

Bemessung von Stützbauwerken aus bewehrtem Boden

Autor(en): **Jaecklin, Felix P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 29/30

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79950>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Felix P. Jaecklin, Baden

Bemessung von Stützbauwerken aus bewehrtem Boden

Durch das schichtweise Einlegen von Geotextilien entsteht ein neuartiger Baustoff mit inhomogenen und stark anisotropen Eigenschaften, der Biegung und Zug vor allem aus schräg gestellten Scherkräften aufnehmen kann. Eine genaues mathematisches Modellieren dieses inhomogenen Baustoffs blieb bis heute praktisch unmöglich. Näherungsweise bewähren sich die klassischen Berechnungsmethoden, die bei Vernagelungen oder Verankerungen angewendet werden.

Die klassische Bemessung von Stützwänden unterscheidet die Nachweise für äussere und innere Stabilität. Früher erfolgten diese getrennt, heute jedoch zunehmend gemeinsam, da sich für die wichtigen unteren Geotextillagen stets die kombinierten Gleitflächen als massgebend erweisen. Diese schneiden gleichzeitig eine oder mehrere Geotextillagen, erfassen aber auch den Hinterfüllbereich.

Äussere Stabilität

Die äussere Stabilität betrachtet die Sicherheit des Bauwerks als Ganzes - bestehend aus Fundation, Front mit bewehrter Erde und unbewehrter Hinterfüllung - unter Einwirkung von Erddruckkräften und Verkehrslasten. Der Nachweis der Sicherheiten für die äussere Stabilität bezüglich Gleiten, Kippen und Tragfähigkeit ergibt die erforderlichen Abmessungen der Erdmasse und damit die Mindestlänge der Geotextil-Bewehrung. - Besonders bei steil abfallendem Gelände vor der Böschung lässt sich die grossräumige Stabilität mit Gleitkreisberechnungen bestimmen.

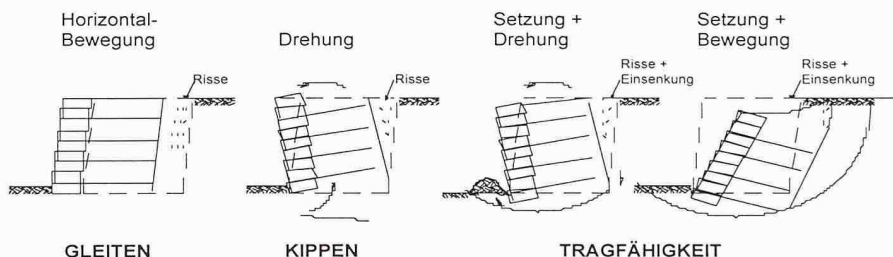
Auch die neue Vorschrift EBGEO, Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, verlangt den Nachweis der äusseren Stabilität [1]. Unbestritten ist dabei die Wichtigkeit der Gesamtstabilität, die für Blockgleiten und tiefliegende Gleitkreise nachzuweisen ist. Der Praktiker kennt den geringeren Wert der Nachweise für Kippen und Tragfähigkeit, da diese für breite Schüttkörper nicht massgebend sind, dies im Unterschied zu den meist schmalen Schwergewichtsmauern aus

Beton, Betonelementen oder Steinkörben.

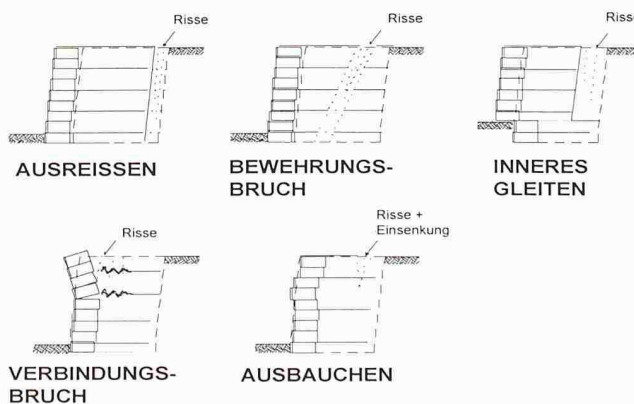
Innere Stabilität

Die innere Stabilität untersucht die Sicherheit des Stützkörpers gegen Versagen der Einzelteile gemäss folgenden Szenarien (Bild 2):

- Ausreissen des Geotextils aus dem Hinterfüllbereich, ähnlich wie das Ausreissen eines Ankers aus der Verankerungszone.
- Bruch des Geotextils durch Überbeanspruchung.
- Weggleiten des oberen Teils der Stützmauer auf einer inneren Gleitfläche.



1 Äussere Stabilitätsnachweise. Die Skizzen geben einen grafischen Überblick der erforderlichen Nachweise für die äussere Stabilität. Kippen und Tragfähigkeit erweisen sich für Geotextilwände wegen der genügenden Breite der Basis als unkritisch, während die kritische lokale Tragfähigkeit oft ungeprüft bleibt



2 Bemessungskriterien zum Nachweis der inneren Sicherheit der Stützkonstruktion. Die Bemessung der Stützkonstruktion hat diese Szenarien abzudecken. Klare Bemessungsregeln und Sicherheitsfaktoren gelten für die Fälle Ausreissen (Ausziehen von «Ankern»), Bewehrungsbruch und inneres Gleiten (oder Blockgleiten) sowie zum Nachweis gegen Bruch der Verbindung zur Frontpartie. Eine eigentliche Bemessung gegen Ausbauchen ist jedoch rechnerisch kaum massgebend, tritt aber in der Praxis häufig ein, oft infolge nassem Wetter und Einbau von nassem Material oder von geringer Qualität

- Abreissen des Geotextils in der Frontpartie.
- Ausbauchen der Frontpartie, verbunden mit Einsenkungen über der Stützkonstruktion.

