

Der Versuch einer langzeitbeständigen mineralischen Oberflächenabdichtung

1 Einleitung

Eine der gravierendsten Fragen ist die nach der dauerhaften Beständigkeit einer rein mineralischen Abdichtungskomponente im Oberflächenabdichtungssystem. Viele negative Erfahrungen der vergangenen Jahre ließen tonmineralische Oberflächenabdichtungen in die Kritik geraten. Feldversuche und Ausgrabungen haben gezeigt, dass infolge Austrocknung und Durchwurzelung mineralische Dichtungsschichten innerhalb weniger Jahre einen großen Teil ihrer Dichtungswirkung verlieren können [3].

An der Zentraldeponie Castrop-Rauxel wurde Ende der 90er Jahre ein alternatives Oberflächenabdichtungssystem konzipiert, das unter Verzicht auf eine Kunststoffdichtungsbahn allein aus mineralischen Komponenten zusammengesetzt ist. Um die offenen Fragen zur Wirksamkeit und Langzeitbeständigkeit zu klären, wurde ein Versuchsfeld eingerichtet und in einem über 10-jährigen Untersuchungsvorhaben wissenschaftlich begleitet.

2 Potenzielle Beeinträchtigungen

Mineralische Oberflächenabdichtungen sind im Gegensatz zu synthetischen Komponenten in der Regel hinsichtlich ihrer stofflichen Eigenschaften dauerhaft beständig. Mögliche Beeinträchtigungen der Funktionsfähigkeit einer solchen Komponente resultieren aus einer eventuell eintretenden Gefügebildung der im Einbauzustand homogenen Matrix, die über verschiedene Einflüsse ausgelöst werden kann.

Änderungen des Wassergehalts führen bei bindigen Materialien zu mitunter hohen Wasserspannungen, die sich als Zugspannungen auf das Korngefüge übertragen und so zu Schrumpfung und Rissbildung führen können. Dieser Prozess kann bestenfalls als teilweise reversibel angesehen werden, so dass hier langfristige Funktionseinbußen zu erwarten sind. [3],[7]

Der Haupteinfluss auf den Wassergehalt innerhalb einer mineralischen Abdichtungsschicht liegt in den Witterungsbedingungen. In den trockenen Sommermonaten gibt die Rekultivierungsschicht über Evaporation und Transpiration in der Wurzelzone ihren Bodenwasservorrat sukzessive an die Atmosphäre ab. Kapillarkräfte sorgen für einen Wassertransport aus den tieferen Schichten bis an die Oberfläche. Auf diese Weise trocknet die Rekultivierungsschicht ausgehend von der Oberfläche bis in tiefere Schichten aus.

Es bildet sich eine „Austrocknungsfront“, d.h. ein Bereich hoher Wasserspannungen, der mit der Zeit von der Oberfläche in die Tiefe voranschreitet (Bild 1). Übertragen sich solch hohe Wasserspannungen auf die mineralische Dichtungsschicht, kann es zu schädlicher Rissbildung kommen. Es muss daher mit konstruktiven Mitteln verhindert werden, dass diese Austrocknungsfront bis in die mineralische Abdichtungsschicht übergreifen kann.

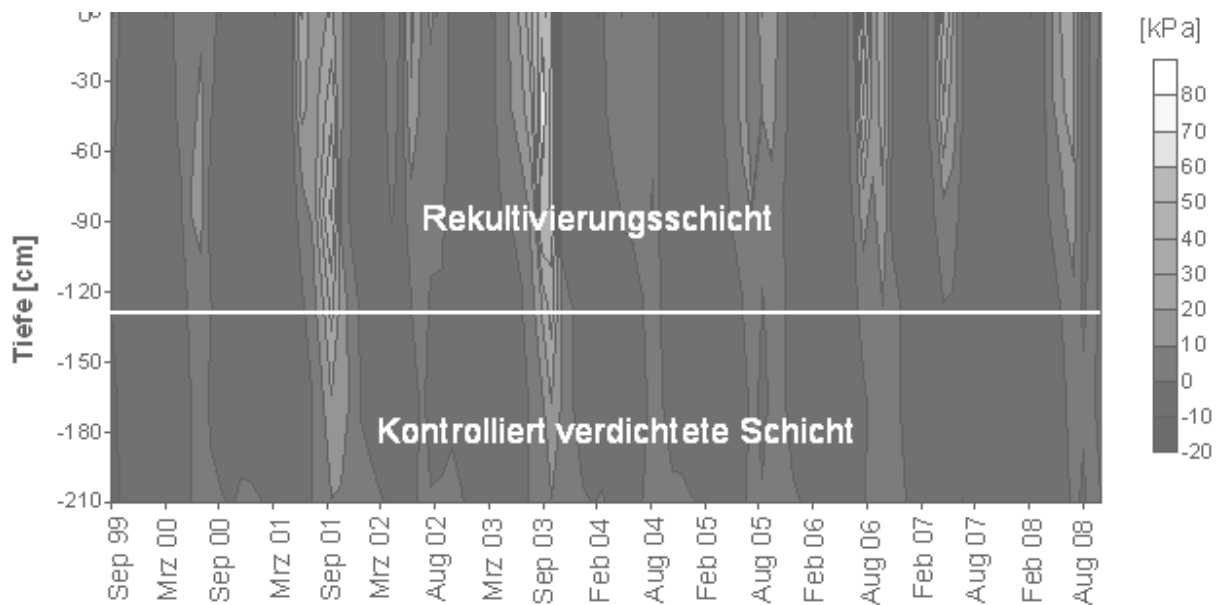


Bild 1 Verlauf der Wasserspannungen im Oberflächenabdichtungssystem

Ein zweiter Einfluss kann über die Entwässerungsschicht auf die mineralische Abdichtungsschicht einwirken. Über den relativ hohen Porenraum, der in der Regel außerdem durch große, fließwirksame Porenquerschnitte gekennzeichnet ist, kann durch eine Luftströmung der Transport von Wasser in der Dampfphase so sehr begünstigt sein, dass die Oberfläche einer mineralischen Dichtungsschicht abtrocknet.

