

Stand sicherheitsnachweise für Oberflächendichtungssysteme

Anmerkungen zum Lastfall Einbau geschichteter Systeme mit Geokunststoffen

Dr.-Ing. Fokke. Saathoff und Dipl.-Ing. Katja Werth
BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Lemförde

1 Einleitung

Zur Reduzierung von Kosten und zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität werden geschichtete Systeme, bestehend aus Geokunststoffen in Kombination mit Erdstoffen heute standardmäßig in Oberflächendichtungssystemen von Deponien eingesetzt. Die Anordnung von Geokunststoffen wie Kunststoffdichtungsbahnen, Schutzlagen, Trenn- und Filterlagen sowie Dränelementen in Oberflächendichtungssystemen sind selbstverständliche Bauweisen. Bedingt durch die jahrelange wissenschaftliche Begleitung und durch den heute zur Verfügung stehenden hohen Standard in der Produktion, erreichen diese Baustoffe Langzeitbeständigkeiten, die mit konventionellen Bauweisen gleichwertig sind. Bedingung hierfür ist der einwandfreie Einbau der geschichteten Geokunststoffsysteme. Unter Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen ist die Standsicherheit der Systeme im Endzustand und für Einbauzustände nachzuweisen. Der Lastfall „Einbauzustand“ wurde und wird dabei gegenüber dem Lastfall „Endzustand“ in der Praxis häufig vernachlässigt. Ein Grund hierfür mag die Vielzahl an zu berücksichtigenden Beanspruchungen sein, deren Größe und Zusammenwirken im Vorfeld meist nicht bekannt sind.

Erst nachdem erste Probleme mit der Standsicherheit während der Einbauphase auftraten – die Grenzen der möglichen ausführbaren Böschungsneigungen im Zusammenhang mit den Kontaktreibungswinkeln der geosynthetischen Schichten und der Belastung aus Baugerät waren erreicht – wurde die Standsicherheit im Einbauzustand genauer untersucht.

Leider bieten die vorliegenden Regelwerke oder Empfehlungen keine ausreichenden Hinweise zur differenzierten Bemessung geschichteter Systeme. Die in Deutschland verbreitete EBGEO (1997) beispielsweise berücksichtigt zwar den Lastfall Einbauzustand, die dargestellten Berechnungsansätze sind jedoch schon im Ansatz fehlerhaft und führen zu Missverständnissen. Aus Sicht der Autoren muss ein Bemessungsansatz jedoch die tatsächlichen Randbedingungen - und damit auch dynamische Einflüsse aus dem Einbauvorgang - erfassen können und mit einem übersichtlichen Modell differenzierte Aussagen zur Standsicherheit erlauben. Der dem Beitrag zugrundeliegende Gedanke zum Lastfall Einbauzustand wurde erstmalig Mitte 1999 in [4] veröffentlicht.

2 Standsicherheit von Oberflächendichtungssystemen

Differenzierte Bemessungen zur Standsicherheit von Oberflächendichtungssystemen führen zu überraschenden Ergebnissen. Häufig ist nicht der Endzustand als kritisch zu werten, sondern der Einbauzustand aufgrund zusätzlicher statischer und dynamischer Lasten, hervorgerufen durch das Befahren des Oberbodens mit Baugeräten. Das Resultat ist, dass u.U. für eine im Endzustand standsichere Oberflächendichtung im Einbauzustand der Einsatz eines Bewehrungselementes erforderlich wird oder das Einbauverfahren zu optimieren ist.

Den Beanspruchungen des Dichtungssystems unter dem Einfluss von Baufahrzeugen kommt auch unter dem Aspekt der eingetragenen Schubspannungen und daraus resultierenden Verschiebungen des Dichtungssystems eine größere Bedeutung zu, als ihnen in der Praxis eingeräumt wird.

Da der Oberboden bereits aufgetragen ist bevor das Dichtungssystem befahren wird, wird eine lokale Überbeanspruchung des Systems in den seltensten Fällen unmittelbar sichtbar. Ein Versagen mit folgendem Abrutschen des Baugerätes und Komponenten des Dichtungssystems als Anzeiger einer unzureichenden Standsicherheit ist nicht akzeptabel. Im Sinne der Qualitätssicherung muss der Eintrag von Lasten oder Verschiebungen in die Dichtungskomponenten jedoch insbesondere bei Oberflächendichtungssystem im Deponiebau vermieden werden. Ein ausreichender Sicherheitsabstand im Standsicherheitsnachweis kann hier dienlich sein und Anhaltswerte liefern.

3 Berechnungsgrundlagen

3.1 Endzustand

Zur Beurteilung der Standsicherheit geschichteter Systeme ist der charakteristische Kontaktreibungswinkel bzw. die Scherfestigkeit der kritischen Schichtgrenze aus dem geschichteten System aus Geokunststoffen und Erdstoffen abzuleiten. Unter Ansatz der Kennwerte dieser böschungparallelen Schichtgrenze sind die haltenden und treibenden Kräfte in Böschungsfallrichtung gegenüberzustellen.

Das Verhältnis der haltenden Kräfte zu den treibenden Kräften spiegelt das erreichte Sicherheitsniveau wieder. Für den Lastfall „Einbauzustand“ ist nach der in Deutschland gültigen DIN 4084 ein Sicherheitsbeiwert $\eta \geq 1,2$, für den Lastfall „Endzustand“ ein Sicherheitsbeiwert $\eta \geq 1,3$ zu erreichen.

Bereits zur Ermittlung der Standsicherheit im Endzustand ist eine Vielzahl von Randbedingungen zu berücksichtigen. Aspekte sind:

- Böschungsneigung
- Böschungslänge
- Schichtmächtigkeit des Oberbodens
- maßgebende Kontaktreibungswinkel aller Schichtgrenzen
- innere Scherfestigkeit der Böden und der Geokunststoffe unter Berücksichtigung der Langzeitscherfestigkeit
- Strömungskräfte infolge eines Dränabflusses
- ggf. Schneelasten, Windlasten auf Bauwerke oder Bewuchs etc.

3.2 Einbauzustand

Unübersichtlicher wird die Erfassung der Beanspruchungen aus den Einbauverfahren. Bei einer Befahrung des Dichtungsaufbaus nach Aufbringen eines Oberbodens in definierter Schichtmächtigkeit bzw. zum Einbau dieser Schicht/Schichten werden sowohl statische Kräfte aus dem Eigengewicht des Baufahrzeuges als auch dynamische Kraftanteile aus der unmittelbaren Fahrzeugbewegung wirksam.

Über den korrekten Ansatz zur Berechnungen der dynamischen Lasten lässt sich sicher kontrovers diskutieren. Bei der Vielzahl der tatsächlich im Deponiebau anzutreffenden Baufahrzeuge und deren sehr spezifischen Belastungen muss es Ziel sein, diese Unterschiede erfassen und berücksichtigen zu können. Der Ansatz eines pauschal gewählten „Schwingbeiwertes“ für alle Fahrzeuggruppen - dieser Ansatz findet sich in den EBGEO - kann aus Sicht der Autoren kein optimales Ergebnis sicherstellen. Vielmehr sind in jedem Fall für Baufahrzeuge kennzeichnend

- das Eigengewicht,
- die Abmessungen, hier insbesondere der Aufstandsflächen der Baufahrzeuge zum Boden,
- die Fahrgeschwindigkeit und
- die Bremsverzögerung.

