

N° 94	MITTEILUNGEN der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik PUBLICATIONS de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches
	Herbsttagung 1976, 5. November, Bern — Session d'automne 1976, 5 novembre, Berne

BOESCHUNGSSTABILITAET

Von Dr. U. Vollenweider, Zürich, U. von Matt, Zürich, und H. Zeindler, Zollikofen

INHALTSVERZEICHNIS

TEIL A — ALLGEMEINES UEBER STABILITAETSBERECHNUNGEN

von Dr. U. Vollenweider

1. Einleitung
2. Berechnungsverfahren. Allgemeiner Ueberblick
 - 2.1. Berechnungsverfahren
 - 2.2. Allgemeine Voraussetzungen
3. Gebräuchliche Berechnungsmethoden
 - 3.1. Starrkörper-Methoden
 - 3.2. Lamellen-Methoden
 - 3.3. Block-Gleit-Methode
 - 3.4. Elektronische Rechenprogramme
4. Allgemeine Beurteilung der Berechnungsmethoden
 - 4.1. Genauigkeit der Berechnung
 - 4.2. Besondere Probleme
5. Schlussfolgerung

Literatur

TEIL B — VERGLEICHENDE STABILITAETSBERECHNUNG

von U. von Matt

1. Einleitung
2. Beispiel 1 — Hangeinschnitt
3. Beispiel 2 — Dammverbreitung
4. Beispiel 3 — Dammerhöhung
5. Schlussfolgerung

TEIL C — PRAKTISCHE ANWENDUNG UND PROBLEMATIK DER RECHENVERFAHREN

von H. Zeindler, Zollikofen

TEIL A — ALLGEMEINES UEBER STABILITAETSBERECHNUNGEN

Von Dr. U. Vollenweider, Zürich

1. Einleitung

Die Untersuchung der Böschungstabilität ist sehr vielseitig und umfasst eigentlich vier voneinander zum Teil stark abhängige Problemkreise:

- allgemeine Problemerkennung
- geotechnische Analyse des Baugrundes als Grundlage zur Stabilitätsberechnung
- Stabilitätsberechnung
- Problembewertung und Wahl der technischen Massnahmen

Der vorliegende Beitrag zur Böschungstabilität befasst sich lediglich mit dem Problem der Stabilitätsberechnung. Dabei ist mit aller Deutlichkeit hervorzuheben, dass die Bedeutung der reinen Stabilitätsberechnung im Rahmen des Gesamtproblemkreises nicht überschätzt werden darf. Wohl ist es wichtig, eine gute Berechnungsmethode zur Verfügung zu haben und vor allem die Genauigkeit und die Grenzen dieser Methode zu kennen; für den Erfolg ist letztlich aber, wie die Erfahrung immer wieder lehrt, die Erfassung des gesamten Problemkreises wichtig.

Mit dem vorliegenden Beitrag soll versucht werden, für den praktisch tätigen Ingenieur einen Ueberblick über den derzeitigen Stand der mathematischen Behandlung von Geländebruchproblemen zu vermitteln.

2. Berechnungsverfahren. Allgemeiner Ueberblick

2.1 BERECHNUNGSVERFAHREN

Zur Untersuchung der Böschungstabilität stehen heute zahlreiche Berechnungsmethoden zur Verfügung. Gesamthaft betrachtet kann grundsätzlich zwischen statischen oder elastisch-plastischen und kinematischen oder starr-plastischen Berechnungsverfahren unterschieden werden.

Praktisch alle heute gebräuchlichen Berechnungsverfahren, wie zum Beispiel die Methode Fellenius, gehören zur Gruppe der kinematischen Berechnungsverfahren. Zur Ermittlung der Böschungstabilität werden statische Berechnungsverfahren, wie zum Beispiel die Methode der finiten Elemente, eher selten verwendet. Der Grund liegt im unvergleichbar grösseren Arbeits- und Rechenaufwand der statischen gegenüber den viel einfacheren kinematischen Verfahren, ohne aber gleichzeitig bezüglich Stabilitätssicherheit ein besseres Resultat liefern zu können. Die wesentlichen Merkmale dieser beiden grundsätzlich verschiedenen Verfahren seien nachstehend kurz erläutert.

a) Statische Berechnungsverfahren

Die statischen Berechnungsverfahren beruhen alle auf der Erfüllung der Gleichgewichts- und Formänderungsbedingungen. Als typisches Beispiel für die Gruppe der statischen Berechnungsverfahren sei stellvertretend die Methode der finiten Elemente erwähnt. In neuester Zeit hat gerade diese Methode dank ihrer Universalität bezüglich Formulierung der Randbedingungen und der Erweiterung auf das Erfassen des elastisch-plastischen Formänderungsverhaltens auch in der Geomechanik eine zunehmende Verbreitung erfahren. Damit können, allerdings auf einem mehr oder weniger willkürlich angenommenen Stoffgesetz, belastungsabhängige und rheologisch bedingte Deformationszustände untersucht werden. Die Erfassung des Grenzgleichgewichtszustandes kann näherungsweise durch sukzessive Aenderung der Randbedingungen oder des Formänderungsverhaltens auf iterativem Wege ermittelt werden. Die Methode der finiten Elemente hat sich insbesondere als sehr wertvoll bei der Untersuchung von Geländebruchproblemen infolge dynamischer Beanspruchung erwiesen. Uebereinstimmend wird aber von Fachleuten festgestellt, dass – mit Ausnahme von Spezialfällen – die statischen Berechnungsverfahren zur Lösung von Stabilitätsproblemen der vorliegenden Art nicht sehr geeignet sind. Dies gilt auch für die Methode der finiten Elemente, obschon gerade dieser Methode noch eine sehr grosse Zukunft vorausgesagt wird. Auf die weitere Behandlung der statischen Berechnungsverfahren wird, wegen ihrer heute noch beschränkten Anwendung in der Praxis, verzichtet.

b) Kinematische Berechnungsverfahren

Die kinematischen Berechnungsverfahren beruhen alle auf der starrplastischen Untersuchung des Grenzgleichgewichtes. Durch eine frei gewählte Gleitfläche wird ein Bruchmechanismus aus einem oder mehreren starren Bruchkörpern gebildet. Ausgehend von bekannten oder angenommenen Kräften werden über eine Gleichgewichtsbetrachtung die inneren Kräfte und insbesondere der erforderliche Bruchwiderstand (Scherfestigkeit) bestimmt. Die rechnerische Stabilitätssicherheit erhält man aus dem Vergleich von vorhandenem zu erforderlichem Bruchwiderstand. Um die kritische Stabilitätssicherheit zu finden, sind meist mehrere Bruchmechanismen zu untersuchen. Massgebend für die Geländestabilität ist der Bruchmechanismus mit der kleinsten rechnerischen Stabilitätssicherheit. Die Anwendung und die mathematische Behandlung der kinematischen Berechnungsverfahren ist grundsätzlich sehr einfach. Die Schwierigkeit liegt in der Wahl des richtigen Bruchmechanismus und der für das Problem zutreffenden Annahme der inneren Kräfte.

2.2 ALLGEMEINE VORAUSSETZUNGEN

Allgemein wird vorausgesetzt, dass sich das Problem der Stabilitätsuntersuchung geometrisch und mathematisch formulieren lässt. Zu diesem Zweck sind zum Teil stark vereinfachende Annahmen zu treffen. Der Einfluss dieser Annahmen auf die Stabilitätsuntersuchung ist in jedem Falle sehr eingehend zu überdenken und mindestens qualitativ in der Beurteilung des Resultates mitzubewertigen. Nachstehend werden die wichtigsten Annahmen und Voraussetzungen kurz behandelt.

a) Ebenes Problem

Die Untersuchung der Böschungstabilität wird meist als ebenes Problem behandelt. Der Rutschkörper, von in Wirklichkeit seitlich begrenzter Ausdehnung, wird im Modell als unendlich ausgedehnt betrachtet. Diese Voraussetzung gestattet die Rückführung

des räumlichen Problems auf ein ebenes. In der Stabilitätsuntersuchung wird nur noch eine Scheibe der Einheitsbreite betrachtet. Ein allfällig wirksamer seitlicher Scherwiderstand als Folge der räumlichen Krümmung wird vernachlässigt. Die Zulässigkeit dieser Voraussetzung ist vor allem bei Berücksichtigung von relativ konzentrierten Geländeaufasten, wie zum Beispiel Bauwerkfundamenten (Abb. 1), oder bei besonderen topografischen Verhältnissen, die eine ausgedehnte Rutschfläche gar nicht erst zulassen, speziell zu prüfen. Ist die Voraussetzung der ebenen Behandlung nicht mehr erfüllt, so ist zur Stabilitätsuntersuchung entweder ein räumlicher Bruchmechanismus anzunehmen, oder aber bei der ebenen Behandlung mindestens ein seitlicher Bruchwiderstand S (Abb. 1) mitzubetrachten. Räumliche Bruchmechanismen lassen sich vor allem elegant und einfach mit Hilfe der Block-Gleit-Methode untersuchen.

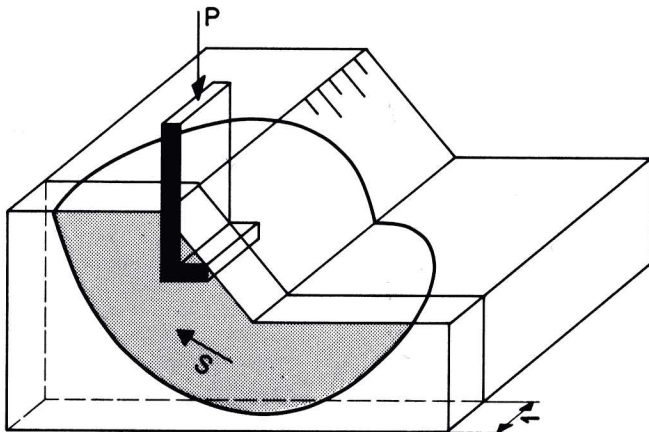


Abb. 1 Räumliches Stabilitätsproblem

b) Bruchbedingungen

Wie allgemein in der Bodenmechanik üblich, wird die Gültigkeit der Coulomb'schen Bruchbedingungen (Gl. 1) vorausgesetzt.

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \Phi' + c' \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit dieser Beziehung ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Scherfestigkeit τ und der Normalspannung σ , den Scherfestigkeitsparametern Φ' (Winkel der inneren Reibung), c' (Kohäsion) und der Porenwasserspannung u gegeben. Grundsätzlich kann die Untersuchung auf der Basis der totalen Spannungen, nach der $\Phi' = 0$ Methode oder auf der Basis der effektiven Spannungen ausgeführt werden. Im ersten Fall wird ohne Berücksichtigung irgendwelcher Porenwasserspannungen eine spannungsunabhängige Scherfestigkeit angenommen. Im zweiten Fall wird unter Berücksichtigung von Porenwasserspannungen mit den effektiven Scherfestigkeitsparametern Φ' und c' gerechnet. Eine Untersuchung auf der Basis der totalen Spannungen rechtfertigt sich nur bei stark kohäsiven Böden und bei genauer Kenntnis von τ_{br} . Wenn immer möglich wird aber eine Berechnung auf der Basis der effektiven Spannungen (Gl. 1) empfohlen. Grundsätzlich sollten jedoch beide Berechnungsverfahren das gleich Ergebnis zeitigen.

c) Stabilitätssicherheit

Einige Unklarheit besteht bei den verschiedenen Berechnungsmethoden in der Definition der Stabilitätssicherheit. Fellenius zum Beispiel definiert die Stabilitätssicherheit (Gl. 2) aus einer Momentenbeziehung von resistierenden zu treibenden Kräften. Bishop dagegen definiert die Stabilitätssicherheit (Gl. 3) als Quotient von vorhandener zu erforderlicher Scherfestigkeit. Diese Feststellung erweckt im ersten Augenblick den Anschein, dass hier zwei grundsätzlich verschiedene Sicherheitsbegriffe verwendet werden, was aber in Wirklichkeit nicht zutrifft.

$$\text{statische Definition (Fellenius)} \quad F = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_t} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\text{materialtechnische Definition (Bishop)} \quad F = \frac{\tau_{br}}{\tau_{erf}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Da bei der Methode Fellenius das resistierende Moment M_r direkt proportional zur Scherfestigkeit τ ist (Gl. 4), kann leicht gezeigt werden, dass die beiden Sicherheitsdefinitionen grundsätzlich identisch sind. Wird nämlich bei Fellenius die Sicherheit analog der Methode Bishop auf die Scherfestigkeit bezogen, so müssen zur Erfüllung des Momentengleichgewichtes (G. 5) das resistierende und das treibende Moment einander gleich sein.

$$M_r = R \Sigma \tau_{br} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$\frac{R \Sigma \tau_{br} / F}{M_t} = 1 \quad (\text{Gl. 5})$$

Dass die beiden Methoden Fellenius und Bishop nicht die gleiche Sicherheit ergeben, liegt nicht in der Definition der Sicherheit, sondern in der unterschiedlichen Berechnung der erforderlichen Scherfestigkeit. Diese Feststellung gilt nicht nur für die Methoden Fellenius und Bishop, sondern praktisch für alle gebräuchlichen Berechnungsmethoden. Es wäre sehr interessant, das Problem der Sicherheitsdefinition, insbesondere unter Miteinbezug von Partialkoeffizienten, wie sie zum Beispiel Brinch Hansen vorschlägt, noch weiter zu diskutieren. Eine solche Diskussion würde aber den gesteckten Rahmen "Stabilitätsberechnungen" sicher sprengen.

