

J Böschungsstabilität

J.1 Allgemeines

Wir finden Böschungen bei natürlichen und künstlichen Geländesprüngen. Maßgebend für deren Stabilität sind neben Böschungsneigung und -höhe die Scherfestigkeit des anstehenden Bodens und angreifende äußere Kräfte, vor allem Wasserdruck.

Eine Böschung versagt, wenn sich in der Böschung eine Gleitfläche bildet, auf welcher der Scherwiderstand des Bodens überschritten wird. Der darüberliegende Erdkörper bildet dann einen Gleitkörper, der entlang der Gleitfläche abrutscht. Ein derartiges Versagen einer Böschung kündigt sich oft vorher durch zunehmende Verformungen an. Vor allem bindige Böden neigen zu einem viskosen Verhalten.

Teilweise wird zwischen Böschungsbruch und Geländebruch (siehe [Bild O02.10](#) bzw. [Bild O02.20](#) im Vorlesungsumdruck) unterschieden:

- **Böschungsbruch:** Versagen einer Böschung mit weitgehend homogener Neigung
- **Geländebruch:** Versagen eines Geländesprunges mit unterschiedlichen Neigungen und u.U. Stützbauwerken

Für die Berechnung der Standsicherheit spielt eine derartige Unterscheidung allerdings keine Rolle.

Die exakte Form der Bruchfuge ist nur in Sonderfällen prognostizierbar. Deshalb wählt man für Berechnungen einfache geometrische Formen, in der Regel Kreise und Geraden bzw. zusammengesetzte Formen und variiert mit diesen Formen die Gleitkörpergeometrie. Zur Ermittlung der Standsicherheit wird für jeden betrachteten Bruchmechanismus untersucht, ob mit auf der sicheren Seite liegenden Scherparametern das Gleichgewicht nachgewiesen werden kann.

J.1.1 Teilsicherheitskonzept

Vor Einführung der neuen DIN 1054 war der Nachweis des Böschungs- bzw. Geländebruchs mit Angabe der geforderten globalen Sicherheiten in DIN 4084 (07/1981) geregelt. Inzwischen ist der Nachweis nach dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte in DIN 1054:2005 enthalten.

Im Hinblick auf die zur Ermittlung der Böschungs- bzw. Geländebruchsicherheit in Frage kommenden Bruchmechanismen und Berechnungsverfahren verweist DIN 1054:2005 jedoch weiterhin auf DIN 4084 (01/2009). D.h. die Berechnung wird gemäß DIN 4084 durchgeführt, der Nachweis nach DIN 1054:2005.

J.1.2 Nachweisformat

Beim Böschungs- bzw. Geländebruch handelt es sich um ein Versagen des Gesamtsystems. Nach DIN 1054:2005 ist der zugehörige Nachweis der Tragfähigkeit als Nachweis für den Grenzzustand 1C bezeichnet. Bei diesem Nachweis sind die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherparameter zu beziehen.

In der Regel darf der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit entfallen.

J.1.2.1 Einwirkungen

Generell werden die durch das Bodeneigengewicht und eventuell angreifende Streckenlasten hervorgerufenen charakteristischen Einwirkungen E_k durch Teilsicherheitsbeiwerte γ_G bzw. γ_Q erhöht:

$$E_d = E_{G,k} \cdot \gamma_G + E_{Q,k} \cdot \gamma_Q$$

Der Teilsicherheitsbeiwert für das Eigengewicht, welches im Fußbereich einer Böschung günstig und im Kronenbereich ungünstig wirkt, ist $\gamma_G = 1,0$.

Der Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im Lastfall 1 beträgt $\gamma_Q = 1,3$.

J.1.2.2 Widerstände

Dem Abgleiten einer Böschung entgegen wirken Reibungskräfte in der Bruchfuge. Die Größe der Reibungskräfte ist abhängig von den Bodeneigenschaften, dem Reibungswinkel und der Kohäsion. Die Berücksichtigung der Sicherheit auf der Widerstandsseite erfolgt durch Abminderung der Scherparameter analog der Definition nach FELLENIUS mit den in DIN 1054 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerten:

$$\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_\varphi}$$
$$c'_d = c'_k / \gamma_c$$

J.1.2.3 Nachweis

Mit den abgeminderten Scherparametern und unter Berücksichtigung der Einwirkungen (Bemessungswerte) wird das Gleichgewicht der Böschung untersucht.

Hierfür wird die Summe der einwirkenden Kräfte oder Momente mit der Summe der widerstehenden Kräfte oder Momente verglichen.

$$E_d \leq R_d$$

Oft wird bei der Betrachtung von Böschungen der Nachweis nicht explizit geführt, sondern lediglich der sogenannte Ausnutzungsgrad μ angegeben:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1$$

Der Ausnutzungsgrad μ der Scherparameter gibt an, welcher Anteil der Bemessungswerte der Scherfestigkeit (also nach Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte) zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes mobilisiert werden muss.

Ein Ausnutzungsgrad $\mu < 1$ bedeutet, dass zum Erreichen des Gleichgewichts nicht die gesamte zur Verfügung stehende Scherfestigkeit aktiviert werden muss. Das untersuchte System weist noch „Tragreserven“ auf.

J.2 Homogener, kohäsionsloser Boden

Bei nichtbindigen Böden ohne Kohäsion entspricht die maximal mögliche Böschungsneigung dem Reibungswinkel des Bodenmaterials.

Beispiel: In einem Sand (S: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $\varphi' = 32,5^\circ$; $c' = 0 \text{ kN/m}^2$) soll temporär für eine Baustraße eine Einschnittsböschung mit der Neigung 1 : 2 hergestellt werden. Ist die Böschung stand-sicher?

$$\beta = \arctan (1/n) = \arctan 1/2 = 26,6^\circ$$

$$\gamma_\varphi = \gamma_c = 1,15 \text{ (Lastfall 2)}$$

$$\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'}{\gamma_\varphi} = \frac{\tan 32,5^\circ}{1,15} \Rightarrow \varphi'_d = 29,0^\circ$$

Nachweis: $\beta_d = 26,6^\circ < \varphi'_d = 29,0^\circ$

Ausnutzungsgrad: $\mu = \frac{\tan \beta}{\tan \varphi'_d} = \frac{\gamma_\varphi}{n \cdot \tan \varphi'} = \frac{\tan 26,6^\circ}{\tan 29,0^\circ} = 0,9$

Die Standsicherheit der Böschung ist gegeben.