Eine dritte Einwirkung droht in der Regel, wenn infolge von Austrocknungsprozessen bereits Risse in der Oberfläche der mineralischen Dichtungsschicht entstanden sind. Diese werden von Pflanzen bevorzugt aufgesucht, um ihre Wurzeln mit möglichst geringer Energie in die mineralische Dichtungsschicht zu treiben und dort ihren Wasserbedarf zu decken. In einer Art positiver Rückkopplung führt dieser Prozess in der Regel dann schnell zum Versagen des Systems.

3 Mögliche Maßnahmen

Der erste Ansatzpunkt zur Vermeidung einer austrocknungsbedingten Rissbildung liegt in der Auswahl eines geeigneten Dichtungsmaterials. Hochplastische Tone haben den unbestrittenen Vorteil, mit moderater Verdichtungsenergie eine sehr hohe Dichtheit zu entfalten. Aufgrund ihres hohen Anteils quellfähiger Tonminerale sind sie allerdings auch empfindlicher gegenüber Wassergehaltsänderungen und unterliegen stärkeren Schrumpfprozessen. In den vergangenen Jahren haben sich für Oberflächenabdichtungssysteme weniger quellfähige sowie gemischtkörnige Böden, die auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve eingebaut werden, als vorteilhaft erwiesen. Konventionell errichtete tonmineralische Abdichtungsschichten gelten bis zu einer Wasserspannung von 20-50 kPa (je nach Material und Einbaubedingungen) als beständig. Gering-quellfähige Materialien weisen bei gleichem Wassergehalt eine deutlich geringere Wasserspannung auf als quellfähige Tone. Horn stellt fest, dass Austrocknungsrisse grundsätzlich dann vermieden werden können, wenn der Einbauwassergehalt des Dichtungsmaterials nicht höher liegt als der geringste später zu erwartende Wassergehalt. [2]

Der zweite und effektivste Ansatz zur Vermeidung von Rissbildung liegt in der Gestaltung der Rekultivierungsschicht. Durch ausreichende Mächtigkeit und Verwendung qualifizierten Bo-

denmaterials kann der Wasserhaushalt in der Regel so gesteuert werden, dass ein Austrocknen bis in die unterste Zone vermieden werden kann. Ein wesentlicher Parameter ist dabei die nutzbare Feldkapazität als Maß für die Wasserspeicherefähigkeit des Bodens. Bild 2 zeigt die Zusammenhänge zwischen einer ausreichend dimensionierten nutzbaren Feldkapazität und dem Verlauf des Wassergehalts. Die Einstellung eines ausreichenden Bodenwasserspeichers kann die Austrocknung bis in die untersten Zonen vermeiden helfen und wirkt sich damit auch positiv auf die Begrenzung der Durchwurzelungstiefe aus.