d) Berücksichtigung des Wassers

Bei Stabilitätsproblemen spielt meist das Wasser eine ganz entscheidende Rolle. Es ist deshalb wichtig, dass man sich über den Einfluss von Wasser eine klare Vorstellung macht. Wie gross dieser Einfluss sein kann, zeigt schon das einfache Beispiel der unendlich langen Böschung (Abb. 2). Bei einer trockenen Böschung entspricht der Winkel der kritischen Böschungsneigung β dem Winkel der inneren Reibung Φ' . Bei einer hangparallel durchströmten Böschung kann sich dagegen der kritische Böschungswinkel je nach Hangwasserspiegel und Kohäsionsanteil praktisch bis auf den halben Wert der trockenen Böschung reduzieren. Der genaue Zusammenhang für dieses einfache Beispiel kann aus der nachstehenden Beziehung (G. 6) durch Einsetzen von $F = 1$ gewonnen werden.

$$F = \frac{(\gamma_e h - \gamma_w h_w) \cdot \cos^2 \beta \operatorname{tg} \Phi' + c'}{\gamma_e h \cos \beta \sin \beta} \quad (\text{Gl. 6})$$

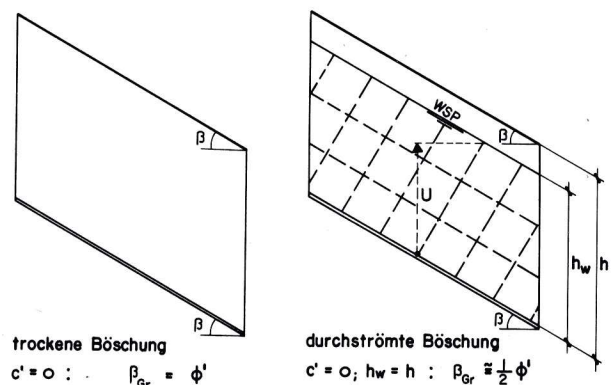


Abb. 2 Grenzneigung der unendlich langen Böschung

In der Stabilitätsberechnung kann, wie Abbildung 3 zeigt, der Einfluss des Wassers entweder über hydrostatische Kräfte oder aber über Porenwasserspannungen berücksichtigt werden. Im ersten Fall werden der Auftrieb A und, sofern vorhanden, die Strömungskraft S eingeführt. Im zweiten Fall werden die effektiven Porenwasserspannungen u entlang der Gleitflächen berücksichtigt. Bei richtiger Anwendung müssen aber beide Methoden zum gleichen Ergebnis führen. Sowohl die hydrostatischen Kräfte als auch die Porenwasserspannungen können über die Konstruktion eines einfachen Strömungsgesetzes gefunden werden. In komplizierteren Fällen ist es manchmal zweckmässiger und für die Stabilitätsberechnung einfacher, anstelle eines Strömungsgesetzes ein Netz gleicher Porenwasserspannungslinien zu konstruieren.

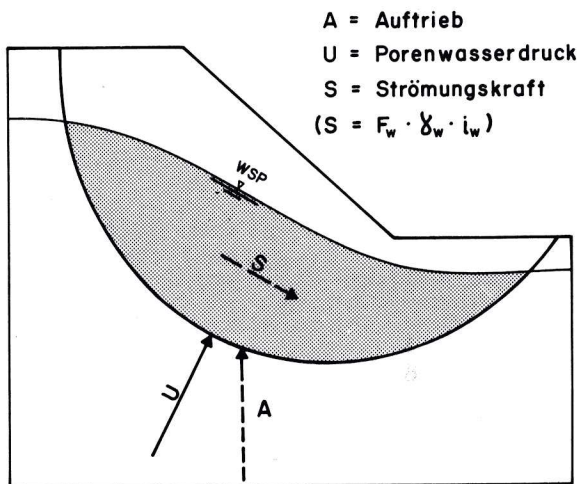


Abb. 3 Wirkung hydrostatischer Kräfte

Porenwasserspannungen können aber auch unabhängig von stehendem oder fließendem Grundwasser auftreten. Durch Belastungsänderungen wie Dammaufschüttung, seismische Beanspruchung, uws. können spannungsinduzierte Porenwasserspannungen (Porenwasserüberdruck) auftreten. Diese haben den Charakter, dass sie zeitlich begrenzt wirksam sind und mit Abfließen des Porenwassers bis zur Bildung eines neuen stabilen Gleichgewichtszustandes wieder verschwinden. Für die Geländestabilität kann in diesem Falle der kurzfristige Belastungszustand mit maximalem Porenwasserüberdruck kritisch werden. Der Vollständigkeit halber ist aber auch zu erwähnen, dass bei rascher Entlastung (Geländeabtrag) ein kurzfristig positiv wirksamer Porenwasserunterdruck auftreten kann. Dies kann zur Folge haben, dass der kritische Zustand nicht sofort mit der Belastungsänderung, sondern erst nach einiger Zeit, d.h. mit Abklingen des Porenwasserunterdruckes, erreicht wird.

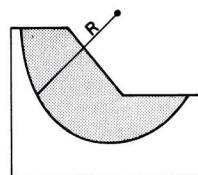
3. Gebräuchliche Berechnungsmethoden

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen, werden nachstehend die wichtigsten der heute gebräuchlichen Berechnungsmethoden kurz charakterisiert. Es wurde bereits eingangs erwähnt, dass es sich dabei durchwegs um kinematische Verfahren handelt, die auf dem Grenzgleichgewicht beruhen. Bei diesen kinematischen Methoden kann, je nach Modellannahme, zwischen Starrkörpermethoden, Lamellenmethoden und Block-Gleitmethoden unterschieden werden.

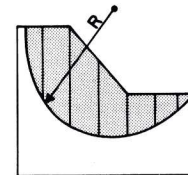
3.1 STARRKÖRPER-METHODEN

Bei den Starrkörpermethoden wird die Stabilitätssicherheit an einem einzigen starren Körper untersucht. Als Gleitfläche wird in der Regel eine Kreiszylinderschale (Fröhlich, Borowicka, Taylor), bei speziellen Verfahren eine logarithmische Spiralfäche (Rendulic, Spencer) oder gar eine Ebene (Culmann) gewählt. Die Verteilung der Reibungsspannungen entlang der Gleitfläche muss in der Regel geschätzt werden. Die Stabilitätssicherheit wird über das Momenten- oder Kräftegleichgewicht gefunden. Die Starrkörpermethoden basieren alle auf der Annahme homogener Verhältnisse (γ_e , Φ' und c' konstant), wobei hydrostatische Kräfte oder Porenwasserspannungen berücksichtigt werden können. Als klassische und heute immer noch angewendete Verfahren sind die Reibungskreisemethode nach Taylor [1] und das verfeinerte Verfahren nach Fröhlich [2] zu erwähnen. Auf diesen Verfahren basierend wurden auch Tabellenwerke erstellt, Taylor [1], Janbu [3], Morgenstern [4], Hunter [5], Fang [6], die unter einfachen Verhältnissen, wie Abbildung 5 zeigt, eine rasche Ermittlung der Stabilitätssicherheit erlauben. Da die Starrkörpermethoden aber bezüglich Geometrie und Homogenität des Baugrundes doch recht limitierende Annahmen voraussetzen, haben sie im Vergleich zu den Lamellen- oder Block-Gleitmethoden eher an Bedeutung verloren. Es wird deshalb hier auf eine eingehendere Behandlung verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen.

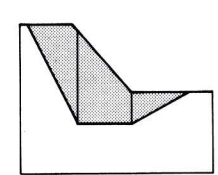
Starrkörper - Methode



Lamellen-Methode



Block-Gleit-Methode



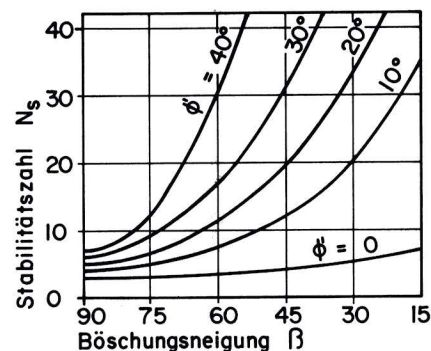
- FRÖHLICH
- TAYLOR
- SPENCER
- und andere

- FELLENIUS
- BISHOP
- JANBU
- MORGENSTERN - PRICE
- KREY
- und andere

- VEREINFACHTE
- ALLGEMEINE

Abb. 4

Kinematische Berechnungsmethoden



Kritische Höhe
 $H_c = F(\phi', c', \beta)$

$$H_c = N_s \frac{c'}{\gamma_e}$$

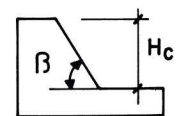


Abb. 5 Stabilitätsbeiwert nach Taylor

3.2 LAMELLEN-METHODEN

Die Lamellen-Methode ist auch heute noch das weitaus gebräuchlichste Berechnungsverfahren. Bei dieser Methode wird der durch die Gleitfläche abgetrennte Rutschkörper in eine frei wählbare Zahl vertikaler Lamellen aufgeteilt. Die Gleitfläche kann je nach Methode durch eine Kreiszylinderschale (Fellenius, Bishop, Krey) oder durch eine beliebige Bruchfläche (Janbu, Taylor, Morgenstern-Price) gebildet werden. Die Verteilung der Reibungsspannungen entlang der Gleitfläche wird über eine Gleichgewichtsbedingung an der einzelnen Lamelle gefunden. Die Stabilitätssicherheit wird über das globale Momenten- oder Kräftegleichgewicht berechnet. Grundsätzlich unterscheiden sich die einzelnen Lamellenverfahren nur in der Annahme der Reibungsspannungen entlang der Gleitfläche, d.h. in der Wahl des inneren Kräftegleichgewichtes an der einzelnen Lamelle, voneinander.

a) Methode Fellenius

Die Methode Fellenius (1947) [7], im englischen Sprachgebiet oft auch Ordinary Method of Slices genannt, ist wohl die älteste und zugleich, dank ihrer Einfachheit, auch die bekannteste aller Lamellenmethoden. Fellenius hat die Stabilitätssicherheit auf den Momentenvergleich (Gl. 2) bezogen. Die Stabilitätssicherheit kann aber, wie in Kapitel 2.2 gezeigt wurde, auch über den Scherfestigkeitsvergleich (Gl. 3) interpretiert werden.

In der Methode Fellenius wird das Kräftegleichgewicht an der einzelnen Lamelle in Richtung der Normalen zur Gleitfläche (radial zum Gleitkreismittelpunkt) formuliert. Zur Erfüllung des Kräftegleichgewichtes müssen bei Fellenius an der einzelnen Lamelle die Lamellenzwischenkräfte parallel zur Gleitfläche wirken. Mit dieser Annahme kann aber kein globales Kräftegleichgewicht erhalten werden, da die Lamellenzwischenkräfte zweier benachbarter Lamellen notgedrungen ungleiche Wirkungslinien haben müssen. An jeder Lamelle wird der Normalkraftanteil aus der Umlenkung der Lamellenzwischenkraft vernachlässigt, was erklärt, dass Fellenius im Vergleich zu den anderen, statisch exakteren Methoden, immer eine etwas zu kleine Sicherheit ergibt.

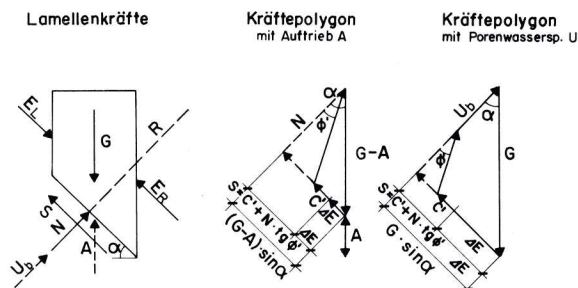
Bei Vorhandensein von Wasser, d.h. nennenswertem Auftrieb und Strömungsdruck oder Porenwasserüberdruck, ist bei der Methode Fellenius grösste Vorsicht geboten. Es kann leicht gezeigt werden, dass bei Anwendung der üblichen Berechnungsformeln (Gl. 8 oder Gl. 9) die hydrostatischen Kräfte, wegen der radialorientierten Gleichgewichtsbeziehung, unter Umständen falsch berücksichtigt werden. Dadurch kann möglicherweise ein gravierender Fehler in der Stabilitätssicherheit erhalten werden. Dieser Mangel kann, unter Berücksichtigung hydrostatischer Zusatzkräfte in der allgemeinen Berechnungsformel, behoben werden.

Dank der Einfachheit ist die Methode Fellenius sehr beliebt. Auch liegt man mit dieser Methode – mit oder ohne Wasser – meist auf der sicheren Seite. Dennoch sollte man diese Methode wegen der aufgezeigten Mängel mit Vorsicht verwenden.

b) Methode Bishop

Die Methode Bishop (1952/55) [8], ist eine Weiterentwicklung der älteren Lamellenmethode von Krey und Fellenius. Wie Fellenius benützt auch Bishop eine Kreiszylinderschale als Bruchfläche. Von Bishop kennt man zwei Verfahren, nämlich eine allgemeine und eine vereinfachte Lamellenmethoden. Bei der allgemeinen Methode können, im Gegensatz zur vereinfachten Methode (simplified Bishop), Lamellenzwischenkräfte mit beliebiger Wirkungslinie mitberücksichtigt werden. Wegen des grossen Rechenaufwandes, bei relativ geringer Resultatverbesserung ($\pm$ einige Prozente), findet die allgemeine Methode Bishop relativ selten Anwendung. Nachstehend wird nur die wesentlich gebräuchlichere "vereinfachte Methode Bishop" diskutiert.

