

Steil, lang und kurvig - Herausforderungen bei Bemessung und Ausführung von Oberflächenabdichtungen in Böschungen unter Einsatz von Geogittern

Dipl.-Ing. Katja Werth

1 Einleitung

Deponieoberflächenabdichtungen sollen über sehr lange Zeiträume die Infiltration von Niederschlagswasser in den Abfallkörper und den Austritt von Deponiegas aus dem Abfallkörper kontrollieren. Es handelt sich um geschichtete Systeme aus Erdstoffen und Geokunststoffen. Auf steilen Böschungen ist das Schichtsystem permanent auf Schub beansprucht. Mit der Planung des Abdichtungssystems ist die Standsicherheit für den Bauzustand, den Betriebszustand und für die lange Zeit der Nachsorge bzw. Folgenutzung nachzuweisen.

Der Bruchmechanismus "schichtparalleles Gleiten" lässt sich für Abdichtungssysteme mit fundamentaler Bodenmechanik physikalisch beschreiben. In der überarbeiteten GDA-Empfehlung 2 - 7 (2008) wird die Nachweismethode nach dem Teilsicherheitskonzept gemäß aktuellem Normenwerk empfohlen. Der Nachweis wird in Anlehnung an die Gesamtstandsicherheit im Grenzzustand 1C (DIN 1054) geführt. Bei Böschungsneigungen steiler als 20° wird erfahrungsgemäß ein Bewehrungselement zur Aufnahme und Abtragung von Defizitzugkräften erforderlich. Im Beitrag soll auf die Besonderheiten einer solchen Bewehrungsanordnung im Hinblick auf Bemessung des Bewehrungselementes, Dimensionierung der Verankerung und Ausführung mit Absicherung von Bauzuständen am Beispiel der Deponie Duisburg-Sudamin eingegangen werden (Abb. 1).



Abb. 1: Befahrung einer 1:n = 1:2 geneigten Oberflächenabdichtung

2 Oberflächenabdichtung mit Geogittern

2.1 Standsicherheitsnachweis

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Standsicherheit eines Oberflächenabdichtungssystems nach aktuellem Normenwerk ist ausführlich in GDA E2-7 (2008) und Wudtke et al. (2008) beschrieben.

Kernfrage des Nachweises ist weniger die Methode, als vielmehr die Festlegung der effektiven Scherparameter, die über lange Zeiträume in den Kontaktflächen des Systems mobilisiert werden können. Das bedeutet, dass der Nachweis fundamental vom Reibungsverhalten in den Schichtgrenzen und/oder der Böden selbst abhängig ist.

Wird im Nachweis der Standsicherheit für ein geplantes Abdichtungssystem der zulässige Auslastungsgrad $\mu > 1,0$ überschritten, so ist ein Bewehrungselement erforderlich, das die in Fallrichtung wirkenden defizitären Schubspannungen entgegengesetzt an der Böschungskrone abträgt. Die Vorgehensweise zur Bemessung von Geogittern und die Dimensionierung der Lastabtragung in Verankerungsgräben sind in EBGEO (1997) beschrieben. Die Veröffentlichung der vollständig überarbeiteten EBGEO-Fassung ist für 2010 vorgesehen. In Saathoff & Werth (2006) wird auf die Besonderheiten von steil geneigten Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Deponie Furth im Wald eingegangen.

Ob das erforderliche Bewehrungselement bei einer nicht ausreichenden Standsicherheit langfristig eine Defizitzugkraft *erf.* $F_{B,d} = 20 \text{ kN/m}$ oder 200 kN/m abzutragen hat, hängt maßgeblich von der Böschungslänge ab. Je kürzer die Böschung, desto geringer die Summe der Kräfte von Böschungsfuß bis Böschungskrone. Die theoretisch ermittelte Zugkraft je Meter Breite bezieht sich auf die Hauptzugrichtung, d. h. auf die Falllinie der Böschung, so dass in der Praxis einaxiale Geogitter angeordnet werden. Im Bemessungsverfahren stellt demnach die Querszugrichtung eine untergeordnete Rolle dar.

