

# Möglichkeiten und Grenzen eines quantitativen Nachweises der Tragfähigkeit von Zwischenabdichtungen

**Dr.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke**  
robert-balthasar.wudtke@uni-weimar.de

**Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt**  
kj.witt@uni-weimar.de

## 1 Einleitung

Zwischenabdichtungen in Abfalldeponien sind eine Spezialform der Basisabdichtungen. Sie sind grundsätzlich zwischen zwei Deponiekörpern angeordnet, vgl. Abbildung 1. Die wesentlichen Funktionen von Zwischenabdichtungen sind die Fassung und Ableitung von in dem die Abdichtung überlagernden Deponiekörper anfallendem Sickerwasser und der Schutz des Untergrundes der Abdichtung vor Infiltration.

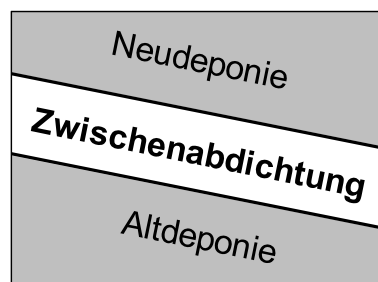


Abbildung 1: Systematik Zwischenabdichtungen

Besondere Anforderungen an Zwischenabdichtungen ergeben sich, da deren Baugrund aus deponierten Abfällen besteht. Hierbei handelt es sich i. d. R. um inhomogen zusammengesetzte Materialien geringer Tragfähigkeit, wechselnder Lagerungsdichte, großer Verformbarkeit. Die genannten Eigenschaften können als Folge biologischen Abbaus zeitlichen veränderlich sein.

Festlegungen hinsichtlich der Anforderungen an Zwischenabdichtungen sowie ihrer Bauweisen sind sowohl national als auch international in Regelwerken formuliert. Beispielfhaft können hierzu folgende genannt werden:

- Deutschland: Deponieverordnung DEPV (2009), GDA (2017), Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards für Mineralische Abdichtungskomponenten BQS (2014)
- Frankreich: „Comité Français Géosynthétique“ CFG
- USA: „Resource Conservation and Recovery Act“ RCRA (2011)
- Australien: „Best Practice Environmental Management“ BPEM (2015)

Die Erweiterung eines Deponiestandorts oder das Überbauen einer bestehenden Abfallablagerung sind auf Grund von ökonomischen Vorteilen sowie einer höheren Akzeptanz in der Bevölkerung gegenüber einer neuen Standortsuche und -entwicklung von Vorteil. Der Teilabschluss einer Deponie kann mit dem

Bau einer dann erforderlichen Zwischenabdichtung kombiniert werden. Die Anwendung von Zwischenabdichtungen zur Erweiterung bestehender Deponien erscheint vor diesem Hintergrund als die ideale Lösung. Nicht in Betracht gezogen werden hierbei jedoch die ungünstigen Effekte infolge der Verformungs- und Tragfähigkeitseigenschaften sowie der Inhomogenität der Altdeponie. Um diesen Gefährdungen langfristig zu begegnen muss eine Zwischenabdichtung über eine ausreichende Robustheit verfügen.

Um eine ausreichende Robustheit einer Zwischenabdichtung nachzuweisen sind zusätzlich zu den Nachweisen der Standsicherheit (ULS) umfassende Betrachtungen zu möglichen Verformungen und Dehnungen des Abdichtungssystems sowie ihre Auswirkung auf deren Gebrauchstauglichkeit (SLS) anzustellen. Es ist zu prüfen ob die infolge der Beanspruchungen an der Zwischenabdichtung auftretenden Verformungen und Dehnungen zu einer funktionalen Beeinträchtigung führen. Hierbei ist insbesondere die Kenntnis über die Materialeigenschaften des Altdeponiematerials essentiell.

## 2 Grundlagen

Ist die Erhöhung der Aufnahmekapazität einer Abfalldéponie vorgesehen, kommen Zwischenabdichtungen bei vertikalen und horizontalen Erweiterungen sowie bei Kombinationen beider Erweiterungen zum Einsatz (Abbildung 2). Ausschlaggebend für die jeweils erforderliche Art der Erweiterung sind die räumlichen Verhältnisse und die Topographie des Deponiestandorts.

