

O Böschungen und Geländesprünge

O.1 Begriffe

Böschungen bestehen im Zusammenhang mit natürlichen oder künstlichen Geländesprünge, wobei die Böschungsneigungen und die Höhenunterschiede wesentlich sind. Die Neigungen werden in Grad gegen die Horizontale oder als Steigungsverhältnis - z.B. 1:2 (1 m Höhenunterschied auf 2 m horizontaler Länge) - angegeben. Böschungen entstehen durch geomorphologische Vorgänge (z.B. Erosion, Bodenhebung, Sedimentation) oder bauliche Maßnahmen (z.B. Dammschüttungen, Einschnitte, Baugruben). Die Bewertung ihrer Standsicherheit ist eine geotechnische Aufgabe. Gelegentlich wird zwischen dem "Hang" = natürliche Böschung und der "Böschung" = Böschung einer künstlich hergestellten Aufschüttung unterschieden, ohne dass es dafür einen besonderen Grund bei Fragen der Standsicherheit gibt. Zu Böschungen gehören ihre Oberflächen, aber auch die darunter liegenden Erd- und Felsmassen, soweit sie mit abtreibenden Kräften behaftet sind.

Böschungen können rutschen und Rutschungen können zu Katastrophen führen, wenn Menschen und Bauwerke von Rutschungen mitgerissen bzw. verschüttet werden, oder wenn Rutschmassen in Gewässern Flutwellen auslösen. So entstand in der Folge des Baus der Vajont-Staumauer und des Füllens des Stausees am 9.10.1963 eine Felsrutschung am Monte Toc in das Piave-Tal mit 250 Mio m³, die eine Flutwelle auslöste, welche den Ort Longarone fortriss. 1900 Menschen kamen zu Tode.

Die Begriffe Rutschung (schließt auch langsame Kriechvorgänge ein), Böschungsbruch (bezieht sich auf Böschungen mit weitgehend homogener Neigung), Geländebruch (bezieht sich auf Geländesprünge mit stark wechselnden Neigungen und Steilstufen, in denen eventuell auch stützende Bauwerke enthalten sind) und Grundbruch (eher bei flachen Neigungen) stehen nebeneinander und erfordern in der Geotechnik keine strenge Unterscheidung. In allen Fällen treten bleibende Scherverformungen auf und es kommt zu hangabwärts gerichteten Massenverschiebungen.

Die begriffliche Unterscheidung von Böschung und Geländesprung beim Nachweis des Versagens ist historisch bedingt:

Alle Rechenverfahren wurden zunächst für die Böschung entwickelt und erst später auch auf Geländesprünge angewandt, als man erkannte, dass es nicht genügt, eine Stützmauer nur nach der Erddrucktheorie zu bemessen (Bild O01.10).

Eine Böschung / ein Geländesprung ist nicht standsicher, wenn messbare, zunehmende bleibende Verformungen auftreten. Früher oder später wird es dann zu einer Rutschung kommen. Rutschungen können aber auch ohne vorlaufende langsame Bewegungen auftreten. Von einer standsicheren Böschung wird erwartet, dass sie auch Extremereignisse - besonders hohe Grundwasserstände oder starken Sickerwasseranfall, tiefreichende Frost-Tau-Wechsel, Erdbeben, Erschütterungen oder kleine Veränderungen in der Morphologie schadensfrei ertragen kann.

Bei nichtbindigen Böden und Fels ist eher mit plötzlichem Versagen zu rechnen, welches durch ein besonderes Ereignis oder durch Materialermüdung nach langandauernder Beanspruchung nahe der Scherbeanspruchungsgrenze ausgelöst wird. Bei bindigen Böden, insbesondere bei hoher Wassersättigung, kann man dagegen ein viskoses Verhalten erwarten. Es treten bei hoher Scherbeanspruchung stets Kriechverformungen auf, die Verformungsgeschwindigkeit ist vom Beanspruchungsniveau abhängig. Zum Kriechverhalten von Böden siehe Vorlesungseinheit H, „Baugrundverformungen“.

Verformungsvorgänge, die zu Rutschungen führen, müssen kinematische Randbedingungen erfüllen. Ohne Zwang möglich sind Bruchformen mit durchgehenden ebenen und kreiszylinderförmigen Gleitflächen. Mit vernachlässigbar geringem Zwang sind auch mehrteilige, oft keilförmige Bruchkörper vorstellbar, die sich entlang ebener Scherfugen relativ zueinander bewegen (Bild O01.20).

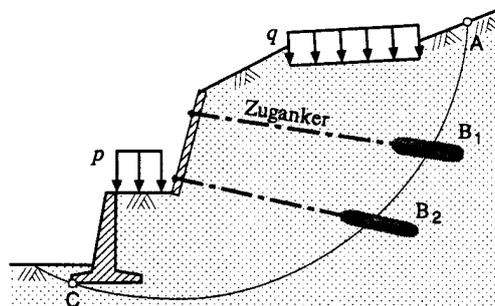


Bild O01.10: möglicher Mechanismus für einen Geländebruch trotz Stützmaßnahmen

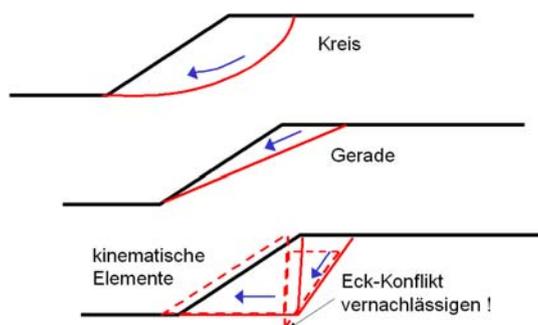


Bild O01.20: kinematisch mögliche Bruchformen

O.3 Erkenntnisse aus der Beobachtung von Rutschungen

Natürliche Rutschungen treten entweder als Folge zusätzlicher Belastungen - z.B. Wasserdruck - auf, was plötzlich und ohne Vorankündigung passieren kann, oder als Endstadium einer progressiven, u.U. sehr langfristigen Kriechbewegung. Im letztgenannten Fall kündigen sich Rutschungen in der Regel durch sehr langfristig vorauslaufende Hangbewegungen an, was sich z.B. an dem säbelförmigen Wuchs von Bäumen ablesen lässt. Bild O03.10 zeigt eine über 29 Jahre beobachtete Rutschung in Ton (SKEMPTON, 1964). In solchen Fällen ist das Versagen durch viskoses und plastisches Materialverhalten begründet (Erreichen der totalen Scherfestigkeit in wassergesättigten Tonen, siehe z.B. auch die große Rutschung in Tuve, Schweden 1979 (TORSTENSSON, 1982)), andernfalls durch Erreichen der effektiven Scherfestigkeitsgrenze.

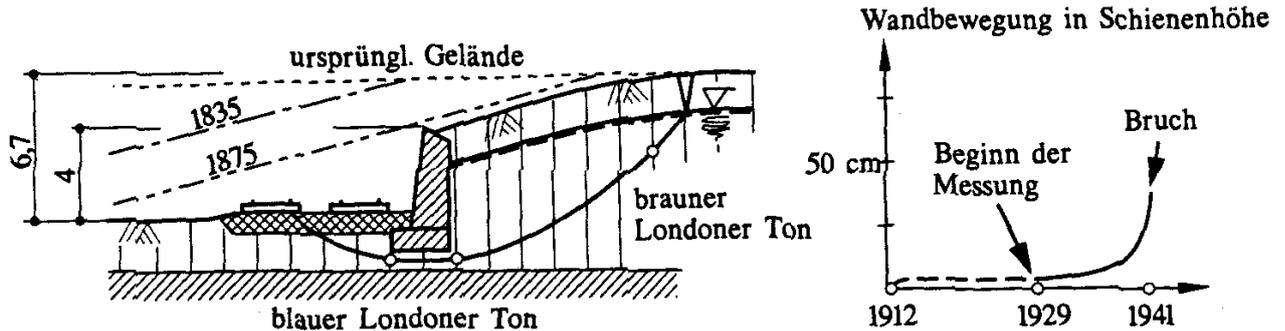


Bild O03.10: über viele Jahre beobachtete Rutschung in Ton (SKEMPTON, 1964)

Die Bruchzonen entwickeln sich hier progressiv: nahe dem Böschungsfuß treten große Scherspannungen, am Böschungskopf große Zugspannungen auf, die Anrisse verursachen. Darin sammelt und staut sich Niederschlagswasser. Die Kriechbewegung ist deswegen auch saisonal schwankend. Die Geschwindigkeit der talwärts gerichteten Bewegung eines Kriechhanges hängt vom Gefälle und im Übrigen davon ab, wie weit durch das bereits eingetretene Verschiebungsmaß die effektive Scherfestigkeit bereits bis auf die Restscherfestigkeit abgebaut ist.

Die Tabelle O03.10 gibt Anhaltspunkte für Hangbewegungen, die vor Rutschungen gemessen wurden. Daraus kann man folgern: Verschiebungen von über 2 cm je Jahr erfordern eine regelmäßige Überwachung der Hangbewegung, von 2 cm/Woche (also auf ein Jahr hochgerechnet 1 m!) sofortige Sicherungsmaßnahmen.

Ort	Kurzbeschreibung	mittlere Verschiebung über eine Periode von					Gesamtbewegung vor der Rutschung
		5 a	18 mt	6 mt	7 d	1 d	
Kensal Green	kl. Stütz. / Böschung	2 cm/a	9 cm/a	16 cm/a	-	-	35 cm
Ooigawa	große Stützwand	-	-	5 cm/a	1 cm/d	10 cm/d	20 cm
Dosan	mittelgr. Rutschung	-	-	-	3 cm/d	30 cm/d	40 cm
Gradot Ridge	große Rutschung	-	-	-	-	-	130 cm
Vajont	sehr große Rutschung	-	70 cm/a	3 mm/d	6 cm/d	20 cm/d	250 cm

Tabelle O03.10: Hangbewegungen vor Rutschungen (SKEMPTON / HUTCHINSON, 1969)

Jede Rutschung lässt nach Aufmessen der Geometrie und Feststellung der Randbedingungen hinsichtlich äußerer Lasten und der Schichtung Rückschlüsse auf die Scherfestigkeit des abgerutschten Materials in der Bruchfuge zu. Nachrechnungen von Rutschungen sind besonders dann sehr hilfreich, wenn Sanierungsmethoden oder Sicherungen nicht gerutschter Nachbarbereiche geplant werden müssen. Die Dimensionierung der Sicherungsmittel ergibt sich dann aus Berechnungen mit den aus der Rutschung rückgerechneten bodenmechanischen Parametern und dem angestrebten Sicherheitsniveau.

O.4 Berechnungsverfahren

O.4.1 Allgemeines und Sicherheitsdefinition

Recht zutreffend lassen sich Böschungen dadurch rechnerisch untersuchen, dass man z.B. mit Hilfe der Finite-Element-Methode den Spannungszustand in einer Böschung unter Berücksichtigung der Entstehungsgeschichte (Dammbau, Einschnittsherstellung) sowie der Eigenschaften der beteiligten Böden errechnet. Aus einer Bewertung der Scherbeanspruchungen im Vergleich zu den Scherfestigkeiten an charakteristischen Stellen lässt sich dann auf die Sicherheit schließen. Da entsprechende Verfahren erst in jüngster Vergangenheit einem breiteren Nutzerkreis verfügbar sind und die integrale Bewertung einer derart ermittelten Sicherheit nicht eindeutig ist, haben sich andere, einfachere Methoden zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen etabliert.

Grundgedanke vieler Berechnungsverfahren ist, mögliche Prüfkörper, die eventuell rutschen könnten, daraufhin zu untersuchen, ob sie unter Berücksichtigung möglicher Widerstände ein stabiles Gleichgewicht aufweisen. Die wesentlichste Vereinfachung ist dabei, dass der Bruchkörper als starre Scheibe idealisiert wird, an der das Gleichgewicht der Kräfte und Momente bei einfachen Annahmen über deren Verteilung nachgewiesen wird.

Sofern die zu untersuchenden Körper nicht aus den Randbedingungen der Baugrundsichtung und der Qualität der beteiligten Schichten festliegen, werden systematisch möglichst viele denkbare Körper untersucht. Maßgebend ist die Geometrie, für welche die geringste Sicherheit vorliegt. Die erforderlichen Variationsberechnungen werden heute üblicherweise EDV-gestützt durchgeführt.

Dazu ist eine Definition erforderlich, was bei dieser Aufgabe unter "Sicherheit" verstanden werden soll. Sicherheit könnte sowohl bedeuten:

- In welchem Maß können Lasten (Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck, horizontale Beschleunigungen) zunehmen, damit die Böschung gerade versagt? oder
- In welchem Maß können stützende Sicherungsmittel (z.B. Anker, Dübel) reduziert werden, bis ein Versagen auftritt? oder
- In welchem Maß kann die Scherfestigkeit des Bodens abnehmen, bis es zum Bruch kommt?

Eine sehr brauchbare Zahl für die Sicherheit ist das Verhältnis der im Material verfügbaren Scherfestigkeit (Tangens des Reibungswinkels, Kohäsion) zur mobilisierten Scherfestigkeit, welche für den genannten Gleichgewichtsnachweis erforderlich ist. Diese Sicherheitsdefinition hat sich in vielen Bereichen der Bodenmechanik durchgesetzt und geht auf FELLENIUS (1927) zurück.

Sicherheit = vorhandene Scherfestigkeit / erforderliche Scherfestigkeit (O04.10)

Fellenius-Regel: $\eta = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi_{mob}}$ und/oder $\eta = \frac{c'}{c_{mob}}$

Dabei geht man in der Regel davon aus, dass der Reibungswinkel ($\tan \varphi$) und die Kohäsion in gleichem Umfang mobilisiert werden. Die Abminderung der Scherparameter ist auch im Partialsicherheitskonzept gut verwendbar. Es werden die charakteristischen Bodenkennwerte φ'_k und c'_k mit Hilfe von Partialsicherheitsbeiwerten γ_φ und γ_c abgemindert auf φ'_d und c'_d . Anschließend wird nachgewiesen, dass diese Bemessungs-(design-)Werte nicht vollständig ausgenutzt werden. Bei Standsicherheitsnachweisen von Böschungen wird also das Gleichgewicht unter der Voraussetzung nachgewiesen, dass die Reaktionskräfte des Bodens (und ebenso von geschnittenen Bauteilen) nur in einem um Sicherheitsfaktoren verminderten Maß in Anspruch genommen werden.

Das Verhältnis der mobilisierten Scherfestigkeit (die erforderlich ist, um das Gleichgewicht sicherzustellen) zur verfügbaren Scherfestigkeit ist im Mohr'schen Diagramm in Bild O04.10 dargestellt.

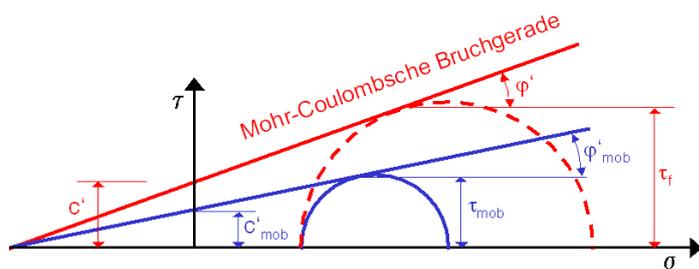


Bild O04.10: mobilisierte Scherfestigkeit φ'_{mob} , c'_{mob} und τ_{mob} im Vergleich zur verfügbaren Scherfestigkeit φ' , c' und τ_f .

0.4.2 Böschung in einem homogenen Boden ohne Kohäsion

In nichtbindigen Böden ohne Kohäsion entspricht die maximal mögliche Böschungsneigung dem Reibungswinkel. Dass erfahrungsgemäß in natürlichem Sand in unseren Breiten auch steilere Böschungen ausgeführt werden können, liegt an der in feuchten Sanden vorhandenen Kapillarkohäsion.

Der erforderliche Reibungswinkel φ' , um eine Böschung mit der Neigung β im Gleichgewicht zu halten, ist $\varphi' = \beta$. Daraus ergibt sich die globale Sicherheit entsprechend der Fellenius-Regel für eine Böschung in kohäsionslosem Material zu

$$\eta = \tan \varphi' / \tan \beta \quad \text{bzw. als Kehrwert der Ausnutzungsgrad: } \mu = \tan \beta / \tan \varphi'$$

Die Tiefe eines Rutschkörpers in kohäsionslosem Material reduziert sich mathematisch auf 0. Daher sind in nichtbindigen Böden die Oberflächen kritisch: Oberflächenrutschungen, Hautrutschungen. Tiefreichende Bruchkörper sind in homogenen nichtbindigen Böden nicht zu erwarten.

Nach dem Sprachgebrauch im Teilsicherheitskonzept sind Nachweise gegen Böschungs- und Geländebruch Nachweise der Gesamtstandsicherheit. Es ist der Grenzzustand 1C nachzuweisen. Dabei wird auf der Widerstandsseite die Teilsicherheit auf die Scherparameter bezogen und es gilt $\tan \varphi'_d = \tan \varphi'_k / \gamma_\varphi$. Bezogen auf den Bemessungswert der Scherfestigkeit φ'_d , in der bereits die zugeordnete Teilsicherheit enthalten ist, wird dann für eine Böschung mit der Neigung β ein Ausnutzungsgrad μ errechnet zu

$$\mu = \tan \beta / \tan \varphi'_d$$

Der Ausnutzungsgrad darf maximal 1 betragen.

0.4.3 Berechnung mit Diagrammen für einfache Fälle

Einfache, homogene Böschungen, in denen kein Strömungsdruck oder Porenwasserüberdruck auftritt, können nach Bild 004.20 bemessen werden. Dabei ergibt sich für einen Ausnutzungsgrad $\mu = 1$ die mögliche Böschungshöhe $h(\beta)$ in Abhängigkeit von der Wichte γ und den Bemessungswerten der effektiven Scherparameter.

In der Literatur sind auch Lösungen für kompliziertere Böschungssituationen, z.B. unter Einrechnung eines Porenwasserüberdruckes (BISHOP / MORGENSTERN, 1960) oder von Wasserdruck in der Anrisszone von Böschungen mit Hilfe von Tafelwerken und Diagrammen veröffentlicht. Sie haben inzwischen aber nur noch untergeordnete Bedeutung, da interessierte Anwender heute problemlos selbst mit allgemein verfügbarer EDV-Hilfe entsprechende Lösungen im Einzelfall berechnen können.

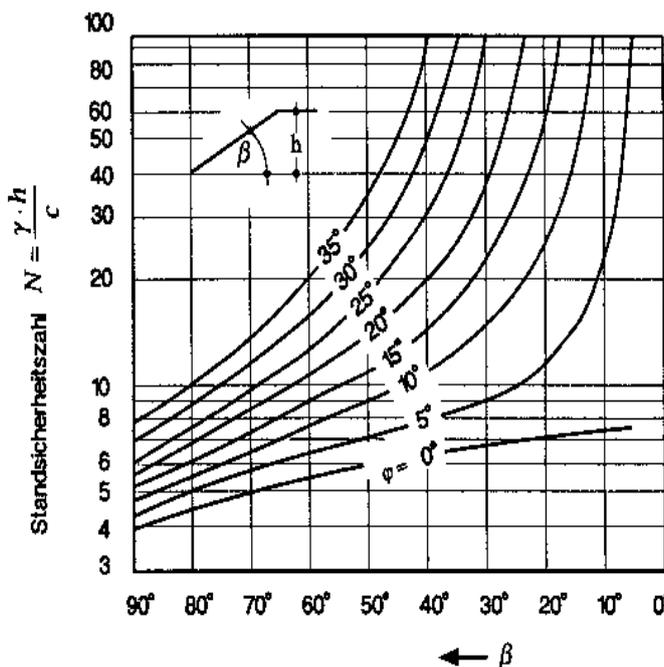


Bild 004.20: Abhängigkeit von Böschungshöhe h und Böschungswinkel β von den Scherparametern φ und c bei einem Ausnutzungsgrad $\mu = 1$ (TAYLOR, 1948)

0.4.4 Rutschungen auf ebenen Gleitflächen

Wenn ausgedehnte geringmächtige Deckschichten, deren Scherfestigkeit geringer ist als diejenige der darunter folgenden Schichten, Teil einer Böschung sind, dann ist die wahrscheinlichste und damit zu untersuchende Rutschfläche die Schichtgrenze unterhalb dieser Deckschicht. Da eine Anrisszone oben und der Fußbereich unten relativ zum Gesamtumfang vernachlässigbar sind, können die Sicherheitsbetrachtungen an einer ebenen, böschungsp parallelen Gleitfläche vorgenommen werden. Derartige Verhältnisse liegen zum Beispiel bei geneigt eingebauten Oberflächenabdichtungen vor, die außerdem in böschungsp paralleler Richtung durchströmt werden können.