Die aufgeführten Randbedingungen können nur im richtigen Zusammenspiel zu befriedigenden Ergebnissen führen. Der nachfolgend beschriebene sogenannte BBG Ansatz verknüpft die Randbedingungen aus Geometrie, Dichtungssystem und Einbaubeanspruchungen, soweit diese praxisnah ermittelt werden können.

4 BBG-Ansatz zum Nachweis der Standsicherheit

4.1 Randbedingungen

Die aus der Befahrung des Dichtungssystems zu bestimmenden Kraftanteile (haltend, treibend und dynamisch) werden über einen Lastausbreitungswinkel in Abhängigkeit von der Schichtstärke des Oberbodens auf das Dichtungssystem und eine ggf. kritische Fuge projiziert. Die tatsächlich in den Berechnungen im Einbauzustand anzusetzenden Lasten je Quadratmeter werden somit geringer als die von den Baugeräteherstellern für die Bodenpressung angegebenen Werte.

Die aus der Befahrung in das System eingetragenen Schubkräfte (Abb. 1) werden sowohl über Reibung in den Schichtgrenzen als auch u.U. durch eine Stützung des Oberbodens gegen bereits aufgetragenen Boden abgetragen. Der letztgenannte Aspekt entfällt jedoch bei geringen Schichtmächtigkeiten des Oberbodens oder gering verdichtetem Oberboden. Auch bei größeren Mächtigkeiten des Oberbodens sind bei geringer Verdichtung zunächst größere Verschiebungen erforderlich, bevor ein nennenswerter passiver Erddruck aufgebaut wird. Hierbei können bereits Überbeanspruchungen in dem geschichteten System aus Geokunststoffen auftreten, die erst nachträglich zu sichtbaren Schäden führen. Im Regelfall kann die Wirkung eines "Stützfußes" für den Bauzustand daher nicht herangezogen werden.

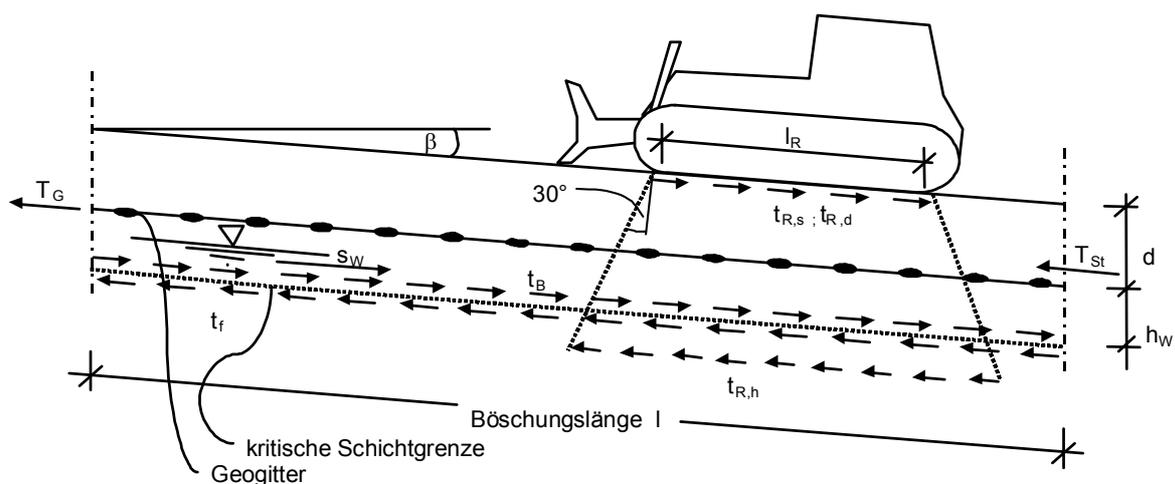


Abb. 1: Kräfteansatz zum Nachweis der Standsicherheit [4]

4.2 Ansatz des Baugerätes

Die tatsächlich durch das Baugerät in das Dichtungssystem eingetragenen Kräfte setzen sich aus statischen und dynamischen Anteilen zusammen. Aus dem Eigengewicht des Baugerätes werden sowohl Kraftanteile normal zu einer böschungsparellen Schichtgrenze als auch in Böschungsfalrichtung wirksam (statische Anteile). Im ersten Fall ergeben sich über eine Erhöhung der Reibung in den Schichtgrenzen „haltende“ Kraftanteile, im zweiten Fall „treibende“ Kraftanteile.

Die aus einer Bremsverzögerung des Baugerätes resultierenden weitgehend böschungsparellen Kräfte – ungünstig wirkend bei einer hangabwärtsgerichteten Fahrtrichtung – werden dagegen nur „treibend“ wirksam (dynamischer Anteil).

Folgender Anwendungsfall (Einbau eines Oberbodens in einer Böschung mit Kettenraupe) soll exemplarisch betrachtet werden:

- Böschungneigung $\beta = 20^\circ$
- Reibungswinkel der kritischen Scherfuge $\text{cal } \delta = 27^\circ$
- Befahrung der Böschung im Bauzustand mit einer Kettenraupe mit einem Gesamtgewicht von $G_R = 13 \text{ t}$
- weitere Kennwerte des Baufahrzeuges nach Herstellerangaben:
 - Länge der Aufstandsfläche $l_R = 2,7 \text{ m}$ (entsprechend der Kettenlänge);
 - Breite der Ketten $b_R = 0,9 \text{ m}$;
 - Fahrgeschwindigkeit $v = 2,8 \text{ m/s}$;
 - Zeit, die das Baufahrzeug bis zum Stillstand benötigt: $t = 1,4 \text{ s}$
- Einbau des Oberbodens in Schichtmächtigkeiten d_i von je $0,5 \text{ m}$ bis zu einer Gesamtmächtigkeit d von $2,0 \text{ m}$.
- Die Böschungslänge beträgt maximal 30 m und wird als Variable angesetzt.

Berechnet wird der erreichte Standsicherheitsfaktor η in Abhängigkeit von der Böschungslänge l [m] und der Mächtigkeit des Oberbodens d_i [m] bei der Befahrung.

Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass bei einem Ansatz des Baufahrzeuges mit statischen und dynamischen Kraftanteilen nach BBG gegenüber dem Ansatz eines „Schwingbeiwertes“ deutlich geringere Sicherheitsbeiwerte ermittelt werden.