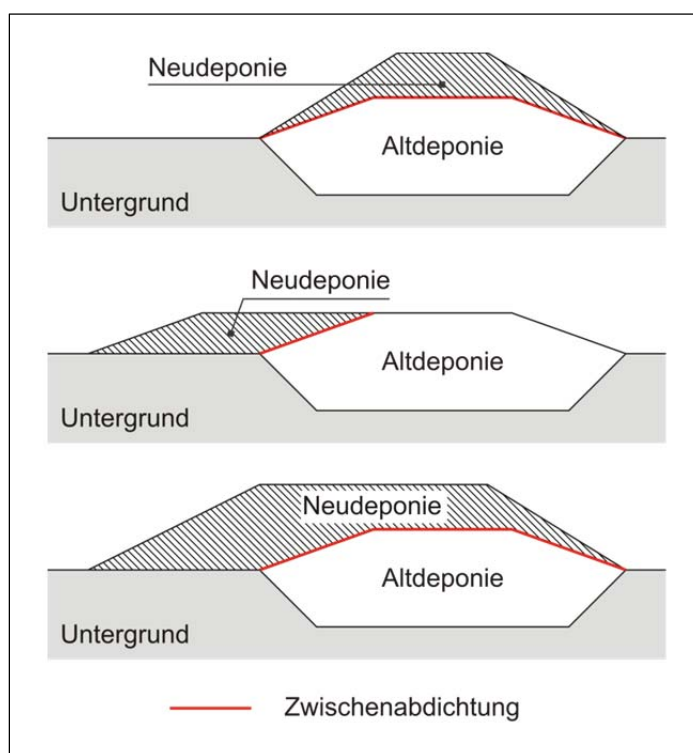


Abbildung 2: Arten der Deponieerweiterung nach TANO et al. (2015)

Die Grenzen der Nutzbarkeit von Zwischenabdichtungen werden maßgeblich durch die zulässige Längsdehnung der verwendeten Abdichtungskomponenten bestimmt. Entscheidend ist, dass diese im Gebrauchszustand nicht erreicht wird. Erfahrungswerte der zulässigen Längsdehnung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Erfahrungswerte zulässiger Längsdehnungen unterschiedlicher Abdichtungskomponenten

Abdichtungskomponente	zulässige Längsdehnung
Mineralische Dichtung	< 1% <sup>1)</sup>
Bentonitmatte	6% - 20% <sup>1)</sup> 10% - 15% <sup>2)</sup>
Kunststoffdichtungsbahn, Polyethylen	
hohe Dichte, glatte Oberfläche	6% - 8% <sup>3)</sup>
hohe Dichte, raue Oberfläche	4% - 6% <sup>3)</sup>
geringe Dichte, glatte Oberfläche	10% - 12% <sup>3)</sup>
geringe Dichte, raue Oberfläche	8% - 10% <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> QIAN *et al.* (2001)

<sup>2)</sup> LAGATTA (1992)

<sup>3)</sup> PEGGS *et al.* (2005)

Aus Basis der dokumentierten Werte kann die Verwendung von mineralischen Abdichtungskomponenten als kritisch angesehen werden. Die in Tabelle 1 genannten Kennwerte müssen vor dem Hintergrund der Schichtstärken der verschiedenen Abdichtungskomponenten unterschiedlich bewertet werden. Mineralische Abdichtungskomponenten verfügen aufgrund ihrer großen Schichtdicke über ein großes Potenzial auftretende Längsdehnungen durch Schubverformungen zu kompensieren. Daher sind mineralische Abdichtungskomponenten als vergleichsweise robuster einzustufen.

### 3 Tragfähigkeit

Der Tragfähigkeitsnachweis für Zwischenabdichtungen unterscheidet sich nicht von den für Deponiebauwerke zu erbringenden Nachweisen. Potenziell sind zum Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit die folgenden Grenzzustände zu untersuchen:

- Gleitsicherheit in den Schichtflächen des Abdichtungssystems,
- Gesamtstandsicherheit (Böschungsbruch) und
- Gleiten des geböschten Deponiekörpers auf der geneigten Aufstandsfläche (Spreizsicherheit).

Ziel der Grenzzustandsbetrachtung ist es, die alle im Zusammenhang mit dem Abdichtungssystem möglichen Versagensarten zu untersuchen.