In der Praxis beobachtete Deformationen und Schäden erfordern eindeutig, die oberen Geotextillagen zu verstärken sowie im obersten Bereich verlängerte Geotextileinlagen einzubauen, um die Deformationen klein zu halten.

Berechnung mit Computerprogrammen

Zur Bemessung geotextilarmierter Stützkonstruktionen finden vorab Computerprogramme Anwendung, die teilweise von Geotextillieferanten zur Verfügung gestellt werden (siehe Kasten S. 16). Mehrere Programme weisen schwerwiegende Nachteile auf: Oft ist das Berechnungsverfahren kaum nachvollziehbar (Black-Box-Effekt) und es bleibt unklar, ob es die kritischen Gleitflächen wirklich findet.

Auch die Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren sind nicht klar ersichtlich. Als Resultat erhält man die Angabe gewisser Geotextiltypen, ohne oder mit nur erschwelter Möglichkeit, Konkurrenzprodukte einzubeziehen. Die Programme von Geotextil-Lieferanten liefern nicht immer die technischen (neutralen) Anforderungen, sondern oft produktspezifische Angaben. Offensichtlich dienen diese Programme der Verkaufsförderung, was die technische Beurteilung und den Vergleich erschwert.

Unabhängige Ingenieure bevorzugen neutrale Programme, die im Handel, besonders auf dem amerikanischen Markt, erhältlich sind. Diese werden mit Forschungskrediten von nationalen Verbänden oder von Forschungs- und Lehrinstituten entwickelt und betreut. Interessanterweise ergeben gerade diese neutralen Programme einen höheren Geotextilbedarf als die Produkte-Herstellerprogramme, offenbar bedingt durch zusätzliche Sicherheitsfaktoren, wie z. B. dem Reibungsfaktor zwischen Geotextil und Boden. Zudem berücksichtigen leistungsfähigere Programme, im Gegensatz zu einfacheren, kritische Gleitflächen.

Der Vergleich der Resultate dieser Programme zeigte auch, wie stark die Ergebnisse infolge unterschiedlicher Sicherheiten und Sicherheitsfaktoren voneinander abweichen. Der Gesamtsicherheitsfaktor GS als Produkt der Partialfaktoren für Kriechen, mechanische, chemische und biologische Einflüsse bestimmt die zulässige Zugkraft im Geotextil. Diese variiert von Programm zu Programm beträchtlich, weshalb es von Bedeutung ist, jene Berechnungsverfahren und -programme zu wählen, die die wichtigen kritischen Gleitflächen auch finden und entsprechend verstärkte Bewehrungen (verstärkte unterste Lagen oder verlängerte oberste Lagen) verlangen. Bild 3 zeigt ein typisches Bei-

spiel einer Computerberechnung für eine geotextilverstärkte Stützmauer.

Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren

Die zur Berechnung wichtigsten wirtschaftlichen Aspekte werden im Folgenden vorgestellt.

Partielle Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren werden für Geotextile und Geogitter angewandt. Abminderungsfaktoren basieren auf der Materialtechnologie, d. h. auf Geotextileigenschaften, welche die Zugfestigkeit des Geotextils reduzieren. Im Unterschied zu Beton und Stahl stehen bei Kunststoffen langfristig weit geringere Festigkeiten zur Verfügung als im Kurzzeitversuch im Labor gemessen. Diesen kunststoffbedingten Abminderungen stehen die auch in der Statik für Betontragwerke üblichen Sicherheits- oder Teilsicherheitsfaktoren gegenüber, um die zusätzlichen Einflüsse im Gebrauchs- und Bruchzustand abzudecken.

Die Wahl der Sicherheits- und Abminderungsfaktoren differiert von Land zu Land entsprechend den Vorschriften, den gebräuchlichen Geotextilien und den örtlich vorhandenen Bodenarten. Sicherheitskonzepte für Tragwerke sind heute allgemein bekannt und werden teilweise auch im Grundbau angewendet, während nur in wenigen Ländern (und nicht in der Schweiz) verbindliche Anforderungen an die Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren von Geotextilarmierungen existieren.

Bei der Vorbereitung dieser Arbeit veranlasste der Verfasser eine weltweite Umfrage bei Spezialisten im Sektor geotextilarmierter Wände, die höchst interessante Resultate erbrachte: Die vergleichbare Menge Geotextil variiert im Vergleich zu einem als zweckmässig beurteilten Resultat zwischen rund 50% und 200%. Die grosse Diskrepanz folgt aus den stark unterschiedlichen Auffassungen über die Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren, so dass die Berechnungen kaum vergleichbar sind. Statt einer umständlichen Interpretation der einzelnen Angaben führte die Auswertung daher zu den nachstehenden Hinweisen und vorläufigen Empfehlungen bezüglich Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren.

