

LBDiR Dr.-Ing. Bernd Schuppener, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Das Teilsicherheitskonzept in der Geotechnik

1 Einführung

Den Eurocodes verdanken wir, dass in Europa im gesamten Bauwesen in Zukunft die rechnerischen Untersuchungen von Grenzzuständen der Tragfähigkeit im gleichen Format durchgeführt werden, indem nachgewiesen wird, dass der Bemessungswert E_d der Beanspruchungen nicht größer wird als der Bemessungswert R_d der Widerstände:

$$E_d \leq R_d$$

Leider endete die Gemeinsamkeit bei den europäischen Geotechnikern bei dieser Ungleichung, da sich unüberbrückbare Differenzen bei der Frage ergaben, wie die Bemessungswerte der Beanspruchungen und der Widerstände bei den Grenzzuständen der Tragfähigkeit des Bodens zu ermitteln sind.

Die Schwierigkeiten bei der Einigung auf eine einheitliche Formulierung der Grenzzustandsgleichungen für Bruchzustände im Boden haben ihre Ursache darin, dass in der Geotechnik eine klare Trennung von Beanspruchungen und Widerständen nur in Ausnahmefällen möglich ist, denn

- in vielen Fällen sind die Einwirkungen des Baugrunds auch von seinem Widerstand abhängig - z. B. wird der aktive Erddruck von der Scherfestigkeit in der Bruchfläche des aktiven Gleitkeils bestimmt - und
- in anderen Fällen ist der Widerstand des Baugrunds von der Größe der Einwirkung abhängig - z. B. wird der Gleitwiderstand durch die Größe der lotrechten Komponente der einwirkenden Sohldruckresultierenden bestimmt.

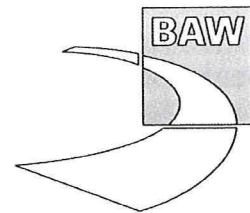
Diese Kopplung von Widerständen und Einwirkungen ist auf das Reibungsverhalten des Bodens zurückzuführen.

2 Grenzzustände

Wegen des Reibungsverhaltens des Bodens gibt es in der Geotechnik zwei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten, wie die Teilsicherheitsbeiwerte bei Grenzzuständen eines Bruchs im Boden eingeführt werden können:

- Man kann einmal die Teilsicherheitsbeiwerte auf die charakteristischen Werte der Einwirkungen und Widerstände anwenden. Ausgangspunkt sind die charakteristischen Werte der Einwirkungen F_k bzw. Beanspruchungen E_k und der Tragfähigkeit bzw. des Widerstands R_k des Baugrunds, die mit den charakteristischen Werten der Scherparameter φ'_k und c'_k bestimmt werden. Die Bemessungswerte der Beanspruchungen E_d aus dem Baugrund (Spannungen, Momente, Verformungen) werden ermittelt, indem die charakteristischen Werte der Einwirkungen $E_{k,i}(\varphi'_k, c'_k)$ mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{E,i}$ multipliziert werden:

$$E_{d,i} = E_{k,i}(\varphi'_k, c'_k) \cdot \gamma_{E,i}$$



Den Bemessungswert des Widerstands des Bodens erhält man, indem der charakteristische Wert des Widerstands R_k – der ebenfalls mit charakteristischen Bodenkenngrößen ermittelt wurde - durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_R für die Widerstände des Bodens dividiert wird:

$$R_d = R_k(\varphi'_k, c'_k) / \gamma_R$$

Grenzzustände, bei denen in der Grenzzustandsbedingung die Einwirkungen und Widerständen mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden, bezeichnet die DIN 1054 als Grenzzustand GZ 1B. Er wird bei allen Nachweisen zur Bemessung von Gründungen, z. B. den Nachweisen der Gleitsicherheit, der Grundbruchsicherheit, des Erdwiderstands und der Tragfähigkeit von Pfählen verwendet.

