

Sonderlösungen für die Verankerung von Dichtungssystemen auf Böschungen

Dipl.-Ing. Ole Syllwasschy,
Dr.-Ing. Janusz Sobolewski

Abdichtungssysteme sowohl mit mineralischen als auch geosynthetischen Komponenten können im Regelfall auf Böschungen bis Neigungen im Bereich von 1:3 problemlos verlegt werden. Bei steileren Böschungen muss das mögliche Versagensbild des hangparallelen Gleitens untersucht werden und ggf. eine Antigleibewehrung dimensioniert werden. Die Bemessung der erforderlichen Zugfestigkeit wird nur kurz erläutert, der Schwerpunkt dieses Vortrages liegt bei der Verankerung des Bewehrungselementes. Hierzu werden die notwendigen Nachweise erläutert und Details der verschiedenen Verankerungsarten vorgestellt. Beispiele veranschaulichen die vorgeschlagenen Lösungsmöglichkeiten. Insbesondere bei beengten Platzverhältnissen im Bereich von Bermen oder dem Plateau und engen Radien im Böschungsverlauf sind besondere Lösungen erforderlich.

1. EINLEITUNG UND KURZBESCHREIBUNG DER FALLBEISPIELE

Auf der Deponie Koppelwald wurde im Böschungsbereich eine Rekubodenschicht mit einer Dicke von 2,0 m eingebaut. Dies resultierte für die relativ langen Böschungen (von 56,0 m bis zu 78,62 m) in sehr starken Bewehrungen aus Geogittern Fortrac[®]-T mit Zugfestigkeiten von 250 - 300 kN/m. Im Plateaubereich, der normalerweise mit einer Stärke von 1,0 m abgedeckt werden sollte, musste ein Randwall mit einer Höhe von 2,0 m vorgesehen werden, welcher durch sein Gewicht die erforderliche Verankerung sicherstellt und die Verankerungslängen auf ein akzeptables Maß reduziert.

Auf der Deponie Dillinger Hütte mit Böschungslängen bis zu 31 m (Neigung 1:2), wurde als Anti-Gleibewehrung das Geogitter Fortrac[®]-T mit Zugfestigkeiten von 110 - 250 kN/m eingebaut. Entsprechend den beengten Platzverhältnissen musste die Verankerung teilweise im Bereich der Zufahrtstraße realisiert werden. Hierbei wurden speziell angeordnete Tiefgräben vorgesehen, um die bereichsweise sehr hohen Zugkräfte mit ausreichender Sicherheit zu verankern.

Die im Land Oberösterreich in Österreich gelegene Deponie Redlham weicht vom Aufbau etwas von den o. g. Systemen ab. Hier wurde zusätzlich eine Dränmatte unterhalb der Kalzium-Bentonitmatte als Gasdränage eingebaut, so dass eine zusätzliche Scherfuge zu beachten war. Bei Neigungen bis 1:2 und Böschungslängen bis zu 60 m mussten hier Fortrac®-Geogitter mit Zugfestigkeiten zwischen 400 und 600 kN/m eingesetzt werden. Die Verankerung erfolgte flach ausgelegt und ballastiert auf dem Plateau. In den Eckbereichen, die Böschungen stoßen hier senkrecht aufeinander, mussten zusätzliche Ankergräben ausgehoben werden, um übermäßige Überlappungen der Bewehrungslagen zu vermeiden.

Im vorliegendem Beitrag werden Erläuterungen zur allgemeinen Bemessung gemacht und die Konstruktion der Verankerungen dargestellt.

2. BEMESSUNG DER ANTIGLEITBEWEHRUNG

2.1 REIBUNGSVERHÄLTNISSE IN DEN MAßGEBENDEN GLEITFLÄCHEN

Die Reibungsverhältnisse zwischen den einzelnen Geokunststoffen in einem mehrschichtigen Abdichtungssystem sind in den meisten Fällen ungünstiger als zwischen Bodenmaterialien, so dass bei steileren Böschungen oft der Einsatz einer geosynthetischen Bewehrung erforderlich ist (Steffen & Sobolewski 1993, Alexiew 1994). Für die statische Bemessung ist es deshalb wichtig, die präzisen Scherparameter zwischen den einzelnen Geokunststoffen und den vor Ort eingesetzten Böden zu kennen (GDA 1997). Die Scherparameter in den relevanten Fugen des Abdichtungssystems können anhand von Scherversuchen als auch Erfahrungswerten bzw. in Analogie zu ähnlichen Bauvorhaben bei entsprechender Abminderung (EAU 1996) ermittelt werden.

In allen Fällen zeigte sich erwartungsgemäß, dass die in den relevanten Fugen betrachtete Sicherheit gegen Gleiten bei Neigungen von 1:2,5 bis 1:2 zu gering war und somit eine Anti-Gleitbewehrung erforderlich wurde.