Eine der umfassendsten und gründlichsten Arbeiten zum Thema Armieren mit Kunststoffen bildet die EBGEO [1], vor allem bezüglich klarer Definition der Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren. Diese Literatur ist leicht zu beschaffen, ist auf deutsch geschrieben und bildet in Deutschland eine recht strikt befolgte Empfehlung, die sich jedoch bereits in Re-

vision befindet, da Ergänzungen und Änderungen angebracht sind. Die Bemessung, angelehnt an EBGEO, erfolgt mit dem Grundsatz:

$$F_{zul.} = \frac{F_{kurz}}{A1 \cdot A2 \cdot A3 \cdot A4 \cdot A5 \cdot \gamma_B} = \frac{F_{kurz}}{GS}$$

F_{kurz}	Zugfestigkeit des Geotextils im Laborversuch
$F_{zul.}$	zulässige Spannung im Geotextil
A1 bis A5	Abminderungsfaktoren, wie nachstehend beschrieben
γ_B	Teilsicherheitszuschlag am Geotextil nach DIN V 1054-100
GS	Gesamtsicherheit

Interaktionskoeffizienten

Weitere Abminderungsfaktoren, die im obigen Grundsatz nicht enthalten sind, betreffen die Interaktion von Geotextilien und Geogittern im direkten Kontakt mit dem Boden: Geotextilien auf Boden entwickeln weniger Reibung als Boden auf Boden. Das berücksichtigen die Interaktionskoeffizienten Ci und Cds, nämlich Ci für Ausziehen von Geotextilien (pullout interaction), und Cds für geringeren Widerstand gegen Blockgleiten (direct sliding). - Übliche Interaktionskoeffizienten für normale Geotextilien gemäss der Literatur finden sich in Bild 7. Diese Interaktionskoeffizienten Ci und Cds wirken sich auf die Länge der Geotextilverankerungen aus, nicht jedoch auf die Sicherheit oder zulässigen Spannungen im Geotextil.

A1 – Kriechen (besonders grosser und gewichtiger Faktor)

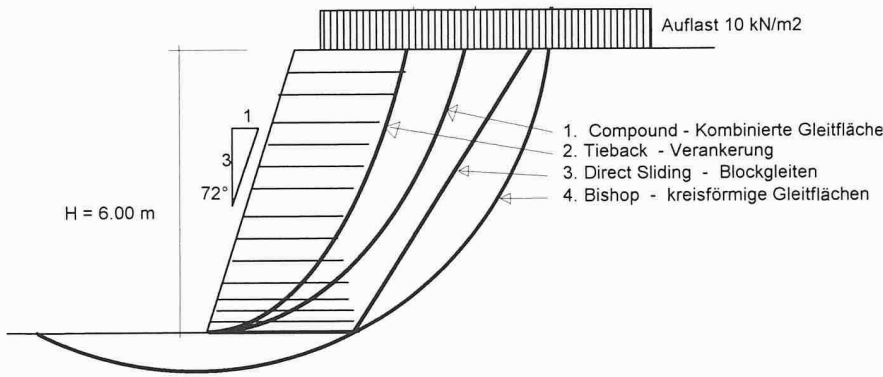
für PP (Polypropylen) und PE (Polyethylen):

Dieser A1-Abminderungswert für PP bildet wohl den umstrittensten Punkt, weil er die Wirtschaftlichkeit der sehr weit verbreiteten PP oft in Frage stellt. Gewisse PP-Befürworter erklären die Diskussion als überflüssig, da das für Geotextilien übliche Spannungsniveau normalerweise gar nicht den Bereich des gefährlichen Langzeit-Ermüdungsbruchs tangiere. Dieses Argument wird jedoch als unbewiesene Behauptung meist abgelehnt.

A1 = 5,0	für PP, PE, nach EBGEO, falls keine Messungen
4,5	für PP nach frz. Vornorm für 70 Jahre Gebrauchsdauer
3,0	für PP nach frz. Vornorm NFG 38064 für 7 Jahre
	Herstellerangaben (alles unvollständige, zufällig bekannt gewordene Angaben ohne Wertung):
3,2	für FLN aus PP, gemäss Kriechversuchen
2,7	für Tricon monofil HDPE

Programme zur Berechnung geotextilarmierter Stützkonstruktionen (Auswahl)

- Enka Slope: Akzo Nobel Industrial Systems BV in Arnhem, NL
- Force: Huesker Synthetic in Gescher, D
- Geoslope: Prof. Bathurst, Jarret and Assoc., Canada
- Miragrid (Mirafi): Mirafi Inc. in Charlotte, NC/USA
- Polyfelt: Polyfelt GmbH. in Linz, A
- Powa: Rehau AG, Erlangen D
- Reslope: Prof. Dov Leshchinsky, Delaware University, USA
- SRWall: National Concrete Masonry Assoc., Herndon, VA/USA, Vers. 2.1 bei Tensar, Vers. 3.0 bei Prof. Bathurst, Jarret and Assoc., Canada
- Stand: Dr. Otta, Forch ZH
- Stru: P. Steiner, Rüeegg AG
- Tenswal: Tensar Earth Technologies Inc. in Morrow, GA/USA usw.