J.3 Rutschungen auf ebenen Gleitflächen

Teilweise sind kritische Gleitflächen in einer Böschung bereits vorgegeben, z.B. wenn geringmächtige Deckschichten auf Schichten mit höherer Scherfestigkeit liegen. Dann ist das Risiko des Abrutschens der gesamten oberen Schicht auf der unteren zu überprüfen. Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei eingebauten Oberflächenabdichtungen oder in Kluftsystemen im Fels vor. Die vorhandene Sicherheit errechnet sich aus einem Vergleich der abtreibenden zu den widerstehenden Kräften in Richtung parallel zur Hangoberfläche.

Beispiel: Beim Erstellen eines Straßeneinschnitts in einem dickbankigen, wenig verwitterten Fels werden Felsplatten freigelegt. Die Klüfte sind mit $\beta = 60^\circ$ geneigt; in der Gleitfläche kann ein Reibungswinkel von $\varphi' = 30^\circ$ und eine Kohäsion von $c' = 25 \text{ kN/m}^2$ angenommen werden (Bild J-1). Können einzelne Felsplatten ($G = 100 \text{ kN/m}^2$) abrutschen?

$$\gamma_\varphi = \gamma_c = 1,25 \text{ (Lastfall 1)}$$

abtreibende Kräfte: $E_d = G \cdot \sin \beta \cdot \gamma_G = 100 \cdot \sin 60^\circ \cdot 1,0 = 86,6 \text{ kN/m}^2$

rückhaltende Kräfte: $\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'}{\gamma_\varphi} = \frac{\tan 30^\circ}{1,25} \Rightarrow \varphi'_d = 24,8^\circ$

$$c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{25}{1,25} = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$R_d = G \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi'_d + c'_d = 100 \cdot \cos 60^\circ \cdot \tan 24,8^\circ + 20 = 43,1 \text{ kN/m}^2$$

Nachweis:
$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{86,6}{43,1} = 2,0 \geq 1$$

Die Felsplatten sind nicht standsicher. Sie müssen z.B. mit Vorspannankern, Dübeln oder einer Verbauwand gesichert werden. Alternativ können die nicht standsicheren Platten abgetragen werden.

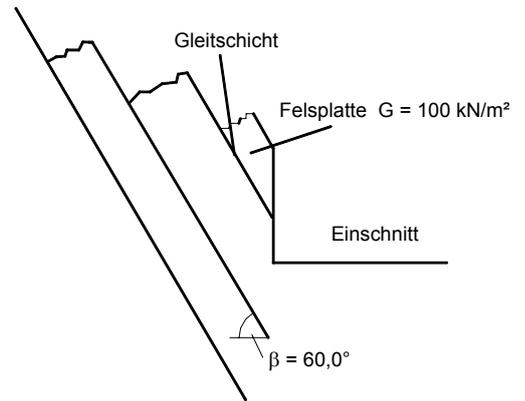


Bild J-1: Felskeil an Einschnittsböschung

J.4 Homogener, kohäsiver Boden

Bei bindigen Böden ist die maximal mögliche Böschungsneigung und -höhe nicht nur vom Reibungswinkel, sondern auch von der Kohäsion des Bodens abhängig. Zur Bemessung von einfachen, homogenen Böschungen ohne Grundwasser, an denen keine äußeren Lasten angreifen, stehen Bemessungsdiagramme nach TAYLOR zur Verfügung (siehe Bild O04.20 im Vorlesungsumdruck). Hieraus kann die mögliche Böschungshöhe h in Abhängigkeit des Böschungswinkels β und der effektiven Scherparameter ermittelt werden.

Beispiel: In einem halbfesten Schluff (UM: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $\varphi' = 30^\circ$; $c' = 10 \text{ kN/m}^2$) soll unter einem Böschungswinkel von $\beta = 45^\circ$ eine 6,0 m tiefe Baugrube hergestellt werden, Bild J-2. Es ist nicht mit Wasserandrang zu rechnen. Ist die Böschung standsicher?

Zur Anwendung des Bemessungsdiagramms müssen die Scherparameter mit den in DIN 1054 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert werden:

$$\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'}{\gamma_\varphi} ,$$

$$c'_d = \frac{c'}{\gamma_c}$$

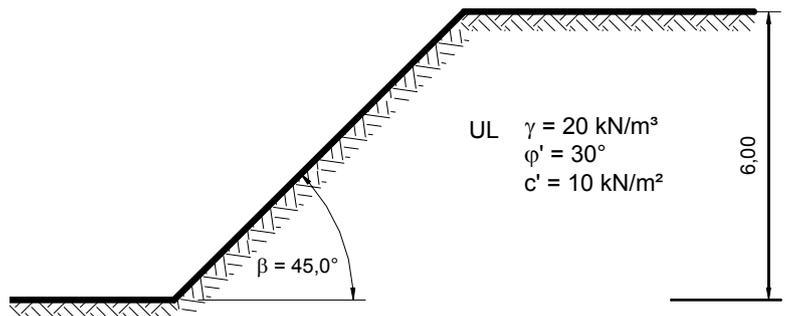


Bild J-2: Baugrubenböschung

$\gamma_\varphi = \gamma_c = 1,15$ (Lastfall 2)

$$\varphi'_d = \arctan \frac{\tan 30^\circ}{1,15} = 26,7^\circ , \quad c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{10}{1,15} = 8,7 \text{ kN/m}^2$$

Durch Ablesen aus dem Diagramm ergibt sich für $\varphi'_d = 26,7^\circ$ und $\beta = 45^\circ$ eine erforderliche Standsicherheitszahl von $N \approx 28$.

Somit ergibt sich die maximal mögliche Böschungshöhe (für $\mu = 1$):

J.5.2 Ermittlung der Widerstände

Das widerstehende Moment setzt sich aus einem Reibungsanteil und einem Kohäsionsanteil zusammen:

$$R_M = R_\varphi \cdot r_\varphi + F_c \cdot r_c$$

Die Reibungskraft R_φ erhält man, indem man die Reaktionskraft Q in einen Anteil senkrecht zur Gleitlinie (N) und einen Anteil parallel zur Gleitlinie zerlegt (siehe Bild J-4). Für R_φ kann dann auch geschrieben werden:

$$R_\varphi = Q \cdot \sin\varphi$$

Q kann aus dem Kräfteck F , F_c , Q (Bild J-4) unter Verwendung des Kosinussatzes folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$Q = \sqrt{F^2 - 2 \cdot F \cdot F_c \cdot \sin\omega + F_c^2}$$

Dabei ist ω der Winkel zwischen der Wirkungslinie von F und der Winkelhalbierenden des Gleitkreises (siehe Bild J-3).