2.2 Nachweis der Bewehrung

Geogitter bestehen aus polymeren Rohstoffen, welche ein elastoplastisches Verhalten aufweisen. Unter Belastung finden nicht nur elastische (Kurzzeit)-Verformungen, sondern auch viskose, zeitabhängige Kriechvorgänge statt. Diese haben bautechnisch relevante Folgen:

- reduzierte Belastbarkeit und/oder
- größere Dehnung der Bewehrung im Vergleich zum Kurzzeitverhalten.

Die Reduzierung der Belastbarkeit kann zum Bruch (Zeitstandbruch) und die Dehnungszunahme (Kriechdehnung) zu unakzeptablen Verformungen des Bauwerkes führen. Bei den Bemessungen dieser Empfehlungen wird der Zeitstandbruch durch die Verwendung eines Abminderungsfaktors A_1 berücksichtigt und die Kriechdehnung durch die Verwendung von Isochronen. Der Zeitstandbruch ist bei Nachweisen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit GZ 1 (DIN 1054), d. h. bei Deponieoberflächenabdichtungen, relevant und die Kriechdehnung bei Nachweisen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 (DIN 1054).

Das Kriechen und die Zeitstandfestigkeit von Geokunststoffen sind nach DIN EN ISO 13431 zu prüfen (siehe auch TL Geok E-StB 2005). Nach DIN EN 13431 sind Belastungszeiten von mindestens einem Jahr (10^4 h) vorgesehen. Aus diesen Untersuchungsergebnissen kann produkt- und materialabhängig auf die Funktionsdauer ≥ 100 Jahre extrapoliert werden. Das Ergebnis der Untersuchung sind Kriech- und Zeitstandbruchkurven. Kriechvorgänge sind abhängig

- vom Polymer (Art des Polymers, Rohstoff)
- von seiner Verarbeitung,
- von der Höhe der Zugbeanspruchung,
- von der Belastungsdauer und
- von der Temperatur.

Für die Bemessung der erforderlichen Zugfestigkeit des Geogitters ist der Nachweis gegen einen Bruch der Bewehrung im Grenzzustand GZ1B (DIN 1054) mit den im Grenzzustand GZ1C (DIN 1054) ermittelten Beanspruchungen *erf. $F_{B,d}$* zu erbringen. Dabei muss der Bemessungswert der Zugfestigkeit des Geogitters $F_{B,d}$ als Materialwiderstand größer oder gleich dem Bemessungswert der ermittelten Beanspruchungen *erf. $F_{B,d}$* sein. Der Bemessungswert des Materialwiderstandes ergibt sich aus der Abminderung der charakteristischen Kurzzeitzugfestigkeit $F_{B,k}$ der Bewehrung mit produktspezifischen Beiwerten zur Berücksichtigung von Einflüssen aus Kriechen, Einbaubeschädigung, Anschlüssen und Umwelteinflüssen sowie durch den Ansatz eines Teilsicherheitsbeiwertes γ_M für den Materialwiderstand. Die Beanspruchung (aus dem Lastfall) ist hierbei bereits mit den Teilsicherheiten entsprechend Grenzzustand GZ1C belegt und muss nicht mit weiteren Teilsicherheiten multipliziert werden. Der Nachweis gegen den Bruch der Bewehrung ergibt sich mit Gleichung (1):

$$F_{B,d} = \frac{F_{B,k}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \leq \text{erf. } F_{B,d} \quad (1)$$

mit:

$F_{B,k}$	charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit des Bewehrungselements
$F_{B,d}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit des Bewehrungselementes
<i>erf. $F_{B,d}$</i>	für einen zulässigen Auslastungsgrad erforderlicher Widerstand als erforderliche Zugfestigkeit aus dem Nachweis im Grenzzustand GZ1C
A_1	produktspezifischer Abminderungsfaktor für die Zeitstandfestigkeit (Kriechen des Polymers)
A_2	produktspezifischer Abminderungsfaktor für die Beschädigungen durch Transport, Einbau und Verdichtung
A_3	produktspezifischer Abminderungsfaktor für die Verarbeitung (Verbindungen, Anschlüsse an Bauteile, etc.)
A_4	produktspezifischer Abminderungsfaktor für Umgebungseinflüsse (Wetterbeständigkeit, Beständigkeit gegen Chemikalien, Mikroorganismen und Tiere)
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für Materialwiderstand; 1,40 (LF1), 1,30 (LF2)

2.3 Nachweis der Verankerung

Der für eine ausreichende Lastabtragung zu dimensionierende Verankerungsgraben oder ein vergleichbares Verankerungskonzept sind unter der Annahme, dass ein Bruch im Boden des Grabens unterstellt wird, im Grenzzustand GZ1C nachzuweisen.