In der Stabilitätsberechnung verwendet Bishop die materialtechnische Sicherheitsdefinition $F = \tau_{br}/\tau_{erf}$. Die Momentenbeziehung ist zur Kontrolle des globalen Gleichgewichts (generalisierte Arbeitsgleichung) erforderlich. Bei der Methode Bishop wird die Lamellenreibungskraft N über eine Gleichgewichtsbetrachtung in vertikaler Richtung formuliert. Zur Erfüllung des lokalen Kräfte-



Sicherheitsdefinition : $F = \Sigma M_R / \Sigma M_T$

lokales Gleichgewicht : $\Sigma R = 0$

globales Gleichgewicht : $\Sigma M = 0$

$$F = \frac{1}{\Sigma G \cdot \sin \alpha} \Sigma (G \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi' + C') \quad \text{ohne Wasser} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$F = \frac{1}{\Sigma (G-A) \cdot \sin \alpha} \Sigma ((G-A) \cdot \cos \alpha \tan \phi' + C') \quad \text{mit Auftrieb} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$F = \frac{1}{\Sigma G \cdot \sin \alpha} \Sigma ((G \cos \alpha - U_b) \tan \phi' + C') \quad \text{mit Porenwassersp.} \quad (\text{Gl. 9})$$

Abb. 6 Stabilitätsberechnung nach Fellenius

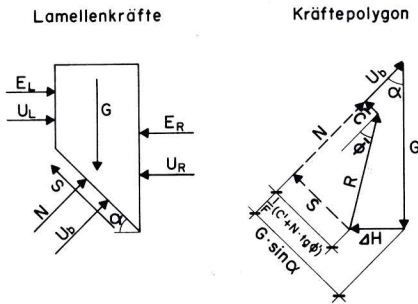
gleichgewichts müssen deshalb in horizontaler Richtung wirkende Lamellenzwischenkräfte angenommen werden. Der Einfluss des Wassers wird über Porenwasserspannungen in statisch korrekter Weise berücksichtigt. Wie schon bei der Methode Fellenius ist aber auch bei der Methode Bishop das globale Kräftegleichgewicht nicht ganz erfüllt.

Die Methode Bishop wurde für kreiszylindrische Gleitflächen entwickelt. Es lässt sich aber zeigen, dass sie in statisch vertretbarer Weise auch für beliebige Gleitflächen verwendet werden kann. Gegenüber der Methode Fellenius hat die Methode Bishop den grossen Nachteil, dass die Sicherheit nur auf iterativem Wege gefunden werden kann. Im allgemeinen genügen aber zwei bis maximal drei Iterationen zur Lösung des Problems. Im weiteren bereitet die Methode Bishop, wie in Kapitel 4 noch gezeigt wird, bei grossen negativen α -Werten (Fussbereich des Bruchkörpers) Schwierigkeiten.

Mit Ausnahme der letzterwähnten Schwierigkeit und dem Nachteil der erforderlichen Iteration ist die Methode Bishop, wie auch Vergleiche mit verfeinerten Berechnungsmethoden (Morgenstern-Price) zeigen, ein zweckmässiges Verfahren zur Ermittlung der Stabilitätssicherheit.

c) Methode Krey

Die Methode Krey (1936) ist vor allem im deutschen Sprachgebiet sehr verbreitet. Sie wird auch in der DIN-Norm 4048 als praktisch bewährte Berechnungsmethode zur Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen empfohlen. Wie Fellenius und Bishop benützt auch Krey eine kreiszylindrische Gleitfläche. Krey selbst hat keine Definition der Standsicherheit gegeben, sondern sich mit der Ermittlung des erforderlichen Reibungswinkels ϕ'_{erf} für die Standsicherheit $F = 1$ begnügt. Analog den Verfahren Fellenius und Bishop wurde die Methode Krey erweitert, um auch für den allgemeinen Fall $F \neq 1$ die Stabilitätssicherheit zu erhalten. Die Ermittlung der Reibungskraft N erfolgt, analog der Methode Bishop, über das vertikale Kräftegleichgewicht an der einzelnen Lamelle. Die Stabilitätssicherheitsbeziehung nach Krey (Gl. 12) entspricht bis auf den iterativen Term $1/F$ der Formulierung nach Bishop (Gl. 10). Entgegen dieser Methode erfordert die Stabilitätsberechnung nach Krey aber kein iteratives Vorgehen. Die Methode Krey hat den Vorteil der Methode Fellenius der direkten Stabilitätsberechnung ohne Iteration und den Vorteil der Methode Bishop der wirklichkeitsnäheren Ermittlung der Scherkräfte entlang der Gleitfläche. Daneben hat sie, wie die beiden



Sicherheitsdefinition : $F = \tau_{br} / \tau_{ert}$
 lokales Gleichgewicht : $\Sigma V = 0$
 globales Gleichgewicht : $\Sigma M = 0$

$$F = \frac{1}{\Sigma G \cdot \sin \alpha} \sum \frac{(G - U_b \cos \alpha) \cdot \tan \phi' + C' \cos \alpha}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi' \cdot \frac{1}{F})} \quad (Gl. 10)$$

$$\text{Kontrolle: } \cos \alpha + \tan \phi' \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{F} > 0,20 \quad (Gl. 11)$$

Abb. 7 Stabilitätsberechnung nach Bishop

andern erwähnten Methoden, den Nachteil, dass sie das Kräftegleichgewicht am ganzen Bruchkörper nur näherungsweise erfüllt.

Gegenüber der Methode Bishop ergibt die Methode Krey eine etwas kleinere Sicherheit (einige Prozente) für den Fall $F \gg 1$ bzw. eine etwas grössere Sicherheit für den Fall $F \leq 1$. Im interessanten Sicherheitsbereich zwischen 0.70 und 1.30 ist die Abweichung zwischen den beiden Methoden jedoch nur gering (ca. 0 - 3 %), was in vielen Fällen die Anwendung der einfacheren Methode Krey gegenüber der, mit Ausnahme der Iteration, gleich aufgebauten Methode Bishop rechtfertigt.

$$F = \frac{1}{\Sigma G \sin \alpha} \sum \frac{(G - U_b \cos \alpha) \tan \phi' + C' \cos \alpha}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi')} \quad (Gl. 12)$$

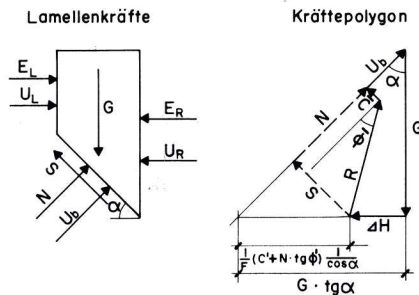
d) Janbu-Methode

Die Methode Janbu (1954) [9] ist sehr ähnlich der Methode Bishop, unterscheidet sich aber von dieser in der Wahl der Gleitfläche und der Formulierung des globalen Gleichgewichtes. Janbu hat erstmals eine Lamellenmethode für beliebige Gleitflächen entwickelt. Dabei verwendet auch Janbu analog Bishop die materialtechnische Sicherheitsdefinition (Gl. 3). Das Kräfteck der einzelnen Lamelle entspricht dabei dem Kräfteck der Methode Bishop. Das globale Gleichgewicht wird aber nicht über eine Momentengleichgewichtsbeziehung, sondern über das globale Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung ($\Sigma H = 0$) erhalten. Im Unterschied zu den vorgängig behandelten Methoden Fellenius, Bishop und Krey ist die Methode Janbu eine statisch korrekte Methode, die das lokale und globale Kräftegleichgewicht erfüllt.

Wie Bishop hat auch Janbu neben der vereinfachten auch eine allgemeine Methode entwickelt, die geneigte Lamellenzwischenkräfte mitberücksichtigt. Janbu zeigt aber, dass im Normalfall der Einfluss der vertikalen Zwischenkräfte nicht sehr bedeutend ist, womit es zulässig ist, mit der vereinfachten Methode zu rechnen. Zur Kompensation dieser Vereinfachung gibt Janbu einen von der Form der Gleitfläche und den Materialeigenschaften abhängigen, tabellierten Korrekturfaktor f_0 an. Dieser Korrekturfaktor liegt, bei üblichen Geländebruchproblemen, zwischen 1.00 und 1.10. Damit hat Janbu auch gezeigt, dass man im allgemeinen bei Vernachlässigung der Vertikalkomponenten der Lamellenzwischenkräfte im Bezug auf die rechnerische Stabilitätsicherheit auf der sicheren Seite liegt.

Die Methode Janbu hat, wie auch die Methode Bishop, den Nachteil, dass die Stabilitätsicherheit nur auf iterativem Wege gefunden werden kann. Bei grossen negativen α -Werten (Fuss-

bereich Bruchkörper) bereitet auch die Methode Janbu Schwierigkeiten, und es gilt hier die gleiche Einschränkung bezüglich α wie bereits bei der Methode Bishop dargelegt.



Sicherheitsdefinition : $F = \tau_{br} / \tau_{ert}$
 lokales Gleichgewicht : $\Sigma V = 0$
 globales Gleichgewicht : $\Sigma H = 0$

$$F = \frac{1}{\Sigma G \cdot \tan \alpha} \sum \frac{(G - U_b \cos \alpha) \cdot \tan \phi' + C' \cos \alpha}{\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi' \cdot \frac{1}{F})} \quad (Gl. 13)$$

Abb. 8 Stabilitätsberechnung nach Janbu

e) Methode Morgenstern-Price

Die Methode Morgenstern-Price (1965) [10] ist zurzeit die allgemeinste bzw. umfassendste Lamellenmethode. Es darf aber gleich vorausgesetzt werden, dass diese Methode nur noch mit dem Computer lösbar ist. Sie wird allgemein auch als exakte Lamellenmethode (accurate method of slices) bezeichnet. Diese Feststellung gilt wohl im Sinne der Statik, nicht aber im Sinne der allgemeinen Plastizitätstheorie. Man erhält damit zwar eine statisch korrekte Lösung, aber sicher nicht eine für das Problem exakte Lösung. Dies wird auch dadurch belegt, dass man nach dieser Methode für das gleiche Problem, je nach Wahl der Wirkungslinie der resultierenden Seitendruckkraft, verschiedene Resultate für die rechnerische Stabilitätsicherheit erhält, wobei in gewissen Grenzen unklar bleibt, welche Lösung nun die richtige ist.

Die Methode Morgenstern-Price gilt, wie Janbu, für beliebige Gleitflächen. Sie verwendet auch die materialtechnische Sicherheitsdefinition (Gl. 3). In Erweiterung zur Methode Janbu kontrolliert diese Methode aber nicht nur das Kräftegleichgewicht, sondern auch noch das Momentengleichgewicht an jeder einzelnen Lamelle und somit auch am ganzen Bruchkörper. Um das Problem statisch lösen zu können, ist es erforderlich, eine Annahme über die Richtung ϵ der Lamellenzwischenkräfte zu machen. Meist ist es erforderlich, den gleichen Gleitkreis mit mehreren solchen ϵ -Annahmen durchzurechnen, weil einzelne Lösungen in bezug auf die ebenfalls zum Kontrollzweck ermittelten Wirkungslinie der Seitendruckkräfte zu unrealistischen Resultaten führen (z.B. Druck resultierende fällt ausserhalb Bruchkörper).

Die Methode Morgenstern-Price kann nur noch mit dem Computer angewendet werden. Dazu ist es noch aus arbeitsökonomischen Gründen erforderlich, wegen der resultatabhängigen ϵ -Eingabe einen direkten Kontakt mit dem Computer zu haben. Wie der Vergleich aus vielen durchgerechneten Beispielen zeigt, ist jedoch der Einsatz dieser Methode im allgemeinen Fall nicht gerechtfertigt. Die berechnete Stabilitätsicherheit nach der Methode Morgenstern-Price liegt, wie durchgerechnete Beispiele zeigen [11], in der gleichen Grössenordnung ($\pm$ einige Prozente) wie die Resultate nach Bishop oder Janbu.

f) Grafische Methode

Die grafische Methode Taylor (1949), auch "modified Swedish" genannt, unterscheidet sich von den vorgängig erwähnten Metho-

den in der Technik der Stabilitätsberechnung. Im Gegensatz zu den numerischen Methoden Fellenius bis Morgenstern-Price ist die Methode Taylor ein grafisches Verfahren zur Ermittlung der Böschungsstabilität. Mit dieser Methode können Bruchmechanismen mit beliebiger Gleitfläche untersucht werden. Auch ist man in der Wahl der Wirkungslinie der Lamellenzwischenkräfte bzw. deren Neigung frei, obschon Taylor selbst für diese Kräfte die Annahme einer konstanten Neigung ϵ empfiehlt.

Die Lösung des Stabilitätsproblems erfolgt grafisch auf iterativem Wege. Für einen angenommenen Sicherheitswert F , bzw. für eine damit festgelegte zulässige Scherfestigkeit τ wird das globale Kräftepolygon unter Berücksichtigung sämtlicher inneren und äusseren Kräfte durch Zusammensetzen der Kräftepolygone aller einzelnen Lamellen konstruiert. Ist das Seilpolygon, wie das Beispiel in Abbildung 9 zeigt, nicht geschlossen, d.h. das globale Kräftegleichgewicht nicht erfüllt, wird der Sicherheitswert F geändert und ein neues Kräftepolygon konstruiert. Meist genügen zur Lösung des Problems zwei bis drei Iterationen mit verschiedenen Sicherheitswerten F .