2.2 LANGZEITVERHALTEN VON DRÄNMATTEN

Dränmatten unterliegen, wie jedes Geokunststoffprodukt, dem Kriechen, also der zeitabhängigen Verformung bei gleichmäßiger Belastung. Es kann hierbei zwischen kompressiblen und nicht kompressiblen Produkten unterschieden werden. Je nach Konstruktionsprinzip der Dränmatte kommt es somit, über die Lebensdauer betrachtet, zu einer mehr oder weniger starken Dickenreduzierung durch Auflast, wodurch entsprechend das Wasserableitvermögen vermindert wird. Für den Bemessungszeitraum ist entsprechend der Nachweis über die ausreichende Entwässerungsleistung zu führen. Hierzu sind seitens der Dränmattenhersteller die entsprechenden Dränleistungen in Abhängigkeit des Kriechverhaltens und der Auflast zu ermitteln und zur Verfügung zu stellen. Weitere Grundlagen hierzu finden sich auch in den EAG-Drän und den GDA-Empfehlungen E 2-20.

2.3 BEMESSUNG DER GEOGITTER

Die Ermittlung der erforderlichen Zugfestigkeit des Geogitters im Lastfall 1 für den jeweiligen Deponieabschnitt wurde wie für den Sonderfall gemäß DIN 4084: 1981 geführt, in dem das Geogitter als Zugglied betrachtet wurde. Die erforderliche Bemessungszugfestigkeit bestimmt sich hierbei zu:

$$F_{dE} = \eta_{erf} \cdot \left((\gamma_B \cdot d_B) + p + \gamma_W \cdot d_W \right) \cdot L \cdot \sin \beta - \left((\gamma_B \cdot d_B) + p \right) \cdot L \cdot \cos \beta \cdot \tan \delta \quad (1)$$

mit:

γ_B - Feuchtwichte des Rekultivierungsbodens

L - Böschungslänge

d_B - Dicke der Rekultivierungsschicht

p - Flächenlast

β - Böschungswinkel

δ - Reibungswinkel in der maßgebenden Gleitebene

d_w - Dicke der Grundwasserleiters in der Rekultivierungs- bzw. Dränschicht (EBGEO 1997)

η - Sicherheitsbeiwert (DIN 4084, LF 1, $\eta = 1,30$, LF 2-Bauzustand $\eta = 1,20$)

Weitere Lagen, wie z. B. mineralische Dränschichten, sind entsprechend einzufügen.

Die erforderliche Kurzzeitzugfestigkeit F_k wurde ermittelt, indem der Wert der Bemessungszugfestigkeit F_d durch die Abminderungsfaktoren für Kriechen A_1 , Beschädigungen beim Einbau A_2 , Anschlüsse und Verbindungen A_3 und Umwelteinflüsse A_4 sowie einem allgemeinen Materialsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,75$ für geosynthetische Bewehrungen multipliziert wurde (FGSV-Merkblatt 1994, globales Bemessungskonzept).

$$F_k = F_{dE} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \gamma \quad (2)$$

Die Bemessung für den Lastfall 2 wurde unter besonderem Augenmerk auf dynamische Kräfte durchgeführt, die z. B. von Baggern, Planiertraupen oder Dumpfern in die Böschung eingetragen werden können. Für weitere Bemessungsdetails sei jedoch auf Syllwasschy et al, 2005 verwiesen.

Die Ergebnisse der Bemessungen (Tab. 1) weisen für die drei Deponien entsprechend den geometrischen und bodenmechanischen Randbedingungen unterschiedliche erforderliche Bemessungsfestigkeiten auf.

Tab. 1: Vorhandene Bemessungszugfestigkeiten

Bauvorhaben	Lastfall 1 [kN/m]	Lastfall 2 [kN/m]
Deponie Koppelwald	69 – 98	Fall A: 21 Fall B: 47
Deponie Dillinger Hütte	28 – 88	Fall A: 38 – 83
Deponie Redlham	195 – 246	Fall A: 151 – 183

Wie die Ergebnisse zeigen, ist bei den hier betrachteten Deponien und Lastannahmen Lastfall 1 maßgebend.

3. KONSTRUKTIVE GESTALTUNG DER VERANKERUNG

3.1 GRUNDLAGEN DER BEMESSUNG

Grundsätzlich kann zwischen einer Verankerung in einem Ankergraben und flach in einer Ebene unterschieden werden (Abb. 1). Die flache Verankerung in der Ebene bietet sich bei Haldendeponien auf dem Plateau an. Der Vorteil hierbei ist insbesondere eine einfache Verlegung ohne zusätzliche Erdarbeiten. Das Abdichtungssystem wird nicht durch Überlappungen mit späteren Abschnitten gestört. Nachteilig ist, dass relativ viel Verankerungslänge und somit Platz und/oder entsprechend viel Ballast erforderlich ist. Der Ankergraben hingegen ermöglicht die Verankerung auf relativ wenig Platz, ist also insbesondere bei beengten Verhältnissen und in Teilabschnitten z. B. auf Bermen vorzuziehen.