Abdichtungssysteme werden gemäß DIN EN 1997-1:2014 sowie dem zugehörigen Nationalen Anhang i. d. R. der Geotechnischen Kategorie GK2 zugeordnet. Bei der Planung einer Zwischenabdichtung sind grundsätzlich der planmäßige Endzustand (BS-P), Bauzustände bei der Erstellung der Abdichtung (BS-T) sowie der Einfluss außergewöhnlicher Beanspruchungen (BS-A) zu betrachten.

Die Gleitsicherheit einer Zwischenabdichtung wird als schichtparalleles Gleiten nach dem Ansatz der infiniten Lamelle ermittelt (DIN 4084:2009). Bei der Grenzzustandsbetrachtung wird ein Versagen durch den Verlust der Gesamtstandsicherheit untersucht (GEO-3). Beim Nachweis wird eine unbegrenzte Böschung betrachtet, was einen homogenen Aufbau des Zwischenabdichtungssystems sowie eine gleichmäßige Belastung voraussetzt. Seitliche Erddrücke sowie eine Stützung am Fuß werden

vernachlässigt. Bestimmend für den Grenzzustand sind die Neigung des Abdichtungssystems und die Scherfestigkeit ihrer Komponenten.

Liegt keine einheitliche Belastung aus der Überlagerung oder der Berücksichtigung zusätzlicher Einwirkungen und Widerstände aus Erddruck oder Stützbauwerken am Böschungsfuß vor, werden zum Nachweis der Gleitsicherheit Starrkörpermechanismen betrachtet.

Nach GDA-Empfehlung E2-7 WITT & WERTH (2015) ist beim Gleitsicherheitsnachweis für alle Trennflächen eines Abdichtungssystems sowie für mögliche Gleitflächen innerhalb der Schichten eine ausreichende Sicherheit gegenüber den Beanspruchungen aus Eigengewicht, Porenwasserdruck und Verkehrslasten nachzuweisen. Ist zum Erreichen einer ausreichenden Sicherheit die Verwendung eines Bewehrungselements notwendig, wird dessen erforderliche Festigkeit unter Berücksichtigung faktorierter Bodenwiderstände (GEO-3) ermittelt, vgl. EBGEO (2010) und WUDTKE *et al.* (2008).

Weiterhin ist die Gesamtstandsicherheit für den gesamten Abfallkörper einschließlich Zwischenabdichtung zu untersuchen, wobei neben dem geplanten Endzustand auch temporäre Verfüllzustände betrachtet werden müssen. Das Berechnungsverfahren ist unter Berücksichtigung der geometrischen Bedingungen sowie der Materialeigenschaften in Übereinstimmung mit DIN 4084:2009 zu wählen. Vereinfachend kann in der Berechnung die Abdichtungskomponente oder Schichtfuge mit der geringsten Scherfestigkeit als repräsentativ für die gesamte Zwischenabdichtung angenommen werden. Auch bei diesem Nachweis können Starrkörpermechanismen relevant sein, wenn bevorzugte Gleitflächen existieren.

Bei Zwischenabdichtungen unter Böschungen ist die Spreizsicherheit in der Aufstandsfläche nachzuweisen. Der zu betrachtende Böschungsfuß liegt nach Abbildung 2 entweder im Übergang zum umliegenden Gelände und ist durch einen Randeddamm gesichert oder im Übergang zu einer Basisabdichtung. Beim Nachweis wird der mobilisierbare Sohlreibungswinkel  $\delta_{\text{vorh}}$ , der Scherwiderstand der Aufstandsfläche, dem zur Schubkraftübertragung erforderlichen Sohlreibungswinkel  $\delta_{\text{erf}}$  gegenübergestellt. Für die an einer Zwischenabdichtung auftretenden Zustände ist nach GDA-Empfehlung E2-21 WITT (1997) der Ansatz nach BRAUNS (1980) geeignet, wobei bei kohäsivem Abfall eine Gesamtscherfestigkeit des Deponiekörpers angesetzt wird.