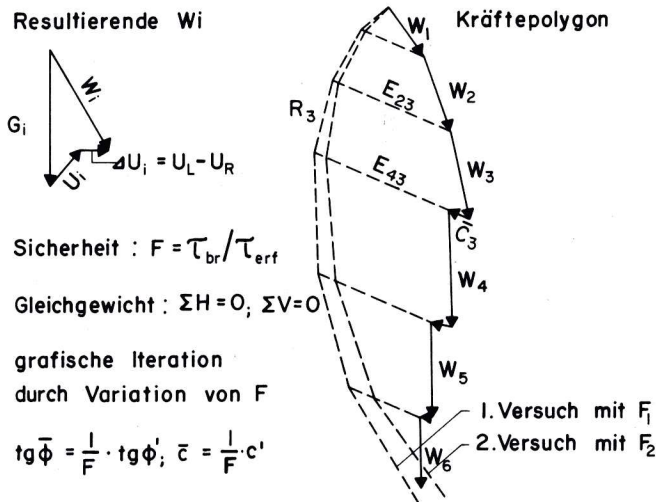
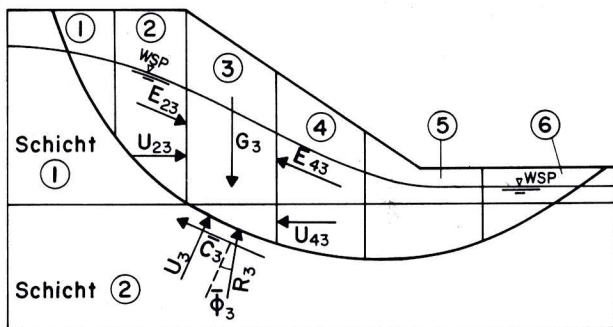


Abb. 9 Stabilitätsberechnung grafische Methode Taylor

Die grafische Methode Taylor entspricht in ihrem Inhalt eigentlich der allgemeinen Methode Janbu. Wie diese, ist auch die Methode Taylor eine statisch korrekte Methode. Sie hat zudem den unbestreitbaren Vorteil, eine sehr übersichtliche Methode zu sein. Im Zuge der numerischen und analytischen Erfassung von ingenieurtechnischen Problemen sind allgemein grafische Verfahren, wie auch hier die Methode Taylor, sehr zu unrecht in Vergessenheit geraten. Bei der grafischen Lösung kann sofort der stabilitätsmässige Einfluss jedes einzelnen Parameters mit einem Minimum an Aufwand abgeschätzt und beurteilt werden.

3.3 BLOCK-GLEIT-METHODE

Die Block-Gleit-Methode ist, ohne erklärten Grund, in der Schweiz eine recht unbekannte Methode. In den USA dagegen ist sie eine sehr verbreitete und auch beliebte Methode zur Lösung einfacher und komplizierter Stabilitätsprobleme [12], [13].

Die Block-Gleit-Methode hat in vielem Ähnlichkeit mit der grafischen Lamellenmethode nach Taylor. Der kritische Bruchbereich wird in einzelne wenige, starre Bruchkörper aufgeteilt. Für die meisten Probleme genügen zwei bis drei solcher Bruchkörper. Das Problem könnte ohne weiteres auch mit vier und mehr Bruchkörpern untersucht werden, was aber, wie die Praxis lehrt, meist wenig sinnvoll ist. Die Bruchkörper können in ihrer Geometrie frei gewählt werden. In der Praxis werden aber, wie Abbildung 10 zeigt, für die Untersuchung der Böschungsstabilität vorteilhafterweise Bruchkörpermechanismen mit vertikalen Trennflächen gewählt. Damit wäre eigentlich das Problem wieder auf die Lamellenmethode mit allerdings nun nur noch zwei bis vier Lamellen (Bruchkörpern) zurückzuführen.

Die Lösung des Stabilitätsproblems erfolgt, analog der Methode Taylor (Kapitel 3.2.f), grafisch. Durch Iteration wird, über die Bedingung des geschlossenen Kräftepolygons, der dem Problem zugeordnete Gleichgewichtszustand ($F = 1.0$) ermittelt. Im allgemeinen genügen zwei bis maximal drei Iterationen zur Lösung des Problems. Unter der Voraussetzung der Gültigkeit der Coulomb'schen Bruchbedingung (Gl. 1), und unter der Annahme der materialtechnischen Stabilitätsdefinition nach Bishop (Gl. 3) bleibt nur noch die Wahl der Neigung ϵ der Bruchkörperzwischenkräfte E als freie Grösse zur statischen Lösung des gestellten Problems offen.

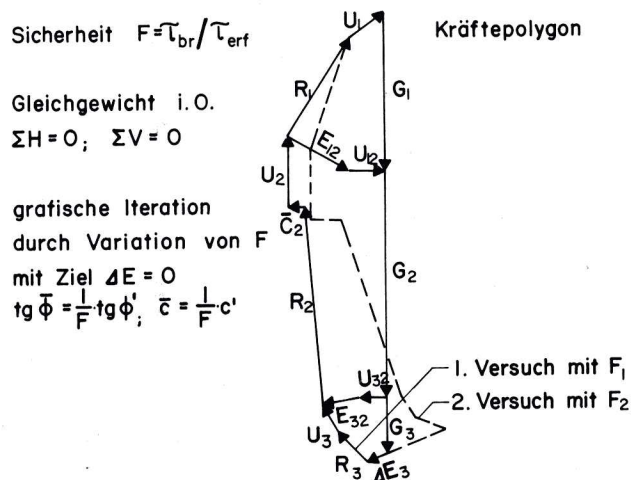
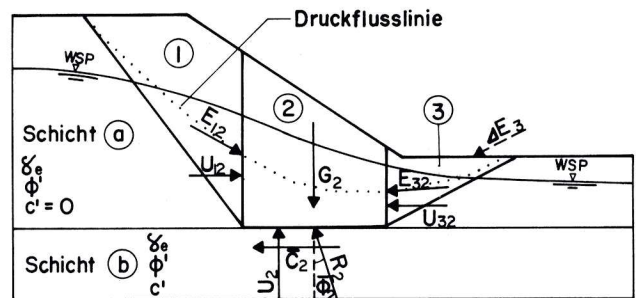


Abb. 10 Stabilitätsberechnung nach Block-Gleit-Methode

Zur Festlegung der noch freien Neigung ϵ wird am besten, auf intuitiver Basis, der Druckflussverlauf, d.h. die mutmassliche Wirkungslinie der Seitendruckkraft, skizziert. Diese muss durch den Anfangs- und Endpunkt des Bruchkörpermechanismus gehen und sollte ungefähr, entsprechend der Coulomb'schen Erddruckverteilung, im Normalfall im unteren Drittel der einzelnen Bruchkörper verlaufen.

Es ist grundsätzlich möglich, und in einzelnen Fällen auch sinnvoll, die Erkenntnis der Plastizitätstheorie auf die Block-Gleit-Methode anzuwenden. Unter Anwendung des zweiten oder kinematischen Grenzwertsatzes [14] wäre damit auch gleich die Wahl der noch freien Zwischenkraftneigung ϵ gelöst. Zur Erfüllung der kinematischen Bedingungen ist, auch in den Zwischenbruchflächen, die angenommene Coulomb'sche Bruchbedingung zu formulieren, was automatisch die Neigung ϵ der resultierenden Bruchkörperzwischenkräfte festlegt. Die Bedingung der Minimalisierung der Gesamtarbeit ($A_d + A_i = 0$) wird nach der Mechanismenmethode über die allgemeine Gleichgewichtsbedingung ($\sum X = 0, \sum Y = 0$) durch Schliessen des Kräftepolygons erfüllt. Unter Beachtung dieser Kriterien, d.h. den Bedingungen des kinematischen Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie, erhält man immer eine eindeutig qualifizierbare Lösung. Leider liegt diese Lösung immer auf der unsicheren Seite, was die Bedeutung der Anwendung der Plastizitätstheorie im Zusammenhang mit der Block-Gleit-Methode als etwas fraglich erscheinen lässt. Das erste mehr intuitive Verfahren zur Festlegung der freien Zwischenkraftneigung ϵ hat sich im allgemeinen Fall als für die Praxis wesentlich geeigneter erwiesen.

Die Block-Gleit-Methode ist eine sehr einfache Methode. Sie ist recht anschaulich und liefert, wie die Beispiele aus dem Beitrag von U. von Matt zeigen, erstaunlich gute und zuverlässige Resultate. Nach den bis heute vorliegenden Untersuchungen liegt die Genauigkeit der Lösung der Block-Gleit-Methode in der gleichen Grössenordnung wie die der klassischen Lamellenmethoden. Diese Methode hat zusätzlich zur Einfachheit den überzeugenden Vorteil, dass, wie bereits bei der Methode Taylor erwähnt, der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf die Stabilitätssicherheit ohne nennenswerten Aufwand abgeschätzt werden kann. Die Block-Gleit-Methode kann auch sehr gut zur Lösung eigentlicher Traglastprobleme herangezogen werden.

3.4 ELEKTRONISCHE RECHENPROGRAMME

Zur Lösung von Stabilitätsproblemen stehen heute elektronische Rechenprogramme zur Verfügung. Es würde allerdings zu weit führen, jedes einzelne dieser Programme beschreiben zu wollen. In diesem Zusammenhang wird auf die entsprechenden Manuals verwiesen. Nachstehend wird nur ein zusammenfassender Überblick über die Möglichkeit elektronischer Programme gegeben. Die meisten Programme basieren auf einer der vorstehend angegebenen Lamellenmethoden. Am zahlreichsten sind Programme, die nach der Methode Fellenius, Krey oder Bishop rechnen. Das erweiterte LEASE-Programm mit der Methode Morgenstern-Price wird dagegen in der Schweiz eher selten angewendet. Bei mehreren uns bekannten Rechenprogrammen (z.B. IBM-LEASE Terrexpert; STAND Dr. Otta, Stump AG; COMPUCORP Dr. Bendel; SASM Dr. Vollenweider/von Moos AG) wird die Stabilitätssicherheit gleichzeitig nach mehreren Methoden berechnet, was sich zur Kontrolle des Resultates als sehr vorteilhaft erweist.

Man darf heute feststellen, dass die meisten elektronischen Programme sehr universal aufgebaut sind. Von der Eingabe her ist man dabei, im Rahmen des Vernünftigen, praktisch an keine Limitationen gebunden. So kann ohne weiteres jede beliebige Geometrie und Schichtung durch einen im X-Y-Koordinaten-System fixierten Raster festgelegt werden. Die Zahl von Knotenpunkten ist grundsätzlich frei, meist genügen aber bereits ca. 100 Knotenpunkte, um von der geometrischen Beschreibung des Baugrundes her auch bereits sehr komplexe Probleme behandeln zu können. Die gleiche Eingabe gilt auch für die Beschreibung des Porenwasserspannungszustandes. Im Normalfall können für jedes einzelne Rasterfeld oder aber für ganze Schichtzüge die geotechnischen Eigenschaften (γ_e , ϕ' und c') eingegeben werden. Freie Wahl hat man auch in der Berücksichtigung von Erdaufasten, sei es als Einzellasten oder als gleichmässig verteilte Belastungen. Letztlich ist es auch möglich, Massenkkräfte, hervorgerufen durch seismische oder dynamische Beanspruchung, in beliebiger Richtung wirken zu lassen.

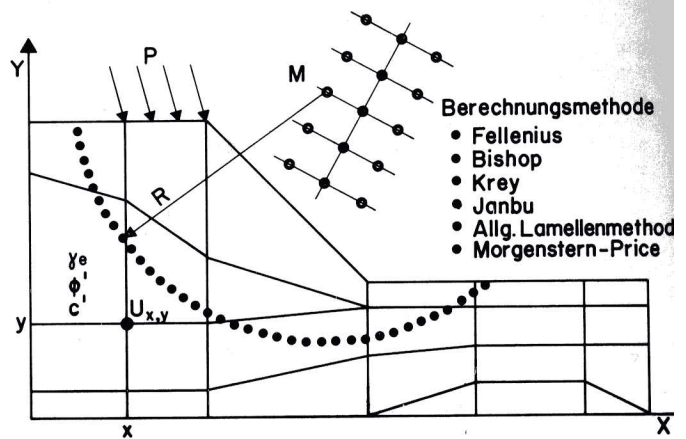


Abb. 11 Stabilitätsberechnung mit Computer-Programm

Die meisten Programme arbeiten mit Gleitkreisen. Einzelne Programme können neben Kreisen auch beliebig zusammengesetzte Gleitflächen (z.B. STAND) oder logarithmische Spiralen (z.B. SASM) berücksichtigen. Durch einen mehr oder weniger ausgeklügelten Mechanismus sind die meisten Programme in der Lage, den kritischen Gleitkreis durch eine numerische Minimalisierung selbst zu finden, wozu die automatische Durchrechnung von 10 und mehr Gleitkreisen erforderlich ist.

Gesamthaft kann man feststellen, dass die elektronischen Programme in der Lage sind, basierend auf kinematischen Berechnungsmethoden, jedes von der Praxis her noch sinnvoll formulierbare System nach den eingegebenen Gesetzmässigkeiten mathematisch-numerisch zu behandeln. Dass damit aber das Stabilitätsproblem noch lange nicht gelöst ist, zeigt das Resultat der Gruppenarbeit (Beitrag U. von Matt).

4. Allgemeine Beurteilung der Berechnungsmethoden

Heute kennen wir genügend Möglichkeiten, um das Problem der Böschungsstabilität mathematisch zu behandeln. Es gilt nun, aus dem reichen Angebot der Möglichkeiten das jeweils zweckmässigste Verfahren zu finden. Wichtig ist dabei aber nicht einmal so sehr, welche Methode gewählt wird, sondern vielmehr, dass der Ingenieur in die von ihm gewählte Berechnungsart Vertrauen hat. Dies setzt vor allem voraus, dass er die Genauigkeit und die Grenzen der gewählten Methode kennt.

4.1 GENAUIGKEIT DER BERECHNUNG

Vorher soll versucht werden, die Genauigkeit der einzelnen Berechnungsmethoden zu beurteilen. Dies ist ein recht schwieriges Unterfangen und teilweise nur rein qualitativ möglich, da man mit wenigen Ausnahmen den exakten Wert der Stabilitätssicherheit meist gar nicht kennt. Die nachfolgende qualitative Beurteilung ist deshalb mit einem grossen Vorbehalt zu interpretieren. Die Angaben über die Genauigkeit der betrachteten Methoden stützen sich zum Teil auf eigene Erfahrung, zum Teil auf die kritische Sichtung zahlreicher Literaturangaben [15], [16]. Bei der Beurteilung wird das mathematische Modell zur Beschreibung von Geometrie und Materialeigenschaften des Baugrundes als zutreffend vorausgesetzt, was in mancher Hinsicht (Materialeigenschaften, Bruchbedingung) bereits sehr fraglich ist.

