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht als Stand der Technik betrachtet werden kann (siehe GDA-Empfehlung E 2-30 sowie RAMKE ET AL., 2000), ist die Modellierung des Austrocknungsverhaltens noch in der Entwicklung. Erste Beispiele hierzu zeigt HEIBROCK, 2000.

Nachfolgend werden die vorhandenen Möglichkeiten zur Modellierung der Austrocknungsvorgänge erläutert.

## 4.2 Übersicht über die Beiträge

Zum Themenbereich Modellierungsansätze wurden sieben Beiträge vorgestellt, von denen sich drei mit der Modellierung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht und vier mit der Modellierung der Austrocknungsprozesse in der mineralischen Abdichtungsschicht beschäftigen. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Beiträge.

Tabelle 4.1: Beiträge zum Themenbereich „Modellierungsansätze“

Teil 1: Modellierung der Wasserhaushaltsprozesse
Einsatz des HELP-Modells im Rahmen der Abschätzung der Austrocknungsgefährdung von mineralischen Dichtschichten <i>K. Berger</i>
Austrocknungsmodellierung mit Hilfe des Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodells BOWAHALD <i>V. Dunger</i>
Einfluss von Exposition und Inklination auf die reale Evapotranspiration und Tiefenversickerung aus Deponie-Rekultivierungsschichten <i>G. Wessolek, R. König, H. Stoffregen</i>
Teil 2: Modellierung der Austrocknungsprozesse
Simulation des Wasserhaushalts einer mineralischen Deponieoberflächenabdichtung unter einer Kunststoffdichtungsbahn <i>W. Salzmann, B. Vielhaber, K. Bohne</i>
Modellierung des Austrocknungsverhaltens mit dem Modell HYDRUS-1D <i>H.-G. Ramke</i>
Modellierung des Austrocknungsverhaltens mit dem Modell SUMMIT <i>G. Heibroek</i>
Rückschlüsse aus der Messung und numerischen Modellierung des anisothermen Dampf- und Wassertransportes in Kapillarsperrensystemen auf den Gastransport in Entwässerungsschichten <i>T. Holfelder</i>

Die in den Arbeiten von BERGER, DUNGER und WESSOLEK ET AL. vorgelegten Simulationsergebnisse beschreiben den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht und wurden mit Modellen gewonnen, die auch für natürliche Böden brauchbar sind. Mit derartigen Modellen liegen umfangreiche Anwendungserfahrungen vor. Durch die Besonderheiten einer oberirdischen Deponie ergeben sich jedoch spezielle Bedingungen, die beachtet werden müssen. Allen drei Modellen ist gemeinsam, dass sie eine Vielzahl von Prozessen simulieren, ohne jedoch eine numerische Lösung der RICHARDS-Gleichung für die ungesättigte Wasserströmung zu verwenden.

Das von BERGER verwendete HELP-Modell wird in Deutschland mittlerweile sehr häufig angewendet. Es berücksichtigt die in Tabelle 4.2 aufgeführten Prozesse.

Tabelle 4.2: Übersicht über die maßgeblichen Prozesse des HELP-Modells

Systemkomponente	Berücksichtigte Prozesse
Rekultivierungsschichten	Niederschlag Schneedeckenaufbau und Schneeschmelze Oberflächenabfluss Frieren und Tauen des Bodens Infiltration und ungesättigter vertikaler Fluss Pflanzenwachstum Potentielle u. tatsächliche Evapotranspiration Speichervorgänge im Boden
Entwässerungsschichten	Lateraler Abfluss auf geneigter Sohle
Mineralische Abdichtungsschichten	Durchsickerung nach DARCY
Kunststoffdichtungsbahnen	Durchsickerung durch Fehlstellen Wasserdampfdiffusion

Demgegenüber wird die kapillare aufwärts gerichtete Wasserbewegung durch HELP nicht erfasst und muss als Teil der Evapotranspiration dargestellt werden. Hierin bestehen große Ähnlichkeiten zum Modell BOWAHALD, über das DUNGER berichtet hat. Trotz gewisser Einschränkungen ist es möglich, mit Hilfe von HELP abzuschätzen, wie lange im unteren Teil der Rekultivierungsschicht eine Trockenheit herrscht, die für die Abdichtungsschicht gefährlich werden kann und wieviel Wasser der Abdichtungsschicht bei anhaltend positiver atmosphärischer Wasserbilanz zufließt. Die in der Arbeit von BERGER genannten Zahlen für den Trockenstandort Geisenheim sprechen von 34 Trockentagen pro Jahr bei einer 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht bzw. von 24 Trockentagen pro Jahr bei einer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 2m. Die Durchsickerung der mineralischen Abdichtung liegt unter den klimatischen Bedingungen von Geisenheim bei einem Regelabdichtungssystem für die Deponieklasse 1 nach TA Siedlungsabfall in der Größenordnung von 50 mm/Jahr, wenn die Abdichtungsschicht als beschädigt angenommen wird (Erhöhung der Durchlässigkeit um den Faktor 10).

DUNGER beschreibt in seiner Arbeit das Modell BOWAHALD, das bezüglich der dargestellten Prozesse und auch bezüglich der Vereinfachungen starke Ähnlichkeiten mit HELP aufweist, obwohl die ursprünglichen Simulationsaufgaben und auch der Aufbau der Modelle verschieden sind. Die historische Entwicklung – insbesondere der Vorlauf des Modells in den USA und die von BERGER durchgeführte Validierungsstudie - hat dazu geführt, dass HELP gegenwärtig bevorzugt benutzt wird. Ein detaillierter Vergleich beider Modelle für gleiche Bedingungen bzw. eine Validierungsstudie wäre interessant.

Bei dem von WESSOLEK ET AL. vorgestellten Modell handelt es sich um ein Zweischicht-Modell, in dem der Einfluss der klimatischen Bedingungen sowie der Hangneigung und der Exposition auf die Evapotranspiration sehr detailliert berücksichtigt wird. Die in der Arbeit vorgestellten Simulationsergebnisse beziehen sich vor allem auf diese Zusammenhänge. Die Fließprozesse im Boden werden dagegen mit ähnlichen Vereinfachungen wie im Modell BOWAHALD abgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass vom Oberflächenrelief einer Deponie starke Einflüsse in Bezug auf die reale Evapotranspiration bzw. die Austrocknungsgefährdung und die Durchsickerung ausgehen. Durch eine sinnvolle Gestaltung des Reliefs – viel Südhangfläche im Verhältnis zu Nordhängen – lässt sich die reale Evapotranspiration deutlich steigern und die Sickerwasserbildung deutlich herabsetzen. Im Umkehrschluss muss das Austrocknungsrisiko mineralischer Abdichtungen an Südhängen deutlich höher eingeschätzt werden als an Nordhängen.

