

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 81 (1963)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Die Stabilitätsberechnung einer Böschung mit dem Momentenplanimeter  
**Autor:** Vischer, D.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-66744>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.04.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Die Stabilitätsberechnung einer Böschung mit dem Momentenplanimeter

DK 624.137.2:531.721

Von D. Vischer, Dr.-Ing., Motor-Columbus AG, Baden

## 1. Einleitung

Für den Nachweis der Stabilität einer Böschung wird vom Bruchzustand derselben ausgegangen. Die Bruchfläche, die man als Gleitfläche bezeichnet, weist erfahrungsgemäss eine doppelt gekrümmte Form auf. Zur Vereinfachung der rechnerischen Behandlung wird das räumliche Problem jedoch auf ein ebenes reduziert, indem man nur den Böschungsquerschnitt betrachtet. Die Lage der wahrscheinlichsten Gleitfläche wird zunächst geschätzt, dann wird sie anhand benachbarter Gleitflächen beurteilt und korrigiert. Der vollständige Stabilitätsnachweis erfordert deshalb die Untersuchung mehrerer Gleitflächen.

Die bekannten Berechnungsverfahren beruhen im wesentlichen auf der numerischen Integration der Kräfte, die längs einer Gleitfläche wirken können. Für die Handrechnung sind diese Verfahren im allgemeinen zeitaufwendig, und es scheint im Zeitalter der elektronischen Rechenautomaten naheliegender, sie zu programmieren. Dabei besteht jedoch die Schwierigkeit der Digitalisierung, das heisst, der Umsetzung des Böschungsquerschnittes und der Gleitfläche in Ziffernform auf Lochkarten usw., wodurch die Uebersicht verloren geht und zusätzliche Fehlerquellen entstehen. Nachstehend wird deshalb auf ein anderes leistungsfähiges Hilfsmittel hingewiesen, bei dem diese Schwierigkeit wegfällt und die Kontinuität des Arbeitsganges auf dem Zeichentisch vom Entwurf bis zum Resultat gewahrt bleibt. Es handelt sich um das sogenannte Momentenplanimeter, dessen Grundidee schon seit 1854 bekannt ist [1]<sup>1)</sup> und das seither in stets verbesserter Ausführung von verschiedenen Firmen hergestellt wird. Dieses einfache mathematische Instrument erlaubt es, den Stabilitätsnachweis einer Böschung auf eine Planimetrierung zurückzuführen und damit erheblich Zeit zu sparen. Wir entwickeln die entsprechenden Grundlagen ausgehend von den Arbeiten von Bishop und von Fellenius [2,4].

## 2. Die Stabilitätsberechnung nach Bishop

Obschon die Stabilitätsberechnung nach Bishop [2] als hinreichend bekannt vorausgesetzt werden darf, soll sie hier kurz als Ausgangspunkt für die weiteren Ausführungen skizziert werden (vgl. auch [3]).

Durch die zu untersuchende Böschung wird eine kreisförmige Gleitfläche gelegt (Bild 1). Radius und Mittelpunkt werden dabei so angenommen, dass sie möglichst der wahrscheinlichsten Lage entsprechen. Für den Stabilitätsnachweis wird das entstandene Böschungssegment durch vertikale Schnitte in eine beliebige Anzahl  $n$  Lamellen der Breite  $b$  und der Tiefe  $l$  eingeteilt. An diesen Lamellen wirken neben dem Gewicht  $G_i$  die horizontalen Erddrücke  $E_i, E_{i+1}$ , die vertikalen Scherkräfte  $X_i, X_{i+1}$  und die Scherkräfte in der Gleitfläche  $S_i$ . Durch Aufsummierung dieser Kräfte erhält man die Beanspruchung des ganzen Segmentes. Die Böschung ist standsicher, solange jene Kräfte, die ein Gleiten verursachen, kleiner sind als jene, die dem Gleiten widerstehen. Als Sicherheitsfaktor  $F$  wird das Verhältnis des Momentes  $M_w$  der widerstehenden Kräfte zum Moment  $M_t$  der treibenden Kräfte in bezug auf den Kreismittelpunkt bezeichnet.

$$F = \frac{M_w}{M_t} \text{ mit}$$

$$(1) \quad M_w = R \sum_{i=1}^n \left\{ c_i' l_i + \operatorname{tg} \Phi_i' (G_i \cos \alpha_i - u_i l_i) + \right.$$

$$\left. + \operatorname{tg} \Phi_i' \left[ (X_i - X_{i+1}) \cos \alpha_i - (E_i - E_{i+1}) \sin \alpha_i \right] \right\}$$

oder durch Elimination von  $(E_i - E_{i+1})$  mittels einer horizontalen Komponentenbedingung und unter Vernachlässigung der  $X_i$ -Kräfte

$$(2a) \quad M_w = R \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ c_i' b_i + \operatorname{tg} \Phi_i' (G_i - u_i b_i) \right] \times \frac{1}{\cos \alpha_i} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{F} \operatorname{tg} \Phi_i' \operatorname{tg} \alpha_i} \right.$$

und

$$(2b) \quad M_t = \sum_{i=1}^n (G_i x_i)$$

Die Grössen  $c_i'$ ,  $\Phi_i'$  und  $u_i$  charakterisieren das Erdmaterial und bedeuten die Kohäsion, den innern Reibungswinkel und den Porenwasserdruck in der Gleitfläche.