F_c ist die Kohäsionskraft: $F_c = 2 \cdot c \cdot r \cdot \sin\alpha_r$

Damit ergibt sich für das widerstehende Moment:

$$R_M = \sqrt{F^2 - 2 \cdot F \cdot F_c \cdot \sin\omega + F_c^2} \cdot \sin\varphi \cdot r_\varphi + F_c \cdot r_c$$

Für die Hebelarme gilt:

- Hebelarm der Kohäsionskraft: $r_c = r \cdot \frac{\alpha_r \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin\alpha_r}$
- Hebelarm der Reibungskraft: $r_\varphi = \xi \cdot r$

ξ berücksichtigt dabei die Verteilung der Normalspannungen längs der Gleitlinie:

- punktförmige Verteilung: $\xi = 1$
- sichelförmige Verteilung: $\xi = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{\alpha_r \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin\alpha_r} \right)$

J.5.3 Beispiel

Die in J.4 betrachtete Böschung soll zusätzlich mit einer Verkehrslast p belastet werden. Es ist die Standsicherheit der Böschung zu untersuchen (Bild J-5).

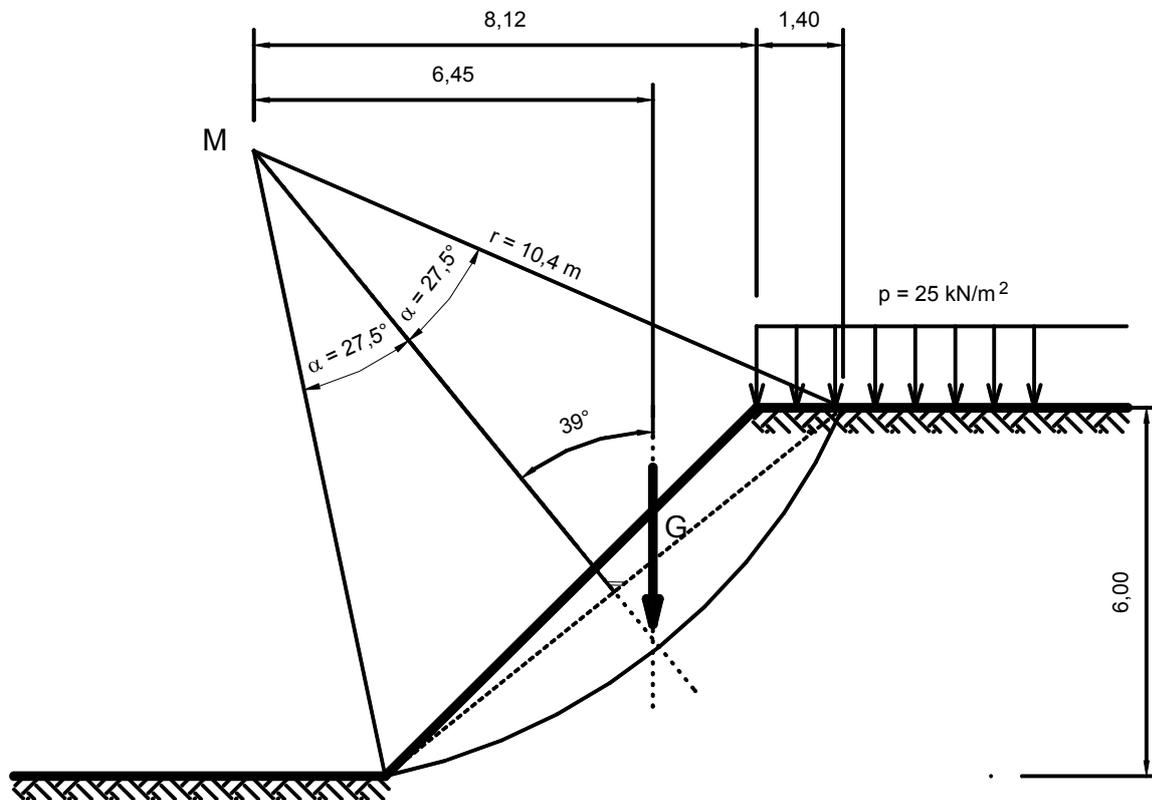


Bild J-5: maßgebender Gleitkreis (M 1 : 125)

Einwirkungen

Aus der Geometrie kann das Eigengewicht des Bruchkörpers bestimmt werden:

$$E_{G,k} = \gamma \cdot (A_{\text{Segment}} + A_{\text{Dreieck}}) = 20 \cdot (7,61 + 4,20) = 236,2 \text{ kN/m}$$

Die Verkehrslast beträgt:

$$E_{Q,k} = 25 \cdot 1,4 = 35 \text{ kN/m}$$

Für den Bemessungswert der Einwirkungen ergibt sich:

$$F = E_{G,k} \cdot \gamma_G + E_{Q,k} \cdot \gamma_Q = 236,2 \cdot 1,0 + 35 \cdot 1,2 = 278,2 \text{ kN/m}$$

Das abtreibende Moment beträgt:

$$E_M = F \cdot e = 236,2 \cdot 1,0 \cdot 6,45 + 35 \cdot 1,2 \cdot 8,82 = 1893,9 \text{ kNm/m}$$

Widerstände

Zunächst werden die Scherparameter φ' und c' abgemindert:

$$\varphi'_{d} = \arctan \frac{\tan 30^{\circ}}{1,15} = 26,7 \quad , \quad c'_{d} = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{10}{1,15} = 8,7 \text{ kN/m}^2$$

Für die in der Gleitlinie wirkende Reaktionskraft Q gilt:

$$Q = \sqrt{F^2 - 2 \cdot F \cdot F_c \cdot \sin \omega + F_c^2}$$

mit

$$F = 278,2 \text{ kN/m}$$

$$F_c = 2 \cdot c \cdot r \cdot \sin \alpha_r = 2 \cdot 8,7 \cdot 10,4 \cdot \sin 27,5^{\circ} = 83,6 \text{ kN/m}$$

$$\omega = 39^{\circ}$$

ergibt sich für Q:

$$Q = \sqrt{278,2^2 - 2 \cdot 278,2 \cdot 83,6 \cdot \sin 39^{\circ} + 83,6^2} = 234,8 \text{ kN/m}$$

Widerstehendes Moment:

$$R_M = Q \cdot \sin \varphi \cdot r_{\varphi} + F_c \cdot r_c = Q \cdot \sin \varphi \cdot 0,5 \cdot \left(1 + \frac{\alpha_r \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin \alpha_r} \right) \cdot r + F_c \cdot r \cdot \frac{\alpha_r \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin \alpha_r}$$

$$R_M = 234,8 \cdot \sin 26,7^{\circ} \cdot 0,5 \cdot \left(1 + \frac{27,5 \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin(27,5^{\circ})} \right) \cdot 10,4 + 83,6 \cdot 10,4 \cdot \frac{27,5 \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin(27,5^{\circ})} =$$
$$= 1118,8 + 903,4 = 2022,2 \text{ kN/m}$$

Nachweis

$$\mu = \frac{E_M}{R_M} = \frac{1894}{2022} = 0,94 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

J.6 Kreiszyllindrische Bruchfugen – Lamellenverfahren

J.6.1 Allgemeines

Beim Lamellenverfahren nach Krey/Bishop teilt man den Bruchkörper in einzelne senkrechte Lamellen ein, an denen jeweils Gleichgewicht bestehen muss. Hierbei treten außer den Lasten aus Eigengewicht und z.B. Verkehr sowie den Scherkräften in der geprüften Gleitebene zusätzliche Erddruckkräfte an den Lamellenflanken auf, die bei der Betrachtung berücksichtigt werden müssen. Die Richtung und Verteilung der Erddruckkräfte ist unbekannt – beim Verfahren von Krey - Bishop werden diese Kräfte horizontal angenommen.