Grundsätzlich ist die Standsicherheit einer derart geneigten Schicht bzw. eines entsprechenden Schichtpaketes abhängig von

- der Gewichtskraft G
- einer möglichen Strömungskraft S
- einer möglichen Auftriebskraft A
- dem Böschungswinkel β
- dem Reibungswinkel φ' und
- der Kohäsion c'

der Schicht(en) oberhalb der zu prüfenden Gleitebene parallel zur Böschungsoberfläche (Bild O04.30).

Aus einem Vergleich der möglichen und der für das Gleichgewicht erforderlichen Kraftkomponenten parallel zur Gleitebene (Bezug für G, A, S und C ist hier ein m^2 Gleitfläche) ergibt sich:

Gleichgewicht in tangentialer Richtung:

$$(G \cdot \cos \beta - A) \cdot \tan \varphi_{mob} + c_{mob} = G \cdot \sin \beta + S$$

aus Fellenius-Regel:

$$\tan \varphi_{mob} = \frac{\tan \varphi'}{\eta} ; c_{mob} = \frac{c'}{\eta}$$

$$\eta = \frac{(G \cdot \cos \beta - A) \cdot \tan \varphi' + c'}{G \cdot \sin \beta + S}$$

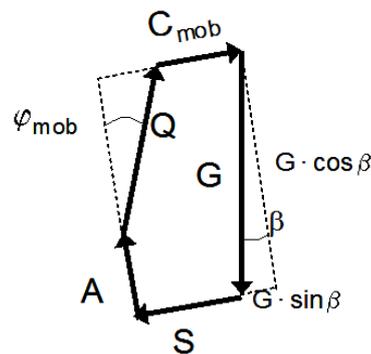
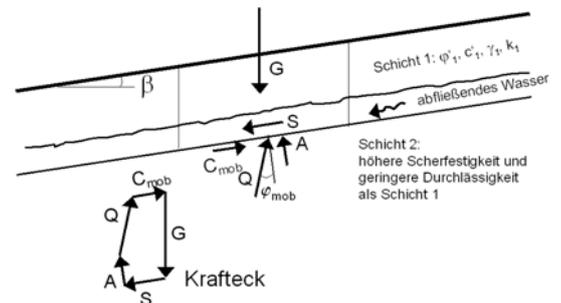


Bild O04.30: Ansatz der Kräfte bei ebener Gleitfläche

Auch hier wird im Partialsicherheitskonzept mit den Bemessungswerten der Scherfestigkeit φ'_d und c'_d gearbeitet und ein Ausnutzungsgrad μ definiert mit

$$\mu = \frac{G \cdot \sin \beta + S}{(G \cdot \cos \beta - A) \cdot \tan \varphi'_d + c'_d}$$

Im einfachen Fall von $A = S = c' = 0$ wird daraus $\mu = \frac{\tan \beta}{\tan \varphi'_d}$, siehe O.4.2.

Die Strömungskraft S ergibt sich aus der Wichte des Wassers γ_w , dem Fließgefälle i und der durchströmten Fläche mit der Höhe h zu

$$S = \gamma_w \cdot h \cdot i = \gamma_w h \cdot \sin \beta$$

und ist in erster Linie von h abhängig. Diese durchströmte Höhe h wiederum ist abhängig von einer abzuführenden Wassermenge Q sowie dem Durchlässigkeitsbeiwert k der durchströmten Schicht entsprechend

$$Q = k \cdot i \cdot h.$$

Beispiel: Bei einem starken Regen mit einer Stunde Dauer muss entsprechend hydrologischen Daten aus Deutschland mit einer Regenspende von bis zu 10 l je Stunde und m^2 gerechnet werden. Dies erfordert einen Abfluss von $Q = 0,01 m^3/h = 2,8 \cdot 10^{-6} m^3/s$. Bei einem Durchlässigkeitsbeiwert von z.B. $1 \cdot 10^{-4} m/s$ und einem Gefälle von 1 : 2,5 führt dies zu einer durchströmten (und auftriebswirksamen) Höhe h von 0,07 m und einer Strömungskraft von $S = 0,3 kN$ je m^2 Böschungsoberfläche (horizontale Projektionsfläche), sofern nicht zusätzlich Wasser aus anderen Einzugsgebieten durch die maßgebende Fläche fließen muss.

O.4.6 Standsicherheitsnachweise bei Felsböschungen

Noch stärker durch geologische Faktoren bestimmt sind Felsböschungen. Hier müssen die charakteristischen Neigungen von Schichtgrenzflächen, Klüften und evtl. Störungen sowie die Scherfestigkeiten auf derartigen Trennflächen erhoben und in Standsicherheitsmodelle eingebracht werden, die grundsätzlich dem Vorgehen beim Blockgleiten ähneln. Bei Felsböschungen darf nicht nur die Sicherheit einer Gesamtböschung betrachtet werden. Auch das mögliche Herauslösen von Teilen einer Böschung muss beachtet werden.

Mit Hilfe von Kluffkörpermodellen und vor allem mit geometrischen Überlegungen, wie typische Trennflächen im Gebirge mit der vorhandenen oder geplanten räumlichen Lage einer Böschung zusammenwirken, lassen sich Standsicherheiten beurteilen und Sicherungsmaßnahmen planen.

Näheres hierzu findet sich in der Vertiefungsvorlesung Felsmechanik.

O.4.7 Berechnung mit zylindrischen Bruchfugen

Bei tieferreichenden Rutschungen bieten kreiszylindrische Bruchfugen eine sinnvolle Geometrie, da sie kinematisch zwangungsfrei möglich sind. Aufgrund der im zu untersuchenden Querschnitt sich ergebenden Kreisbögen spricht man von Gleitkreisverfahren. Bei fast allen Böschungsgeometrien ist es sinnvoll möglich, im Querschnitt kreisförmige Bruchfugen zu untersuchen. Die Untersuchung wird als Variation durchgeführt, bei der in engem Raster viele Kreismittelpunkte und Durchmesser berechnet werden. Bei sehr großem Durchmesser und entfernt liegenden Mittelpunkten lassen sich mit Kreisbögen auch ebene Scherflächen gut annähern.

O.4.7.1 Lamellenfreies Verfahren (FRÖHLICH, 1950)

Alle Lasten werden mit ihren Bemessungswerten zu einer Resultierenden S_d zusammengefasst (Bild O04.50). Zu dieser wird außerdem gegebenenfalls die so genannte Kohäsionskraft hinzugerechnet, die man (damit die Kohäsion in gleichem Maße mobilisiert wird wie die Reibung) nach BOROWICKA (1970) als Vergrößerung der Normalkraft auf die Bruchfuge am Durchstoßpunkt von S_d in der Form ansetzt

$$P_k = (c \cdot \cot \varphi') \cdot L \quad (O04.20)$$

($L = \overline{AB}$ - Sehnenlänge des Bruchkreises mit dem Öffnungswinkel $2 \cdot \alpha$. Dann ist $L = 2 \cdot r \cdot \sin \alpha$). P_k und S_d werden vektoriell zu S_{kd} addiert. Wenn ϑ der Winkel zwischen S_d bzw. S_{kd} und der Bruchflächennormalen ist, ergibt sich nach der Fellenius-Regel die Globalsicherheit $\eta = \tan \varphi' / \tan \vartheta$ bzw. beim Partialsicherheitskonzept der Ausnutzungsgrad $\mu = \tan \vartheta / \tan \varphi'_d$. (Bild O04.50 zeigt das Verfahren im Fall $c = 0$). Die Methode versagt bei kleinen Reibungswinkeln und maßgebender Kohäsion.

Da diese Berechnungsart nach BOROWICKA außerdem bei mehrschichtigem Bodenaufbau nur mittels zusätzlicher Annahmen zum Ziel führen würde, ist sie praktisch auf homogene Bodenverhältnisse beschränkt. Ein weiterer Nachteil dieses einfachen Verfahrens ist die Vernachlässigung der Tatsache, dass die Reaktionskräfte eine Verteilung längs der Bruchfläche haben, deren Resultierende nicht im gleichen Punkt angreifen muss wie die der Lasten. Daher bietet DIN 4084-100 hierfür ein Momentenverfahren an.

O.4.7.2 Lamellenverfahren nach KREY und BISHOP

(Näherungsverfahren nach KREY, 1926, Weiterentwicklung von BISHOP, 1954)

In allgemeinen Nachweisfällen, insbesondere bei mehrschichtigem Baugrundaufbau, wird der Bruchkörper in eine Folge einzelner lotrechter Lamellen unterteilt, an denen je für sich das Gleichgewicht nachzuweisen ist. Dabei treten die Erddrücke auf die Lamellen-Flanken als neue, zusätzliche Unbekannte auf. Ihre Verteilung und Richtung ist unbekannt und könnte nur durch die Konstruktion einer Stützzlinie im Bruchkörper zur Erfüllung des Momentengleichgewichts bestimmt werden. Darauf wird jedoch bei den gängigen Lamellenverfahren verzichtet, weil es für die Lösung der Aufgabe

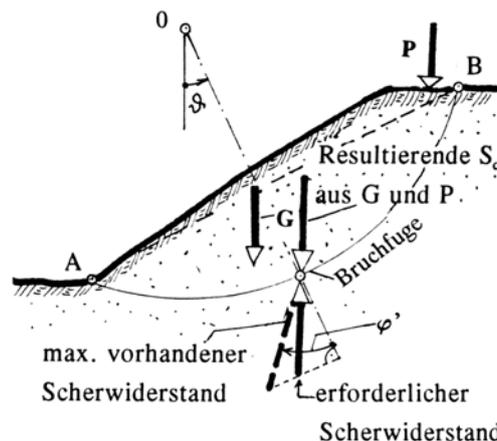


Bild O04.50: Ansatz der Kräfte beim lamellenfreien Verfahren

genügt, das Momentengleichgewicht am Bruchkörper insgesamt zu erfüllen. Der damit verbundene statische Fehler ist für übliche Anwendungen nicht ausschlaggebend, weshalb das Verfahren wegen seiner einfachen Handhabung international eingeführt ist (s.a. EC7). Sobald große äußere Kräfte berücksichtigt werden müssen, sollten jedoch statisch einwandfreie Verfahren den Vorzug erhalten.

Auch hier wird die statische Unbestimmtheit des Problems umgangen, indem die (unbekannte) Verteilung der Normalspannungen längs der Bruchfläche ausgeklammert wird: die Normalkräfte in der Bruchfläche werden im Sinne einer "einfachen Annahme" so angesetzt, wie sie sich aus den Lasten (ohne von den Materialeigenschaften abhängige Lastausbreitungsberücksichtigung) herunterrechnen lassen. Das Risiko liegt aber erfahrungsgemäß weniger hier, sondern vielmehr im richtigen Ansatz der Bemessungslasten, der Bemessungs-Scherparameter und in der vollständigen Variation der Bruchfläche.

Um ein allgemein verwendbares Verfahren zu bekommen, muss es so entwickelt werden, dass es sowohl mit effektiven als auch mit totalen Scherparametern funktioniert. Nachstehend sind die logischen Schritte für den Fall angegeben, dass mit effektiven Spannungen gerechnet werden soll; der Berechnungsfall mit totalen Spannungen ist darin als Sonderfall enthalten.

1. Schritt:

Mittelpunkt M (bzw. 0) und Radius r des Bruchkreises werden gewählt. Der dadurch festgelegte Bruchkörper wird, Bild O04.60, in senkrechte Lamellen 1,2...i...n eingeteilt. Jede Lamelle ist durch einen Richtungswinkel ϑ_i (positiv in Richtung der ansteigenden Böschung) und eine Breite b_i definiert. Die Lamelleneinteilung stimmt man zweckmäßigerweise auf die Bodenschichten und die Böschungsgeometrie ab; in einfachen Fällen genügt es i.A., etwa 10 Lamellen zu nehmen.

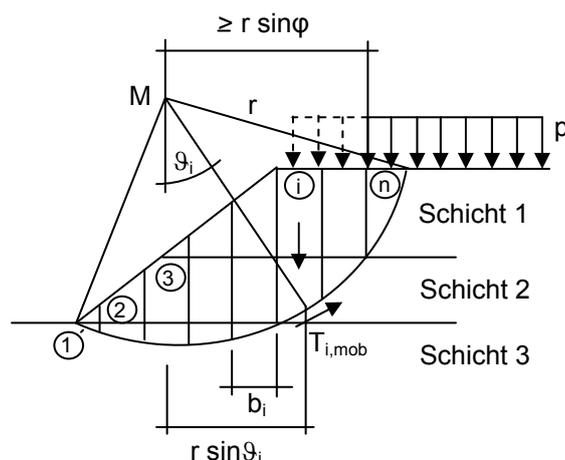


Bild O04.60: Einteilung eines Gleitkreises in Lamellen

2. Schritt:

Die im Punkt i der Bruchfuge mit den Bemessungswerten der Scherfestigkeit (Index "d") aufnehmbare Scherspannung ist

$$\tau_{id} = \sigma'_i \cdot \tan \varphi'_{id} + c'_{id} \tag{O04.30}$$

bzw. die aufnehmbare Schubkraft T_{fid} mit f = failure i für die i. Lamelle und d = design

$$T_{fid} = N'_i \cdot \tan \varphi'_{id} + c'_{id} b_i / \cos \vartheta_i \tag{O04.40}$$

Um zu berücksichtigen, dass die aufnehmbare Schubkraft nicht voll ausgenutzt zu werden braucht, um im Grenzzustand Gleichgewicht zu haben, wird ein "Ausnutzungsgrad" $\mu \leq 1$ definiert. Dieser könnte von Lamelle zu Lamelle variieren, wird in der Praxis aber als konstant angenommen. Somit ist die mobilisierte Schubkraft

$$T_{i,mob} = \mu \cdot T_{fid} \tag{O04.50}$$

In Bild O04.70 sind die Reaktionskräfte Q und C_{mob} aufgrund der Parameter der mobilisierten Schubspannung eingetragen. Es sind Krafftecke für den aktiven (i) und den passiven (k) Bereich dargestellt. z.B. gilt für die Lamelle i:

$$\tan \varphi'_{i,mob} = \mu \cdot \tan \varphi'_{id} \quad \text{und} \quad c'_{i,mob} = \mu \cdot c'_{id} \tag{O04.60}$$

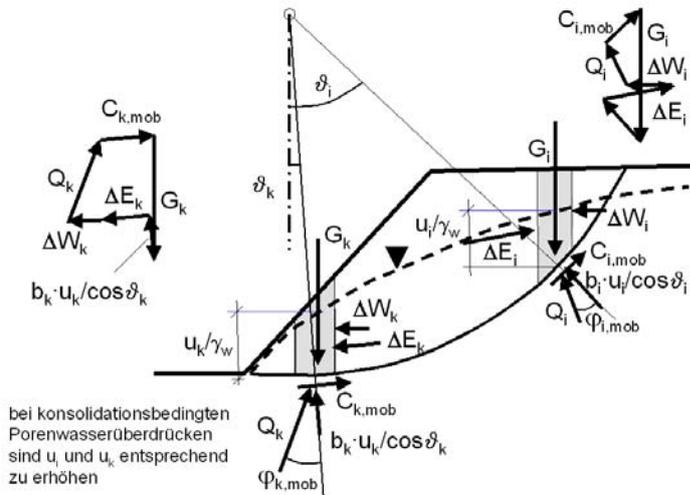


Bild O04.70: Ansatz der Kräfte an den Lamellen

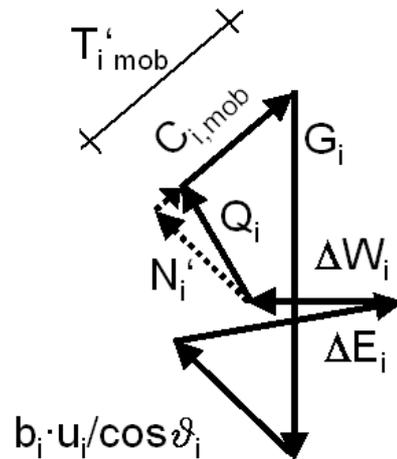


Bild O04.80: Krafteck für Lamelle i mit N und T

3.Schritt:

Falls mit einem Porenwasserüberdruck u zu rechnen ist, muss seine Größe längs der Bruchfuge abgeschätzt werden: er verringert die Normalkraft N auf den effektiven Wert N' . Dagegen bleibt die Wirkung einer Strömungskraft W_i auf N und damit auch auf T außer Ansatz; Strömungskräfte werden der Einfachheit halber nur als Lasten in die Berechnung eingesetzt (Vereinfachung auf der sicheren Seite), siehe Kapitel O.4.7.3.

4.Schritt:

Da über die Verteilung der Reaktionskräfte längs der Bruchfuge bei dieser vereinfachten Betrachtung nichts ausgesagt werden kann, muss angenommen werden, dass die Scherfestigkeit in allen Punkten im gleichen Maß mobilisiert ist, d.h. man setzt

$$\mu_i = \text{const} = \mu \tag{O04.70}$$

und hat dann

$$T_{i,mob} = \mu \cdot [c'_{id} \cdot b_i / \cos \vartheta_i + N'_i \cdot \tan \varphi'_{id}] \tag{O04.80}.$$

5.Schritt:

Man denkt sich nun für die Lamelle i das Krafteck gezeichnet, Bild O04.90. G_i (einschließlich eventuell auf der Lamelle stehender Oberflächenlasten, da deren räumliche Ausbreitung zur Tiefe bei diesem Näherungsverfahren unberücksichtigt bleibt), die Porenwasserdruckkraft ist nach Größe und Richtung bekannt, sie reduziert die effektive Normalkraft in der Lamellenbasis. Die Kraft $T_{i,mob}$ wirkt tangential und setzt sich aus einem mobilisierten Reibungs- und Kohäsionsanteil zusammen. Man muss die Richtung von ΔE_i , dessen Größe und Winkel δ_i gegen die Horizontale unbekannt sind, abschätzen, um über das Kräftegleichgewicht an der Lamelle etwas aussagen zu können: man könnte z.B. ein festes Verhältnis δ_i / φ_i annehmen. Nachfolgend wird die Größe $\Delta(E_i + W_i)$ stets als vektorielle Summe von ΔE_i , und ΔW_i verstanden

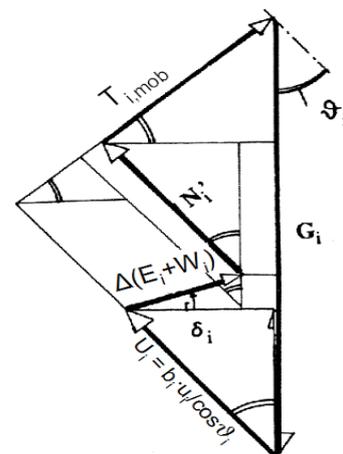


Bild O04.90: Krafteck für Lamelle i

Aus dem Krafteck lassen sich zwei Kräftegleichgewichtsbedingungen ablesen, wobei es für den Rechengang zweckmäßig ist, die normalen und die tangentialen Kräfte zu betrachten (Oberflächenlasten werden anteilig in G_i eingerechnet):

normal:

$$G_i - b_i \cdot u_i - \Delta(E_i + W_i) \cdot \sin \delta_i - T_{i,mob} \cdot \sin \vartheta_i - N'_i \cdot \cos \vartheta_i = 0$$

tangential:

$$G_i \cdot \sin \vartheta_i - \Delta(E_i + W_i) \cdot \sin \delta_i \cdot \sin \vartheta_i - \Delta(E_i + W_i) \cdot \cos \delta_i \cdot \cos \vartheta_i - T_{i,mob} = 0$$

} (O04.90).

Es lässt sich zeigen, dass hier die Vertikalanteile von $\Delta(E_i+W_i)$ ohne großen Verlust an Genauigkeit vernachlässigt werden können, d.h. man setzt $\delta_i = 0$:

$$\left. \begin{aligned} G_i - b_i \cdot u_i &= T_{i,mob} \cdot \sin \vartheta_i + N'_i \cdot \cos \vartheta_i \\ G_i \cdot \sin \vartheta_i &= T_{i,mob} + \Delta(E_i + W_i) \cdot \cos \vartheta_i \end{aligned} \right\} \text{(O04.100).}$$

Wenn man in den Gleichungen O04.100 $T_{i,mob}$ mittels Gleichung O04.80 eliminiert, bleiben als unbekannte Berechnungsgrößen die Kräfte N_i und $\Delta(E_i + W_i)$ und der Ausnutzungsgrad μ .

6.Schritt:

Eine Bedingung zur Berechnung der 3 Unbekannten wird bei diesem Näherungsverfahren durch eine Gleichgewichtsbeachtung am gesamten Bruchkörper gewonnen, und zwar nimmt man dazu die Momenten-Gleichgewichtsbedingung:

$$r \cdot \sum G_i \cdot \sin \vartheta_i = r \cdot \mu \cdot \sum \{c'_{i,d} \cdot b_i / \cos \vartheta_i + N'_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}\} + \sum r_i \cdot \Delta(E_i + W_i) \cdot \cos \vartheta_i \quad \text{(O04.110).}$$

Die notwendige Unterscheidung von r und r_i veranschaulicht Bild O04.100.