## 3. Die Stabilitätsberechnung nach Fellenius

Die Stabilitätsberechnung nach Fellenius [4] kann — auch wenn sie wesentlich älter ist — als Spezialfall derjenigen nach Bishop aufgefasst werden. Sie erfolgt prinzipiell gleich, vernachlässigt aber in der Grundgleichung (1) für  $M_w$  neben den  $X_i$ - auch die  $E_i$ -Kräfte.

$$\bar{F} = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_t}$$

mit

$$(3) \quad \bar{M}_w = R \sum_{i=1}^n \left[ c_i l_i + \operatorname{tg} \Phi_i' (G_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \right]$$

und

$\bar{M}_t$  wie nach Bishop.

## 4. Hinweis auf graphische Lösungen

Die von Bishop gewählte Schreibweise für die Gleichung (2) ist einer bestimmten numerischen Lösungsmethode angepasst. Unter der Annahme unendlich vieler Lamellen von der Breite  $b_i = dx$  (d. h.  $l_i = ds$ ) kann man die Summen durch Integralzeichen ersetzen und damit die Schreibweise ändern. Innerhalb des betrachteten Bereiches werden zunächst die Bodenkennziffern  $c'$ ,  $\operatorname{tg} \Phi'$  und das spezifische Gewicht  $\gamma$  als konstant vorausgesetzt.

$$(4a) \quad M_w = R \left( c' \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F} \sin \alpha} dx + \right. \\ \left. + \gamma \operatorname{tg} \Phi' \int_{P_1}^{P_2} \frac{h}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F} \sin \alpha} dx - \right. \\ \left. - \operatorname{tg} \Phi' \int_{P_1}^{P_2} \frac{u}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F} \sin \alpha} dx \right)$$

$$(4b) \quad M_t = R \gamma \int_{P_1}^{P_2} h \sin \alpha dx$$

<sup>1)</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf den Literaturnachweis am Schluss des Aufsatzes.

und entsprechend für die Gleichung (3) nach Fellenius

$$(5) \quad \bar{M}_w = R \left( c' \int_{P_1}^{P_2} ds + \gamma \operatorname{tg} \phi' \int_{P_1}^{P_2} h \cos \alpha dx - \operatorname{tg} \phi' \int_{P_1}^{P_2} \frac{u}{\cos \alpha} dx \right)$$

Der einfache Aufbau der Formeln (4b) und (5) wurde von May [5] für die Entwicklung einer leistungsfähigen und übersichtlichen graphischen Lösungsmethode verwendet. May zerlegt die Höhe  $h$  gemäss Bild 1 in die Komponenten  $h \sin \alpha$  und  $h \cos \alpha$  und trägt diese über  $x$  auf. Die Planimetrierung der entstandenen Flächen liefert ihm die Integrale

$$\int_{P_1}^{P_2} h \sin \alpha dx \quad \text{und} \quad \int_{P_1}^{P_2} h \cos \alpha dx$$

Aehnlich verfährt er mit dem Anteil des Porenwasserdruckes

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{u}{\cos \alpha} dx \quad (\text{vgl. auch SBZ 1959, S. 675$$

[6]). Der Ausdruck

$$\int_{P_1}^{P_2} ds \quad \text{entspricht trivialerweise der Bogenlänge des Segmentes. Eine einfache lineare Kombination der erhaltenen Werte liefert$$

schliesslich den Sicherheitsfaktor  $\bar{F}$  nach Fellenius.

Wie die Formel (4a) zeigt, sind die Verhältnisse zur Berechnung des Sicherheitsfaktors  $F$  nach Bishop weniger einfach. Der Versuch von Arnold [7], das Problem mit einigen Kunstgriffen auf das Verfahren von May zurückzuführen, überzeugt nicht voll. Es scheint, dass hier ein anderer Weg eingeschlagen werden muss.

### 5. Umformung der Gleichungen

Bei den Integralen der Gleichungen (4) und (5) handelt es sich mit Ausnahme von

$$\int_{P_1}^{P_2} ds \quad \text{durchwegs um Ausdrücke von der$$

$$\text{Form } I = \int_{P_1}^{P_2} h f(x) dx$$

Mit der Substitution

$$dz = f(x) dx, \quad z = \int f(x) dx$$

und unter Berücksichtigung, dass es sich um Integrale über eine geschlossene Fläche handelt, erhält man

$$I = \int_{P_1}^{P_2} h dz = \int_A y dz = \int_A z dy$$

Die  $z$ -Funktionen lauten mit  $x = R \sin \alpha$  nacheinander

$$z = \int \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{\operatorname{tg} \phi' x}{R}}} \frac{dx}{R}$$

$$z' = \int \frac{x}{R} \frac{dx}{R}$$

$$z'' = \int \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \frac{dx}{R}$$

$$z''' = \int \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \frac{dx}{R}$$