Zur Berechnung der unbekannt Kräfte und des Ausnutzungsgrades steht neben dem Kräftegleichgewicht in vertikaler und tangentialer Richtung an der Einzel-lamelle das Momentengleichgewicht zur Verfügung. Setzt man hierbei die Summe der Momente aus Erddruckkräften zu null, so kann der Ausnutzungsgrad μ einfach errechnet werden:

$$\mu = \frac{\text{mobilisierte Scherfestigkeit}}{\text{Entwurfsgröße der Scherfestigkeit}}$$

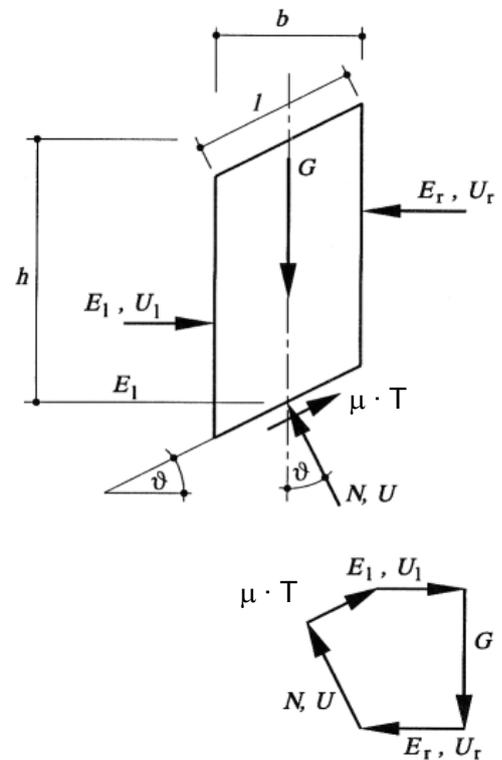


Bild J-6: Kräfte an der Einzella-melle

Es gilt:

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

bzw. bei Berechnung mit der undrännierten Scherfestigkeit c_u :

$$\mu = \frac{\sum (G_i + P_i) \cdot \sin \vartheta_i}{\sum c_{u,i,d} \cdot b_i / \cos \vartheta_i}$$

Unter den Kräften P_i sind in diesem Zusammenhang oberhalb der Böschung angreifende Vertikal-lasten zu verstehen, die bei Berechnungen im Endzustand mit in die Lamelleneigengewichte ein-gerechnet werden können. Während die Lamelleneigengewichte als charakteristische Größen ein-zusetzen sind, müssen die Kräfte $P_{i,d}$ durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht werden.

Die Scherparameter c' und φ' müssen durch Teilsicherheitsbeiwerte abgemindert werden.

Einwirkende und widerstehende Kräfte aus Ankern, Verbauwänden, Pfählen o. ä. werden ge-meinsam über den Anteil M_d im Zähler der Gleichung berücksichtigt. Die Kräfte werden mit ihren Hebelarmen um den Kreismittelpunkt multipliziert, durch den Radius des maßgebenden Gleit-

Bei EDV-Berechnungen verwendet man eine ausreichend feine Lamelleneinteilung (typisch $n = 20$) und prüft gegebenenfalls, ob eine feinere Einteilung das Ergebnis noch beeinflusst.

J.6.2 Homogene Böschung

Die bereits in den Abschnitten J.4 und J.5.3 betrachtete Böschung soll nun mit dem Lamellenverfahren untersucht werden, Bild J-8.

Zuerst werden die Lamellen eingeteilt: Eine Lamellengrenze liegt an der Böschungsschulter, die anderen werden mit gleichem Abstand $b = 1,50$ m angeordnet, so dass sich insgesamt 5 Lamellen ergeben (Hinweis: Die Lamelle 5 besitzt eine Breite von 1,4 m!).

Berechnung der Gewichte der Lamellen:

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot 1,05 \cdot 20 = 15,8 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot (1,05 + 1,85) \cdot 20 = 43,5 \text{ kN/m}$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot (1,85 + 2,35) \cdot 20 = 63,0 \text{ kN/m}$$

$$G_4 = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot (2,35 + 2,30) \cdot 20 = 69,8 \text{ kN/m}$$

$$G_5 = \frac{1}{2} \cdot 1,4 \cdot 2,30 \cdot 20 = 32,2 \text{ kN/m}$$

Anmerkung: Der Teilsicherheitsbeiwert für das Eigengewicht ist 1,0.

Zur Ermittlung des widerstehenden Momentes müssen die Scherparameter φ' und c' abgemindert werden:

$$\varphi'_d = \arctan \frac{\tan 30^\circ}{1,15} = 26,7^\circ, \quad c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{10}{1,15} = 8,7 \text{ kN/m}^2$$

Das Aufstellen des Momentengleichgewichts erfolgt sinnvollerweise mit einer Tabelle. Die Winkel ϑ werden aus der Zeichnung herausgemessen; als Startwert wird ein Ausnutzungsgrad $\mu = 1,0$ angenommen.

Lamelle	G [kN/m]	b [m]	ϑ_i [°] gemessen	c'_d [kN/m ²]	φ'_{d} [°]	$\frac{G \cdot \tan \varphi'_d + b \cdot c'_d}{\cos \vartheta + \mu \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi'_d}$	G · sin ϑ_i
1	15,8	1,5	16,0	8,7	26,7	19,1	4,3
2	43,5	1,5	25,0	8,7	26,7	31,2	18,4
3	63,0	1,5	34,5	8,7	26,7	40,3	35,7
4	69,8	1,5	45,5	8,7	26,7	45,4	49,7
5	32,2	1,4	59,0	8,7	26,7	30,0	27,6
Σ						<u>166,0</u>	<u>135,8</u>

$$\mu = \frac{135,8}{166,0} = 0,82 < 1,0$$

Der Ausnutzungsgrad liegt unter 1,0, der Nachweis ist also erfüllt. Zur Berechnung des exakten Ausnutzungsgrades müssten weitere Iterationen erfolgen.