Die nächste Gruppe von Beiträgen zur Modellierung befasst sich mit der Modellierung der Austrocknungsprozesse, d.h. der Beschreibung des Wasserflusses im Oberflächenabdichtungssystem unterhalb der Rekultivierungsschicht einschließlich der mineralischen Abdichtungsschichten. Mit unterschiedlich komplexen Modellen wird der Frage nachgegangen, ob es unter realistisch angesetzten Randbedingungen für verschiedene Systeme zu einem Wasserentzug aus den Abdichtungsschichten kommt. Die Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die in den verwendeten Modellen simulierten Prozesse.

Tabelle 4.3: Übersicht über die in den Simulationsmodellen berücksichtigten Prozesse

Prozess	HYDRUS-1D	SUMMIT	TOUGH 2
instationäre Wasserbewegung	x	x	x
isotherme Wasserdampfdiffusion		x	x
anisotherme Wasserdampfdiffusion		x	x
konvektiver Wasserdampftransport			x

Das Simulationsmodell SUMMIT (entwickelt von DÖLL, 1996) beschreibt den flüssigen und dampfförmigen Wassertransport, der durch hydraulische und thermische bedingte Gradienten auftritt. Das Modell berücksichtigt jedoch keinen konvektiven dampfförmigen Transport. Von SALZMANN ET AL. wurden unter Benutzung des Modells SUMMIT Untersuchungen zum Wassertransport in Kombinationsabdichtungen durchgeführt, die sich auf mehrjährige reale Messungen an Lysimetern stützen konnten.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass unter der Kunststoffdichtungsbahn, also bei fehlendem konvektiven Wasserfluss zwischen Rekultivierungsschicht und Abdichtungsschicht, der im Vergleich zu den anderen Prozessen relativ schwache anisotherme Dampftransport zwischen Abdichtungsschicht und Ausgleichsschicht langfristig bedeutend werden kann.

Auch dies führte jedoch in den vorgelegten Untersuchungen nur dann zu einer Austrocknung der Abdichtung, wenn die hydraulischen Eigenschaften der Ausgleichsschicht etwa denen der Entwässerungsschicht ähneln. Ein grober Sand oder Kies ist nicht in der Lage, ihm dampfförmig zugeführtes Wasser auf hydraulischen Wege wieder zurückzutransportieren. Es muss bei Systemen mit Kunststoffdichtungsbahnen daher geprüft werden, ob bei den Temperaturgradienten, mit denen zu rechnen ist, ein Strömungsgleichgewicht, das eine fortschreitende Austrocknung verhindert, erreicht werden kann.

Von RAMKE und HEIBROCK wurden die Austrocknungsprozesse in mineralischen Abdichtungsschichten mit direkt darüber angeordneter Rekultivierungsschicht und mit dazwischen liegender Entwässerungsschicht untersucht. Systemgrößen, Bodenkennwerte und Randbedingungen waren weitgehend identisch, um die Simulationen, die mit zwei verschiedenen Modellen durchgeführt wurden, vergleichen zu können.

RAMKE benutzte das Simulationsmodell HYDRUS-1D, mit dem der instationäre Transport flüssigen Wassers in der gesättigten und ungesättigten Zone nachgebildet wird. Für die Simulation wurden gemessene VAN-GENUCHTEN-MUALEM-Parameter zur Darstellung der pF-Kurve und der k(u)-Funktion verwendet (STOFFREGEN 1998 und STEINERT, 1999). Als obere Randbedingung wurde 20 cm über der Entwässerungsschicht bzw. der mineralischen Abdichtungsschicht (in der Rekultivierungsschicht) eine Porenwasserspannung von 15.000 hPa angelegt (entsprechend  $pF = 4,2$ ), um eine weitgehende Austrocknung der Rekultivierungsschicht zu simulieren. Die Modellierungen ergaben, dass bei Systemen ohne Entwässerungsschicht eine Austrocknung der mineralischen Abdichtung nicht zu verhindern ist. Schon nach 30 Tagen stellen sich 5 cm unter ihrer Oberfläche Wasserspannungen von über 3000 hPa mit entsprechender Verringerung der Wassergehalte ein. Dagegen konnte die Austrocknung durch eine Entwässerungsschicht aus kapillarbrechendem Material wirksam unterbunden werden. Auch 200 Tage nach dem Anlegen des Matrixpotentials an der Oberfläche des Systems sanken die Wasserspannungen nicht unter 160 hPa, da der Transport flüssigen Wassers durch die kapillarbrechende Schicht wirksam unterbunden wird.

Weitere Abschätzungen von RAMKE zur Bedeutung der Wasserdampfdiffusion zeigten, dass diese Komponente für isotherme Bedingungen vernachlässigt werden kann, und dass unter anisothermen Bedingungen die potential- und thermisch-bedingten Flüsse entgegengesetzt wirken.

Analog dem Ansatz von RAMKE wurde von HEIBROCK mit dem Modell SUMMIT die Austrocknung der mineralischen Abdichtung direkt unter einer trockenen Rekultivierungsschicht sowie unter einer Entwässerungsschicht untersucht. Neben dem Vergleich der beiden Modelle sollte hierdurch insbesondere geprüft werden, ob die Berücksichtigung der Dampfdiffusion im Modell SUMMIT zu anderen Ergebnissen führt als mit dem Modell HYDRUS.

Von HEIBROCK werden die erforderlichen oberen Randbedingungen aus Ergebnissen mit dem HELP-Modell abgeleitet. Weiterhin werden von HEIBROCK interessante Betrachtungen zum Risskriterium und zum Einfluss des Einbauzustandes der Abdichtungsschicht angestellt.