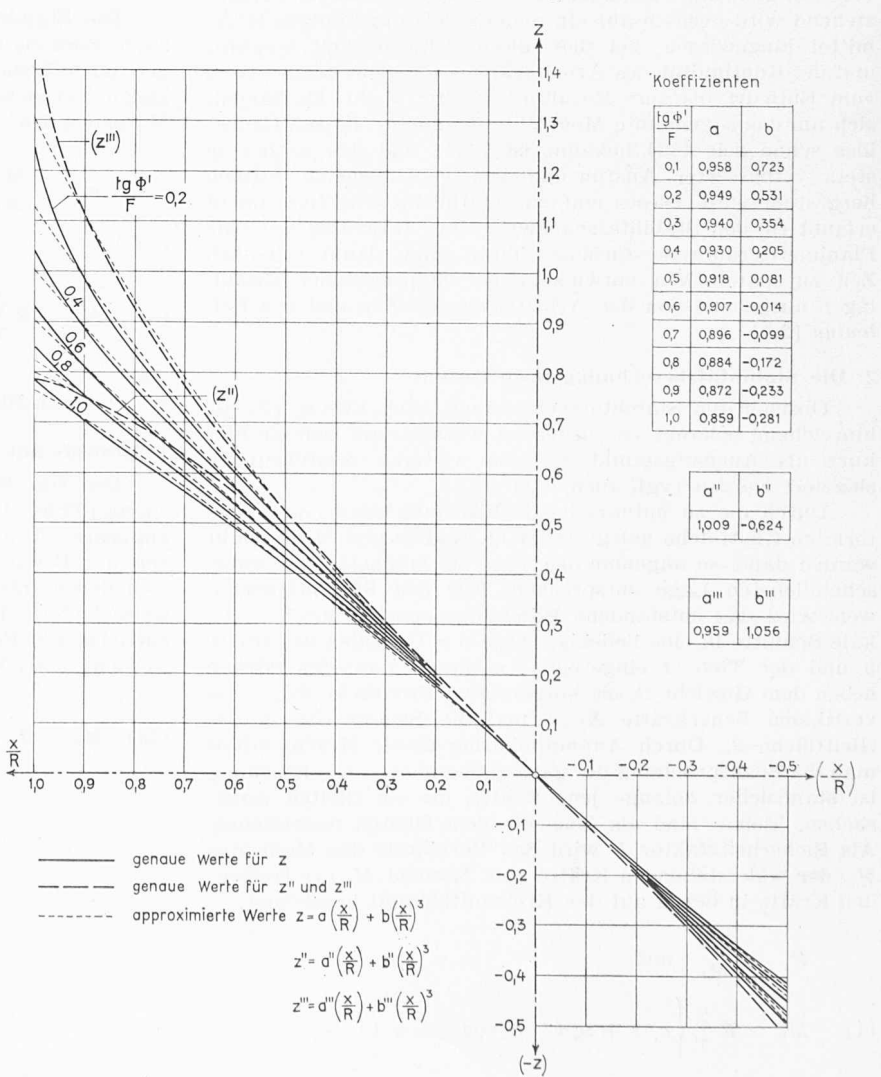
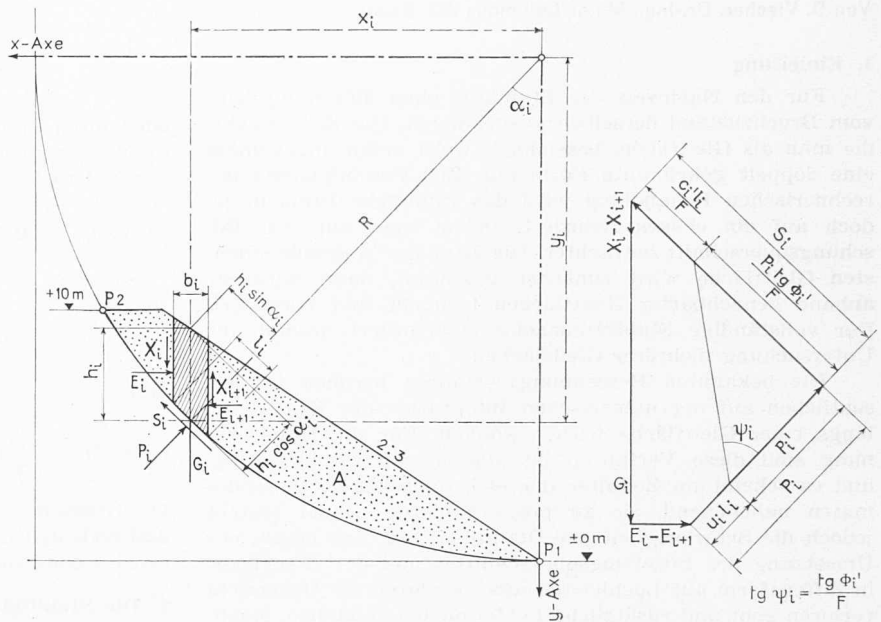


Bild 1. Oben Böschungssegment mit herausgegriffener Lamelle und dazugehörigem Krafteck. Unten charakteristische Leitkurven ( $z$ -Funktionen)

Es ist möglich, diese Integrale direkt zu lösen. Mit Ausnahme von  $z'$  erhält man aber Ausdrücke, die sich für die Weiterbehandlung nicht eignen.

$$z' = \frac{x^2}{2R^2}$$

Die andern  $z$ -Funktionen werden deshalb durch eine kubische Parabel von der Art

$$z = a \left( \frac{x}{R} \right) + \frac{b}{3} \left( \frac{x}{R} \right)^3$$

approximiert. Aus Bild 1 ist ersichtlich, dass diese Approximation innerhalb des für Gleitkreise wichtigen Bereiches

$0,95 > \frac{x}{R} > -0,95$  gut gelingt. Der Approximationsfehler

liegt in der Grössenordnung von  $\pm 2\%$  des  $z$ -Wertes für

$\frac{x}{R} = \pm 0,5$ . Damit vereinfachen sich die Ausdrücke für  $I$

auf

$$I = \int_A z \, dy = a \int_A \frac{x}{R} \, dy + \frac{b}{3} \int_A \frac{x^3}{R^3} \, dy = \frac{a}{R} A + \frac{b}{R^3} J$$

$$I' = \int_A z' \, dy = \frac{1}{2} \int_A \frac{x^2}{R^2} \, dy = \frac{1}{R^2} M$$

$$I'' = \int_A z'' \, dy = (\text{analog zu } I) = \frac{a''}{R} A + \frac{b''}{R^3} J$$

$$I''' = \int_{A_u} z''' \, dy = (\text{analog zu } I) = \frac{a'''}{R} A_u + \frac{b'''}{R^3} J_u$$