## 4 Gebrauchstauglichkeit

### 4.1 Grundlagen

Die Gebrauchstauglichkeit ist nach DIN EN 1997-1:2014 nachgewiesen, wenn die Eigenschaften eines Bauwerkes oder Bauteiles die uneingeschränkte Nutzung sicherstellen. Bei Zwischenabdichtungen sind diese Eigenschaften die Entwässerungsfunktion und die Abdichtungsfunktion. Die Gebrauchstauglichkeit von Zwischenabdichtungen wird als hinsichtlich einer funktionalen Einschränkung anhand der langfristig auftretenden Verformungen und Verzerrungen bewertet.

Die Einschränkung der Entwässerungsfunktion einer Zwischenabdichtung kann durch ungleichmäßige Setzungen des Baugrundes verursacht werden. In der Folge wird die zur Entwässerung erforderliche Mindestneigung  $i_{\text{erf}}$  der Abdichtung unterschritten, vgl. Gleichung (1).

$$i_{vorh} < i_{erf} \quad (1)$$

Um sicher zu stellen, dass die in Längs- und Querrichtung erforderliche Mindestneigung der Zwischenabdichtung (1,5 % bzw. 3 %) dauerhaft realisiert wird, ist eine Überhöhung des Profile bei der Errichtung der Zwischenabdichtung vorzusehen. Die Überhöhung wird aus der Verformungsprognose abgeleitet. Die Größe des Sicherheitszuschlags muss die Unschärfe der Prognose berücksichtigen.

Um eine Einschränkung der Abdichtungsfunktion zu beurteilen, sind die an der Abdichtungskomponente auftretenden Dehnungen zu betrachten. Die aus verschiedenen mechanischen Einwirkungen resultierenden Zwangsverformungen werden hierzu untersucht. Als Ergebnis darf in den einzelnen Abdichtungskomponenten keine unverträglichen Schub- und Zugspannung auftreten.

Der Nachweis der Dichtungsfunktion wird durch eine Gegenüberstellung der auftretenden/prognostizierten Dehnungen  $\varepsilon_{vorh}$  und der materialspezifischen Grenzdehnung  $\varepsilon_{zul}$  geführt, vgl. Gleichung (2).

$$\varepsilon_{vorh} < \varepsilon_{zul} \quad (2)$$

Die Grundlage des Verformungsnachweises ist damit die Prognose künftiger Dehnungen, welche sich aus auflastbedingter Biegung, Längenänderungen und aus einem Schrumpfen der Zwischenabdichtung ergeben können. Die Verträglichkeit der genannten Zwangsdehnungen wird für polymere Abdichtungskomponenten anhand der Grenzdehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit beurteilt. Für mineralische Komponenten kann die Zugfestigkeit nur experimentell ermittelt werden. Einflussfaktoren auf den Parameter sind der Wassergehalt, der Verdichtungsgrad und die Versuchsmethode KÖDITZ *et al.* (2016). Sicherheitsabschläge der Zugfestigkeit ergeben sich aus den experimentellen Unsicherheiten und aus den Unschärfen des mechanischen Modells.

Nach GDA-Empfehlung E2-13 WITT (2010) sollen sich Abdichtungsschichten gegenüber einwirkenden Setzungen unempfindlich verhalten und ihre Abdichtungsfunktion auch im verformten Zustand behalten. Als Folge von Verformungen können in einer mineralischen Abdichtungsschicht Zugrisse oder Scherzonen entstehen. Während nach SCHERBECK & JESSBERGER (1992) Scherzonen mit geschlossenen Scherfugen hierbei zu einer kaum veränderten Abdichtungsfunktion führen, ist mit dem Entstehen von Zugrissen immer ein Verlust derselben verbunden. Die an einer Zwischenabdichtung zumindest langfristige Auflast wirkt der Entstehung von Zugrissen entgegen.

Sofern eine KDB als Abdichtungskomponente verwendet wird, ist die Abdichtungsfunktion direkt an ihre materialspezifisch zulässige Längsdehnung  $\varepsilon_{zul}$  gebunden. Die Werte von  $\varepsilon_{zul}$  schwanken in Abhängigkeit des spezifischen Gewichtes der Materialien und der Oberflächenbeschaffenheit des Endproduktes. Tendenziell ist davon auszugehen, dass mit einer Verringerung des spezifischen Gewichtes eine Steigerung der zulässigen Längsdehnung verbunden ist. Zugleich verfügt eine KDB mit einer glatten Oberfläche im Vergleich zu einer strukturierten KDB über eine größere zulässige Längsdehnung, vgl. Tabelle 1.

