

## Einsatz von Pflanzen zur Befestigung von Böschungen und künstlichen Riffen

### Stabilisierung von steilen Böschungen mit Pflanzen

Dr.-Ing. Bernd Schuppener  
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

#### 1 Einleitung

Bei Böschungssicherungen aus Buschlagen und/oder Heckenlagen (SCHIECHTL, 1987), im Folgenden *Lebend Bewehrte Erde* genannt, wird durch die Verbindung von Boden mit Pflanzenteilen ein Stützkörper hergestellt (siehe Bild 1).

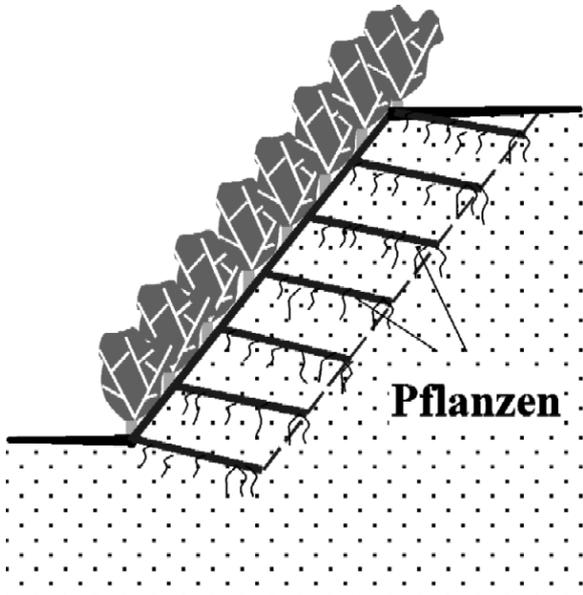


Bild 1: Schematische Darstellung einer Böschungssicherung mit *Lebend Bewehrter Erde*

Dieser Stützkörper gewährleistet die Standsicherheit des Geländesprungs. Die eingelegten Zweige und Äste von adventivwurzelbildenden Pflanzen - meistens Weiden - verrotten nicht, sondern bleiben am Leben, indem sie sich bewurzeln. Damit sorgen sie für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Der oberirdische Teil der Pflanzen treibt im Frühjahr aus. Sein Laub sorgt für einen Schutz gegen Erosion durch Wind und Niederschläge, aber auch gegen ein Austrocknen des Bodens.

Der erste Ansatz zur Berücksichtigung des Beitrags von Pflanzen bei der Stabilisierung von Böschungen beschrieb die Bewehrungswirkung der Pflanzen mit einem Coulombschen Reibungsansatz (SCHUPPENER, 1994). In der Zwischenzeit sind eine Reihe von Modell- und Feldversuchen zur Bestimmung des Tragverhaltens durchgeführt worden, die im Folgenden dargestellt werden. Sie zeigen, dass man mit hinreichender Genauigkeit die Verbundfestigkeit zwischen Pflanzen und Boden mit einem konstanten Wert beschreiben kann. Auf dieser Grundlage wird ein Bemessungsmodell entwickelt, mit dem eine ingenieurbio-logische Böschungssicherung im Hinblick auf die Zahl, die Länge und die Dicke der einzulegenden Pflanzen bemessen werden kann. Dabei wird das Teilsicherheitskonzept der neuen DIN 1054 (2000) verwendet.

#### 2 Tragverhalten von ingenieurbio-logischen Böschungssicherungen

Bei Stützbauwerken sind

- der Nachweis der Äußeren Standsicherheit und
- der Nachweis der Inneren Standsicherheit

zu führen. Beim Nachweis der Äußeren Standsicherheit wird gezeigt, dass der gesamte Geländesprung mit dem Stützbauwerk stand-sicher ist, d. h. dass z.B. kein Geländebruch auftritt. Beim Nachweis der Inneren Standsicherheit wird gezeigt, dass der Stützkörper in der Lage ist, die in seinem Inneren auftretenden Spannungen aufzunehmen, die die äußeren Kräfte und sein Eigengewicht in ihm erzeugen. Dieser Nachweis dient dazu, den Stützkörper *Lebend Bewehrte Erde* hinsichtlich der Zahl, Länge und Dicke der einzulegenden Pflanzen zu dimensionieren.

Bei einem Verlust der Inneren Standsicherheit gibt es zwei Versagensmöglichkeiten (siehe Bild 2). Im ersten Fall reicht die Festigkeit des Holzes der Pflanze nicht aus, die Pflanzen reißen an der Bruchfuge oder in der Nähe ab oder werden abgeschert. Ein solches Versagen ist möglich, wenn die Pflanzen im Boden sehr stark bewurzelt sind und dadurch ein sehr guter Verbund zwischen der Pflanze und dem Boden erreicht worden ist.

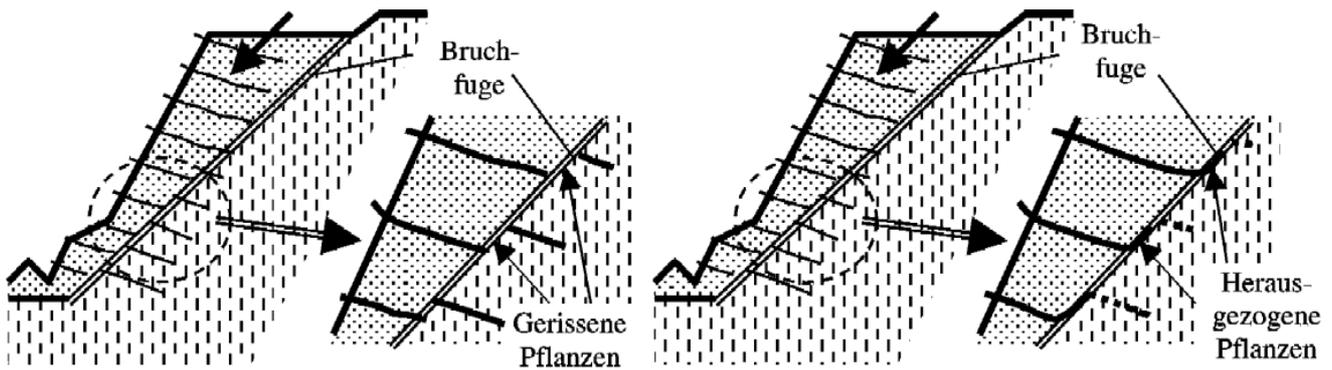


Bild 2: Versagensmechanismen bei einer Böschungssicherung mit Pflanzen, bei der die Pflanzen reißen oder herausgezogen werden

Es kann aber auch der Fall eintreten, dass die eingelegten Pflanzen beim Rutschvorgang aus dem Boden herausgezogen werden. Dieser Versagensmechanismus ist kurz nach der Herstellung der Böschungssicherung möglich, wenn die Pflanzen noch nicht bewurzelt sind und der dadurch erzeugte gute Verbund zwischen Pflanze und Boden noch fehlt. Dieser Zustand nach Herstellung der Böschung ist für die Standsicherheit maßgebend. Wesentlicher Parameter für ein Bemessungsmodell ist daher eine wirklichkeitsnahe Erfassung des Auszieh Widerstandes von Pflanzen.