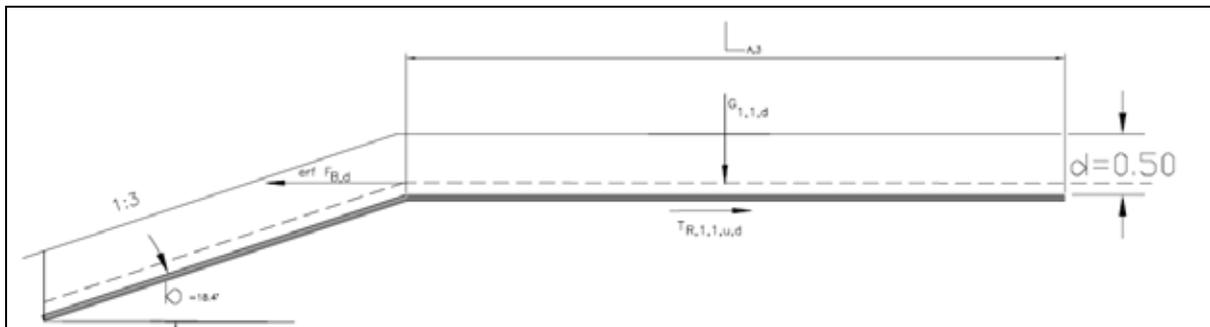


Abb. 1a: Verankerung flach auf dem Plateau

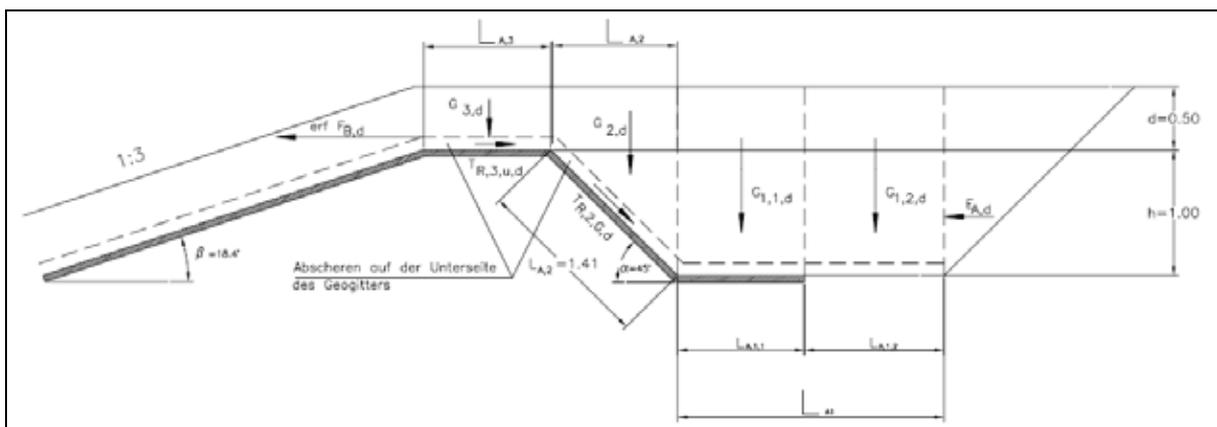


Abb. 1b: Verankerung in einem Einbindegraben

Die Bemessung der Verankerung für die vorgestellten Projekte erfolgte in Bezug auf die DIN 1054: 1976 mit $\eta_g = 1,50$ für den LF 1 und mit $\eta_g = 1,35$ für den Bauzustand LF 2. Die zu verankernde Kraft ergibt sich somit aus der Bemessungszugfestigkeit des Geogitters multipliziert mit der Sicherheit gegen Gleiten η_g .

Auch konstruktive Details, wie z. B. Dränleitungen im Bereich der Verankerung, müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden. Muss beispielsweise eine Rohr- oder Dränleitung in offener Grabenbauweise ausgetauscht werden, so ist der Nachweis zu erbringen, dass auch mit der fehlenden Auflast des Grabenaushubs noch eine für den Lastfall Bauzustand ausreichende Ankerkraft vorhanden ist.

3.2 FLACHE VERANKERUNG AUF DEM PLATEAU

Bei der flachen Verankerung wird die Ankerkraft durch die Auflast, die Ankerlänge und die Reibungsverhältnisse zwischen den Abdichtungskomponenten bestimmt. Die Berechnung ist entsprechend Abb. 1a nur abhängig von der Geometrie und der maßgebenden Gleitfuge. Es müssen die beiden Fälle „Herausziehen der Bewehrung aus dem Auflastkörper“ und „Gleiten der Bewehrung mit Auflastkörper“ unterschieden werden.