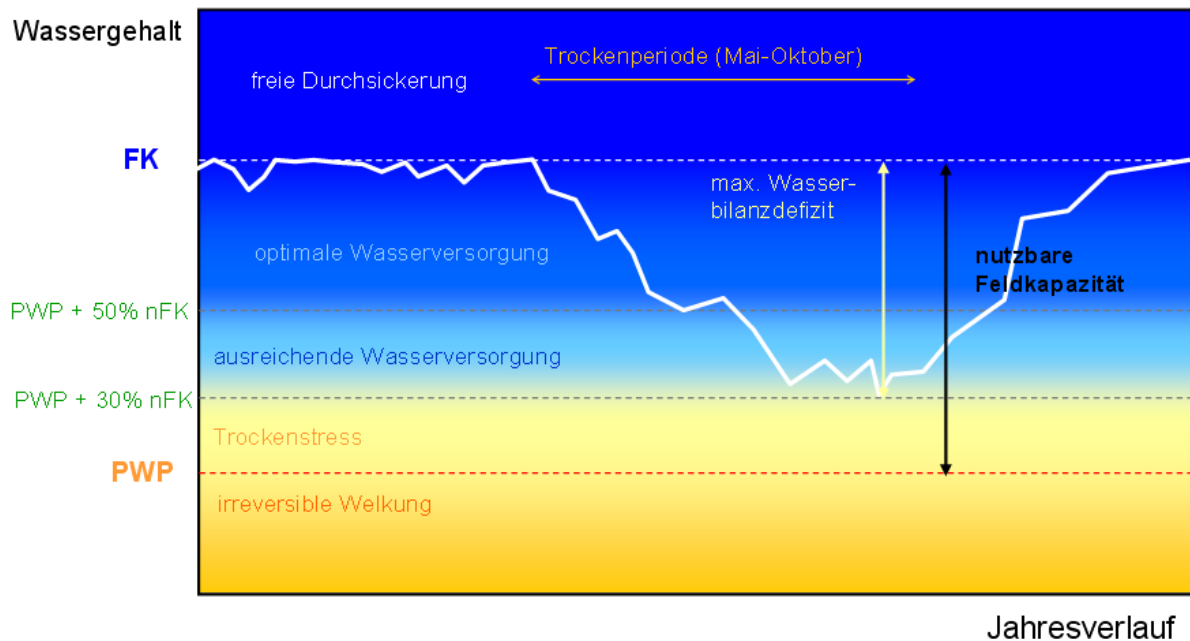


Bild 2 Wassergehalt einer Rekultivierungsschicht im Jahresverlauf

Als überaus wesentliche konstruktive Maßnahme ist die Anordnung einer Entwässerungsschicht zwischen Rekultivierungsschicht und mineralischer Abdichtungsschicht anzusehen. Sie verhindert mit ihrem Kapillarsprung, dass sich die Kapillarströmung in der Rekultivierungsschicht auf die mineralische Dichtungsschicht überträgt. Bild 3 zeigt die Wirkung am Vergleich zweier ansonsten identischer Versuchsfelder deutlich. Die hohen Wasserspannungen reißen an der kapillarbrechenden Entwässerungsschicht ab. Der Versuch, eine mineralische Dichtungsschicht durch den Verzicht auf eine Entwässerungsschicht – soweit konstruktiv überhaupt möglich – besser gegen Austrocknung zu schützen, würde vermutlich eine kontraproduktive Wirkung entfalten. Dies wurde bereits früher an mehreren Testfeldern beobachtet [1],[3],[6].

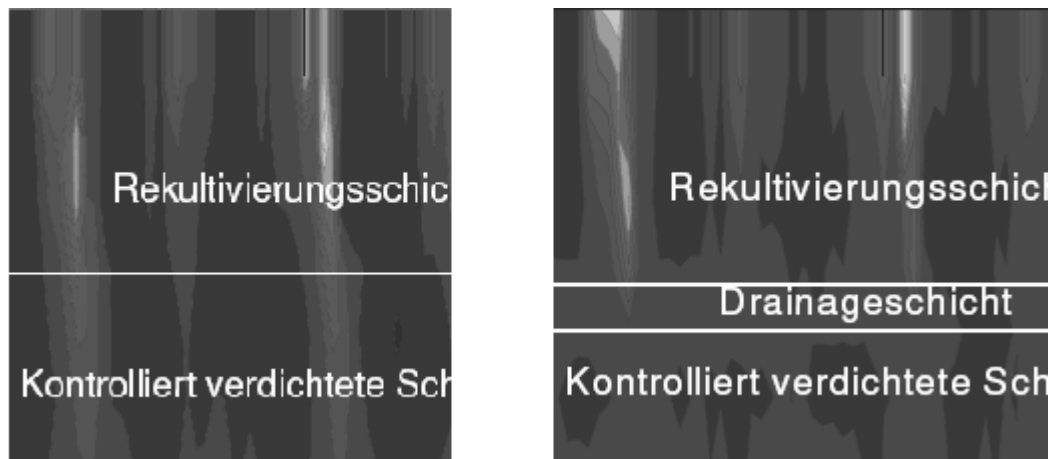


Bild 3 Vergleich der Wasserspannungen – mit und ohne Dränageschicht

Bild 4 zeigt, dass die Dränageschicht den Wassergehalt sowohl in der Rekultivierungsschicht als auch in der mineralischen Abdichtungsschicht beeinflusst. Der Wassergehalt wird über den Jahresverlauf stark nivelliert, so dass der Unterschied in den Feuchtperioden weitaus stärker ausfällt als in den relevanten Trockenperioden. Der Wassergehalt an sich lässt noch keine Aussage über zu erwartende Schäden im Materialgefüge zu; dies lässt sich erst im Zusammenhang mit der material-spezifischen pF-Kurve aus der korrespondierenden Wasserspannung ableiten.