### 3 Versuche zur Überprüfung des Bemessungsmodells

Zur Ermittlung des Auszieh Widerstandes wurden seit dem Frühjahr 1995 bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Berlin gezielte Forschungen durchgeführt, die in vegetationskundlichen Fragen durch das Büro Prof. Neumann + Prof. Hoffmann begleitet wurden. Die Untersuchungen umfassen Ausziehversuche in einem Versuchskasten im Labor und in Probeböschungen, an denen das Wachstum der Pflanzen und die Entwicklung ihrer Tragfähigkeit als Bewehrungselement untersucht wurden.

Der Versuchskasten für die Ausziehversuche besteht aus einer Stahlkiste, die schichtweise mit Sand gefüllt wird, wobei eine Pflanze eingebaut wird (siehe Bild 3). Unter dem Stahldeckel

befindet sich ein Druckkissen, mit dem man über Luftdruck eine festgelegte Normalspannung auf den Boden und damit auch auf die Umfangsfläche der Pflanze aufbringen kann. An den Enden schaut die Pflanze aus dem Kasten heraus. An einem Ende wird die Pflanze über eine Klemmvorrichtung und ein Drahtseil mit einem Getriebe auf Zug belastet und dabei die Verschiebung und die Kraft gemessen. Diese Versuchseinrichtung entspricht im wesentlichen den Vorgaben des Entwurfs der DIN EN 13738 (2000), die ein Prüfverfahren festlegt, mit dessen Hilfe im Laboratorium unter Verwendung eines Ausziehkastens der Widerstand bestimmt werden kann, den Geotextilien gegen Herausziehen aus dem Boden besitzen.

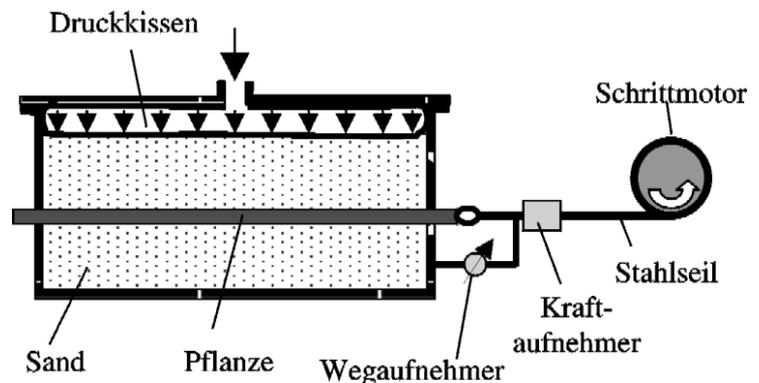


Bild 3: Versuchskasten für Ausziehversuche

Neben den Ausziehversuchen im Labor wurden auf dem Gelände der BAW in Berlin Probeböschungen aus einem schwach schluffigen, schwach feinkiesigen Sand mit einer Proctordichte von  $D_{Pr} \approx 92\%$  hergestellt und dabei Pflanzen eingelegt. Die Böschungen erreichten Höhen zwischen 2,50 m und 3,0 m, die

Böschungsneigungen lagen bei  $\beta = 45^\circ$  und  $\beta = 60^\circ$ . Die Pflanzen hatten einen Durchmesser von etwa 2 cm und eine Länge von etwa 2,0 m. Sie wurden mit einer Neigung von  $\alpha = 10^\circ$  in Lagen eingebaut, deren vertikaler Abstand 0,5 m betrug. Bei diesen Probeföschungen sollte neben vegetationskundlichen Problemen folgenden bodenmechanischen Fragen nachgegangen werden:

- Wie eng und in welcher Länge darf man Pflanzen legen, ohne dass sie auf Dauer an Vitalität verlieren oder gar absterben?
- Wie entwickelt sich die Tragfähigkeit der Pflanzen im Laufe der Jahre?

kleineren Kräfte handlicher und kleiner. Bei den Zugversuchen an der Probeföschung konnten auch die 2 m langen Pflanzen aus dem Boden gezogen werden. Maßgebend ist im unbewurzelten Zustand der Pflanzen damit nicht die Zugfestigkeit des Holzes sondern die Verbundfestigkeit zwischen Boden und Pflanze.

Die Ergebnisse der ersten Ausziehversuche sind zusammen mit den Ergebnissen der Modellversuche im Bild 4 dargestellt, in dem die maximal mobilisierbare Verbundspannung  $\tau_f$ , die Verbundfestigkeit zwischen Boden und Pflanze über der auf die Umfangsfläche der Pflanze wirkenden mittleren Normalspannung  $\sigma$  aufgetragen ist. Man erkennt drei wesentliche Ergebnisse:

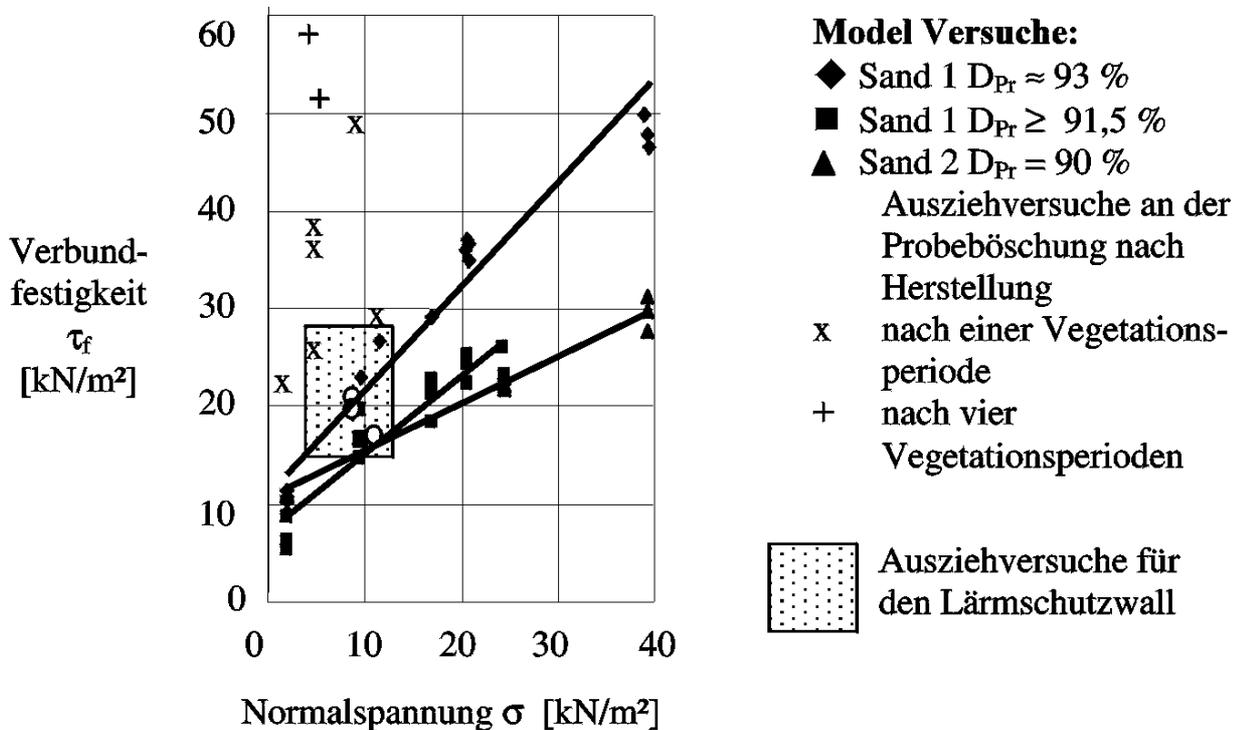


Bild 4: Ergebnisse der Versuche im Modellkasten und der Versuche an der Probeföschung

Es wurden daher gleich nach der Herstellung der ersten Probeföschung im Mai 1995 Ausziehversuche an den eingelegten Pflanzen durchgeführt, die ganz ähnlich wie bei Pfählen oder Ankern im Grundbau ablaufen, nur sind die verwendeten Geräte wegen der erheblich

- Ausgehend von einem Anfangswert nimmt die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  proportional zur Normalspannung  $\sigma$  zu.
- Die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  nimmt mit der Proctordichte  $D_{Pr}$  des Bodens zu.

## Einsatz von Pflanzen zur Befestigung von Böschungen und künstlichen Riffen

### Stabilisierung von steilen Böschungen mit Pflanzen

- Die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  der noch unbewurzelten Pflanzen unmittelbar nach Herstellung der Probeböschung (offene Kreise) stimmt gut mit denen der Modellversuche im Versuchskasten überein.

Nach der ersten Vegetationsperiode wurden erneut Zugversuche durchgeführt. Man erkennt deutlich den Zuwachs an Verbundfestigkeit  $\tau_f$  durch die Bewurzelung der eingelegten Pflanzen. Im Bild 4 sind nur die Ergebnisse von den 6 Versuchen dargestellt, bei denen es möglich war, die Pflanze aus dem Boden zu ziehen. Bei 4 Versuchen riss das Holz unmittelbar hinter der Krafteinleitungsstelle. Hier war durch die Bewurzelung die aufnehmbare Verbundspannung so groß geworden, dass nun die Zugfestigkeit des Holzes für die Tragfähigkeit maßgebend wurde.



Bild 5: Auslegen und Einerden von Pflanzen auf einer Berme und Verdichten mit einer Vibrationswalze

Weitere 7 Zugversuche wurden nach 4 Vegetationsperioden im Sommer 1998 durchgeführt. Ein Herausziehen der Pflanzen gelang lediglich bei den zwei Pflanzen, die am oberen Rand der Böschung eingebaut worden waren und eine Überdeckung von nur 0,5 m hatten. Man erkennt, dass die maximal mobilisierbare Verbund-

spannung noch einmal ganz beträchtlich angestiegen war.

Dieser Zuwachs der Tragfähigkeit durch die Bewurzelung der Pflanzen während der ersten Vegetationsperioden stellt eine durchaus nutzbare Reserve für den Fall dar, dass Teile der eingelegten Pflanzen im Laufe der Zeit ausfallen. Die verbleibenden Pflanzen sind durch den Zuwachs an Tragfähigkeit dann in der Lage, die Funktion der ausgefallenen Pflanzen zu übernehmen.

Neben den Zugversuchen wurden systematische pflanzenkundliche Untersuchungen durchgeführt. Obgleich keinerlei Pflegemaßnahmen vorgenommen wurden, blieben die Ausfälle unter 10 %. Wesentliches Ergebnis für die Funktion als Stützbauwerk war, dass im Boden über die gesamte



Länge der Pflanzen von etwa 2,0 m eine Bewurzelung festgestellt werden konnte (SCHUPPENER, B. & HOFFMANN, J., 1999). Damit ist sichergestellt, dass die Pflanzen auf voller Länge überleben.

Mittlerweile ist die Bauweise *Lebend Bewehrte Erde* auch bei Erdbaumaßnahmen in der Praxis

angewandt worden. So an der Autobahn A 113 bei Berlin, wo die steilen Böschungen eines Lärmschutzwalls mit dieser Bauweise gesichert wurden. Dabei wurden 4 bis 6 cm dicke und 3 m lange Weiden verwendet, die auf Bermen verlegt, mit einem schwach tonigen, schluffigen und schwach feinkiesigen Sand eingeschüttet wurden. Anschließend wurde der Boden mit einer Vibrationswalze auf eine Proctordichte von  $D_{Pr} \approx 97\%$  verdichtet (Bild 5).