Es ist zum einen der Nachweis gegen Bruch im Verankerungsgraben (Nachweis der ausreichenden Abmessungen gegen Herausziehen des Geogitters) und zusätzlich der Nachweis gegen Bruch der Böschungskrone (Abscheren der Krone durch die an die Böschung angehängte Last) zu erbringen.

Die Grenzzustandsgleichungen mit den Teilsicherheitsbeiwerten für Widerstände in den Scherfestigkeiten sowie die Vorgehensweise für beide Teilnachweise sind ausführlich in Wudtke et al (2008) und EBGEO (1997) beschrieben.

2.4 Konstruktive Besonderheiten – Deponie Duisburg-Sudamin

Eine ausführliche Beschreibung der in 2007/2008 durchgeführten Maßnahme zur Errichtung des Landschaftsbauwerkes auf der MHD-Deponie Duisburg-Sudamin ist in Malakou (2009) und Helmke (2008) aufgeführt. Die unteren Böschungen des quasi pyramidenstumpfförmigen Landschaftsbauwerkes wurden in einer Neigung 1:2 mit maximalen Längen von ca. 40 m ausgeführt. Im gesamten Böschungsbereich wurde eine Gesamtmächtigkeit der dreischichtigen Rekultivierungsschicht mit $d = 1,60$ m aufgebracht.

Im Vorfeld der Ausführung der Oberflächenabdichtung wurde für den in Abb. 2 ausgeführten Dichtungsaufbau eine sorgfältige Analyse des Reibungsverhaltens in allen Schichtgrenzen vorgenommen, um eine sichere Bemessung der Standsicherheit gegen Gleiten durchführen zu können. Die gemäß GDA E3-8 im Scherversuch ermittelten Laborwerte wurden abgemindert (GDA E3-8 (2005) und Blümel & Heinemann (2004)). Auf Grundlage des geringsten charakteristischen Kontaktreibungswinkels $\delta_k = 25,6^\circ$ wurde zum Erreichen des zulässigen Auslastungsgrades eine erforderliche Defizitzugkraft $T_{G,d} = 180$ kN/m ermittelt. Die vom Geogitter langfristig abzutragende Zugkraft (= Bemessungsfestigkeit) beträgt demnach *erf.* $F_{B,d} = 180$ kN/m. Als Geogitter wurde das einaxiale, kriecharme Geogitter Secugrid 400/40 R6 aus kreuzweise gelegten, extrudierten Polyesterflachstäben mit einer hohen Dehnsteifigkeit eingesetzt. Die Auslastung des Geogitters beträgt mit Bezug zur Höchstzugkraft nur 45 %. Die Gegenüberstellung der ermittelten Defizitzugkraft aus dem Endzustand mit den Bauzuständen unter Einsatz einer Befahrung der Oberflächenabdichtung mit einem Pistenbully zum Einbau der Rekultivierungsschicht (Abb. 3), ergab geringere Defizitzugkräfte nach dem Verfahren Saathoff & Werth (2005).

