

MITTEILUNGEN

DES INSTITUTES
FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK
TECHNISCHE HOCHSCHULE WIEN

HERAUSGEGEBEN VON PROF. DR. H. BOROWICKA

**H. Borowicka: Ein einfaches und widerspruchsfreies Verfahren zur
Ermittlung der Standsicherheit einer Böschung**

Ein einfaches und widerspruchsfreies Verfahren zur Ermittlung der Standsicherheit einer Böschung

von Hubert Borowicka

Wenn die Standsicherheit einer Böschung bei bekannten Bodenverhältnissen ermittelt werden soll, so besteht die Hauptaufgabe darin, diejenige Schnittfläche durch den Boden aufzufinden, entlang welcher am ehesten eine Gleitung stattfinden könnte. So einfach diese Frage auch klingt, so ist ihre Beantwortung bei einem Medium, welches die Eigenschaft der inneren Reibung besitzt, nicht einfach, weil es eben verschiedene Möglichkeiten dafür gibt, was man unter „am ehesten“ zu verstehen hat, bzw. über die Art und Weise, wie dies festgestellt werden soll. Grundsätzlich gibt es zwei Wege dafür, nämlich entweder nach den kleinsten Scherparametern des Bodens zu fragen, welche den kritischen Zustand des Grenzgleichgewichtes der Böschung herbeiführen würden, und diese zu den vorhandenen Scherparametern in eine Beziehung zu setzen (Fellenius) oder an der Böschung eine zusätzliche Wirkung anzubringen, bis der Grenzgleichgewichtszustand eintritt (Fröhlich). Tatsächlich bestehen zwischen diesen beiden Gedankengängen keine Unterschiede grundsätzlicher Art. Die Herbeiführung des hypothetischen Grenzgleichgewichtszustandes wird nur auf verschiedene Weise interpretiert und führt letzten Endes zum gleichen Ergebnis, wenn von der abweichenden Definition der Sicherheit abgesehen wird.

Wenn nun die Frage gestellt wird, für welche durch den Boden gelegte Schnittfläche der Grenzgleichgewichtszustand am ehesten erreicht wird, so gibt es hierfür zwei grundsätzlich verschiedene Wege:

Die erste Betrachtungsweise geht von der Plastizitätstheorie aus, bei welcher angenommen wird, daß in jedem Punkt der Bodenmasse der plastische Grenzgleichgewichtszustand erreicht ist. Bei der im Sinne dieser Theorie strengen Lösung ist das Gleichgewicht in jedem Teil der plastischen Masse gewahrt. Die Form der Gleitlinienscharen ist das Endergebnis der Untersuchung und die Sicherheit folgt aus dem Verhältnis der vorhandenen zu den abgemindert gedachten Scherparametern, für welche der plastische Zustand in der Bodenmasse eintritt.

Bei der zweiten Betrachtungsweise, welche Gleitflächenmethode genannt werden soll, wird durch den Boden eine Schnittfläche beliebiger Form gelegt und dann diejenigen Scherparameter ermittelt, für welche die Schnittfläche zur Gleitfläche wird. Das Ziel ist die Auffindung jener Gleitfläche, für welche sich die größte Scherbeanspruchung ergibt. Im Grunde genommen handelt es sich demnach um ein Varia-

tionsproblem, wobei gleichfalls die genaue Form der Gleitfläche ermittelt werden könnte. Tatsächlich wird aber in praktischen Fällen die Form der Gleitfläche angenommen, u. zw. meist als Zylinderfläche mit einem Kreis oder einer logarithmischen Spirale als Leitlinie, da man weiß, daß die genaue Form der Gleitfläche keinen großen Einfluß auf die Größe der Sicherheit ausübt.

Der Hauptunterschied zwischen beiden Betrachtungsweisen besteht darin, daß bei Anwendung der Plastizitätstheorie in jedem Punkt der plastische Grenzgleichgewichtszustand erreicht sein muß, während bei der Gleitflächenmethode von vornherein keine unbedingte Notwendigkeit hierzu besteht. Es kann daher auch angenommen werden, daß der plastische Zustand nur in der Gleitfläche selbst herbeigeführt wird.

Nur von diesem Standpunkt aus gesehen, kann die Gleitflächenmethode als gleichrangige Untersuchungsmethode und nicht nur als Näherungsverfahren für die Plastizitätstheorie angesehen werden. Die durch den Boden gelegten Schnittflächen stellen gleichsam Prüfflächen dar, für welche die zum Eintritt des Grenzgleichgewichtszustandes erforderlichen Scherparameter ermittelt werden. In erster Linie wird daher zu fordern sein, daß für den Grenzgleichgewichtszustand die äußeren Gleichgewichtsbedingungen am Rutschkeil streng erfüllt sind. Was sein inneres Gleichgewicht betrifft, so kann nur verlangt werden, daß an keiner Stelle der durch das Coulombsche Reibungsgesetz gegebene Scherwiderstand des Bodens überschritten werden darf.

Ein einfaches Verfahren, welches der Forderung nach Einhaltung aller Gleichgewichtsbedingungen am Rutschkörper nachkommt, wurde von Fröhlich entwickelt. Es gilt nur für kreiszylindrische Gleitflächen und ist nur bei homogenen Bodenverhältnissen empfehlenswert. Das Verfahren kann noch vereinfacht werden, wenn die Kohäsion c durch den Binnendruck p_k ersetzt wird, wobei zwischen c , p_k und dem Winkel der inneren Reibung φ die Beziehung

$$p_k = k c \cotg \varphi \quad (1)$$

besteht, worin k ein Abminderungsfaktor kleiner als eins ist, wenn die Kohäsion nicht mit ihrem vollen Betrage in die Rechnung eingeführt werden soll. Werden verschiedene Mindestwerte der Sicherheit für Reibung und Kohäsion gefordert, so ist k dem Verhältnis der erforderlichen Sicherheitsbeiwerte gleich zu setzen.