Auch hier wurden Zugversuche an gerade eingebauten, also noch unbewurzelten Pflanzen durchgeführt, die eine Überdeckung von 0,4 m bis 0,7 m hatten, was einer mittleren Normalspannung  $\sigma$  von  $5 \text{ kN/m}^2$  bis  $10 \text{ kN/m}^2$  entspricht. Die Ausziehversuche ergaben bei 8 Zugversuchen eine mittlere Verbundfestigkeit von  $\tau_f = 24 \text{ kN/m}^2$ , die etwas höher ist als an der Probaböschung in Alt Stralau, was auf die ebenfalls höhere Proctordichte zurückzuführen ist. Eine Zusammenfassung aller bisherigen Versuchsergebnisse zeigt Bild 4. Man erkennt eine verhältnismäßig große Streuung der Verbundfestigkeit, was auf die unregelmäßige und von Pflanze zu Pflanze immer wieder andere Geometrie zurückzuführen ist. Eine quantitative Auswertung der Versuche zeigt, dass der Einfluss der Normalspannungen  $\sigma$  auf die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  in der Streuung der Versuchsergebnisse untergeht. Bei einer Böschungsneigung von 1:1 und Pflanzenlängen von 2 m sind die auf den Pflanzenumfang wirkenden Normalspannungen  $\sigma$  immer kleiner als  $25 \text{ kN/m}^2$ . In Anbetracht der großen Streuung der Verbundfestigkeit liegt es daher nahe, bei einer Bemessung einer Böschungssicherung mit Pflanzen von einem konstanten Wert für die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  auszugehen. Auf Grundlage der bisher durchgeführten Versuche kann bei einer Proctordichte von  $D_{Pr} \geq 93\%$  der Bemessungswerte der Verbundfestigkeit auf der sicheren Seite liegend zu  $\tau_{f,k} = 15 \text{ kN/m}^2$  angesetzt werden.

#### 4 Bemessungsmodell

Grundlage des Bemessungsmodells für ingenieurbio-logische Böschungssicherungen der Bauweise *Lebend Bewehrte Erde* ist das Teilsicherheitskonzept. Danach ist nachzuweisen, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Bemessungswert der Widerstände  $W_d$  größer

oder gleich dem Bemessungswert  $E_d$  der Einwirkungen ist:

$$W_d \geq E_d \quad (1)$$

Bei der Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände werden folgende vereinfachende und auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen (siehe Bild 6):

- Der für die Bemessung maßgebende Bruchzustand ist - ähnlich wie bei der Erddruckberechnung nach COULOMB - durch eine gerade Bruchfläche gekennzeichnet.
- Bei einer Gleichgewichtsbetrachtung an diesem Bruchkörper bilden das Eigengewicht  $G$  des Bruchkörpers und die Verkehrslast  $q$  bzw. ihre parallel zur Bruchfläche wirkenden Komponenten  $T_{G,d}$  und  $T_{Q,d}$  die Einwirkungen.
- Die Widerstände setzen sich zusammen aus den Bemessungswerten der Reibung  $R_d$  und der Kohäsion  $K_d$  des Bodens sowie aus der Tragfähigkeit  $Z_d$  der Pflanzen.

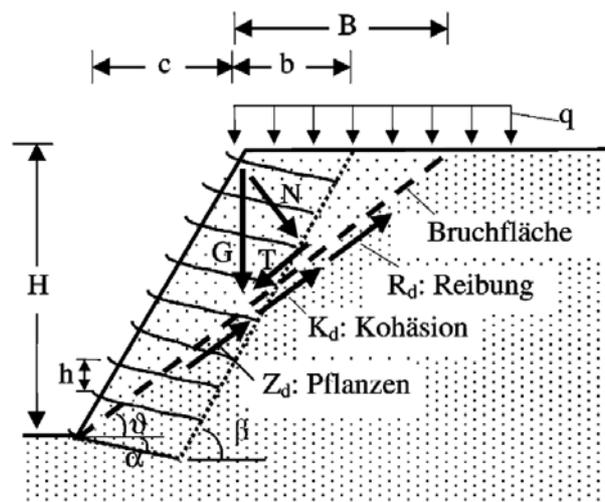


Bild 6: Böschungssicherung mit Bruchkörper und Kräften

Damit ergibt sich für die Grenzzustandsgleichung (1):

$$R_d + K_d + Z_d \geq T_{G,d} + T_{Q,d} \quad (2)$$

Löst man dann die Gleichung (2) nach  $Z_d$  auf, so erhält man den Bemessungswert der Tragfähigkeit  $Z_d$  der Pflanzen, der erforderlich ist, um eine ausreichende innere Standsicherheit der Böschung zu gewährleisten.

$$Z_d \geq T_{G,d} + T_{Q,d} - (R_d + K_d) \quad (3)$$

Die Bemessungswerte  $T_{G,d}$  und  $T_{Q,d}$  der Einwirkungen werden ermittelt, indem zunächst das Eigengewicht  $G$  des Bruchkörpers mit der Wichte  $\gamma$  ermittelt wird:

$$G = H \cdot B/2 \cdot \gamma = H^2 \cdot \gamma \cdot (\text{ctg } \vartheta - \text{ctg } \beta) / 2$$

Mit der Verkehrslast  $q$  ergeben sich dann die charakteristischen Werte (Index „k“):

$$T_{G,k} = G \cdot \sin \vartheta$$

$$T_{Q,k} = B \cdot q \cdot \sin \vartheta = H \cdot (\text{ctg } \vartheta - \text{ctg } \beta) \cdot q \cdot \sin \vartheta$$

die dann zur Bestimmung der Bemessungswerte (Index „d“) mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten für die ständigen und veränderlichen Lasten  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  zu multiplizieren sind:

$$T_{G,d} = T_{G,k} \cdot \gamma_G$$

$$T_{Q,d} = T_{Q,k} \cdot \gamma_Q$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte können dem Eurocode 7 (2001) oder der DIN 1054 (2000) entnommen werden, wobei die Werte der DIN 1054 in ihrer Größe vom Lastfall abhängen.

Die Bemessungswerte der Widerstände des Bodens werden aus der Böschungsgeometrie und dem Eigengewicht des Bruchkörpers mit den Bemessungswerten der Scherparameter  $\varphi_d$  und  $c_d$  ermittelt, die sich aus den charakteristischen Werten der Scherparameter  $\varphi_k$  und  $c_k$  durch die Einführung von Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_\varphi$  und  $\gamma_c$  ergeben:

$$\tan \varphi_d = (\tan \varphi_k) / \gamma_\varphi, \quad c_d = c_k / \gamma_c$$

Daraus ergeben sich die Bemessungswerte des Bodens  $R_d$  and  $K_d$  zu:

$$R_d = N \cdot \tan \varphi_d = G \cdot \cos \vartheta \cdot \tan \varphi_d$$

$$K_d = c_d \cdot H / \sin \vartheta$$

Die Ausziehversuche im Labor und an der Probeföschung haben gezeigt, dass man die zwischen Pflanze und Boden mobilisierbare Verbundfestigkeit  $\tau_{f,k}$  in hinreichend genauer Näherung mit einem konstanten Wert beschreiben kann. Damit ergibt sich der Auszieh Widerstand  $P_k$  der einzelnen Pflanzen zu:

$$P_k = \pi \cdot D \cdot l \cdot \tau_{f,k}$$

mit dem Pflanzendurchmesser  $D$  und ihrer Verankerungslänge  $l$  im Boden (siehe Bild 7).