An vielen Standorten wird aus Rekultivierungsschichten zumindest in der zweiten Hälfte des Winterhalbjahres ein Sickerwasserabfluss stattfinden, der die Abdichtung befeuchtet. Erst ab Juni ist mit einer starken Austrocknung der Rekultivierungsschicht zu rechnen, die im September auch tiefere Bereiche der Rekultivierungsschicht erfasst. In Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht, dem Pflanzenbewuchs, der Bodenart und dem lokalen Klima ist mit einer Dauer der Trockenheit von 30 - 200 Tagen zu rechnen. Im Sinne des hier benutzten zweistufigen Verfahrens (Simulation der Rekultivierungsschicht mit dem HELP-Modell, danach Simulation der Prozesse in der Abdichtung) sollte von Fall zu Fall geprüft werden, mit welchen oberen Randbedingungen in der Abdichtung gerechnet werden muss.

Die Ergebnisse von HEIBROCK und RAMKE sind qualitativ weitgehend identisch und quantitativ vergleichbar. Auch bei HEIBROCK zeigte sich eindeutig, dass es bei einem direkten Anschluss der Rekultivierungsschicht an die Abdichtung bei einer Austrocknung der Rekultivierungsschicht in kurzer Zeit zu deutlichen Wasserverlusten in der Abdichtungsschicht kommt. Dies kann durch eine dazwischenliegende Dränschicht wirksam unterbunden werden.

Die quantitativen Unterschiede in den Berechnungen mit SUMMIT und HYDRUS, die sich insbesondere auf den Verlauf der Wasserspannung in der Entwässerungsschicht beziehen, sind vermutlich auf den bei SUMMIT berücksichtigten dampfförmigen Wassertransport zurückzuführen. Dieser Prozess wirkt sich jedoch nur in der Entwässerungsschicht und nicht auf die mineralische Abdichtung aus. Auch bei der Untersuchung von HEIBROCK wurde deutlich, dass in Systemen, in denen ein Austausch flüssigen Wassers zwischen der Rekultivierungsschicht und der Abdichtungsschicht stattfindet, der Dampftransport nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die infolge einer konvektiven Durchströmung (Luftbewegung und Austausch mit Umgebungsluft) der Entwässerungsschicht auftretenden geringen Luftfeuchtigkeiten können durch SUMMIT nicht direkt simuliert werden. Aus diesem Grund wurde für die Berechnungen angenommen, dass entsprechend „geringe“ Luftfeuchtigkeiten auftreten. Diese führen dann zu einem signifikanten Wasserentzug aus der Abdichtungsschicht. Dies bedeutet, dass die Abdichtung austrocknet, wenn in der Entwässerungsschicht infolge von Massenaustausch über längere Zeiträume Luft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit  $< 98\%$  auftritt.

Das von HOLFELDER vorgestellte und benutzte Modell TOUGH 2 hat die beste theoretische Basis aller hier präsentierten Modelle, da der konvektive und diffusive Transport mehrerer Fluide mehrdimensional betrachtet wird. Auf diese Weise ist es

theoretisch möglich, die komplizierten Vorgänge, die durch eine Luftströmung in der Entwässerungsschicht entstehen, zu simulieren. HOLFELDER hat mit diesem Modell primär den thermisch induzierten Wasserfluss in Kapillarsperren aufgrund natürlicher Temperaturgradienten untersucht. Die Größenordnung der thermisch induzierten Wasserdampfdiffusion entspricht der Abschätzung von RAMKE für die isotherme Wasserdampfdiffusion und kann daher für praktische Zwecke vernachlässigt werden, wenn nicht von einem permanenten Temperaturgradienten von unten nach oben ausgegangen werden muss.

Mit einer weiteren Modellierung wurde von HOLFELDER der Frage nachgegangen, wie sich Druckschwankungen an der offenen Seite einer einseitig ausstreichenden Entwässerungsschicht auswirken und ob es hierdurch zu einem Luftaustausch und damit einem Abtransport gesättigter Luft aus der Entwässerungsschicht kommt. Unter den angesetzten Randbedingungen zeigte sich aber, dass sich keine starke konvektive Luftströmung in der Entwässerungsschicht ausbildet und die darin enthaltene Luft wassergesättigt bleibt. HOLFELDER vermutet, dass die im Verhältnis zur horizontalen Abdichtungsfläche kleine Austauschfläche der Entwässerungsschicht mit der Umgebung ursächlich dafür sein wird, dass der Randeinfluss vernachlässigt werden kann. Numerische Schwierigkeiten haben allerdings dazu geführt, dass der Simulationszeitraum bislang deutlich zu kurz ist, so dass aus diesen interessanten Ansätzen noch keine praktische Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Austrocknungsgefährdung von Abdichtungen zu ziehen sind. Das Modell sollte jedoch in Hinblick auf die hier vorliegende Problemstellung weiterentwickelt werden.

## 4.3 Schlussfolgerungen

### 4.3.1 Schlussfolgerungen zu den Modellierungsansätzen

Die Beiträge zum Themenbereich Modellierung und die Ergebnisse der Diskussionen in der Arbeitsgruppe 3 lassen die folgenden Schlussfolgerungen zur Modellierung zu:

- Modellierung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht

Die Modellierung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht ist Stand der Technik, sie kann z.B. mit dem HELP-Modell entsprechend der GDA-Empfehlung E 2-30 vorgenommen werden, aber auch die Modelle BOWAHALD und von WESSOLEK können verwendet werden. Alle 3 Modelle sind umfangreich getestet worden, aber nur das HELP-Modell ist mit Hilfe von Messungen an Deponien validiert worden.

Die Modellierung des Wasserhaushalts ist erforderlich, um die Randbedingungen für die Bewertung des Austrocknungsrisikos der Abdichtungsschicht zu erhalten, sie ergibt als Funktion der Zeit die Randbedingungen Wasserspannungen/Wassergehalt und Zusickerungen in die Entwässerungsschicht.

- Durchwurzelung der Abdichtungsschicht

Es muss grundsätzlich von einer Schädigung der Abdichtungsschicht ausgegangen werden, wenn Pflanzenwurzeln die Oberfläche der mineralischen Abdichtungsschicht erreichen oder diese durchwurzeln.

Die Gefahr einer Durchwurzelung der mineralischen Abdichtungsschicht steigt, wenn in trockenen Sommermonaten die obere humose Bodenschicht austrocknet und der Wassergehalt auch in den tieferen Bereichen der Rekultivierungsschicht über längere Zeit zu weit absinkt.