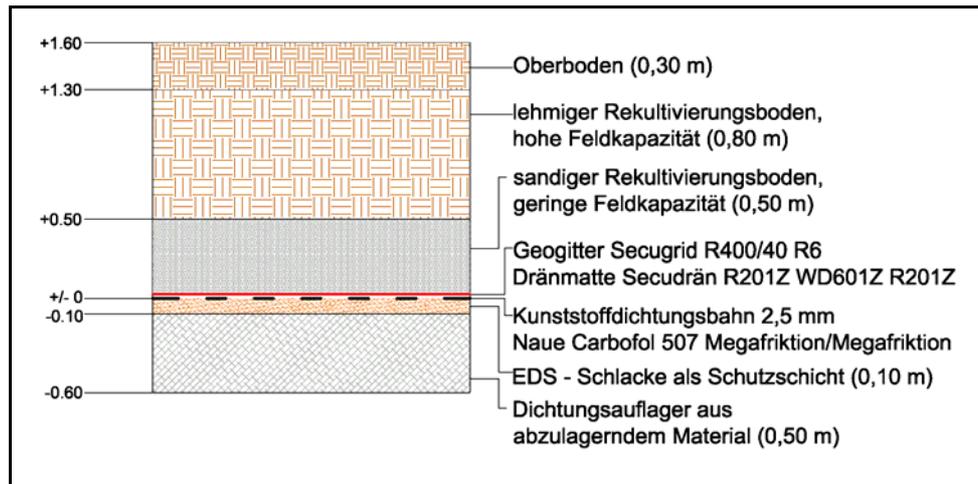


Abb. 2: Oberflächenabdichtung MHD-Deponie Duisburg-Sudamin (Malakou, 2008)



Abb. 3: Einbau des Rekultivierungsbodens mit einem Pistenbully im 1:n = 1:2 geneigten Böschungsbereich (Werth & Witolla (2008))

