

# Nachweis der Beständigkeit von Zwischenabdichtungen in Abfalldeponien

Dr.-Ing. R.-B. Wudtke, Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt  
Bauhaus-Universität Weimar

*Zwischenabdichtungen zur Trennung von Deponieabschnitten sind ein wesentliches Konstruktionselement bei der Erhöhung und Erweiterung bestehender Deponien. Sie müssen die Funktionen der Basisabdichtung für die Erweiterung der Deponie garantieren, lagern jedoch auf dem i. A. sehr inhomogenen und setzungsempfindlichen Abfallkörper auf. Altdeponien sind i. d. R. durch verformungsempfindliches Material gekennzeichnet, das aufgrund der Inhomogenität des Abfallkörpers räumlich eine große Variabilität der Steifigkeit aufweist. Im Vergleich zu Basisabdichtungen auf gewachsenem Baugrund sind bei der Bemessung von Zwischenabdichtungen vor allem Aspekte der Verformung und Verformbarkeit relevant.*

*Im Beitrag werden die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit einer Zwischenabdichtung zusammengestellt und erläutert. Die dauerhafte Funktion des Abdichtungssystems wird wesentlich durch die Gebrauchstauglichkeit bestimmt. Der Kern des Nachweises einer dauerhaften Funktion zielt zum einen auf die Prognose der im Lebenszyklus auftretenden Verformungen, zum anderen auf die Grenzen der Verformbarkeit der Abdichtungskomponenten. Hierzu existieren analytische und numerische Berechnungsverfahren, welche das Verformungsverhalten sowie zusätzlich einen biologischen Abbau im unterlagernden Deponiekörper berücksichtigen. Die Bedingungen einer verformungsbedingten Rissinitiation in mineralischen Komponenten lassen sich derzeit nur durch experimentelle Untersuchungen abschätzen.*

## 1 Einleitung

Eine Zwischenabdichtung in Abfalldeponien ist eine Spezialform eines Basisabdichtungssystems, das zwischen zwei Abschnitten eines Deponiekörpers angeordnet ist. Ihre wesentliche Funktion besteht in der Fassung und Ableitung von in dem überlagernden Deponiekörper anfallendem Sickerwasser und im Schutz des Untergrundes vor Infiltration. Besondere Anforderungen an Zwischenabdichtungen ergeben sich daraus, dass der Baugrund solcher Abdichtungen aus deponierten Abfällen besteht. Hierbei handelt es sich i. d. R. um inhomogen zusammengesetzte Materialien geringer Tragfähigkeit, wechselnder Lagerungsdichte, großer Verformbarkeit und zeitlicher Veränderlichkeit.

Zu Regelwerken, welche sich mit den Anforderungen an und Bauweisen von Abdichtungssystemen beschäftigen zählen die Deponieverordnung [1], die GDA-Empfehlungen [2] und die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards für Mineralische Abdichtungskomponenten [3] in Deutschland, die Regelungen des „Comité Français Géosynthétique“ CFG in Frankreich, die Regelungen zu ungefährlichem Abfall des „Resource Conservation and Recovery Act“ [4] in den USA sowie der „Best Practice Environmental Management“ [5] in Australien.

Oft wird die Erweiterung eines Deponiestandorts oder das Überbauen einer bestehenden Abfallablagerung auf Grund von ökonomischen Vorteilen und einer besseren Akzeptanz in der Bevölkerung gegenüber einer neuen Standortsuche und -entwicklung als vorteilhaft bewertet. Der Teilabschluss einer Deponie kann mit dem Bau einer dann erforderlichen Zwischenabdichtung kombiniert werden. Obwohl die Anwendung von Zwischenabdichtungen als Erweiterung von bestehenden Deponien zunächst als ideal erscheint, führen die ungünstigen Verformungseigenschaften einer Altdeponie sowie ein ggf. nicht abgeschlossener biologischer Abbau zu Vorbehalten gegenüber dieser Lösung. Um die aus den genannten Einflüssen resultierenden Gefährdungen für eine dauerhafte Funktion des Abdichtungssystems zu beherrschen, muss eine Zwischenabdichtung über eine hinreichende Robustheit verfügen.