Um die Gefahr einer Durchwurzelung der Abdichtungsschicht zu reduzieren, ist ein ausreichender pflanzenverfügbare Wasservorrat in der Rekultivierungsschicht erforderlich. Zur Simulation des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht stehen die oben genannten Modelle zur Verfügung.

- Kapillarer Aufstieg von Wasser und Transport flüssigen Wassers

Wenn der Wurzelzone der Rekultivierungsschicht durch Austrocknung Wasser entzogen wird, stellt sich ein hydraulischer Gradient und ein Wasserfluss aus dem unteren Bereich der Rekultivierungsschicht in die Wurzelzone ein (kapillarer Aufstieg). Dieser Wassertransport kann mit der RICHARDS-Gleichung modelliert werden. Zur Modellierung dieses konvektiven Transports flüssigen Wassers sind z.B. die Modelle HYDRUS und SUMMIT geeignet.

Durch kapillaren Transport flüssigen Wassers nach oben kann – bei fehlender Entwässerungsschicht – auch der mineralischen Abdichtungsschicht Wasser entzogen werden. Entscheidend für die entzogene Wassermenge sind die Einwirkungsdauer des niedrigen Matrixpotentials im unteren Teil der Rekultivierungsschicht, die pF-Kurven der Rekultivierungs-, Entwässerungs- und mineralischen Abdichtungsschicht und deren ungesättigte Leitfähigkeiten ( $k_u$ -Funktion).

Die Berechnungen mit unterschiedlichen Modellen zeigten, dass eine Entwässerungsschicht aus grobkörnigem Material kapillarbrechend wirkt und eine Wasserabgabe durch kapillaren Aufstieg aus der mineralischen Abdichtungsschicht unterbindet. Ein direkter Anschluss der mineralischen Abdichtung an die Rekultivierungsschicht (keine Entwässerungsschicht) führt dagegen bei trockener Rekultivierungsschicht zu einer schnellen Austrocknung der mineralischen Abdichtung durch kapillaren Aufstieg.

- Isotherme und anisotherme Wasserdampfdiffusion

Neben dem kapillaren Transport flüssigen Wassers kommt es in porösen Medien durch Druck- und Temperaturgradienten zusätzlich zur Diffusion von Wasserdampf. Die Diffusion verläuft in Richtung sinkender Matrixpotentiale (*isotherme Dampfdiffusion*) und Temperaturen (*anisotherme Dampfdiffusion*). Zur Beurteilung der Auswirkungen des dampfförmigen diffusiven Wassertransportes kann z.B. das Modell SUMMIT herangezogen werden.

Durch Dampfdiffusion eintretende Wasserabgaben der Rekultivierungsschicht nach unten in die Gasdränschicht oder nach oben in die Entwässerungsschicht können durch die entgegengesetzte Strömung flüssigen Wassers ausgeglichen werden, wenn zum ersten das dampfförmig abgegebene Wasser dort längere Zeit verbleibt und zweitens die hydraulischen Eigenschaften der Gasdränschicht bzw., der Entwässerungsschicht einen entsprechenden flüssigen Wassertransport ermöglichen.

Berechnungen, Abschätzungen und der Vergleich mit Messungen zeigten,

- dass in mineralischen Abdichtungssystemen (ohne KDB) der isotherme und anisotherme Transport von Wasserdampf zu keinen relevanten Wasserverlusten der mineralischen Abdichtungsschicht führt, wenn keine Durchlüftung der Entwässerungsschicht und damit auch keine Reduktion der Luftfeuchte in der Entwässerungsschicht stattfindet.
- dass durch Temperaturgradienten induzierte Wasserbewegungen nur für die Abdichtungswirkung mineralischer Abdichtungsschichten in Kombinationsabdichtungssystemen von Bedeutung sind.

- dass es in Kombinationsabdichtungssystemen mit Gasdränschicht langfristig zu einer Austrocknung der mineralischen Abdichtung kommen kann, wenn der im Sommer abwärts gerichtete Wassertransport im Jahresverlauf nicht kompensiert werden kann.

- Konvektiver Wasserdampftransport

Konvektiver Wasserdampftransport kann zu einer Verringerung der Wassergehalte und Dampfdrücke in der Gasphase der Entwässerungsschicht führen, wodurch es bei Systemen ohne Kunststoffdichtungsbahn zu einer Austrocknung der mineralischen Abdichtung kommen kann. Ein Durchströmen der Entwässerungsschicht mit atmosphärischer Luft ist daher in jedem Fall zu verhindern.

In wieweit eine Luftzirkulation innerhalb der Entwässerungsschicht durch atmosphärische Druckdifferenzen – z.B. bei ausstreichender Entwässerungsschicht oder durch die Rekultivierungsschicht – verursacht wird, kann derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden.

Der konvektive Wasserdampftransport wird bisher nur durch das Modell TOUGH 2 berücksichtigt. Für eine realitätsnahe Simulation des konvektiven Wasserdampftransports sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Der bisherige Kenntnisstand der Austrocknungsprozesse und die vorhandenen Simulationsmodelle erlauben trotz der offenen Fragen (siehe Kapitel 4.4) eine praktische Anwendung im Deponiebau. Mit den Wasserhaushaltsmodellen können standort- und systemspezifisch die für die Austrocknung der mineralischen Abdichtungsschichten relevanten Randbedingungen ermittelt werden. Mit den Modellen SUMMIT und HYDRUS kann die Empfindlichkeit (Wasserabgabe) verschiedener Abdichtungsschichten gegenüber diesen Randbedingungen untersucht werden. Um zu vergleichbaren Bewertungen zu kommen, sind jedoch folgende Voraussetzungen zu schaffen, bzw. es sind im Anwendungsfall die folgenden Festlegungen zu treffen:

1. Standardisierung der Methoden zur Ermittlung hydraulischer Bodenparameter
2. Festlegung des Risskriteriums auf der Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes
3. Herausgabe von Regeln für die Ermittlung von Randbedingungen (Temperaturen, Wasserspannungen oberhalb/unterhalb der Abdichtung)

#### 4.3.2 Schlussfolgerungen zur Konstruktion von Oberflächenabdichtungssystemen

Die Ergebnisse der Beiträge zur Modellierung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsschichten und der anschließenden Diskussion können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mineralische Abdichtungssysteme

Mineralische Abdichtungssysteme ohne Entwässerungsschicht sind ungeeignet, da durch kapillaren Aufstieg der mineralischen Abdichtungsschicht bei trockener Rekultivierungsschicht Wasser entzogen wird.