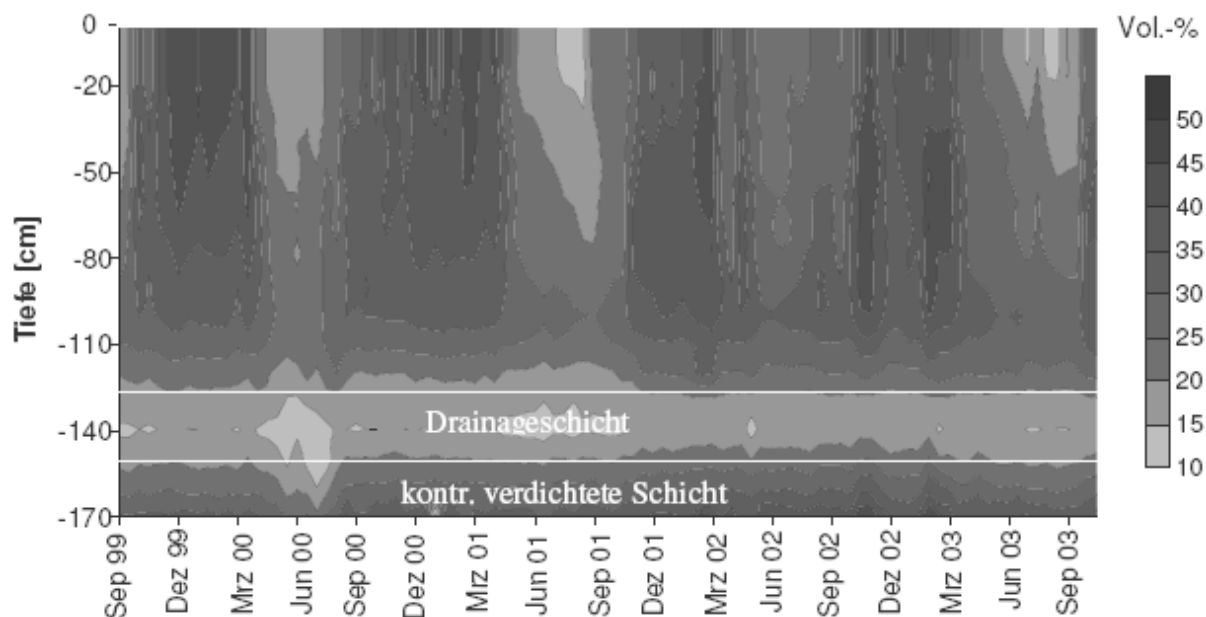


Bild 4 Wassergehalt in einer Oberflächenabdichtung

Die vordergründig miteinander kollidierenden Anforderungen an die Entwässerungsschicht (hohes Porenvolumen, großer Porenquerschnitt, Kapillarsprung, Begrenzung der Luftkonvektion) lassen sich im Ernstfall durchaus miteinander vereinbaren.

- Bei einer konventionell gestalteten Entwässerungsschicht mit relativ grober Körnung kann man zum Schutz der unterliegenden mineralischen Dichtungsschicht eine Schutzschicht feinerer Körnung (z.B. Sand) unterhalb der eigentlichen Entwässerungsschicht anordnen. [7]

- Eine qualifizierte Rekultivierungsschicht mit einem hohen Bodenwasserspeicher lässt es in der Regel zu, die Entwässerungsschicht in einer feineren Körnung (mit einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit) anzulegen, die zwar einen Kapillarsprung erzeugt aber den Porenraum soweit begrenzt, dass konvektive Luftströmungen minimiert werden. Gegebenenfalls kann die hydraulische Leistungsfähigkeit durch Einziehen von Dränrohren erhöht werden.

Beide Ansätze bewirken, dass unmittelbar über der mineralischen Dichtungsschicht eine Restfeuchtigkeit aus Dränabflüssen länger gehalten wird als bei einer konventionellen grobporigen Entwässerungsschicht.

4 Aufbau der Boden-Natur-Dichtung

Im Zuge der Planung eines Oberflächenabdichtungssystems wurde als Bauvariante das System der Boden-Natur-Dichtung in die Überlegungen einbezogen. Dieses von der Betreiberin konzipierte System sieht eine Anordnung von bindigem Bodenmaterial in Verbindung mit einer optimierten Rekultivierungsschicht in hoher Gesamtmächtigkeit vor. Die für die Deponieklasse II sonst obligatorische Kunststoffdichtungsbahn sollte hier durch jeweils höherwertige Eigenschaften der mineralischen Abdichtung und der Rekultivierungsschicht kompensiert werden (siehe Bild 5).

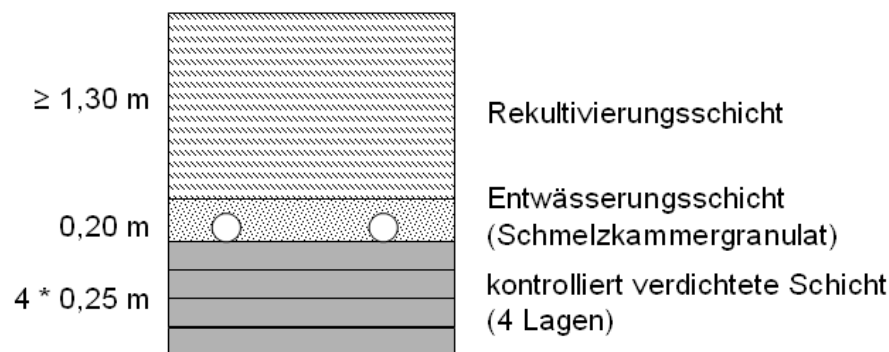


Bild 5 Aufbau der Boden-Natur-Dichtung

Für die Auswahl des Bodenmaterials für die mineralische Dichtungsschicht wurde ein konkreter Bereich des Bodendiagramms eingegrenzt (siehe Bild 6). Die Begrenzung des Tonmineralgehalts und darüber hinaus die Vermeidung stark quellfähiger Tone soll sicherstellen, dass Quell- und Schrumpfprozesse infolge schwankender Wassergehalte minimiert werden. Versuche an einem abweichenden Material haben gezeigt, dass der geeignete Bereich vermutlich größer gefasst werden könnte, ohne die funktionalen Anforderungen zu unterlaufen.