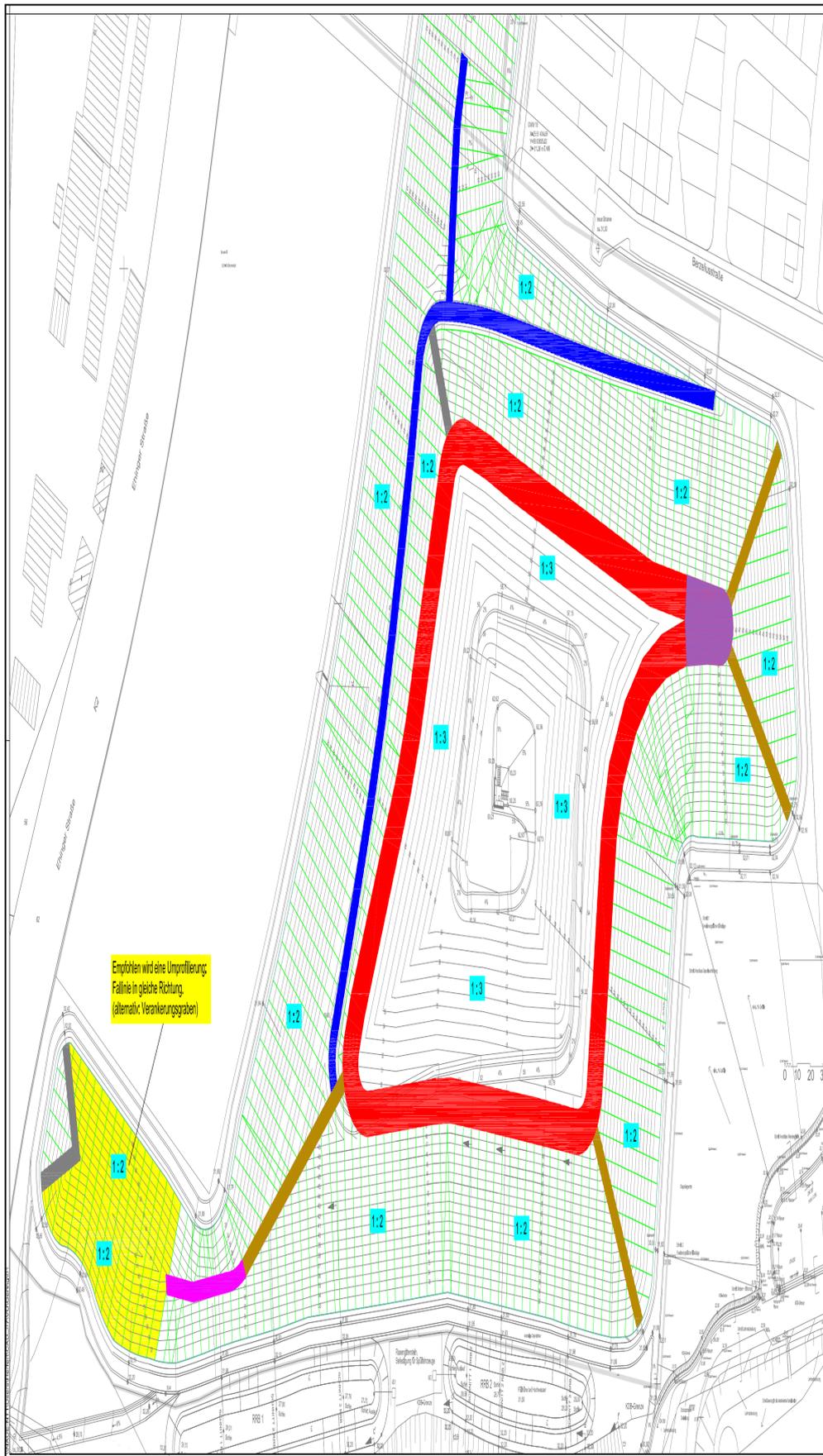


Abb. 4: Verlegeplan für die Geogitterbewehrung (Deponie Duisburg-Sudamin)

Der umgesetzte Bewehrungsplan für das Geogitter Secugrid 400/40 R6 ist in Abb. 4 aufgeführt. Die Herausforderung lag im Verankerungskonzept für das Geogitter u. a. unter Berücksichtigung folgender Aspekte:

1. Einhaltung der Böschungsfalllinie beim Verlegen des Geogitters in den Außen- und Innenkurvenbereichen (siehe Kontur in Abb. 4):
 - Exakte Verlegeplanung zur Reduktion von Geogitterüberlappungen, damit ein optimales Geogitter-Boden-Verbundverhalten beibehalten wird (siehe Abb. 4).
 - Herstellen von Flankengräben in den Kurvenbereichen für eine Lastabtragung aus den Seitenböschungen unter Beibehaltung der Falllinie und ohne Mehrfachüberlappungen der Geogitter (Abb. 5).

2. Ein Durchlegen des Geogitters in der Berme zwischen zwei Böschungsbereichen ist nicht zulässig, ebenso ist ein Durchlegen des Abdichtungssystems durch Verankerungsgräben allgemein nicht erwünscht (für ein optimales Geogitter-Boden-Verbund-System nach Abb. 6 und Vernachlässigung einer Grabenentwässerung). Bei der Herstellung der Verankerungsgräben im Bermenbereich ist eine Anschlussmöglichkeit zwischen der oberen Böschungsabdichtung mit der unterhalb angeordneten Böschungsabdichtung zu schaffen (Abb. 6, unten):
 - Im Nachweis ist der Bauzustand mit verfülltem, aber nicht überschüttetem Verankerungsgraben bei Befahrung und Einbau von Boden im belasteten Böschungsbereich abzusichern.



Abb. 5: Ausbildung eines Flankengrabens zur Verankerung des Geogitters im Kurvenbereich



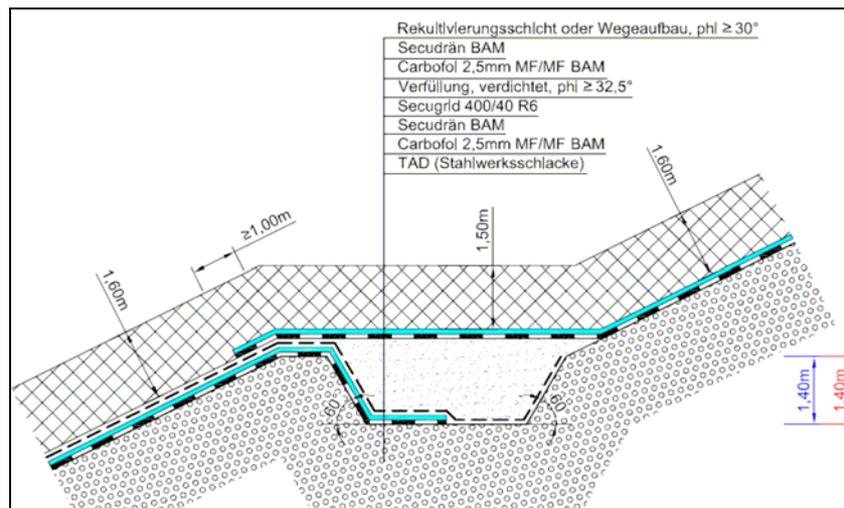


Abb. 6: Ausbildung der Geogitter-Verankerung im Bermenbereich ohne Durchlegen der Abdichtung (oben) und Detail zum Anschluss der Abdichtungen aus oberer und unterer Böschung (unten)