Die vorhandene Ankerkraft bestimmt sich somit für den Fall Gleiten zu:

$$F_A = G_{1,1,d} \cdot (\cos(\alpha) \cdot \tan(\delta) - \sin(\alpha)) \quad (3)$$

Für den Fall Herausziehen ist die vorhandene Ankerkraft gemäß folgender Formel zu berechnen:

$$F_A = G_{1,1,d} \cdot \cos(\alpha) \cdot (\tan(\delta_o) + \tan(\delta_u)) \quad (4)$$

Hierbei sind die sowohl die maßgebende Scherfuge (δ_u) als auch die Kontaktfläche oberhalb des Bewehrungselementes (δ_o) zu berücksichtigen.

Die Verankerung der Bewehrung erfolgte auf der Deponie Koppelwald (Abb. 3) klassisch im Bereich des Plateaus (Abb.4) durch eine Überschüttung, die gleichzeitig als Betriebsweg dient.

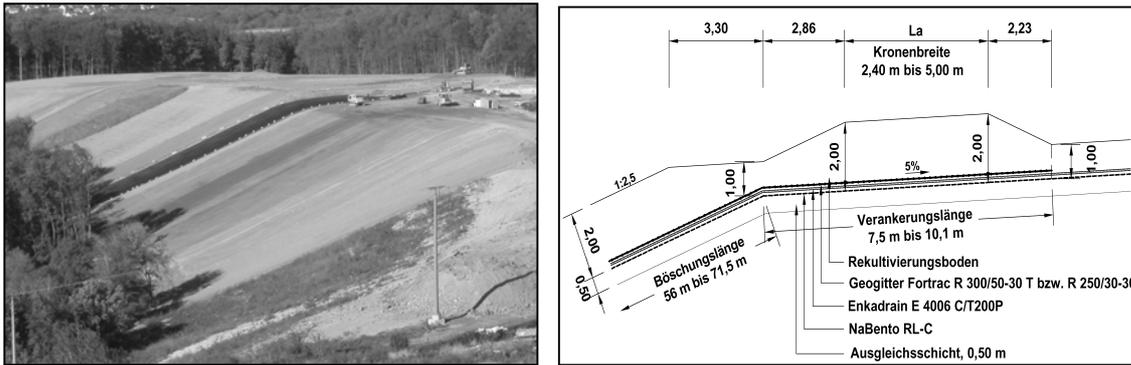


Abb. 3: Deponie Koppelwald, Bauzustand **Abb. 4:** Verankerung der „Anti-Gleit“-Bewehrung

Aus den Berechnungen für die maßgebende Gleitfuge zwischen GTD und Dränmatte ergaben sich Verankerungslängen zwischen 7,5 m und 10,1 m. Die Überdeckung erfolgte trapezförmig mit einer Kronenbreite zwischen 2,4 m bis 5,0 m bei einer Höhe von 2,0 m. Um eine ausreichende Entwässerung im Plateaubereich zu gewährleisten musste in der Statik zusätzlich eine hangseitige Neigung von 5 % im Verankerungsbereich berücksichtigt werden.

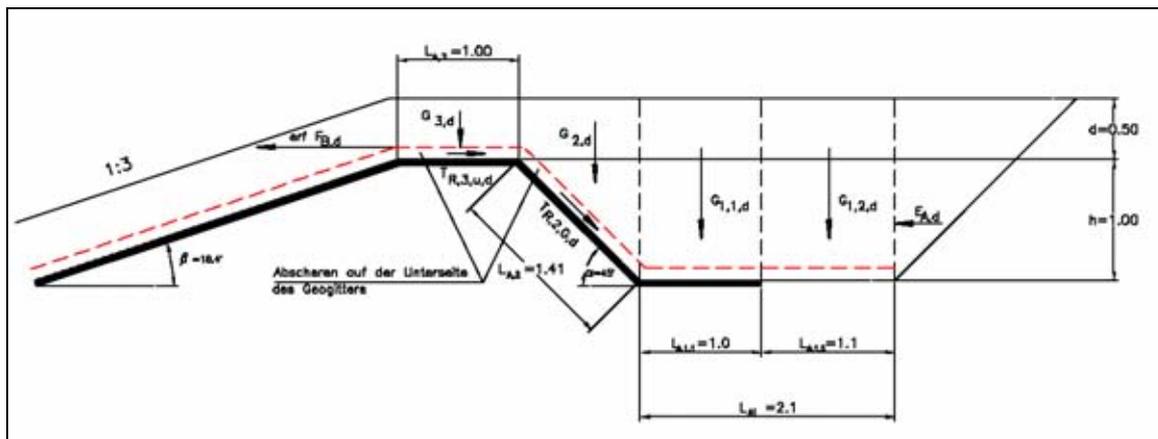
3.3 VERANKERUNG IN EINEM ANKERGRABEN

Die Verankerung in einem Graben kann platzsparend ausgeführt werden, weil durch die tiefe Bewehrungslage die Auflast und somit die Reibungskräfte vergrößert und die Verankerungslänge entsprechend verkürzt wird. Die Auflast auf der dem Hang zugewandten Grabenflanke wirkt zusätzlich haltend. Je nach Geometrie und Abstand der hangaufwärts folgenden Böschung ist der aktive Erddruck von der Rückseite als treibende Kraft auf den Ankerkörper zu berücksichtigen.