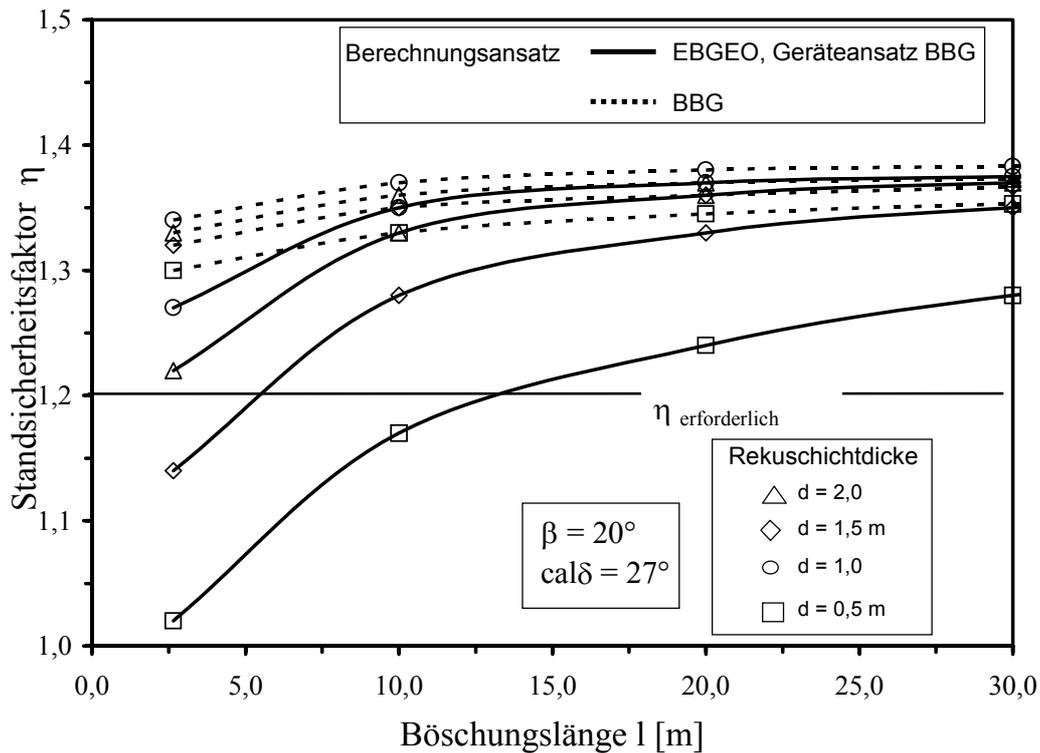


Abb. 2: Vergleich der Standsicherheitsergebnisse bei unterschiedlichen Ansätzen des Baugeräts [7]

Aus der Gegenüberstellung eines Lastanteiles aus dem Baugerät, der konstant bleibt, und einem mit zunehmender Böschungslänge linear zunehmenden Betrag aus der in der Schichtgrenze mobilisierten Reibung ergibt sich eine asymptotische Annäherung des errechneten Standsicherheitsfaktors an einen konstanten Wert. Der Unterschied in den Berechnungsansätzen für das Baugerät wirkt sich signifikant im Bereich kleiner Böschungslängen aus.

Damit wird der Einfluss der Mächtigkeit der befahrenen Schüttlage des Oberbodens deutlich: Je größer die Schichtmächtigkeit, desto günstiger ist die Lastverteilung und der Anteil der treibenden dynamischen Kraftanteile fällt kleiner aus. Das Beispiel verdeutlicht, dass die Berücksichtigung der Baugerätedaten und der Schichtmächtigkeiten nach dem BBG-Ansatz unter bestimmten Randbedingungen eine nicht ausreichende Standsicherheit ergibt (z.B. Schichtmächtigkeiten des Oberbodens $d_1 = 0.5 \text{ m}$ und Böschungslängen $l = 10 \text{ m}$), die nach bisheriger Berechnung eine ausreichende Sicherheit ergab.

4.3 Einführung des Grenzwertes κ

Neben der Diskussion des Bemessungsansatzes für das Baugerät ist die grundsätzliche Frage zu erörtern, inwieweit örtlich begrenzte Belastungen eines Dichtungssystems durch ein Baugerät durch u.U. günstige Randbedingungen, die

sich aus der Gesamtsituation einer Böschung ergeben (z.B. einer flachen Neigung oder eines guten Verbundverhaltens in den Schichtgrenzen) kompensiert werden können. Unter den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Gründen steht es aus Sicht der Autoren außer Frage, dass lokal durch ein Baufahrzeug in ein Dichtungssystem eingetragene Kräfte nicht durch über eine lange Böschung aufsummierte haltende Reibungskräfte aufgefangen werden können. Die „Scholle“, auf der das Baufahrzeug wirkt, ist zunächst grundsätzlich unabhängig von der Gesamtböschung zu beurteilen. In Fortführung der in Abbildung 2 beispielhaft dargestellten Berechnungsergebnisse ergibt sich damit die in Abbildung 3 dargestellte Situation.

Dargestellt sind in Abbildung 3 zum Vergleich die bereits in Abbildung 2 enthaltenen Ergebnisse für den Ansatz des Baugerätes nach BBG (asymptotische Annäherung des erreichten Sicherheitsbeiwertes an einen konstanten Wert). Dem gegenübergestellt sind die Berechnungsergebnisse nach dem vollständigen in Kapitel 5 angeführten BBG-Ansatz. Für die gewählte Beispielböschung, befahren durch eine leichte Kettenraupe mit ca. 13 t Gesamtgewicht, wird, unabhängig vom Standort der Kettenraupe auf der Böschung, ein konstanter Sicherheitsbeiwert erreicht, da nicht die Gesamtböschungslänge in die Berechnung eingeht sondern nur die Länge des Baufahrzeuges selbst. Unter sonst gleichen Randbedingungen ergibt sich für die oben dargestellten Berechnungsergebnisse ein ähnliches Bild, wenn ein geringerer Kontaktreibungswinkel, z.B. $\delta = 20^\circ$ statt 27° , angesetzt wird (Abb. 4).

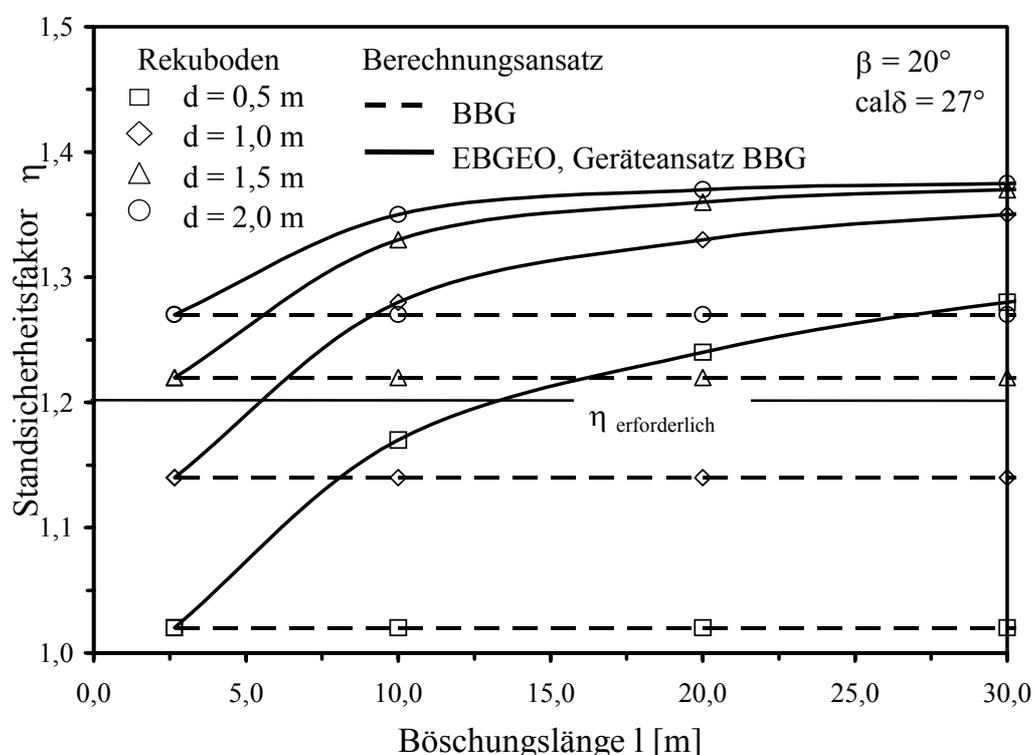


Abb. 3: Vergleich der Standsicherheitsergebnisse bei unterschiedlichen maßgeblichen Böschungslängen [7]