Erstmalig wurde ein Monitoring-System für die Bewehrung unter Einsatz von Dehnungsmesstreifen in einer Oberflächenabdichtung eingerichtet. Dabei wurden zum einen Geogitter zur möglichen späteren Probennahme angeordnet als auch Dehnmesstreifen in ausgewählten Bereichen auf die Polyesterflachstäbe in Hauptzugrichtung aufgebracht (Abb. 7). Die Messungen werden regelmäßig ausgewertet und die Ergebnisse geben Rückschlüsse auf das Zugkraftverhalten im eingebauten Zustand.



Abb. 7: Einrichten des Geogitter-Monitorings auf der Deponie Duisburg-Sudamin (NAUE GmbH & Co. KG)

2.5 Zusammenfassende Anforderungen/Verankerungskonzept

- Stöße der Geogitter in Hauptzugrichtung, z. B. an der Böschung, sollten ausgeschlossen werden. Ein vor Baubeginn an die vorhandene Geometrie angepasster Verlegeplan für die Geokunststoffbewehrung offenbart frühzeitig Zwangspunkte in der Ausführung (Kurven, Mehrfachüberlappungen, etc.).
- Mehrfachüberlappungen sind in Kurvenbereichen zu vermeiden. Unter Berücksichtigung des Reibungsverhaltens sind Verzahnungsschichten zwischen ggf. erforderlichen Überlappungen zu empfehlen.
- Wird anstatt eines Verankerungsgrabens eine horizontale Lastabtragung unter Auflast vorgesehen, kann der Nachweis gegen Bruch der Böschungskrone vernachlässigt werden. Üblicherweise ergeben sich bei dieser Variante der Verankerung verhältnismäßig große Verankerungslängen im Gegensatz zur Abmessung einer Grabenbreite, da häufig nur locker eingebaute Rekultivierungsschichten zur Berechnung der wirksamen Auflastspannung herangezogen werden können. Im Nachweis gegen Bruch im Verankerungsgraben sollte der tatsächlich vorgesehene Lagerungszustand der Deckschichten berücksichtigt werden.
- Bei Einbindegräben ist statisch zu unterscheiden, ob das Dichtungssystem mit dem Geogitter im Einbindegraben durchgelegt wird oder eine Trennung der Dichtungssysteme mit separatem Anschluss oberhalb des Grabens ausgeführt wird. Wenn das Dichtungssystem durchgelegt wird, sollte eine Ableitung von Stauwasser im Graben vorgesehen werden. Bei beiden Varianten zur Lastabtragung sollte zur Berechnung der mobilisierbaren Reibungskraft im Geogitter das Reibungsverhalten des Gesamtaufbaus herangezogen werden.
- Die Bewehrung wird zur Abtragung von Defizitzugkräften und Vermeidung von unzulässigen Dehnungen und Zwangsbeanspruchungen im Dichtungssystem angeordnet. Sie mindert damit die destabilisierenden Gewichtskräfte im Abdichtungssystem ab. Die innere Scherfestigkeit der Deckschichten selbst wird dadurch jedoch nicht erhöht. Nachweislich kann über Verzahnungseffekte an der Grenzfläche Geogitter / Boden eine Festigkeitszunahme angenommen werden. Für die gesamte Deckschichtdicke – insbesondere für den oberflächennahen Bereich ist aber kein Einfluss des Bewehrungselementes zu erwarten, so dass eine ausreichende innere Standsicherheit und besonders Erosionssicherheit gegeben sein muss. Erosionserscheinungen infolge von Starkregenereignissen

an noch nicht begrünten steilen Oberflächenabdichtungen lassen sich durch geeignete Erosionsschutzmaßnahmen verhindern. Weitere Hinweise zur Erosionsanfälligkeit von Rekultivierungsschichten sind in Witt & Johannsen (2009) aufgeführt. Zur Vermeidung von Erosionsrinnen sollten zusätzliche Oberflächenerosionsschutzmaßnahmen (z. B. Erosionsschutzmatten) zur Beschleunigung des Bewuchses und Verringerung der Fließgeschwindigkeiten bei Starkregenereignissen vorgesehen werden.