Für die Verankerung im Graben sind somit folgende Nachweise zu führen.

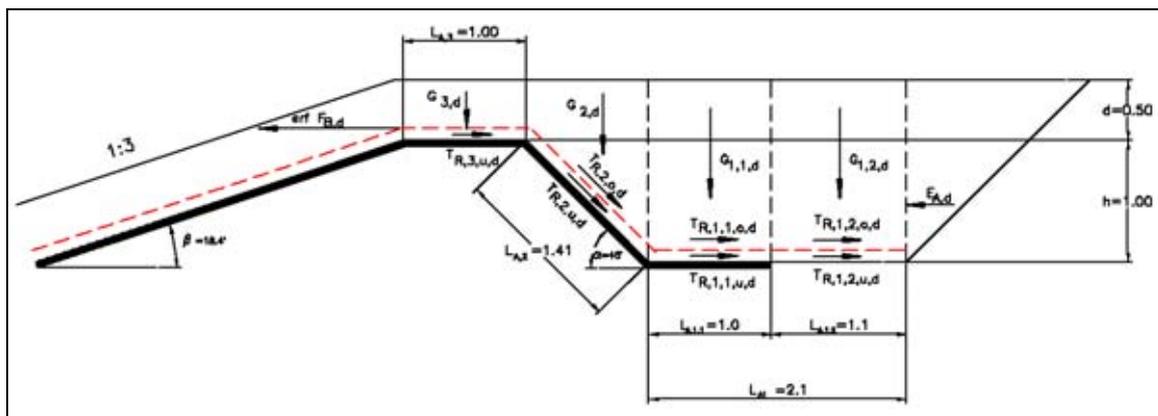
- Nachweis gegen Herausziehen des Geogitters
- Nachweis gegen Gleiten des Geogitters
- Nachweis gegen Abscheren der Böschungskrone

Abb. 5: Nachweis gegen Gleiten des Geogitters mit dem Füllboden:



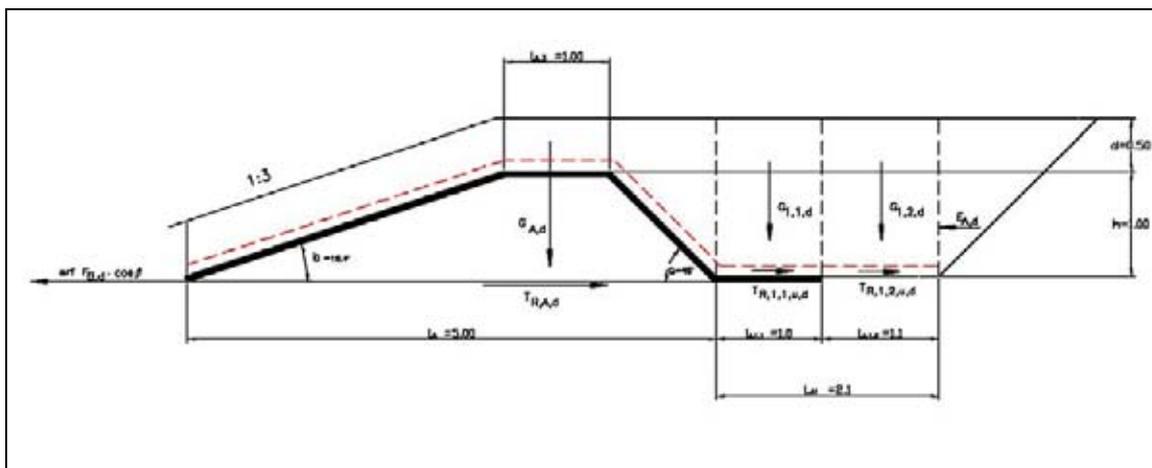
$$F_A = G_{3,d} \cdot \tan(\delta_G) + G_{2,d} \cdot (\cos(\alpha) \cdot (\tan(\delta_g) + \sin(\alpha)) + G_{1,1,d} \cdot \tan(\delta_g) + G_{1,2,d} \cdot \tan(\delta_B) \quad (5)$$

Abb. 6: Nachweis gegen Herausziehen des Geogitters:



$$F_A = G_{3,d} \cdot \tan(\delta_G) + G_{2,d} \cdot (\cos(\alpha) \cdot (\tan(\delta_G) + \tan(\delta_B)) + \sin(\alpha)) + G_{1,1,d} \cdot (\tan(\delta_B) + \tan(\delta_G)) + 2 \cdot G_{1,2,d} \cdot \tan(\delta_B) \quad (6)$$