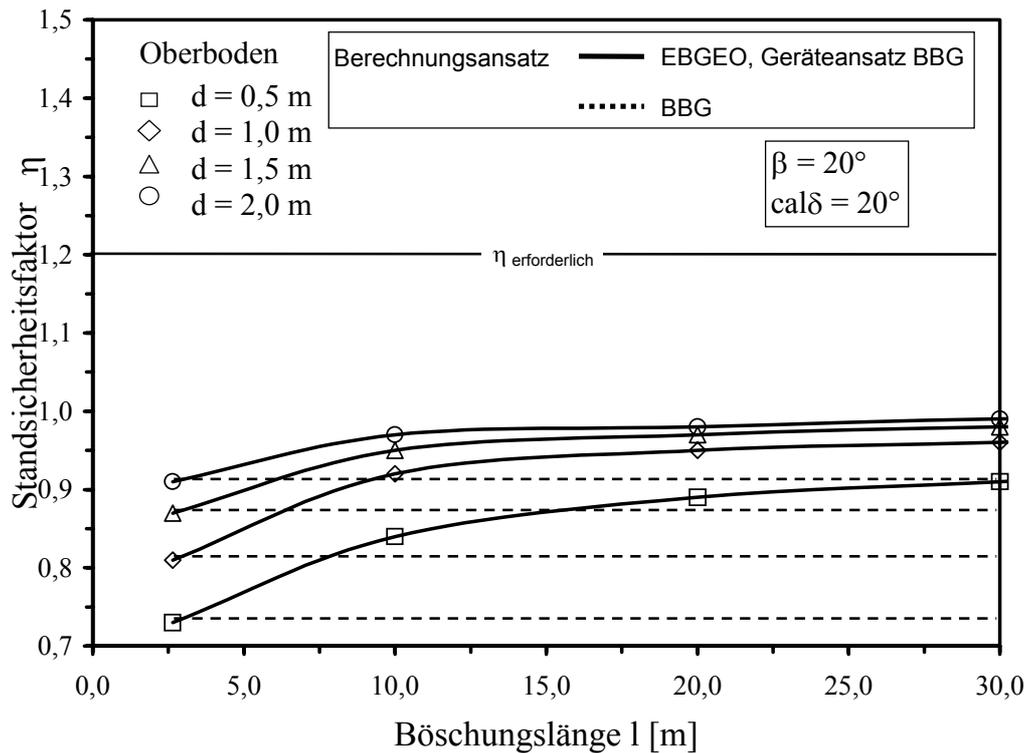


Abb. 4: Vergleich der Sicherheitsbeiwerte für eine Standsicherheitsberechnung mit $\text{cal } \delta = 20^\circ$ anstatt 27° [7]

In diesem Fall liegt die Standsicherheit insgesamt über alle betrachteten Böschungslängen unter der geforderten Standsicherheit von $\eta \geq 1,2$. Mit zunehmender Böschungslänge nähert sich der Standsicherheitsfaktor wiederum asymptotisch einem konstanten Wert. Der grundlegende Unterschied einer Böschung, die in sich bei Vernachlässigung von Einflüssen aus Baufahrzeugen weitgehend standsicher ist (Abb. 3, $\delta = 27^\circ$), und einer Böschung, die über alle Bereiche keine ausreichende Standsicherheit aufweist (Abb. 4, $\delta = 20^\circ$) ergibt sich erst aus der Betrachtung der Defizitkräfte, wie im Folgenden näher erläutert. Im Ergebnis wird eine Unterscheidung von zwei Fällen mit der Einführung eines Verhältniswertes $1,2 < \kappa < 1,2$ erforderlich.

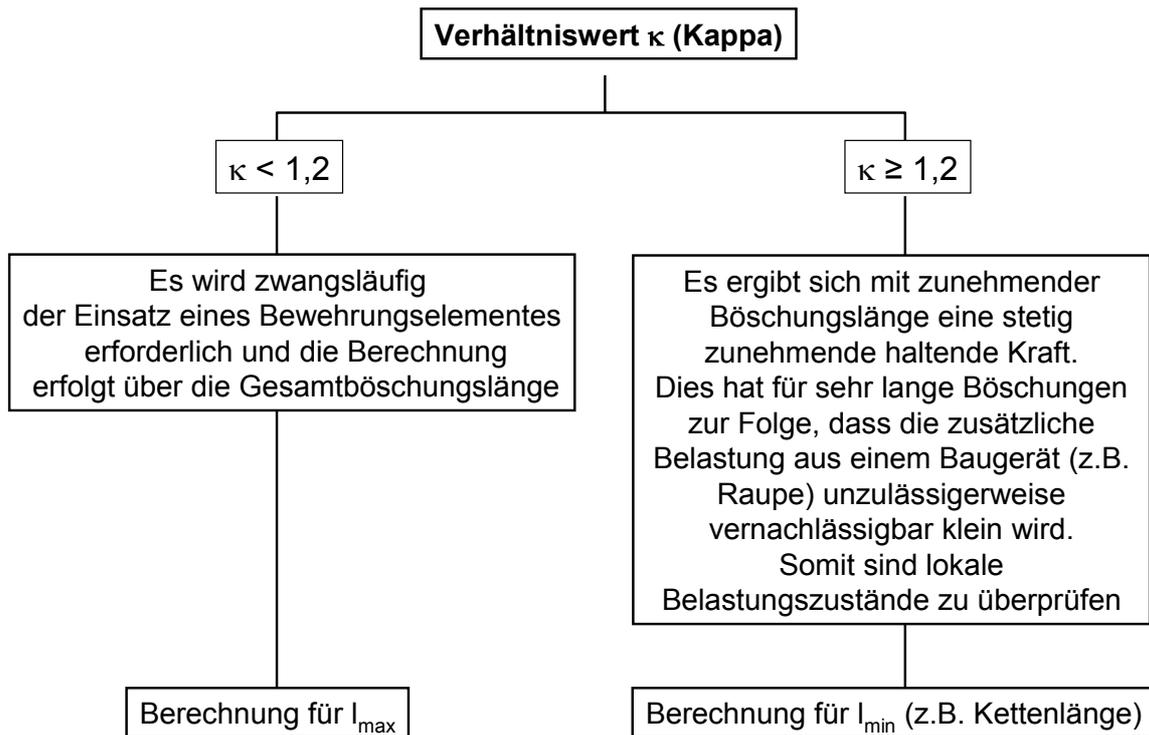


Abb. 5: Unterscheidung der Standsicherheit mit Einführung eines Verhältniswertes κ

4.3.1 Fallunterscheidung $\kappa < 1,2$

Für den Fall, dass eine Böschung durch unzureichende Reibungsbeiwerte innerhalb eines geschichteten Systems als nicht standsicher eingestuft werden kann (d.h. der geforderte Sicherheitsbeiwert von 1,2 im Bauzustand wird bereits ohne Befahrung nicht erreicht), ist ein zusätzliches Bewehrungselement anzuordnen, das die über die Böschungslänge aufsummierten Defizitkräfte an der Böschungskrone abträgt.