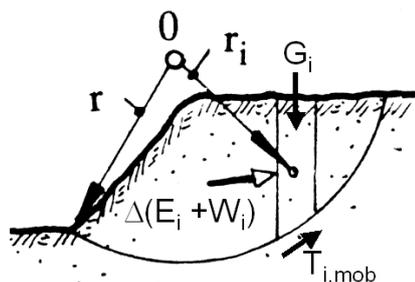


Bild O04.100: Unterscheidung von r und r_i

Die von BISHOP empfohlene Vereinfachung besteht darin, die letzte Teilsumme = 0 zu setzen. Darin - wie auch in der Vereinfachung $\delta_i = 0$ - liegt ein statischer Fehler, denn genau genommen ist damit nicht mehr gewährleistet, dass die vektorielle Summe der Erddruckkräfte $\Sigma(\Delta(E_i + W_i)) = 0$ ist, wie es sein muss, weil es innere Kräfte sind. Mit dieser Vereinfachung ergibt sich aus Gleichung O04.110:

$$\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i = \mu \cdot \sum \{c'_{i,d} \cdot b_i / \cos \vartheta_i + N'_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}\} \quad \text{(O04.120).}$$

7.Schritt:

N'_i wird mit Hilfe der vertikalen Gleichgewichtsbedingung, Gleichung O04.100, eliminiert. Dann bleibt eine Bestimmungsgleichung für den Ausnutzungsgrad μ , die sich nach einigen Umformungen auf folgende implizite Form bringen lässt:

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i}{\sum [(G_i - b_i \cdot u_i) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}] / [\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}]} \quad \text{(O04.130).}$$

Der Ausnutzungsgrad μ gibt an, in welchem Umfang die Bemessungswerte $\varphi_{i,d}$ und $c_{i,d}$, also die mit den Partialsicherheitswerten γ_φ und γ_c reduzierten charakteristischen Scherfestigkeiten $\varphi_{i,k}$ und $c_{i,k}$ in Anspruch genommen werden. Es gilt daher die Forderung: $\mu \leq 1$

Nach dem alten, globalen Sicherheitskonzept ist die globale Sicherheit $\eta = f = 1/\mu$, wenn $\varphi_{i,d}$ und $c_{i,d}$ als unverminderte charakteristische Werte φ_k und c_k in die Formel eingesetzt werden.

Man beachte, dass sich die Definition der Ausnutzung bzw. Sicherheitsdefinition allein aus der Teilmobilisierung von Scherwiderständen in der Gleitfuge ergibt, sie ist bei allgemeinen Randbedingungen - auch wenn das oft falsch so angegeben wird - nicht das Verhältnis zwischen haltenden und treibenden Kräften / Momenten.

Bei der Berechnung mit totalen Scherfestigkeiten c_u wird diese anstelle der effektiven Parameter eingesetzt. Bei $\varphi_u = 0$ vereinfacht sich Gleichung O04.130 zu

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i}{\sum c_{u,i,d} \cdot b_i / \cos \vartheta_i} \quad (\text{O04.140}).$$

8.Schritt:

Die Gleichung O04.130 lässt sich mit einer einfachen Iteration in wenigen Schritten lösen: man setzt auf der rechten Seite $\mu = 1$, errechnet damit einen ersten Näherungswert von μ und wiederholt mit diesem Ergebnis, auf der rechten Seite eingesetzt, die Berechnung. Da μ auf der rechten Seite die Nenner-Summe nur schwach beeinflusst, konvergiert die Iteration sehr schnell.

9.Schritt:

Die Berechnungsschritte (1) - (8) werden für verschiedene Werte r bei festem Mittelpunkt 0 wiederholt, bis der Größtwert von μ gefunden ist.

10. Schritt (und folgende):

Die Berechnungsschritte (1) - (9) werden für verschiedene Mittelpunkt-Koordinaten durchgeführt, wobei die Variation zweckmäßigerweise auf der Basis eines regelmäßigen Rasters vorgenommen wird, welches nach Eingrenzung des Punktes, an dem sich die höchste Ausnutzung ergibt, verfeinert wird.

Die genannten Berechnungen werden mit Hilfe von EDV-Programmen durchgeführt, die von verschiedenen Anbietern zur Verfügung stehen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Benutzeroberflächen, aber auch technisch hinsichtlich der Behandlung von Ergänzungen wie Ankern, Nägeln, Dübeln, räumlichen Wirkungen, Erdbebenlastfällen, Ansatz freier Wasserspiegel, Berücksichtigung von Konsolidationseffekten, Vergleich von Widerständen im Böschungsfußbereich mit dem Erdwiderstand etc.

Durch die Variation der Bruchkreise erhält man eine Ergebniskarte mit Werten μ , in der sich Kurven $\mu = \text{const}$ einzeichnen lassen: Isoasphalien. Bei homogenen Böschungen haben die Isoasphalien die Form einer schmalen Ellipse, Bild O04.110. Danach ist es zweckmäßig, den Punkt 0 zuerst parallel zur Böschung zu variieren und dann erst in der Richtung der Böschungsnormalen. Falls sich bei der Variation $\mu > 1$ ergibt, ist die Böschung nicht ausreichend standsicher. Dann müssen zusätzliche rückhaltende Kräfte (z.B. Anker) installiert oder die Geometrie geändert werden.

Eine Begrenzung der Variation ergibt sich aus folgenden Regeln:

Der ungünstigste Bruchkreis geht durch den Böschungsfuß, solange $\varphi' > 5^\circ$ ist (TAYLOR, 1948) und die Geometrie nicht durch Stützbauwerke beeinflusst ist.

Überkippende Böschungskanten brauchen nicht untersucht zu werden: $\vartheta_r \leq 90^\circ$.

Wenn eine weiche über einer festen Schicht liegt, bildet die Schichtgrenze eine natürliche Grenztangente für die in Frage kommenden Bruchkreise, Bild O04.120. Im Bild ist eine geometrische Näherungskonstruktion für die Lage des ungünstigsten Bruchkreises bei sehr weichen Deckschichten mit eingetragen.

Darüber hinaus gibt es aber kaum Regeln, die es gestattet würden, auf die Variationsrechnung zu verzichten. Es kann hingegen sogar vorkommen, dass ein relatives Minimum irrtümlich für das absolute Minimum gehalten wird, insbesondere bei Geländebruch-Nachweisen.

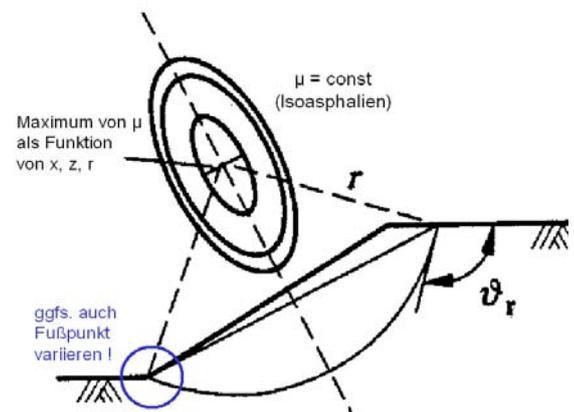


Bild O04.110: Linien gleicher Ausnutzung der Scherfestigkeit

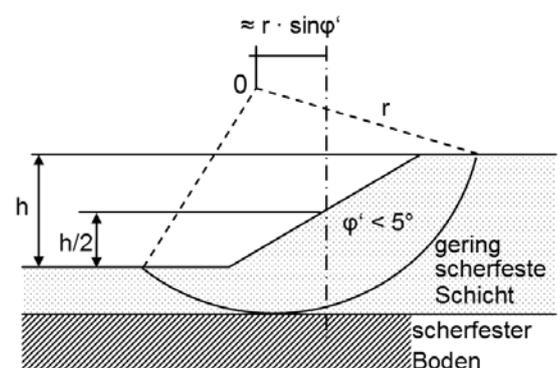


Bild O04.120: Einschränkung der Variation bei geschichtetem Baugrund

O.4.7.3 Berücksichtigung von Wasserdruck

Die Sicherheit einer Böschung bzw. eines Geländesprungs kann durch die Wirkung von Wasser herabgesetzt werden. Maßgebend sind dabei die Kraftwirkungen des Wassers, also Wasserdruck, Porenwasserüberdruck, Strömungskräfte. Dagegen sind Wirkungen des Wassers hinsichtlich einer Veränderung der Scherfestigkeit von untergeordneter Bedeutung und spielen nur dann eine Rolle, wenn in teilgesättigten Böden durch Wasserzutritt stabilisierende Kapillarkräfte aufgehoben werden. Dies geht dann einher mit einer Verringerung der Konsistenz.

In den zuvor vorgestellten Gleichungen ist die Wirkung des Wassers bereits durch mögliche Porenwasserdruckkräfte entlang der Gleitfuge berücksichtigt. Zur Berechnung der Gewichte der Lamellen muss dabei mit der Wichte des gesättigten Bodens unterhalb des Wasserspiegels gerechnet werden, also mit:

$\gamma_r = \gamma_s \cdot (1 - n) + n \cdot \gamma_w$. Bei ausgeglichenem Wasserspiegel außerhalb und innerhalb der Böschung kann man auch anstelle des Ansatzes der Porenwasserdruckkräfte die Gewichte oberhalb des Wasserspiegels mit γ und unterhalb mit γ' berechnen (Bild O04.140). Derartige Berechnungen zeigen, dass bei homogenem Boden und ausgeglichenem Wasserspiegel die Sicherheit bei voll eingetauchter und vollständig wasserfreier Böschung gleich groß ist; dazwischen hat sie einen Kleinstwert.

Wenn das Außenwasser niedriger steht als das Grundwasser (Bild O04.130), strömt das Wasser seinem Gefälle nach ab und belastet das Korngerüst des Böschungsbodens mit einem Strömungsdruck. Eine einfache, aber unter Umständen sehr auf der sicheren Seite liegende Abschätzung besteht darin, den hydrostatischen Wasserüberdruck als äußere Horizontalkraft W anzusetzen.

Das daraus resultierende Moment $M = W \cdot r_w$ wird dann im Zähler der Gleichung für den Ausnutzungsgrad O04.130 - dividiert durch r - addiert:

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i + W \cdot r_w / r}{\sum \frac{(G_i - b_i \cdot u_i) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}}} \quad (O04.150).$$

Die Berücksichtigung im Zähler ergibt sich aus dem Umstand, dass die Wasserdruckkraft in voller Größe wirksam ist und nicht nur - wie die Scherkräfte in der Gleitfuge - in einem durch den Ausnutzungsgrad μ bestimmten reduzierten Umfang.

Man bedenke, dass die Berücksichtigung von Momenten aus äußeren Lasten an dieser Stelle aus der Erfüllung der Momenten-Gleichgewichts-Gleichung O04.110 resultiert. Damit bleibt aber die Wirkung der Strömungskraft auf die Reaktionskräfte in der Bruchfuge unberücksichtigt und die am Gleitkörper wirkenden Horizontalkräfte stehen nicht zwingend miteinander im Gleichgewicht. Der mögliche Fehler in der Vereinfachung zwischen den Gleichungen O04.110 und O04.120 wird durch angreifende und derart berücksichtigte Horizontalkräfte eventuell größer, die Auswirkung ist nicht exakt absehbar.

Eine Berechnung ohne zusätzliche Fehler bei der Berücksichtigung des Wasserdrucks im Innern eines zu prüfenden Rutschkörpers erhält man durch Zeichnen eines Stromliniennetzes, Bild O04.150, aus dem alle am Bruchkörper angreifenden Wasserdruckkräfte abgeleitet werden können, wobei die vollen Wasserdrücke, nicht etwa nur Differenzdrücke, anzusetzen sind. Entsprechend muss auch der durchströmte Teil des Bruchkörpers mit seinem vollen Gewicht, d.h. ohne Auftrieb, angesetzt werden. Die Wasserdruckkräfte in der Bruchfläche gehen als Spannungen U_i in die o.g. Formeln ein.

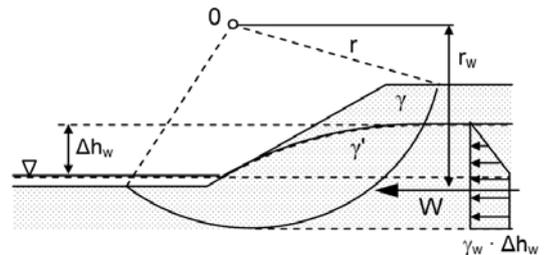


Bild O04.130: strömendes Wasser in einer Böschung, einfacher Ansatz des Strömungsdruckes

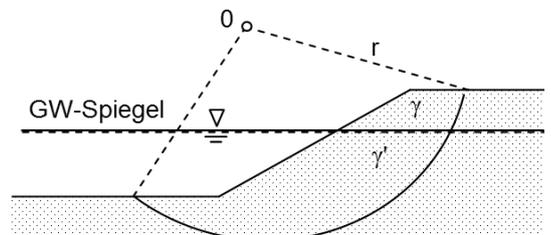


Bild O04.140: ausgeglichener Wasserspiegel innerhalb und außerhalb einer Böschung

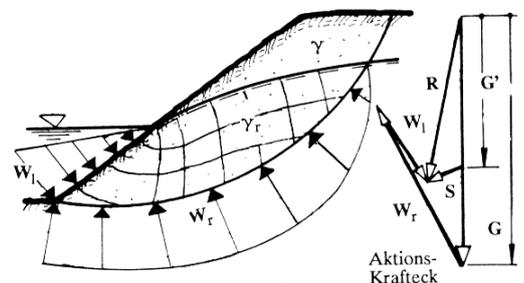


Bild O04.150: Stromliniennetz und Porenwasserdruckverteilung bei durchströmter Böschung

Der Wasserdruck W_I am Böschungsfuß, der die Wirkung des offenen Wassers außerhalb der Böschung widerspiegelt, wird in seiner Momentenwirkung ($M = W_I \cdot r_w$) analog der Gleichung O04.150 im Zähler der Gleichung für den Ausnutzungsgrad berücksichtigt. Aufgrund der stützenden Drehrichtung dieses Momentes gilt hier:

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i - W_I \cdot r_w / r}{\sum \frac{(G_i - b_i \cdot u_i) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}}} \quad (O04.160).$$

Auch in diesem Fall gelten die o.g. Anmerkungen zu möglichen Fehlern im Gleichgewicht der horizontalen Kräfte.

Die Berechnung der Porenwasserdrücke aus dem Stromliniennetz lässt sich ohne großen Genauigkeitsverlust dadurch vereinfachen, dass die Krümmung der Potentiallinien vernachlässigt wird, d.h. in jeder Lamelle die durch die Sickerlinie gegebene hydrostatische Wasserdruckhöhe angesetzt wird.

Ein besonderes Risiko für Böschungen stellt der rasche Abfall des Außenwasserspiegels dar. Die dadurch bedingte Minderung der rechnerischen Sicherheit erfasst man am einfachsten dadurch, dass die in Bild O04.150 eingetragene widerstehende Wasserdruckkraft $W_I = 0$ gesetzt wird und das Zusatzmoment M in Gleichung O04.160 entfällt.

O.4.7.4 Artesischer Wasserdruck, Porenwasserüberdruck und Konsolidation

Artesische Wasserdruckkräfte, Bild O04.160, können günstig oder ungünstig wirken, je nachdem, wie der Bruchkreis die Sperrschicht schneidet. Die Druckabnahme innerhalb der Sperrschicht nach oben wird gradlinig angenommen – eine ausreichende Näherung. Die artesischen Wasserdrücke auf die Gleitfläche gehen als Spannungen u_i in die o.g. Formeln ein.

Ebenso können Porenwasserüberdrücke, die die effektiven Spannungen in der Gleitfuge reduzieren, bei den Wasserdrücken u_i berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei der Herstellung von Dämmen auf weichem Untergrund bedeutsam. Hier stellt sich die Frage, wann eine neue Schüttlage aufgebracht werden darf, ohne dass durch die Zusatzbelastung ein Geländebruch auftritt. Die Scherwiderstände am Dammfuß sind vom Konsolidierungsgrad abhängig, also davon, in welchem Umfang der Porenwasserdruck aus zuvor fertig gestellten Schüttlagen abgeklungen ist. In Programmberechnungen für Gleitkreisberechnungen lassen sich entsprechende Konsolidationsberechnungen integrieren. Dann wird für jede Schüttlage bzw. jede aufgebrachte Last eine Liegezeit definiert und in Abhängigkeit von Geometrie, Liegezeit und Durchlässigkeitsverhältnissen für jede Lamelle an der Gleitfuge der Porenwasserüberdruck berechnet.

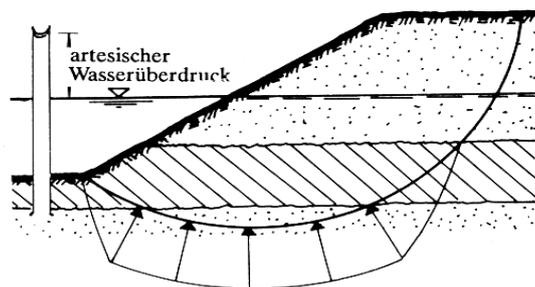


Bild O04.160: Böschungssituation mit artesisch gespanntem Grundwasser (nach KEMPFERT / RAITHEL, 2007)

O.4.7.5 Berücksichtigung äußerer Kräfte und von Erdbeben

Äußere Kräfte, die auf eine Böschung bzw. einen Geländesprung einwirken, werden näherungsweise in der Art berücksichtigt wie die Kraft W in Bild O04.130: die daraus resultierenden Momente werden mit $1/r$ im Zähler des Bruchs zur Berechnung von μ eingerechnet

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i + E \cdot r_E / r - A \cdot r_A / r}{\sum \frac{(G_i - b_i \cdot u_i) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}}}$$

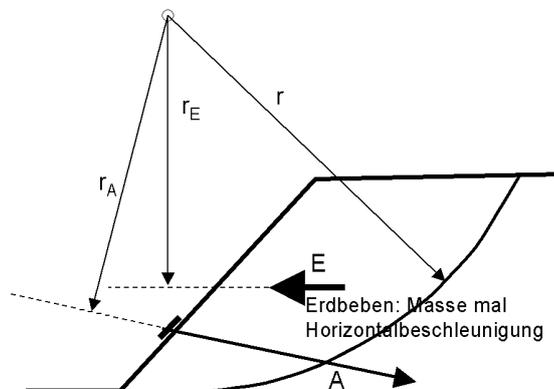


Bild O04.170: Böschungssituation bei Erdbeben

Dabei sind die Gebrauchslasten bzw. die Entwurfslasten, also die charakteristischen Lasten dividiert durch den zutreffenden Teilsicherheitsbeiwert, zu verwenden. Einzelkräfte sind auf zugeordnete Böschungslängen zu "verschmieren", z.B. die Kräfte von Ankern im Abstand von 2,5 m sind durch 2,5 m zu dividieren und werden dadurch auf 1 m Böschungslänge

bezogen. Weiterhin ist zu prüfen, ob es sich um innere Kräfte (Bild O04.180) oder äußere (Bild O04.190) handelt; nur letztere können angesetzt werden. Anker haben, wenn sie vorgespannt sind, auch eine normalkraft-erhöhende Wirkung in der Gleitfuge, die ebenfalls standsicherheitserhöhend angesetzt werden kann.

Beim Nachweis von Erdbeben werden die in einem Gleitkörper enthaltenen Massen ermittelt und mit der maßgebenden Horizontalbeschleunigung multipliziert. Diese Horizontallast wird als äußere Kraft berücksichtigt: Kraft mal Hebelarm um den Mittelpunkt, dividiert durch den Kreisradius wird im Zähler addiert.

Wieder gelten die Anmerkungen aus Abschnitt 0.4.7.2 zu möglichen Fehlern im Gleichgewicht der horizontalen Kräfte.