Grundsätzlich ist zwischen einer theoretischen und einer praktischen Genauigkeit zu unterscheiden. Die theoretische Genauigkeit bezieht sich auf die mathematische Formulierung der gewählten Methode, die praktische Genauigkeit auf deren problembezogene Anwendung. Unter Genauigkeit wird allgemein die prozentuale Abweichung des errechneten gegenüber dem theoretisch exakten Sicherheitswert verstanden.

a) Theoretische Genauigkeit

Die theoretische Genauigkeit ist bei den meisten heute verwendeten Methoden sehr gut. Als besonders genau sind sicher die Methoden Morgenstern-Price, Janbu und Bishop zu erwähnen, weniger genau dagegen die Methode Fellenius. Die Genauigkeit nimmt allgemein mit zunehmendem Gleitflächenöffnungswinkel ab. Während bei den Methoden Morgenstern-Price, Bishop, Janbu, Taylor und der Block-Gleit-Methode die Abweichung gegenüber dem exakten Wert je nach Fall positiv oder negativ sein kann, dürfte dagegen die Methode Fellenius, bei richtiger Anwendung, immer auf der sicheren Seite liegen.

In der nachstehenden Tabelle werden vier der heute klassischen Berechnungsmethoden kurz klassifiziert. Der angegebene Genauigkeitsgrad beruht, wie bereits erwähnt, auf einer Schätzung. Wichtiger als der absolute Wert ist der relative Vergleich zwischen den einzelnen Methoden. Bezüglich Genauigkeit entsprechen die Methoden Krey und Janbu ungefähr der Methode Bishop, die grafische Methode Taylor entspricht ungefähr der Block-Gleit-Methode.

Methode	Gleitfläche	Technik	Aufwand	theoretische Genauigkeit
Fellenius	Kreis	numerisch	mittel	± 5 - 12 %
Bishop	Kreis	numerisch	gross	± 4 - 7 %
Morgenstern-Price	beliebig	Computer	sehr gross	± 2 - 5 %
Block-Gleit-Methode	beliebig	grafisch	klein	± 5 - 8 %

Tabelle 1 Qualitativer Vergleich der Berechnungsmethoden

b) Praktische Genauigkeit

Die praktisch erzielbare Genauigkeit einer Stabilitätsuntersuchung hängt vom Problem, von der Methode und vom Benutzer ab. Die praktische Genauigkeit ist immer und zum Teil wesentlich kleiner als die theoretische Genauigkeit. Selbst bei sehr sorgfältiger Untersuchung des gestellten Stabilitätsproblems ist in der Praxis, mehr oder weniger unabhängig von der gewählten Methode, mit einer Erhöhung der Ungenauigkeit um einen Faktor 1.2 bis 1.5 zu rechnen. Dieser Genauigkeitsschwund hängt mit der Diskretisierung des Problems, der Limitierung der untersuchten Gleitkreise und der Genauigkeit der Berechnung zusammen. Für den ungeübten Praktiker oder bei oberflächlicher Behandlung kann der Ungenauigkeitsfaktor ohne weiteres einen Wert von 2 und mehr erreichen. Es ist klar, dass bei Einsatz von Computerprogrammen wesentliche Fehlerquellen ausgeschlossen werden. Ebenso ist klar, dass der ungeübte Praktiker im Vergleich zum geübten mit einer wesentlich grösseren Ungenauigkeit rechnen muss. Gesamthaft könnte, immer unter Voraussetzung der Gültigkeit der problembezogenen Annahmen, die Genauigkeit der Problembehandlung näherungsweise wie in Tabelle 2 dargestellt qualifiziert werden.

Bei der angegebenen Qualifizierung wird vorausgesetzt, dass einerseits zur Minimalisierung der Sicherheit mehrere (in der Praxis minimal ca. drei bis fünf) Bruchmechanismen durchgerechnet werden, und dass bezüglich Behandlung des Wassereinflusses bzw. der Porenwasserspannungen keine gravierenden Fehler (Fellenius!) begangen werden. Treffen diese beiden Annahmen nicht zu, so sind noch höhere Ungenauigkeit in Kaufzunehmen.

Berechnungsart	Abweichung gegenüber exakter Lösung
a) Computerprogramme mit voller Iteration und Repetition (z.B. mit Krey, Bishop, Janbu)	± 5 - 10 %
b) sorgfältige Handrechnung geübter Praktiker (z.B. mit Krey, Bishop, Block-Gleit)	± 7 - 12 %
c) vereinfachte Handrechnung geübter Praktiker (z.B. Krey, Bishop, Block-Gleit)	± 10 - 15 %
d) vereinfachte Handrechnung ungeübter Praktiker (mit irgendeiner Methode)	± 15 - 25 %

Tabelle 2 Praktische Genauigkeit der Berechnungsart

Die Untersuchung zeigt, dass bei einer globalen Sicherheitsbetrachtung bereits für die mathematische Behandlung des Problems eine Partialsicherheit von minimal 1.15 gefordert werden muss. Mit der angegebenen Partialsicherheit wären aber erst die Fehlereinflüsse aus der mathematischen Behandlung, nicht aber die Fehlerquellen aus der geotechnischen Problemformulierung abgedeckt. Ueber die geotechnischen Fehlereinflüsse zu sprechen kann aber – trotz ihrer nicht minder geringen Bedeutung – nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags sein.

4.2 BESONDERE PROBLEME

Bei der Stabilitätsuntersuchung treten immer wieder Probleme auf, die zu Schwierigkeiten führen. Nachstehend werden einige der wichtigsten dieser Probleme kurz behandelt.

a) Stabilitätsberechnung

Wie bereits gezeigt, bereitet die Methode Fellenius Schwierigkeiten bei der Erfassung hydrostatischer Kräfte und Porenwasserspannungen. Von Fellenius kennt man zwei Methoden (Kapitel 3.2.a), aber keine dieser beiden Methoden ist für jedes Problem uneingeschränkt anwendbar.

$$F_1 = \frac{\sum (C' + (G-A) \cos \alpha \operatorname{tg} \Phi')}{\sum (G-A) \sin \alpha} \quad \begin{array}{l} \text{(Berechnung mit} \\ \text{Auftrieb A)} \end{array} \quad \text{(Gl. 8)}$$

$$F_2 = \frac{\sum (C' + (G \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \Phi')}{\sum G \cdot \sin \alpha} \quad \begin{array}{l} \text{(Berechnung mit} \\ \text{Porenwasserspannung} \\ \text{U)} \end{array} \quad \text{(Gl. 9)}$$

Die erste Berechnungsart (Gl. 8), welche reduzierte Raumgewichte bzw. Auftriebskräfte berücksichtigt, ist zulässig für den Fall eines ruhenden Grundwasserspiegels. Im Fall von strömendem Grundwasser ist diese Berechnung aber falsch, indem im Nenner die Strömungskraft S_w nicht mitberücksichtigt wird. Die zweite, gebräuchlichere Berechnungsart (Gl. 9), welche mit Porenwasserspannungen operiert, ist näherungsweise richtig für den Fall von reinem Porenwasserüberdruck. Im Fall von strömendem oder stehendem Grundwasser gibt sie aber ebenfalls falsche Werte, weil zur Bestimmung der Lamellenkräfte der Wasserspiegel stets parallel zur Gleitfläche angenommen wird. Bei Vorhandensein von Wasser oder Porenwasserspannungen wird, wie auch die in Abbildung 12 dargestellte Untersuchung von Bishop [18] zeigt, bei der Methode Fellenius zur Vorsicht geraten.

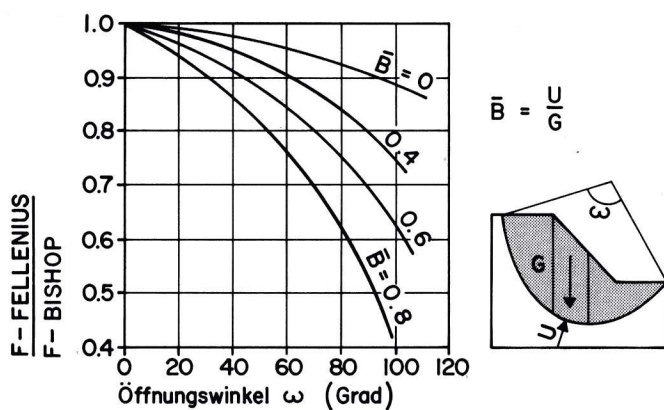
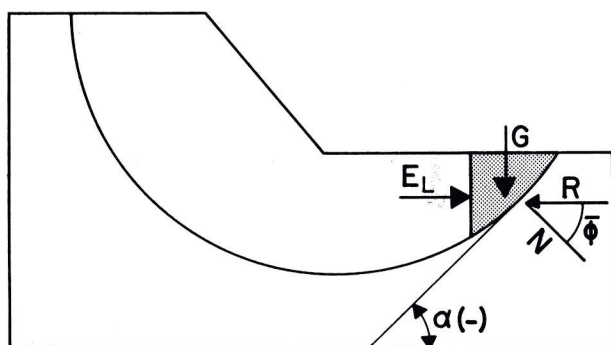


Abb. 12 Sicherheitsvergleich Fellenius-Bishop

Die Methode Bishop bereitet in speziellen Fällen ebenfalls Schwierigkeiten. Wenn die Gleitfläche im Fussbereich der Böschung (Abb. 14) einen zu grossen negativen Wert erreicht ($\tan \alpha = -F/\tan \Phi'$), nimmt die Reibungskraft N einen unendlichen Wert an und die Stabilitätsberechnung wird für diesen Fall bedeutungslos. Um dies zu verhindern, sollte bei Bishop stets die angegebene Beziehung bezüglich α kontrolliert und erfüllt sein.



Bedingung: $\cos \alpha + \frac{1}{F} \cdot \tan \phi' \cdot \sin \alpha > 0.20$

Abb. 13 Kritische Gleitflächenneigung bei Methode Bishop

Gleichgewichtsmässig bedeutet dies, dass in den kritischen Lamellen, die Lamellenzwischenkraft nicht mehr in horizontaler Richtung wirkt, sondern dass sie leicht in Richtung parallel zur Gleitfläche geneigt wird. Die gleiche Schwierigkeit kennt man auch mit den Methoden Krey, Janbu und zum Teil Morgenstern-Price.

b) Einzellasten

Schwierigkeiten bereitet auch die Stabilitätsuntersuchung bei Auftreten grosser konzentrierter Einzellasten. Die für die Untersuchung der Böschungsstabilität entwickelten Methoden sind selten besonders geeignet für die Untersuchung von Traglastproblemen, wie z.B. die Bestimmung der Bruchlast eines Fundamentes. Für dieses Problem sind, wenn immer möglich, spezielle Traglastmethoden zu verwenden. Ist gleichwohl die Geländestabilität mit Einzellasten zu untersuchen, ist zu bedenken, dass, je nach verwendeter Berechnungsmethode [17], grosse Einzellasten eine starke Verfälschung der wirklichen Stabilitätsverhältnisse zur Ursache haben können. Auf Grund eigener Untersuchungen kann jedoch festgestellt werden, dass, im Gegensatz zu den andern Verfahren, die Block-Gleit-Methode auch bei der Lösung von Traglastproblemen recht gute und zuverlässige Resultate liefert. Voraussetzung ist allerdings eine geeignete Wahl der Bruchkörperbildung unter teilweisem Verzicht auf Anordnung vertikaler Bruchkörperzwischenflächen.

c) Räumliches Problem

Die Stabilitätsuntersuchung wird in der Regel als ebenes Problem untersucht. Diese Annahme ist von der Natur her nur sehr selten erfüllt. Wie räumliche Untersuchungen [19] zeigen, ist der Fehler (auf der sicheren Seite) der ebenen Betrachtung weniger als ca. 5 % für lange, flache Rutschungen mit kleinem Rutschflächenöffnungswinkel, und zum Teil mehr als ca. 20 - 30 % für kurze, tiefe Rutschungen mit grossem Rutschflächenöffnungswinkel. Eine zumindest qualitative Berücksichtigung des räumlichen Effektes erscheint vor allem im letzteren Fall bei speziellen Problemen angezeigt.

5. Schlussfolgerung

Aus der gesamten Untersuchung können nachfolgende, für den praktisch tätigen Ingenieur als Wegleitung gedachte Schlussfolgerungen gezogen werden.

a) Grundsätzliches

Von der Stabilitätsuntersuchung wird allgemein, vor allem bei Verwendung komplizierter Berechnungsmethoden, eine allzu hohe Genauigkeit erwartet. Wie die Untersuchung zeigt, ist schon in der reinen Berechnung mit einer Fehlermarge von minimal 10 - 15 % zu rechnen. Berücksichtigt man noch die geotechnischen Unsicherheiten, so ist es sicher einleuchtend, dass in vielen Fällen der erhaltenen Stabilitätssicherheit als absolutem Wert nur eine beschränkte Bedeutung zugemessen werden darf.

Den grössten Nutzen zieht man aus einer Stabilitätsuntersuchung, wenn sie als vergleichende Berechnung zur Beurteilung der relativen Sicherheit herangezogen wird. Für den stabilitätsmässigen Vergleich von zwei verschiedenen Zuständen - z.B. vor und nach Erstellung eines Bauwerkes - hat der absolute Genauigkeitsgrad der verwendeten Berechnungsmethode nur eine untergeordnete Bedeutung.