- Des weiteren kann man Teilsicherheitsbeiwerte γ_φ und γ_c für die Reibung und die Kohäsion auf die charakteristischen Scherparameter φ'_k und c'_k anwenden und Bemessungswerte $\tan\varphi'_d$ und c'_d für den Reibungsbeiwert und die Kohäsion ermitteln:

$$\tan \varphi'_d = \tan \varphi_k / \gamma_\varphi ;$$

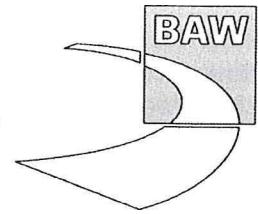
$$c'_d = c'_k / \gamma_c$$

Mit den Bemessungswerten der Scherparameter φ'_d und c'_d werden dann die Bemessungswerte E_d und R_d der Beanspruchungen und der Widerstände ermittelt. Diese Vorgehensweise empfiehlt sich in Fällen, wo die Einwirkungen zum größten Teil aus Eigenlasten des Bodens bestehen. Die Größe der Eigenlast des Bodens ist verhältnismäßig sicher zu bestimmen, während größere Unsicherheiten in den Scherparametern enthalten sind, so dass in solchen Fällen die Verwendung von Bemessungswerten der Scherparameter sinnvoller ist. Das Verfahren kommt beim Nachweis der Gesamtstandesicherheit von Böschungen und Geländesprüngen nach DIN 4084 zur Anwendung und wird in der DIN 1054 als Grenzzustand GZ 1C bezeichnet.

Darüber hinaus gibt es auch in der Geotechnik den Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit, der dadurch gekennzeichnet ist, dass keine Materialfestigkeit in Anspruch genommen wird. In der DIN 1054 wird er als Grenzzustand GZ 1A bezeichnet und zum Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegen Aufschwimmen und hydraulischen Grundbruch verwendet. Bei Grenzzuständen des Verlusts der Lagesicherheit werden in der Grenzzustandsbedingung die Bemessungswerte $E_{dst,d}$ und $E_{stb,d}$ der ungünstigen (destabilisierenden) und günstigen (stabilisierenden) Einwirkungen verglichen:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d}$$

Die Bemessungswerte der Einwirkungen ergeben sich aus dem Produkt der charakteristischen Werte der Einwirkungen mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{G,stb}$, $\gamma_{G,dst}$ und $\gamma_{Q,dst}$ für die günstigen und ungünstigen ständigen (Index G) und veränderlichen (Index Q) Einwirkungen.



3 Teilsicherheitsbeiwerte

Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich das Sicherheitsniveau des früheren Konzepts der globalen Sicherheiten bewährt hat, weil es nicht nur eine wirtschaftliche, sondern auch ausreichend sichere Bemessung von Gründungen ermöglichte. Aus diesem Grund ist man bei der quantitativen Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte von dem Grundsatz ausgegangen, dass bei der Umstellung auf das Nachweiskonzept der Eurocodes das bewährte Sicherheitsniveau erhalten bleiben sollte. Damit sollte auch vermieden werden, dass zusätzlich zu den Umstellungsschwierigkeiten auf die Eurocodes noch eine Diskussion über die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte ausgelöst wird.

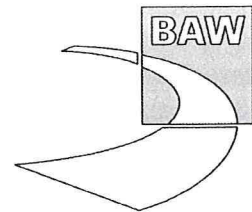
Das Sicherheitsniveau des Konzepts der globalen Sicherheiten lässt sich sehr einfach auf das Teilsicherheitskonzept übertragen. Man muss nur gewährleisten, dass das Produkt aus dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G,Q}$ für die Einwirkungen und dem Teilsicherheitsbeiwert γ_R für die Widerstände gleich dem globalen Sicherheitsbeiwert η_{global} ist:

$$\eta_{\text{global}} \approx \gamma_{G,Q} \cdot \gamma_R$$

Da im gesamten konstruktiven Ingenieurbau in Europa in Zukunft für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen die gleichen Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{G,Q}$ verwendet werden sollen, kann man aus dieser Gleichung sofort den Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand γ_R des Baugrunds ermitteln. Für den Grundbruchnachweis forderte die alte DIN 1054 z. B. für den Lastfall 1 eine globale Sicherheit von 2,0. Mit einem Mittelwert von $\gamma_{G,Q} = 1,40$ für die Teilsicherheitsbeiwerte von $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,50$ für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen ergibt sich dann ein Teilsicherheitsbeiwert für den Grundbruchwiderstand von $\gamma_{Gr} \approx 1,40$. In entsprechender Weise sind die Teilsicherheitsbeiwerte für den Erdwiderstand, den Gleitwiderstand usw. festgelegt worden.