Auf die einfachste Form gebracht, besteht das Verfahren von Fröhlich darin, daß zuerst die Resultierende der am Rutschkeil angreifenden äußeren Kräfte R_a ermittelt und mit dem Binnendruck zu einer Gesamtergebnisierenden R zusammengesetzt wird (Abb. 1). Bei

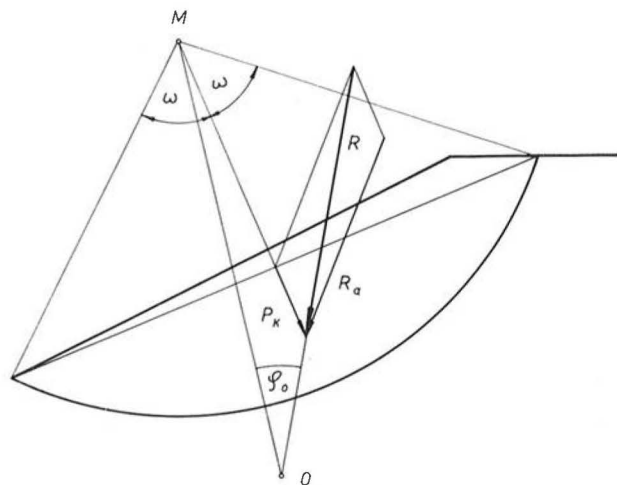


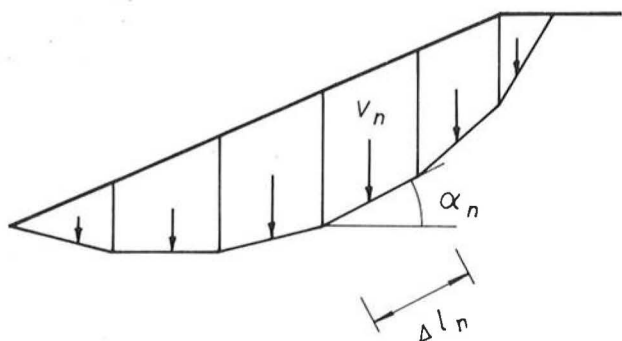
Abb. 1: Vereinfachtes Verfahren von Fröhlich bei homogenem Boden.

sichelförmiger Verteilung der Normalspannungen in der Gleitfläche ergibt sich als Entfernung des Punktes 0 vom Mittelpunkt des Kreises M genügend genau:

$$\overline{OM} = \frac{r}{2} \left(1 + \frac{\omega}{\sin \omega} \right) \quad (2)$$

worin r der Radius des Gleitkreises und ω der halbe Öffnungswinkel des Gleitkeiles ist. Der zwischen R und OM eingeschlossene Winkel φ_0 kann abgelesen und die Sicherheit S ermittelt werden. Man erhält für die Sicherheit

$$\left. \begin{aligned} \text{nach Fröhlich} \quad S &= \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} \\ \text{nach Fellenius} \quad S &= \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0} \end{aligned} \right\} (3)$$



Durchschneidet jedoch die Gleitfläche zwei oder mehrere Bodenschichten mit verschiedenen Scherparametern, dann ist das Verfahren von Fröhlich ohne weiteres nicht mehr anwendbar. Für diese Fälle wurde ein neues, einfaches Verfahren entwickelt, dessen statische Grundlagen die gleichen wie beim Verfahren von Fröhlich sind, nämlich die Einhaltung aller Gleichgewichtsbedingungen am gesamten Rutschkeil, ohne zunächst auf die Spannungsverhältnisse im Inneren einzugehen. Das neue Verfahren, welches bei jeder beliebigen Form der Gleitfläche anwendbar ist, kann auch als Weiterentwicklung der schwedischen Methode aufgefaßt werden, indem der bei dieser Methode entstehende Fehler im Kräftegleichgewicht eliminiert wird.

Wie bei allen Lamellenverfahren wird zunächst die angenommene Gleitfläche in eine Anzahl gerader Teilstrecken von der Länge Δl_n mit den Neigungswinkeln α_n gegen die Horizontale zerlegt. Am Gleitkörper sollen lotrechte Kräfte v_n , Horizontalkräfte h_n sowie in der Gleitfläche — u. zw. normal zu dieser — der Binnendruck p_{kn} und Wasserdruck w_n angreifen. Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, können nun ohne Rückwirkung auf das Gleichgewicht des gesamten Rutschkörpers die Kräfte v_n und h_n in ihren Wirkungslinien in die Gleitfläche geschoben werden. Gemäß Abb. 3 ergibt sich für die n -te Teilstrecke die Normalkraft n_n mit:

$$n_n = v_n \cos \alpha_n - h_n \sin \alpha_n + (p_{kn} - w_n) \Delta l_n \quad (4)$$