Im Zusammenhang mit einer Vergrößerung der Aufnahmekapazität von Abfalldeponien kommen Zwischenabdichtungen bei vertikalen und horizontalen Erweiterungen sowie bei Zwischenformen zum Einsatz (Bild 1-1). Die Entscheidung über die anzuwendende Art der Erweiterung wird im Wesentlichen durch die räumlichen Verhältnisse und die Topographie des Deponiestandortes bestimmt.

In Zwischenabdichtungen kommen als Abdichtungskomponenten mineralische Abdichtungsschichten aus Ton, Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) sowie Bentonitmatten zum Einsatz. Sowohl mineralische Abdichtungsschichten als auch eine KDB werden bei allen Abdichtungssystemen als alleinige Abdichtungskomponente eingesetzt. Bentonitmatten werden als alleinige Abdichtungskomponente vor allem beim Abschluss und der Verwahrung von Deponien verwendet. In Kombinationsabdichtungen ist der Einsatz aller Abdichtungskomponenten üblich, wobei die KDB i. d. R. die oberste Abdichtungskomponente ist.

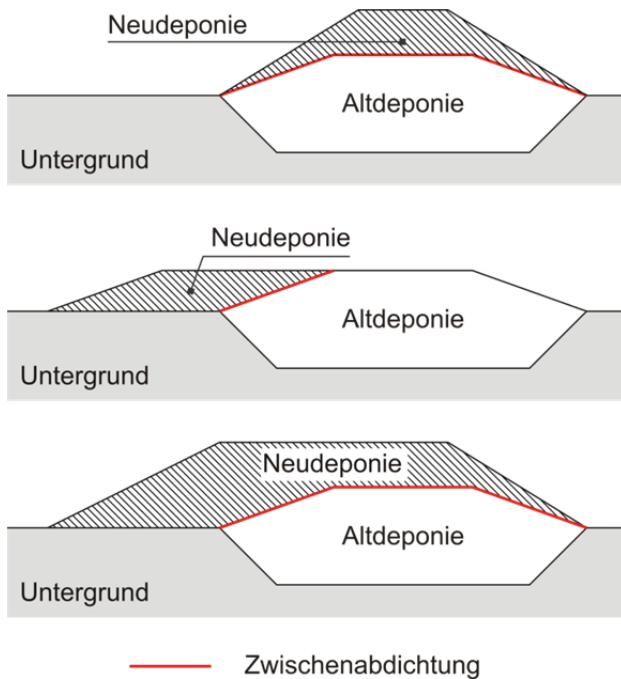


Bild 1-1: Arten der Deponieerweiterung nach [6]

Zum Nachweis der Beständigkeit einer Zwischenabdichtung sind zusätzlich zu den üblichen Standsicherheitsnachweisen Betrachtungen zur Verformung und Dehnung des Abdichtungssystems anzustellen. Hierbei ist zum einen zu prüfen, ob die infolge der Beanspruchungen auftretenden Verformungen und Dehnungen des Abdichtungssystems für die Entwässerung verträglich sind. Zum anderen muss nachgewiesen werden, dass die abdichtenden Komponenten durch die unvermeidlichen Verformungen nicht geschwächt werden.

## 2 Nachweis der Tragfähigkeit

Der Nachweis der Tragfähigkeit einer Zwischenabdichtung unterscheidet sich nicht grundsätzlich von den für Deponiebauwerke zu erbringenden Nachweisen. Die folgenden Grenzzustände sind 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 potentiell im Zusammenhang mit dem Abdichtungssystem auftretenden 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 avisierte Endzustand (BS-P), Bauzustände bei der Erstellung der Abdichtung (BS-P) sowie außergewöhnliche Beanspruchungen (BS-A) zu betrachten.