Der EC 7-1 und auch die Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau sehen bei den Teilsicherheitsbeiwerten für die ständigen Einwirkungen eine Unterscheidung vor, ob die Einwirkung günstig oder ungünstig wirkt. Während die ungünstig wirkenden Einwirkungen mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_G = 1,35$ beaufschlagt werden, erhalten die günstig wirkenden Einwirkungen nur einen Teilsicherheitsbeiwert von nur $\gamma_{G,\text{günstig}} = 1,00$. Diese Unterscheidung zwischen günstigen und ungünstigen ständigen Einwirkungen gab es beim früheren globalen Sicherheitskonzept der Geotechnik nicht. Sie wird auch bei der neuen DIN 1054 nicht vorgenommen, weil dann die Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte an das seit Jahrzehnten bewährte Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzepts nicht möglich gewesen wäre.

Der EC 7-1 lässt offen, wann die Teilsicherheitsbeiwerte in der Rechnung eingeführt werden. Man kann - wie es auch im konstruktiven Ingenieurbau geschieht - die Teilsicherheitsbeiwerte gleich auf die Lasten - also auf die Einwirkungen - ansetzen und dann die Statik mit den Bemessungswerten durchführen. Man kann aber auch die statische Berechnung - wie bisher - mit den charakteristischen Belastungen durchführen und erst bei der Überprüfung der Grenzzustandsbedingung die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Beanspruchungen - also die Schnittkräfte - und die Widerstände des Baugrunds ansetzen. Beim Nachweis der Grundbruchsicherheit und der Gleitsicherheit kommt bei beiden Verfahren nicht das Gleiche heraus. Die DIN 1054 sieht eine Faktorisierung der Beanspruchungen vor, weil die Anpassung



der Teilsicherheitsbeiwerte an das seit Jahrzehnten bewährte Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzepts nur bei dieser Vorgehensweise möglich ist und der entwerfende Ingenieur so immer mit den real auftretenden Beanspruchungen rechnet.

4 Beispiel: Bemessung einer Winkelstützwand

4.1 Annahmen, Teilsicherheitsbeiwerte und Berechnungsverfahren

Es ist die Breite B der Fundamentplatte einer Winkelstützwand (siehe Bild 1) geotechnisch zu bemessen, d. h. nachzuweisen. Das Bemessungsmoment M_d im Anschnitt der Stützwand an die Fundamentplatte und die Bemessungsscherkraft S_d in der Stützwand werden bei diesem Beispiel nicht ermittelt. Die Breite B der Fundamentplatte wird bestimmt, indem nachgewiesen wird, dass eine zuvor gewählte Breite B die Grenzzustandsgleichungen mit den erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerten sowohl für den Grundbruch als auch für das Gleiten erfüllt. Auch auf die Darstellungen des Geländebruchnachweises und des Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird in diesem Beispiel verzichtet.