Abb. 7: Nachweis gegen Abscheren der Böschungskrone:



$$F_A = G_{A,d} \cdot \tan(\varphi_B) + G_{1,1,d} \cdot \tan(\delta_B) + G_{1,2,d} \cdot \tan(\varphi_B) \quad (7)$$

Auf der Deponie Dillinger Hütte (Abb. 8) musste aufgrund der beengten Platzverhältnisse ein Tiefankergraben ausgeführt werden. Die Ausführung erfolgte in zwei unterschiedlichen Weisen. Im Bereich der unteren Bermen 1 und 2 (Abb. 9) konnte die Verankerung unter dem Betriebsweg hergestellt werden und im anschließenden Böschungsbereich zusätzlich in einem 1 m tiefen Ankergraben verlegt werden. Im oberen Bereich (Abb. 10) der Böschung, die unmittelbar an die Deponieauffahrt anschließt, wurde aufgrund der Platzverhältnisse ein 1,5 m tiefer Ankergraben ausgehoben, in dem das Geogitter mit Rückumschlag verlegt wurde. Die komplizierte Geometrie des Tiefankergrabens, insbesondere im Bereich der Bermen 1 und 2 erforderte teilweise aufwändige Nachweise für das Abscheren der Krone und das Versagen durch Ausheben des Füllbodens aus dem Ankergraben.

Diese Berechnungen wurden unter Ansatz von polygonalen Gleitflächen (Abb. 11) durchgeführt, wobei die rechnerisch ermittelte Ankerkraft mit der geforderten Sicherheit LF 1: $\eta_g = 1,5$ bzw. LF 2: $\eta_g = 1,35$ als Bemessungswert angesetzt wurde.



Abb. 8: Tiefankergraben Dillinger Hütte

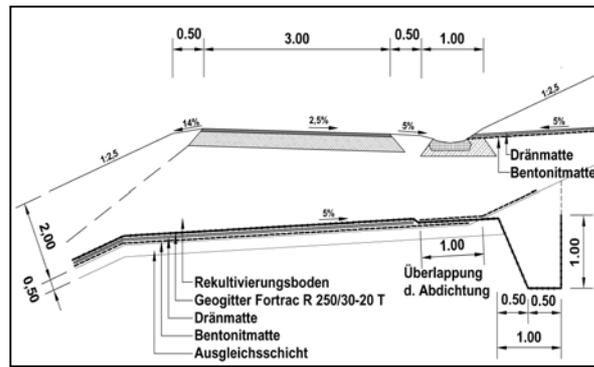


Abb. 9: Verankerung Bermen 1 und 2

Das Versagen wurde nach der Blockgleitmethode ohne Berücksichtigung der Scherkräfte in den Lamellenseiten für die potentiell ungünstigsten polygonalen Gleitflächen untersucht.

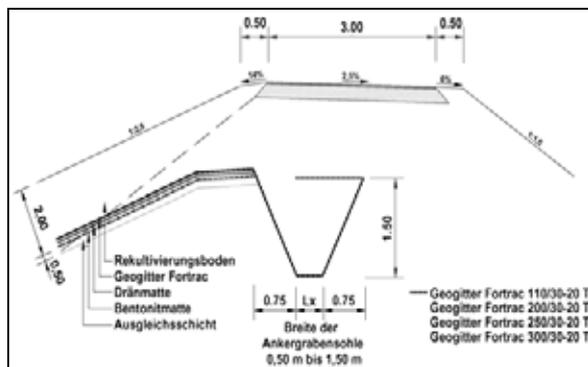


Abb. 10: Verankerung Berme 3

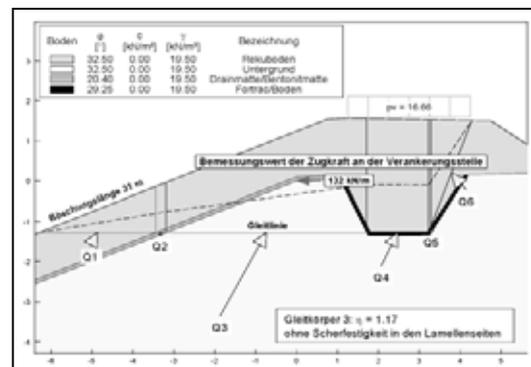


Abb. 11: Stat. Berechnung des Ankergrabens

3.4 ANKERGRABENAUSBILDUNG IN ECKBEREICHEN VON DEPONIEEN

Bei Deponieböschungen, die in ihrem Verlauf relativ sanft ausgerundete Kurven aufweisen, kann die Antigleibewehrung problemlos auf dem Plateau verankert werden. Sind die Kurvenverläufe jedoch eng oder treffen gar zwei Böschungen unter 90° oder steiler aufeinander, so dass ein Grat entsteht (Abb. 12), ist besonderes Augenmerk auf die Verlegung der Antigleibewehrung zu richten. Bedingt durch den engen Radius des Böschungsverlaufes oder gar einer ausgebildeten Schnittkante ohne Kurvenverlauf würden sich die Bewehrungslagen im Eckbereich stark überschneiden und im Ankerbereich mehrfach überlappt in einem Punkt auf der Böschungskrone konzentrieren. Somit entsteht in einem Punkt eine konzentrierte Kräfteinleitung aus einer großen Fläche, welche nur durch entsprechende Auflasten oder Verankerungslängen aufzunehmen wäre.