Die treibende Scherkraft t_{tn} wird

$$t_{tn} = v_n \sin \alpha_n + h_n \cos \alpha_n \quad (5)$$

und der Scherwiderstand t_{wn} unter Verwendung der Sicherheitsregel von Fellenius

$$t_{wn} = \frac{1}{S} \operatorname{tg} \varphi_n n_n \quad (6)$$

Der Winkel δ zwischen der Resultierenden R und der Lotrechten beträgt:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sum h_n + \sum (w_n - p_{kn}) \Delta l_n \sin \alpha_n}{\sum v_n - \sum (w_n - p_{kn}) \Delta l_n \cos \alpha_n} \quad (7)$$

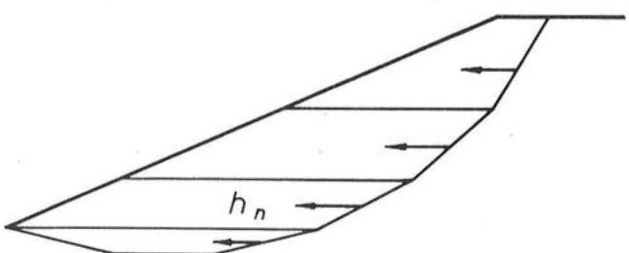


Abb. 2: Verschiebung der am Rutschkeil angreifenden Kräfte in die Gleitfläche.

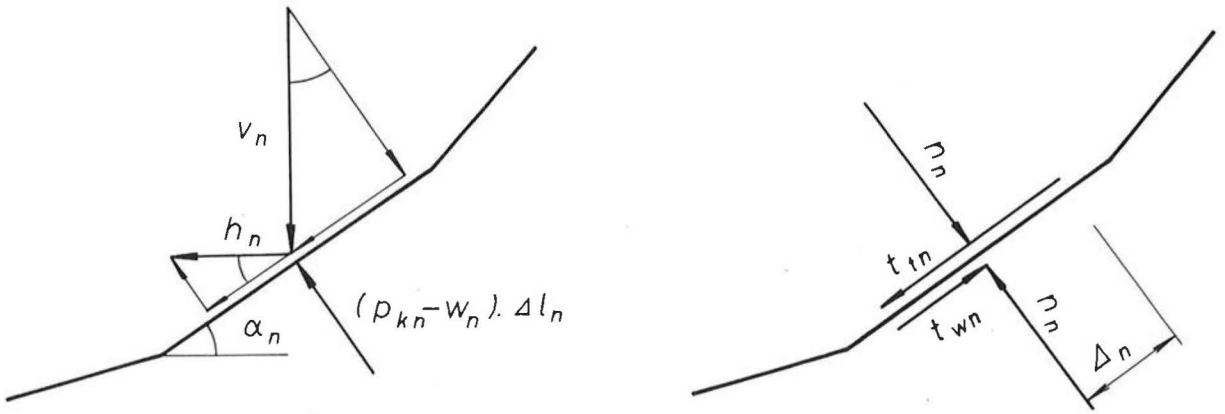


Abb. 3: Kräftezerlegung im n-ten Streckenelement der Gleitfläche.

Nun können die Normalkräfte n_n in Richtung der Resultierenden R und normal zu ihr in Komponenten zerlegt werden, deren Resultierende N_R und N_N sind (Abb. 4):

$$\begin{aligned} N_R &= \sum n_n \cos(\alpha_n + \delta) \\ N_N &= \sum n_n \sin(\alpha_n + \delta) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} N_R &= \sum n_n \cos(\alpha_n + \delta) \\ N_N &= \sum n_n \sin(\alpha_n + \delta) \end{aligned}} \right\} (8)$$

Dieselbe Zerlegung wird auch mit den widerstehenden Scherkräften t_{wn} durchgeführt, wodurch man deren Resultierende T_{WR} und T_{WN} erhält:

$$\begin{aligned} T_{WR} &= \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \sin(\alpha_n + \delta) \\ T_{WN} &= \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \cos(\alpha_n + \delta) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} T_{WR} &= \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \sin(\alpha_n + \delta) \\ T_{WN} &= \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \cos(\alpha_n + \delta) \end{aligned}} \right\} (9)$$