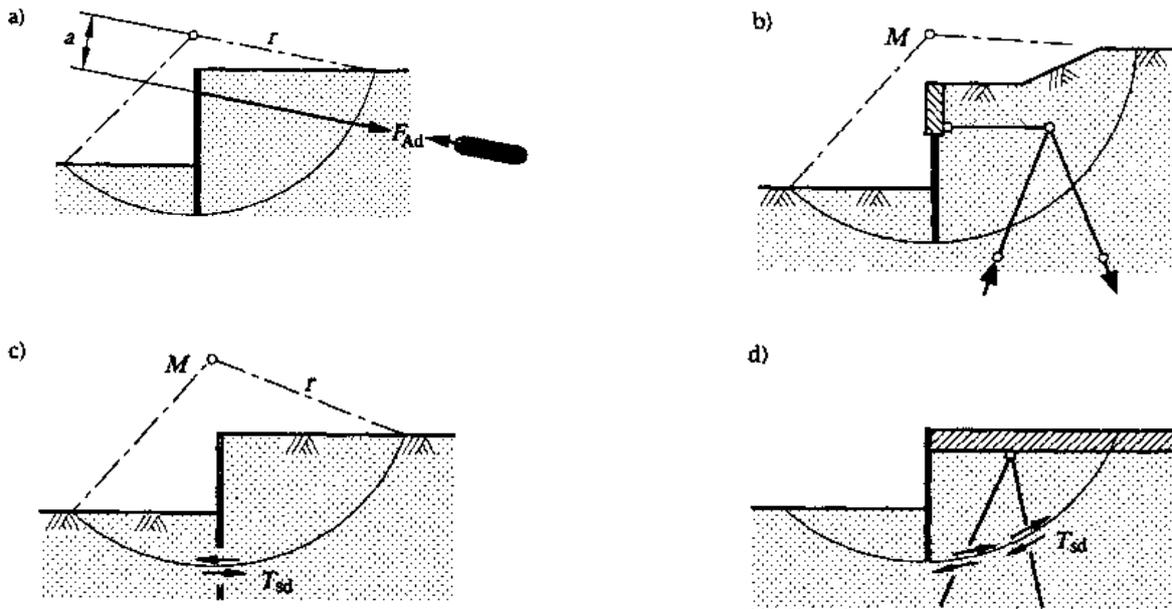
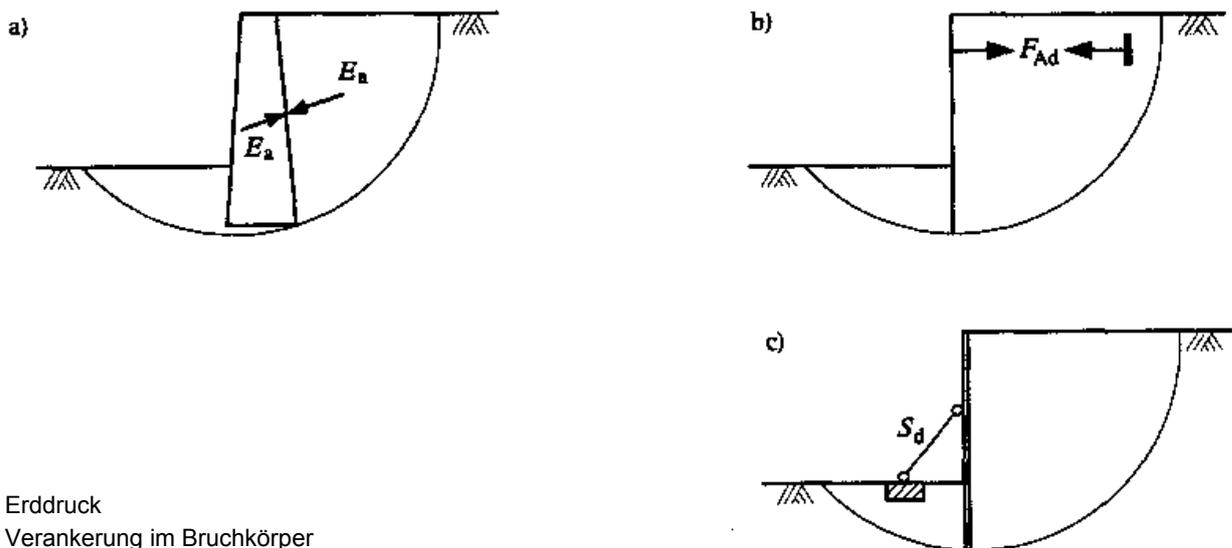


Bild O04.180: äußere Kräfte mit Wirkung auf einen Gleitkreis



- a) Erddruck
- b) Verankerung im Bruchkörper
- c) Stützung im Bruchkörper

Bild O04.190: innere Schnittkräfte ohne Wirkung auf einen Gleitkreis

O.4.7.6 Berücksichtigung von räumlichen Wirkungen

Wenn eine Böschung nur eine begrenzte Länge hat, z.B. in einer engen Baugrube, oder nur auf begrenzter Länge belastet wird, dann können räumliche Wirkungen günstig berücksichtigt werden. Die bisher dargestellten Formeln und Ansätze gelten für theoretisch unbegrenzt lange Böschungen. In Fällen mit begrenzter Böschungslänge werden stützende Seitenkräfte am räumlichen Böschungskörper ermittelt und als haltende äußere Kräfte gemäß O.4.7.5 eingeführt. Die seitlichen Stützkkräfte ergeben sich aus der Reibung (Erdruchdruck multipliziert mit dem Tangens des Reibungswinkels) zuzüglich der Kohäsion in den Seitenflächen. Sie werden wie in O.4.7.5 auf die zu berücksichtigende Böschungslänge "verschmiert".

O.4.8 Kinematisch und statisch korrekte Verfahren (übernommen von GUSSMANN, 1993)

Neben dem zuletzt beschriebenen und weit verbreiteten Verfahren nach Krey / Bishop gibt es weitere Berechnungsverfahren, da es unter den genannten Voraussetzungen und je nach der Art der Vereinfachung verschiedene statische Lösungen gibt. Insbesondere bleibt bei gekrümmter Bruchlinie die Normalspannungsverteilung unbestimmt und demzufolge - bei Reibungsböden - auch die Schubspannungsverteilung. Wenn dagegen die Bruchfläche eben ist, sind diese Verteilungen zwar auch unbestimmbar, aber die resultierende Krafrichtung ist eindeutig und ebenso die daraus resultierende Lösung. Wenn also das Materialverhalten im Innern des Bruchkörpers unberücksichtigt bleibt, lassen sich nur aus Ebenen zusammengesetzten, kinematisch zulässigen Bruchkörper-Mechanismen statisch eindeutige Lösungen erwarten. Dagegen kann es für alle gekrümmten Bruchflächen stets mehrere statisch korrekte Lösungen geben.

In diesem Abschnitt wird eine gemeinsame Betrachtung des erweiterten Lamellenverfahrens und des Verfahrens der zusammengesetzten Bruchmechanismen vorgenommen. Anschließend werden daraus die einfacheren Sonderfälle und auch Näherungsverfahren abgeleitet.

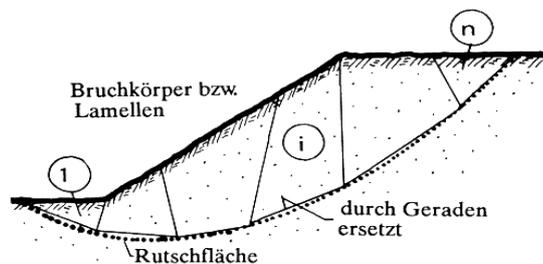


Bild O04.200: Böschungsbruch mit zusammengesetzten Bruchmechanismen

Bild O04.200 zeigt einen gedachten, kinematisch möglichen Böschungsbruch, bestehend aus n Elementen. Sie können entweder als Bruchkörper-Elemente oder als Lamellen mit fiktiven Schnittflächen interpretiert werden. Im ersten Fall gilt auch für die Element-Seitenflächen die Bedingung der Gleichung (O04.20), erweitert auf mobilisierte Kräfte gemäß Gleichung (O04.40). Wenn man sie als Lamellen ansieht, ist die Bruchbedingung nur eine obere Grenze, da auch kleinere Spannungen bzw. Kräfte zulässig sind.

Formale Gegenüberstellung der Unbekannten und der verfügbaren Gleichungen:

1. Bruchkörper-Betrachtung:

Unbekannte		Gleichungen	
3 je Unterkante	3n	2 Gleichgewichtsbedingungen je Lamelle	2n
3 je Schnitt	3(n-1)	1 Momentenbedingung je Lamelle	n
Ausnutzungsgrad 1/f	1	1 Bruchbedingung je Unterkante	n
(gilt für alle Seiten)		1 Bruchbedingung je Schnitt	(n-1)
Summe:	6n-2	Summe:	5n-1

Es wird sich zeigen, dass hierbei die Kräftegleichungen von der Momentengleichung entkoppelt und für sich lösbar sind. Durch die weitere willkürliche Annahme von 1 Angriffspunkt je Schnitt ergeben sich n-1 zusätzliche Gleichungen, so dass damit das Problem mathematisch eindeutig formuliert ist.

Diese Annahme wirkt sich nur auf die Angriffspunkte der Normalkräfte der Unterseite, aber nicht auf f aus (Entkopplung!).

2. Lamellen-Betrachtung:

Wenn die Bruchbedingung, mit der Reduktion auf Bemessungswerte und auf den Ausnutzungsgrad 1/f, auch im fiktiven Lamellenschnitt als Gleichung und nicht nur als obere Schranke angesehen wird, gilt für die Lösbarkeit dasselbe wie bei der Bruchkörper-Betrachtung. Bei den Lamellenverfahren werden aber meist senkrechte Schnittflächen und - zur Annäherung an eine gekrümmte Bruchkurve - n groß (Grenzfall: ∞) gewählt. Dann ergibt sich folgende Gegenüberstellung:

Unbekannte		Gleichungen	
2 je Unterkante	2n	2 Gleichgewichtsbedingungen je Lamelle	2n
3 je Schnitt	3(n-1)	1 Momentenbedingung je Lamelle	n
Ausnutzungsgrad 1/f	1	1 Bruchbedingung je Unterkante	n
Summe:	5n-2	Summe:	4n

d.h. es fehlen noch (n-2) Gleichungen. Das bedeutet, dass es nun nicht mehr möglich ist, für jeden Schnitt 1 Bedingung wie die Neigung der Seitenkraft oder wie bisher die Bruchbedingung anzunehmen, weil das Problem dann 1-mal überbestimmt wäre. Es ist daher notwendig, eine weitere Aussage (Neigung der Seitenkraft oder Bruchbedingung oder Angriffspunkt) mit 1 freien Parameter zu formulieren: die Anzahl der Unbekannten wächst um 1, die der Gln. um (n-1). Damit sind für diese Betrachtungsweise die notwendigen und hinreichenden Bedingungen definiert, um das Problem ohne Aussage zum Materialverhalten lösen zu können.

Allgemeines Verfahren (GUSSMANN, 1978)

Zugrunde gelegt wird eine allgemeine Geometrie nach Bild O04.210. Gegenüber den bisher eingeführten Größen sind folgende Änderungen zu beachten:

- Die Grenzflächen der Bruchkörper bzw. Lamellen sind eben, können aber geneigt sein.
- Die angenommene Bruchlinie wird innerhalb eines betrachteten Bruchelements bzw. einer Lamelle durch eine Gerade ersetzt.
- Die Eigengewichtskraft kann mit einer Horizontalkraft (Erdbeben, Anker o.ä.) zusammenwirken. Die Resultierende P hat die Neigung ω gegen das Lot. Sie kann mit der Normalkraft N ein Versatzmoment mit dem Hebelarm r_p bilden.
- Die Geometrie wird mit einem beliebigen Polarkoordinatensystem r, ψ festgelegt. Die Lamellen-Unterkante ist um α gegen die Richtung $\psi = 90^\circ$ (meist waagrecht) geneigt.

Anmerkung: Beim Kreis mit M als Mittelpunkt wäre $r_i = r$ und $\psi_i = \alpha_i = \vartheta_i$.

- S ist die totale Seitendruckkraft, d.h. die vektorielle Summe aus effektiver Erddruckkraft und Wasserdruckkraft W; ΔS die entsprechende Differenz. Nur wenn $r_{pi} \neq 0$ ist, ergibt ΔS ein Moment mit dem Hebelarm r_{si} .

Im Krafteck werden die Kräfte in Komponenten senkrecht und parallel zur Richtung von ΔS zerlegt. Damit erhält man folgende beiden Gleichungen:

$$u_i \cdot l_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) + N'_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) + (N'_i / f) \cdot \tan \varphi_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) + (c_i \cdot l_i / f) \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) - P_i \cdot \cos(\delta_i - \omega_i) = 0 \tag{O04.170}$$

$$\Delta S_i - P_i \cdot \sin(\delta_i - \omega_i) - u_i \cdot l_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) - N'_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) + (N'_i / f) \cdot \tan \varphi_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) - (c_i \cdot l_i / f) \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \tag{O04.180}$$

N'_i lässt sich in Gleichung O04.180 mittels Gleichung O04.170 eliminieren, und es ergibt sich

$$\Delta S_i = B_i - (1/f) \cdot A_i \tag{O04.190}$$

mit

$$A_i = \{ [P_i \cdot \cos(\alpha_i - \omega_i) - u_i \cdot l_i] \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot l_i \} / \{ \cos(\alpha_i - \delta_i) + (1/f) \cdot \tan \varphi_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) \} \tag{O04.190a}$$

$$B_i = P_i \cdot \sin(\alpha_i - \omega_i) / \{ \cos(\alpha_i - \delta_i) + (1/f) \cdot \tan \varphi_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) \} \tag{O04.190b}$$

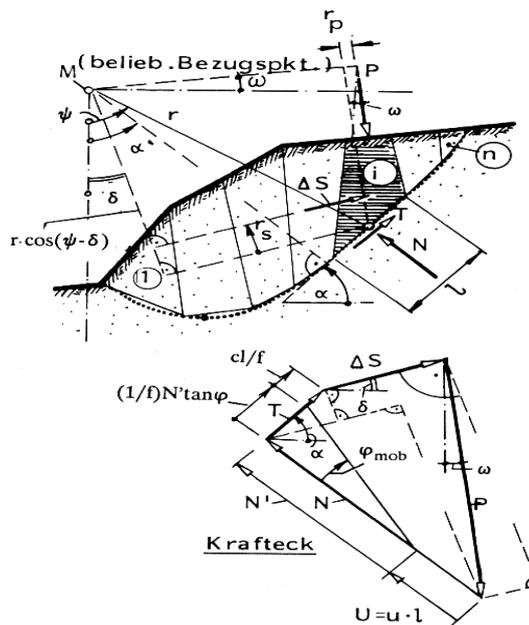


Bild O04.210: Definitionen zu Geometrie und Kräften beim allgemeinen Verfahren

Die Momenten-Bedingung liefert

$$r_{si} \cdot \Delta S_i = - r_{pi} \cdot P_i \tag{O04.200}$$

Bei der Summation über alle n Elemente müssen die horizontalen, vertikalen und Momentenwirkungen der inneren Schnittkräfte verschwinden, d.h. es muss sein:

$$\sum^n \Delta S_i \cdot \cos \delta_i = 0 \tag{O04.210a}$$

$$\sum^n \Delta S_i \cdot \sin \delta_i = 0 \tag{O04.210b}$$

$$\sum^n \Delta S_i \cdot [r_i \cdot \cos(\psi_i - \delta_i) - r_{si}] = 0, \text{ bzw. mit O04.200:}$$

$$\sum^n [\Delta S_i \cdot r_i \cdot \cos(\psi_i - \delta_i) + P_i \cdot r_{pi}] = 0 \tag{O04.210c}$$

Die Gleichungen O04.190 können nach f aufgelöst werden und ergeben dann:

$$f = \sum^n A_i \cdot \cos \delta_i / \sum^n B_i \cdot \cos \delta_i \tag{O04.220a}$$

$$f = \sum^n A_i \cdot \sin \delta_i / \sum^n B_i \cdot \sin \delta_i \tag{O04.220b}$$

$$f = \sum^n A_i \cdot r_i \cdot \cos(\psi_i - \delta_i) / \sum^n [B_i \cdot r_i \cdot \cos(\psi_i - \delta_i) + P_i \cdot r_{pi}] \tag{O04.220c}$$

Dabei bleibt allerdings f noch implizit in A_i und B_i enthalten; außerdem sind die Neigungswinkel δ_i und die Hebelarme r_{pi} unbekannt.

Da die Betrachtung senkrechter Lamellen- bzw. Bruchkörpergrenzen einfacher ist als die allgemeine Bruchkörperform, wird sie im Folgenden vorangestellt. Voraussetzung soll zunächst sein, dass die Länge der Unterkante nicht extrem klein wird gegenüber der Seitenlänge. Mit der einfachen Annahme, dass die Kräfte S eine beliebige, aber konstante Neigung haben, folgt auch für die ΔS ein konstanter Winkel δ_i = const = δ. Damit lassen sich die Gleichungen O04.220a und O04.220b auf die gemeinsame Gleichung

$$f = \sum A_i / \sum B_i \tag{O04.230}$$

zurückführen. Anmerkung: Diese Formel ist - in modifizierter Form und mit ω_i = 0 - identisch mit der von NEUBER (1968) angegebenen Gleichung.

Die Momenten-Bedingung O04.200 bzw. O04.220a kann für jede Lamelle und auch global durch geeignete Wahl der Hebelarme r_{pi} eingehalten werden: die Momenten-Bedingung liefert bei dieser Betrachtungsweise keine neue Information.

Bei Wahl senkrechter Lamellengrenzen ist die Annahme (GUSSMANN, 1978)

$$\delta = \bar{\varphi}_m \text{ und } \tan \bar{\varphi}_m = (1/f) \cdot \tan \bar{\varphi}_d \tag{O04.240}$$

zweckmäßig und physikalisch plausibel. Der Querstrich über φ weist darauf hin, dass bei geschichtetem Baugrund der über die Höhe gemittelte Wert $\bar{\varphi} \neq \varphi$ ist. Die Annahme liegt auf der sicheren Seite, da oft noch die Kohäsion als Reserve zur Verfügung steht. Die Gleichung O04.230 ist statisch korrekt und für beliebige Bruchlinien anwendbar.

Anmerkung:

Wenn der Anstieg der Bruchlinie nahe am Böschungsfuß zu steil wird (α_i < 0 !), durchläuft A_i eine Polstelle, und es ergeben sich negative Reaktionskräfte, was physikalisch unmöglich ist. Daher wird für diesen Fall der Ansatz des Erdwiderstands im Fußbereich empfohlen, Bild O04.220. Alternativ kann auch die angenommene Bruchfuge abgeändert werden. Die Lage der Polstelle ergibt sich mit der Umformung

$$\cos(\alpha_i - \bar{\varphi}_m) + \sin(\alpha_i - \bar{\varphi}_m) \cdot \tan \varphi_m = \cos(\alpha_i - \bar{\varphi}_m) / \cos \varphi_m \text{ aus}$$

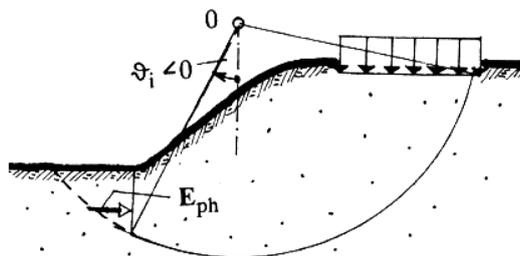


Bild O04.220: Berücksichtigung von Erdwiderstand am Böschungsfuß

empfohlen, Bild O04.220. Alternativ kann auch die angenommene Bruchfuge abgeändert werden. Die Lage der Polstelle ergibt sich mit der Umformung

$$\cos(\alpha_{\text{pol}} - \bar{\varphi}_m - \varphi_m) = 0 \quad \text{zu}$$

$$\alpha_{\text{pol}} = \bar{\varphi}_m + \varphi_m - \frac{1}{2}\pi \quad (\text{O04.250}).$$

Die von einigen Autoren vorgenommene Vereinfachung $\delta = 0$ (wie auch beim Gleitkreisverfahren, 5.Schritt) liegt noch weiter auf der sicheren Seite. Sie führt auf die von JANBU (1955) abgeleitete Formel. Wenn in Gleichung O04.230 $\omega_i = 0$ und $G_i = P_i$ gesetzt werden, folgt mit $\delta = 0$ und $l_i = b_i/\cos\alpha_i$ sowie nach Erweiterung mit $\cos\alpha_i$ und Umformung:

$$f \cdot \left\{ \sum^n G_i \cdot \tan\alpha_i \right\} = \sum^n \left[(G_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan\varphi_i + c_i b_i \right] / \left[\cos\alpha_i + (1/f) \cdot \tan\varphi_i \cdot \sin\alpha_i \right] \quad (\text{O04.260}).$$

Die Gleichung O04.260 ist statisch korrekt. Die Polstelle liegt hier bei $\alpha_{\text{pol}} = \varphi - \pi/2$.

Die andere Gruppe der Lamellenverfahren geht von der Annahme $r_{pi} = 0$ bzw. beliebig kleiner Lamellenunterseite aus, und damit gewinnt die Momenten-Bedingung an Bedeutung. Wenn (O04.220c) auf kreisförmige Bruchflächen angewendet wird, ergibt sich mit $\delta = 0$, $\omega_i = 0$, $G_i = P_i$, $r_i = r$, $\psi_i = \alpha_i = \vartheta_i$ nach Umformungen die Gleichung O04.140 von KREY und BISHOP.

Man beachte, dass bei dieser Annahme das Kräfte-Gleichgewicht - hier speziell das Gleichgewicht der horizontalen Kräfte - nicht erfüllt ist. Dies wird dadurch bestätigt, dass die Gleichung O04.260 bei der Anwendung auf Kreise ein anderes Ergebnis liefert.