Die Gleitsicherheit einer geneigten Zwischenabdichtung wird als schichtparalleles Gleiten nach dem Ansatz der infiniten Lamelle im Grenzzustand GEO-3 ermittelt (DIN 4084:2009). Auf der sicheren Seite liegend, wird bei dem Nachweis eine unbegrenzte Böschung betrachtet, was einen homogenen Aufbau der Abdichtung und eine gleichmäßige Belastung voraussetzt. Seitliche Erddrücke wie auch eine Stützung am Fuß werden dabei vernachlässigt. Liegt keine einheitliche Belastung aus der Überlagerung vor oder bei Berücksichtigung zusätzlicher Einwirkungen und Widerstände aus Erddruck oder Stützbauwerken am Böschungsfuß, werden zum Nachweis der Gleitsicherheit Starrkörpermechanismen betrachtet.

Nach GDA-Empfehlung E2-7 [7] ist bei der Tragfähigkeitsbeurteilung 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 der Gesamtstandsicherheit der Einsatz eines Bewehrungselements erforderlich, wird dessen erforderliche Festigkeit unter Berücksichtigung der faktorisierten Bodenwiderstände (GEO-3) ermittelt, vgl. EBGEO [8].

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. Auch hierbei können Starrkörpermechanismen relevant sein, wenn bevorzugte Gleitflächen existieren.

Bei Zwischenabdichtungen unter Böschungen ist die Spreizsicherheit in der Aufstandsfläche nachzuweisen. Hierzu wird der mobilisierbare Sohlrei-

bungswinkel  $\delta_{vorh}$ , der Scherwiderstand der Aufstandsfläche, dem zur Schubkraftübertragung erforderlichen Sohlreibungswinkel  $\delta_{erf}$  gegenübergestellt. Für die an einer Zwischenabdichtung auftretenden Zustände ist nach GDA-Empfehlung E2-21 [9] der Ansatz nach BRAUNS [10] geeignet, wobei bei kohäsivem Abfall eine Gesamtscherfestigkeit des Deponekörpers angesetzt wird.

### 3 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

#### 3.1 Grundlage

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 ihre Entwässerungsfunktion und Abdichtungsfunktion. Die Gebrauchstauglichkeit von Zwischenabdichtungen wird damit anhand der langfristig auftretenden Verformungen und Verzerrungen bewertet.

Eine eingeschränkte Nutzung der Zwischenabdichtung hinsichtlich ihrer Entwässerungsfunktion kann durch ungleichmäßige Setzungen des Baugrundes verursacht werden. In der Folge wird die zur Entwässerung erforderliche Mindestneigung  $i_{erf}$  der Abdichtung unterschritten, vgl. Gleichung (1).

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

Die in Längs- und Querrichtung dauerhaft erforderliche Mindestneigung der Zwischenabdichtung (1,5 % bzw. 3 %) muss durch eine aus der Verformungsprognose abgeleiteten Überhöhung sichergestellt werden. Der Sicherheitszuschlag orientiert sich an der Unschärfe der Prognose.

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 Abdichtungsfunktion kann durch eine Gegenüberstellung der prognostizierten Dehnungen  $\varepsilon_{vorh}$  und der materialspezifischen Grenzdehnung  $\varepsilon_{zul}$  nach Gleichung (2) geführt werden.

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

Die Grundlage des Verformungsnachweises ist damit die Prognose künftiger Dehnungen, die sich aus auflastbedingter Biegung und aus Längenände-

rungen, eventuell auch aus Schrumpfen ergeben. Die Verträglichkeit dieser Zwangsdehnungen wird für polymere Abdichtungskomponenten anhand der Grenzdehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit beurteilt. Für mineralische Komponenten kann die Zugfestigkeit nur experimentell ermittelt werden. Einflussfaktoren sind Wassergehalt, Verdichtungsgrad und vor allem die Versuchsmethode [11]. Sicherheitsabschläge ergeben sich aus den experimentellen Unsicherheiten und aus den Unschärfen des mechanischen Modells.

Nach GDA-Empfehlung E2-13 [12] 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 [13] Scherzonen mit geschlossenen Scherfugen hierbei kaum zu einer veränderten Abdichtungsfunktion führen, ist mit dem Entstehen von Zugrissen immer ein Verlust der Abdichtungsfunktion verbunden. Die an einer Zwischenabdichtung zumindest langfristige Auflast wirkt der Entstehung von Zugrissen entgegen.