## 4.2 Analytische Verformungsberechnung

Die an Zwischenabdichtungen auftretenden Verformungen werden durch die Überlagerungsspannung und durch die Verformungseigenschaften des die Abdichtung unterlagernden Abfalls bestimmt. Ungleichmäßige Setzungen ergeben sich aus dessen Inhomogenität und Volumenverlusten im

Abfallkörper aufgrund biologischen Abbaus. Grundsätzlich werden Setzungen infolge Primär- und Sekundärkompression bei einer Spannungserhöhung und Setzung nach Volumenverringernach der biologischen Zersetzung organischer Materialien unterschieden.

Berechnungsmethoden zur analytischen Ermittlung von Untergrundverformungen gehen von bodenmechanischen oder rheologischen Prinzipien aus oder sind auf empirischer Basis definiert. Die zeitliche Abhängigkeit des biologischen Abbaus im Abfallkörper kann ebenfalls in diese integriert sein.

Den derzeitigen Kenntnisstand hierzu verallgemeinernd können Setzungsberechnungen zugleich Dehnungen aus Primärkonsolidation  $\varepsilon_{Pri}$ , aus Sekundärkonsolidation  $\varepsilon_{Sek}$  und aus biologischem Abbau  $\varepsilon_{Bio}$  berücksichtigen, vgl. Gleichung (3). Zur Berechnung der Setzungen werden die Dehnungen mit der Mächtigkeit der einzelnen Homogenbereiche  $\Delta H_i$  multipliziert.

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \Delta H_i \cdot (\varepsilon_{Pri} + \varepsilon_{Sek}(t) + \varepsilon_{Bio}(t)) \quad (3)$$

Ausreichende Kenntnisse der Materialeigenschaften vorausgesetzt, können die Primärsetzungen in die elastischen und plastischen Anteile differenziert werden.

Auf der Grundlage punktueller Setzungsberechnungen kann mit geostatistischen Methoden eine räumliche Verteilung der Verformungen für die Fläche der Zwischenabdichtung abgebildet und die Maximaldehnung  $\varepsilon_{vorh}$  als geostatistischer Erwartungswert ermittelt werden. Hierzu ist zunächst ein Zufallsfeld zu den möglichen punktuellen Streuungen zu definieren, das sich an der Inhomogenität und der räumlichen Streuung von Extremwerten orientieren sollte. Auch wenn dabei viele Annahmen zu Grunde liegen, ergibt diese Methode einen Hinweis über das sinnvolle Maß der Überhöhung. Modellrechnungen mit dieser Methode zeigen, dass sich aufgrund der räumlichen Mittelwertbildung trotz Inhomogenität relativ gleichmäßige Setzungen ergeben.

### 4.3 Numerische Verformungsberechnung

Die Anwendung numerischer Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an Zwischenabdichtungen setzt ausreichende Kenntnisse bodenmechanischer Materialmodelle voraus. Zugleich wird eine vergleichsweise detaillierte Berücksichtigung der geometrischen Variabilität von Untergrund, Zwischenabdichtung und Deponiekörper ermöglicht. Mit den Verfahren ist insbesondere eine differenzierte Ermittlung der durch Laststeigerung verursachten Verformungsanteile möglich. Die durch biologischen Abbau bedingte Verformung lässt sich mit bodenmechanischen Materialmodellen nicht berücksichtigen, kann aber mit Änderungen der Steifigkeit nachvollzogen werden.

Vor dem Hintergrund der deutlich unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Materialmodelle hinsichtlich der Abbildung der an Zwischenabdichtungen auftretenden Verformungen ist die Wahl des zur Verformungsprognose geeigneten Modells an die für den Deponiestandort geplanten Laständerungen geknüpft. Laststeigerungen sind an die vorgesehene finale Einbaukubatur und die Zwischenzustände der Verfüllung geknüpft. Entlastungssituationen sind selten vorgesehen. Die Anwendung von Verfestigung berücksichtigenden Materialmodellen ist möglich. Im Vergleich zu „einfachen“ Materialmodellen erfordern diese detaillierte Informationen der bodenmechanischen Eigenschaften der Materialien und eine Parameterermittlung im Labor. Eine Anwendung allein auf der Grundlage von Erfahrungswerten führt nur scheinbar zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit der erhaltenen Prognose.