Durch die Befahrung im Bauzustand ergibt sich eine erhöhte Belastung. Der Betrag aus den zusätzlich treibenden dynamischen Lastanteilen des Baufahrzeuges ist zu der maximalen Defizitkraft an der Böschungskrone aufzuaddieren (Abb. 6). Der Grenzzustand einer ausreichenden Standsicherheit im Bauzustand ohne Befahrung wird im Folgenden als Verhältniswert im Grenzzustand κ [-] definiert.

In Abbildung 7 sind für die in Abbildung 4 dargestellten Berechnungsergebnisse die erforderlichen Zugkräfte in Abhängigkeit von der Böschungslänge aufgetragen, die von einem Bewehrungselement an der Böschungskrone abgetragen werden müssen. Das κ wurde in diesem Fall zu 0,99 errechnet.

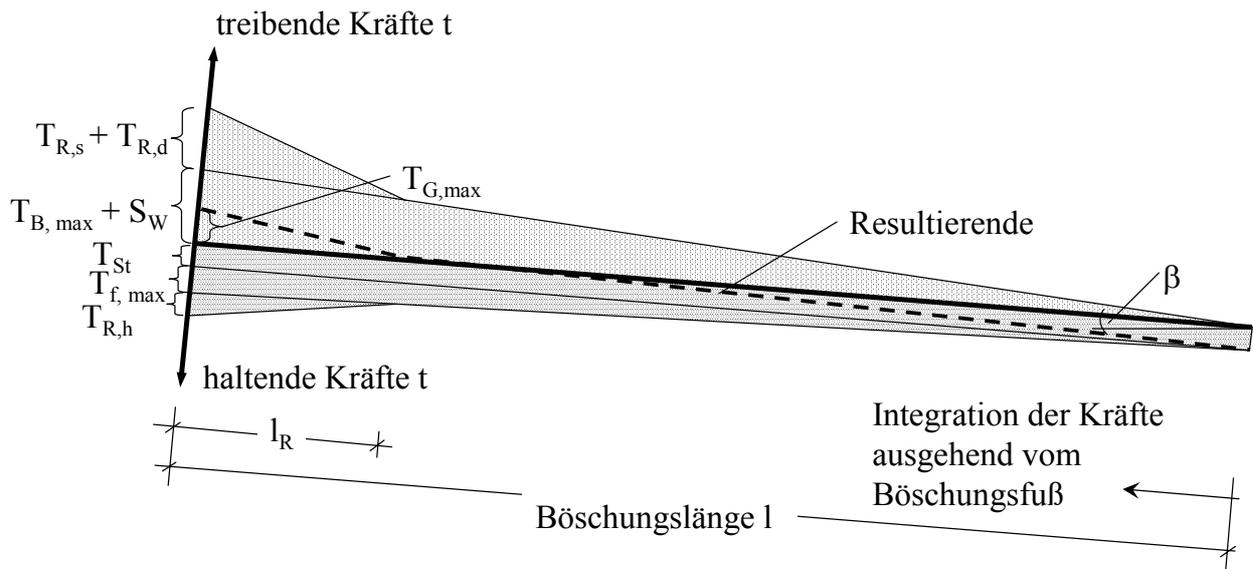


Abb. 6: maximal von einer Zugbewehrung aufzunehmende Kraft T_G für ein Verhältnis $\kappa < 1,2$

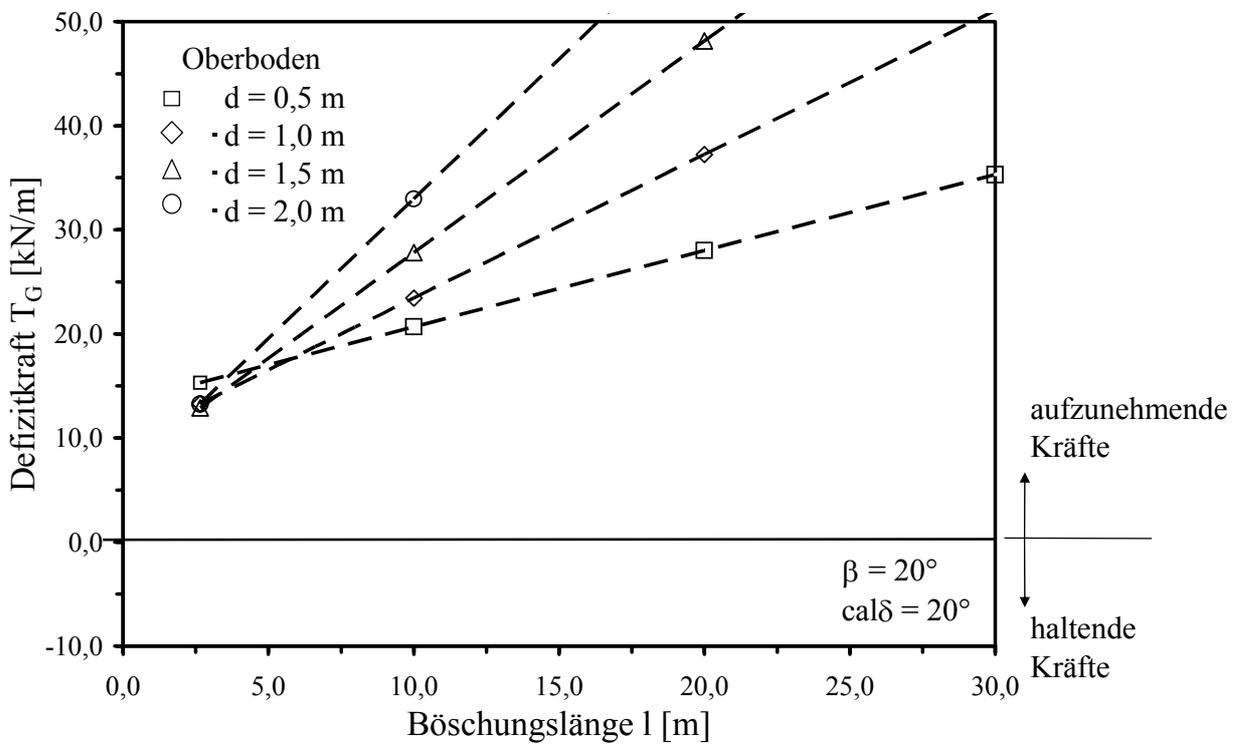


Abb. 7: Erforderliche Zugfestigkeit für die Ergebnisse zur Standsicherheit nach Abb. 4 ($\kappa < 1,2$)

4.3.1 Fallunterscheidung $\kappa \geq 1,2$

Im Gegensatz zu dem vorstehend beschriebenen Fall $\kappa < 1,2$ wird bei Böschungen, die aus den geometrischen Randbedingungen unter Beachtung des maßgebenden Kontaktreibungswinkels den Grenzwert $\kappa \geq 1,2$ erreichen, keine Bewehrung der Böschung selbst erforderlich (Abb. 8 und 9).