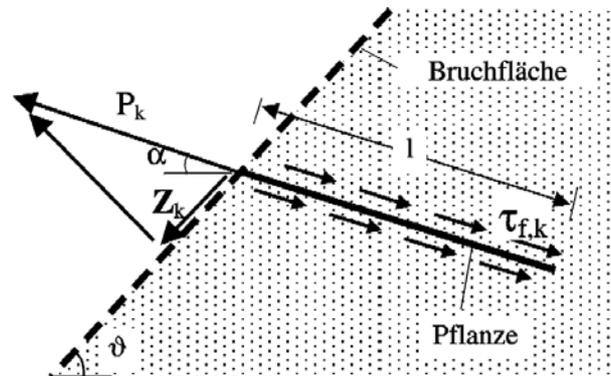


Bild 7: Prinzipskizze zum Tragverhalten der Pflanzen

In dem Nachweis der inneren Standsicherheit wird lediglich die parallel zur Bruchfläche mobilisierbare Komponente  $Z_k$  des Auszieh Widerstandes aller mitwirkenden Pflanzen angesetzt. Mit der Neigung  $\vartheta$  der Bruchfläche, der Neigung  $\alpha$  der Pflanze und der gesamten Verankerungslänge  $L = \sum l_i$  aller beanspruchten Pflanzen ergibt sich:

$$Z_k = \sum P_{k,i} \cdot \cos (\alpha + \vartheta)$$

$$Z_k = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos (\alpha + \vartheta)$$

Mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_P$  für die Tragfähigkeit der Pflanzen ist dann der Bemessungswert der Tragfähigkeit der Pflanzen:

$$Z_d = Z_k / \gamma_P = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos (\alpha + \vartheta) / \gamma_P \quad (4)$$

So lange die untersuchte Bruchfläche in einem Abstand  $B \leq b/2$  von der Oberkante der Böschung austritt (siehe Bild 6), sind die Verankerungslängen der einzelnen Pflanzen luftseitig von der Bruchfläche kleiner als auf der gegenüberliegenden Seite der Bruchfläche. Bei einem Bruch auf solchen Bruchflächen werden sich also die Pflanzen aus diesem markierten Bereich aus dem Boden herausziehen, so dass dieser Verankerungsbereich für die Dimensionierung der Zahl der einzulegenden Pflanzen maßgebend wird. Da in der Regel  $\alpha < 10^\circ$  ist, ergibt sich die mittlere Verankerungslänge der einzelnen Pflanzen in hinreichender Näherung zu

$$l_m = B/2.$$

Bei einer Anzahl von  $N$  eingelegten Pflanzen pro laufenden Meter Böschung ist dann die gesamte Verankerungslänge

$$L = N \cdot B/2,$$

so dass sich mit (4) der Bemessungswert der Tragfähigkeit aller Pflanzen zu

$$Z_d = \pi \cdot D \cdot N \cdot B/2 \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos(\vartheta + \alpha) / \gamma_P \quad (5)$$

ergibt.

der Böschungsoberkante austritt, ergibt die erforderliche Zahl der einzulegenden Pflanzen zu:

$$N = \frac{Z_d \cdot \gamma_P}{(z_w \cdot l_o/H + (H - z_w) \cdot l_u/H) \cdot \pi \cdot D \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos(\vartheta + \alpha)} \quad (7)$$

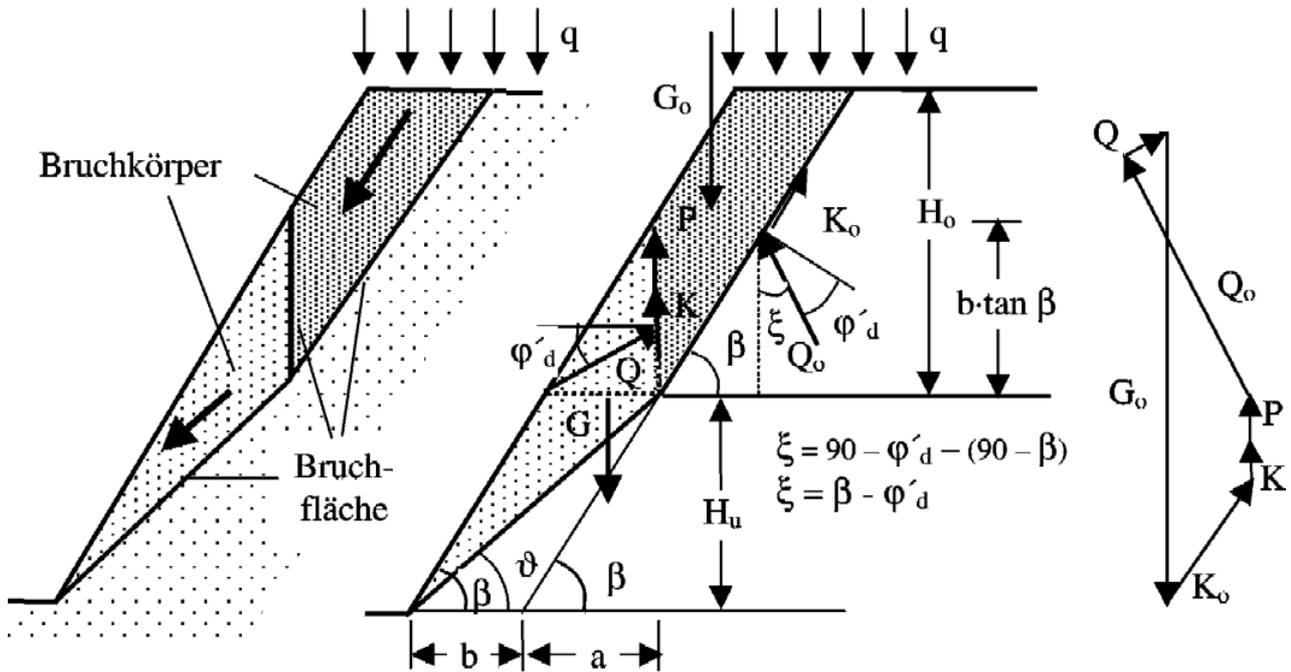


Bild 8: Bruchmechanismus mit zwei Bruchkörpern

Aus der Gleichgewichtsbetrachtung am potenziellen Bruchkörper wird mit Gleichung (3) der Bemessungswert der statisch erforderlichen Tragfähigkeit  $Z_d$  ermittelt, so dass man für den Fall von Bruchflächen mit  $B \leq b/2$  die Gleichung (5) nach  $N$ , der Zahl der erforderlichen Pflanzen, auflösen kann:

$$N = \frac{2 \cdot Z_d \cdot \gamma_P}{\pi \cdot D \cdot B \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos(\vartheta + \alpha)} \quad (6)$$