Allgemeine Angaben

Anstellwinkel des aktiven Erddruckes	$\delta = 20^\circ$
Koeffizient für den Herauszieh Widerstand im bewehrten Boden	$C_i = 0,80$
Koeffizient für den Herauszieh Widerstand unter der untersten Lage	$C_i = 0,80$
Koeffizient für das Gleiten im bewehrten Boden	$C_i = 0,80$
Koeffizient für das Gleiten unter der untersten Lage	$C_i = 0,80$

Größen zur Bemessung der Geotextileinlagen

Abminderungsfaktor für Kriechen (hier für PP)	$A_1 = 3,2$
Abminderungsfaktor für Einbaubeschädigungen	$A_2 = 1,3$
Abminderungsfaktor für Verlängerung in Krafrichtung	$A_3 = 1,0$
Abminderungsfaktor für Umgebungseinflüsse	$A_4 = 1,1$
Abminderungsfaktor für Fabrikationstoleranz	$A_5 = 1,0$
Faktor für seitliche Überlappung	$\gamma_U = 1,0$
Faktor für tangentielle Krafrichtung	$\gamma_T = 1,0$

Allgemeine Sicherheitsfaktoren

Sicherheitsfaktor für Reibungswert des Bodens	$\theta_R = 1,0$
Sicherheitsfaktor für Geotextil	$\gamma_A = 1,4$
Sicherheitsfaktor für Blockgleiten	$\theta_G \geq 1,3$
Sicherheitsfaktor für kreisförmige Gleitflächen	$\theta_K \geq 1,3$

3

Typische Berechnung einer geotextilverstärkten Stützmauer von 6 m Höhe und 3:1, bzw. 72° Wandneigung, mit Auflast und Bodenkenwerten wie angegeben (Programm Reslope nach Prof. Dov Leschinsky [2], www.reslope.com)

1. Compound (kombinierte Gleitfläche): Die Figur zeigt die besonders kritischen Gleitflächen, wobei die kombinierte «Compound» für die Stärke und für die Länge der untersten Geotextillagen massgebend ist
2. Tieback (Verankerung): Die steile Linie «Tieback» ist massgebend für die Bemessung der oberen Lagen als Verankerungen
3. Direct Sliding (Blockgleiten): Die strichpunktete Linie bezeichnet die kritische Gleitfläche für das Blockgleiten oder «direct sliding»
4. Bishop (kreisförmige Gleitflächen): Mit der untersten Linie wird der kritische Gleitkreis nach Bishop gezeichnet, der das sogenannte globale Gleiten umfasst

4

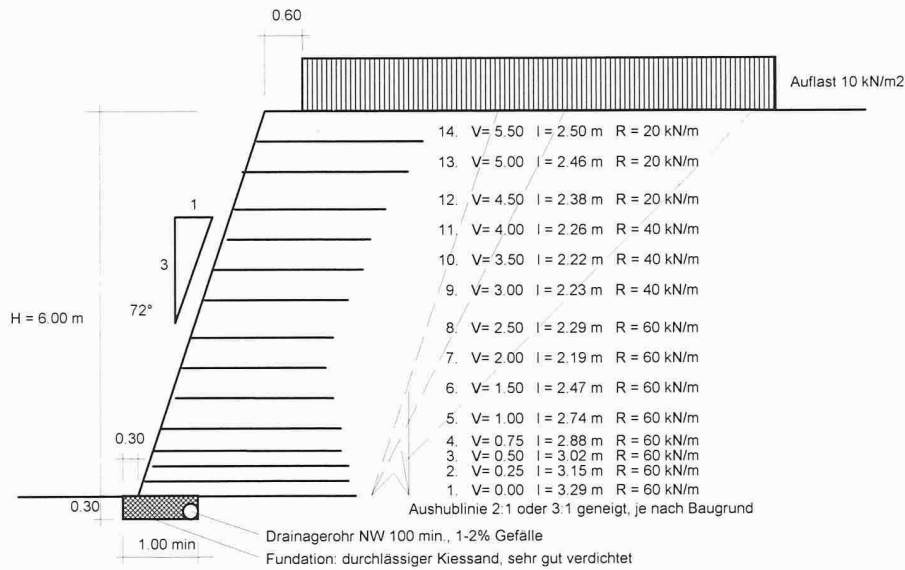
Typische Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren – Mit diesen Eingaben werden die wichtigsten Eingabedaten betreffend die Sicherheit und die Bemessung zusammengefasst. Die Gesamtsicherheit ergibt sich aus der Multiplikation der Sicherheitsfaktoren.

5

Resultate der Berechnungen «Final Design Output» (Reslope) mit folgenden wichtigen Angaben und Erläuterungen zu den Kolonnen:

Benötigte Zugfestigkeit:								
Nr.	Höhe über Basis	Länge	Versagensart	benötigt, T_r	ultimativ, T_{ult}	Langzeitverhalten (Entwurf) T-ltds	Gesamtsicherheitsfaktor	Status
	m	m		kN/m	kN/m	kN/m	γ_A	
1	0,00	3,29	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
2	0,25	3,15	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
3	0,50	3,02	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
4	0,75	2,88	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
5	1,00	2,74	Tieback	9,38	60,0	13,11	>1,40	OK
6	1,50	2,47	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
7	2,00	2,19	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
8	2,50	2,29	Compound	9,37	60,0	13,11	>1,40	OK
9	3,00	2,23	Tieback	5,74	40,0	8,74	1,52	OK
10	3,50	2,22	Tieback	4,81	40,0	8,74	1,82	OK
11	4,00	2,26	Tieback	3,89	40,0	8,74	2,25	OK
12	4,50	2,38	Tieback	2,90	20,0	4,37	1,51	OK
13	5,00	2,46	Tieback	1,61	20,0	4,37	2,72	OK
14	5,50	2,50	Tieback	0,42	20,0	4,37	10,46	OK