Ausnahmen können u.U. lediglich Abdichtungssysteme mit einer sehr mächtigen Rekultivierungsschicht (> 2,50 m) an feuchten Standorten darstellen.

Eine mineralische Abdichtungsschicht sollte deshalb nicht nur von einer ausreichend mächtigen Rekultivierungsschicht, sondern auch von einer Entwässerungsschicht aus grobkörnigem bzw. kapillARBrechendem Material überlagert werden.

Der Austausch atmosphärischer Luft mit der Luft in der Entwässerungsschicht, insbesondere ein Durchströmen, muss minimiert bzw. unterbunden werden.

- Kombinationsabdichtungssysteme

Durch jahreszeitlich bedingte Temperaturunterschiede innerhalb des Abdichtungssystems kann es über lange Zeiträume (> 50 Jahre) zu Wasserverlusten kommen, die für die Abdichtungswirkung der mineralischen Abdichtung relevant sind.

Für die Planung sind in diesem Zusammenhang vor allem die hydraulischen Eigenschaften der Gasdränschicht von großer Bedeutung. Sie soll einerseits einen hinreichenden Gehalt an Schluff besitzen, um zu gewährleisten, dass die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei den dort vorherrschenden Wassergehalten nicht zu klein wird und dadurch eine Austrocknung der mineralischen Abdichtung verhindern. Andererseits ist zu gewährleisten, dass die Gasdurchlässigkeit nicht zu gering wird.

Es kann unter diesen Gesichtspunkten zweckmäßig sein, unter der mineralischen Abdichtung zunächst eine schluffhaltige Ausgleichsschicht und darunter eine ausreichend durchlässige Entgasungsschicht aus mineralischen Stoffen oder Geokunststoffen anzuordnen.

#### 4.4 Offene Fragen

Die folgenden Fragen sind derzeit offen und sollten in weiteren Untersuchungen geklärt werden:

- Eines der Probleme, die eine weitere wissenschaftliche Bearbeitung dringend erfordern, ist die Bodenmechanik der Rissbildung. Die Beurteilung der Modellierungsergebnisse bleibt qualitativ, solange keine Kriterien für die Rissbildung zur Verfügung stehen.
- Ergebnisse einiger Felduntersuchungen zum Austrocknungsverhalten legen den Verdacht nahe, dass die räumliche Heterogenität des gesamten Abdichtungssystems Effekte hervorrufen könnte, die bislang noch nicht detailliert bekannt sind, da sich Austrocknungsschäden an mineralischen Abdichtungsschichten zeigten, auch wenn diese von einer Entwässerungsschicht überlagert wurden und Durchwurzelung und Durchlüftung mutmaßlich ausgeschlossen werden können.

Dies betrifft vor allem die Bewegung von Wasserdampf in der Entwässerungsschicht, bzw. die Frage ob, über welche Zeiträume und unter welchen Bedingungen sich in der Gasphase der Entwässerungsschicht deutlich ungesättigte Verhältnisse einstellen.

Zum einen könnte es sich hier um einen echten Austausch zwischen der Gasphase der Atmosphäre und der Gasphase der Entwässerungsschicht handeln. Dieser konvektiv bedingte Dampftransport kann z.B. über eine einseitig ausstreichende grobkörnige Entwässerungsschicht oder aufgrund von Durchströmungen der Rekultivierungsschicht (Makro- und Bioporen etc.) zustande kommen.

Zum anderen ist vorstellbar, dass Druckschwankungen in der Atmosphäre bzw. windbedingte Druckunterschiede über das Porensystem der Rekultivierungsschicht zu einer Umwälzung der Gasphase in der Entwässerungsschicht führen (Mikro-Zirkulation der Luft in Grobporen), was zu einem beschleunigten Austausch des Wasserdampfes zwischen der mineralischen Abdichtungsschicht und der Rekultivierungsschicht führt. Vereinfachend kann dies modelltechnisch durch eine Erhöhung des Dampfdiffusionskoeffizienten abgebildet werden.

## **5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen**

### **5.1 Ursachen der Austrocknung mineralischer Abdichtungsschichten**

Die folgenden Prozesse sind für die Austrocknung mineralischer Abdichtungsschichten maßgeblich:

- die Durchwurzelung der mineralischen Abdichtungsschicht, mit der Folge des Wasserentzugs aus der Abdichtungsschicht durch die Pflanzenwurzeln
- der kapillare Aufstieg flüssigen Wassers aus einer mineralischen Abdichtungsschicht in eine unmittelbar darüber angeordnete Rekultivierungsschicht
- der vorwiegend konvektive Wasserdampftransport in einer Entwässerungsschicht aus kapillarbrechendem Material

Es muss jedoch betont werden, dass derzeit trotz der Erkenntnis der Ursachen sowie den vorliegenden empirischen Erfahrungen noch keine endgültigen Empfehlungen für die langfristig funktionsfähige Gestaltung von Oberflächenabdichtungssystemen mit tonmineralischen Abdichtungsschichten gegeben werden können.

Zum ersten ist eine Bemessung im ingenieurwissenschaftlichen Sinne (Lastannahmen, Materialgesetze, Berechnungsmodell, Sicherheitsbeiwerte) in Hinblick auf die Austrocknung derzeit noch nicht möglich. Neben der Mechanik der Rissbildung zählt zu den offenen Fragen auch das Ausmaß des konvektiven Wasserdampftransportes in den Entwässerungsschichten, das noch nicht standortspezifisch quantifiziert werden kann. Insbesondere bei dünneren Rekultivierungsschichten scheinen der Luftaustausch mit der Atmosphäre oder Übertragungen der Luftdruckschwankungen für die Austrocknung der mineralischen Abdichtung trotz grobkörniger Entwässerungsschicht eine Rolle zu spielen.

Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen lassen sich jedoch die für die Beurteilung der Austrocknungsgefahr maßgeblichen Randbedingungen (Lastfälle) ableiten.