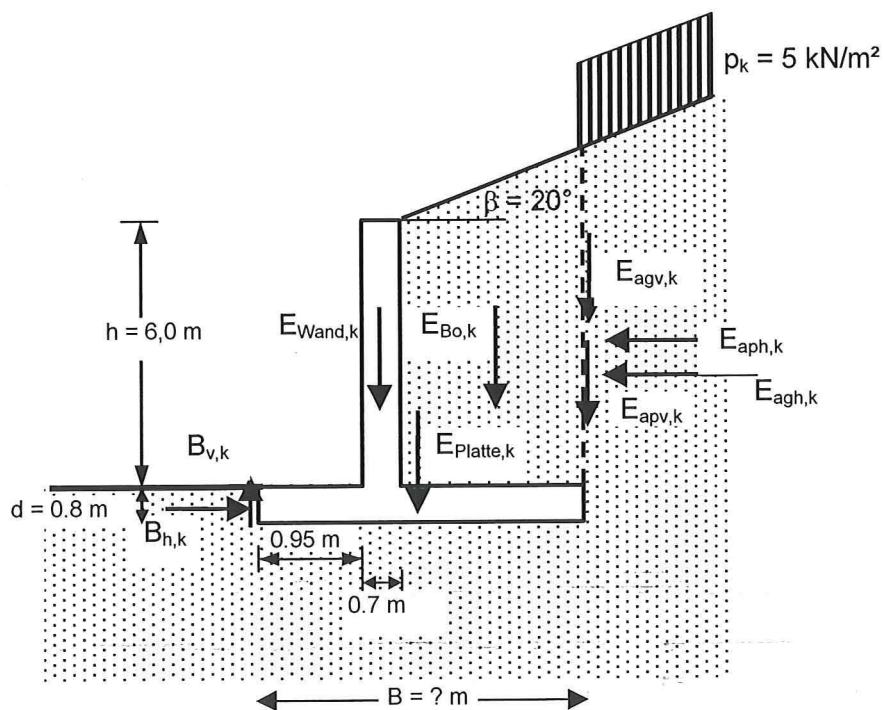
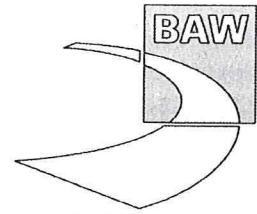


Bild 1: Einwirkungen auf die Winkelstützwand

Es werden folgende charakteristische Materialkennwerte angesetzt:

- Reibungswinkel des Bodens: $\varphi'_k = 32,5^\circ$
- Wichte des feuchten Bodens: $\gamma_k = 19 \text{ kN/m}^3$
- Wichte des Betons: $\gamma_{Be,k} = 25 \text{ kN/m}^3$



Es wird der Lastfall 1 untersucht. Die maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte sind (siehe Tabellen 2 und 3 der DIN 1054) für:

Ständige Einwirkungen (aktiver Erddruck und Eigengewicht des Bodens):	$\gamma_G = 1,35$
Ungünstige veränderliche Einwirkungen (aktiver Erddruck infolge von Auflasten):	$\gamma_Q = 1,50$
Widerstände des Bodens:	
Grundbruchwiderstand:	$\gamma_{Gr} = 1,40$
Widerstand gegen Gleiten:	$\gamma_{Gl} = 1,10$
passiver Erddruck:	$\gamma_{Ep} = 1,40$

Der Erddruck wird entsprechend DIN 4085-100 (1996) ermittelt. Beim Standsicherheitsnachweis wird entsprechend DIN 4085-100 Abschn. 7.14.1 der Erddruck auf eine fiktive vertikale Wand am Ende der Fundamentplatte der Winkelstützwand angesetzt. Die Richtung des Erddrucks wird parallel zur Neigung des Geländes angenommen ($\delta = \beta$). Die Tragfähigkeit des Bodens für den Grundbruch wird mit den Formeln der DIN 4017-100 ermittelt.

4.2 Charakteristische Einwirkungen

Die Einwirkungen auf die Winkelstützwand sind im Bild 1 dargestellt. Im ersten Schritt wird eine Breite $B = 3,60$ m angenommen. Daraus ergibt sich die Höhe der fiktiven Wand zu:

$$h_f = h + (B - 0,95 - 0,7) \cdot \tan \beta$$

$$h_f = 6,71 \text{ m}$$

Charakteristischer Erddruck aus Bodeneigengewicht (g) und Verkehrslast (p)