$A$  stellt die betrachtete Segmentfläche,  $M$  das statische Moment und  $J$  das Trägheitsmoment desselben in bezug auf die  $y$ -Axe dar.  $A_u$  und  $J_u$  beziehen sich in analoger Weise auf die Segmentfläche, die entsteht, wenn man den Porenwasserdruck  $u$  als Druckhöhe  $h_u = u/\gamma$  über der Gleitfläche aufträgt. Die Berechnung der Gleichungen (4) und (5) ist folglich auf die Bestimmung von Flächen und Flächenmomenten zurückgeführt.

## 6. Zusammenstellung und Diskussion der Formeln

### a) Stabilitätsberechnung nach Bishop

|                   |                               |   |       |
|-------------------|-------------------------------|---|-------|
| (6) {             | Widerstehendes Moment         | $P_2$   |       |
|                   | Anteil der Kohäsion           | $K = c' R^2 z$  | $P_1$ |
|                   | Anteil der Normalkräfte       | $N = \gamma \operatorname{tg} \Phi' R \left( aA + b \frac{J}{R^2} \right)$        |       |
|                   | Anteil des Porenwasserdruckes | $U = -\gamma_w \operatorname{tg} \Phi' R \left( aA_u + b \frac{J_u}{R^2} \right)$ |       |
|                   | Treibendes Moment             | $M_t = \gamma M$  |       |
| Sicherheitsfaktor | $F = \frac{K + N + U}{M_t}$   |   |       |

### b) Stabilitätsberechnung nach Fellenius

|                   |   |  |       |
|-------------------|---|--|-------|
| (7) {             | Widerstehendes Moment                               | $P_2$  |       |
|                   | Anteil der Kohäsion                                 | $\bar{K} = c' R s$   | $P_1$ |
|                   | Anteil der Normalkräfte                             | $\bar{N} = \gamma \operatorname{tg} \Phi' R \left( a'' A + b'' \frac{J}{R^2} \right)$          |       |
|                   | Anteil des Porenwasserdruckes                       | $\bar{U} = -\gamma_w \operatorname{tg} \Phi' R \left( a''' A_u + b''' \frac{J_u}{R^2} \right)$ |       |
|                   | Treibendes Moment                                   | $M_t = \gamma M$   |       |
| Sicherheitsfaktor | $\bar{F} = \frac{\bar{K} + \bar{N} + \bar{U}}{M_t}$ |  |       |

## c) Bezeichnungen

**Bodenkennziffern** (nach Comptes rendus du 5<sup>e</sup> Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, 1961):

- $\gamma$  = Feuchtraumgewicht
- $\gamma'$  = Raumgewicht bei Sättigung
- $\Phi'$  = effektiver Reibungswinkel
- $c'$  = effektive Kohäsion
- $\gamma_w$  = Raumgewicht des Wassers

## Dimensionen:

- $R$  = Gleitkreisradius
- $s$  = Bogenlänge des Böschungssegmentes
- $A$  = Fläche des Böschungssegmentes
- $M$  = Statisches Moment von  $A$  bezüglich der Vertikalen durch das Gleitkreiszentrum
- $J$  = Trägheitsmoment von  $A$  bezüglich der Vertikalen durch das Gleitkreiszentrum

## Hilfsgrössen:

- $z$  = Leitfunktion gemäss Bild 1
- $a, b$  = Koeffizienten gemäss Bild 1

## d) Diskussion

Interessant ist das Ergebnis für das treibende Moment, indem dieses dem einfachen Moment der betrachteten Segmentfläche in bezug auf die  $y$ -Axe proportional ist. Dabei handelt es sich nicht um eine Approximation, sondern um eine exakte Beziehung.

Das Ergebnis für das widerstehende Moment fusst dagegen, mit Ausnahme des Anteiles der Kohäsion, auf einer Approximation. Diese führt für die Stabilitätsberechnung nach Bishop und für diejenige nach Fellenius zu formal gleichen Ausdrücken. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren spiegelt sich in den numerischen Werten der Koeffizienten  $a, b$  bzw.  $a'', b''$  und  $a''', b'''$  wieder. Ein Vergleich

der  $z$ -Funktionen in Bild 1 zeigt, dass für den Fall  $\frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F} \cong 0,6$

der Anteil der Normalkräfte bei beiden Verfahren ungefähr gleich in Rechnung gestellt wird. Die Differenz beim Anteil aus dem Porenwasserdruck liegt aber in der Grössenordnung

von mehreren Prozenten. Für den Fall  $\frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F} < 0,2$  dagegen

stimmt der Anteil aus dem Porenwasserdruck annähernd überein, während der Anteil aus den Normalkräften ungleich wird. Der Unterschied zwischen dem Sicherheitskoeffizienten nach Bishop und demjenigen nach Fellenius kann deshalb nicht mit einem allgemeingültigen Prozentsatz gekennzeichnet werden, wie dies oft getan wird, sondern hängt wesentlich vom Parameter  $\frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F}$  und vom gegenseitigen Verhältnis der verschiedenen Anteile (Kohäsion, Porenwasserdruck!) ab.

sentlich vom Parameter  $\frac{\operatorname{tg} \Phi'}{F}$  und vom gegenseitigen Verhältnis der verschiedenen Anteile (Kohäsion, Porenwasserdruck!) ab.

hältnis der verschiedenen Anteile (Kohäsion, Porenwasserdruck!) ab.