Eine weitere Variante ergibt sich durch die ebenfalls denkbare Annahme $\delta_i = \alpha_i$. Dann folgt aus Gleichung O04.220c bei Anwendung auf Kreise und bei den damit verbundenen Ansätzen

$$\omega_i = 0, \quad G_i = P_i, \quad r_i = r, \quad \psi_i = \alpha_i = \vartheta_i: \\ \sum G_i \cdot \sin\Delta_i = f \cdot \left\{ \sum \left[(G_i \cdot \cos\vartheta_i - u_i \cdot b_i / \cos\vartheta_i) \cdot \tan\varphi_i + c_i \cdot b_i / \cos\vartheta_i \right] \right\} \quad (\text{O04.270}).$$

Das Kräftegleichgewicht ist so nicht erfüllbar. Die Gleichung O04.270 stimmt mit der von FELLENIUS (1927) bzw. TERZAGHI (1950) überein, wurde allerdings dort anders abgeleitet.

Obwohl also die Annahme $\delta_i = \alpha_i$ physikalisch nicht haltbar ist, ist Gleichung O04.270 in der Praxis sehr verbreitet, weil sie den Vorteil hat, dass f explizit formuliert ist und keine Polstelle auftreten kann. Der damit berechnete Sicherheitswert ist meist kleiner als bei den anderen Verfahren (Ausnahme: große Kohäsion bei großem Reibungswinkel).

Auch die Annahme $r_{pi} = 0$ und $\delta \neq 0$ ist physikalisch vernünftig, steigert aber den Lösungsaufwand: wenn gleichzeitig die Gleichungen O04.220c mit $r_{pi} = 0$ und O04.230 erfüllt werden sollen, ist $\delta = \text{const}$ nicht mehr frei wählbar. Man erhält aber eine Lösung, da für die Unbekannten f und δ auch 2 Gleichungen zur Verfügung stehen. Dies führt auf den wichtigsten Sonderfall der Verfahren nach MORGENSTERN / PRICE (1965) bzw. SPENCER (1973), siehe auch WOLDT (1977) und GUSSMANN (1978).

Das Verfahren hat den Vorteil, den Grenzübergang $n \rightarrow \infty$ mit stetiger Normalspannungsverteilung zu ermöglichen. Die Lösung ist statisch korrekt. Zur Vermeidung dieses Aufwands dient die Näherung $\delta = \varphi_m$, angewendet auf Gleichung O04.220c mit $r_{pi} = 0$. Es wird für die Praxis empfohlen, f sowohl nach Gleichung O04.230 als auch nach O04.220c mit $r_{pi} = 0$ und $\delta = \varphi_m$ zu berechnen und den kleineren beider Werte als maßgebend anzusehen. Nur wenn sich dabei ein größerer Unterschied ergeben sollte, ist der höhere Rechenaufwand gerechtfertigt.

Reibungsloser Boden $\varphi = 0$

Die Bruchlinie sei ein Kreis mit dem Öffnungswinkel β . Dann ergibt Gleichung O04.220c mit $\omega_i = 0$, $G_i = P_i$, $r_{pi} = 0$, $\alpha_i = \psi_i = \vartheta_i$, $r_i = r$, $c_i = c_u$:

$$f = \{r \cdot \sum^\infty c_u \cdot l_i\} / \{r \cdot \sum^\infty G_i \cdot \sin\vartheta_i\} = c_u \cdot \{r^2 \cdot \beta / G \cdot x_s\} \quad (\text{O04.280}).$$

(G - Gewicht des Bruchkörpers, x_s - Schwerpunktabstand vom Kreismittelpunkt), d.h. für einen monolithischen Bruchkörper ist die Sicherheit hier unabhängig vom beliebig anzunehmenden Winkel δ_i .

Vergleichsweise erhält man für $\delta = \text{const.}$ aus Gleichung O04.230 nach Erweiterung mit r:

$$r \cdot \sum G_i \cdot \sin \Delta_i / \cos(\Delta_i - \delta) = f \cdot \{r \cdot \sum c_{i,r} / \cos(\vartheta_i - \delta)\} \quad (\text{O04.290}),$$

d.h. $f(\delta)$, so dass der Grenzübergang $n \rightarrow \infty$ hier unzulässig ist, weil die Näherung von der statisch richtigen Lösung abweicht.

Lösungsweg bei beliebigem kinematischem Bruchmechanismus

Der Lösungsweg bei einem allgemeinen Bruchkörper-Mechanismus mit inneren Gleitflächen wird am Beispiel eines mittleren Bruchelements gezeigt, Bild O04.230. Die Berechnung geht hier von "l"(links) nach "r"(rechts). Mit einem zunächst geschätzten Wert von f sind die Parameter der mobilisierten Scherfestigkeit φ_{mi}, c_{mi} für die Unterseite und $\bar{\varphi}_{mr}, c_{mr}$ für die rechte Flanke bekannt. Ebenso kennt man aus der vorausgegangenen Berechnung am Element $i-1$ die Seitenkraft S_i und deren Richtung δ_i (bei der 1.Lamelle ist $S_1=0$).

Man beginnt das Kräfteck mit dem rechts wirkenden Wasserdruck U_r und C_{mr} . Daran schließen die Kräfte S_1, P_1, C_{mi} und U_i . Durch den Schnitt der beiden Geraden, die unter $\bar{\varphi}_{mr}$ und φ_{mi} gegenüber der jeweiligen Normalenrichtung wirken, ergibt sich die totale Seitenkraft S_r nach Größe und Richtung und damit auch ΔS_i mit dem Winkel δ_i .

Wenn sich bei der letzten Lamelle n das Kräfteck so schließt, dass $S_{nr} = 0$ ist, war die Schätzung von f richtig; andernfalls muss f solange korrigiert werden, bis S_{nr} ausreichend klein geworden ist.

Diese iterative Art des Vorgehens ist für eine numerische Programmrechnung sehr geeignet, sonst aber wenig effizient. Die analytische Lösung geht zunächst von einer zweiten Gleichung für ΔS aus: wenn δ_i angenommen wird, ergibt sich die Größe von ΔS_i aus dem Kräfteck (U_r, C_{mr}, S_i , Richtungen $\delta_i, \bar{\varphi}_{mr}$):

$$\Delta S_i / Z_r = \cos \bar{\varphi}_{mr} [\sin(\bar{\alpha}_r + \bar{\varphi}_{mr} - \delta_i)] \quad (\text{O04.300})$$

$$\text{mit } Z_i = C_{mr} - S_i \sin(\delta_i - \bar{\alpha}_r) + [S_1 \cdot \cos(\delta_1 - \bar{\alpha}_r) - \bar{U}_r] \cdot \tan \bar{\varphi}_{mr}$$

Durch Gleichsetzen mit der umgeformten Gleichung O04.190:

$$\Delta S_i = Z_i \cdot \cos \varphi_{mi} / \cos(\alpha_i - \varphi_{mi} - \delta_i) \quad (\text{O04.310})$$

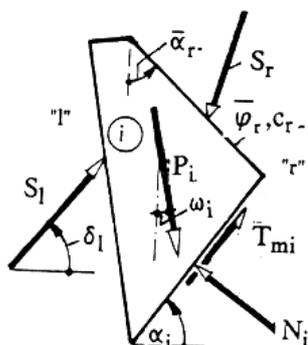
mit $Z_i = P_i \cdot \sin(\alpha_i - \omega_i) - C_{mi} - [P_i \cdot \cos(\alpha_i - \omega_i) - U_i] \cdot \tan \varphi_{mi}$ kann aufgelöst werden nach:

$$\tan \delta_i = \frac{[\sin(\bar{\alpha}_r + \bar{\varphi}_{mr}) / \cos \bar{\varphi}_{mr}] \cdot Z_i - [\cos(\alpha_i - \varphi_{mi}) / \cos \varphi_{mi}] \cdot Z_r}{[\cos(\bar{\alpha}_r + \bar{\varphi}_{mr}) / \cos \bar{\varphi}_{mr}] \cdot Z_i + [\sin(\alpha_i - \varphi_{mi}) / \cos \varphi_{mi}] \cdot Z_r} \quad (\text{O04.320}).$$

Für die letzte Lamelle gilt $\delta_n = \delta_{n-1,r}$.

Wenn sich bei Annahme eines Wertes f_0 nach Gleichung O04.220a ein anderer Wert als nach Gleichung O04.220b ergibt, ist das Kräftegleichgewicht noch nicht erreicht: man wiederholt dann die Rechnung mit dem Mittelwert der beiden Ergebnisse; das Verfahren konvergiert sehr schnell. Die Hauptschwierigkeit dieses Verfahrens liegt aber nicht in der Statik, sondern in der aufwendigen Variation der Kinematik, um das Minimum von f zu finden.

Physikalisches Element:



Krafteck:

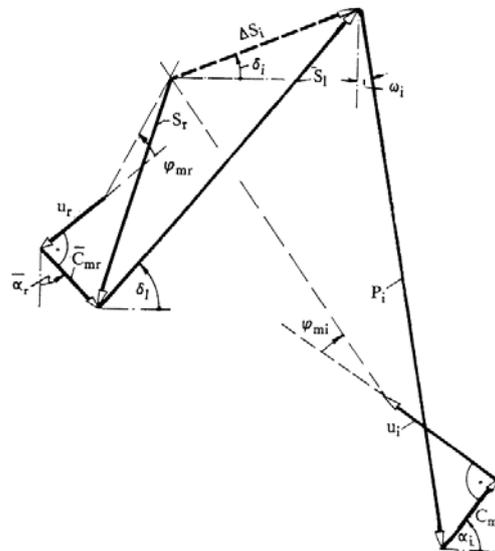


Bild O04.230: mittleres Element aus einem allgemeinen Bruchkörper-Mechanismus

O.4.9 Finite-Element-Methode

Ein statisch und kinematisch korrektes Verfahren zur Bewertung der Sicherheit einer Böschung ist auf jeden Fall auch die Methode der Finiten Elemente, mit welcher der Spannungs- und Verformungszustand einer Böschung infolge ihrer Herstellung berechnet werden kann. Um ein Maß für die Sicherheit bzw. den Ausnutzungsgrad zu erhalten, werden die Scherparameter aller beteiligten Schichten im selben Maß schrittweise soweit reduziert, bis sich rechnerisch ein Versagen ergibt. Das Maß der dazu erforderlichen Reduzierung der Parameter definiert den Ausnutzungsgrad der Böschung bei Verwendung der Entwurfs-Scherfestigkeiten.

O.5 Planung und Sicherung von Böschungen

O.5.1 Allgemeines

Böschungen treten auf bei einem Damm (künstliche Schüttung mit definierten Eigenschaften), einem Einschnitt (nachträglich hergestellte Böschung in bestehendem Untergrund) oder Doppelprofil (halb Damm mit Auftrag, halb Einschnitt durch Abtrag). Zur Ingenieuraufgabe gehören die Planung und Sicherung der Böschung an sich mit ihrer zulässigen Neigung und dem Schutz der Böschungsfäche und gleichzeitig auch der besonders gefährdeten Kopf- und Fußbereiche. Mit zunehmendem Sicherungsaufwand gehen gesicherte Böschungen in aufgelöste und geschlossene Stützwände und Stützkonstruktionen über, die in einem eigenen Abschnitt behandelt werden. Zu den Besonderheiten bei Uferböschungen siehe DIN 19657 "Sicherungen an Gewässern, Deichen und Küstendünen, Richtlinien" (1965).

Das Abrutschen von geböschtem Lockergestein in hügeligem oder bergigem Gelände ist eine Erscheinung, die zum natürlichen Kreislauf des oberflächlich anstehenden Materials gehört. Baumaßnahmen in solchem Gelände verlangen deswegen eine ständige Beobachtung etwaiger Veränderungen (Schiefstellen von Bäumen, Masten; Anrisse; Versagen von Wasserleitungen u.a.m.). Künstlich angelegte Böschungen müssen, wenn sie dauernden Bestand haben sollen, in jedem Fall gesichert oder sogar verbaut werden. Dabei wird die Böschung mit biologischen oder konstruktiven Mitteln vor mechanischen und thermischen Beanspruchungen geschützt und ihre Standsicherheit verbessert oder erhalten.

Mechanische Beanspruchungen sind beispielsweise Zusatzbelastungen aus Auflasten oder Wasserdruck, Änderung der Spannungsverteilungen durch Aufhöhen oder Abgraben, Beschädigungen durch Mensch, Maschine, Tier, Erdbeben, Erosion, Flut oder Aufweichung.

Thermische Beanspruchungen sind zum Beispiel Frost, Hitze und Temperaturwechsel.

Die Schutzmaßnahmen müssen technisch entworfen, aber mit den Belangen der Öffentlichkeit, der Anrainer und der Nutznießer abgestimmt werden. Der Ingenieur muss dabei Verbindung zu den Vertretern der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft halten.

O.5.2 Erhebungen von Eingangsdaten

Zur Beurteilung einer Böschungssituation sind zunächst gründliche Erhebungen erforderlich, die in der Regel in Zusammenarbeit mit Geodäten und Geologen vorgenommen werden. Außer geometrischen Daten, die durch eine Vermessung bereitgestellt werden müssen oder sich aus einer Planung ergeben, muss die Baugrundsituation geklärt werden und wird typischerweise in einem Baugrundgutachten dargestellt.

Nachdem der Baugrund im Feld durch Schürfe, Bohrungen und Sondierungen aufgeschlossen ist, wird unter Berücksichtigung geologischer Zusammenhänge ein räumliches Baugrundmodell erarbeitet und in Form von Profilen, Schnitten und Schichtlagerungskarten dargestellt. Die Eigenschaften der maßgebenden Schichten werden durch bodenmechanische Laborversuche bestimmt. Die Grundwasserverhältnisse müssen erhoben und gemeinsam mit dem Abfluss des Wassers geklärt werden: hydrogeologische Angaben zum Verbleib der Niederschläge, Schichtwasser, Kluftwasser, Vernässungen, Quellen, Wasserstauer. Eventuell muss ergänzend die Wasserentsorgung bergseitig stehender Häuser kontrolliert werden.

Daten, die nicht oder nicht mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können, müssen geschätzt und evtl. in Bandbreiten berücksichtigt werden. Wenn alle Daten vorliegen, wird die Standsicherheit unter Einbeziehung des Wasserdrucks für eine nach technischen Gesichtspunkten gewählte Böschungsneigung berechnet, wobei sowohl die für die erforderliche Sicherheit notwendige als auch die im Grenzzustand mögliche Böschungsneigung interessiert. Bei unvollständigen Daten kann eine Risikoanalyse zweckmäßig sein (ZIEGLER, 2002).

Zur Planung einer Sicherung sind im Anschluss an die Erhebungen allgemeine Randbedingungen zu klären:

- Wie ist die technisch geforderte Form realisierbar?
- Welche Baustoffe sind wirtschaftlich verfügbar?
- Welche Verbautechniken sind ortsbekannt?
- Welche Vegetation ist möglich?
- Welche Klimadaten müssen beachtet werden?
- Ist eine Nutzung der Böschung vorzusehen?
- Ist eine Unterhaltung und Pflege der Böschung möglich?

O.5.3 Konstruktive Gesichtspunkte

Niedrige Böschungen (unter 2 m) möglichst nicht steiler als 1:2, damit keine zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen für den Verkehr notwendig sind. Landwirtschaftliche Nutzung bis 1:10 möglich. Kopf und Fuß müssen ausgerundet werden (ansonsten Gefahr von Kerbspannungen und Anrissen oder mangelnde Bodenfreiheit bei Überfahrt) mit einem Radius von etwa 3 bis 7 m. Wenn klüftiger Fels ohne Deckschicht am Kopf ansteht, kann sich eine zusätzliche Sicherung durch genageltes Baustahlgewebe bzw. Geotextilien empfehlen (Bild O05.10). Begrünung ist bis zu 1:1,5 ohne Hilfsmaßnahmen möglich; sonst bis etwa 1:1.

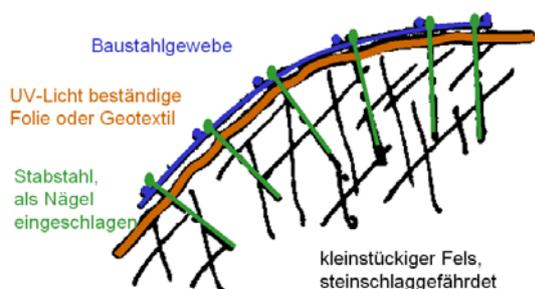


Bild O05.10: Schutz am Kopf einer Felsböschung

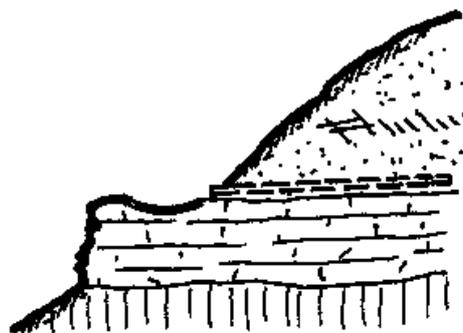


Bild O05.20: Berme an einer Schichtoberfläche

Bermen: Bermen haben Vor- und Nachteile:

- Vorteile: Unfallschutz (Absturzsicherung); als Wirtschaftsweg nutzbar, wenn breiter als 2,5 m; einfachere Unterhaltung der Böschung; Anpassung an einen Schichtwechsel möglich (Bild O05.20); ästhetisch befriedigender.
- Nachteile: Platzbedarf; Erschwerte Profilierung beim Bau der Böschung; Wassersammler (Schnee bleibt liegen!), der planmäßige Entwässerung erfordert; erdstatisch ungünstig bei fehlender Ausrundung.

Die Konstruktionsmittel zur Sicherung von Böschungen bestehen aus folgenden Elementen:

- Membran (Flächen- oder Kantenschutz)
- Mauer (Wand; statische Wirkung einer Platte)
- Widerlager (Stützkörper)
- Scheibe (Stützscheibe in der Böschung)
- Anker (Rückverhängung auf Zug)
- Dübel (Verzahnung potentieller Bruchflächen)
- Drän (Ableitung von Schicht-, Kluft- und Oberflächenwasser)

Ein Verbau wird entweder vollständig (geschlossen) oder teilweise (aufgelöst) ausgeführt.

Baustoffe: Natursteine, Bruchsteine, Schotter, Kies, Abraummaterial, Füllboden, Stahlbeton bei biegebeanspruchten Stützwänden
Rund- und Schnittholz,
Baustahl, Baustahlgewebe, Stahlnetze, Draht, Blechstreifen,
Plastikfolien und -gitter (Geokunststoffe),
Faschinen, Wippen,
Gräser, Klee, Stauden, Büsche, Bäume,
Strohhäcksel (Mulch), Torf, Dünger,
Bitumen, Asphalt, Klebstoffe, Kalk, Zement.

O.5.4 Versiegelung von Erdwänden und Böschungen

Es ist zweckmäßig, Erdwände und Böschungen bei längerer Standzeit durch Versiegelung gegen Erosion und Entfestigung zu schützen, bei Böschungen solange, bis der natürliche Bewuchs diese Funktion übernimmt, bzw. dann, wenn ein Bewuchs nicht möglich ist. Dabei kommen bei Böschungen Pflasterungen in Frage, insbesondere unter Brücken und bei Ufern (Bild O05.30). Bei Steilböschungen sind Spritzbeton-Versiegelungen oder Sicherungen nach der Art des Stuttgarter Lebendverbau (siehe Abschnitt O.5.6) geeignet, einen sofort wirksamen Schutz sicherzustellen.

Biologischer Verbau (Lebendverbau)

Freie Böschungen sollen möglichst begrünt und bepflanzt werden. Dazu sind folgende Fragen vorab zu beantworten:

- Liegt die zu sichernde Böschung in einem Klimabereich, in dem überhaupt Pflanzen wild gedeihen?
- Südhang oder Nordhang? Haben Pflanzen während der Anwachszeit Chancen, Austrocknung oder Frosteinwirkung zu überstehen?
- Welche Wildpflanzen sind standortgemäß? Sind sie in ausreichender Menge zu beschaffen?
- Kann starker Wildwuchs Verkehrswege oder Nutzungen beeinträchtigen, so dass ein Pflegeplan erforderlich wird?
- Muss mit Schadstoffeinträgen (z.B. Tausalz) gerechnet werden?
- Ist die Fläche bearbeitbar (Handarbeit? Maschinenarbeit?)