Der Einsatz eines Geländeschnittes zur Darstellung eines räumlichen Problems ist immer mit der Definition eines Worst-Case-Szenarios verbunden. Für die Verformungsbetrachtung von Zwischenabdichtungen, muss der Geländeschnitt die größte Mächtigkeit des unterlagernden Abfalles und zugleich die größte vorgesehene Überlagerung der Zwischenabdichtung abbilden. Im Ergebnis der Betrachtung wird die tatsächlich eintretende Verformung der Abdichtungskomponente überschätzt.

Sowohl für den Nachweis der Ableitfunktion als auch der Dichtungsfunktion sind letztendlich nicht die insgesamt eintretenden Setzungen sondern die lokalen Setzungsdifferenzen sowie die hieraus resultierenden Dehnungen der Abdichtungskomponente entscheidend. Insbesondere Bereiche mit einer veränderlichen Mächtigkeit des die Zwischenabdichtung unterlagernden Abfalls oder Böschungen der geplanten Endkubatur sind hiervon betroffen.

## 5 Nachweis der Rissfreiheit für mineralische Abdichtungskomponenten

Ein quantitativer Nachweis der Rissfreiheit mineralischer Abdichtungskomponenten ist außerordentlich komplex, vgl. EDELMANN (1998). Als Materialgröße wird die Zugfestigkeit des mineralischen Abdichtungsmaterials benötigt. Diese ist stark vom Wassergehalt bzw. dem Sättigungsgrad des Bodens abhängig. Der Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dehnung und der effektiven Spannung in der mineralischen Abdichtungskomponente lässt sich aus der bodenphysikalischen Größe oder aus der repräsentativen Zugspannungs-Dehnungs-Kurve des Materials ermitteln.

Der Nachweis der Rissfreiheit kann als eine lokale Spannungsbilanz an der Zwischenabdichtung ausgeführt werden. Hierbei werden die durch Zwangsverformung aufgeprägte Zugspannung  $\sigma_{t,a}$ , der aus der Auflastspannung resultierende Ruhedruck  $\sigma_0$  und die Zugfestigkeit des mineralischen Abdichtungsmaterials  $\sigma_{t,u}$  gegenübergestellt, vgl. Gleichung (4):

$$\sigma_0 - \sigma_{t,a} \geq \sigma_{t,u} \quad (4)$$

Weitere Zugspannungsanteile aus einer Wassergehaltsminderung, i. e. Schrumpfen, können ebenfalls berücksichtigt werden. Die Wasserspannung ist dagegen bereits in der Zugfestigkeit enthalten.

## 6 Zusammenfassung

Die Tragfähigkeit von Zwischenabdichtungen in Abfalldeponien wird durch die Grenzzustände eines Gleitens in potentiellen Gleitflächen des Abdichtungssystems, eines Böschungs- und Geländebruches durch den Abfallkörper und die Abdichtung und durch die Spreizsicherheit bestimmt. In den Komponenten des Abdichtungssystems dürfen keine unverträglichen Schub- und Zugspannungen auftreten. Die mechanischen Einwirkungen aus zu erwartenden Zwangsverformungen des Abdichtungssystems müssen einzelfallbezogen ermittelt werden.

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird die dauerhafte Funktionsfähigkeit der Zwischenabdichtung untersucht, im Wesentlichen das Gefälle der Drainage und die Dichtigkeit der Abdichtungskomponente. Beide werden durch die am Abdichtungssystem auftretenden Verformungen des unterlagernden Abfalls infolge Überlagerungsdruck und Zersetzung bestimmt. Zur Prognose der Verformungen ist die Anwendung analytischer Verfahren etabliert, welche das bodenmechanische Verhalten der Materialien sowie einen biologischen Abbau berücksichtigen. Die Anwendung numerischer

Verfahren ermöglicht zusätzlich eine differenzierte Betrachtung der Standortbedingungen und die Anwendung höherwertiger Materialmodelle.

Für den Nachweis der Rissfreiheit mineralischer Abdichtungskomponenten können die prognostizierten Dehnungen den empirisch festgelegten oder experimentell ermittelten verträglichen Dehnungen gegenübergestellt werden. Alternativ ist ein Spannungsnachweis möglich, wenn die Zugfestigkeit der Komponenten bekannt ist.