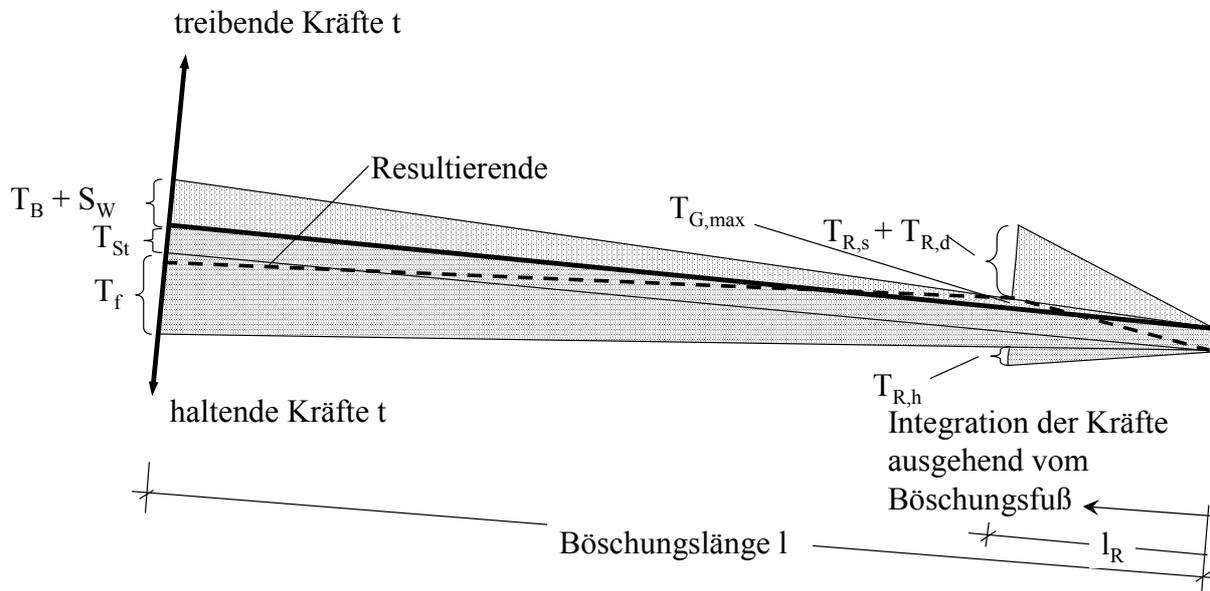


Abb. 8: maximal von einer Zugbewehrung aufzunehmende Kraft T_G für ein Verhältnis $\kappa \geq 1,2$

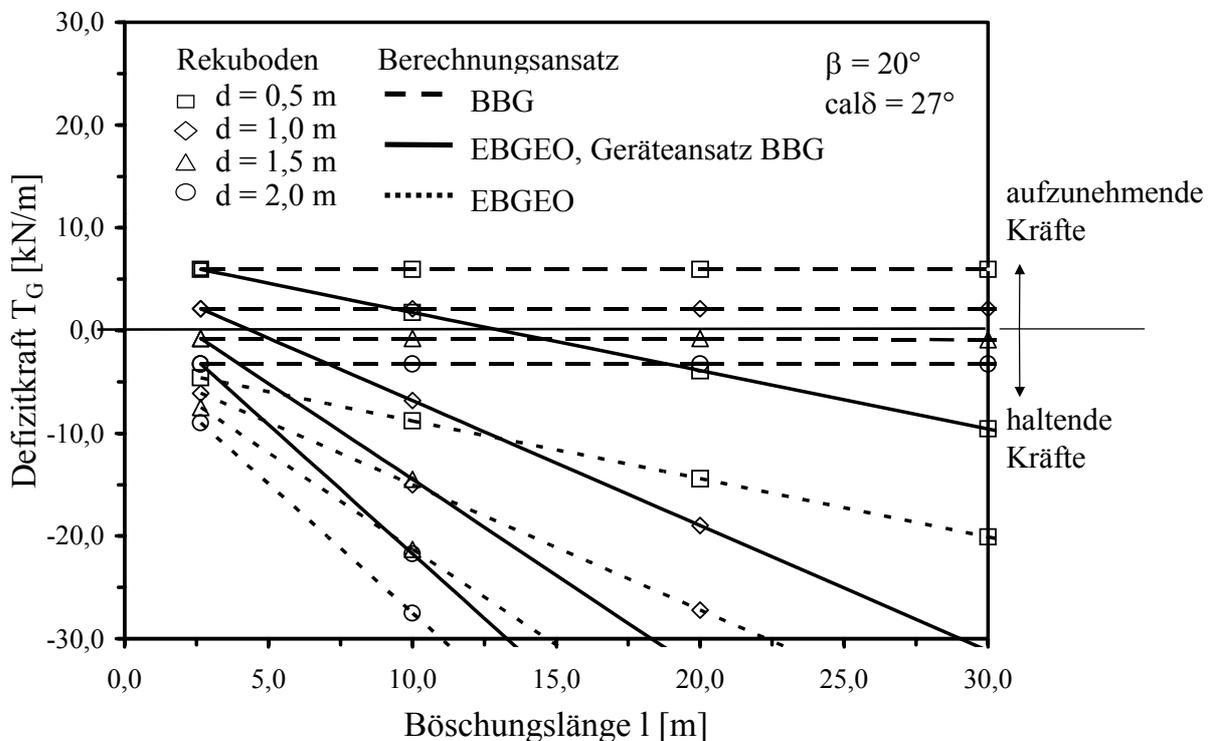


Abb. 9: Erforderliche Zugfestigkeit für die Ergebnisse bei verschiedenen Berechnungsansätzen ($\kappa \geq 1,2$)

Unter ungünstigen Randbedingungen - die in der Praxis jedoch häufig vorkommen - wird die lokale Sicherheit im unmittelbaren Einflussbereich eines Baufahrzeuges jedoch besonders bei einer Befahrung des Dichtungssystems auf dünnen Schüttlagen unterschritten (Abb. 3, Abb. 4). Für diesen Fall ist die Anordnung eines Bewehrungselementes, das ausschließlich lokale Unsicherheiten während der Bau-phase absichert, unabdingbar, es sei denn, es werden andere Randbedingungen gewählt (anderes Baugerät, verbesserte Kontaktreibungswinkel etc.).

4.4 Optimierungsspielraum

Der von der BBG aufgestellte Bemessungsansatz eröffnet hier die Möglichkeit einer differenzierten Betrachtung auf der Grundlage projektspezifisch verfügbarer Daten. Aus Abbildung 3 wird für die exemplarisch durchgeführte Berechnung deutlich, dass z.B. eine Erhöhung der Schichtmächtigkeit von 0,5 m auf 1,0 m, auf der eine erstmalige Befahrung des Dichtungssystems stattfindet, eine Erhöhung des erreichbaren Sicherheitsbeiwertes relativ zu dem erforderlichen Sicherheitsbeiwert von rd. 10% erbringt. Deutlicher schlägt sich dieses Ergebnis bei der Betrachtung der erforderlichen Zugfestigkeit eines Bewehrungselementes nieder (Abb. 9). Statt einer aufzunehmenden Zugkraft von 6,5 kN wird bei einer Erhöhung der Schichtmächtigkeit von 0,5 m auf 1,0 m nur eine Zugkraft von 2 kN gefordert. Ggf. kann dieser Betrag einem sonst vernachlässigten Adhäsionsanteil in der kritischen Schichtgrenze zugeordnet und auf ein zusätzliches Bewehrungselement verzichtet werden.