Vorteil der Vegetationsdecke: Sie schützt den Untergrund vor der unmittelbaren Einwirkung des Klimas und des Wassers, entzieht ihm einen Teil des Porenwassers (wird von den Pflanzen durch Verdunstung abgegeben) und sorgt so für die Erhaltung und langsame Zunahme der Kohäsion in der Deckschicht des Bodens. Sträucher und Bäume (SPANG, 1963) schützen durch ihre Wurzeln, die den Boden bis zum Dreifachen des Kronendurchmessers durchdringen, zusätzlich und

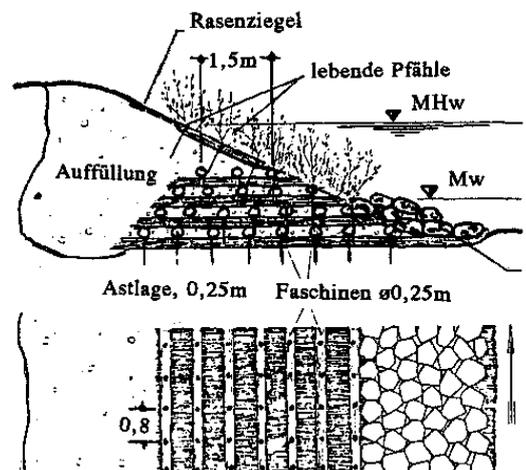


Bild O05.30: Ufersicherung mit Astpackung

steigern den Wasserentzug bis zu 3 m Tiefe (Eiche, Kiefer: 6 m). Wurzeln umschlingen loses Gestein und legen es damit fest; der Scherwiderstand des durchwurzelteten Bodens kann dreimal so groß sein wie der eines wurzellosen Bodens (WALDRON / DAKESSIAN, 1982). Baumstümpfe an Böschungen deswegen nicht roden.

"Deckwerk" ist der Oberbegriff für planmäßig hergestellte Vegetationsdecken, gegebenenfalls in Verbindung mit Steinlagen, Geogittern u.a.m. Im einfachsten Fall aus Rasen: entweder vorgefertigt (Rasenziegel) oder in Bahnen gerollt (Rollrasen) oder am Einbauort als Nasssaat (Hydrosaat) aufgespritzt oder als Trockensaat aufgeblasen. Dazu werden Saatgut, Dünger, Bodenverbesserungsstoffe, Kleber und gegebenenfalls Wasser in einem Mischer vermischt und in Lagen von wenigen cm gespritzt (Reichweite bis etwa 25 m). Zur Wahl der Saat und zur Rezeptur vgl. DIN 18917 und 18918. Aufwendigere Deckwerke: Spreitlagen, Schwellen, Faschinen, Flechtzäune und Konstruktionen aus lebenden Hölzern und Gehölzen bieten zunehmend auch kurzfristig mechanischen Schutz.

Mulchen: Stroh, Heu, gerodetes Buschwerk, Zellulose o.ä. werden gehäckselt, evtl. durch Zusatz von Bitumenemulsion gebunden und auf die GrünSaat aufgeblasen. Das Mulchen bewirkt eine Schutzschicht gegen extreme Klimaeinflüsse und ist bei Flächengrößen über 1 ha wirtschaftlich. Gefahr dabei, dass die Oberfläche derart verschlossen wird, dass sich die Pflanzen nicht entwickeln können. Daher Variante nach SCHIECHTL (1973) ("Schiechteln"): im 1. Arbeitsgang Aufbringen von Längsstroh, danach im 2. Gang Einstreuen der Saatgut-Mischung und in einem 3. Gang Aufsprühen einer pflanzenverträglichen, mit kaltem Wasser verdünnbaren, stabilen Bitumen-Emulsion. Ausführung teil- oder vollmechanisiert möglich mit Tagesleistungen von 3000 bis 15000 m² je nach Schwierigkeit des Standorts. Auch kleine Teilflächen sind damit rasch zu begrünen.

Mutterboden-Andeckungen sollten nur bei flachen Böschungen vorgesehen werden, weil sie sich nicht wie in der Natur durch Umwandlung des anstehenden Lockergesteins gebildet haben und deswegen als Fremdkörper keinen schubfesten Verbund mit der Unterlage haben. Auch haben die Pflanzen dann die Tendenz, ihr Wurzelwerk nur in dieser Mutterboden-Decke zu entwickeln. Die Folge sind im Frühjahr häufig zu beobachtende Abgleitungen.

Sicherung von Deckwerken durch Flechtwerk (Bild O05.40): Bei stark den Einwirkungen des Wetters ausgesetzten Böschungen empfiehlt sich eine Sicherung durch Flechtwerke: Holzpflocke von 3 bis 10 cm Durchmesser, 1 m lang, werden im Abstand von ca. 1 m eingeschlagen, so dass sie etwa 20 - 30 cm hervorstehen. Zwischen sie werden lebende Stechhölzer geschlagen. Die Pflocke werden dann mit biegsamen Weidenzweigen oder anderen ausschlagfähigen Ruten umflochten, 3-7 übereinander, und zusammengedrückt. Damit die Zweige wurzeln können, müssen sie mindestens mit einer Schnittfläche im Boden liegen, andernfalls sterben sie ab. Da die so entstehenden Flechtwerke mechanisch empfindlich gegen Steinschlag, rutschenden Schnee etc. sind, sollten sie möglichst in flachen Gräben im Boden versenkt gesetzt werden. Nachteilig ist der hohe Materialverbrauch bei relativ geringem Bewurzelungseffekt. Flechtwerke werden diagonal in Böschungen angeordnet und bremsen so oberflächlich abfließendes Wasser, um Erosion zu vermeiden.

Saatmatten sind zweilagige Gewebe mit dazwischen fixiertem Saatgut, die auf der sorgfältig zu profilierenden, feuchten Böschungsfäche abgerollt und durch Abwalzen fest auf den Untergrund gedrückt werden. Die Ränder werden in den Boden spatentief eingeschlagen. Je nach Neigung der Fläche und Erosionsrisiko werden die Matten mit Pflocken oder Stiften von etwa 30 cm Länge auf den Untergrund genagelt. Diese sind haltbarer, aber auch teurer als das einfache Deckwerk aus Rasen.

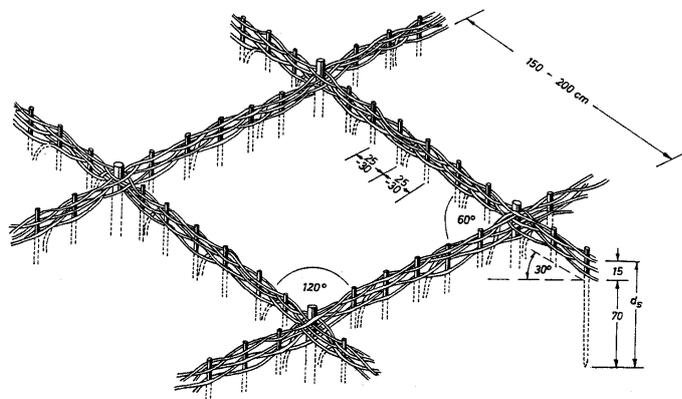


Bild O05.40: Flechtwerk (SCHIECHTL, 2001)

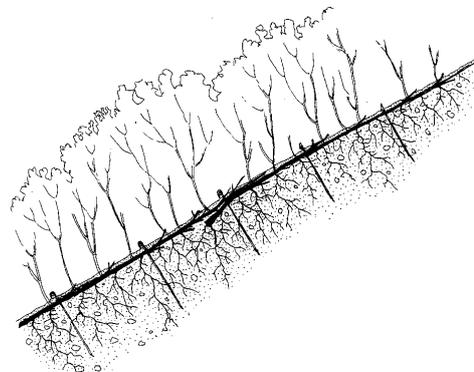


Bild O05.50: Spreitlagenbau (SCHIECHTL, 2001)

Spreitlagen (Bild O05.50): Geschlossene Böschungsdeckung durch eine Lage lebender, mindestens 1,5 m langer Äste, die mit dem dicken Ende in den Boden eingebettet werden, damit sie ausschlagen. Um sie an den Boden anzudrücken, werden Drähte (oder Gewebe) im Abstand von etwa 1 m darüber gespannt und durch Bodennägel fixiert. Kombination mit nicht ausschlagfähigen Ästen gegebenenfalls auch möglich. Dem Vorteil des flächendeckenden Austriebs und der sofortigen Schutzwirkung steht der Nachteil des hohen Materialbedarfs und der arbeitsintensiven Bauweise entgegen. Anwendung vorzugsweise bei Uferböschungen, die gegen Wellenschlag sofort geschützt werden sollen.

Schwellen werden dadurch geschaffen, dass längs der Höhenlinie oder - zur Abführung des Wassers bei nassen Hängen - etwas geneigt zu ihr eine etwa 0,5 m tiefe Berme in den Hang eingeschnitten und mit einem stabilisierenden Element ausgefüllt wird. Beim Lebendverbau ist dieses Element kein massiver Riegel o.ä., sondern besteht aus eingesetzten Pflanzen oder aus eingelegten Stecklingen, die mit Bodenmaterial überdeckt werden und in den Hang hinein wurzeln. Wenn die Stecklinge in der Form eines dicken Seils zu Bündeln zusammengebunden werden, spricht man von Faschinen. Die Fläche, auf der die Stecklinge (Heister) verlegt werden, muss nach außen ansteigen (Bild O05.60).

Im einfachsten Fall hat man - in Abwandlung des klassischen Cordonbaus (Bild O05.70) - den **Heckenlagenbau**: bewurzelte Pflanzen werden dicht nebeneinander so verlegt, dass sie mit etwa 1/3 ihrer Länge herausragen. Die einzelnen Lagen sind etwa 3 m voneinander entfernt. Damit die Pflanzen einwachsen und ihre Verwurzelung ausbreiten, muss der Boden eine ausreichende Qualität haben, so dass dieses Verfahren nur für günstige Standorte in Betracht kommt.

Wo der Boden ungünstig (nährstoffarm) ist, müssen ausschlagfähige Äste (z.B. Weidenäste) verlegt werden, sog. **Buschlagenbau** (Bild O05.80). Die Einschnittbreite ist größer als beim Heckenlagenbau, etwa 0,5 bis 1,0 m. Damit die Äste auf möglichst großer Länge von Erde bedeckt werden können, legt man sie nicht parallel nebeneinander, sondern schräg und überkreuzt. Auch wird empfohlen, Äste verschiedener Gehölze und unterschiedlicher Dicke (= unterschiedlichen Alters) zu nehmen. Auch die Verwendung kurzer sperriger Äste ist möglich.

Wenn der Buschlagenbau zur Stabilisierung einer Dammschüttung eingesetzt wird, können die Äste in größerer Länge nebeneinander gelegt werden, was das Verfahren vereinfacht und eine weitgehende Mechanisierung gestattet. Die Buschlagen sind gegen mechanische Beanspruchung relativ unempfindlich (Steinschlag). Das lässt sich noch steigern, indem man den Ästen einen Gewebestreifen unterlegt.

Man hat damit eine einfache Art des Cordonbaus auf Reisigunterlage, **Bild O05.90**, bei dem diese Unterstützung durch eine Reisigbettung aus Nadelholzästen erzielt wird, die auf längs verlegten Stangen liegt. Auf die Bettung werden ca. 10 cm Erde geschüttet, ehe die lebenden Äste in 2-3 cm Abstand verlegt werden. Das Verfahren ist relativ teuer wegen seiner mehrfachen Arbeitsgänge

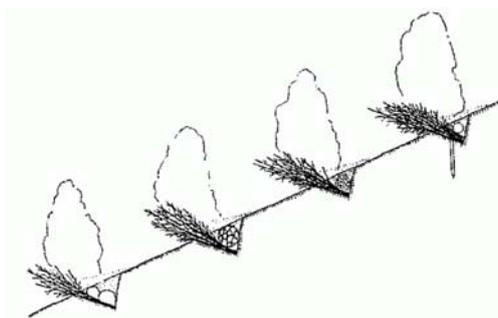


Bild O05.60: Lebende Busch-Schwellen zur Sicherung von Gewässersohlen (SCHIECHTL, 1973)

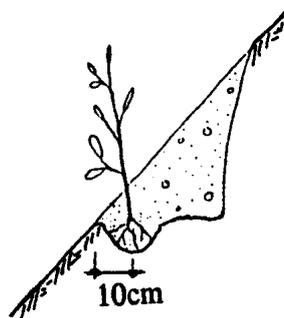


Bild O05.70: Klassischer Cordonbau (1880) (Heckenpflanzung)

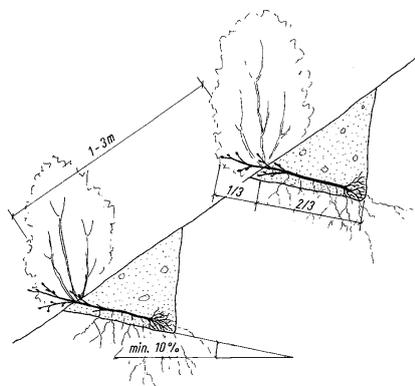


Bild O05.80: Buschlagenbau in Ansnchnittböschung (SCHIECHTL, 2001)

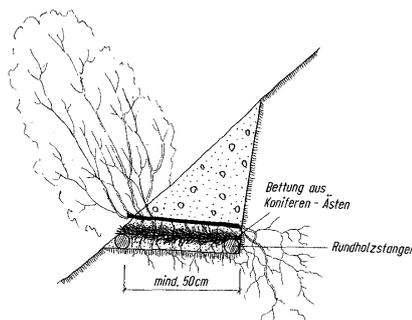


Bild O05.90: Cordonbau auf Reisigunterlage (SCHIECHTL, 2001)

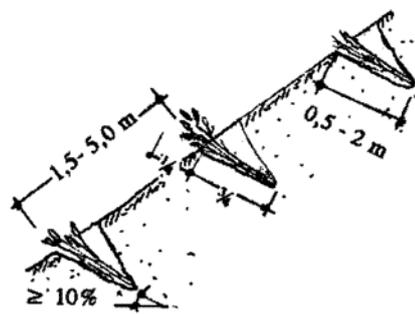
und wird heute nur noch örtlich bei der Sicherung labiler Teilbereiche angewendet. Der Vorteil der Reisigbettung ist die gute Belüftung der Wurzeln. Abstand der Reihen übereinander ca. 3 m.

Aus der Kombination von Buschlage und eingelegten Stecklingen von Heckengehölzen ergibt sich dann der Heckenbuschlagenbau nach SCHIECHTL (1973), Bild O05.100, der in allen Klimazonen möglich ist, in denen diese Gehölze auch sonst gedeihen.

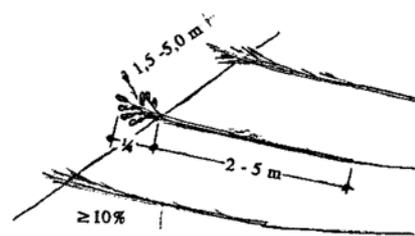
Schwellen mit Nagelung: Bei steilerem Gelände oder stärkerer mechanischer Beanspruchung genügt es nicht, sich darauf zu verlassen, dass die Pflanzen imstande sind, einen ausreichenden Verbund der Schwellen mit dem Boden in einer Art "Vernähung" herzustellen. Man muss dann eine Vernagelung ergänzen.

Hangfaschinen sind gebündelte Äste ausschlagfähiger Gehölze (mindestens 5 Äste von 1 cm Durchmesser; Ergänzung durch totes Astwerk möglich). Sie werden in Gräben verlegt und mit mindestens 60 cm langen Holzpflocken oder Rundstählen, $a = 80$ cm, auf die Böschung genagelt, so dass sie oben bündig mit dem Faschinenbündel abschließen. Anwendung setzt weichen Boden voraus, damit die Durchwurzelung sich rasch entwickelt (Bild O05.110).

Lebender Flechtzaun: Holzpflocke von 3 bis 10 cm Durchmesser, 1 m lang, werden mit $a = 1$ m eingeschlagen, dazwischen jeweils 2 lebende Steckhölzer. Die Pflocke werden dann mit Weidenruten o.ä. umflochten. Die Pflocke sollen höchstens 5 cm überstehen und zu 2/3 ihrer Länge im Boden eingespannt sein, Bild O05.120. Je mehr der Flechtzaun in den Boden versenkt wird, desto sicherer ist der Anwachs-Effekt. Allerdings ist die Wurzelbildung schwach, der Materialverbrauch hoch und der Anteil an Handarbeit ebenfalls. Nachteilig ist ferner die Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen: wenn ein einzelner Pflock herausgerissen wird, kann der Zaun wie eine Laufmasche aufreißen, vgl. die Bemerkungen zum Flechtwerk.



im Anschnitt



in Schüttungen

Bild O05.100: Heckenbuschlagenbau als Kombination von Hecke und Busch (wirksamere Standortverbesserung) (SCHIECHTL, 1973)

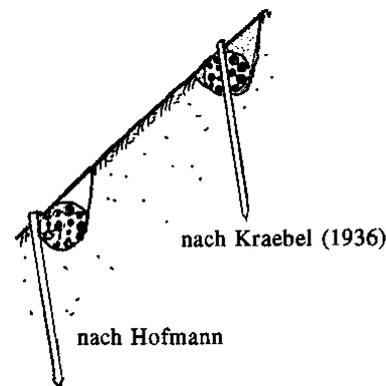


Bild O05.110: Hangfaschinenbau

Lebender Hangrost (Bilder O05.120 bis O05.140): Für die flächige Sicherung von Steilhängen, die nicht abgeflacht werden können, und Höhen bis zu etwa 15 m, werden in den Hang bündig einfache oder doppelwandige Gitterroste eingesetzt, die aus Holz oder Beton bestehen. Rückverhängungen selten, da an Steilhängen schwer herzustellen. Begrünung mit Steckhölzern während der Vegetationsruhe; eventuell auch nur Rasensaat in der Vegetationszeit. Verfahren ist sehr lohnintensiv, doch liegen die Kosten immer noch unter denen einer massiven Stützkonstruktion.

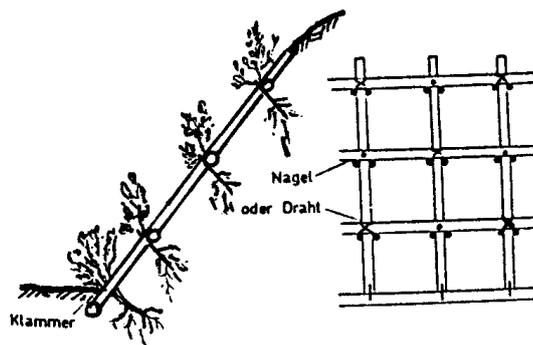


Bild O05.120: Hangrost mit lebenden Weidenpflöcken (SCHIECHTL, 1991)

Lebende Palisade: Bei begrenzten Verbaulängen (Sanierung von Rutschkeilen z.B.) werden lebende, unten angespitzte und möglichst gerade gewachsene Stangen als Pfahlreihe mit 1/3 ihrer Länge in den Boden gerammt und an einem Querholz festgebunden. Hier wird also eine sofortige mechanische mit einer biologischen, nachfolgenden Stabilisierung kombiniert. Wenn geeignetes Material verfügbar ist, ist diese Bauart billig und leicht herstellbar. Allerdings müssen die Stangen mehrere m lang sein (Bild O05.150).

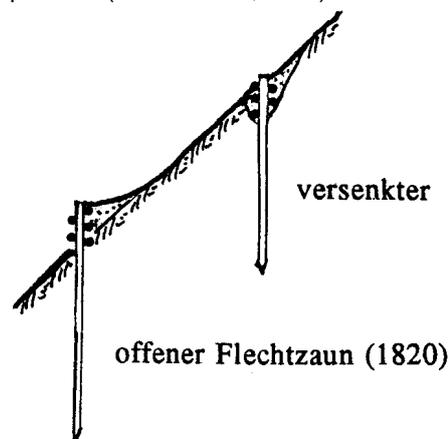


Bild O05.130: lebender Flechtzaun

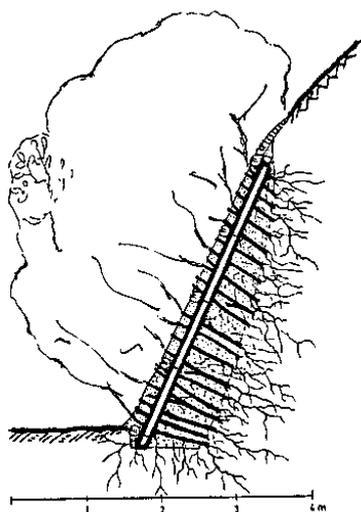


Bild O05.140: Lebender Hangrost aus dick gepackten Weidenästen zur Sanierung eines Verbruchs an einem Steilhang (BEGEMANN/SCHIECHTL, 1994)

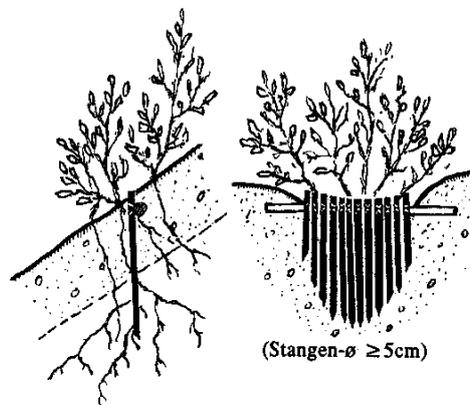


Bild O05.150: Lebende Palisadenwand (Stangendurchmesser $\geq 5\text{cm}$) (SCHIECHTL, 2001)

Grünschwellen aus Holz (Bild O05.160) oder Beton bestehen aus einer Blockschichtung, unter 10° gegen den Berg geneigt. In die Zwischenräume werden ausschlagfähige Äste, zu 3/4 im Boden, Schnittfläche im gewachsenen Boden, eingelegt. Mutterboden oder Humus zum Verfüllen unnötig; es genügt Füllmaterial mit 15 % Feinkorn-Anteil. Hohlstellen unter den Ästen beim Verfüllen vermeiden!