Aus den dargelegten Gründen sollte, wenn immer möglich, eine vergleichende Stabilitätsuntersuchung ausgeführt werden. Ist dieses Vorgehen aus praktischen Erwägungen nicht möglich, sollte mindestens das Ergebnis der Stabilitätsuntersuchung nicht kritiklos als absoluter Wert betrachtet werden.

b) Handrechnung

Für einfachere Beispiele, die nicht gerade direkt mit einem Tabellenwerk gelöst werden können, empfiehlt sich in jedem Fall eine Handrechnung. Als geeignetste Methode zur Lösung beliebiger Böschungsstabilitätsprobleme wird die Block-Gleit-Methode empfohlen. Diese setzt allerdings einige Erfahrung und ein minimales Mass von bodenmechanischer Intuition voraus. Sie hat den grossen Vorteil, dass sie auf grafischem Wege sehr rasch und sehr übersichtlich das gestellte Stabilitätsproblem zu lösen vermag. Wie bei keiner andern Methode kann bereits aus dem grafischen Kräftepolygon der Einfluss aller Parameter auf das Stabilitätsergebnis qualitativ beurteilt werden. Die zur Lösung erforderliche Iteration kann mit relativ geringem Aufwand durch Neufestlegung der Schlusslinie ausgeführt werden. Änderungen der Randbedingungen können auf einfachste Art vollzogen werden. Zudem besitzt diese Methode, gemessen an der Einfachheit ihrer Anwendung, eine erstaunlich hohe Genauigkeit, die sich durchaus mit den Methoden Bishop und Janbu messen kann. Ein Beweis dafür liefern auch die drei Testbeispiele im Beitrag von U. von Matt.

Für Ingenieure, die besser gewohnt sind, numerisch zu rechnen, kann - je nach gestelltem Problem - jede der behandelten Lamellenmethoden (Fellenius, Krey, Bishop oder Janbu) empfohlen werden. Bei der Methode Fellenius ist allerdings auf die Schwierigkeiten bei Vorhandensein von Porenwasserspannungen bzw. hydrostatischen Kräften hinzuweisen.

c) Computereinsatz

Es ist interessant festzustellen, dass zur praktischen Lösung von Geländebruchproblemen der Computer bis heute weder revolutionierende Neuerungen noch nennenswerte Resultatverbesserungen gebracht hat. Hingegen erlöst der Computer den Praktiker von der manuellen Numerik und gibt ihm dadurch die Möglichkeit, sich für die kreative Problemanalyse freizuhalten. Bei komplizierten Problemen und vor allem, wenn eine grosse Zahl von Randbedingungen, durch Variation von Schichtung und Bodeneigenschaften, untersucht werden soll, ist daher der Einsatz des Computers sicher gerechtfertigt. Dabei wird dringend empfohlen, mit einem möglichst ausgereiften Programm zu rechnen. Wie die Erfahrung lehrt, braucht ein neues Computerprogramm meist längere Zeit, bis es als voll ausgereiftes Hilfsmittel bezeichnet werden kann. Heute stehen verschiedene Computerprogramme (IBM LEASE, STAND, SASM, usw.) zur Verfügung, die diese Bezeichnung sicher verdienen. Das Programm sollte mindestens nach einer der verfeinerten Methoden (Krey, Bishop, Janbu) rechnen. Der Einsatz höchst entwickelter Berechnungsmethoden, wie z.B. der Methode Morgenstern-Price, ist in der Praxis allerdings nicht erforderlich.

Der sinnvolle Einsatz des Computers setzt grosse Erfahrung und ein hohes Mass an bodenmechanischem Verständnis voraus. Der Ingenieur wird, meist schlecht vorbereitet, schlagartig mit einer wahren Flut von Informationen überschüttet. Wohl befindet sich darunter auch das gesuchte Resultat, das aber für sich allein, ohne grosse Erfahrung, kaum optimal interpretiert werden kann. Da die Problemformulierung in vielen Fällen vom erwarteten Resultat abhängig ist (iterativer Lösungsprozess), empfiehlt es sich, vor der eigentlichen Computerrechnung, mit Tabellenwerken oder durch eine einfache Handrechnung, eine grobe Problemanalyse vorzunehmen. Damit kann das spätere Computerresultat besser interpretiert und der Gesamtaufwand für die Computerrechnung reduziert werden.

Abschliessend muss noch mit aller Deutlichkeit darauf hingewiesen werden, dass der Computer ein hochentwickeltes Hilfsmittel darstellt. Der Umgang mit einem solchen Hilfsmittel setzt auch ein entsprechendes Mass an Erfahrung voraus. Es genügt sicher nicht, die eigene fehlende Erfahrung durch die Verwendung eines Computerprogrammes kompensieren zu wollen.

d) Tabellenwerke

Für einfachere Geländebruchprobleme gibt es verschiedene Tabellenwerke. Bekannt sind vor allem die Arbeiten von Terzaghi, Taylor und Janbu. Mit diesen Hilfsmitteln kann sehr rasch und auf elegante Weise, allerdings unter Annahme homogener Verhältnisse, die kritische Böschungsneigung oder auch die kritische Böschungshöhe ermittelt werden. Tabellenwerke gibt es auch für das Problem des durchströmten Erddammes und der durchströmten Böschung. Zu erwähnen ist dabei die Stabilitätsuntersuchung von Morgenstern oder Hunter.

Bei einfacheren Beispielen lohnt es sich auf jeden Fall, nach geschlossenen Lösungen in Form von Tabellen Ausschau zu halten. Diese haben den grossen Vorteil, dass sie sehr einfach sind und für das gestellte Problem meist eine zuverlässige Lösung geben.

LITERATUR

- [1] D.W. Taylor, Fundamentals of soil mechanics, J. Wiley and Sons, New York (1948)
- [2] O.K. Fröhlich, Grundzüge einer Statik der Erdböschungen, Bauingenieur 38 (1963)
- [3] N. Janbu, Stability analysis of slopes with dimensionless parameters, Harvard soil mechanics series No. 46 (1954)
- [4] N. Morgenstern, Stability charts for earth slopes during rapid drawdown, Géotechnique Vol. 13 (1963)
- [5] J.H. Hunter and R.L. Schuster, Stability of simple cuttings in normally consolidated clays, Géotechnique Vol. 18 (1968)
- [6] H.Y. Fang and T.J. Hirst, Application of plasticity theory to slope stability problems, HRR 373 (1970)
- [7] W. Fellenius, Erdstatische Berechnungen, W. Ernst und Sohn, Berlin, 1948
- [8] A.W. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Géotechnique 5 (1955)
- [9] N. Janbu, European conference on stability of earth slopes, Band 3 (1954)
- [10] N.R. Morgenstern and V.E. Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, Géotechnique Vol. 15 (1965)
- [11] R.V. Whitman and W.A. Bailey, Use of computers for slope stability analysis, Journal ASCE, Vol. 93 SM4 (1967)
- [12] J.L. Lowe, Stability analysis of embankments, Journal ASCE, SM4 Vol. 93 (1967)
- [13] H.A. Sultan and H.B. Seed, Stability of sloping core earth dams, Journal ASCE, SM4 Vol. 93 (1967)
- [14] D.C. Drucker, H.J. Greenberg and W. Prager, Extended limit design theorems for continuous media, Q.Appl. Math.9 (1952)
- [15] Stability and performance of slopes and embankments, ASCE Conference Berkley California (1969)
- [16] Erdstatische Berechnungen Mitteilungen VGB TH Aachen, Heft 10 (1970)
- [17] W.J. Turnbull and M.J. Hvorslev, Special problems in slope stability, Journal ASCE, SM4 Vol. 93 (1967)
- [18] A.W. Bishop, The use of slip circle in the stability analysis of slopes, Géotechnique Vol. 5 (1955)
- [19] M.M. Baligh and A.S. Azzouz, End effects on stability of cohesive slopes, Journal ASCE, SM Vol. 101 (1975)

TEIL B : VERGLEICHENDE STABILITÄTSBERECHNUNG

Resultat und Auswertung der Gruppenarbeit Stabilitätsberechnung

Von U. von Matt, Zürich

1. Einleitung

Im Rahmen einer Arbeitsgruppe von geotechnischen Büros wurden drei Stabilitätsprobleme von mehreren Fachleuten mit verschiedenen Berechnungsmethoden bearbeitet. Dabei wurden bei allen drei Beispielen die Geometrie und die geotechnischen und hydraulischen Daten zum vornherein festgelegt, so dass als Variable für die Bearbeitung nur noch die *Berechnungsmethode* und ihre Anwendung verblieb.

Das Ziel dieser Gruppenarbeit war, einen aktuellen Ueberblick zu erhalten über

- a) die in der Schweiz vorwiegend verwendeten Berechnungsmethoden zur Lösung von Böschungsstabilitätsproblemen,
- b) die Streuung der Resultate bei gegebenen Randbedingungen und Bearbeitung durch geübte Praktiker
 - bei Verwendung verschiedener Berechnungsmethoden,
 - bei Verwendung der gleichen Methode durch verschiedene Ingenieure (Handrechnung und/oder verschiedene Computerprogramme mit nominell gleicher Methode),
 - zwischen Handrechnung und Anwendung von Computerprogrammen.

Die durchgeführte Gruppenarbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Wissenschaftlichkeit. Wie aus dem Beitrag von Dr. U. Vollenweider hervorgeht, konnte es auch nicht darum gehen, die beste Berechnungsmethode zu finden. Die Gruppenarbeit sollte vielmehr dem mit Stabilitätsproblemen konfrontierten Ingenieur nützliche Beurteilungs- und Entscheidungshilfen liefern, z.B. bei der Anwendung von Empfehlungen eines geotechnischen Berichtes oder bei Vorliegen von Expertisen mit unterschiedlichen Resultaten, etc.

An der Lösung der Beispiele 1 und 2 beteiligten sich folgende geotechnische Büros:

Dr. H. Bendel GmbH, Luzern
Geotechnisches Institut AG, Bern
Geotest AG, Bern
Grundbauberatung AG, St. Gallen
Stump Bohr AG, Zürich
Terrexpert AG, Bern
Dr. von Moos AG, Zürich
Dr. U. Vollenweider, Zürich

Das Beispiel 3 entstammt der amerikanischen Literatur und wurde von den Büros Dr. von Moos AG und Dr. U. Vollenweider mit weiteren Berechnungsmethoden bearbeitet.

2. Beispiel 1 — Hangeinschnitt

Beispiel 1 ist ein 8 m tiefer Hangeinschnitt. Der geologische Aufbau des Hanges und die geotechnischen Eigenschaften seiner Schichten sind aus Abbildung 14 ersichtlich. Es besteht ein hochliegender Hangwasserspiegel, der durch den Einschnitt abgesenkt

wird. Im Fels erfolgt jedoch nur eine teilweise Reduktion des hydrostatischen Druckes, so dass dort mit gespanntem Wasser gerechnet werden muss. In der Abbildung sind die angenommenen Linien gleichen Wasserdruckes eingetragen.

Es wurden insgesamt 20 Berechnungen durchgeführt (Tabelle 1a). Die neun dabei bestimmten bzw. für weitere Berechnungen benutzten kritischen Gleitflächen gehen zwar alle erwartungsgemäss durch die Mergelschicht, weisen im übrigen aber doch eine enorme Streuung auf (Abbildung 14). Dasselbe gilt für die berechneten Sicherheitsfaktoren: Mit zehn verschiedenen Berechnungsmethoden ergeben sich Sicherheiten zwischen 0.70 und 1.32.

Dieses wenig ermutigende Bild erhellt sich jedoch beträchtlich, wenn wir folgendes beachten:

- 1) Fellenius 1 nimmt horizontale Wasserspiegel in den einzelnen Lamellen an, was im vorliegenden Fall offensichtlich weit von der Wirklichkeit entfernt ist. Die Berechnung mit dieser Methode wurde im vollen Bewusstsein dieser Tatsache durchgeführt, um zu illustrieren, was geschehen kann, wenn eine an sich brauchbare Methode an einem für sie absolut ungeeigneten Problem angewendet wird.
- 2) Die Methoden Fröhlich und Streck setzen homogene Baugrundverhältnisse voraus. Ihre Anwendung auf das untersuchte Problem bedingt deshalb eine Schätzung der massgebenden mittleren Bodenkennwerte. Die resultierenden Ergebnisse können somit nur als summarische Abschätzung betrachtet werden.
- 3) Fellenius 2 nimmt gleitflächenparallele Wasserspiegel in den Lamellen an, was im vorliegenden Fall vernünftig ist. Aus Gründen, die im Beitrag von Dr. U. Vollenweider dargelegt sind, liefert dieses Verfahren jedoch relativ niedrige Sicherheiten.

In der Tabelle 1c sind deshalb die Mittelwerte und die maximalen prozentualen Abweichungen zusammengestellt, die sich ergeben, wenn die vier oben erwähnten Verfahren teilweise oder ganz von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Neben der erwarteten Verringerung der Streuung der einzelnen Resultate zeigt sich eine auffallende Invariabilität der Mittelwerte. Bemerkenswert ist auch die relativ geringe Streuung der fünf sorgfältigen Handrechnungen von $\pm$ ca. 6 bis 8 %, wobei allerdings die kleinere Anzahl von Handrechnungen gegenüber den Berechnungen mit Computerprogrammen zu beachten ist.

Auch bei Ausschluss aller vier als weniger genau zu betrachtenden Verfahren verbleibt noch eine Streuung von ca. $\pm$ 10 bis 13 %.

Dazu ist zu bemerken, dass das untersuchte Problem nicht besonders geeignet ist für eine Berechnung mit kreisförmigen Gleitflächen, wie sie von der Mehrzahl der angewendeten Methoden benützt werden. Denn die relativ dünne Schwächezone (Mergelschicht) lässt eine polygonale, trapezförmige Bruchfläche erwarten. Dieser Erwartung entsprechen die Gleitflächen D, F₂ und G₂ mit ziemlich nahe beieinander liegenden Resultaten.

Hervorzuheben ist noch, dass mit der erfolgten arithmetischen Mittelwertbildung grundsätzlich nichts über die effektive Genauigkeit ausgesagt wird. Immerhin kann u.E. aufgrund der vorliegenden Ergebnisse angenommen werden, dass die vorhandene Sicherheit zwischen 0.81 und 0.92 liegen dürfte.