Zum Vergleich: Bei der Berechnung nach EBGEO (Abb. 9) ergibt sich im Gegensatz zu dem BBG-Ansatz, bei dem Defizitkräfte, d.h. aufzunehmende Kräfte, berechnet werden, für eine Böschungslänge von 20 m eine haltende Kraft von 27,2 kN/m. Hierdurch wird, wie in Abbildung 2 dargestellt, eine hohe Sicherheit suggeriert, die tatsächlich nicht vorhanden ist.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich bei Nutzung des BBG-Ansatzes aus der Anpassung der zulässigen Fahrgeschwindigkeit des Baufahrzeuges, einer günstigeren Lastverteilung durch breitere Ketten oder eines geringeren Betriebsgewichtes. Objektspezifisch kann so unter Einbeziehung der am Einbau Beteiligten, insbesondere der Baufirmen, mit geringem Aufwand und zumeist ohne zusätzliche Kosten eine Optimierung des Einbauvorganges zur Sicherung der Stand-sicherheit und im Sinne der Qualitätssicherung erfolgen.

5 Rechnerischer Nachweis zur Standsicherheit im Einbauzustand (LF2) nach BBG-Ansatz

5.1 Kurzzeichen

A	effektive Aufstandsfläche des Fahrzeuges unter Berücksichtigung der Lastausbreitung
a_v	Bremsverzögerung (m/s^2)
a'	Adhäsion der maßgebenden Kontaktfläche (kN/m^2), wird sicherheitshalber zu Null gesetzt
b_R	Breite der Raupenkette (m)
d	Dicke des Oberbodens (m)
d_i	Dicke d_1 bzw. d_{ges} des Oberbodens, auf der die Befahrung erfolgt (m)
g	Erdbeschleunigung ($10 m/s^2$)
G_R	Eigengewicht des Fahrzeuges (kN)
h_W	mittlere Aufstauhöhe (m)
h_S	Höhe des Stützfußes (m)
K_p	Erddruckbeiwert (-)
l_R	Länge der Raupenkette (m)
l	Böschungslänge (m)
s_W	Strömungskraft (kN/m^2)
t_B	Schubkraft in Böschungsfallrichtung (kN/m^2)
$t_{R,d}$	Schubkräfte infolge einer Vollbremsung des Fahrzeuges (kN)
$t_{R,s}$	Schubkraft aus Eigengewicht des Fahrzeuges (kN/m^2)
$t_{R,h}$	Reibungskraft in der kritischen Scherfuge aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges (kN/m^2)
t	Zeit, die das Fahrzeug bis zum Stillstand benötigt (s)
t_f	mobilisierte Reibungskraft in der kritischen Scherfuge (kN/m^2)
T_G	Zugkraft im Bewehrungselement (kN/m)
T_{St}	Stützkraft am Böschungsfuß (kN/m)
T_{max}	Summe der haltenden Kräfte (kN/m)
T_{vorh}	Summe der treibenden Kräfte (kN/m)
v	maximale Geschwindigkeit des Fahrzeuges (m/s)
β	Böschungsneigung ($^\circ$)
γ	Wichte des Bodens (kN/m^3)
γ_W	Wichte des Wassers ($10 kN/m^3$)
δ'	Reibungswinkel der maßgebenden Kontaktfläche ($^\circ$)
η	Sicherheitsbeiwert (-)

5.2 Treibende Kräfte

Schubkraft t_B

Die aus dem Eigengewicht des Oberbodens resultierende Schubkraft t_B pro lfd. Meter Böschungslänge in Böschungfallrichtung lässt sich berechnen zu:

$$t_B = (\gamma \cdot d) \cdot \sin \beta \quad (1)$$

Strömungskraft s_w

Nach einem starken Regenereignis kann es zu einem Aufstau in der Entwässerungsschicht des Oberflächendichtungssystems kommen. Die infolge dessen auftretenden zusätzlich treibenden Kräfte werden als Strömungskraft bezeichnet. Zur Berechnung der Strömungskraft ist es notwendig, den Aufstau in der Entwässerungsschicht abzuschätzen. Bei mineralischen Entwässerungsschichten wird üblicherweise die halbe Dicke als Aufstauhöhe angesetzt. Erfahrungsgemäß wird beim Einsatz von geosynthetischen Dränelementen mit einer objektspezifisch nachgewiesenen ausreichenden Langzeit-Dränleistung und unter Vernachlässigung der Wichtenänderung des Bodenmaterials eine mittlere Aufstauhöhe von $h_w = 0.02$ m nicht überschritten. Die Strömungskraft pro lfd. Meter Böschungslänge berechnet sich zu:

$$s_w = \gamma_w \cdot h_w \cdot \sin \beta \quad (2)$$

Zusätzliche Schubkräfte $t_{R,s}$ und $t_{R,d}$

Im Einbauzustand ist eine Befahrung des Dichtungssystems zu erwarten. Hierdurch treten zusätzliche aufzunehmende Schubkräfte in der kritischen Scherfuge auf. Diese setzen sich nach [4] aus statischen ($t_{R,s}$) und dynamischen ($t_{R,d}$) Anteilen zusammen:

Schubkraft $t_{R,s}$ aus statischer Belastung

Die Schubkraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges in Böschungfallrichtung ergibt sich aus:

$$t_{R,s} = (G_R/A) \cdot \sin \beta \quad (3)$$

Es ergibt sich daraus unter Ansatz eines Lastausbreitungswinkels für die effektive Aufstandsfläche A:

$$A = (2 \cdot l_R \cdot b_R) + (4 \cdot l_R \cdot d_i \cdot \tan 30^\circ) \quad (4)$$

Schubkraft $t_{R,d}$ aus dynamischer Belastung

Die auftretenden Schubkräfte aus einer Vollbremsung der Fahrzeuge ergeben sich nach:

$$t_{R,d} = ((G_R / g) \cdot a_v) / A \quad (5)$$

Die Bremsverzögerung ergibt sich aus:

$$a_v = v / t \quad (6)$$

5.3 Haltende Kräfte

Reibungskraft t_f

Die in der kritischen Scherfuge wirksam werdende Reibungskraft t_f aus der Bodenauflast ergibt sich:

$$t_f = (\gamma \cdot d_i) \cdot \cos \beta \cdot \tan \delta' + a' \quad (7)$$

Stützkraft T_{St} im Böschungsfußbereich

Für kurze Böschungen und bei einem Einbau des Bodens von unten nach oben kann eine haltende Kraft aus dem im Böschungsfußbereich eingebauten Boden als Stützkraft T_{St} in die Berechnung eingehen.

$$T_{St} = 0,5 \cdot \gamma \cdot h_S^2 \cdot K_p \cdot \cos \beta \quad (8)$$

Zusätzliche Reibungskraft $t_{R,h}$ aus Eigengewicht des Fahrzeuges

Die haltende Kraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges ergibt sich nach [4] zu:

$$t_{R,h} = (G_R / A) \cdot \cos \beta \cdot \tan \delta' \quad (9)$$

5.4 Nachweis und Sicherheitsbeiwert

Für den Einbauzustand ergibt sich der Nachweis aus der Integration der treibenden und haltenden Kräfte über die Böschungslänge:

$$\eta = \frac{T_{\max}}{T_{\text{vorh}}} \geq 1,2 \quad (10)$$

Für die Berechnung ist von entscheidender Bedeutung, ob für das Dichtungssystem im Lastfall 2 (d.h. unter Berücksichtigung der Schütthöhen) das Verhältnis κ der aus dem Eigengewicht der Bodenauflast wirkenden haltenden und treibenden Kräfte kleiner oder größer 1,2 wird. Für die Berechnung werden die haltenden Kräfte des Stützfußes T_{St} und einer eventuell erforderlich werdenden Zugbewehrung T_G zu Null gesetzt, um das Verhältnis κ (haltende Kräfte / treibende Kräfte) zu ermitteln. Das Verhältnis κ ergibt sich infolge der aus der Bodenauflast wirkenden Einzelkomponenten zu:

$$\kappa = \frac{t_f \cdot l + T_G + T_{St}}{t_B + s_w \cdot l} \quad (11)$$

Für den Fall einer Böschung, bei der die haltenden Kräfte die treibenden Kräfte nicht aufwiegen, gilt $\kappa < 1,2$:

$$\kappa < 1,2: \quad \eta = \frac{t_f \cdot l + t_{R,h} \cdot l_R + T_G + T_{St}}{(t_B + s_w) \cdot l + (t_{R,s} + t_{R,d}) \cdot l_R} \quad (12)$$