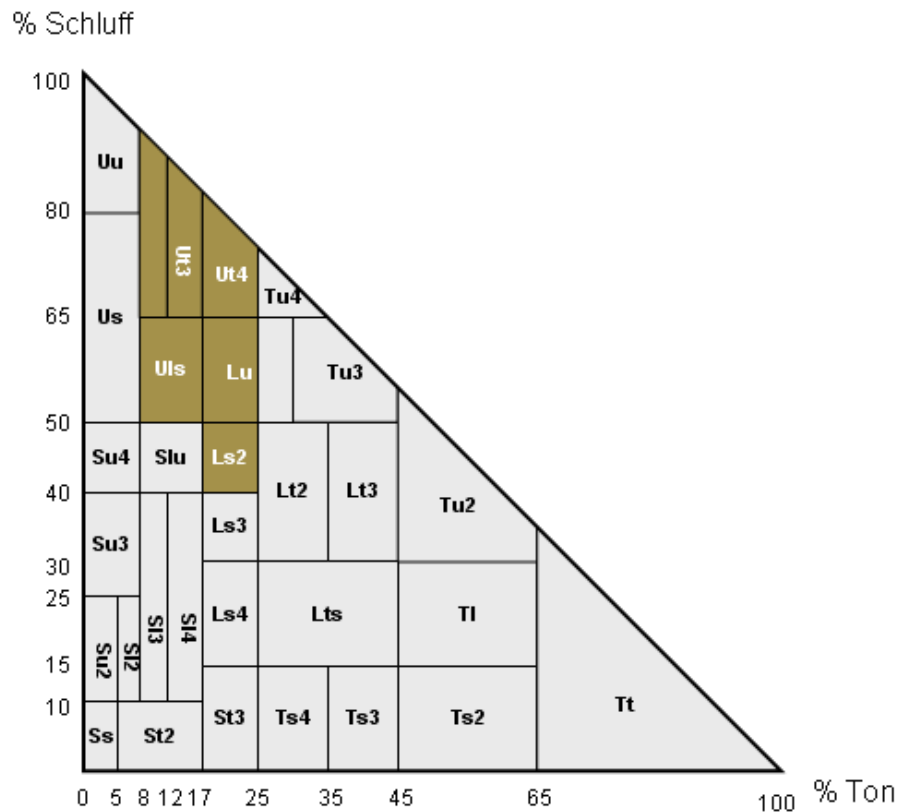


Bild 6 Eingrenzung des Dichtungsmaterials im Bodendiagramm

Auf Grund der natürlichen Schwankungsbreite der Eigenschaften verfügbarer Bodenmaterialien wurde vereinbart, dass der k -Wert in jeder der vier Dichtungslagen den Wert von $5 \cdot 10^{-9}$ m/s, im harmonischen Mittel aller vier Dichtungslagen jedoch einen Maximalwert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s einhalten muss. Die tatsächlich ermittelten k -Werte der einzelnen Lagen bewegten sich in einem Bereich zwischen $5 \cdot 10^{-9}$ m/s und $2 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Die Entwässerungsschicht mit einer Mächtigkeit von 20 cm wird aus einem Schmelzkammergranulat mit einem Körnungsband von 0/8 mm gebildet, das einen k -Wert von mindestens $1 \cdot 10^{-3}$ m/s erreicht. Damit wird der Gefahr einer von Luftdruckschwankungen induzierten, konvektiven Luftströmung in der Entwässerungsschicht wirksam begegnet. Die Körnung gewährleistet gleichzeitig einen ausreichenden Kapillarsprung zur Rekultivierungsschicht.

Die Rekultivierungsschicht in einer Mächtigkeit von 1,30 m wurde aus ähnlichen Bodenmaterialien aufgebaut, wie sie auch für die mineralische Dichtung verwendet wurden (Bild 7). Die Feldkapazität wurde zwar nicht im Versuch ermittelt, liegt aber nach der Bodenansprache im Bereich von 15-20 Vol.-%, d.h. in der Summe über die gesamte Mächtigkeit bei ca. 200 mm.