In Abb. 13 ist eine weitere Möglichkeit der Eckausbildung dargestellt. Trotz des engen Winkels, in dem die Böschungen tlw. unter 45° aufeinandertreffen, konnte durch eine ausrundende Profilierung und einer damit verbundenen Abflachung der Böschung in den Eckbereichen auf die Antigleitbewehrung verzichtet werden.

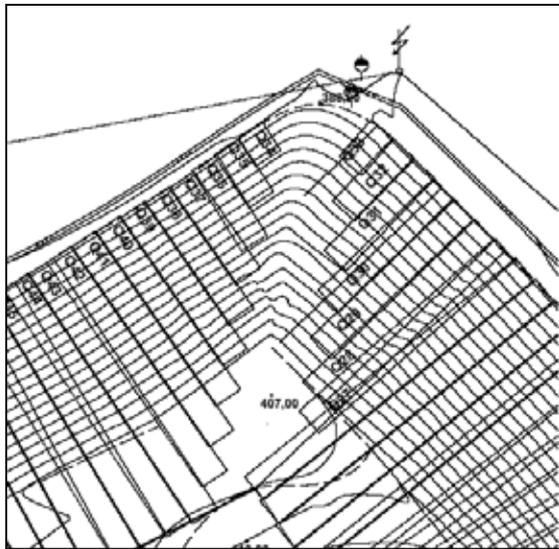


Abb. 12: Eckbereich ohne Ausrundung

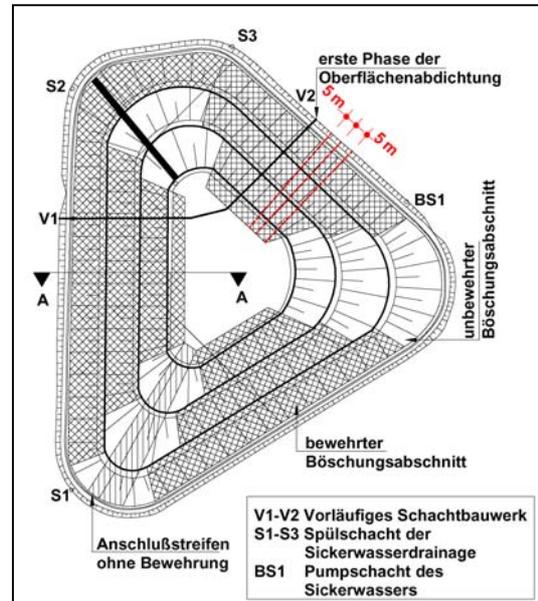


Abb. 13: Eckbereiche mit Ausrundungen

Alternativ besteht die Möglichkeit entlang der Schnittkante der Böschungen zwei Gräben anzulegen und dort direkt die Bewehrung zu verankern. Dies hat den Vorteil, dass keine Überlappungen entstehen und die Verankerungskonstruktion klein bleibt. Diese Lösung wurde auf der österreichischen Deponie Redlham ausgeführt. Entlang der gradlinig verlaufenden Böschungen erfolgte die Verankerung flach auf dem Plateau. Die Eckbereiche waren nahezu ohne Ausrundung ausgeführt worden, weshalb sich für jede Böschung jeweils ein Ankergraben auf dem Böschungsrat als Lösung anbot (Abb. 14). Die Bemessung der Grabengeometrie erfolgte unter Berücksichtigung mehrerer Gesichtspunkte:

- Aufnahme der Zugkräfte der Bewehrung aus den Böschungen
- Aufnahme und Ableitung der in Grabenachse verlaufenden Kräfte auf das Plateau
 - an der Grabensohle
 - an den Grabenflanken