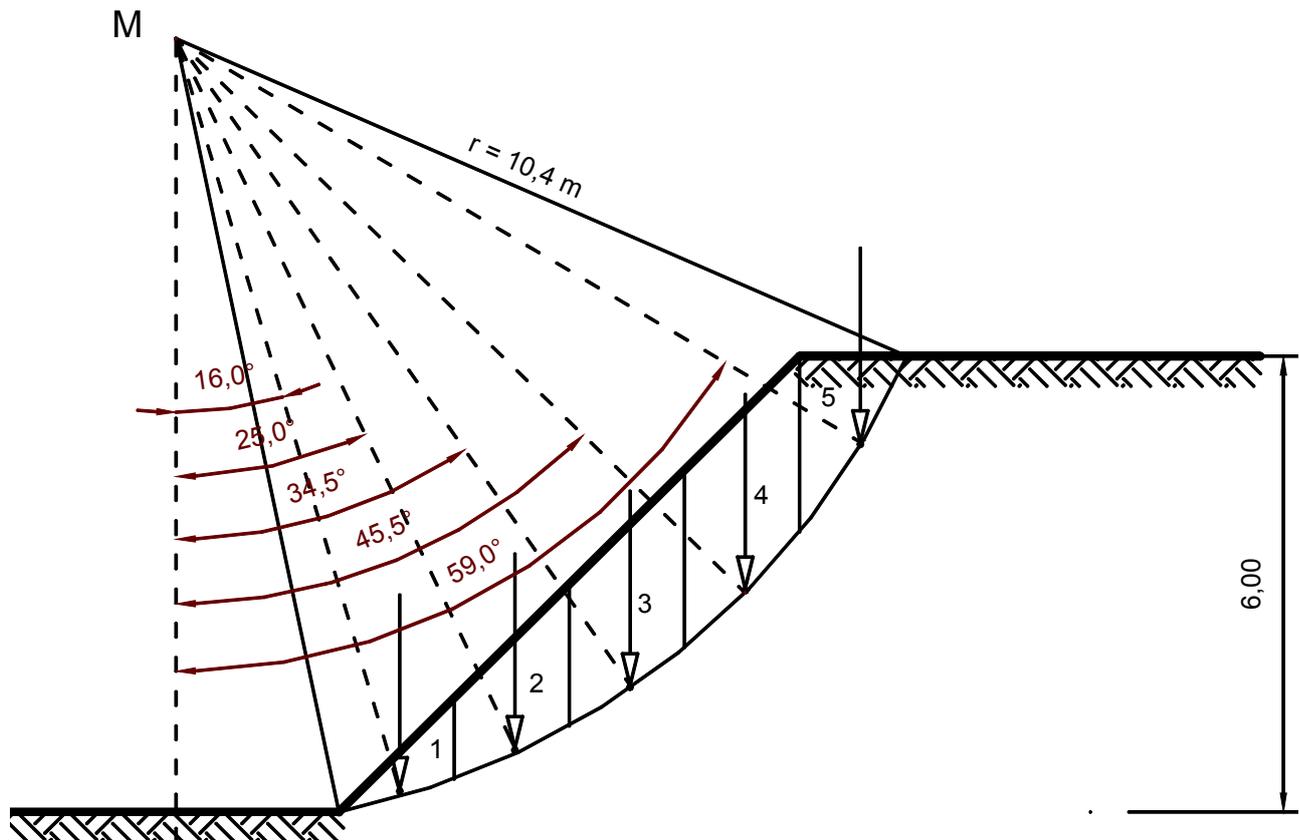


Bild J-8: Lamellenverfahren – homogene Böschung M 1:100

J.6.3 Berücksichtigung von Wasserdruck

Zur Berücksichtigung von in der Böschung anstehendem Grundwasser stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

Die Berechnung kann oberhalb der Prüfgleitfläche mit **totalen** Spannungen (Wichte γ_r) durchgeführt werden. Hierbei reduziert der in der „Bruchfuge“ wirksame Porenwasserdruck die totalen Normalspannungen auf effektive Spannungen, aus denen sich der Scherwiderstand errechnet (siehe [Bild O04.150](#) im Vorlesungsumdruck).

Alternativ ist eine Betrachtung der **effektiven** Spannungen oberhalb der Prüfgleitfläche möglich, indem dort mit γ' gerechnet wird. Hierbei werden die vertikalen Anteile aus dem Wasserdruck bereits im Eigengewicht des Bodens in jeder Lamelle, die horizontalen Anteile über ein zusätzliches abtreibendes Moment am Gesamtprüfkörper berücksichtigt (siehe [Bild O04.130](#) im Vorlesungsumdruck).

In [Bild J-9](#) ist eine unter $\beta = 30^\circ$ geneigte Böschung mit einem möglichen Bruchkörper dargestellt. Das Grundwasser steht 1,0 m unter GOK an; in den oberen 4,0 m steht schluffiger Kies an, darunter leichtplastischer Schluff. Die Bodenparameter sind im Bild angegeben.

J.6.3.1 Berechnung mit totalen Spannungen

- Berechnung der Eigengewichte der Lamellen:

Zur Berechnung der Eigengewichte wird oberhalb des Grundwassers mit der Feuchtwichte γ , unterhalb mit der Wichte bei vollständiger Sättigung $\gamma_r = \gamma' + \gamma_w$ gerechnet.

$$\gamma_{r, GU} = 10,5 + 10 = 20,5 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{r, UL} = 10 + 10 = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot 3,10 \cdot 3,45 \cdot 20 = 107 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot 3,90 \cdot [(3,10 + 3,45) \cdot 20 + 1,05 \cdot 20,5 + 1,20 \cdot 20] = 344 \text{ kN/m}$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \cdot 3,05 \cdot [(3,45 + 3,00) \cdot 20 + (1,05 + 1,70) \cdot 20,5 + (1,20 + 2,30) \cdot 20] = 389 \text{ kN/m}$$

$$G_4 = \frac{1}{2} \cdot 3,15 \cdot [(3,00 + 1,95) \cdot 20 + (1,70 + 2,30) \cdot 20,5 + (2,30 + 1,70) \cdot 20] = 411 \text{ kN/m}$$

$$G_5 = \frac{1}{2} \cdot 3,20 \cdot [1,95 \cdot 20 + (2,30 + 2,70) \cdot 20,5 + (1,70 + 1,30) \cdot 20] = 322 \text{ kN/m}$$

$$G_6 = \frac{1}{2} \cdot 2,95 \cdot [2,70 \cdot 20,5 + (1,30 + 1,00) \cdot 20] = 150 \text{ kN/m}$$

$$G_7 = \frac{1}{2} \cdot 0,70 \cdot 20 = 7,0 \text{ kN/m}$$

- Berechnung der Porenwasserdrücke an den einzelnen Lamellen: Näherungsweise wird für jede Lamelle der Porenwasserdruck in der Mitte der Gleitfuge ermittelt. Später wird dieser Wert mit der Lamellenbreite multipliziert und vom Lamelleneigengewicht abgezogen. Durch die Annahme einer konstanten Porenwasserdruckverteilung in der Lamelle ergibt sich ein gleicher Hebelarm für die Eigengewichte und Porenwasserdrücke, was die nachfolgende Berechnung maßgeblich vereinfacht.