$$K_{ah,k} (\delta_a = \beta = 20^\circ, \varphi'_k = 32,5^\circ) = 0,34$$

$$E_{agh,k} = (h_f + d)^2 \cdot K_{ah,k} \cdot \gamma_k \cdot 0,5$$

$$E_{agh,k} = 182,2 \text{ kN/m}$$

$$E_{agv,k} = E_{ah,k} \cdot \tan(20^\circ) = 182,2 \cdot 0,36$$

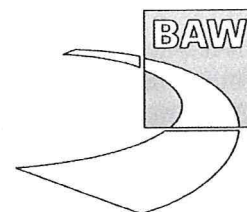
$$E_{agv,k} = 65,6 \text{ kN/m}$$

$$E_{aph,k} = (h_f + d) \cdot K_{ah,k} \cdot p_k = 7,51 \cdot 0,34 \cdot 5$$

$$E_{aph,k} = 12,8 \text{ kN/m}$$

$$E_{apv,k} = E_{aph,k} \cdot \tan(20^\circ) = 12,8 \cdot 0,36$$

$$E_{apv,k} = 4,6 \text{ kN/m}$$



Charakteristisches Bodeneigengewicht

$$G_{Bo,k} = (h + h_f) \cdot 0,5 \cdot (B - 0,95 - 0,7) \cdot \gamma_k$$

$$G_{Bo,k} = 235,5 \text{ kN/m}$$

Veränderliche Belastung

nicht maßgebend für die geotechnische Bemessung

Charakteristisches Eigengewicht des Betons

$$G_{Be,k} = G_{Platte,k} + G_{Wand,k}$$

$$G_{Be,k} = (d \cdot B + 0,7 \cdot h) \cdot \gamma_{Be,k}$$

$$G_{Be,k} = 72 + 105 = 177 \text{ kN/m}$$

Passiver Erddruck

$$K_{ph,k} (\varphi = 32,5^\circ, \delta_p = -(2/3)\varphi', \beta = 0) = 7,15$$

$$E_{ph,k} = d^2 \cdot K_{ph,k} \cdot \gamma_k \cdot 0,5 = 0,8^2 \cdot 7,15 \cdot 19 \cdot 0,5 = 43,5 \text{ kN/m}$$

$$E_{pv,k} = E_{ph,k} \cdot \tan(2/3)\varphi$$

$$E_{pv,k} = 43,5 \cdot 0,40$$

$$E_{pv,k} = 17,4 \text{ kN/m}$$

Nach 7.4.2(2) der DIN 1054 darf beim Grundbruchnachweis bei der Ermittlung der resultierenden charakteristischen Beanspruchung in der Sohlfläche an der Stirnseite des Fundaments eine Bodenreaktion von $B_k = 0,5 \cdot E_{p,k}$ angesetzt werden:

$$B_{h,k} = 0,5 \cdot E_{ph,k} = 21,8 \text{ kN/m}$$

$$B_{v,k} = 0,5 \cdot E_{pv,k} = 8,7 \text{ kN/m}$$

4.3 Charakteristische Beanspruchungen der Sohlfuge

Es wird die Summe der Momente M_k in Bezug auf die Symmetrieachse der Fundamentplatte ermittelt. Gegen den Uhrzeigersinn gerichtete Biegemomente sind positiv:

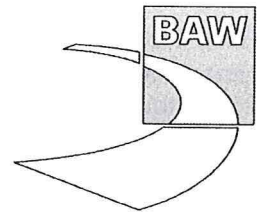
$$M_k = (E_{agh,k} \cdot (0,8 + h_f)/3) + E_{aph,k} \cdot (0,8 + h_f)/2 - (E_{agv,k} + E_{apv,k}) \cdot (B/2)$$

$$- G_{Bo,k} \cdot (B/2 - (B - 1,65)/2) + G_{Wand,k} \cdot ((B/2) - 1,30) - B_{ph,k} \cdot d/3 - B_{pv,k} \cdot B/2$$

$$M_k = (182,2 \cdot (0,8 + 6,71)/3) + 12,8 \cdot ((0,8 + 6,71)/2)$$

$$- (65,6 + 4,6) \cdot 1,80 - 235,5 \cdot 1,65/2 + 105 \cdot (1,80 - 1,30) - 21,8 \cdot 0,8/3 - 8,7 \cdot 1,8$$