Zum zweiten fehlen die langfristigen Erfahrungen mit den mineralischen Oberflächenabdichtungssystemen, da die Felduntersuchungen überwiegend an Testfeldern oder Deponien vorgenommen wurden, die noch keine zehn Jahre alt waren. Andererseits lassen gerade die Felduntersuchungen, die häufig an Systemen durchgeführt wurden, die nicht dem heutigen Stand des Wissens entsprechen, die Aufstellung von konstruktiven Hinweisen für eine verbesserte Gestaltung des Gesamtsystems und der Einzelelemente zu.

Die nachfolgenden Empfehlungen zur Gestaltung der einzelnen Elemente des Oberflächenabdichtungssystems, die den gemeinsamen Diskussionsstand vieler namhafter Experten Deutschlands wiedergeben, können deshalb zu einer Verbesserung der Langzeitwirksamkeit von mineralischen Oberflächenabdichtungssystemen beitragen.

## 5.2 Empfehlungen für die Praxis

### 5.2.1 Gestaltung des Bewuchses

Die Auswahl und die Pflege des Bewuchses sind auf die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht abzustimmen, bzw. die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist an den vorgesehenen Bewuchs anzupassen.

Wenn die Schichtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht für Bäume ausgelegt wird, muss sie mindestens 3 m betragen. Bei geringerer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist der Bewuchs so auszuwählen und zu pflegen, dass tiefwurzeln- de Büsche und Bäume nicht zu einer Durchwurzelung der mineralischen Abdichtung führen:

- Sträucher und Bäume kommen für den Bewuchs der Rekultivierungsschicht oberhalb der mineralischen Abdichtungsschicht nicht in Betracht, da diese potentiell tiefer wurzeln als Grünlandpflanzen, allerdings können auch Krautpflanzen im Grünland sehr tief wurzeln.
- Auch eine ungesteuerte Vegetationsentwicklung (natürliche Sukzession) muss damit entfallen, da die natürliche Sukzession in der Regel vom Grünland über Strauch- und Buschvegetation zum Waldzustand führt.
- In der Konsequenz muss als Zielzustand der Vegetation Grünland angesetzt werden. Dieser Vegetationszustand ist durch gezielte Pflegemaßnahmen langfristig zu erhalten (Mahd). Eine regelmäßige Mahd kann das Tiefenwachstum von Wurzeln nicht völlig unterbinden, aber doch reduzieren.

Weitere Hinweise zur Gestaltung und Pflege des Bewuchses gibt die GDA-Empfehlung E 2-32.

### 5.2.2 Rekultivierungsschicht

Für die Gestaltung der Rekultivierungsschicht sind in Hinblick auf das ausreichende Wasserdargebot für den Bewuchs, die angestrebte Minimierung der Austrocknung der mineralischen Abdichtungsschichten sowie zur Verhinderung ihrer Durchwurzelung die folgenden Rahmendaten einzuhalten:

- Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht über mineralischen Abdichtungsschichten soll mindestens 1,50 m betragen. Bei Trockenstandorten sowie bei Standorten, die der natürlichen Sukzession überlassen werden sollen, ist eine deutliche Erhöhung der Schichtmächtigkeit sinnvoll.
- Die Rekultivierungsschicht soll über eine möglichst hohe nutzbare Feldkapazität (ideal 200 mm/m) verfügen. Sie ist möglichst locker

einzubauen, um eine Überverdichtung, die zur Verringerung der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität führt sowie Stauwasserbildung nach sich ziehen kann, zu vermeiden.

- Im oberen Bereich der Rekultivierungsschicht (20 – 30 cm) ist humoses Material zu verwenden.
- Bei einer Schichtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht  $\leq 2,0$  m ist eine Wurzelsperre im unteren Bereich zweckmäßig. Bei Trockenstandorten sollte hierfür eine Kunststoffdichtungsbahn verwendet werden.

Die weiteren Hinweise der GDA-Empfehlung E 2-31 zum Entwurf, zu Eignungsuntersuchungen, zum Einbau sowie zum Qualitätsmanagement sind zu beachten.

### 5.2.3 Entwässerungsschicht

Die mineralische Entwässerungsschicht soll gemäß den Anforderungen der Deponieverordnung eine langfristige Wasserdurchlässigkeit von  $k_f \geq 10^{-3}$  m/s und eine Schichtmächtigkeit von 30 cm aufweisen, sofern keine genaueren Nachweise für mineralische Materialien oder hydraulisch gleichwertige Dränmatten geführt werden.

In Hinblick auf eine Minimierung des konvektiven Transportes flüssigen Wassers (kapillarer Aufstieg) sowie des konvektiven Wasserdampftransportes (Durchlüftung) sollten die folgenden Punkte beachtet werden:

- keine Durchlüftung der Entwässerungsschicht  
(Entwässerungsschicht nicht gleichzeitig oben und unten offen)
- kein übermäßig grobes, in jedem Fall jedoch ein kapillarbrechendes Dränmaterial (Feinkies ist besser geeignet als Grobkies),
- Trennung der mineralischen Abdichtung und der Entwässerungsschicht  
(Sandschicht oder Vliesstoff zum Feuchthalten der mineralischen Abdichtung)

Für die Eignungsuntersuchungen des Dränmaterials sei auf die GDA-Empfehlung E 3-12 verwiesen, für den Bau der Entwässerungsschicht auf die GDA-Empfehlung E 4-2 und für die Qualitätsüberwachung auf die GDA-Empfehlung E 5-6. Einzelheiten des Entwurfs sowie die Anwendung von Geokunststoffprodukten in der Entwässerungsschicht werden in der GDA-Empfehlung E 2-20 geregelt.

#### 5.2.4 Mineralische Abdichtung

Der Auswahl des Materials der mineralischen Abdichtungsschicht sowie dessen Einbau kommt eine entscheidende Rolle für die langfristige Funktionsfähigkeit der mineralischen Abdichtung zu.