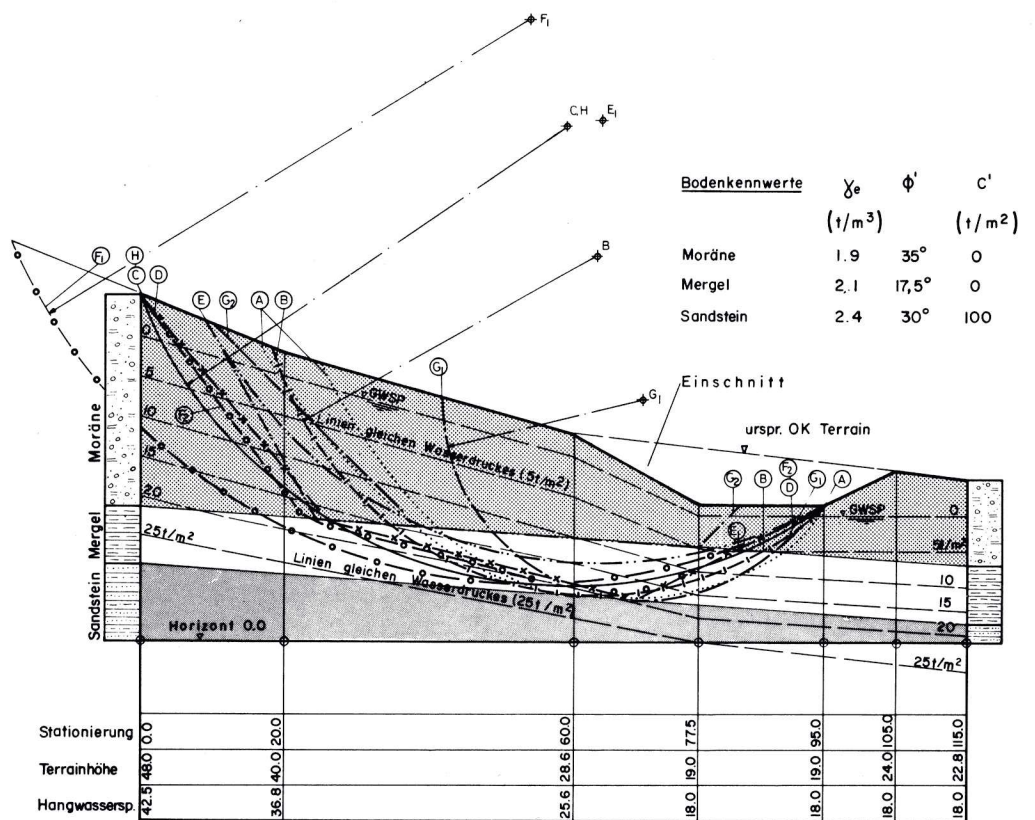


Abb. 14
Beispiel 1 Hangeinschnitt

	Büro	Methode	Mittel	F	Bemerkungen
A	Geotechnisches Institut AG	Janbu 1	Handrechnung	0.88	ohne Lamellenzwischenkräfte
		Janbu 2	"	0.93	mit Lamellenzwischenkräften (Korrekturfaktor)
B	Dr. von Moos AG	Fellenius 1	SASM-Programm (Dr. U. Vollenweider)	1.32 (!)	Wasserspiegel horizontal
		Krey		0.89	horiz. Lamellenzwischenkräfte
		allg. Bishop		0.86	geneigte Lamellenzwischenkräfte (ohne Iteration)
C	Terrexpert AG	Fellenius 2	Programm Losinger	0.83	Wasserspiegel parallel Gleitfläche
		Bishop		0.88	horiz. Lamellenzwischenkräfte
		Fellenius 2	IBM-LEASE	0.86	Wasserspiegel parallel Gleitfläche
		Bishop		0.96	horiz. Lamellenzwischenkräfte
		Janbu 2'	spez. Programm Terrexpert	0.92	mit Lamellenzwischenkräften
D	Dr. U. Vollenweider	Block-Gleit	grafisch	0.84	
E	Grundbauberatung AG	Fröhlich	Handrechnung	ca. 1	homogene Baugrundverhältnisse (summarische Untersuchung)
		Streck	"	ca. 0.7	
F	Stump Bohr AG	Krey	STAND-Programm	0.90	ohne Lamellenzwischenkräfte
		Janbu 1	" "	0.81	
G	Geotest AG	Fellenius 2	Handrechnung	0.80	Wasserspiegel geneigt
		Janbu 1	"	0.88	ohne Lamellenzwischenkräfte
H	Dr. H. Bendel GmbH ¹⁾	Fellenius 2	COMPUCORP	0.70	wirklicher Wasserspiegel berücks.
		Bishop		0.86	horiz. Lamellenzwischenkräfte
		allg. Bishop		0.76	geneigte Zwischenkräfte (Mittel zwischen Terrain- und Gleitflächeneigung)

¹⁾ Gleitfläche von Terrexpert (C) übernommen.

Tabelle 1b Beispiel 1 Hangeinschnitt Auswertung nach Methode

Methode	benützte Mittel	Sicherheitsfaktor Bereich	Sicherheitsfaktor Mittelwert aus (n) Werten	max. Abweichung, bezogen auf Mittelwert
Fellenius 1	Computer	1,32	1,32 (1)	-
Fellenius 2	Handr. + Computer	0,70 - 0,86	0,80 (4)	- 13 % / + 7 %
Simpl. Bishop	Computer	0,86 - 0,96	0,90 (3)	- 4 % / + 7 %
allg. Bishop	Computer	0,76 - 0,86	0,81 (2)	- 6 % / + 6 %
Krey	Computer	0,89 - 0,90	0,895 (2)	- 1 % / + 1 %
Janbu 1	Handr. + Computer	0,81 - 0,88	0,857 (3)	- 5 % / + 3 %
Janbu 2	Handr. + Computer	0,92 - 0,93	0,925 (2)	- 1 % / + 1 %
Streck	Handrechnung	ca. 0,7	0,7 (1)	-
Fröhlich	Handrechnung	ca. 1,0	1,0 (1)	-
Block-Gleit	grafisch	0,84	0,84 (1)	-

Tabelle 1c Beispiel 1 Hangeinschnitt Statistische Auswertung

	Sicherheitsfaktor Mittelwert aus (n) Werten	max. Abweichung, bezogen auf Mittelwert
Mittelwert alle Berechnungen	0,879 (20)	- 20 % / + 50 %
Mittelwert alle Berechnungen (ohne Fellenius 1)	0,856 (19)	- 18 % / + 17 %
Mittelwert alle Berechnungen (ohne Fell. 1, Streck + Fröhlich)	0,857 (17)	- 18 % / + 12 %
Mittelwert alle Berechnungen (ohne Fell. 1 + 2, Streck + Fröhlich)	0,875 (13)	- 13 % / + 10 %
	Comp. (8)	- 13 % / + 10 %
	Hand. (5)	- 7 % / + 6 %
Mittelwert alle elektr. Berechnungen (ohne Fellenius 1)	0,853 (12)	- 18 % / + 13 %
Mittelwert alle Handrechnungen inkl. grafisch	0,861 (7)	- 19 % / + 16 %
Mittelwert alle Handrechnungen (ohne Streck + Fröhlich)	0,866 (5)	- 8 % / + 7 %

3. Beispiel 2 — Dammverbreitung

Im Beispiel 2 wurde die Stabilität einer seitlichen Anschüttung an einen bestehenden Damm untersucht (Abbildung 15). Der Untergrund besteht aus jungen Seeablagerungen. Der Wasserspiegel liegt sehr hoch. In den tonig-siltigen Seeablagerungen (Schicht 3) entsteht durch die Schüttung ein Porenwasserüberdruck, der zu 25 % der Zusatzlast angenommen wurde.

Die bei den insgesamt 12 durchgeführten Berechnungen gefundenen sieben kritischen Gleitflächen liegen ziemlich nahe beieinander und münden mit einer Ausnahme (E) alle im Teich. Mit neun verschiedenen Berechnungsmethoden erhalten wir Sicherheiten zwischen 0,88 und 1,08 (Tabellen 2a und 2b). Die Streuung von $\pm 10\%$ ist erheblich kleiner als im Beispiel 1. Dafür gibt es zwei Gründe:

- 1) Der genaue Wert der Sicherheit liegt offensichtlich sehr nahe bei 1,0. In diesem Bereich weichen die verschiedenen Berechnungsmethoden erfahrungsgemäss am wenigsten voneinander ab.

- 2) Dieses Beispiel ist für eine Gleitkreisberechnung viel besser geeignet als das Beispiel 1, denn die wirklich auftretende Bruchfläche wird hier eher eine Kreisform aufweisen als beim Hangeinschnitt.

Die Methode Fellenius liefert erwartungsgemäss niedrige Sicherheiten. Fellenius 1 eignet sich übrigens für diesen Fall – im Gegensatz zu Beispiel 1 – gut.

Schliesst man die Ergebnisse nach Fellenius aus der Betrachtung aus, so reduziert sich die Streuung der übrigen Resultate um nahezu die Hälfte (Tabelle 2c). Die Mittelwerte aus allen elektronischen bzw. aus allen Handrechnungen ohne Fellenius liegen nur 1 % auseinander. Sieht man im weiteren vom nicht mit dem Korrekturfaktor für den Einfluss der Lamellenzwischenkräfte behafteten Wert 0,97 (Janbu 1) ab, so liegen alle acht Resultate innerhalb einer Bandbreite von $\pm 3\%$.

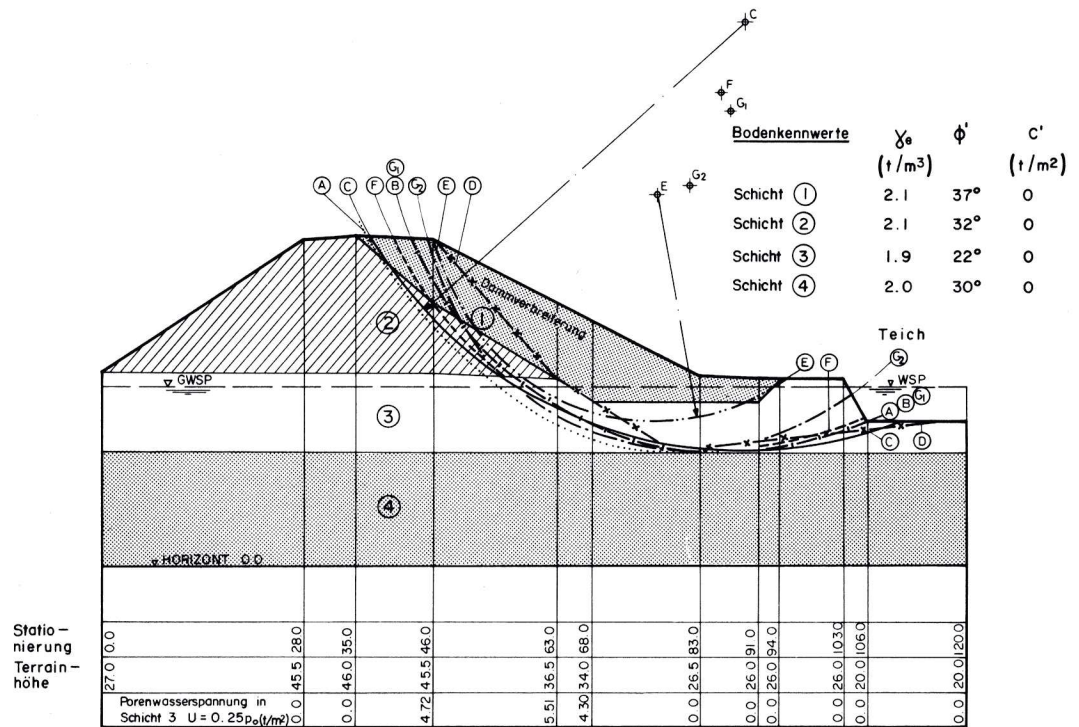


Abb. 15 Beispiel 2 Dammverbreiterung

Tabelle 2a Beispiel 2 Dammverbreiterung Auswertung nach Verfasser

	Büro	Methode	Benützte Mittel	Sicherheitsfaktor F	Bemerkungen
A	Geotechnisches Institut AG	Janbu 1	Handrechnung	0.97	ohne Lamellenzwischenkräfte
		Janbu 2	“	1.06	mit Lamellenzwischenkräften (Korrekturfaktor)
B	Dr. von Moos AG	Fellenius 1	SASM-Programm (Dr. U. Vollenweider)	0.93	Wasserspiegel horizontal
		Krey		1.08	horiz. Lamellenzwischenkräfte
		allg. Bishop (ohne Iteration)		1.08	geneigte Lamellenzwischenkräfte $\epsilon = \frac{1}{2} (\alpha + \beta)$
C	Terrexpert AG	Fellenius 2	IBM-LEASE	0.98	Wasserspiegel parallel Gleitfläche
		Bishop		1.08	horiz. Lamellenzwischenkräfte
D	Dr. U. Vollenweider	Block-Gleit	grafisch	1.07	
E	Grundbauberatung AG	Fröhlich	Handrechnung	1.08	
F	Stump Bohr AG	Bishop	STAND	1.03	
		Krey		1.02	
G	Geotest AG	Fellenius 1	Handrechnung	0.88	

Tabelle 2b Beispiel 2 Dammverbreiterung Auswertung nach Methode

Methode	benützte Mittel	Sicherheitsfaktoren	Anzahl Resultate
Fellenius 1	Hand / Computer	0.88/0.93	2
Fellenius 2	Computer	0.98	1
Simpl. Bishop	Computer	1.03/ 1.08	2
allg. Bishop	Computer	1.08	1
Krey	Computer	1.02/1.08	2
Janbu 1	Handrechnung	0.97	1
Janbu 2	Handrechnung	1.06	1
Fröhlich	Handrechnung	1.08	1
Block-Gleit	grafisch	1.07	1

Tabelle 2c Beispiel 2 Dammverbreiterung Statistische Auswertung

	Sicherheitsfaktor	Anzahl Resultate	max. Abweichung vom Mittelwert
Mittelwert alle Berechnungen	1.022	12	- 14 % / + 6 %
Mittelwert alle Berechnungen (ohne Fellenius)	1.052	9	- 8 % / + 3 %
Mittelwert alle elektronischen Berechn. (ohne Fell.)	1.057	5	- 3.5 % / + 2 %
Mittelwert alle Handrechnungen (ohne Fellenius)	1.046	4	- 7 % / + 3 %
Mittelwert alle Berechnungen (ohne Fell. + Janbu 1)	1.063	8	- 4 % / + 1.5 %

4. Beispiel 3 – Dammerhöhung

Das Beispiel 3 haben wir einem Artikel von Whitman und Bailey entnommen (Lit. 11 im Beitrag Dr. Vollenweider). Es stellt einen bestehenden Damm dar, welcher über einer ca. 4 m mächtigen Schicht von organischem Silt liegt und nun um ca. 4.5 m erhöht werden soll (Abbildung 16). Die Autoren haben die Stabilitätsicherheit an einem ganz bestimmten (übrigens nicht dem kritischen!) Gleitkreis mit drei verschiedenen Methoden, nämlich Fellenius, Simplified Bishop und Morgenstern-Price berechnet. Vom Büro Dr. von Moos AG und von unserem Büro wurde am gleichen Gleitkreis die Sicherheit nach Fellenius, Krey, allgemeiner Bishop ohne Iteration und mit der Block-Gleit-Methode bestimmt. In der Abbildung 16 sind zwei der für das letzte Verfahren gewählten Drei-Block-Gruppen dargestellt.