$$M_k = 214,5 \text{ kNm/m}$$



Summe der charakteristischen Beanspruchungen senkrecht zur Sohlfläche:

$$N_k = E_{agv,k} + E_{apv,k} + G_{Bo,k} + G_{Wand,k} + G_{Platte,k} - B_{pv,k}$$

$$N_k = 65,6 + 4,6 + 235,5 + 105 + 72 - 8,7$$

$$N_k = 474,0 \text{ kN/m}$$

Charakteristische Horizontalkräfte für den Grundbruchnachweis:

$$H_k = E_{agh,k} + E_{aph,k} - B_{ph,k}$$

$$H_k = 182,2 + 12,8 - 21,8$$

Exzentrizität:

$$e_k = M_k / N_k = 214,5 / 474,0 = 0,45 \text{ m}$$

Reduzierte Fundamentbreite B' :

$$B' = B - 2 \cdot e_k = 3,60 - 0,90 = 2,70 \text{ m}$$

4.4 Nachweis der Grundbruchsicherheit

Alle Beiwerte der Gleichung für den Grundbruchwiderstand werden mit charakteristischen Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und charakteristischen Bodenkennwerten ermittelt.

Tragfähigkeitsbeiwerte:

$$N_d = e^{\pi \cdot \tan \varphi'} \tan^2 (45^\circ + \varphi'_k / 2) = 25$$

$$N_b = (N_d - 1) \cdot \tan \varphi'_k = 15$$

$$N_c = (N_d - 1) / \tan \varphi'_k = 37$$

Neigungsbeiwerte:

$$\tan(\delta) = H_k / N_k = 173,2 / 474,0 = 0,37$$

$$\kappa_d = (1 - 0,7 \cdot \tan \delta)^3$$

$$\kappa_d = 0,41$$

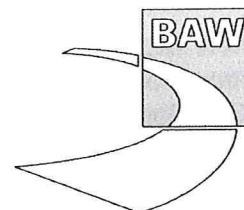
$$\kappa_b = (1 - \tan \delta)^3$$

$$\kappa_b = 0,25$$

$$\kappa_c = 0$$

Formbeiwerte:

$$v_b = v_d = v_c = 1,0$$



Charakteristischer Wert des Grundbruchwiderstandes:

$$R_{n,k} = B' \cdot 1,0 \cdot (c'_k \cdot N_c \cdot v_c \cdot \kappa_c + \gamma_k \cdot d \cdot N_d \cdot v_d \cdot \kappa_d + \gamma_k \cdot B' \cdot N_b \cdot v_b \cdot \kappa_b)$$

$$R_{n,k} = 2,70 \cdot (0 + 19 \cdot 0,8 \cdot 25 \cdot 1,0 \cdot 0,41 + 19 \cdot 2,70 \cdot 15 \cdot 1,0 \cdot 0,25)$$

$$R_{n,k} = 940,1 \text{ kN/m}$$

Bemessungswert des Grundbruchwiderstandes:

$$R_{n,d} = R_{n,k} / \gamma_{Gr} = 940,1 / 1,40$$

$$R_{n,d} = 671,5 \text{ kN/m}$$

Bemessungswert der Beanspruchung senkrecht zur Sohlfläche:

$$N_d = (E_{agv,k} + G_{Bo,k} + G_{Wand,k} + G_{Platte,k} - B_{pv,k}) \cdot \gamma_G + E_{apv,k} \cdot \gamma_Q^1$$

$$N_d = (65,6 + 235,5 + 105 + 72 - 8,7) \cdot 1,35 + 4,6 \cdot 1,5$$

$$N_d = 640,6 \text{ kN/m}$$

Nach Abschnitt 7.5.2 und Gleichung (19) ist beim Nachweis der Grundbruchsicherheit nachzuweisen, dass die Bedingung $N_d \leq R_{n,d}$ erfüllt ist:

$$N_d = 640,6 \text{ kN/m} < R_{n,d} = 671,5 \text{ kN}$$

Der Ausnutzungsgrad $1/f$ beträgt:

$$1/f = N_d / R_{n,d} = 0,95$$

Die Abmessungen gewährleisten einen ausreichenden Grundbruchwiderstand.