Nr.	Lagen der Geotextilien, unten beginnend nummeriert, und Höhe über der Fundation
Länge	Länge der Verankerungsgeotextilien oder Geogitter
Versagensart	massgebende Bemessung: ob kombinierte Gleitfläche oder Ankerwirkung
T_r , benötigt	erforderliche Gebrauchskraft
T_{ult} ,	vorhandene Zugfestigkeit des Geotextils gemäss Kurzzeitversuch im Labor, = F kurz,
T-ltds	langfristig zulässige Zugkraft im Geotextil, in Reslope noch ohne γ_B muss
Gesamtsicherheit	über $\gamma_B = 1.4$ liegen, Sicherheitszuschlag für Ungewissheiten
Status	Kontrolle ob Bedingungen eingehalten



6 Schnitt durch die Stützwand mit eingetragenen Resultaten der Berechnung: Nummerierung der Lagen, Höhe über der Foundation, Länge des Geotextils in m, garantierte Mindestfestigkeit des Geotextils in kN/m

- 2,4 für PP Sytec nach BS 8006 UK für HDPE
- 2,4-2,75 für Tensar nach Zulassung IB Berlin
- 2,6 für Tensar nach britischer Zulassung

Empfehlung:
 A1 = 3,2-4,5 für PP, PE, falls keine Messungen vorhanden
 A1 = 2,4-3,2 für PP, PE, je nach Messdaten aus Kriechversuchen

für PET (Polyester):

- A1 = 2,5 für PET nach EBGEO, falls keine Versuche vorliegen
- 2,25 für PET nach frz. Vornorm für 70 Jahre
- 1,5 für PET nach frz. Vornorm für 7 Jahre

Herstellerangaben:

- 1,89 für PET Polyfelt Rock G, PEC
- 1,67 für PET Fortrac Huesker, nach Versuchen für 120 Jhr.
- 1,5 für Terram Paragrid, mit Versuchen bestimmt
- 1,52 für TerramGrid, mit Versuchen bestimmt
- 1,47 für Colbond Enkagrid Pro 40.

Empfehlung:

- A1 = 2,25 für PET, falls keine Versuche vorliegen
- A1 = 1,6-1,9 für PET, je nach Messdaten aus Kriechversuchen

Für PVA (Polyvinylalkohol):

- A1 = 5,0 für ungeprüfte Materialien
- 2,0 Beispiel für PVA Po-

lyvinylalkohol nach Huesker

Spezielle Folgerung: Allgemein bildet der A1-Faktor für Kriechen für alle Materialien den wichtigsten Faktor, denn es ist der grösste und der am breitesten variierende Wert. Besonders tiefe Werte sind nur nach der Beurteilung des im Einzelfall vorhandenen langfristigen Spannungsniveaus und nach Vorliegen von anerkannten Zulassungen oder Versuchsergebnissen zu akzeptieren.

A2 - Einbaubeschädigung (infolge Transport, Einbau und Verdichtung)

- A2 = min. 2,0 nach EBGEO bei gemischt und grobkörnigem Boden und rundem Korn, bei eckigen Körnern nach Versuchen
- min. 1,5 nach EBGEO bei feinkörnigem, nichtbindigem Boden und rundem Korn
- 1,3 üblicher Standardwert in Frankreich
- 1,1-1,5 Nach Laborversuchen von Gourc [3], je nach Typ und Boden sowie nach frz. Norm für fein- oder grobkörnigen Boden

Herstellerangaben:

- 1,5 für Tensar SR2 in grobkörnigem Boden
- 1,1-1,3 für mittlere Tensar in feins bis grobkörnigen Böden
- 1,3 für TerramGrid
- 1,1 für ParaGrid
- 1,2-1,4 für Fortrac, Enkagrid, Boden gemischt- bis grobkörnig

- 1,02-1,05 für Fortrac, Enkagrid, in feinkörnigem Boden
- 1,2 für Rehau Raugrid in gemischtkörnigem Boden
- 1,1 für Tricon HDPE
- 1,0-1,1 für Sytec Geogitter, Boden gemischt bis eckig, belegt?
- 1,3 für FLN Geovliese aus PP, obwohl diese Vliese nicht besonders empfindlich sind.

Empfehlung:

- A2 = 1,1 bei Ton und Silt und unempfindlichem Geotextil
- 1,2 Silt, Sand und wenig runder Kies
- 1,3 normaler kiesiger Boden
- 1,4-2,0 eckiger, gebrochener Kies oder Fels, leichtes Geogitter

A3 - Fugen und Verbindungen

(Überlappungen, Anschlüsse an Bauteile usw.)

Verlängerungen, Fugen oder Überlappungen in der Krafrichtung von Geotextil- oder Geogitterarmierungen sind nicht zweckmässig, nicht fachgerecht und darum auch nicht zulässig. A3 entfällt daher: A3 = 1,0

A4 - Umgebungseinflüsse (umfassen nicht nur den pH-Wert, sondern auch biologische Zersetzung durch Bakterien, Tierfrass, UV-Strahlung usw.)

PET sind empfindlich auf hohen pH-Wert, wie vor allem im Frischbeton und in kalkstabilisierten Schichten. Versuche mit PET-Geovliesen zeigten einen krassen Zerfall (über 50%) der Festigkeit auch nach nur wenigen Wochen in kalkstabilisierter Erde.