Für ein Verhältnis der Kräfte aus der Oberflächendichtung, bei dem die haltenden Kräfte die treibenden überwiegen ($\kappa > 1,2$) ergibt sich der ungünstigste Standpunkt des Fahrzeuges am Böschungsfuß, bzw. die Betrachtung des Böschungsabschnittes im Bereich des Fahrzeuges wird kritisch.

$$\kappa \geq 1,2: \quad \eta = \frac{t_f \cdot l_R + t_{R,h} \cdot l_R + T_G + T_{St}}{(t_B + s_w) \cdot l_R + (t_{R,s} + t_{R,d}) \cdot l_R} \quad (13)$$

Wird die Sicherheit $\eta < 1,2$, ist Gleichung 12 bzw. 13 nach T_G umzustellen. Die ermittelte Mindestzugfestigkeit T_G muss von einem Bewehrungselement (z.B. Geogitter) abgetragen werden können (Bemessungsfestigkeit im LF2).

6. BBG-Anmerkungen zu Randbedingungen

Kritische Randbedingungen in der Nachweisführung zur Standsicherheit von Oberflächendichtungssystemen sind aus unserer Erfahrung nach:

- Vernachlässigter Zufluss von Sickerwasser aus dem Plateau- in den Böschungsbereich, ggf. konzentriert.
- Nicht ordnungsgemäße Durchführung von Scherversuchen für die zu betrachtenden Gleitfugen (erfahrungsgemäß ist der Unterschied in den Ergebnissen aus Scherversuchen nicht so erheblich, wenn zwischen Durchführung "unter Wasser" oder "trocken" verglichen wird, wohl aber, wenn die Durchführung in unterschiedlichen Institutionen (Laboren) erfolgte).
- Einmalige Änderungen beim Einsatz des Baugerätes (z.B. Ersatzgeräte mit abweichender Lastverteilung oder nachträglicher Baugeräteeinsatz in Deponiebereichen, die im Nachweis unberücksichtigt geblieben sind) können erfahrungsgemäß erhebliche Auswirkungen auf die Standsicherheit haben.

Aus Autorensicht findet der Ansatz der Adhäsion bisher eine unklare Berücksichtigung in den Regelwerken. Hilfreiche Empfehlungen zur rechnerischen Berücksichti-

gung der Adhäsion in Standsicherheitsnachweisen für Deponieoberflächendichtungssysteme für die Kontaktflächen zwischen zwei verschiedenen Geokunststoffen mit rauen und strukturierten Oberflächen (z.B. zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Dränelement) werden in [8] gegeben. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Ansatz der Adhäsion ein bedeutender Aspekt. Unser BBG-Vorschlag zur Berücksichtigung der Adhäsion für die Empfehlungen E3-8 liegt vor, wurde aber im dafür zuständigen Gremium noch nicht abschließend diskutiert.

7 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Beitrag werden die herkömmlichen Ansätze (z.B. nach EBGEO) zur Ermittlung der Standsicherheit im Einbauzustand in Frage gestellt. Die aus Sicht der Autoren genaueren und somit auf sicherer Seite liegenden Ansätze der BBG Bauberatung Geokunststoffe beruhen auf detaillierteren Betrachtungen, die gerade für das Verhältnis $\kappa \geq 1.2$ der aus der Bodenlast wirkenden Einzelkomponenten und der Strömungskraft bedeutende Abweichungen zu den Ergebnissen nach EBGEO aufweisen.

Die Berücksichtigung der Gesamtböschungslänge bei der Bemessung des Einbauzustandes geschichteter Systeme in den derzeit gebräuchlichen Ansätzen (z.B. EBGEO, GDA) führt u.U. zu einer nicht ausreichenden lokalen Sicherheit. Im Gegensatz zur EBGEO wird im Ansatz der BBG zuerst das Kräfteverhältnis der wirkenden Kräfte aus der aus der Bodenüberdeckung sowie der Strömungskraft unabhängig von der Länge bestimmt. Ist das Verhältnis $\kappa < 1,2$ (geforderte Sicherheit), so wird zwangsläufig der Einsatz eines Bewehrungselementes erforderlich und die Berechnung erfolgt über die Gesamtböschungslänge.

Beträgt jedoch das Kräfteverhältnis $\kappa \geq 1,2$, so ergibt sich mit zunehmender Böschungslänge eine stetig zunehmende haltende Kraft. Dies hat für sehr lange Böschungen zur Folge, dass die zusätzliche Belastung aus einem Baugerät (z.B. Kettenraupe) unzulässigerweise vernachlässigbar klein wird. Somit sind lokale Belastungszustände zu überprüfen.

Die Berechnungsbeispiele verdeutlichen den gravierenden Unterschied zwischen einer erforderlichen Bewehrungslage nach BBG zur Sicherung lokaler Belastungszustände und einer sehr hohen Sicherheit bei einer Betrachtung der Gesamtböschungslänge nach EBGEO.

Der im Beitrag dargelegte Ansatz wird von BBG seit 1999 konsequent für nationale und internationale Objekte zugrundegelegt. Sicher können auch für diesen Ansatz nach BBG weitere Spezifizierungen und Verbesserungen diskutiert werden (wie z.B. Einfluss dynamischer Lasten aus Bauverkehr oder anzusetzender Lastausbreitungs

winkel), um auch in der Zukunft eine sichere und wirtschaftliche Bemessung durchführen zu können. Es ist aber wünschenswert, wenn nach dem Straßenbauausschuss (FGSV-Merkblatt, Ausgabe 2005) auch der EBGEO-Arbeitskreis auf die hier dargelegten Besonderheiten zum Lastfall Einbauzustand verweisen kann.

8 Literatur

- [1] DIN 1054: Zulässige Belastung des Baugrundes, 1976
- [2] DIN 4084: Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Abschnitt 11.4, 7/1981
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: E 3-8 neu „Reibungsverhalten von Geokunststoffen“, Bautechnik 74 (1997), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [4] Broers, A.; Saathoff, F.: Gedanken zum Lastfall Einbauzustand geschichteter Systeme, 7. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, 1999
- [5] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen
- [6] EBGEO (1997): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [7] Saathoff, F., Vollmert, L., Wittemöller, J. Werth, K., Klompmaier, J. (2000): The Load Case "Execution Phase" of Stratified Geosynthetic Systems, Proc. of the Second Geosynthetics Conference, EUROGEO 2000, Bologna: IGS
- [8] Blümel, W., Heinemann, M. (2004): Zur Berücksichtigung von Adhäsion in Stand-sicherheitsnachweisen für geneigte Oberflächenabdichtungen mit Geokunststoffen, Fachtagung "die sichere Deponie, Süddeutsches Kunststoffzentrum SKZ, Würzburg, 2004