## 7. Das Momentenplanimeter

Die Ermittlung der Fläche, des einfachen Momentes und des Trägheitsmomentes für das betrachtete Segment wäre relativ umständlich, wenn nicht im Momentenplanimeter (auch Integrator genannt) ein Gerät zur Verfügung stünde, das die drei Werte bei einmaliger Umfahrung liefert. Dieses Gerät stellt im wesentlichen eine Weiterentwicklung des normalen Planimeters dar (Bild 2): Es besitzt wie jenes einen Fahrarm, der mit einem Integrierwerk gekuppelt ist. Ergänzend weist es aber noch zwei weitere Integrierwerke auf, die über Zahnräder gesteuert werden. Das Ganze ist an einem Wagen befestigt, der auf einer Führungsschiene läuft.

In bezug auf die Theorie des Momentenplanimeters muss auf die Literatur verwiesen werden [8]. Aus seinem Anwendungsbereich soll hier einzig der Schiffsbau erwähnt werden, weil es dort ebenfalls um eine Stabilitätsberechnung geht, bei welcher Gewicht und Auftrieb eine Rolle spielen.

Die Aufstellung und Bedienung des Gerätes ist einfach und kann gegebenenfalls einer Hilfskraft überlassen werden.

Der Zeitaufwand für die Ermittlung eines Sicherheitsfaktors auf Grund der Formeln (6) und (7) wird damit wesentlich kleiner, als unter Verwendung eines der üblichen manuellen Verfahren.

### 8. Beispiele

#### a) Einfacher Dammquerschnitt

Als einfaches Beispiel wird das in Bild 1 dargestellte Böschungssegment untersucht. Das Material sei annähernd homogen und besitze folgende Kennziffern:  $c' = 0$ ,  $\text{tg}\phi' = 0,75$ ,

$$\gamma = 1,9 \text{ t/m}^3, \quad h_u = r_u \frac{\gamma_w}{\gamma} h = 0,285 h^2, \quad (r_u = 0,15).$$

Die einmalige Umfahrung mit dem Momentenplanimeter liefert bei  $R = 20 \text{ m}$   $A = 47,9 \text{ m}^2$ ,  $M = 456 \text{ m}^3$ ,  $J = 5150 \text{ m}^4$ .

Wegen der einfachen Definition für den Porenwasserdruck wird  $A_u = 0,285 A = 13,6 \text{ m}^2$  und  $J_u = 0,285 J = 1468 \text{ m}^4$ .

Aus den Formeln (6) folgt für einen auf 0,6 geschätzten  $\frac{\text{tg}\phi'}{F}$ -Wert

$$N = 1,9 \cdot 0,75 \cdot 20 (0,907 \cdot 47,9 - 0,014 \frac{5150}{400}) = 1233 \text{ mt/m}$$

$$U = -1,0 \cdot 0,75 \cdot 20 (0,907 \cdot 13,6 - 0,014 \frac{1468}{400}) = -184 \text{ mt/m}$$

$$M_t = 1,9 \cdot 456 = 866 \text{ mt/m}$$

$$F = \frac{1233 - 184}{866} = 1,21.$$

Der erreichte Parameter  $\frac{\text{tg}\phi'}{F} = 0,62$  zeigt, dass die vorgängige Schätzung richtig war. Aus den Formeln (7) folgt weiter

$$\bar{N} = 1,9 \cdot 0,75 \cdot 20 (1,009 \cdot 47,9 - 0,624 \frac{5150}{400}) = 1148 \text{ mt/m}$$

$$\bar{U} = -1,0 \cdot 0,75 \cdot 20 (0,959 \cdot 13,6 + 1,056 \frac{1468}{400}) = -254 \text{ mt/m}$$

$$\bar{F} = \frac{1148 - 254}{866} = 1,03.$$

2) Eine solche vereinfachende Voraussetzung wird für den Porenwasserdruck oft getroffen (vgl. [9]). Für die Stabilitätsberechnung nach Bishop kann dann der Anteil der Normalkräfte und des Porenwasserdruckes gemäss (6) zusammengezogen werden auf  $(N + U) =$

$$= \gamma \text{tg}\phi' R (1 - r_u) (aA + b \frac{J}{R^2})$$

Wegen der Gegenüberstellung zum Verfahren von Fellenius wird hier davon abgesehen.