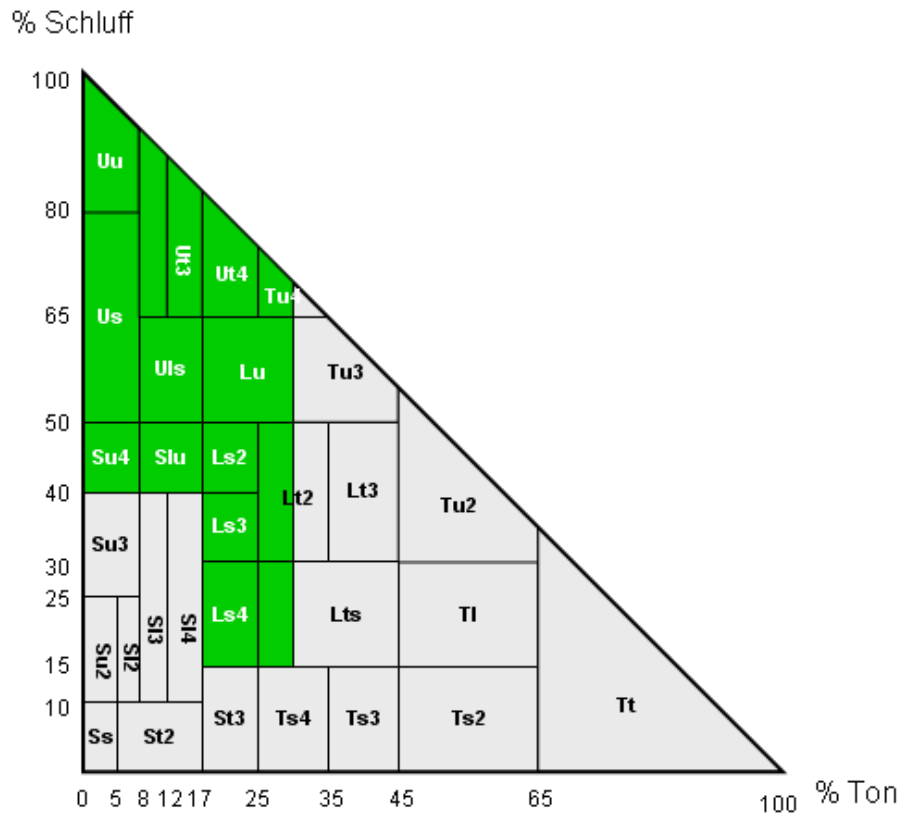


Bild 7 Eingrenzung des Bodenmaterials für die Rekultivierungsschicht

5 Ergebnisse der Langzeituntersuchung

Seit Ende 1998 untersucht das Geographische Institut der Ruhr-Universität Bochum (Prof. Dr. Harald Zepp) vier zu diesem Zweck auf der Deponie eingerichtete Versuchsfelder hinsichtlich des Wasserhaushalts und der Niederschlagsinfiltration durch das Dichtungssystem. Jeweils zwei der Versuchsfelder sind dabei mit einer Entwässerungsschicht ausgestattet, bei den beiden anderen Felder wurde auf diese verzichtet.

Das System weist seit Beginn der Untersuchungen eine sehr hohe Dichtungswirkung auf. Nach ca. 5 Jahren entwickelten sich die Durchflussmengen der beiden Bauvarianten (mit und ohne Dränageschicht) unterschiedlich. Während die Variante ohne Dränageschicht nach 7 Jahren keine messbare Durchsickerung mehr zeigte, erhöhte sich die Durchsickerung in der Variante mit Dränageschicht auf maximal 4 mm/a zwar deutlich, aber immer noch auf sehr niedrigem Niveau.

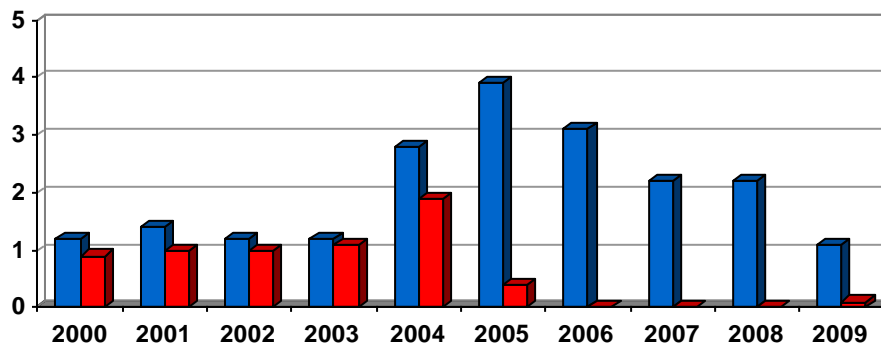


Bild 8 Durchflussmengen zweier Versuchsfelder im Vergleich (mm/a)

links: Versuchsfeld mit Dränageschicht
rechts: Versuchsfeld ohne Dränageschicht

Einen deutlicheren Hinweis auf die Dichtungswirkung gibt die Betrachtung der saisonalen Schwankungen der Durchsickerung. In den ersten Jahren und ansatzweise wieder seit 2009 stellt sich eine deutliche Saisonalität der Durchsickerungsmengen ein. Allerdings liegen die hohen Sickereraten nicht – wie zunächst zu erwarten wäre – im Winterhalbjahr sondern im Sommerhalbjahr. Die genaue Ursache dieser Erscheinung konnte bislang nicht abschließend geklärt werden. Sie ist vermutlich im Temperaturgradienten begründet, der den Wassertransport in der Dampfphase beeinflusst und im Sommer einen verstärkten Transport nach unten bewirkt. Das Phänomen ist auch schon an anderen Versuchsfeldern in Deutschland beobachtet worden.

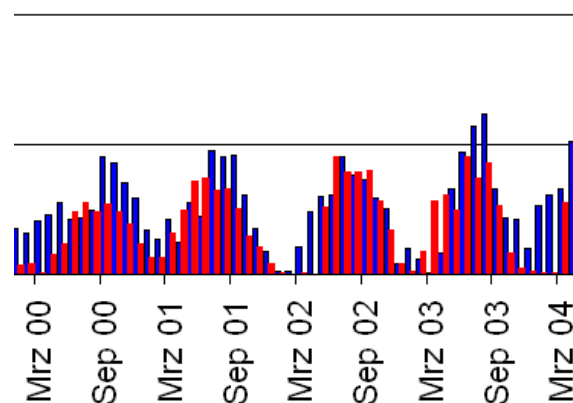


Bild 9 Saisonaler Verlauf der Durchsickerungsmengen

Dies deutet zusammen mit der sehr geringen Durchsickerungsrate darauf hin, dass abflusswirksame Makroporen oder gar ein Rissgefüge, die einen konvektiven Transport begünstigen, nicht vorhanden sind. Auch fehlt jegliche Korrelation von Sickerwassermenge und Niederschlagsmenge – sowohl saisonal als auch ganzjährig.