Der Porenwasserdruck wird ebenso wie das Eigengewicht der Lamellen mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G = 1,0$ erhöht.

$$u_1 = 1,55 \cdot 10 = 15,5 \text{ kN/m}^2$$

$$u_2 = 3,8 \cdot 10 = 38,0 \text{ kN/m}^2$$

$$u_3 = 4,6 \cdot 10 = 46,0 \text{ kN/m}^2$$

$$u_4 = 4,5 \cdot 10 = 45,0 \text{ kN/m}^2$$

$$u_5 = 3,45 \cdot 10 = 34,5 \text{ kN/m}^2$$

$$u_6 = 1,4 \cdot 10 = 14,0 \text{ kN/m}^2$$

- Abminderung der Scherparameter (LF 1):

$$\text{GU: } \varphi'_d = \arctan \frac{\tan 32,5^\circ}{1,25} = 27,0^\circ, \quad c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{5}{1,25} = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{UL: } \varphi'_d = \arctan \frac{\tan 30^\circ}{1,25} = 24,8^\circ, \quad c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{10}{1,25} = 8,0 \text{ kN/m}^2$$

- Weitere Berechnung mit Tabelle, Startwert $\mu = 1,0$

Lamelle	G [kN/m]	u [kN/m]	b [m]	ϑ [°]	c'_d [kN/m ²]	φ'_d [°]	$\frac{(G-u \cdot b) \cdot \tan \varphi'_d + b \cdot c'_d}{\cos \vartheta + \mu \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi'_d}$	G · sin ϑ
1	107,0	15,5	3,45	-18,0	8	24,8	64,7	-33,1
2	344,0	38	3,90	-4,5	8	24,8	126,7	-27,0
3	389,0	46	3,05	7,5	8	24,8	132,5	50,8
4	411,0	45	3,15	19,0	8	24,8	136,5	133,8
5	322,0	34,5	3,20	31,5	8	24,8	112,8	168,2
6	150,0	14	2,95	45,5	4	27	63,1	107,0
7	7,0	0	0,70	55,0	4	27	6,4	5,7
Σ							642,7	405,5

$$\mu = \frac{405,5}{642,7} = 0,63$$

Der nächste Iterationsschritt wird mit $\mu = 0,63$ durchgeführt. Nach der zweiten Iteration ergibt sich ein Ausnutzungsgrad von $\mu = 0,61$. Das bedeutet, dass die Bemessungswerte der Scherwiderstände nur zu 61% beansprucht werden; die Böschung ist dauerhaft standsicher.

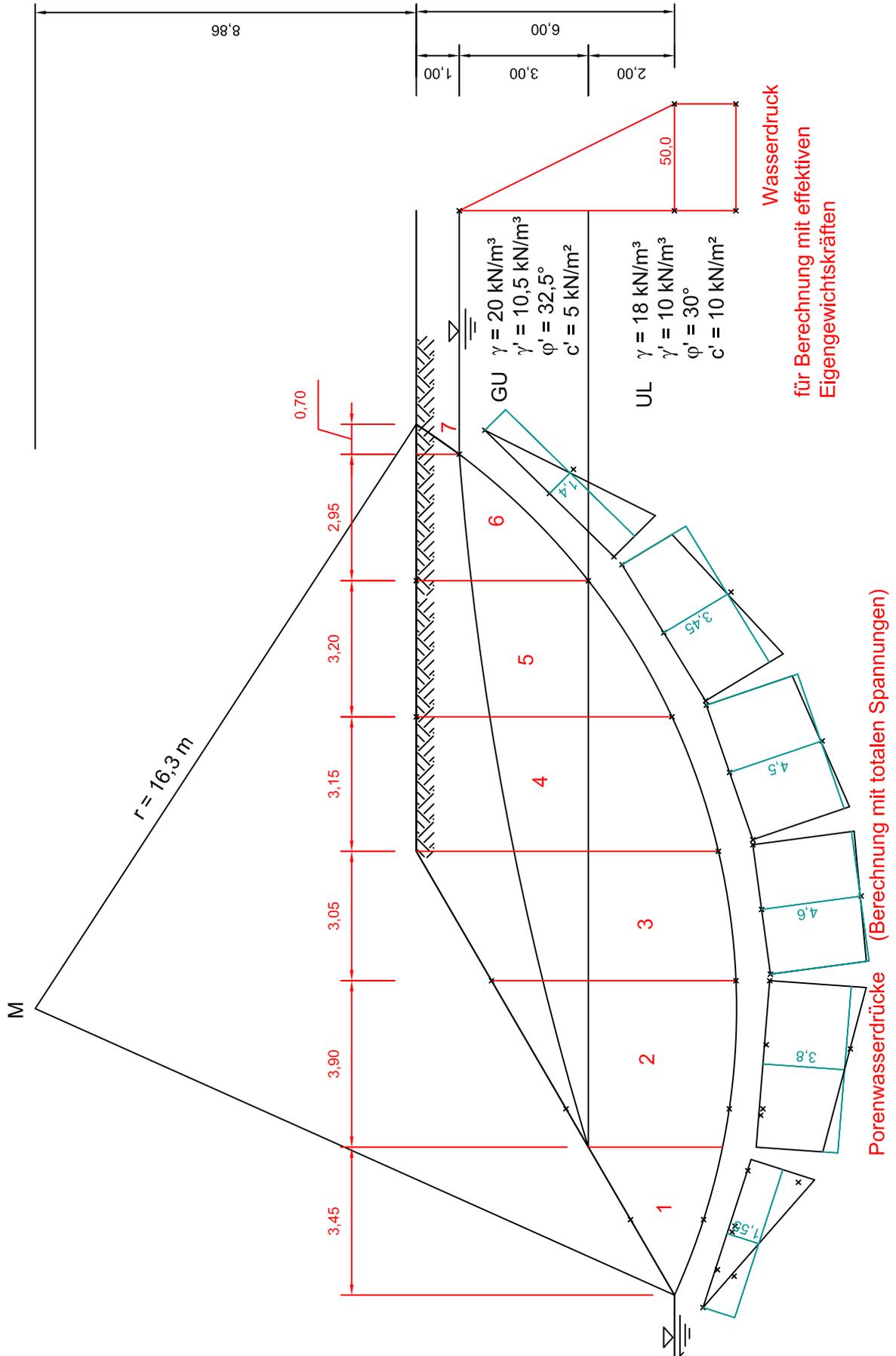


Bild J-9: Lamellenverfahren - Berücksichtigung von Grundwasser M 1 : 150

J.6.3.2 Berechnung mit effektiven Spannungen

- Berechnung der Eigengewichte der Lamellen:

Zur Berechnung der Eigengewichte wird oberhalb des Grundwassers mit der Feuchtwichte γ , unterhalb mit der Wichte unter Auftrieb γ' gerechnet.