Wird eine KDB als Abdichtungskomponente verwendet ist die Abdichtungsfunktion direkt an die 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. Je nach Material sind Werte von  $\varepsilon_{zul}$  zwischen 4 % (strukturierte KDB HD-PE) und 15 % (PP) möglich, vgl. [14]. Für die Nachweise sind auch Alterungseffekte und Temperatureinflüsse zu berücksichtigen.

#### 3.2 Analytische Verformungsberechnung

Die an Zwischenabdichtungen auftretenden Verformungen werden durch die Überlagerungsspannung und durch die Verformungseigenschaften des unterlagernden Abfalls bestimmt. Ungleichmäßige Setzungen ergeben sich aus dessen Inhomogenität und biologischer Aktivität, die wiederum an den Effekt der Zwischenabdichtung gekoppelt ist. Grundsätzlich werden Setzungen infolge Primär- und Sekundärkompression bei Spannungserhöhung sowie infolge Volumenverringerng durch organischen Abbau 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.

Die Ermittlung von Setzungen in Abfallkörpern unter dem Einfluss der genannten Effekte ist regelmäßig wiederkehrend Thema wissenschaftlicher Betrachtungen. Den derzeitigen Kenntnisstand hierzu verallgemeinernd können Setzungsberechnungen zugleich Dehnungen aus Primärkonsolidation  $\varepsilon_{Pri}$ , aus Sekundärkonsolidation  $\varepsilon_{Sek}$  und aus biologischem Abbau  $\varepsilon_{Bio}$  berücksichtigen. 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 Grundlage von punktuellen Setzungsberechnungen lässt sich mit geostatistischen Methoden eine räumliche Verteilung für die Fläche der Zwischenabdichtung abbilden und daraus die Maximaldehnung  $\varepsilon_{vorh}$  ermitteln.

### 3.3 Numerische Verformungsberechnung

Der Einsatz numerischer Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an Zwischenabdichtungen setzt die Anwendung bodenmechanischer Materialmodelle voraus und ermöglicht eine vergleichsweise detaillierte Berücksichtigung der geometrischen Variabilität des Untergrundes. Insbesondere die bodenmechanisch bedingten, durch Laststeigerung verursachten Verformungsanteile können differenziert ermittelt werden. Die durch biologischen Abbau bedingte Verformung lässt sich mit bodenmechanischen Materialmodellen nicht berücksichtigen, kann aber über Änderungen der Steifigkeit modelliert werden.

Vor dem Hintergrund der deutlich unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Materialmodelle zur Abbildung von an Zwischenabdichtungen auftretenden Verformungen ist die Wahl des zur Verformungsprognose geeigneten Modells an die für den Depo-niestandort geplanten Laständerungen geknüpft. Eine Laststeigerung ist durch die geplante finale Einbaukubatur sowie durch Zwischenzustände der Verfüllung bedingt. Entlastungssituationen sind eher

selten. Daher ist die Anwendung von Verfestigung berücksichtigenden Materialmodellen möglich. Im Vergleich zu „einfachen“ Materialmodellen erfordern diese genaue Kenntnis der Eigenschaften der betroffenen Materialien und zusätzlich die Ermittlung bodenmechanischer Parameter im Labor. Eine Anwendung allein auf der Grundlage von Erfahrungswerten führt hier 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. Hinsichtlich einer Verformungsbetrachtung an Zwischenabdichtungen, muss der Geländeschnitt die größte Mächtigkeit des unterlagernden Abfalles und zugleich die größte geplanten Überlagerung der Zwischenabdichtung repräsentieren. Im Ergebnis der Betrachtung wird die tatsächlich eintretende Verformung der Abdichtungskomponente überschätzt.

Sowohl für den Nachweis der Entwässerungsfunktion als auch der Abdichtungsfunktion sind letztendlich nicht die insgesamt eintretenden Setzungen sondern nur die temporären und bleibenden lokalen Setzungsdifferenzen mit den hieraus resultierenden Dehnungen entscheidend. Böschungen der Überlagerung und unterschiedliche Mächtigkeiten des unterlagernden Abfalls sind erfahrungsgemäß die empfindlichsten Bereiche.