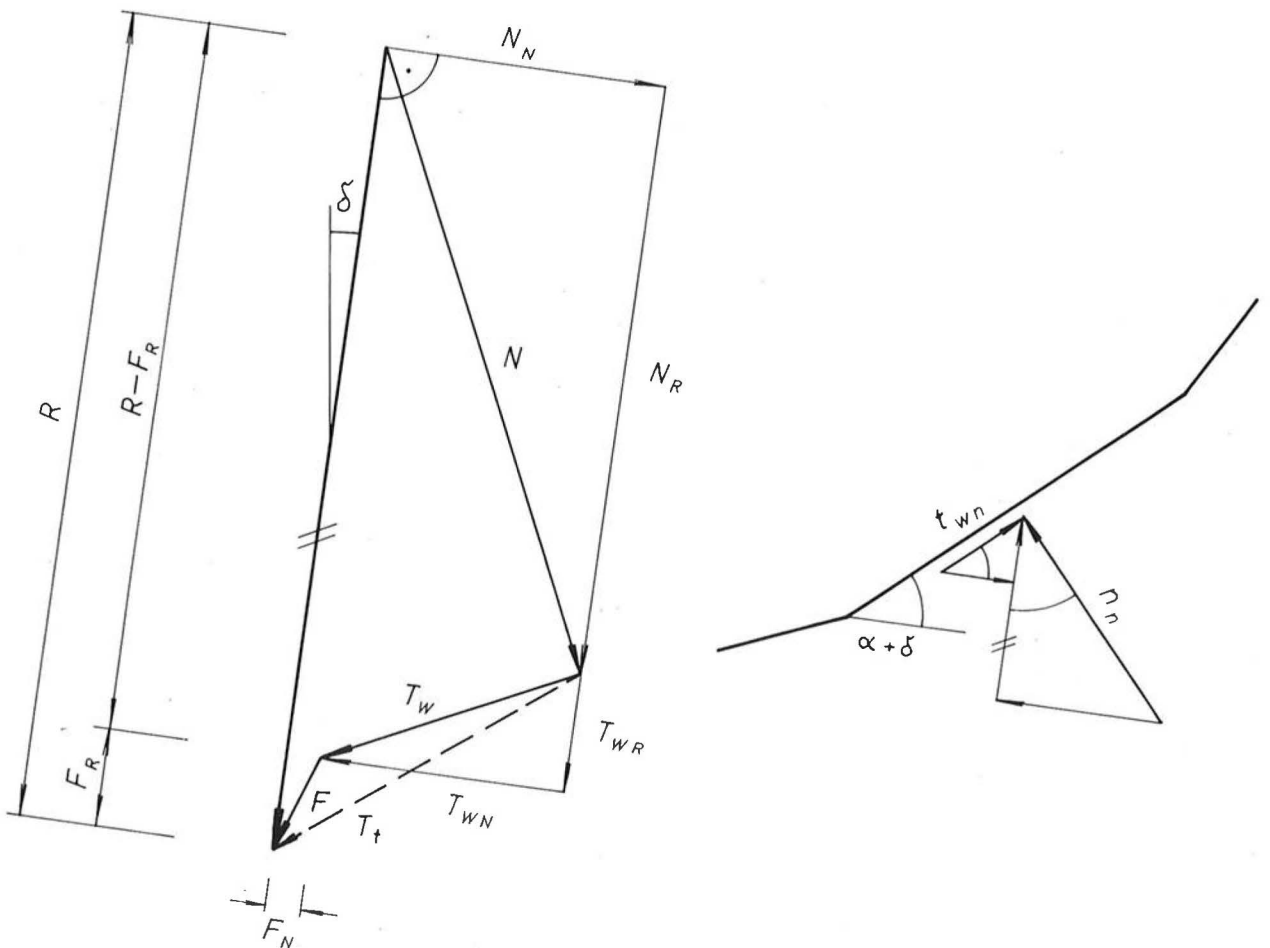


Abb. 4: Kräfteplan mit Schlußfehler F .

Die vier Komponenten gemäß (8) und (9) ergeben jedoch zusammengesetzt nicht die Resultierende R. Wie der Kraftplan der Abb. 4 zeigt, entsteht vielmehr ein Schlußfehler F, dessen Komponenten F_R und F_N in Richtung von R bzw. normal zu R betragen:

$$F_R = R - \sum n_n \cos(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \sin(\alpha_n + \delta)$$

$$F_N = \sum n_n \sin(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \cos(\alpha_n + \delta) \quad (10)$$

Man kann aber zum Schlußfehler F im Kräfteplan bzw. zu seinen Komponenten F_R und F_N noch auf eine andere Weise gelangen: In jedem Streckenelement der Gleitfläche greift die treibende Scherkraft t_{in} gemäß (5) und die widerstehende Scherkraft t_{wn} gemäß (6) an. Ihre Differenz Δ_n beträgt:

$$\Delta_n = t_{in} - t_{wn} = t_{in} - \frac{1}{S} \text{tg } \varphi_n n_n \quad (11)$$

Zusammengesetzt müssen diese Scherkraftdifferenzen gleichfalls den Schlußfehler F ergeben. Projiziert auf die Richtung von R und normal zu R ergibt sich:

$$F_R = \sum t_{in} \sin(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \sin(\alpha_n + \delta)$$

$$F_N = \sum t_{in} \cos(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{S} \sum \text{tg } \varphi_n n_n \cos(\alpha_n + \delta) \quad (12)$$

Die Gleichungen (10) und (12) führen zum gleichen Ergebnis. Ein besonders bevorzugter und einfacher Fall tritt dann ein, wenn die Komponente F_N des Schlußfehlers F null ist. Dann folgt aus (12) die Sicherheit

$$S = \frac{\sum \text{tg } \varphi_n n_n \cos(\alpha_n + \delta)}{\sum t_{in} \cos(\alpha_n + \delta)} = \frac{\sum \text{tg } \varphi_n [v_n \cos \alpha_n - h_n \sin \alpha_n + (p_{kn} - w_n) \Delta l_n] \cos(\alpha_n + \delta)}{\sum (v_n \sin \alpha_n + h_n \cos \alpha_n) \cos(\alpha_n + \delta)} \quad (13)$$

Der Winkel δ ergibt sich aus (7). Wie man sieht, benötigt man zur Bestimmung der Sicherheit weder die Größe noch die Lage der Resultierenden R. Bei reiner Reibung und alleiniger Eigengewichtswirkung wird mit $v_n = g_n$ und $\delta = 0$ die Sicherheit S erhalten:

$$S = \frac{\sum \text{tg } \varphi_n g_n \cos^2 \alpha_n}{\sum g_n \sin \alpha_n \cos \alpha_n} \quad (13a)$$

Zum Vergleich mit (13) bzw. (13a) ergibt sich die Sicherheit nach der schwedischen Methode

$$S_s = \frac{\sum \text{tg } \varphi_n n_n}{\sum t_{in}} \quad (14)$$

bzw.