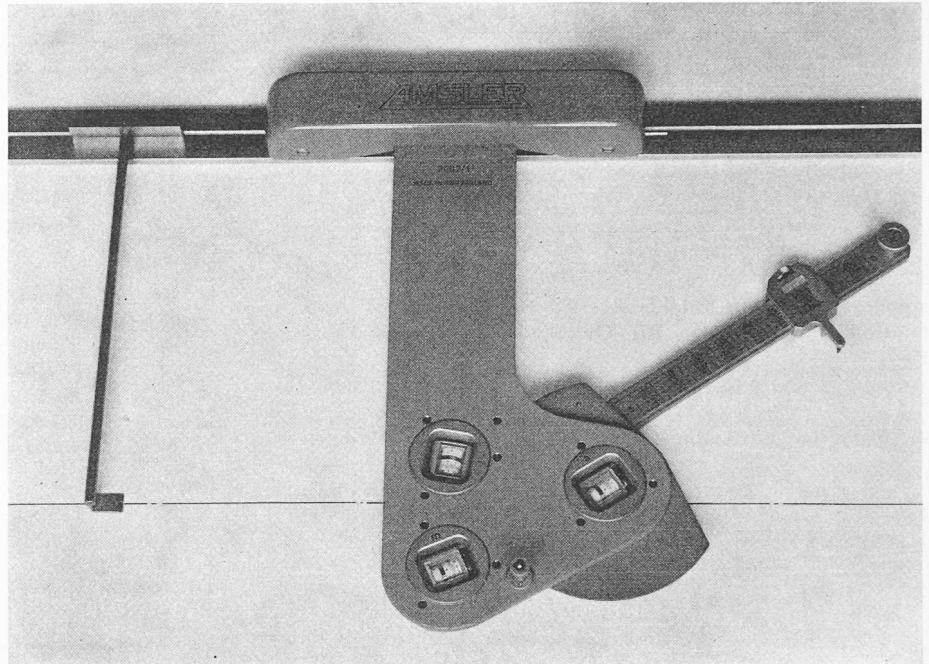
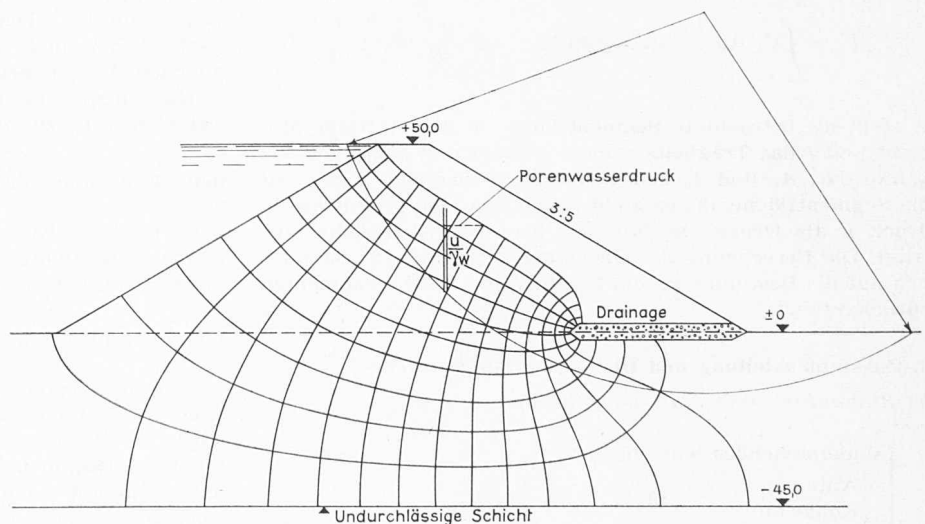


Bild 2. Momentenplanimeter (Photo Amsler, Schaffhausen)



Dammmaterial:  $\gamma = 2,35 \text{ t/m}^3$  (feucht)  
 $\gamma' = 2,50 \text{ t/m}^3$  (gesättigt)  
 $\text{tg}\phi' = 0,80$

Untergrund:  $\gamma = 2,25 \text{ t/m}^3$  (gesättigt)  
 $\text{tg}\phi' = 0,6$   
 $c' = 1,5 \text{ t/m}^2$

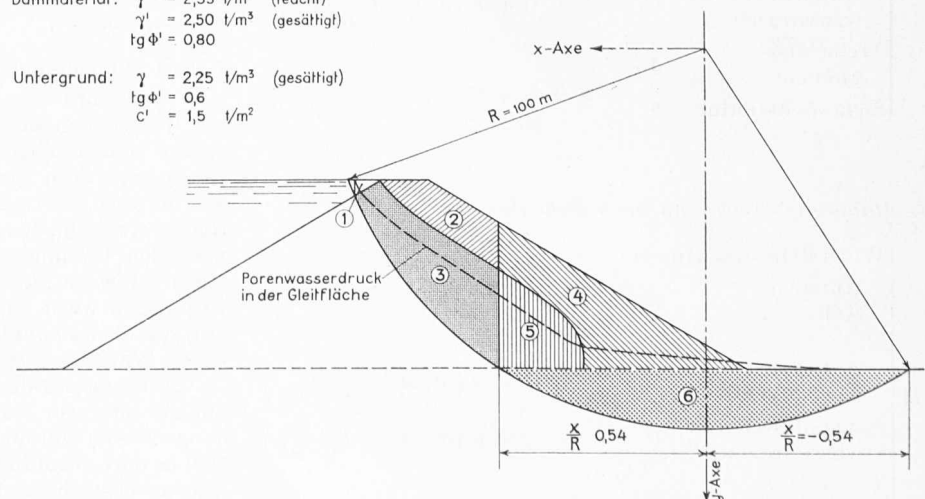


Bild 3. Oben Erddamm mit Sickerströmungsnetz. Unten Beispiel eines Gleitkreises mit Aufteilung des Segmentes in die verschiedenen zu behandelnden Zonen

b) Zusammengesetzter Dammquerschnitt

Das in Bild 3 betrachtete Böschungssegment muss für die Berechnung entsprechend den verschiedenen Bodenkennziffern in sechs Zonen aufgeteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass sich der innere Reibungswinkel auf die Gleitfläche bezieht.

Im Unterschied zum vorangehenden Beispiel wird der Porenwasserdruck nicht als fester Prozentsatz der Erdlast angenommen, sondern aus dem Strömungsnetz bestimmt und vertikal über dem Gleitkreis aufgetragen. Das auf diese Weise entstandene Segment zerfällt in einen Teil, der mit  $\text{tg } \phi' = 0,8$  und in einen solchen, der mit  $\text{tg } \phi' = 0,6$  in die Berechnung eingeht.