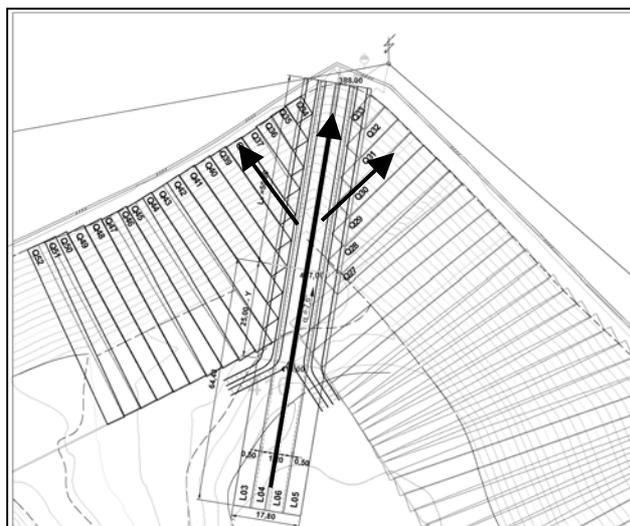


Abb. 14: Ankergraben auf Böschungsgrat

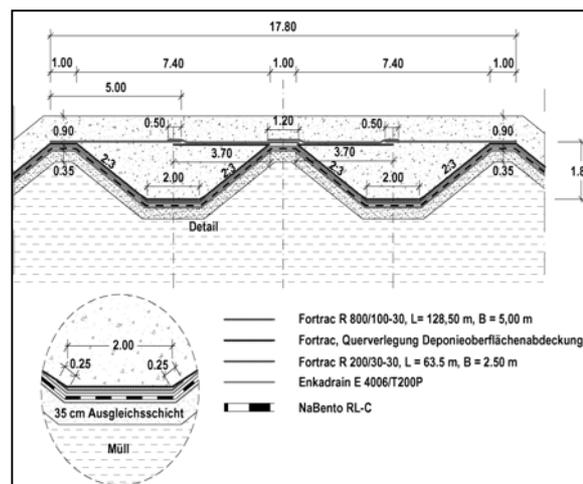


Abb. 15: Querschnitt der Ankergraben

Bei dieser Lösung mussten somit die längs des Grabens auftretenden Zugkräfte durch zusätzliche Bewehrungen aufgefangen werden, um keine hangabwärts treibenden Querkräfte in den Bewehrungen der Böschungen zu aktivieren. Diese Bewehrungslagen wurden zum einen an der Grabenbasis eingelegt und zum anderen auf Höhe der Unterkante der Rekultivierungsschicht. Somit wurde gewährleistet, dass der gesamte Grabenkörper verankert wurde und auch lokal Scherkräfte aus Gleiten abgetragen werden, ohne das Dichtungselement auf Dehnung zu beanspruchen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Abdichtungssysteme auf Deponieböschungen mit Neigungen steiler als 1:3, die in den meisten Fällen durch zu steilen Einbau in der zum Teil weiter zurückliegenden Betriebsphase entstanden sind, können normalerweise problemlos durch Antigleibewehrungen in Form von Geogittern gleitsicher ausgeführt werden. Oftmals stellt sich jedoch die Verankerung der Geokunststoffbewehrung als problematisch heraus, weil entweder die Platzverhältnisse sehr beengt oder die Ankerlängen sehr groß sind. Anhand von drei Beispielen und Angaben zur Ankerkraftberechnung für verschiedene Geometrien wurden Lösungen für diese Problematik präsentiert. Durch den Einsatz von hochzugfesten Geogittern ist der standsichere Aufbau der Abdichtung auch auf bestehenden Böschungen mit Neigungen 1:2,0 und steiler möglich, wodurch teure Massenumlagerungen des Abfalls vermieden werden können. Hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine Aufsteilung der Böschungsneigung dann ihre Grenze findet, wenn der Rekultivierungsboden bzw. mineralische Dränschichten an die Grenzen ihrer Scherfestigkeit stoßen, d.h. Reibungswinkel und Böschungswinkel nähern sich stark an.

LITERATUR

Alexiew, D. (1994) Bemessung geotextiler Bewehrungselemente für Abdichtungssysteme auf geneigten Flächen. 10. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 197-212

Arbeitsausschuß Ufereinfassungen (1996) Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU. Berlin, Germany, Ernst & Sohn.

EBGEO (1997) Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO. Berlin, Germany, Ernst & Sohn

EAG-Drän (2005) Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Dränmatten. Berlin, Germany, Ernst & Sohn.

FGSV (1994) Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus. Köln, FGSV-Verlag

GDA (1997) Empfehlungen des Arbeitskreises zur „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ GDA. Berlin, Germany, Ernst & Sohn.

Steffen, H., Sobolewski, J. (1993) Standsicherheitsberechnungen im Deponiebau, 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, Geotechnik, Sonderheft, 48-55

Syllwasschy, O.; Sobolewski, J.; Brokemper, D.; Alexiew, N.: Beispiele für effiziente Oberflächenabdichtungen anhand der Deponien Koppelwald, Dillinger Hütte und Redlham: Aufbau, Statik, Verlegepläne, Bauausführung; Symposium Umweltgeotechnik TU Freiberg, 2005

TA Abfall (1991) Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Bundesanzeiger

TA Siedlungsabfall (1993) Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Bundesanzeiger