$$S_s = \frac{\sum \text{tg } \varphi_n g_n \cos \alpha_n}{\sum g_n \sin \alpha_n} \quad (14a)$$

Wenn die Sicherheit bekannt ist, kann mit Hilfe von (10) oder (12) der Schlußfehler $F = F_R$ ermittelt werden. Um das Kräftegleichgewicht am gesamten Rutschkörper herzustellen, müssen in der Gleitfläche zusätzliche Normalkräfte Δn_n und Scherkräfte $\Delta t_{wn} = \frac{1}{S} \text{tg } \varphi_n \Delta_n$ angesetzt werden, deren Resultierende den Schlußfehler F_R im Kräfteplan ergeben muß. An sich gibt es unendlich viele Möglichkeiten, welche diese Bedingung erfüllen. Eine von diesen besteht darin, daß die Zusatzkräfte Δn_n und Δt_{wn} proportional den Kräften n_n und t_{wn} angenommen werden:

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_n &= n_n \frac{F_R}{R - F_R} \\ \Delta t_{wn} &= \frac{1}{S} \text{tg } \varphi_n n_n \frac{F_R}{R - F_R} \end{aligned} \right\} (15)$$

Obwohl sowohl diese Zusatzkräfte als auch die Differenzkräfte Δ_n gemäß 11 den Schlußfehler $F = F_R$ als Resultierende ergeben und somit das Kräftegleichgewicht am Rutschkörper gewahrt ist, werden die Wirkungslinien ihrer Resultierenden in der Regel nicht zusammenfallen und daher das Momentengleichgewicht nicht genau erfüllt sein. Wird die Lage der Resultierenden der Differenzkräfte Δ_n und der Gesamtergebnierenden R ermittelt und ergibt sich hiebei ihr gegenseitiger Abstand mit a, so ist am Rutschkörper ein Restmoment in Höhe von

$$\Delta M = a \frac{F_R R}{R - F_R} \quad (16)$$

vorhanden. Die Aufgabe besteht nun darin, die Ver-

teilung der Zusatzkräfte Δn_n und Δt_{wn} so zu verändern, daß ohne Änderung der Größe ihrer Resultierenden F_R das Zusatzmoment ΔM auf den Rutschkörper ausgeübt wird. Zu diesem Zwecke geht man am besten so vor, daß in der Gleitfläche unter der Grenzneigung $\frac{1}{S} \text{tg } \varphi_n$ gegen ihre Normale drei

Einzelkräfte P_I , P_{II} und P_{III} hinzugefügt werden, welche nur ein resultierendes Kräftepaar mit dem Hebelsarm b ergeben (Abb. 5). Hieraus folgt:

$$P_{II} = \frac{a}{b} \frac{F_R R}{R - F_R}, \quad (17)$$

womit auch die Kräfte P_I und P_{III} bekannt sind.

Die Kräfte P_I , P_{II} und P_{III} können nun leicht auf zwei oder mehrere Teilstrecken der Gleitfläche unter Einhaltung der geforderten Gleichgewichtsbedingungen aufgeteilt und den Zusatzkräften gemäß (15) überlagert werden.

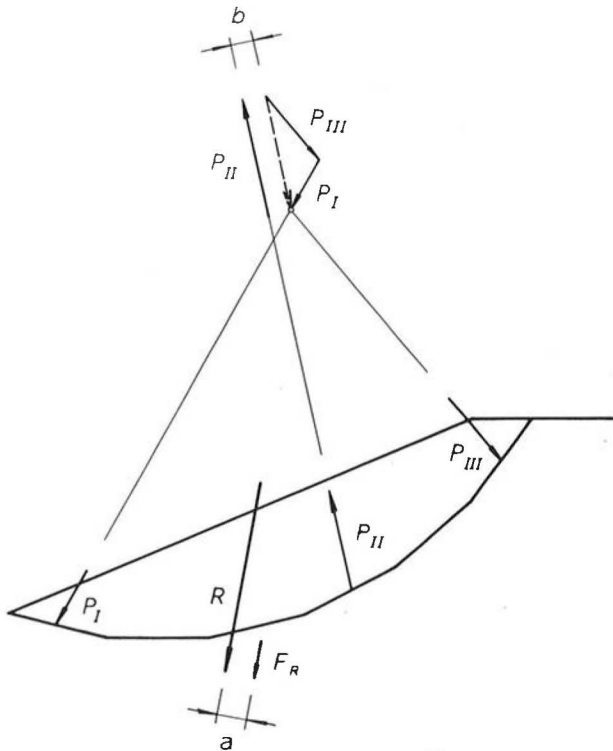


Abb. 5: Aufnahme des Restmomentes durch ein Kräftepaar.

Im Sonderfall einer kreisförmigen Gleitfläche kann das Restmoment ΔM um den Kreismittelpunkt aus der folgenden Formel mit r als Radius des Gleitkreises errechnet werden:

$$\Delta M = r \left(\sum \tau_{in} - \frac{1}{S} \frac{R}{R - F_R} \sum n_n \operatorname{tg} \varphi_n \right) \quad (18)$$

Da die Lage der Angriffspunkte der drei Kräfte P in der Gleitfläche frei wählbar ist, so ergibt sich dadurch die Möglichkeit, die Richtung der Erddrücke in lotrechten Schnitten durch den Rutschkeil in der Weise zu beeinflussen, daß der Coulombsche Grenzwert des Scherwiderstandes in diesen Schnitten nicht überschritten wird. Hieraus folgt, daß bei einer Sicherheit gemäß Gleichung (13) alle von der statischen Seite her zu stellenden Forderungen erfüllbar sind. Aus diesem Grunde kann man die Sicherheit aus (13) errechnen, ohne die Zusatzkräfte Δn_n und $\Delta \tau_{wn}$ bzw. die Differenzkräfte Δ_n oder den Schlußfehler $F = F_R$ ermitteln zu müssen.