Die Bilanzierung der Wassermengen zeigt, dass ca. 2/3 der Niederschlagsmenge wieder an die Atmosphäre abgegeben werden und 1/3 über die Entwässerungsschicht abgeleitet wird.

Der nahezu vernachlässigbare Rest von $\ll 1\%$ tritt durch die Dichtungsschicht.

Niederschlag	771 mm/a	100 %
Verdunstung	494 mm/a	64,1 %
lateraler Abfluss & Dränage	275 mm/a	35,7 %
Durchsickerung	1,82 mm/a	0,24 %

Tab. 1 Bilanzierung der Wassermengen 1999-2009

Der des Öfteren beobachtete Effekt einer relevanten, austrocknungsbedingten Verringerung der Dichtungswirkung kann an diesem System seit 10 Jahren nicht einmal ansatzweise beobachtet werden. Der Grund dafür wird erkennbar, wenn man sich den Verlauf der Wasserspannungen ansieht, die über die gesamte Tiefe des Oberflächenabdichtungssystems gemessen wurden. Kritische Wasserspannungen in einer Größenordnung von 20-50 kPa werden im Zusammenwirken von Rekultivierungsschicht und Entwässerungsschicht wirksam und andauernd von der mineralischen Dichtungsschicht ferngehalten. Auch in den überdurchschnittlich warmen und trockenen Sommerperioden 2001 und 2003 wurde die Dichtungsschicht keiner kritischen Belastung ausgesetzt.

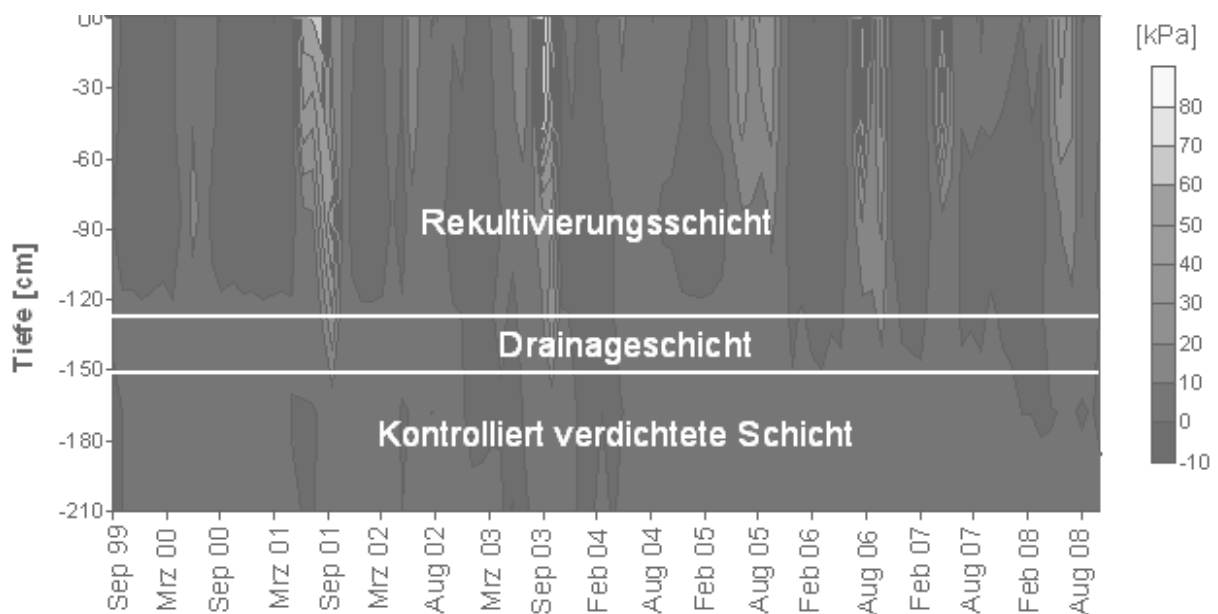


Bild 10 Verlauf der Wasserspannungen

Auf Grund der positiven und für den langfristigen Schutz der mineralischen Dichtung essentiellen Wirkung der Dränageschicht entschieden sich die Beteiligten für die Genehmigung der Variante mit Dränageschicht, obwohl die Durchsickerungsmengen geringfügig höher lagen als für die Variante ohne Dränage. Auf der Grundlage der Deponieverordnung von 2002 wurde dem Gesamtsystem die Gleichwertigkeit zum Regelaufbau der Klasse II anerkannt.

6 Regelwerke und einheitliche Qualitätsstandards

Betrachtet man die für die Errichtung eines solchen Systems anzuwendenden Vorschriften und Empfehlungen, gelangt man zu folgender Übersicht.

Unter den verfügbaren Regelwerken nimmt die Deponieverordnung als rechtlich verbindliches Werk naturgemäß eine überragende Stellung ein. Ihr Anhang 1 gibt zur Gestaltung eines Oberflächenabdichtungssystems mit einer mineralischen Abdichtungskomponente im Wesentlichen auf, dass

- die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen, chemischen und biologischen Einflüssen gegeben sein muss
- die Gefahr von Trockenrissbildung zu vermeiden ist
- die Funktionserfüllung für mindestens 100 Jahre nachgewiesen wird.