Die Ergebnisse des Status-Workshops führen zu folgenden Empfehlungen:

- Im Rahmen von Eignungsprüfungen sollten Tonmaterialien ausgewählt werden, die besonders wenig rissempfindlich gegenüber Wasserverlusten reagieren
- Die größten Rissweiten sind bei ausgeprägt plastischen Bodengruppen TA sowie bei deren Einbau auf der nassen Seite der Proctor-Verdichtungskurve zu erwarten
- Empfehlenswert ist der Einsatz von Böden mit leicht- und mittelplastischen Tönen mit einem niedrigen Schrumpfgrenzenwassergehalt, daneben kommen auch gemischtkörnige Böden in Betracht, die bei geeigneter Korngrößenverteilung weniger rissanfällig sind
- Ferner sind technische Mischungen mit einer gezielt aufgebauten Körnungslinie sowie speziell vergütete Abdichtungsmaterialien, die ein günstiges Austrocknungsverhalten aufweisen, geeignet
- Der Einbau der mineralischen Abdichtung sollte unter Berücksichtigung der zulässigen maximalen Durchlässigkeit so trocken wie technisch möglich erfolgen, um das Schrumpfpotential möglichst gering zu halten (keine Porenwasserüberdrücke beim Einbau)
- Die Forderungen nach ausreichender Scherfestigkeit, geringer Wasserdurchlässigkeit (Abdichtungsfunktion) und Handhabbarkeit müssen gleichzeitig erfüllt werden, der Einbauwassergehalt stellt sich als Schnittmenge der zulässigen Bereiche ein, in denen die Anforderungen an Scherfestigkeit, Austrocknungsverhalten und Wasserdurchlässigkeit erfüllt werden (vergleiche Abbildung 5.1)
- Für gemischtkörnige mineralische Abdichtungen kommt nach derzeitigem Kenntnisstand der Einbau mit einem geringeren Wassergehalt als dem optimalen Proctorwassergehalt in der Regel nicht in Frage

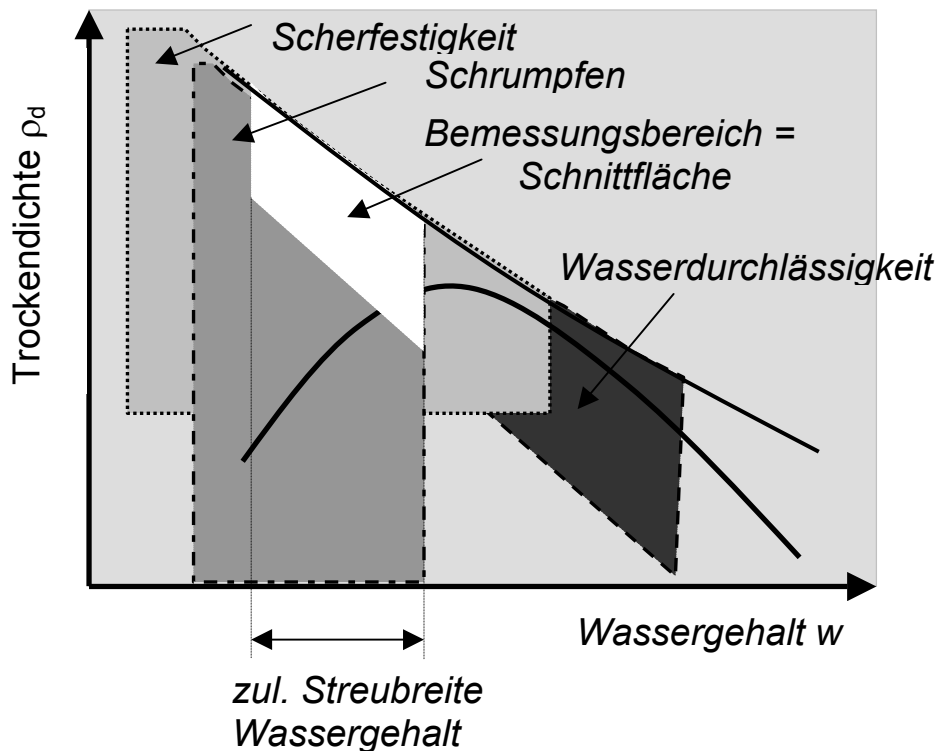


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Anforderungen an den Einbauwassergehalt mineralischer Abdichtungsschichten und den resultierenden Bemessungsbereich

### 5.3 Offene Fragen

Das Ziel der Planung von mineralischen Abdichtungssystemen muss darin bestehen, den Aufbau der gesamten Abdichtung so zu bemessen, dass der Ausgangswassergehalt im Lebenszyklus einer Abdichtung nur in geringer, definierter Streubreite unterschritten wird und ein ausreichender Sicherheitsabstand zur kritischen Wasserspannung  $\Psi_{\text{krit}}$ , bei der die Rissbildung einsetzt, eingehalten werden kann.

Um dieses Ziel planmäßig sicher erreichen zu können, fehlen noch eine Reihe von Voraussetzungen, die nur in weiteren Forschungsarbeiten geklärt werden können:

- Eines der zentralen Probleme, die eine weitere wissenschaftliche Bearbeitung dringend erfordern, ist die Bodenmechanik der Rissbildung.

Die Rissbildung in einer mineralischen Abdichtungsschicht wird durch Überschreitung einer Wasserspannung  $\Psi_{\text{krit}}$  ausgelöst. Es gibt derzeit noch kein abgestimmtes Modell, das den Grenzzustand physikalisch formuliert. Bisher gibt es lediglich Anhaltswerte für Versagenskriterien.

Zur Bildung einer abgestimmten fachlichen Meinung sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

- Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge, aber auch, um verschiedene Materialien unter praxisgerechten Bedingungen miteinander vergleichen zu können, ist eine Vereinbarung über anerkannte Systemversuche zu treffen.

Dies betrifft zum ersten die Verfahren zur Feststellung des Rissbeginns, worüber noch kein Konsens herrscht.

Zum zweiten ist die Durchführung der Systemversuche – Austrocknungsversuche und Trocken-/Nassversuche – noch nicht vereinheitlicht. Die Randbedingungen, die zu simulieren sind, bedürfen der akzeptierten Definition.

- Grundsätzlich bleibt sowohl mit Feldversuchen, aber auch in begleitenden Laborversuchen und durch Modellierungen die Frage zu klären, ob die räumliche Heterogenität des gesamten Abdichtungssystems möglicherweise Effekte hervorrufen könnte, die bislang noch nicht detailliert bekannt sind.