Im Folgenden wird ein Beispiel für die Ermittlung der Sicherheit nach der neuen Methode gegeben (Abb. 6). In einem Damm mit Böschungsneigung 1:2 wird der Einfachheit halber eine kreisförmige Gleitfläche eingelegt. Diese ist in zehn gerade Teilstrecken von der Länge $\Delta l_n = 1$ m unterteilt, wobei die Neigungsdifferenz zweier benachbarter Teilstrecken $5,50^\circ$ beträgt. Der Reibungsbeiwert wurde in den untersten drei Teilstrecken mit 0,7, in den mittleren vier mit

0,6 und in den obersten drei Teilstrecken mit 0,5 bei einem Raumgewicht des Bodens von $2,2 \text{ t/m}^3$ angesetzt. Die Untersuchung erstreckt sich auf drei Lastfälle, nämlich:

- Lastfall I: nur Eigengewichtslasten bei reinem Reibungsboden
- Lastfall II: zusätzlich zu I Wasser- und Binnendruck in der Gleitfläche
- Lastfall III: zusätzlich zu II horizontale Erdbebenkräfte.

Bei der Ermittlung der Wasserdrücke wurde angenommen, daß in den obersten beiden Teilstücken kein Wasserdruck vorhanden ist. Im tieferliegenden Teil des Rutschkeils wurde eine Parallelströmung zur Böschungsoberfläche vorausgesetzt. Als rechnerischer Binnendruck wurde in den unteren drei Teilstrecken $0,5 \text{ t/m}^2$, im Mittelteil $0,3 \text{ t/m}^2$ und in den oberen drei Teilstrecken null angesetzt. Bei der Erdbebenwirkung wurde die wirksame Horizontalkraft mit 5 Prozent des Eigengewichtes in die Rechnung eingeführt.

Die Rechnung und Summenbildung wurde in Tabelle 1 für die drei Lastfälle durchgeführt, wobei alle Größen in den Dimensionen Tonnen und Metern und die Winkel in Graden angegeben sind. Aufgrund der Gleichungen (7), (13) und (14) ergibt sich:

Lastfall I	$\delta = 0$		
		$S_s = \frac{10,613}{7,978} = 1,330$	
		$S = \frac{9,618}{6,753} = 1,424$	
Lastfall II	$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,361}{19,677 - 2,868} = 0,081$		
	$\delta = 4,63^\circ$	$S_s = \frac{8,721}{7,978} = 1,093$	
		$S = \frac{7,632}{6,411} = 1,190$	
Lastfall III	$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,362 + 0,05 \cdot 19,677}{19,677 - 2,868} =$		
			$= 0,1396$
	$\delta = 7,95^\circ$	$S_s = \frac{8,439}{8,796} = 0,959$	
		$S = \frac{7,200}{6,765} = 1,064$	

Die Sicherheit nach (13) ist daher in allen drei Lastfällen um etwa 7—11 Prozent größer als die Sicherheit S_s nach der schwedischen Methode gemäß (14). Der Lastfall I wurde noch genauer untersucht. Zunächst wurde aus (12) der Schlußfehler $F = F_R$ mit

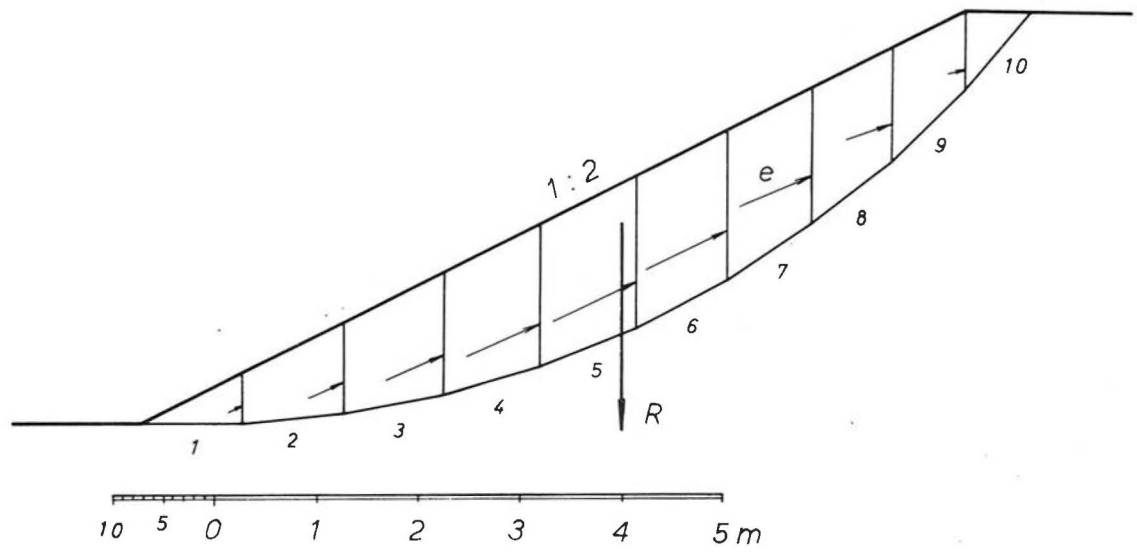


Abb. 6a: Untersuchte Gleitfläche.