4.5 Gleitsicherheit

Zur Einhaltung einer ausreichenden Sicherheit gegen Gleiten ist nachzuweisen, dass die Bedingung

$$T_d \leq R_{t,d} + E_{p,d}$$

eingehalten ist. Dabei ist:

T_d der Bemessungswert der Beanspruchung parallel zur Fundamentsohlfläche

$R_{t,d}$ der Bemessungswert des Gleitwiderstandes

$E_{p,d}$ der Bemessungswert des Erwiderstandes parallel zur Sohlfläche an der Stirnseite des Fundaments.

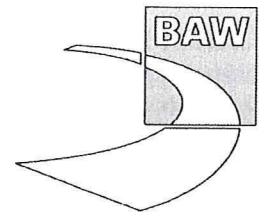
Bemessungswert der Beanspruchung parallel zur Sohlfläche:

Die größte Beanspruchung parallel zur Sohlfläche ergibt sich bei Ansatz der Verkehrslast auf der Böschung:

$$T_d = E_{agh,k} \cdot \gamma_G + E_{aph} \cdot \gamma_Q = 182,2 \cdot 1,35 + 12,8 \cdot 1,50$$

$$T_d = 265,2 \text{ kN/m}$$

¹) Nach DIN 1054, Abs. 10.3.1(6) sind eigentlich veränderliche Flächenlasten kleiner als 10 kN/m² als ständige Lasten zu behandeln. Hier wurde die Verkehrslast von $p_k = 5 \text{ kN/m}^2$ mit einem Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten beaufschlagt, um das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte zu demonstrieren.



Bemessungswert des Gleitwiderstandes:

$$R_{t,d} = N_k \cdot \tan \delta_{S,k} / \gamma_{GI}$$

dabei ist beim Nachweis der Gleitsicherheit:

N_k die senkrecht zur Sohlfläche wirkende Komponente der charakteristischen Beanspruchung der Sohlfläche (ohne eine Mitwirkung eines teilmobilisierten Erdwiderstand an der Stirnseite)

$\delta_{S,k}$ der charakteristische Wert des Sohlreibungswinkels, der nach 7.4.3 (3) bei Ortbetonfundamenten mit $\delta_{S,k} = \varphi'_k$ angesetzt werden kann.

$$R_{t,d} = (E_{agv,k} + E_{apv,k} + G_{Bo,k} + G_{Wand,k} + G_{Platte,k}) \cdot \tan \delta_{S,k} / \gamma_{GI}$$

$$R_{t,d} = (65,6 + 4,6 + 235,5 + 105 + 72) \cdot \tan 32,5^\circ / 1,10$$

$$R_{t,d} = 279,6 \text{ kN/m}$$

Bemessungswert des Erdwiderstands:

$$K_{ph,k} (\varphi = 32,5^\circ, \delta_p = -(2/3) \cdot \varphi, \beta = 0) = 7,15$$

$$E_{ph,k} = d \cdot K_{ph,k} \cdot \gamma_k \cdot d \cdot 0,5$$

$$E_{ph,k} = 0,8^2 \cdot 7,15 \cdot 19 \cdot 0,5 = 43,5 \text{ kN/m}$$

$$E_{ph,d} = E_{ph,k} / \gamma_{Ep}$$

$$E_{ph,d} = 43,5 / 1,40 = 31,1 \text{ kN/m}$$

Grenzzustandsgleichung:

$$T_d \leq R_{t,d} + E_{p,d}$$

$$265,2 \leq 279,6 + 31,1 = 310,7 \text{ kN/m}^2$$

Das Fundament besitzt eine ausreichende Gleitsicherheit. Der Ausnutzungsgrad $1/f$ beträgt:

$$1/f = T_d / R_{t,d} = 0,85$$

Die Abmessungen gewährleisten auch einen ausreichenden Widerstand gegen Gleiten.