Dies betrifft vor allem die Bewegung von Wasserdampf in der Entwässerungsschicht, bzw. die Frage ob, über welche Zeiträume und unter welchen Bedingungen sich in der Entwässerungsschicht in der Gasphase deutlich ungesättigte Verhältnisse einstellen.

- Ein weiteres grundsätzliches Problem stellt die Tiefenentwicklung der Pflanzenwurzeln für schrumpfrissempefindliche Abdichtungen dar.

Die Entwicklung der Vegetation und mithin der Wurzeln ist ein sehr langfristiger Prozess. Auch die längsten bisher vorliegenden Messreihen in Testfeldern und die Aufgrabungen älterer Abdichtungssysteme stellen lediglich Momentaufnahmen am Anfang des Gebrauchszeitraums eines Oberflächenabdichtungssystems dar. Es kann einige Jahrzehnte dauern, bis das Wurzelsystem der Vegetation vollständig ausgebildet ist und ggf. Schäden an Abdichtungssysteme auftreten, die heute noch intakt sind.

Der Einsatz geeigneter Schutzmaßnahmen – Wurzelsperren – ist deshalb unabdingbar. Welche Wurzelsperren geeignet sind – ausschließlich Kunststoffdichtungsbahnen oder auch andere Geokunststoffprodukte oder mineralische Schichten – wird derzeit noch kontrovers diskutiert und ist zu untersuchen.

Die Arbeitsgruppe „Oberflächenabdichtungssysteme“ des Arbeitskreises 6.1 – Geotechnik der Deponiebauwerke – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) wird auf der Basis der hier vorgelegten Schlussfolgerungen über einen Empfehlungsentwurf zur Gestaltung von mineralischen Oberflächenabdichtungssystemen beraten.

## 6 Regelwerke

- GDA-EMPFEHLUNG E 2-20, 1997: Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage  
Deutsche Geotechnische Gesellschaft e.V. (DGGT)  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-20, 2000: Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen, Überarbeitung Kapitel 3  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)  
Die Bautechnik, Heft 9
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-30, 1998: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)  
Die Bautechnik, Heft 9
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-31, 2000: Rekultivierungsschichten  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)  
Die Bautechnik, Heft 9
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-32, 2000: Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)  
Die Bautechnik, Heft 9
- GDA-EMPFEHLUNG E 3-1, 1997: Eignungsprüfung mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage  
herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- GDA-EMPFEHLUNG E 3-12, 1997: Eignungsprüfung für mineralische Entwässerungsschichten  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, ebd.
- GDA-EMPFEHLUNG E 4-2, 1997: Herstellung von mineralischen Entwässerungs- und Schutzschichten  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, ebd.
- GDA-EMPFEHLUNG E 5-6, 1997: Qualitätssicherung für mineralische Entwässerungsschichten  
GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, ebd.

## 7 Literatur

- BRAUNS, J.; SCHNEIDER, H.; GOTTHEIL, K., 2000: Wasserverlust und Schrumpfen bei mineralischen Dichtungen aus geotechnischer Sicht  
Geotechnik, Heft 1
- DÖLL, P., 1996: Modeling of Moisture Movement under the Influence of Temperature Gradients: Desiccation of Mineral Liners Below Landfills  
Bodenökologie und Bodengenese, Heft 20  
Fachgebiet Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie und Biologie, Technische Universität Berlin
- HEIBROCK, G., 1996: Zur Rissbildung durch Austrocknung in mineralischen Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien  
Ruhr-Universität Bochum, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Heft 26
- HEIBROCK, G., 2000: Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen bei dem Entwurf mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme  
in: Ramke, H.-G.; Berger, K.; Stief, K. (Hrsg.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht, Fachtagung, Hamburg  
Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47, Inst. f. Bodenkunde, Univ. Hamburg
- HOLZLÖHNER, U., 1993: Transportvorgänge und Bodendeformation unter Einwirkung von Austrocknung und äußeren Spannungen  
in: 2. Arbeitstagung des Verbundforschungsvorhabens „Deponieabdichtungssysteme, Tagungsband  
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM, Berlin
- RAHARDJO, H.; LIM T. T.; CHANG, M. F.; FREDLUND, D. G., 1995: Shear strength of a residual soil, *Geotechnical Journal*, pp 60 - 77
- RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (HRSG.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht, Fachtagung, Hamburg  
Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47, Inst. f. Bodenkunde, Univ. Hamburg
- STEINERT, B., 1999: Kapillarsperren für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten – bodenphysikalische Grundlagen und Kipprinnenuntersuchungen  
Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 45, Inst. f. Bodenkunde, Univ. Hamburg
- STOFFREGEN, H., 1998: Hydraulische Eigenschaften deponiespezifischer Materialien unter Berücksichtigung von Temperaturänderungen  
Bodenökologie und Bodengenese, Heft 32  
Fachgebiet Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie und Biologie, Technische Universität Berlin

## **Anschriften der Autoren**

Prof. em. Dr. habil. Klaus Bohne

Universität Rostock, Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz  
Institut für Bodenkunde  
Bonhoeffer-Straße 13, 18069 Rostock  
Tel.: 0381/8099797, E-Mail: KlausBohne@aol.com

Dr.-Ing. Erwin Gartung

Landesgewerbeanstalt Bayern, Grundbauinstitut  
Tillystraße 1, 90431 Nürnberg  
Tel.: 910 / 6 55 55 61, E-Mail: gbgg@gw.lga.de

Dr.-Ing. Gunnar Heibrock

Jessberger und Partner Büro Leipzig GmbH  
Bornaische Straße 210, 04279 Leipzig  
Tel.: 0341/333 89-55, E-Mail: gunnar.heibrock@jp-l.de

Dr. Ulrich Maier-Harth

Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz  
Emy-Roeder-Str.5, 55129 Mainz  
Tel.: 06131/9254-306, E-Mail: ulrich.maier-harth@gla-rlp.de

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft  
Karolinenstraße 6, 20357 Hamburg  
Tel.: 040/430950-11, E-Mail: melchior@mplusw.de

Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke

Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter  
Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik  
An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter  
Tel.: 05271/687-130, E-Mail: hg.ramke@fh-hoexter.de

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Karl-Josef Witt

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen  
Lehrstuhl für Grundbau  
Marienstraße 7 a, 99423 Weimar  
Tel.: (0 36 43) 58-45 60, E-Mail: kj.witt@bauing.uni-weimar.de