Whitman und Bailey wählten diesen Gleitkreis, weil er tief hinunter greift, am Fuss steil ansteigt und dort noch die Schicht mit einem hohen Reibungswinkel schneidet. Diese Konstellation führt bei Bishop und Morgenstern-Price zu den von Dr. Vollenweider beschriebenen Schwierigkeiten, weil die letzte Lamelle einen unrealistisch grossen Einfluss auf die Gesamtsicherheit ausübt. Durch eine spezielle Betrachtung an der letzten Lamelle bestimmten die Autoren zur berechneten Sicherheit nach Bishop von 0.82 einen unteren Grenzwert von 0.70. Aus der Tabelle 3 ist die grosse Streuung der Resultate (ca. $\pm 15\%$; ohne Fellenius: ca. $\pm 12\%$) ersichtlich, obschon ja alle Berechnungen am *gleichen Gleitkreis* durchgeführt wurden, und das Problem, abgesehen von der oben erwähnten Schwierigkeit, für eine Gleitkreisberechnung an sich sehr geeignet ist. Hervorzuheben ist, dass auch hier die Block-Gleit-Methode sehr gute Ergebnisse liefert.

Bodenkennwerte	γ_e (t/m ³)	ϕ'	c' (t/m ²)
Schicht ①	2.05	35°	0
Schicht ②	2.0	33°	0
Schicht ③	1.76	0°	1.465
Schicht ④	2.1	40°	0

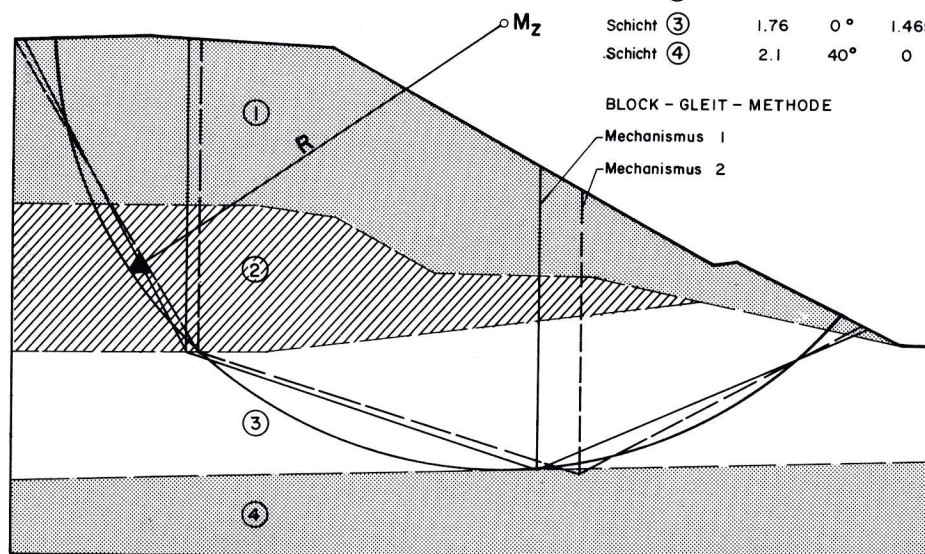


Abb. 16

Beispiel 3 Dammerhöhung

Tabelle 3 Beispiel 3 Dammerhöhung Allgemeine Auswertung

Büro	Methode	benützte Mittel	Sicherheitsfaktor
Whitman + Bailey	Fellenius	Computer	0.66
	Simpl. Bishop	"	0.70 - 0.82
	Morgenstern-Price	"	0.73 - 0.78
Dr. von Moos AG +	Fellenius	Computer	0.70
	Krey	"	0.88
Dr. U. Vollenweider	allg. Bishop (ohne It.)	"	0.75 ¹⁾ - 0.84 ²⁾
Dr., U. Vollenweider	Block-Gleit	grafisch	0.70 - 0.78

1) Seitenkräfte parallel Gleitfläche

2) Seitenkräfte parallel mittlerem Winkel zwischen Geländeoberfläche und Gleitfläche

5. Schlussfolgerung

Aus den dargestellten Vergleichsrechnungen ergeben sich folgenden Konsequenzen:

1) Je nach *Struktur* eines zu lösenden Stabilitätsproblems können bei gleichen Randbedingungen und sorgfältiger fachmännischer Bearbeitung mit verschiedenen Berechnungsmethoden Sicherheiten resultieren, die wenig (± 2 bis 5 % [Beispiel 2]) oder aber stark (± 10 bis 20 % [Beispiel 1]) streuen. In speziell empfindlichen Fällen können derart grosse Streuungen sogar auftreten, wenn mehrere Berechnungsverfahren auf den gleichen Gleitkreis angewendet werden (Beispiel 3).

2) Bei übereinstimmenden Grundlagen kann eine bestimmte Berechnungsmethode bei Anwendung von verschiedenen Programmen und/oder der Benützung durch verschiedene Personen (Eingabe, Interpretation!) in ungünstigen Fällen ± 5 % bis über 10 % streuen.

3) Die Methode Fellenius liegt bei vernünftiger Anwendung immer auf der sicheren Seite. Bei gedankenloser Anwendung kann sie jedoch, wenn Wasser im Spiel ist, extrem falsche Werte liefern (Beispiel 1).

4) Um gute Resultate zu erhalten, muss nicht unbedingt mit dem Computer gerechnet werden, wie die Ergebnisse nach Janbu und mit der Block-Gleit-Methode zeigen.

TEIL C : PRAKTISCHE ANWENDUNG UND PROBLEMATIK DER RECHENVERFAHREN

Von Hans Zeindler, Zollikofen

Sie haben im ersten Teilreferat von Herrn Dr. Vollenweider erfahren, welche Rechenverfahren für Stabilitäts-Nachweise heute zur Anwendung kommen. Soweit es sich nicht um eher überschlägige Berechnungen handelt, sind sie alle bereits ein- oder mehrfach für Computer-Einsatz programmiert worden. Wer wollte da noch mühsam "von Hand" resp. "von Kopf" rechnen.

Bereits im 2. Teilreferat hat Ihnen jedoch Herr von Matt gezeigt, dass die Handrechnung durchaus noch ihren Platz behaupten kann, und zwar sowohl bezüglich Genauigkeit als auch bezüglich Wirtschaftlichkeit.

Wir stehen daher vor der Frage, wie nun im Einzelfall die am besten geeignete Methode bzw. Kombination von Methoden bestimmt werden kann.

Sicher müssen wir uns zunächst und vor allem den grundlegenden Unterschied zwischen Mensch und Computer vergegenwärtigen:

Der Elektronen-Rechner – als Maschine – kann nur Operationen ausführen, für welche wir ihm vorher alle Elemente eingegeben haben. Er kann sogar Berechnungsgrössen selbständig variieren, falls wir ihm vorher die entsprechenden Variationsregeln vorgeschrieben haben. Er kann aber keine Entscheide treffen, welche selbständige Ueberlegungen und Intelligenz voraussetzen. Sein Hauptvorteil ist die Schnelligkeit, mit welcher er alles tut, was er kann.

Der Mensch arbeitet wesentlich langsamer. Dafür ist er in der Lage, das jeweilige Problem zu analysieren und aufgrund seiner Kenntnisse und Erfahrungen den Einfluss der verschiedenen Parameter im voraus zu gewichten. Er ist daher fähig, seine Berechnungen direkt auf kritische Kombinationen von Einflussgrössen auszurichten und dafür weniger wesentliche Gruppierungen zu vernachlässigen.

Die Speicherkapazitäten der Gross-Computer ermöglichen heute die vollautomatische Berechnung eines Problems mit Hilfe mehrerer Rechenmethoden und unter Berücksichtigung weiter Streubreiche für sämtliche Parameter. Sie faszinieren uns durch ihre Rechenvirtuosität aber oft derart, dass wir darob das jeweilige eigentliche Problem vergessen.

Dieses eigentliche Problem liegt in den Randbedingungen und Annahmen, die im Einzelfall einzuführen sind. Ich möchte hier nicht wiederholen, was in den vorausgehenden Referaten bereits für andere Problemkreise gesagt wurde, sondern nur auf einige für die Stabilitätsrechnung wesentliche Faktoren hinweisen, deren Bestimmung Sache des Geotechnikers und nicht des Computers ist:

1. Der Verlauf der Gleitfläche

Form und Lage der Gleitfläche hängen vom Aufbau des Bodens ab. Der Geotechniker hat im voraus zu überlegen, in welchen Bodenbereichen ein Scherbruch überhaupt möglich ist und welchen Verlauf der "Weg des geringsten Widerstandes" nehmen kann.

2. Kräfte zwischen den Lamellen

Die zu wählende Rechenmethode hängt u.a. von der Bedeutung der Kräfte zwischen den Lamellen ab. Falls diese vernachlässigt werden können, genügt die Methode nach Fellenius. Andernfalls sind die Methoden nach Janbu oder Bishop zu wählen. Bei einer Beschränkung auf die Horizontalkräfte genügt jeweils die vereinfachte Methode.

3. Grundwasserverhältnisse

Wasserdruck und Wasserströmung spielen für die Stabilität eine ausschlaggebende Rolle. Es ist daher zu überprüfen, ob ein allenfalls zu benutzendes Rechenprogramm die im Einzelfall wesentlichen Grundwasser-Eigenheiten auch zu berücksichtigen vermag.

In der Praxis sollte daher wie folgt vorgegangen werden: Zunächst ist abzuklären, ob das Stabilitätsproblem überhaupt eine grössere Zahl von Variablen aufweist, wozu auch verschiedene Untergrundmodelle gehören können. Wenn nicht, so kann es mit Handrechnung oder Kleincomputer gelöst werden.

Wenn ja, so soll aus den vorhandenen Programmen dasjenige ausgewählt werden, welches dem Problem am besten entspricht. Dies setzt natürlich voraus, dass der mit der Untersuchung betraute Geotechniker den methodischen Aufbau der verschiedenen Programme kennt und nicht nur deren Eingabeformulare. Er braucht diese Kenntnis ja auch zur Interpretation der vom Computer ausgedruckten Resultate.

Viele Programme suchen z.B. in einem Raster denjenigen Kreismittelpunkt, der dem kleinsten Sicherheitsgrad entspricht. Der Computer findet in der Regel ein solches Minimum. Nicht jedes Programm ist jedoch in der Lage, nach allfälligen weiteren Minima zu suchen, welche bei komplexen Problemen durchaus auftreten können.

Es ist daher erwünscht, dass der Geotechniker auch während dem Rechenablauf noch Einfluss auf die Berechnung nehmen kann.

Dies ist dann möglich, wenn er z.B. auf einem Tischcomputer in Teilschritten vorgehen kann. Statt mit einem Tischcomputer kann natürlich auch mit dem Terminal eines Gross-Computers gearbeitet werden, sofern dessen Programm entsprechend aufgebaut ist. In diesem Falle können die zusätzlichen technischen Möglichkeiten von Grossanlagen genutzt werden.

Ein anderer Weg hat sich in der Praxis vor allem bei der Ueberprüfung einer grösseren Anzahl ähnlicher Profile ebenfalls bewährt:

Ein erfahrener Geotechniker wählt die nach seiner Ansicht gefährlichsten Gleitflächen aus und überprüft ihren Sicherheitsgrad von Hand oder mit dem Tischcomputer. Er kann die kritische Gleitfläche meist mit ca. 10 Berechnungsschritten herausfinden. Zur Kontrolle wird parallel dazu ein Profil mit dem umfassenden Programm eines Grosscomputers durchgerechnet, um sicherzustellen, dass die "Intuition" des Geotechnikers richtig liegt.

Zum Schluss möchte ich zum "ceterum censeo" der ganzen Geotechnik kommen: Jede Berechnung ist bestenfalls so genau wie die Bodenparameter, welche wir ihr zugrunde legen können. Zur Wahl der geeignetsten Rechenmethode gehört daher auch die Gewissensprüfung, ob die Zuverlässigkeit der verfügbaren Baugrundkenntnisse den vorgesehenen Rechenaufwand überhaupt rechtfertigt.

Adresse der Verfasser:

Dr. U. Vollenweider, dipl. Bauing. ETH
Büro Dr. U. Vollenweider, Beratende Ingenieure ETH/SIA
Hegarstr. 22, 8032 Zürich

U. von Matt, dipl. Bauing. ETH
Büro Dr. U. Vollenweider

H. Zeindler, dipl. Bauing. ETH
Geotest AG
Birkenstr. 15
3052 Zollikofen