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot 3,10 \cdot 3,45 \cdot 10 = 53,5 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot 3,90 \cdot [(3,10 + 3,45) \cdot 10 + 1,05 \cdot 10,5 + 1,20 \cdot 20] = 196 \text{ kN/m}$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \cdot 3,05 \cdot [(3,45 + 3,00) \cdot 10 + (1,05 + 1,70) \cdot 10,5 + (1,20 + 2,30) \cdot 20] = 219 \text{ kN/m}$$

$$G_4 = \frac{1}{2} \cdot 3,15 \cdot [(3,00 + 1,95) \cdot 10 + (1,70 + 2,30) \cdot 10,5 + (2,30 + 1,70) \cdot 20] = 270 \text{ kN/m}$$

$$G_5 = \frac{1}{2} \cdot 3,20 \cdot [1,95 \cdot 10 + (2,30 + 2,70) \cdot 10,5 + (1,70 + 1,30) \cdot 20] = 211 \text{ kN/m}$$

$$G_6 = \frac{1}{2} \cdot 2,95 \cdot [2,70 \cdot 10,5 + (1,30 + 1,00) \cdot 20] = 110 \text{ kN/m}$$

$$G_7 = \frac{1}{2} \cdot 0,70 \cdot 20 = 7,0 \text{ kN/m}$$

- Wasserdruck:

$$W_k = 10 \cdot (\frac{1}{2} \cdot 5^2 + 5 \cdot 1,43) = 125 + 71,5 = 196,5 \text{ kN/m}$$

$$M_w = 125 \cdot (9,86 + \frac{2}{3} \cdot 5,0) + 71,5 \cdot (9,86 + 5,0 + \frac{1}{2} \cdot 1,43) = 1649,2 + 1113,6 = 2762,8 \text{ kNm/m}$$

- Startwert $\mu = 1,0$

Lamelle	G [kN/m]	u [kN/m]	b [m]	ϑ [°]	c'_d [kN/m ²]	$\varphi'_{i,d}$ [°]	$\frac{(G-u \cdot b) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b \cdot c'_d}{\cos \vartheta + \mu \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi'_{i,d}}$	G · sin ϑ
1	53,5		3,45	-18,0	8	24,8	64,7	-16,5
2	196,0		3,90	-4,5	8	24,8	126,8	-15,4
3	219,0		3,05	7,5	8	24,8	119,4	28,6
4	270,0		3,15	19,0	8	24,8	136,8	87,9
5	211,0		3,20	31,5	8	24,8	112,5	110,2
6	110,0		2,95	45,5	4	27	63,7	78,5
7	7,0		0,70	55,0	4	27	6,4	5,7
					Σ		630,4	279,0

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i + \frac{M}{r}}{\sum [(G_i - b_i \cdot u_i) \cdot \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}] / [\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}]} = \frac{279,0 + \frac{2762,8}{16,3}}{630,4} = 0,71$$

Der nächste Iterationsschritt wird mit $\mu = 0,71$ durchgeführt. Nach der zweiten Iteration ergibt sich ein Ausnutzungsgrad von $\mu = 0,69 \leq 1,0$, die Böschung ist dauerhaft standsicher.

J.6.4 Berücksichtigung von äußeren Lasten im Anfangs- und Endzustand

Greifen an der Böschungsschulter zusätzliche äußere Lasten z.B. aus einem Gebäude an, so müssen diese bei der Berechnung der Standsicherheit der Böschung berücksichtigt werden. Ist die Last schon sehr lange aufgebracht (Endzustand) so sind im Baugrund keine Porenwasserüberdrücke mehr zu erwarten – die Last kann einfach zu den Lamelleneigengewichten hinzuaddiert werden. Gleiches gilt für den Anfangszustand einer Böschung aus nichtbindigen Böden.

In einer Böschung aus bindigen Böden entstehen bei Aufbringen einer Spannung anfangs Porenwasserüberdrücke. Das heißt, es werden keine zusätzlichen rückhaltenden Kräfte in der Scherfuge mobilisiert. Zur Berechnung eines solchen Zustandes stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

- Berechnung mit effektiven Scherparametern: Es werden effektive Spannungen betrachtet. Scherkräfte werden nur aufgrund des Bodeneigengewichtes verursacht, die aufgebrachte Last wird nur als abtreibendes Moment berücksichtigt.
- Berechnung mit totalen Scherparametern: Es werden totale Spannungen betrachtet. Bei den rückhaltenden Kräften darf nur die undrained Scherfestigkeit angesetzt werden; die aufgebrachte Last wird aber in den Lamelleneigengewichten berücksichtigt. Die Gleichung für den Ausnutzungsgrad vereinfacht sich dann zu:

$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i}{\sum c_{ui,d} \cdot b_i / \cos \vartheta_i}$$

Bei diesem Verfahren ist keine Iteration notwendig.

J.6.4.1 Anfangszustand mit effektiven Scherparametern

Bei einer Baugrubenböschung wird auf die Böschungsschulter ein Kran mit einer Flächenlast von $p = 40 \text{ kN/m}^2$ aufgestellt (Bild J-10).

Ist die Böschung anfangs standsicher?

- Abminderung der Scherparameter (LF 2):

$$\varphi'_d = \arctan \frac{\tan 30,0^\circ}{1,15} = 26,7^\circ, \quad c'_d = \frac{c'}{\gamma_c} = \frac{10}{1,15} = 8,7 \text{ kN/m}^2$$

- Berechnung der Eigengewichte der Lamellen:

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 2,0 \cdot 20 = 40,0 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot (2,0 + 3,65) \cdot 2,0 \cdot 20 = 113 \text{ kN/m}$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \cdot (3,65 + 4,90) \cdot 2,0 \cdot 20 = 171 \text{ kN/m}$$

$$G_4 = \frac{1}{2} \cdot (4,90 + 3,20) \cdot 2,50 \cdot 20 = 203 \text{ kN/m}$$

$$G_5 = \frac{1}{2} \cdot 3,20 \cdot 2,50 \cdot 20 = 80,0 \text{ kN/m}$$

- Moment aus Kranlast (Bemessungswert)

$$M = \gamma_Q \cdot p \cdot 5,0 \cdot (4,95 + \frac{1}{2} \cdot 5,0) = 1,2 \cdot 40 \cdot 5,0 \cdot (4,95 + \frac{1}{2} \cdot 5,0) = 1788 \text{ kNm/m}$$