Zur Gestaltung der Rekultivierungsschicht fordert die DepV

- die Bemessung der Mächtigkeit nach den Schutzerfordernissen
- eine nutzbare Feldkapazität von mindestens 140 mm für die Gesamthöhe
- Vermeidung der Durchwurzelung
- Schutz vor Austrocknung

Die Verweisung auf Anhang E der TA Abfall ist mit der Neufassung der Deponieverordnung in 2009 aufgegeben worden; die TA Abfall wurde aufgehoben. Konkretisierende Festlegungen zur Materialauswahl und zum Einbau liegen somit als bundeseinheitliche Verwaltungsvorschrift nicht mehr vor.

Der Freistaat Bayern und das Land Nordrhein-Westfalen haben in einem gemeinsamen Merk-/Arbeitsblatt die ehemaligen Regelungen des Anhangs E in leicht modifizierter Form veröffentlicht und für die Vollzugsbehörden in diesen beiden Ländern verbindlich eingeführt. Hinsichtlich einer rein mineralischen Abdichtung gibt dieses Arbeitsblatt auf, dass

- der Anteil der aktiven/quellfähigen Tonminerale zu begrenzen ist
- die Rekultivierungsschicht so auszulegen ist, dass keine schädlichen Wasserspannungen auftreten können; dieses ist in einem Gutachten zur Austrocknungsempfindlichkeit nachzuweisen
- der Einbauwassergehalt homogen verteilt ist und im Bereich des optimalen Wassergehalts oder unter dem Proctorwassergehalt liegen muss (trockener Ast)
- ein Verdichtungsgrad von $D_{pr} > 95 \%$ erreicht werden muss
- der Luftporenanteil auf $n_a < 5 \%$ zu begrenzen ist

Als weitere maßgebliche Quelle sind die GDA-Empfehlungen zu nennen, auf die auch das gemeinsame Merk-/Arbeitsblatt hinweist.

- Die Empfehlung E 2-20 zu Entwässerungsschichten lässt die in dem vorgestellten Fall gewählten Modifikationen ausdrücklich zu, ohne sie explizit einzufordern.
- Die Empfehlung E 2-31 enthält ausführliche Gestaltungsprinzipien zur Gestaltung und Bemessung der Rekultivierungsschicht, die alle vorgenannten Erscheinungen berücksichtigen.

Für den Nachweis der dauerhaften bzw. langfristigen Funktionsfähigkeit von mineralischen Abdichtungskomponenten liegen noch keine allgemeingültigen Vorgaben vor. Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW hat einen Gutachter damit beauftragt, ein Konzept für eine solche Nachweisführung zu erarbeiten. Die Ergebnisse werden in Kürze vorliegen.

7 Zusammenfassung

Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus den Ergebnissen der Langzeituntersuchung hinsichtlich der Dauerbeständigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen ziehen?

- Eine ganz wesentliche Funktion zum Schutz der mineralischen Dichtungsschicht nimmt die Entwässerungsschicht wahr, die auf Grund des Kapillarsprungs den Abtransport von Porenwasser in die Rekultivierungsschicht unterbindet.
- Die Rekultivierungsschicht kann bei geeigneter Bemessung und durchschnittlichen meteorologischen Verhältnissen die klimatischen Schwankungen von Niederschlag, Verdunstung und Temperatur soweit ausgleichen, dass kritische Wasserspannungen allenfalls sporadisch auftreten und sich nicht auf die Abdichtungsschicht auswirken.
- Die Langzeitbeständigkeit einer mineralischen Dichtung kann nur im Zusammenhang mit dem gesamten Oberflächenabdichtungssystem (Rekultivierungsschicht) und den meteorologischen Verhältnissen beurteilt werden.
- Die bestehenden Regelwerke lassen die Bemessung des Systems nach den vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen zu. Allerdings ist die hier realisierte Variante für die Deponieklasse II nach der neuen Deponieverordnung aus formalen Gründen nicht mehr genehmigungsfähig, da ihr die zweite Abdichtungskomponente fehlt.
- Es ist möglich, eine mineralische Abdichtungsschicht auch ohne überlagernde Kunststoffdichtungsbahn so zu errichten, dass sie den witterungsbedingten Einwirkungen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit dauerhaft widersteht.

8 Literatur

- [1] Henken-Mellies, Gartung (2002): Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach, Müll und Abfall, Heft 1
- [2] Horn (2002): Analyse des Austrocknungsverhaltens von mineralischem Bodenmaterial anhand von Laboruntersuchungen, in: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxter
- [3] Melchior, Berger, Vielhaber, Miehlisch (2002): Großlysimeter Deponie Hamburg-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Dichtungen, in: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxter
- [4] Melchior, Vielhaber (2002): Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht, in: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxter
- [5] Tiedt (2009): Wasserhaushaltsbetrachtungen an der Oberflächenabdichtung der Zentraldeponie Castrop-Rauxel, Tagungsband DWA Deponietage 2009
- [6] Wagner, Schnatmeyer (2002): Großversuche der Universität Trier mit einer mineralischen Abdichtungsschicht, in: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxter
- [7] Witt, Zeh, Falk (2004): Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen, Müll und Abfall, Heft 11

- [8] Zepp: Bericht über das alternative Oberflächenabdichtungssystem Castrop-Rauxel (1999-2005), Zwischenbericht, Fakultät für Geowissenschaften, Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum, Bochum