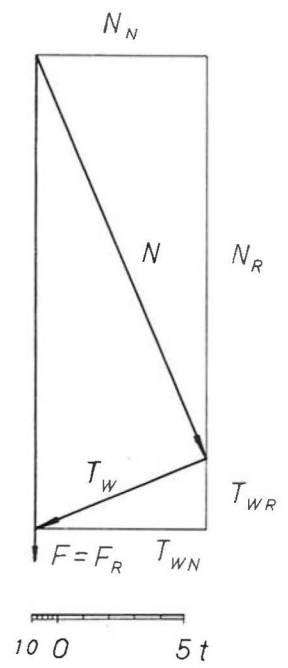


Abb. 6b: Kräfteplan im Lastfall I.

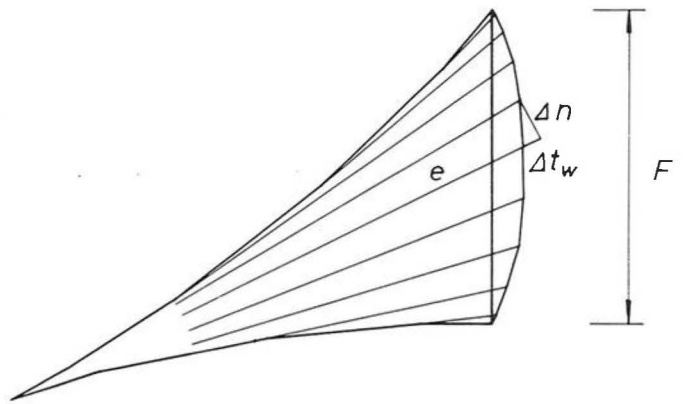


Abb. 6c: Zerlegung des Schlußfehlers in die Zusatzkräfte Δn_n und Δt_{wn} nach (15).

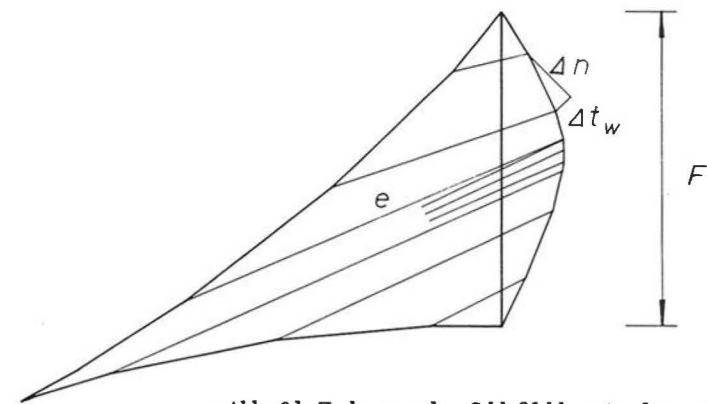


Abb. 6d: Zerlegung des Schlußfehlers in die verbesserten Zusatzkräfte nach Herstellung des Momentengleichgewichtes.

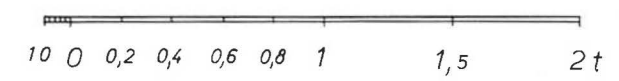


Abb. 6: Untersuchung einer Böschung auf ihre Standsicherheit.

TABELLE 1

Lastfall I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nr.	α_n°	Δl_n	$\cos \alpha_n$	$\sin \alpha_n$	g_n	$\operatorname{tg} \varphi_n$	$g_n \cos \alpha_n$	$g_n \sin \alpha_n$	$g_n \cos \alpha_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n$	$g_n \sin \alpha_n \cdot \cos \alpha_n$	$g_n \cos^2 \alpha_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n$
							5·3	5·4	7·6	8·3	
1	0	1	1,0000	0,0000	0,550	0,70	0,550	0,000	0,385	0,000	0,385
2	5,5	1	0,9954	0,0958	1,535	0,70	1,528	0,147	1,070	0,146	1,065
3	11	1	0,9816	0,1908	2,272	0,70	2,230	0,433	1,561	0,425	1,532
4	16,5	1	0,9588	0,2840	2,741	0,60	2,628	0,778	1,577	0,746	1,512
5	22	1	0,9272	0,3746	2,941	0,60	2,727	1,102	1,636	1,022	1,517
6	27,5	1	0,8870	0,4617	2,883	0,60	2,557	1,331	1,534	1,181	1,361
7	33	1	0,8387	0,5446	2,593	0,60	2,175	1,412	1,305	1,184	1,095
8	38,5	1	0,7826	0,6225	2,113	0,50	1,654	1,315	0,827	1,029	0,647
9	44	1	0,7193	0,6947	1,494	0,50	1,075	1,038	0,538	0,747	0,387
10	49,5	1	0,6494	0,7604	0,555	0,50	0,360	0,422	0,180	0,274	0,117
Σ					19,677			7,978	10,613	6,754	9,618