In ähnlicher Weise können die Formeln für andere Neigungen  $\vartheta$  der Bruchfläche entwickelt werden (SCHUPPENER, 2001). Für den Fall, dass die Bruchfläche in einem Abstand von  $b/2 < B \leq b$  von

Für den Fall, dass die Bruchfläche zum Teil außerhalb des Stützkörpers liegt ( $B > b$ ) ergibt sich

$$N = \frac{2 \cdot Z_d \cdot \gamma_P \cdot H}{(H - z_w) \cdot b \cdot \pi \cdot D \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos(\vartheta + \alpha)} \quad (8)$$

In dem Fall, wo die Böschungen höher und steiler werden und das Verhältnis von Stützkörperhöhe zu Stützkörperbreite  $H/b > 2$  wird, können auch gebrochene Bruchflächen maßgebend werden (siehe Bild 8), wobei die obere Bruchfläche an der Grenzfläche zwischen der Böschungssicherung und dem anstehenden Boden hinter den Enden der eingelegten Pflanzen verläuft. An dieser Grenzfläche kann im Bruchzustand haltend nur Reibung und Kohäsion mobilisiert werden, die

möglicherweise nicht ausreichen, um diesen Teil des Stützkörpers im Gleichgewicht zu halten. Der obere Bruchkörper gibt daher auf den unteren Bruchkörper eine zusätzliche Schubbelastung ab.

Zur Herleitung eines Bemessungsalgorithmus für die erforderliche Zahl von Pflanzen wird ein Zwei-Körper-Bruchmechanismus zugrunde gelegt (siehe Bild 8), bei dem eine vertikale Bruchfläche zwischen den beiden Bruchkörpern angenommen wird. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wirken an den Bruchfugen zwischen den Bruchkörpern bzw. dem anstehenden Boden folgende Bemessungswerte der Widerstände bzw. Einwirkungen:

- In der senkrechten Bruchfuge zwischen dem oberen und unteren Bruchkörper wirkt senkrecht die Kohäsionskraft  $K_d$  und die Scherkraft  $P_d$  der geschnittenen Pflanzen sowie die aus Reibung und Normalkraft resultierende Kraft  $Q_d$ , die eine Neigung von  $\varphi'_d$  gegenüber der Normalen auf die vertikale Bruchfuge (siehe Bild 8) hat. Die Scherkraft  $P_d$  der geschnittenen Pflanzen wird auf der sicheren Seite liegend aus der Querschnittsfläche der Pflanzen und ihrer Scherfestigkeit quer zur Faser bestimmt.
- Zwischen dem oberen Bruchkörper und dem anstehenden Boden wirkt die Kohäsionskraft  $K_{o,d}$  und die zur Normalen auf die Bruchfläche um den Winkel  $\varphi'_d$  geneigte resultierende Kraft  $Q_{o,d}$ .

Aus der Gleichgewichtsbedingung am oberen Bruchkörper können die Größen der Kräfte  $Q_d$  und  $Q_{o,d}$  ermittelt werden, die zunächst nur der Richtung nach bekannten sind. Dies kann graphisch über ein Kräfteck oder analytisch geschehen. Für die einzelnen geometrischen Größen ergeben sich folgende Beziehungen:

$$H_u = b \cdot \tan \vartheta / (1 - \tan(90 - \beta) \cdot \tan \vartheta)$$

$$H_o = H - H_u$$

Damit ermitteln sich die Eigengewichtskraft  $G_{o,d}$  des oberen Bruchkörpers, die auch die mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q$  faktorisierte Verkehrslast  $p$  enthält, zu:

$$G_{o,d} = (H_o - 0,5 \cdot b \cdot \tan \beta) \cdot \gamma \cdot b \cdot \gamma_G + p \cdot b \cdot \gamma_Q$$

$$K_{o,d} = c_{c,d} \cdot H_o / \sin \beta$$

$$K_d = c_{c,d} \cdot b \cdot \tan \beta$$

Mit der Scherkraft  $P_d$  der Pflanzen ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen:

$$\Sigma V: G_{o,d} - K_d - P_d - Q_d \cdot \sin \varphi'_d - K_{o,d} \cdot \sin \beta - Q_{o,d} \cdot \cos(\beta - \varphi'_d) = 0 \quad (9)$$

$$\Sigma H: Q_d \cdot \cos \varphi'_d + K_{o,d} \cdot \cos \beta - Q_{o,d} \cdot \sin(\beta - \varphi'_d) = 0 \quad (10)$$

aus (10) ergibt sich:

$$Q_{o,d} = (Q_d \cdot \cos \varphi'_d + K_{o,d} \cdot \cos \beta) / \sin(\beta - \varphi'_d)$$

Eingesetzt in (9):

$$Q_d = (G_{o,d} - K_d - P_d - K_{o,d} \cdot \sin \beta - K_{o,d} \cdot \cos \beta / \tan(\beta - \varphi'_d)) / (\sin \varphi'_d + \cos \varphi'_d / \tan(\beta - \varphi'_d))$$

Mit dem Gewicht  $G_d$  des unteren Bruchkörpers

$$G_d = 0,5 \cdot b \cdot (b \cdot \tan \beta + H_u) \cdot \gamma \cdot \gamma_G$$

ergeben sich die zur Bruchfläche zwischen dem unteren Bruchkörper und dem Boden parallelen (Index Z) und senkrechten (Index N) Komponenten von  $Q_d$ ,  $G_d$ ,  $K_d$  und  $P_d$  zu:

$$Q_{N,d} = Q_d \cdot \sin(\varphi'_d - \vartheta)$$

$$Q_{Z,d} = Q_d \cdot \cos(\varphi'_d - \vartheta)$$

$$G_{N,d} = G_d \cdot \cos \vartheta$$

$$G_{Z,d} = G_d \cdot \sin \vartheta$$

$$K_{N,d} = c_{c,d} \cdot b \cdot \tan \beta \cdot \cos \vartheta$$

$$K_{Z,d} = c_{c,d} \cdot b \cdot \tan \beta \cdot \sin \vartheta$$

$$P_{N,d} = P_d \cdot \cos \vartheta$$

$$P_{Z,d} = P_d \cdot \sin \vartheta$$

Mit den Bemessungswerten der in der Bruchfläche zwischen dem unteren Bruchkörper und dem anstehenden Boden wirkenden Kräfte