### 3.4 Nachweis der Rissfreiheit

Ein quantitativer Nachweis der Rissfreiheit mineralischer Abdichtungskomponenten ist außerordentlich komplex, vgl. [15]. Als Materialgröße wird die Zugfestigkeit des mineralischen Abdichtungsmaterials benötigt, die jedoch stark vom Wassergehalt bzw. vom Sättigungsgrad abhängt. Aus dieser bodenphysikalischen Größe oder direkt aus der repräsentativen Zugspannungs-Dehnungs-Kurve lässt sich der Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dehnung und der effektiven Spannung in der mineralischen Abdichtungskomponente berechnen.

Als Nachweis der Beständigkeit können die durch die Zwangsverformung aufgeprägte Zugspannung  $\sigma_{t,a}$ , der aus der Auflastspannung resultierende Ruhedruck  $\sigma_0$  und die Zugfestigkeit des mineralischen Abdichtungsmaterials  $\sigma_{t,u}$  bilanziert werden:

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

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

## 4 Zusammenfassung

Die Tragfähigkeit (ULS) 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 sowie durch die Spreizsicherheit bestimmt. In den einzelnen 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 Funktion der Zwischenabdichtung analysiert, im Wesentlichen das Gefälle der Drainage und die Dichtigkeit. Beides wird 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 eigentlichen Nachweis der Beständigkeit 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 Kenntnis der Geometrie und des Aufbaus der Altdeponie haben die Art des künftigen Abfalls und das Verfüllregime der Erweiterung einen starken Einfluss auf die dauerhafte Funktion einer Zwischenabdichtung.

## Literaturverzeichnis

- [1] DepV: *Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager*, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2009
- [2] GDA: *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 2017,
- [3] BQS: *Bundeseinheitliche Qualitätsstandards für Mineralische Abdichtungskomponenten*, LAGA Ad-hoc-A1G „Deponietechnik“, 2014
- [4] RCRA: Subtitle D: *Non-hazardous Solid Wastes*, Resource Conservation and Recovery Act. EPA - United States Environmental Protection Agency, 2011
- [5] BPEM: Publication 788.3\*: *Siting, design, operation and rehabilitation of landfills*, Environment Protection Authority Victoria (Australia), 2015
- [6] Tano, F., Olivier, F., Touze-Foltz, N., Dias, D.: *State-Of-The-Art of Piggy-Back Landfills Worldwide: Comparison of Containment Barrier Technical Designs and Performance Analysis In Terms of Geosynthetics Stability*, Geosynthetics 2015, Portland (USA), 15.-18.02.2015, S. 1210 - 1220
- [7] Witt, K. J., Werth, K.: *GDA-Empfehlung E2-7: Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen*, 2015
- [8] EBGEO: *EBGEO - Empfehlungen für Bewehrungen aus Kunststoffen*, Berlin: Ernst & Sohn - Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2010
- [9] Witt, K. J.: *GDA-Empfehlung E2-21: Spreizsicherheitsnachweis und Verformungsabschätzung für die Deponiebasis*, 1997
- [10] Brauns, J.: *Spreizsicherheit von Böschungen auf geneigtem Gelände*, Bauingenieur 55, 1980, S. 433 - 436,
- [11] Köditz, J., Wudtke, R.-B., Witt, K. J.: *Gegenüberstellung direkter und indirekter Versuchsmethoden zur Bestimmung der Zugfestigkeit bindiger Böden*, Geotechnik 39, Heft 4 (2016), S. 225-234
- [12] Witt, K. J.: *GDA-Empfehlung E2-13: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten*, 2010
- [13] Scherbeck, R., Jessberger, H. L.: *Zur Bewertung der Verformbarkeit mineralischer Abdichtungsschichten*, Bautechnik 69, Heft 9 (1992), S. 497 - 506
- [14] Peggs, I. D., Schmucker, B., Carey, P.: *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
- [15] Edelmann, L.: *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 1998