Ein Nachweis der dauerhaften Funktion einer Zwischenabdichtung enthält vergleichsweise hohe Unschärfen, denen mit robuster Bauweise und hohen Sicherheitszuschlägen begegnet werden muss. Die Unschärfen resultieren zum einen aus der Unkenntnis des Zustandes und der Zusammensetzung der Altdeponie, zum anderen aus Annahmen zur künftigen Überlagerung. Neben der Geometrie und dem Aufbau der Altdeponie haben die Art des künftigen Abfalls und das Verfüllregime der Erweiterung einen starken Einfluss. Bei dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Zwischenabdichtungen ist daher nicht nur der Endzustand der Verfüllung zu berücksichtigen. Die Abfolge der Ablagerung auf der Fläche und damit die Belastung der Zwischenabdichtung haben qualitativ und quantitativ einen wesentlichen Einfluss auf deren finales Verformungsbild.

## Literaturverzeichnis

BPEM. (2015). *Publication 788.3\*: Siting, design, operation and rehabilitation of landfills*. Environment Protection Authority Victoria (Australia).

BQS. (2014). *Bundeseinheitliche Qualitätsstandards für Mineralische Abdichtungskomponenten*. LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“.

BRAUNS, J. (1980). *Spreizsicherheit von Böschungen auf geneigtem Gelände*. Bauingenieur, Vol. 55, 433 - 436.

DEPV. (2009). *Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager* Berlin, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.

EBGEO. (2010). *EBGEO - Empfehlungen für Bewehrungen aus Kunststoffen*. Berlin, Ernst & Sohn - Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH.

EDELMANN, L. (1998). *Beitrag zum Grenzverformungsverhalten und zur Gebrauchstauglichkeit horizontaler mineralischer Deponiebarrieren*. Dissertation. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.

GDA. (2017). *GDA-Empfehlungen*. [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, Fachsektion 6 Umweltgeotechnik, AK 6.1 - Geotechnik der Deponiebauwerke.

KÖDITZ, J., WUDTKE, R.-B. & WITT, K. J. (2016). *Gegenüberstellung direkter und indirekter Versuchsmethoden zur Bestimmung der Zugfestigkeit bindiger Böden*. Geotechnik, Vol. 39 (4), 225-234.

LAGATTA, M. D. (1992). *Hydraulic conductivity tests on geosynthetic clay liners subjected to differential settlement*. Landfill and Surface Impoundment Performance Evaluation Manual, U.S. EPA SW-869, University of Texas.



- PEGGS, I. D., SCHMUCKER, B. & CAREY, P. (2005). Assessment of Maximum Allowable Strains In Polyethylene and Polypropylene Geomembranes. Geo-Frontiers 2005: Waste Containment and Remediation, Austin/Texas (United States), 24.-26. Januar 2005.
- QIAN, X., KOERNER, R. M. & GRAY, D. H. (2001). Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. 1. Auflage. Prentice Hall Inc.
- RCRA. (2011). Subtitle D: Non-hazardous Solid Wastes. Resource Conservation and Recovery Act, Vol., EPA - United States Environmental Protection Agency.
- SCHERBECK, R. & JESSBERGER, H. L. (1992). Zur Bewertung der Verformbarkeit mineralischer Abdichtungsschichten. Bautechnik, Vol. 69 (9), 497 - 506.
- TANO, F., OLIVIER, F., TOUZE-FOLTZ, N. & DIAS, D. (2015). State-Of-The-Art of Piggy-Back Landfills Worldwide: Comparison of Containment Barrier Technical Designs and Performance Analysis In Terms of Geosynthetic Stability. Geosynthetics 2015, Portland (USA), 15.-18.02.2015, 1210-1220.
- WITT, K. J. (1997). GDA-Empfehlung E2-21: Spreizsicherheitsnachweis und Verformungsabschätzung für die Deponiebasis.
- WITT, K. J. (2010). GDA-Empfehlung E2-13: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten.
- WITT, K. J. & WERTH, K. (2015). GDA-Empfehlung E2-7: Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen.
- WUDTKE, R.-B., WERTH, K. & WITT, K. J. (2008). Standortsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. Bautechnik, Vol. 85 (9), 596 - 602.