Die spezielle Umfrage bezüglich Kontakt von PET-Material mit ausgehärtetem Beton oder Fertigteilen ergab sehr unterschiedliche Ergebnisse: Wenige Spezialisten in Deutschland sehen auch darin eine Gefahr für PET, sogar im Kontakt mit längst erhärteten Fertigteilen, die im Regen standen, oder abgewaschenem Beton. Ohne Bedenken lassen Ingenieure in Frankreich, Belgien und den Niederlanden das Berühren von Polyester mit Betonfertigteilen zu. Allgemein gelten mit PVC überzogene Geogitter aus PET als kaum gefährdet, weil speziell geschützt. Herstellerangaben:

- A4 = 1,15 für Fortrac bei pH = 9,0 bis 9,5; alkalisch
- 1,1 für Fortrac bei pH = 2,0 bis 4,0; sauer
- 1,0 für Fortrac bei pH = 4,1 bis 8,9; neutral, da alle mit PVC ummantelt

Empfehlung:

- A4 = 1,1 jedoch PET nur in neutraler Umgebung einsetzen, also

bei pH = 4 bis 8,5. Kein direkter Kontakt mit Beton oder Kalk

PP, PE und HDPE gelten als chemisch beständig, sowohl in saurem wie in alkalischem Milieu. Die Einschränkungen bezüglich pH-Wert gelten daher nicht für diese Materialien.

A4 = 2,0 nach EBGEO, falls Witterung, Licht und UV-Strahlung oder andere Mikroorganismen einwirken.

Empfehlung:

A4 = 1,0 wenn sichergestellt ist, dass die Einflüsse ausbleiben infolge Witterung, UV-Licht, Mikroorganismen, Chemikalien

A4 = 1,1 falls diese Einflüsse nicht ganz auszuschliessen sind
1,1 gilt als vorsichtiger Mittelwert, in USA, Frankreich, auch für FLN, Tricon, Tensor.

A5 – Fabrikationstoleranz (neu, in Ergänzung zu EBGEO)

A5 erfasst einen neuen Abminderungsfaktor, bedingt durch die Fabrikationstoleranz. Frühere Herstellerangaben und viele Prospekte geben die Zugfestigkeit von Geotextilien als Mittelwert einiger Versuche an.

Für alle Baumaterialien, wie auch für Beton und Stahl, gilt die Festigkeitsangabe als garantierter Mindestwert. Gemeint ist damit die 95%-Fraktile. Diese meist allgemein übliche Bedingung gilt jedoch nicht immer für Geotextilien. Der neue Produktkatalog des SVG [4] löste das Problem, indem er seit zwei Jahren den garantierten Mindestwert anstelle des vorher üblichen Mittelwerts angibt.

Angaben aus älteren Produktelisten enthalten oft noch den Mittelwert, «Nominalwert», «Durchschnittswert» oder den «oft erreichten Wert». Beträgt die Streuung beispielsweise ± 12% und die Streuung von Batch zu Batch ± 5%, so gilt für A5 etwa:

A5 = 1,17 Der Unterschied zwischen garantiertem Mindest- und Nominalwert kann somit signifikant sein.

Empfehlung:

A5 = 1,0 aber nur nach Kontrolle (garantierter Mindestwert), z.B. nach Produktkatalog SVG, sonst oft ca. 1,1 bis 1,3

Teilsicherheit γ_B

USA, Kanada und auch Deutschland verlangen einen Teilsicherheitsbeiwert γ_B der Bewehrung: $\gamma_B = 1.40$ nach DIN V 1054-100.

7
Abminderungsfaktoren – hier die Interaktionskoeffizienten – betreffend die Interaktion von Geotextilien und Geogittern im direkten Kontakt mit dem Boden

8
Folgerungen aus den Partialsicherheiten: Minimal geforderte Gesamtsicherheit nach französischer Norm für Geotextilien bei Armierungen

C_i bzw. $C_{ds} = 0,70 - 0,75$	für feinkörnige Böden ML, CL
C_i bzw. $C_{ds} = 0,75 - 0,85$	für mittlere Sande SM, SW, SP
C_i bzw. $C_{ds} = 0,85 - 0,90$	für dichte, gestufte Kiese u. Sande, GM, GC, SM, SW
C_i bzw. C_{ds} - Werte	für knotensteife Geogitter liegen um 5 bis 15% höher, da sich ein Verkrallen (interlocking) einstellt, besonders mit grossen Kieskomponenten von 0,25 bis 50% der Maschenweite.
Empfehlung: $C_i = C_{ds} = 0,8$	typischer Mittelwert für normale Verhältnisse

Gesamtsicherheit GS:	PET Polyester	PP Polypropylen PE Polyethylen
Wenig aggressive Umgebung:	min. 3,3	min. 6,6
Aggressive Umgebung:	min. 4,5	max. 9,0

Zu den Abminderungsfaktoren besteht ein Unterschied: Die Abminderungen berücksichtigen die tatsächliche Schwächung der Geotextilien infolge verschiedener Einflüsse. D.h. die Messung der Kurzzeitfestigkeit im Labor gibt nicht die wesentlich geringere Festigkeit unter Langzeitbeanspruchung an. Demgegenüber berücksichtigt der γ_B -Wert den echten Sicherheitszuschlag, wie auch bei anderen Baustoffen (Beton und Stahl) üblich.