Die Berücksichtigung der Kohäsion im Untergrund geschieht bei der Methode nach Bishop wie folgt: Die Gleitfläche durchschneidet den Untergrund im Bereich

$$-0,54 < \frac{x}{R} < 0,54$$

Die entsprechenden Grenzen der  $z$ -Funktion für  $\frac{\text{tg } \phi'}{F} = 0,43$  sind gemäss Bild 1  $-0,53$  und

$0,53$  und ergeben eine Differenz von  $1,06$ . Nach den Gleichungen (6) ist der Anteil der Kohäsion direkt proportional zu dieser Differenz. Anstatt aus Bild 1 kann die  $z$ -Funktion auch aus der Approximationsparabel ermittelt werden. Mit

$$a = 0,926, b = 0,168 \text{ und } \frac{x}{R} = \pm 0,54 \text{ wird}$$

$$z = \pm (0,926 \cdot 0,54 + 0,168 \cdot 0,54^3) = \pm 0,53$$

Die vollständige Stabilitätsberechnung ist in Bild 4 tabellarisch zusammengestellt und ergibt  $F = 1,42$  und  $\bar{F} = 1,14$ .

Stabilitätsberechnung nach Bishop  
 $R=100 \text{ m}, R^2=10000 \text{ m}^2, \text{Schätzung } F=1,4$   
 Anteil der Normalkräfte

| Nr.      | $\gamma$ | $\text{tg } \phi'$ | J       | A    | $\frac{J}{R^2}$ | $\frac{\text{tg } \phi'}{F}$ | a     | b     | aA   | b $\frac{J}{R^2}$ | $\frac{aA+bJ}{R^2}$ | $\gamma \text{ tg } \phi' R(aA+bJ)$ |
|----------|----------|--------------------|---------|------|-----------------|------------------------------|-------|-------|------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 1        | 1,0      | 0,8                | 118200  | 12   | 11,8            | 0,57                         | 0,910 | 0,014 | 11   | 0                 | 11                  | 900                                 |
| 2        | 2,35     | 0,8                | 1417000 | 311  | 141,7           | 0,57                         | 0,910 | 0,014 | 283  | 2                 | 285                 | 53600                               |
| 3        | 2,50     | 0,8                | 3796000 | 761  | 379,6           | 0,57                         | 0,910 | 0,014 | 693  | 5                 | 698                 | 139600                              |
| 4        | 2,35     | 0,6                | 820000  | 861  | 82,0            | 0,43                         | 0,926 | 0,168 | 797  | 14                | 811                 | 114400                              |
| 5        | 2,50     | 0,6                | 819000  | 398  | 81,9            | 0,43                         | 0,926 | 0,168 | 369  | 14                | 383                 | 57400                               |
| 6        | 2,25     | 0,6                | 670000  | 1158 | 67,0            | 0,43                         | 0,926 | 0,168 | 1072 | 11                | 1083                | 146200                              |
| $\Sigma$ |          |                    |         |      |                 |                              |       |       |      |                   |                     | 512100                              |

Anteil des Auftriebes

| 3'       | 1,0 | 0,8 | 2700000 | 546  | 270,0 | 0,57 | 0,910 | 0,014 | 497  | 4  | 501  | -40100  |
|----------|-----|-----|---------|------|-------|------|-------|-------|------|----|------|---------|
| 6'       | 1,0 | 0,6 | 1300000 | 1581 | 130,0 | 0,43 | 0,926 | 0,168 | 1464 | 22 | 1486 | -89200  |
| $\Sigma$ |     |     |         |      |       |      |       |       |      |    |      | -129300 |

Anteil der Kohäsion =  $1,5 \cdot 10000 \cdot 1,06 =$

Treibendes Moment

| Nr.      | $\gamma$ | M     | $\gamma M$ |        |
|----------|----------|-------|------------|--------|
| 1        | 1,0      | 1382  | 1400       |        |
| 2+4      | 2,35     | 43900 | 103200     |        |
| 3+5      | 2,50     | 70800 | 177000     |        |
| 6        | 2,25     | 0     | 0          |        |
| $\Sigma$ |          |       |            | 281600 |

$$F = \frac{512100 - 129300 + 15900}{281600} = 1,42$$

(entspricht obiger Schätzung)

Stabilitätsberechnung nach Fellenius  
 Anteil der Normalkräfte

| Nr.      | $\gamma$ | $\text{tg } \phi'$ | J | A | $\frac{J}{R^2}$ | a     | b      | aA   | b $\frac{J}{R^2}$ | $\frac{aA+bJ}{R^2}$ | $\gamma \text{ tg } \phi' R(aA+bJ)$ |        |
|----------|----------|--------------------|---|---|-----------------|-------|--------|------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|--------|
| 1        |          |                    |   |   |                 | 1,009 | -0,624 | 12   | -7                | 5                   | 400                                 |        |
| 2        |          |                    |   |   |                 | "     | "      | 314  | -88               | 226                 | 42500                               |        |
| 3        |          |                    |   |   |                 | "     | "      | 768  | -237              | 531                 | 106200                              |        |
| 4        |          |                    |   |   |                 | "     | "      | 869  | -51               | 818                 | 115300                              |        |
| 5        |          |                    |   |   |                 | "     | "      | 401  | -51               | 350                 | 52500                               |        |
| 6        |          |                    |   |   |                 | "     | "      | 1168 | -42               | 1126                | 152000                              |        |
| $\Sigma$ |          |                    |   |   |                 |       |        |      |                   |                     |                                     | 468900 |