- Startwert $\mu = 1,0$

Lamelle	G [kN/m]	u [kN/m]	b [m]	ϑ [°]	c'_d [kN/m ²]	φ'_{d} [°]	$\frac{(G-u \cdot b) \cdot \tan \varphi'_d + b \cdot c'_d}{\cos \vartheta + \mu \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi'_d}$	$G \cdot \sin \vartheta$
1	40,0		2,00	-0,5	8,7	26,7	37,7	-0,3
2	113,0		2,00	10,0	8,7	26,7	69,2	19,6
3	171,0		2,00	20,5	8,7	26,7	92,9	59,9
4	203,0		2,50	34,0	8,7	26,7	111,5	113,5
5	80,0		2,50	52,0	8,7	26,7	61,3	63,0
Σ							<u>372,6</u>	<u>255,7</u>

$$\mu = \frac{255,7 + \frac{1788}{11,2}}{372,6} = 1,11$$

Nach weiteren Iterationen ergibt sich der Ausnutzungsgrad zu $\mu = 1,14 > 1,0$; die ausreichende Standsicherheit ist nicht gegeben.

J.6.4.2 Anfangszustand mit totalen Scherparametern

- Ermittlung der Eigengewichte: Bei den Lamellen 4 und 5 muss der Bemessungswert der Flächenlast zum Eigengewicht addiert werden.

$$G_4' = 203,0 + 2,5 \cdot p \cdot \gamma_Q = 203,0 + 2,5 \cdot 40 \cdot 1,2 = 323,0 \text{ kN/m}$$

$$G_5' = 80,0 + 2,5 \cdot 40 \cdot 1,2 = 200,0 \text{ kN/m}$$

- Abminderung der Scherparameter:

$$c_{u,d} = \frac{c_u}{\gamma_c} = \frac{30}{1,15} = 26,1 \text{ kN/m}^2$$

Lamelle	G [kN/m]	b [m]	ϑ [°]	$c_{u,d}$ [kN/m ²]	$\frac{c_{u,d} \cdot b}{\cos \vartheta}$	$G \cdot \sin \vartheta$
1	40,0	2,00	-0,5	26,1	52,2	-0,3
2	113,0	2,00	10,0	26,1	53,0	19,6
3	171,0	2,00	20,5	26,1	55,7	59,9
4	323,0	2,50	34,0	26,1	78,7	180,6
5	200,0	2,50	52,0	26,1	106,0	157,6
Σ					<u>345,6</u>	<u>417,4</u>

$$\mu = \frac{417,4}{345,6} = 1,21; \text{ die ausreichende Standsicherheit ist nicht gegeben.}$$

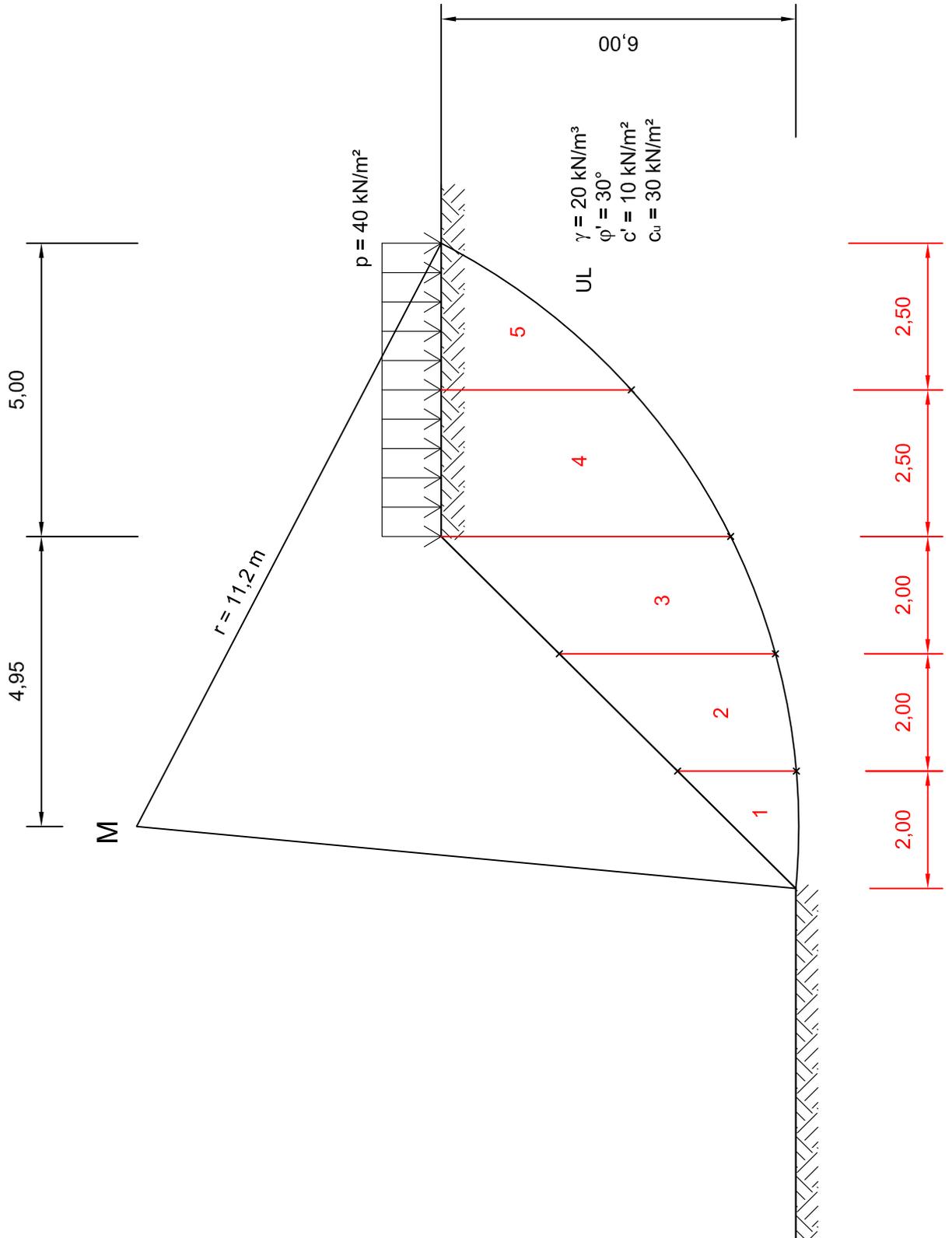


Bild J-10: Lamellenverfahren - Anfangszustand M 1:100