– Kohäsionskraft  $K_{u,d} = c_{c,d} \cdot H_u / \sin \vartheta$ ,

– Reibungskraft  $R_{u,d} = (Q_{N,d} + G_{N,d} + K_{N,d} + P_{N,d}) \cdot \tan \varphi'_d$  und

– Tragfähigkeit  $Z_{u,d}$  der Pflanzen

ermittelt sich der Bemessungswert  $W_d$  des Widerstands in der unteren Bruchfläche zu:

$$W_d = (Q_{N,d} + G_{N,d} + K_{N,d} + P_{N,d}) \cdot \tan \varphi'_d + K_{u,d} + Z_{u,d}$$

Der Bemessungswert  $E_d$  der Einwirkungen als der Summe der abtreibenden Kräfte ergibt sich zu:

$$E_d = Q_{Z,d} + G_{Z,d} + K_{Z,d} + P_{Z,d}$$

Setzt man  $R_d$  und  $E_d$  in die Grenzzustandsgleichung (2) ein und löst man nach  $Z_{u,d}$  auf, dann ergibt sich für den Bemessungswert der erforderlichen Tragfähigkeit der Pflanzen:

$$Z_{u,d} \geq Q_{Z,d} + G_{Z,d} + K_{Z,d} + P_{Z,d} - ((Q_{N,d} + G_{N,d} + K_{N,d} + P_{N,d}) \cdot \tan \varphi_d + c_{c,d} \cdot H_u / \sin \vartheta) \quad (11)$$

Bei der Ermittlung der erforderlichen Zahl  $N$  von Pflanzen für den unteren Bruchkörper kann die mittlere Verankerungslänge der Pflanzen in hinreichender Näherung zu

$$l = b/2$$

angenommen werden, so dass sich die erforderliche Zahl  $N$  der Pflanzen für den unteren Bruchkörper mit Gleichung (6) zu

$$N = \frac{Z_{u,d} \cdot \gamma_{Pf}}{\pi \cdot D \cdot b/2 \cdot \tau_{f,k} \cdot \cos(\vartheta + \alpha)} \quad (12)$$

errechnet.

Da zu Beginn der Bemessung noch nicht feststeht, welcher Bruchmechanismus und welche Bruchflächenneigung  $\vartheta$  für die Bemessung maßgebend ist, muss zur Bestimmung der erforderlichen Zahl der Pflanzen eine Variationsrechnung durchgeführt werden. Dazu müssen beide Bruchmechanismen untersucht, jeweils die Neigung der Bruchfläche  $\vartheta$  variiert und für jede Bruchflächenneigung die Zahl der erforderlichen Pflanzen bestimmt werden. Für die Bemessung maßgebend ist dann die Bruchflächenneigung, für die sich die größte Zahl der Pflanzen ergibt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zum Beitrag von Pflanzen auf die Standsicherheit von Böschungssicherungen der Bauweise *Lebend Bewehrte Erde* zeigen, dass nicht die Festigkeit des Pflanzenmaterials sondern der Ausziehungswiderstand der Pflanzen bzw. die Verbundfestigkeit  $\tau_f$  zwischen Pflanzen und Boden der maßgebende Parameter ist. Die Verbundfestigkeit nimmt mit der Dichte des Bodens zu. Durch die Bewurzelung der Pflanzen steigt die Verbundfestigkeit im Laufe der Jahre auf den vier- bis fünffachen Wert an. Diese Steigerung der Tragfähigkeit stellt eine durchaus nutzbare Reserve für den Fall dar, dass Teile der eingelegten Pflanzen im Laufe der Zeit ausfallen. Wegen der unregelmäßigen Geometrie der

Pflanzen streut die Verbundfestigkeit verhältnismäßig stark, so dass der Einfluss der Normalspannung auf die Verbundfestigkeit darin untergeht. Aus diesem Grund wird abweichend von dem ursprünglichen Reibungsansatz (SCHUPPENER, 1994) vereinfachend eine konstante Verbundfestigkeit  $\tau_f$  beim Bemessungsmodell angesetzt.

Zwei Bemessungsmodelle werden untersucht: ein Starr-Körper-Bruchmechanismus mit einer geraden Bruchfläche und ein Zwei-Körper-Bruchmechanismus. Daraus werden auf Grundlage des Teilsicherheitskonzepts Formeln zur Bemessung der Böschungssicherung im Hinblick auf die Zahl, Länge und Dicke der einzulegenden Pflanzen abgeleitet. Damit steht ein durch Versuche abgesichertes bodenmechanisches Bemessungsverfahren zur Verfügung, mit dem die stabilisierende Wirkung der Pflanzen als Böschungssicherung berücksichtigt werden kann.

Neben einer Verbreiterung der Datenbasis zur sicheren und wirklichkeitsnahen Festlegung der in der Bemessung anzusetzenden Verbundfestigkeit  $\tau_f$  muss in weiteren Felduntersuchungen der Frage nachgegangen werden, welche Lebensbedingungen die Pflanzen vorfinden müssen, damit der Geotechniker auch auf Dauer auf sie rechnen kann.

## 6 Bemessungsbeispiel

Es soll eine Böschung mit einer Höhe von  $H = 4$  m und einer Böschungsneigung von  $\beta = 50^\circ$  mit der Bauweise *Lebend Bewehrte Erde* gesichert werden, die auf dem horizontalen Gelände oberhalb der Böschung mit einer Verkehrslast von  $p = 5$  kN/m<sup>2</sup> belastet wird. Dazu ist geplant, Pflanzen mit einem mittleren Durchmesser von  $D = 0,02$  m in Lagen in einem vertikalen Abstand von  $h = 0,5$  m mit einer Neigung gegen die Horizontalen von  $\alpha = 5^\circ$  in einer Länge einzulegen, dass ein Stützkörper von  $b = 2,0$  m Breite entsteht.