Anteil des Auftriebes

| 3'       | 1,0 <th>0,8 <th>2700000</th> <th>546</th> <th>270,0</th> <th>0,57</th> <th>0,910</th> <th>0,014</th> <th>497</th> <th>4</th> <th>501</th> <th>-40100</th> </th> | 0,8 <th>2700000</th> <th>546</th> <th>270,0</th> <th>0,57</th> <th>0,910</th> <th>0,014</th> <th>497</th> <th>4</th> <th>501</th> <th>-40100</th> | 2700000 | 546  | 270,0 | 0,57 | 0,910 | 0,014 | 497  | 4  | 501  | -40100 |
|----------|---|---|---------|------|-------|------|-------|-------|------|----|------|--------|
| 6'       | 1,0   | 0,6   | 1300000 | 1581 | 130,0 | 0,43 | 0,926 | 0,168 | 1464 | 22 | 1486 | -89200 |
| $\Sigma$ |   |   |         |      |       |      |       |       |      |    |      | 163900 |

Anteil der Kohäsion =  $1,5 \cdot 100 \cdot 115 =$

$$F = \frac{468900 - 163900 + 17300}{281600} = 1,14$$

Treibendes Moment wie oben

Bild 4. Stabilitätsberechnung für Böschungssegment gemäss Bild 3

9. Zusammenfassung

Die bekannten Grundgleichungen von Bishop und von Fellenius für die Stabilitätsberechnung eines Böschungssegmentes können soweit umgeformt werden, dass sie einer linearen Kombination der Querschnittsgrössen dieses Segmentes (Fläche, statisches Moment, Trägheitsmoment) entsprechen. Die treibenden Momente sind direkt proportional zum statischen Moment in bezug auf die Lotrechte durch das Gleitkreiszentrum; die widerstehenden Momente ergeben sich näherungsweise aus der Fläche und dem Trägheitsmoment bezüglich der gleichen Axe. Der Fehler, den diese Näherung in sich schliesst, liegt unter 1 % und dürfte das Endresultat praktisch nicht beeinflussen. Zur Bestimmung der Querschnittsgrössen wird das Momentenplanimeter (auch Integrator genannt) verwendet, das — ähnlich wie ein normales Polarplanimeter — sehr einfach zu handhaben ist. Die Stabilitätsanalyse, die mit den üblichen numerischen und graphischen Verfahren relativ zeitraubend ist, kann auf diese Weise wesentlich vereinfacht werden.

Adresse des Verfassers: Dr. D. Vischer, Staffelstrasse 14, Wettingen AG.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Erismann, Mathematische Instrumente als Baukasten, «Neue Zürcher Zeitung», Beilage Technik, 12. September 1962.
- [2] A. W. Bishop, The use of the Slip Circle in the Stability Analyses of Slopes, «Géotechnique» 1955, S. 7.
- [3] G. Schnitter, Theorien zur Berechnung von Stau Mauern und Staudämmen, «Wasser- und Energiewirtschaft» Nr. 7/8/9, 1956.
- [4] W. Fellenius, Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion. Berlin 1927, W. Ernst & Sohn.
- [5] D. R. May, Application of the Planimeter to the Swedish Method of Analyzing the Stability of Earth Slopes, «Transactions 2nd Congress on Large Dams» 1936, Vol. IV, S. 540.
- [6] N. Schnitter, Stabilität der Ufer des Stausees Sufers, «Schweiz. Bauzeitung» 1959, S. 675.
- [7] M. Arnold, Slope Stability Analysis by a new Graphical Method, «Proceedings of the American Society of Civil Engineers», Vol. 87, No. SM 5, 1961.
- [8] T. Erismann, Anciens et nouveaux appareils mécaniques d'intégration, «Bulletin Technique de la Suisse Romande», 21. Februar / 7. März 1953.
- [9] A. W. Bishop, N. Morgenstern, Stability Coefficients for Earth Slopes, «Géotechnique» 1960, S. 129.

Schweizerische Gesellschaft für Feintechnik

DK 061.2:681

Kürzlich ist eine «Schweizerische Gesellschaft für Feintechnik» (Association Suisse de Microtechnique) gebildet worden, welcher massgebende Fachverbände unserer Uhren- und unserer Maschinenindustrie zu Gevatter standen. Anlass zu dieser Gründung war der Umstand, dass die Schweiz als Produzentin von Uhren, elektrischen und optischen Instrumenten, Zählern und ähnlichen Erzeugnissen bisher über keine Fachorganisation verfügte, die sich mit den technischen und wissenschaftlichen Fragen des weitläufigen Gebietes der Feintechnik befasste.

Die Gesellschaft setzt sich zum Ziele, einerseits Fragen der Ausbildung an Hochschulen, Techniken usw. an die Hand zu nehmen, andererseits aber auch durch die Organisation von Fachtagungen, die Vermittlung wissenschaftlicher und technischer Dokumentation sowie die Behandlung von Forschungsfragen die theoretischen und damit auch praktischen Kenntnisse auf dem Gebiete der Feintechnik zu vertiefen. Ferner ist vorgesehen, mit ähnlich gearteten nationalen und internationalen Gesellschaften Kontakte aufzunehmen.

Die Mitgliedschaft der Gesellschaft kann sowohl von in der Schweiz wohnhaften natürlichen Personen als auch von in der Schweiz domizilierten industriellen oder gewerblichen Unternehmungen, wie schliesslich von Lehranstalten usw.

Schluss siehe Seite 193