- Der Einbau der Rekultivierungsschichten mit einem Langarmbagger ist bei Böschungslängen ab ca. 25 m bis 30 m im Hinblick auf die Verdichtungsintensität der Rekultivierungsschicht nicht optimal durchzuführen. Bei steilen und langen Böschungen ist der Einsatz eines Pistenbullys zum empfehlen. Bei Oberflächenabdichtungen ohne Bewehrung sollte die Befahrung mit Planiertraupen von unten nach oben erfolgen. Bei Ansatz einer Bewehrung sollte der Einbau der Deckschichten von oben nach unten erfolgen, damit eine straffe Planlage des Geogitters erreicht wird.

3 Schlussfolgerung

Geogitter in Deponieoberflächenabdichtungen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie nicht automatisch Bestandteil des Schutzsystems gegen Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper darstellen, sondern oberhalb der Abdichtungsschichten als statisch erforderliches Bauteil zur Aufrechterhaltung der Standsicherheit integriert werden. Die Bemessung hat so zu erfolgen, dass keine Relativbewegungen und damit Zugbeanspruchungen in die Dichtungs- und Dränschichten eingetragen werden. Die Geogitter sollten daher eine kriecharme, robuste Struktur mit ausgeprägt gutem Kraft-Dehnungsverhalten aufweisen. Hierfür sind ausführliche Nachweise vorzulegen. Eine genaue Verlegeplanung der Bewehrungsanordnung ist generell zu empfehlen. Der Verlegeplanung muss ein Verankerungskonzept auf Basis statischer Nachweise für alle zu betrachtenden Bereiche und Bauphasen vorausgehen.

Letztendlich tragen aber vor allem die Qualität der Ausführung und der fachgerechte Umgang mit den Geokunststoffen unter Berücksichtigung dimensionierter Vorgaben für Vorbereitung, Einbau, Verlegeplanung, Überlappung, Stöße, Überschüttung, etc. maßgeblich zu einer sicheren Standsicherheit des Oberflächendichtungssystems für lange Funktionsdauern unter schwierigen geometrischen Randbedingungen bei.

4 Literatur

Regelwerke

- [1] DIN 4084: Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Abschnitt 11.4, 7/1981
- [2] EBGEO (1997): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [3] DIN 1054: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 01/2005.
- [4] DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 11/2004.
- [5] DIN 4084: Baugrund - Geländebruchberechnungen. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 11/2002
- [6] DIN EN ISO 13431: 1999-11 Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens
- [7] TL Geok E Stb-05: Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues, FGSV, 2005
- [8] Witt, K. J., Ramke, H.-G.: Empfehlungen E3-8 "Reibungsverhalten von Geokunststoffen". Arbeitskreis 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Bautechnik 82, Heft 9 (2005)
- [9] Witt, K. J., Ramke, H.-G.: Empfehlungen E2-7 "Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen". Arbeitskreis 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Bautechnik 85, Heft 9 (2008)

Veröffentlichungen

- [10] Blümel, W., Heinemann, M. (2004): Zur Berücksichtigung von Adhäsion in Standsicherheitsnachweisen für geneigte Oberflächenabdichtungen mit Geokunststoffen. Tagungsband zur 20. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 2004.
- [11] Malakou, E. (2009): Endgültiger Abschluss der MHD-Deponie Duisburg-Sudamin. Vortrag und Tagungsband. 6. NAUE Geokunststoffkolloquium, Bad Wildungen, 2009
- [12] Saathoff, F., Werth, K. (2005): Standsicherheitsnachweise für Oberflächenabdichtungssysteme – Anmerkungen zum Lastfall Einbau geschichteter Systeme mit Geokunststoffen. Tagungsband zur 21. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 2005

- [13] Werth, K.; Witolla, C. (2008): Standsicherheit von Oberflächendichtungssystemen – geotechnische und hydraulische Interaktion von Rekultivierungsschicht und geosynthetischen Drän- und Filterschichten – Bemessung, Ausführung und Qualitätssicherung. Tagungsband zur 24. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 2008
- [14] Witt, K.-J.; Johannsen, R. (2009): Geotechnische und Ingenieurbio-logische Maßnahmen von Rekultivierungsböden. Tagungsband. 5. Leipziger Deponiefachtagung, 17./18. Februar 2009