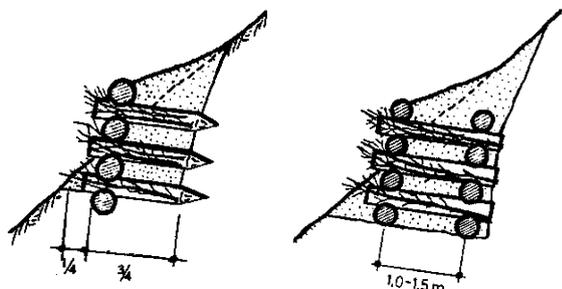


Bild O05.160: Holzgrünschwelle: (links) einwandig oder (rechts) doppelwandig (nach SCHIECHTL, 2001)

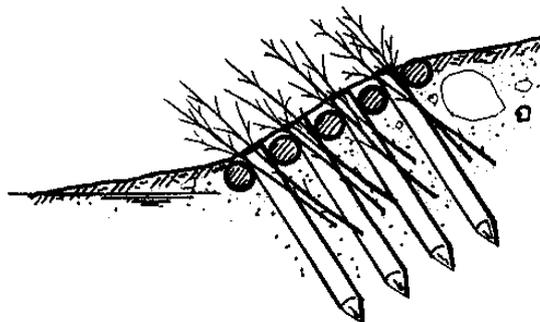


Bild O05.170: Lebende Sperre an einem Gewässer in Form einer begrünenden, einwandigen Grünschwelle Rundhölzer \varnothing 15-20 cm, Weiden 150 cm lang (nach SCHIECHTL, 2001)

O.5.5 Mechanische Teilverbauung

Zu den mechanischen Teilverbauungen werden Stützkörper sowie Stützscheiben in der Böschung und ihre Kombination mit Ankern gerechnet.

Fußsicherungen an Hängen oder Böschungen können im einfachsten Fall aus Naturstein-Schichtungen, Bild O05.190 (mit rückseitigem Filtervlies zur Filterstabilität gegen den Berg), oder Gabionen (Bild O05.180) bestehen. Begrünung durch eingelegte Stecklinge ist empfehlenswert. Gabionen bieten eine flexible Möglichkeit, Dämme oder Einschnitte im Fußbereich zu versteilen.

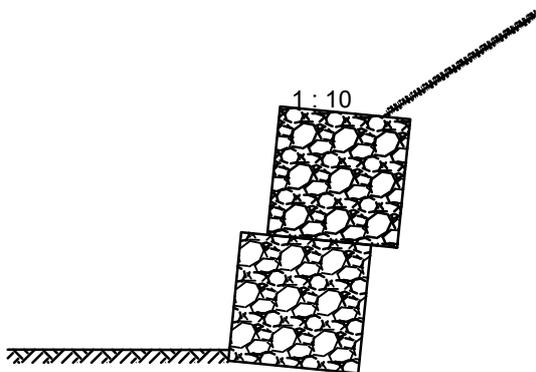


Bild O05.180: Fußsicherung aus Gabionen

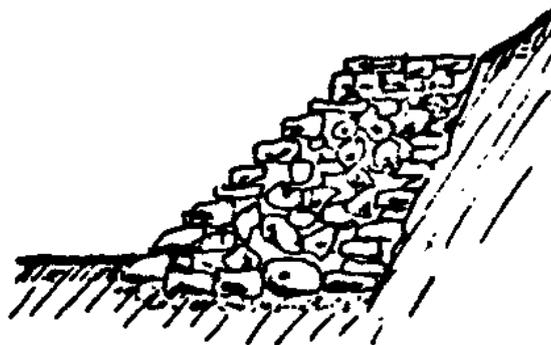


Bild O05.190: Naturstein-Schichtungen als Fußsicherung einer Böschung

Zu den Möglichkeiten des Teilverbau rechnen auch Stützscheiben aus Kies, Schotter, Einkornbeton oder Erdbeton (Bild O05.200). Sie dienen dazu, im haltenden Teil der Böschung Reibungswiderstände und Gewicht, damit die Reaktionskraft Q , zu erhöhen. Bei den zuerst genannten Materialien wird diese Wirkung mit der Möglichkeit einer Entwässerung kombiniert. Beim Erdbeton werden Gräben ausgehoben und das Aushubmaterial, mit Zementsuspension vermischt, unmittelbar dem Aushub folgend wieder eingebaut. Wenn Stützscheiben in regelmäßiger Folge gesetzt werden, verspannt sich der Boden zwischen den Scheiben, so dass eine kontinuierliche Stützwirkung entsteht (SMOLTZYK et al., 1992).

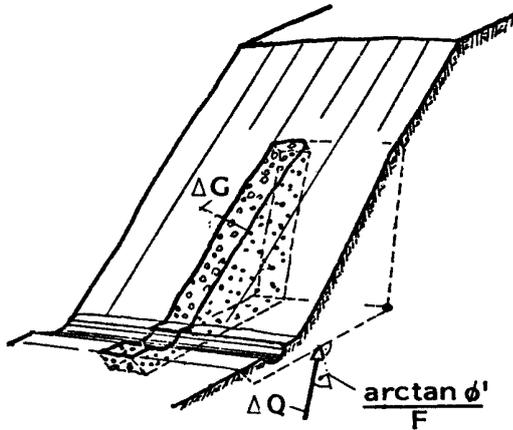


Bild O05.200: Stützscheibe in einer Böschung

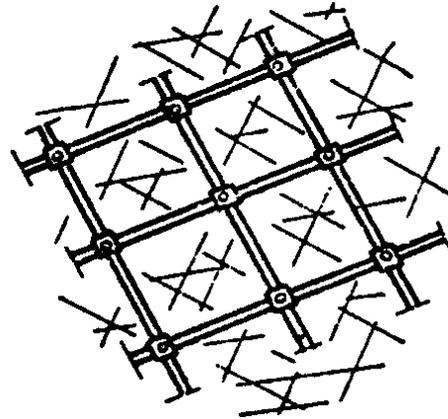


Bild O05.210: aufgenageltes Gitter zur Fellsicherung

Eine Übergangsform zwischen Böschungssicherung und Stützmauer zur örtlichen Sicherung angewitterter Felspartien ist das aufgenagelte Gitter (Bild O05.210) oder die Sicherung steiler Kluftplatten durch Felsanker (Bild O05.220). Reicht das nicht aus, dann muss eine Vollsicherung durch eine Stahlbetonwand erfolgen, die durch Felsanker rückverhängt wird (Bild O05.230). An der Rückseite einer direkt gegen den Hang betonierten Wand muss zur Entspannung von Wasserdruck eine Dränschicht eingebaut werden. Hierfür sind Dränmatten geeignet.

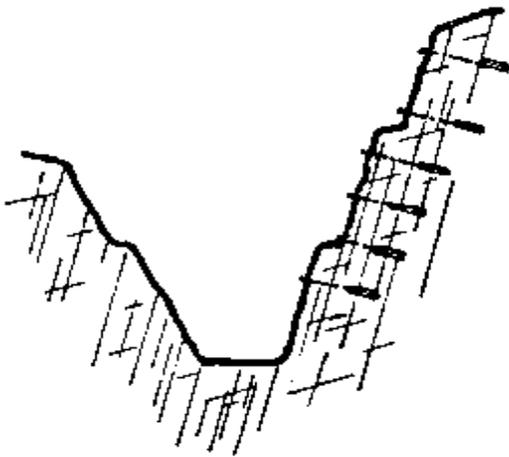


Bild O05.220: Verankerung steil stehender Kluftkörper

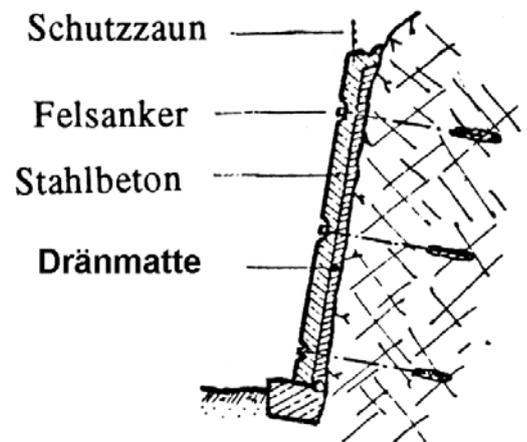


Bild O05.230: Vollsicherung durch Stahlbetonwand

O.5.6 Befestigung von Böschungen durch geotextile Bewehrung

Im Zusammenhang mit der Sicherung von Böschungen haben Geokunststoffe seit den 1980er Jahren zunehmende Bedeutung gewonnen. Durch entsprechende Anordnung geotextiler Elemente lässt sich eine Bewehrung des Bodens erreichen, die nach begrenzten Verformungen Zugkräfte aufnehmen und dadurch die Standsicherheit einer Böschung erhöhen kann.

Bild O05.240 zeigt mögliche Arten der Stützung bzw. Rückverhängung. In Standsicherheitsnachweisen werden stabilisierende Zugkräfte, die bei verträglichen Verformungen geweckt werden können, in den Gleichgewichtsbetrachtungen berücksichtigt. In welchem Umfang Geokunststoffe dazu Kräfte dauerhaft bereitstellen können, ist vom Material und seinen technischen Daten abhängig. Näheres wird in der Vorlesung Q, „Stützbauwerke und Verbau“ behandelt.

Geokunststoffbewehrungen lassen sich gut mit biologischen Sicherungsmethoden koppeln, da das zwischen den Geotextilien eingebaute Bodenmaterial dafür gezielt ausgewählt werden kann: Wasserspeicherefähigkeit, Nährstoffe, Durchwurzelungsmöglichkeit. Langfristig kann dann der durchwurzelte Bodenkörper Teilfunktionen der Geokunststoffbewehrung übernehmen. SMOLTZYK / MALCHAREK (1981) stellten eine als Stuttgarter Lebendverbau / Wulstverbau bezeichnete Konstruktion vor, die aus geschichteten, kunststoff-ummantelten Schüttgut-Polstern besteht (Bild O05.250). Sie kann bei Böden, die im frisch angeschnittenen Zustand dank Kohäsion ausreichend standfest sind, aber mit der Zeit infolge Witterungseinfluss ihre Standsicherheit einbüßen, den Erhalt der Kohäsion sichern.

Die Wülste bestehen aus Gittermatten und Siebschutt. Sie werden vor einer frisch angeschnittenen Steilböschung aus z.B. steifem Ton gestapelt und mit Gehölz-Stecklingen besetzt, entweder in offener (Bild O05.260b) oder geschlossener (Bild O05.260c) Bauweise. Die Bilder O05.270 und O05.280 zeigen Anwendungsmöglichkeiten beim Aufbau bewehrter Dammböschungen und Schallschutzwälle. Der erdstatische Nachweis erfolgt ähnlich wie bei der vernagelten Erdwand.

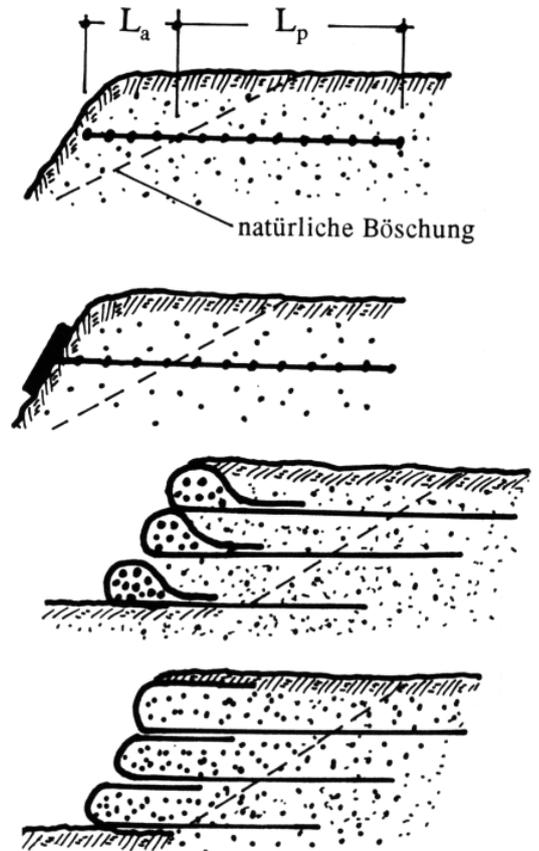


Bild O05.240: Böschungssicherung mit Bodenbewehrungen L_a - aktiver Bereich, L_p - passiver Bereich

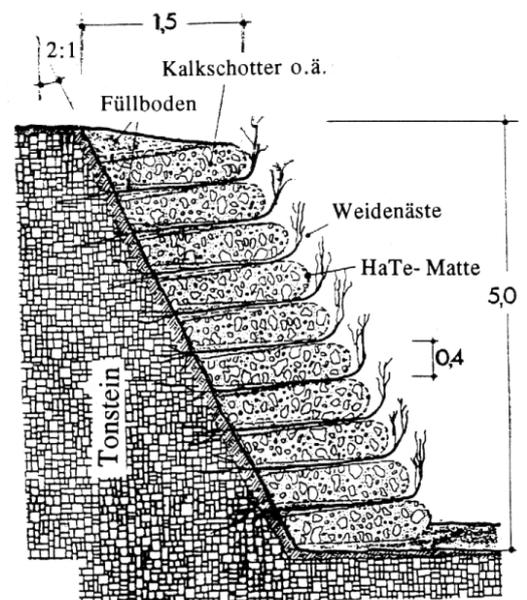


Bild O05.250: Stuttgarter Lebendverbau / Wulstverbau (SMOLTZYK / MALCHAREK, 1981)

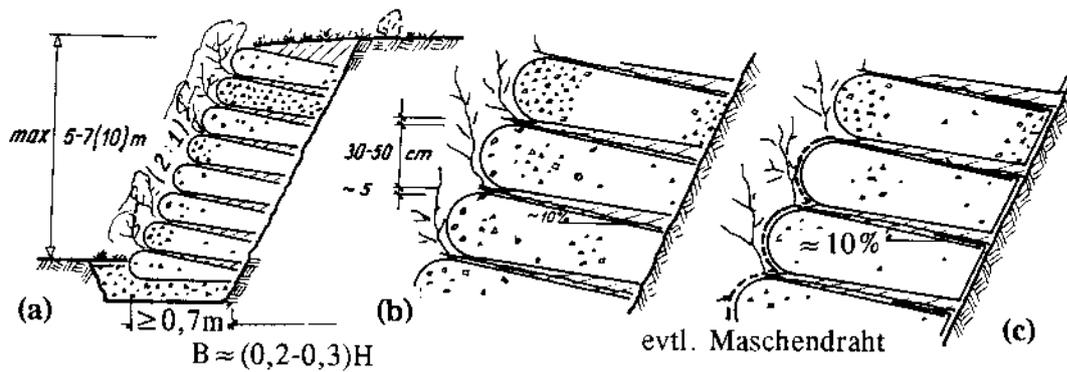


Bild O05.260: Wulstverbau mit offenen (b) oder geschlossenen (c) Wülsten; Schutz vor Vandalismus evtl. mit Maschendraht; typische Breite: $B = (0,2 \dots 0,3) \cdot H$

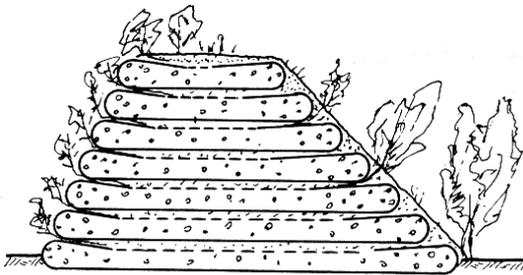


Bild O05.270: Schallschutzwall

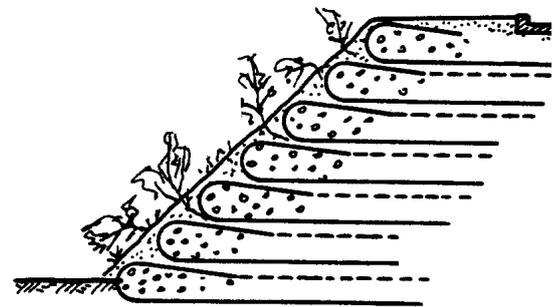


Bild O05.280: Bewehrte Böschung

O.5.7 Drainage

Hinter dem Kopf und vor dem Fuß einer Böschung muss eine dauernd funktionsfähige Drainage angelegt werden. Am Kopf muss verhindert werden, dass Wasser aus Flächen oberhalb der Böschung ungeführt über die Böschung abfließt, sonst kommt es schnell zu tiefen Erosionsrinnen. Am Böschungsfuß soll verhindert werden, dass Wasser frei aus der Böschung austritt, hier kann es zu rückschreitender Erosion und zu Aufweichungen kommen. Die obere Dränrinne muss in regelmäßigen Abständen nach unten auslaufen können. Dazu legt man z.B. eine Kaskadentreppe an, deren Stufen die Energie des Wassers umwandeln. In der Böschung selbst können schräg verlaufende Sickerschlitze - Bild O05.290 - das Oberflächenwasser sammeln und abführen, d.h. Erdrinnen, die auf einer Lehmsohle grobes Gesteinsmaterial als Füllung haben und auf der Bergseite eine Filterkies-Zwischenschicht. Die Sammelstränge werden meist mit einem Dränrohr ausgerüstet.

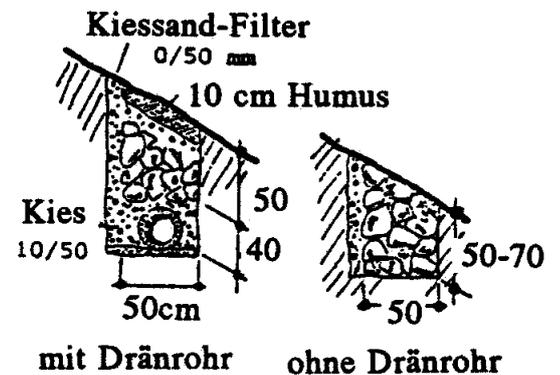


Bild O05.290: Sickerschlitze in einer Böschung

Entwässerung auch mit biologischen Mitteln, z.B. durch kräftig wasserziehende Pflanzen: Bäume wie Ahorn, Erle, Esche, Pappel, Weide, Bergulme oder Sträucher wie Weide oder Holunder bzw. Krautpflanzen wie Klee, Huflattich, Schilf. Schilfsoden legt man zur Drainage örtlicher nasser Stellen wie Rasenziegel (1m^2 Schilf verbraucht jährlich etwa 1 t Wasser).

Herstellen von Dränsträngen: mit Rasen- oder Schilfsoden ausgelegte Mulden (Rasenrinne); Faschinendrängs (Bild O05.300); Stangendrängs (Bild O05.310); Künetten (Bild O05.320) - jeweils teilweise oder ganz mit lebendem Material. Variante zur Hangfuß-Entwässerung in Form eines Filterkeils, Bild O05.330.