$\gamma_B = 1,4$ nach EBGEO als Partialsicherheitsfaktor
1,3-1,5 USA, Kanada

In gewissen Ländern und bei verschiedenen Unternehmern wird dieser Zuschlag oft vergessen, was offensichtlich nicht fachgerecht ist.

Gesamtsicherheit (totaler Wert aus Abminderung und Sicherheit)

Die Gesamtsicherheit GS der Beanspruchung von Geotextilien in Stützkonstruktionen charakterisiert den Unterschied zwischen Kurzzeitfestigkeit F_{kurz} und zulässiger Beanspruchung F_{zul} , gemäss der anfangs zitierten §Formel.

Diese moderne Definition stimmt nicht ganz mit jener in den USA üblichen überein (γ_B nicht eingeschlossen). Für jedes Projekt ist es wichtig, jeden einzelnen Abminderungs- und Sicherheitsfaktor sorgfältig zu wählen. Dem Praktiker fällt jedoch auf, dass diese Auswahl oft mit einer verdeckten Tendenz bestimmte Ziele zu erreichen verbunden wird. So tendiert der unerfahrene Ingenieur zu eher höheren Zuschlägen, um alle Gefahren sicher abzudecken, während Unternehmer und Lieferanten im Preiskampf dazu neigen, durch geringe Abminderungs- und Sicherheits-

faktoren die Liefermenge klein zu halten. Das erscheint schmerzloser, als durch Preisnachlässe den angestrebten tiefen Offertpreis zu erzielen.

Daraus resultiert ein Bauwerk von geringerer Sicherheit und daher von versteckter geringerer Qualität. Zudem wirkt sich die Tendenz knapper Abminderungs- und Sicherheitszuschläge schädlich auf das Gelingen und damit auf das Vertrauen in diese moderne Technologie aus. Aus der Sicht des Planers und des Bauherrn bleibt dieses Vorgehen fraglich, da die Gesamtkosten für Geotextilarmierungen nur einen sehr kleinen Prozentsatz der gesamten Baukosten ausmachen und sich daher das erhöhte Risiko aus der Sicht der Bauherrschaft oder Bauleitung nicht lohnt.

Um dieses nicht nur in der Schweiz bestehende Dilemma zu lösen, verlangt die französische Norm einen minimalen Gesamtsicherheitsfaktor nach Bild 8. Die geforderten Minimalwerte $GS \geq 3,3$ für PET und $\geq 6,6$ für PP stimmen mit der Erfahrung in der Schweiz gut überein. Offensichtlich bewirkt die Vorschrift, eine minimale Gesamtsicherheit der Geotextilien einzuhalten, um fragwürdige Sicherheitskoeffizienten auszuschliessen und den Bauherrn mit einer angemessenen Menge Geotextilien zu beliefern. So gelingt es, die Konkurrenzsituation auf Kosten der Sicherheit weniger zu verzerren.

Aus diesem Grund erscheint diese französische Vorschrift taktisch und technisch zweckmässig, besonders wenn sie aufgrund spezieller Verhältnisse und belegter Versuchsergebnisse flexibel gehandhabt wird. Die Empfehlung lautet: In Ausschreibungen für geotextilarmierte Bauten den minimalen Gesamtsicherheitsfaktor

Felix P. Jaecklin erhält den Preis «For Excellence in Technology»

Felix P. Jaecklin wurde von der Internationalen Gesellschaft für Erosion Control mit dem Preis «For Excellence in Technology» [5] für die Planung, Bemessung und Ausführung eines innovativen, umweltfreundlichen Projektes geehrt: eine besonders hohe Stützmauer, die ausser durchgehend begrünt und gesichert ist mit eingebetteten Geotextilien. Die erstellte Stützmauer demonstriert die Möglichkeiten der neuesten Technologie mit speziellen Erd-Gabionen. Die Vegetation der Aussenfront bildet einen wichtigen Eckpunkt dieser Baumethode: Die Vegetation schützt mit ihren Blättern und dem Wurzelwerk den Hang vor Erosion selber und behält die Erdauffüllung an Ort. Das ist weit kostengünstiger und erheblich attraktiver als Betonstützmauern.

Die Internationale Gesellschaft für Erosion Control vergab den Preis in Anerkennung für ein aussergewöhnliches Projekt anlässlich der Eröffnungszereemonie ihrer Konferenz in Palm Spring, Kalifornien.

Dieses Projekt einer geotextilarmierten Wand an der Autobahn von Madrid nach La Coruña bei Ponferrada erreicht eine maximale Höhe von 28 Metern. Die vertikal gemessene Wandfläche beträgt 8500 m². Die Wand ist um 60° geneigt. Schlüsselfunktion dieser Bauweise bilden die speziellen Gabionen in der Frontfläche dieser Konstruktion. Die verwendeten Gabionen im Geogreen-System wurden von Felix P. Jaecklin entwickelt und zeichnen sich aus durch die Herstellung der Körbe in speziellen Schalungen mit um 60° geneigter Vorderfront, die aufeinander gesetzt eine bündige Frontfläche bilden.

Ein Artikel über das Bauwerk erschien im Schweizer Ingenieur und Architekt [6].

vorzuschreiben oder mindestens vor der Vergabe zu kontrollieren.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Geotextilbewehrte Stützmauern werden nach den bisherigen Ingenieurmethoden bemessen, ähnlich Nagelwänden und verankerten Baugruben, nämlich mit einem bergseitig wirkenden Erddruck und den dazu erforderlichen Verankerungskräften. Diese Kräfte müssen im Inneren des Stützkörpers aufgenommen und in den Untergrund weitergeleitet werden.