Lastfall II

	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Nr.	W_n	P_{kn}	$W_n - P_{kn}$	$(W_n - P_{kn}) \cdot \cos \alpha_n$	$(W_n - P_{kn}) \cdot \sin \alpha_n$	$(\alpha + \delta)^\circ$	$\cos (\alpha + \delta)$	n_n	$n_n \operatorname{tg} \varphi_n$	$n_n \operatorname{tg} \varphi_n \cdot \cos (\alpha + \delta)$	$g_n \sin \alpha_n \cdot \cos (\alpha_n + \delta)$
			12—13	14·3	14·4			7—14	19·6	20·18	8·18
1	0,200	0,500	-0,300	-0,300	0,000	4,63	0,9967	0,850	0,595	0,593	0,000
2	0,561	0,500	0,061	0,061	0,006	10,13	0,9844	1,467	1,027	1,011	0,145
3	0,842	0,500	0,342	0,336	0,065	15,63	0,9630	1,888	1,322	1,273	0,417
4	1,040	0,300	0,740	0,710	0,210	21,13	0,9328	1,888	1,133	1,057	0,726
5	1,153	0,300	0,853	0,791	0,320	26,63	0,8940	1,874	1,124	1,005	0,985
6	1,118	0,300	0,818	0,276	0,378	32,13	0,8468	1,739	1,043	0,883	1,127
7	0,716	0,300	0,416	0,349	0,227	37,63	0,7920	1,759	1,055	0,836	1,118
8	0,249	0,000	0,249	0,195	0,155	43,13	0,7298	1,405	0,703	0,513	0,960
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	48,63	0,6609	1,077	0,539	0,356	0,683
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	54,13	0,5860	0,360	0,180	0,105	0,247
Σ									8,721	7,632	6,411

Lastfall III

	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Nr.	h_n	$h_n \cos \alpha_n$	$h_n \sin \alpha_n$	n_n	t_{tn}	$n_n \operatorname{tg} \varphi_n$	$(\alpha_n + \delta)^\circ$	$\cos (\alpha_n + \delta)$	$n_n \operatorname{tg} \varphi_n \cdot \cos (\alpha_n + \delta)$	$t_{tn} \cdot \cos (\alpha_n + \delta)$
		23·3	23·4	19—25	8 + 24	26·6			28·30	27·30
1	0,000	0,000	0,000	0,850	0,000	0,595	7,95	0,9904	0,589	0,000
2	0,015	0,014	0,001	1,466	0,161	1,026	13,45	0,9726	0,998	0,157
3	0,044	0,043	0,008	1,880	0,476	1,316	18,95	0,9458	1,245	0,450
4	0,083	0,078	0,023	1,865	0,857	1,119	24,45	0,9104	1,019	0,780
5	0,121	0,112	0,045	1,829	1,214	1,097	29,95	0,8665	0,951	1,052
6	0,150	0,113	0,069	1,670	1,464	1,002	35,45	0,8146	0,816	1,193
7	0,168	0,141	0,092	1,667	1,553	1,000	40,95	0,7553	0,755	1,173
8	0,168	0,131	0,104	1,301	1,446	0,651	46,45	0,6890	0,449	0,996
9	0,144	0,104	0,100	0,977	1,142	0,489	51,95	0,6163	0,301	0,704
10	0,093	0,061	0,021	0,289	0,482	0,144	57,45	0,5380	0,077	0,260
Σ					8,796	8,439			7,200	6,765

1,233 t und aus (8) die Komponenten $N_R = 15,66$ t und $N_N = 6,75$ t ermittelt. Damit konnte der Kräfteplan der Abb. 6 b gezeichnet werden. In Abb. 6 c ist die Zerlegung des bereits bekannten Schlußfehlers in die Differenzkräfte Δ_n gemäß (11) einerseits und F_R in die Zusatzkräfte Δ_{n_n} und $\Delta_{t_{w_n}}$ gemäß (15) gezeigt. Diese Kräfte ergeben aber nach (18) ein Restmoment um den Kreismittelpunkt von $\Delta M = 0,025$ r. Um dieses zu eliminieren, muß die Zerlegung des Schlußfehlers in die zusätzlichen Scher- und Normalkräfte in der Weise vorgenommen werden, wie dies in Abb. 6 d gezeigt ist. In die Abbildung 6 sind auch die Erddrücke e in den lotrechten Schnitten eingetragen.

Zusammenfassung:

Wird durch einen abgeböschten Erdkörper eine gedachte Gleitfläche von beliebiger Form gelegt, so

ist diese in gerade Teilstrecken mit der Länge Δl_n und der Neigung α_n gegen die Horizontale zu zerlegen. Die am Rutschkörper angreifenden, lotrechten Kräfte v_n und horizontalen Kräfte h_n werden in ihren Wirkungslinien in die Gleitfläche geschoben, in welcher außerdem Wasserdrücke w_n und Binnendrücke $p_{kn} = k c \cot \varphi_n$ wirksam sein können wobei k das Verhältnis der erforderlichen Mindestsicherheit für Reibung und Kohäsion ist. Für den Neigungswinkel δ der Gesamtergebnierenden gegen die Lotrechte ergibt sich:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sum h_n + \sum (w_n - p_{kn}) \Delta l_n \sin \alpha_n}{\sum v_n - \sum (w_n - p_{kn}) \Delta l_n \cos \alpha_n}$$

Damit erhält man für die Sicherheit unter Verwendung der Regel von Fellenius:

$$S = \frac{\sum \operatorname{tg} \varphi_n n_n \cos (\alpha_n + \delta)}{\sum t_{in} \cos (\alpha_n + \delta)} = \frac{\sum \operatorname{tg} \varphi_n [v_n \cos \alpha_n - h_n \sin \alpha_n + (p_{kn} - w_n) \Delta l_n] \cos (\alpha_n + \delta)}{\sum (v_n \sin \alpha_n + h_n \cos \alpha_n) \cos (\alpha_n + \delta)}$$