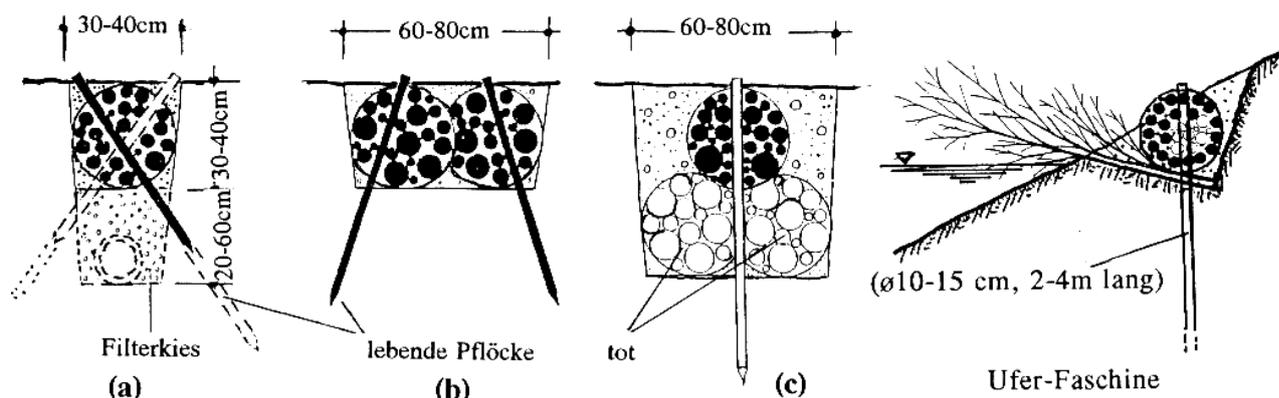


Bild O05.300: Verschiedene Faschinen-Dräns (SCHIECHTL, 1973)

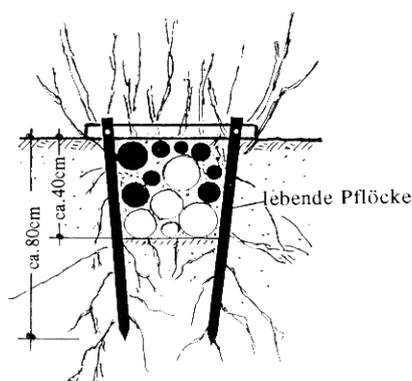


Bild O05.310: lebender Stangendrän (SCHIECHTL, 1973)

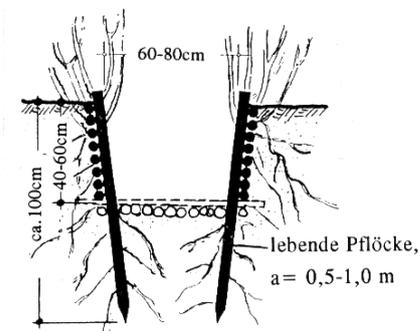


Bild O05.320: Lebende Künette (SCHIECHTL, 1973)

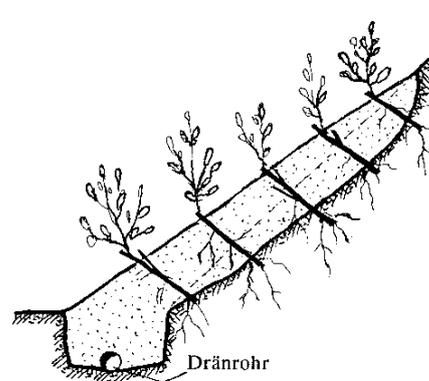


Bild O05.330: Filterkeil (SCHIECHTL, 1973)

0.5.8 Baugrubenböschungen

Bei Böden hoher und mittlerer Scherfestigkeit, nicht zu großer Gründungstiefe, günstigen Grundwasserverhältnissen und bei Verfügbarkeit des dazu erforderlichen Platzes ist die frei geböschte Baugrube die kostengünstigste Maßnahme, um den für in den Baugrund einbindende Maßnahmen erforderlichen Raum zu schaffen. Bei Kostenvergleichen mit Verbaumaßnahmen ist der zusätzliche Aushub und die Wiederverfüllung im Böschungsbereich den Kosten eines Verbaus gegenüber zu stellen.

Ohne rechnerische Nachweise der Standsicherheit dürfen nach DIN 4124, Baugruben und Gräben, bei weichen bindigen Böden und einer Höhe bis 5 m Böschungen mit einer Neigung bis 45° hergestellt werden; bei steifen bindigen Böden sind Böschungsneigungen bis 60°, im Fels bis 80° erlaubt. Dabei müssen einige zusätzliche Voraussetzungen erfüllt sein, z.B. keine Lasten unmittelbar an der Böschungskrone, kein zutretendes Grundwasser / Sickerwasser etc. Treffen die Voraussetzungen nicht zu, dann sind Standsicherheitsnachweise zu führen. Ein logischer Konflikt besteht darin, dass die nach DIN 4124 zulässigen Böschungen, die sich in der Praxis selbstverständlich auch als standsicher erweisen, mit üblichen Bodenkennwerten nicht immer nachweisen lassen. Z.B. ist eine 45°-Böschung in einem kohäsionslosen Boden rechnerisch nicht standsicher. Um entsprechende Nachweise führen zu können, muss z.B. die Kapillarkohäsion berücksichtigt werden, was normalerweise nicht üblich ist.

Ein weiterer Konflikt besteht darin, dass von Bauausführenden häufig zu steile Baugrubenböschungen hergestellt werden, die (zunächst) offensichtlich stehen bleiben, aber dennoch nicht standsicher sind. Hier mangelt es an der ausreichenden Standsicherheit, also am Sicherheitsabstand zwischen der zulässigen Böschungsneigung und der Neigung im Grenzzustand. Aus Gründen der Haftung und des Unfallschutzes muss der Geotechnik-Ingenieur auf der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen bestehen. Leider gibt es in Deutschland jährlich Tote im Zusammenhang mit plötzlich versagenden Baugrubenböschungen.

Lotrechte Erdwände sind standsicher, wenn die Scherfestigkeit einen Kohäsionsanteil enthält, und können dann auch rechnerisch nachgewiesen werden. Da bei erstbelasteten Bodenarten nur eine scheinbare Kohäsion vorhanden ist, beschränkt DIN 4124 die ohne Sicherung zulässige Standhöhe auf 1,25 m und schreibt für Höhen zwischen 1,25 m und 1,75 m, wie sie bei der Herstellung von Gräben häufig auszuführen sind, das Herstellen einer ausgesteiften Saumverbohlung vor (Bild O05.340). Außerdem muss dann auf beiden Seiten der Baugrube ein Streifen von 0,6 m lastfrei bleiben.

Bei der Begrenzung auf 1,25 m wird von der Vorstellung ausgegangen, dass dann im Fall eines Einbruchs der Erdwand noch eine Flucht- oder Rettungsmöglichkeit besteht.

Unverbaute Baugruben, die tiefer als 1,75 m sind, müssen nach DIN 4124 abgeböschet, dürfen also auch bei nachgewiesener Standsicherheit nicht senkrecht geböschet werden.

Anmerkung: Wie Bild O04.20 zeigt, wächst die Standsicherheitszahl N logarithmisch an, wenn die Böschung flacher wird, d.h. auch ein geringes Anschrägen verbessert die Standsicherheit und Standzeit einer Erdwand merklich.

Um Lasten an der Krone von Baugrubenböschungen zu erfassen, genügt der Ansatz einer gleichförmigen Ersatzlast von 10 kN/m^2 , wenn die Einzelfahrzeuge weniger als 240 kN Gesamtlast haben und die Räder höchstens auf 3 m an die Böschungskante herankommen können. Andernfalls ist DIN 1072 maßgebend. Ein lastfreier Streifen von mindestens 1 m Breite ist stets anzustreben.

Ferner ist sicherzustellen, dass kein Oberflächenwasser über die Randböschungen fließt. Hierzu ist es zweckmäßig, sofern ein Gefälle zur Baugrube besteht, kleine Erdwälle auf den Böschungskronen anzulegen und für eine gezielte Ableitung von oberflächlich zusammenfließendem Wasser zu sorgen.

Schichtgrenzen in einer freien Böschung sind ein erhöhtes Risiko, wenn sie Schichten unterschiedlicher Wasserwegigkeit voneinander abgrenzen und dadurch bevorzugte Gleitflächen sein können. Wenn an Schichtgrenzen Wasseraustritte festgestellt werden und eine Gefahr des Abgleitens erkennbar wird, sollte eine Entwässerung der oberen Schicht, z.B. mit Tiefendrains oder Vakuumlanzen vorgenommen werden.

Bei Felsböschungen müssen brüchige Felspartien zur Vermeidung von Steinschlag beseitigt werden. Aus Arbeitsschutzgründen kann es notwendig sein, Felsböschungen mit Steinschlagschutzgittern zu sichern, die an der Böschungskrone oder auf Bermen befestigt werden.

Wenn Baugrubenböschungen mit Folien abgehängt werden, kann damit ein Austrocknen und damit verbundener Kohäsionsverlust des Bodens in der Böschung vermieden werden. Eine darüber hinausgehende Sicherung stellen derartige Folien jedoch nicht dar; sie behindern zudem die Möglichkeit der Beobachtung. Folienabhängungen sollten - z.B. durch aufgelegte Baustahlgewebematten und kurze eingeschlagene "Nägel" gehalten werden.

Gelegentlich gibt es Randbedingungen, bei denen eine Zwischenlösung zwischen senkrechter, statisch zu bemessender Sicherung und freier Böschung wirtschaftlich ist. So kann eine konstruktiv angeordnete Spritzbetonschale auf einer Böschungsoberfläche, die zunächst einen Oberflächenschutz darstellt und dem Erhalt einer Kohäsion dient, die Standsicherheit der Böschung insgesamt erhöhen, dass zwischen Spritzbetonschale und Böschung (eventuell im Zusammenhang mit Erddruckkräften, aber auch dann, wenn kein Erddruck wirksam ist) Reibungskräfte wirksam werden (Bild O05.350). Diese stützen die Böschung und werden in der Spritzbetonschale als Normalkräfte zum Böschungsfuß abgeleitet.

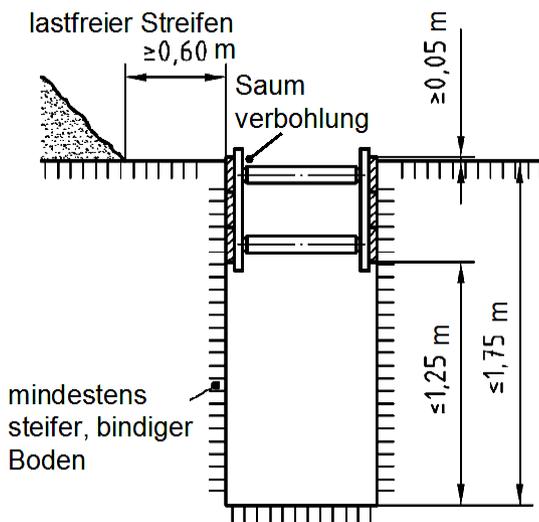


Bild O05.340: Graben geringer Tiefe mit Saumbohlen und Steifen (nach DIN 4124)

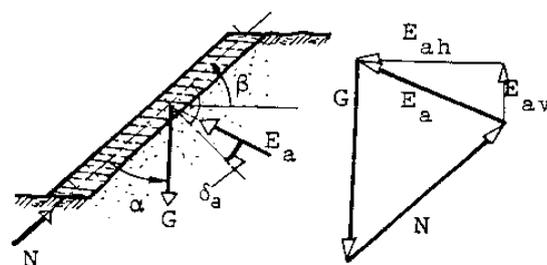


Bild O05.350: Spritzbetonschale auf einer Böschung

Dort muss dann die Spritzbetonschale so verstärkt werden, dass die Kräfte grundbruchsicher in der Baugrubensohle abgetragen werden können. Vor Anordnung und Festlegung derartiger Maßnahmen müssen stets erdstatische Nachweise geführt werden, die eine ausreichende Standsicherheit belegen können.

O.6 Besonderheiten bei Dämmen

Die Böschungsoberflächen von Dämmen können bei der Ausführung der Erdarbeiten nicht in gleicher Qualität verdichtet werden wie das Innere des Dammes, da hier die seitliche Verspannung fehlt. Daher ist es erforderlich, Dammbauwerke gegenüber ihrem Sollprofil zunächst um etwa 0,5 m bis 1 m seitlich zu überschütten und das unvermeidbar geringer verdichtete Überprofil nachträglich abzutragen. Die derart hergestellte Böschungsoberfläche ist entsprechend den Ausführungen in Abschnitt O.5 zu sichern.

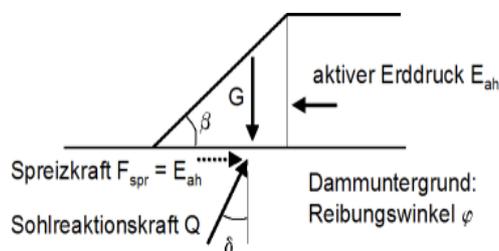


Bild O06.10: Spreizkraft an einer Dammsohle

Die Basis eines Dammes stellt eine vorgeprägte Gleitebene dar, an der verschieden scherfeste Materialien aneinander grenzen und in der Spreizkräfte wirken, siehe unten. Bei einer glatt abgewalzten Aufstandsfläche kann sogar die Scherfestigkeit in besonderem Maße herabgesetzt sein. Vor allem bei Dämmen, die auf einem geneigten Gelände aufgebaut werden, sieht man daher gerne eine Verzahnung zwischen Untergrund und Dammkörper vor. Auch bei Dammverbreiterungen werden alte und neue Dammteile miteinander verzahnt.

An der Sohle eines Dammes treten Spreizkräfte auf. Sie ergeben sich aus dem Abbau des Erddrucks, der im Innern des Dammkörpers mit der Höhe h wirkt und der bis zur Dammaußenseite abgebaut werden muss (Bild O06.10). Unterhalb der Böschung ergibt sich die Größe der Spreizkraft F_{spr} aus dem aktiven Erddruck E_{ah} im Innern des Dammes zu

$$F_{spr} = E_{ah} = K_{ah} \cdot \gamma \cdot h^2 / 2$$

Das Eigengewicht des Bodens unterhalb der Böschung beträgt $G = \gamma \cdot h^2 / 2 / \tan \beta$ und damit die Neigung der nach außen gerichteten Resultierenden der Kräfte aus dem Damm: $\tan \delta = F_{spr} / G$. Daraus ergibt sich eine Sicherheit gegen ein seitliches Weggleiten des Dammfußes von $\eta = \tan \varphi / \tan \delta$, wenn φ der Reibungswinkel des Materials im Dammuntergrund ist. Bei unzureichender Sicherheit kann sie durch den Einbau hochzugfester Geokunststoff-Bewehrungen erhöht werden, was bei Dämmen auf weichem Untergrund regelmäßig erforderlich ist.

O.7 Messprogramme, Beobachtungen, Beweissicherung

Vor allem die Herstellung von Baugruben in bestehenden Hängen, die dabei gegenüber ihrer natürlich entstandenen Neigung versteilt werden, sollte in der Regel - unabhängig von der rechnerisch ermittelten ausreichenden Standsicherheit - messtechnisch beobachtet werden. Dies gilt insbesondere, wenn - z.B. bedingt durch die zwangsläufig punktuelle Erkundung, häufig verknüpft mit schwieriger Zugänglichkeit - nicht sicherstellen konnte, dass keine Harnischflächen, Schwächezonen oder vorgeprägte Gleithorizonte bestehen. Vor Beginn des Aushubs sind dann z.B. an der Böschungskrone Inklinometer herzustellen, in denen die Verformungen während des Aushubs regelmäßig gemessen werden.

Nach Herstellen der Böschung können zusätzlich geodätisch zu kontrollierende Messpunkte an der Oberfläche, weitere Inclinometer in der Böschung und Horizontalextensometer zum Messen von Verformungen eingesetzt werden.

Vor Beginn des Aushubs sollten die erwarteten Verformungen überlegt oder errechnet werden und Maßnahmen bedacht werden, wie im Fall von unerwarteten Verformungen zu reagieren ist: z.B. vorübergehender Baustop, zusätzliche Messungen zur Präzisierung der ersten Messergebnisse, Sicherungsmaßnahmen z.B. durch vorgespannte Anker.

Außerdem ist es häufig empfehlenswert, Einschnittsböschungen während der Aushubarbeiten geologisch aufnehmen zu lassen, um Störungen, Wasseraustritte, ein ungünstiges Kluffgefüge im Gebirge oder andere Einflüsse auf die Standsicherheit frühzeitig erkennen zu können.

Falls Anlieger oberhalb einer Böschung von Verformungen betroffen sein können (Straße, Leitungen, Gebäude..), empfiehlt sich eine Beweissicherung. Dabei wird der Zustand vor Beginn der Aushubarbeiten genau erhoben und dokumentiert, außerdem können Verformungsmessungen während der Abtragsarbeiten auch in diesem Zusammenhang zweck-

mäßig sein. Ziel ist, bei unverträglichen Verformungen frühzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können und unberechtigte Schadensersatzansprüche abwehren zu können.

O.8 Sanierung von Rutschungen

Bei einer tatsächlich aufgetretenen Rutschung bestand eine Beanspruchung, bei der die Scherfestigkeit in der Fuge des Versagens vollständig ausgenutzt worden war. Die Auswertung unter Berücksichtigung der Geometrie, der Lasten und der Wassersituation lässt damit einen hervorragenden Rückschluss auf die tatsächliche Scherfestigkeit zu.

Eine Rutschung an sich lässt sich kaum sanieren, abgerutschter Boden lässt sich nicht wieder an seiner Originalstelle einbauen. Meist geht es bei Sanierung von Rutschungen darum, Maßnahmen für vergleichbare, noch nicht abgerutschte Böschungsbereiche festzulegen, bei einer Rutschung freigelegte Steilstufen im oberen Abrissbereich zu sichern oder Voraussetzungen zu schaffen, Rutschmassen zu beseitigen, ohne weitere Rutschungen auszulösen.

Bei derartigen Überlegungen sollten die Ziele verfolgt werden, in das System Stützkkräfte einzubringen oder treibende Kräfte herauszunehmen. Zur Abstützung geeignet sind Vorschüttungen, Verdübelungen und Verankerungen, bei der Entfernung treibender Kräfte sind Abflachungen und Entwässerungsmaßnahmen zweckmäßig.

Zur Beurteilung der Maßnahmen im Sinne einer Kosten-Nutzen-Schätzung sollte man sie auf der Grundlage von Standsicherheitsberechnungen miteinander vergleichen. Die gerutschte Böschung wird nachgerechnet, dabei werden die Parameter so angepasst, dass die Sicherheit = 1 ist, bzw. alle Partialsicherheiten auf 1 gesetzt und der Ausnutzungsgrad $1/f = 1$ ist. Dann werden das zu erreichende Sicherheitsziel festgelegt (z.B. zu erreichende Globalsicherheit $\eta = 1,2$) und die Sicherungsmaßnahmen rechnerisch mit dem gleichen Modell bewertet, z.B.: Welche Ankerkräfte sind erforderlich, um diese Sicherheit zu erreichen, in welchem Umfang muss eine Entwässerung vorgenommen werden, auf welchen Winkel muss abgeflacht werden. Oft wird sich zeigen, dass wirksame Entwässerungsmaßnahmen die effektivste Sicherungsmethode darstellen, da mit begrenztem Aufwand z.B. durch tiefe Dräns oder dränierende Horizontalbohrungen wesentliche treibende Kräfte abgebaut werden können.

O.9 Schrifttum

- BEGEMANN, W. / SCHIECHTL, H.M. (1994): Ingenieurbioogie: Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erbau. 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- BISHOP, A. W. / MORGENSTERN, N. (1960): Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique 10, S.129-150
- BOROWICKA, H. (1970): Ein statisch einwandfreies Verfahren zur Ermittlung der Standsicherheit einer Böschung. Der Bauingenieur 45, S.307-313
- DIN 4084-100 (04/1996)
- DIN 4124 (10/2002)
- DIN 19657 (1965)
- GUSSMANN, P. (1978): Das allgemeine Lamellenverfahren unter besonderer Berücksichtigung von äußeren Kräften. GEOTECHNIK 1, S.68-74
- GUSSMANN, P. (1993): Studienunterlagen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Abschnitt E6.
- KEMPFERT, H.-G. / RAITHEL, M. (2007): Bodenmechanik und Grundbau. Band 1, Kapitel 14. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin.
- KREY, H. D. (1926): Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes. Verlag von W. Ernst und Sohn Berlin.
- MORGENSTERN, N. / PRICE, V. E. (1965): The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique 15, S.79-93
- SCHIECHTL, H.M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Callwey-Verlag, München.
- SCHIECHTL, H.M. (2001): Böschungssicherung mit ingenieurbioologischen Bauweisen. In: Grundbautaschenbuch, 6. Auflage, Teil 2, Kap. 2.16. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- SEVALDSON, R. A. (1956): The slide at Lodalen. Géotechnique 6, S.167-182
- SKEMPTON, A. W. (1964): Long-term stability of clay slopes. Géotechnique 14, S.77-101
- SKEMPTON, A. W. / HUTCHINSON, J. (1969): Stability of natural slopes and embankment foundations. Proc.7th ICSMFE Mexico, State-of-the-Art, Volume S.291-340
- SMOLTZYK, U. / MALCHAREK, K. (1981): Lebendverbau von Steilböschungen. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 23, S. 396 - 400.
- SMOLTZYK, U. / MA, J./ THAHER, M. (1992): Untersuchung von Böschungs-Stützscheiben durch Zentrifugen-Modellversuche. Vorträge Baugrundtagung Dresden, S.407 - 416.
- SPENCER, E. (1973): Thrust line criterion in embankment stability analysis. Géotechnique 23, S.85-100

- TAYLOR, D. W. (1948): Fundamentals of Soil Mechanics. J.Wiley & Sons Inc. New York London Sydney
- TORSTENSSON, B. A. (1982): The landslide at Tuve, Sweden. Ground Engineering 15, S.15-24
- WALDRON, L. J. / DAKESSIAN, S. (1982): Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance. Soil Sci. Soc. Amer. J 46, S. 894 - 899.
- WICHTER, L. (1980): Festigkeitsuntersuchungen an Großbohrkernen von Keupermergel und Anwendung auf eine Böschungsrutschung. Veröff. Inst. Bodenmech., Felsmech. Universität Karlsruhe, Heft 84.
- WOLDT, J. (1977): Beitrag zur Standsicherheitsberechnung von Erddämmen. Diss. Universität Stuttgart.
- ZIEGLER, M. (2002): Risikosimulationsrechnungen in der Geotechnik; 9. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium; Mitt. d. Inst. u. d. Versuchsanst. für Geot. der Techn. Univ. Darmstadt