Erfahrungsgemäss werden die untersten Geotextillagen am stärksten beansprucht, weil sie als Verankerung des bewehrten Erdkörpers wirken. Dies gilt speziell gegenüber den kritischen kombinierten Gleitflächen, die im unteren Bereich durch die Geotextilien und weiter oben dann in der Hinterfüllung dahinter verlaufen. Die Literatur erwähnt diesen Lastfall selten und so wird dieser bei der Bemessung oft übersehen. Demgegenüber erwiesen sich für Geotextilwände andere oft

nachgewiesene Fälle als unnötig, weil selten kritisch. Gemeint sind die Berechnung des Kippens und der Tragfähigkeit.

Berechnungen von Hand oder mit Diagrammen eignen sich nicht zum Auffinden der kritischen Gleitflächen. Deshalb werden die kritischen untersten Lagen kaum genügend bemessen. Mehrere der üblichen Computerprogramme überschätzen die Sicherheit aus demselben Grund. Darum sind für grössere Objekte eingehende geotechnische Untersuchungen zum Festlegen der massgebenden Bodenkennwerte erforderlich. Dazu gehört auch die Wahl moderner Computersoftware, welche diese kritischen Gleitflächen auch wirklich finden, damit die kritischen unteren Geotextilien genügend stark und genügend lang bemessen werden.

Eine separate und besonders wichtige Vorbereitung betrifft das Festlegen der Grundlagen zur Bemessung, nämlich der Interaktionskoeffizienten je nach Bodenart und Geotextilien, der Abminderungsfaktoren speziell ausgerichtet auf die zur Verwendung gelangenden Geotextilien und der Teilsicherheit der Geotextilien, z.B. $\gamma_B = 1,4$ nach EBGE0.

Keine dieser Festigkeits-Berechnungen gibt die Anforderungen zusätzlicher Verstärkungen und Verlängerungen der obersten Geotextillagen an, um Deformationen und Risse infolge üblicher Setzungen zu vermeiden. Dazu sind konstruktive Überlegungen zur Wandhöhe, Wandneigung, Verkehrsbelastung, Drainage und spezielle Anforderungen an Schüttmaterialien im Frontbereich wichtig.

Grundsätzlich ist somit die Bemessung von grossen Stützmauern mit Geotextilbewehrung bekannt und in den wesentlichen Zügen dargelegt. Damit eröffnet sich für die Ingenieure unserer Generation die Möglichkeit, Stützbauwerke wesentlich kostengünstiger zu planen und zu erstellen als dies bisher der Fall war. Besonders erfreulich erscheint dabei die umweltfreundliche Gestaltung mit vollflächiger Bepflanzung, was zu fördern ist.

Weitere Studien sind erforderlich um die Kenntnisse über die im Ausland üblichen Abminderungs- und Sicherheitskonzepte in ihrer Tiefe zu erfassen und auszuwerten.

Adresse des Verfassers:

Felix P. Jaecklin, dipl. Bauing., Dr. sc. techn. ETH, Geotechnikbüro Dr. Felix P. Jaecklin GmbH, Kronengasse 41, 5400 Baden

Literatur

- [1] *Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.*: EBGE0, Empfehlungen für die Bewehrungen aus Geokunststoffen. Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (DGGT) 1997, Verlag Ernst & Sohn, BRD
- [2] *Leschinsky D.*: Reslope Version 3. Computer software, Adama Engineering, Inc., Newark, Delaware, USA, www.reslope.com
- [3] *Gourc J.P.*: Retaining Structures with Geosynthetics: A Mature Technique, but with some Questions Pending... Keynote Lecture, Eurogeo, Maastricht 1996, page 27
- [4] *Rüegger R., Jaecklin F.P., Ammann J.F.*: Geotextilhandbuch des SVG Schweizerische Vereinigung der Geotextilfachleute. Empa St. Gallen
- [5] *ACS, DSP, Jaecklin F.P.*: International Conference for Erosion Control, Palm Springs, February 23, 2000, award winner for Excellence in Technology, ceremony, poster, and oral paper
- [6] *Jaecklin F.P.*: Sehr hohe geotextilarmierte Stützmauer. Schweizer Ingenieur und Architekt, 117. Jhg, Nr. 20, 21. Mai 1999, Seite 25
- [7] *Rimoldi P., Jaecklin F.P.*: State-of-the-Art Report, Design and Construction of Vegetated Retaining Walls. Workshop on Green Faced Walls, Euro Geo 1, Maastricht, NL, Oktober 1996
- [8] *Jaecklin F.P.*: Hangsicherungen, geotextilarmierte Stützmauern. Dokumentation Locher Hauser, 2.9.96
- [9] *Jaecklin F.P.*: Software assists in design of highest European geosynthetic-reinforced wall. GFR, Geotechnical Fabrics Report, April 1999, Vol. 17, Number 3, S. 40
- [10] *Jaecklin F.P., Gourvat D.*: Géosynthétiques et végétalisation. Rencontres Géosynthétiques, 4ième colloque francophone, Bordeaux, 12. Octobre 1999, Volume 2, page 51 et Route Actuelle No. 90, Décembre 1999, page 43