Der Boden für den Stützkörper ist auf eine Proctordichte von  $D_{Pr} = 93\%$  zu verdichten, so dass bei den erdstatischen Berechnungen ein Reibungswinkel von  $\varphi'_{k} = 32,5^\circ$  und einer Kapillarkohäsion von  $c_{c,k} = 2$  kN/m<sup>2</sup> angenommen werden können. Der Boden bzw. der Stützkörper hat eine Wichte von  $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>. Es wird

**Einsatz von Pflanzen zur Befestigung von Böschungen und künstlichen Riffen**  
Stabilisierung von steilen Böschungen mit Pflanzen

angenommen, dass unmittelbar nach der Herstellung der *Lebend Bewehrten Erde* zwischen Pflanzen und Boden eine Verbundfestigkeit von mindestens  $\tau_{r,k} = 15 \text{ kN/m}^2$  wirken. Das ist ggf. durch Zugversuche bei der Herstellung nachzuweisen. Die Böschungssicherung wird mit den Teilsicherheitsbeiwerten des Lastfalls 1 nach DIN 1054-neu bemessen (siehe Tabelle 1), wobei für die Pflanzen die Teilsicherheitsbeiwerte für flexible Bewehrungselemente angesetzt wurden.

Zur Ermittlung des Bemessungswerts der Tragfähigkeit  $Z_d$  der Pflanzen bei Ansatz gerader Bruchflächen mit Gleichung (3) wird eine Variationsrechnung durchgeführt (siehe Tabelle 2), indem die Neigung  $\vartheta$  der Bruchflächen beginnend  $\vartheta = 48^\circ$  in Schritten von  $\Delta\vartheta = 2^\circ$  bis auf  $\vartheta = 30^\circ$  vermindert wird. Dann wird je nach Lage der Bruchfuge mit den Gleichungen (6) (7) und (8) die Zahl der erforderlichen Pflanzen  $N$  pro laufenden Meter Böschung bzw.  $n$  pro laufenden Meter Einbauberme ermittelt.

Neigung der Bruchfläche $\vartheta$	$Z_d$ kN/m	$z_w$ m	$B$ m	$N$	$n$
42	4,9	0,3	1,1	18	2,5
40	6,4	1,1	1,4	21	2,9
38	7,2	1,7	1,8	24	3,3
<b>36</b>	<b>7,0</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>27</b>	<b>3,7</b>
34	5,7	2,4	2,6	25	3,5
32	3,2	2,7	3,0	15	2,2
30	-0,8	-	3,6	0	0

Tabelle 2: Bemessungsergebnisse bei geraden Bruchflächen

Neigung der Bruchfläche $\vartheta$	$Z_d$ kN/m	$H_U$ m	$N$	$n$	Bemerkung
7	- 1,2	0,28	0	0	
11	1,5	0,46	2,9	2,9	
15	3,9	0,70	6,6	4,8	
<b>19</b>	<b>5,7</b>	<b>0,97</b>	<b>9,8</b>	<b>5,0</b>	Maßgebend für die Bemessung
23	6,9	1,31	12,0	4,5	
27	6,7	1,77	12,6	3,5	

Tabelle 3: Bemessungsergebnisse beim Zwei-Körper-Bruchmechanismus

Bei einer Bemessung unter Annahme eines 2-Körper-Bruchmechanismus wird eine analoge Variationsrechnung durchgeführt, um die Bruchflächenneigung  $\vartheta$  des unteren Bruchkörpers zu ermitteln, für die größte Zahl von Pflanzen erforderlich wird (siehe Tabelle 3). Zunächst wird mit Gleichung (11) die erforderliche Tragfähigkeit  $Z_d$  der Pflanzen ermittelt. Für die Ermittlung der Scherkraft der Pflanzen in der vertikalen Bruchfuge zwischen den beiden Bruchkörpern wurde hier angenommen, dass 5 Pflanzen pro lfd Meter Einbauberme notwendig werden. Bei einem Böschungswinkel von  $\beta = 50^\circ$  und einem vertikalen Abstand der Pflanzenlagen von  $h = 0,5 \text{ m}$  werden immer 5 Pflanzenlagen geschnitten, so dass insgesamt 25 Pflanzen zur Scherkraft beitragen. Setzt man nach Niemz (1993) eine Scherfestigkeit von Holz quer zur Faser an, die bei  $\sigma_{zul} \approx 1 \text{ N/mm}^2 = 1.000 \text{ kN/m}^2$  liegt und schon eine Sicherheit enthält, so ergibt sich der Bemessungswert für die Scherkraft von 25 Pflanzen zu:  $P_d = 25 \cdot \pi \cdot D^2/4 \cdot \sigma_{zul} = 7,9 \text{ kN/m}$ . Im letzten Schritt wird dann für die erforderliche Tragfähigkeit der Pflanzen mit der Gleichung (12) die Zahl der erforderlichen Pflanzen bestimmt.

Die Variationsrechnungen ergeben, dass der Zwei-Körper-Bruchmechanismus bei einer Neigung der Bruchfuge von  $\vartheta = 19^\circ$  eine größere Zahl von Pflanzen erfordert als bei Ansatz geraden Bruchflächen, wo bei einer Bruchflächenneigung von  $\vartheta = 36^\circ$  die meisten Pflanzen erforderlich sind. Maßgebend für die Bemessung der Böschungssicherung ist die Bruchfläche, für die sich das Maximum der erforderlichen Pflanzen ergibt. Im vorliegenden Fall ist damit der Zwei-Körper-Bruchmechanismus für die Bemessung maßgebend.

## 7 Literatur

- DIN 1054 (2000) Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Entwurf Dezember, 2000
- DIN EN 13738 (2000) Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden, Entwurf Februar, 2000
- Eurocode 7 (2001) prEN 1997-1, *Geotechnical design – part 1 General rules*, final draft October 2001
- Niemz, P. (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag
- Schiechtl, H. M. (1987): Böschungssicherung mit ingenieurbioologischen Bauweisen, Grundbautaschenbuch, 3. Auflage, Teil 3, Seiten 217 – 315
- Schuppener, B. (1994): Die statische Berechnung der Bauweise *Lebend Bewehrte Erde*, GEOTECHNIK 4
- Schuppener, B. & Hoffmann, J. (1999) Living Reinforced Earth – an ecological method of stabilizing steep slopes, Proc. XII<sup>th</sup> ECSMGE, Vol. 1, Amsterdam, 1999
- B. Schuppener (2001) Bemessung von Böschungssicherungen mit Pflanzen, geotechnik 24 (2001), Nr. 3

### Verfasser:

Dr.-Ing. Bernd Schuppener  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstr. 17, 76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9726-3800  
e-mail: bernd.schuppener@baw.de