

Bundesanstalt für Wasserbau - BAW

BAW Kolloquium „Neue Normen in der Geotechnik“

Sicherheitsnachweise für Flach- und Flächengründungen

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Bernhard Walz
Bergische Universität Wuppertal

Gliederung

1. Vorbemerkung – Neue / erweiterte Regelungen
2. Schritte bei der Bemessung einer Gründung
3. System, Gründung und Gründungslasten des Beispiels
4. Nachweis gegen Verlust des Gleichgewichts (Kippen)
5. Nachweis der Standsicherheit (Gleiten und Grundbruch) – Grenzzustand GZ 1
6. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit – Grenzzustand GZ 2
7. Bemessung des Fundamentes mit Hilfe des aufnehmbaren Sohldrucks
8. Literaturhinweise

1 Vorbemerkung – Neue und erweiterte Regelungen

Nach Smolczyk [2] werden Gründungskörper, die äußere Lasten ausschließlich über horizontale (oder wenig geneigte) Sohlflächen in den Baugrund einleiten, als Flächengründungen bezeichnet. Flachgründung sind Flächengründungen mit begrenzter Einbindetiefe. Der Vortrag behandelt ausschließlich Flachgründungen.

Die Bemessung von Flachgründungen ist in der (bisherigen) DIN 1054 (11/1976) ausführlich geregelt. Die DIN 1054: 2005-01 enthält darüber hinausgehend kaum neue inhaltliche Bestimmungen. In der straffen Gliederung des Abschnittes 7 der DIN 1054: 2005-01

- Einwirkungen und Beanspruchungen in der Sohlfläche
- Bodenreaktionen und Bodenwiderstände
- Nachweis der Tragfähigkeit
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

ist die Umsetzung des Teilsicherheitskonzeptes mit der Unterscheidung zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) und demjenigen der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2) erkennbar.

In einfachen Fällen ist eine Fundamentbemessung über das Konzept des „aufnehmbaren Sohldrucks“ möglich, der bisher als „zulässige Bodenpressung“ bezeichnet wurde.

Neu ist die Zuordnung von Flach- und Flächengründungen zu „Geotechnischen Kategorien“ (Abschnitt 7.2), wobei empfohlen wird

- bei Baugrund- und Gründungsverhältnissen, die eine Bemessung der Flachfundamente mit Hilfe des aufnehmbaren Sohldrucks erlauben, von der Geotechnischen Kategorie GK 1 auszugehen und
- bei in der Norm beispielhaft genannten Gründungen, z. B. bei Pfahl-Plattengründungen, bei Gründungen neben bestehenden Gebäuden oder bei ausgedehnten Plattengründungen auf Boden mit unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnissen im Grundriss die Geotechnische Kategorie GK 3 vorauszusetzen.

Für den Nachweis der Sicherheit gegen Materialversagen, d.h. für die Bemessung der Biege- und Schubbewehrung des Fundamentes enthält die DIN 1054: 2005-01 zwar derzeit einige Regelungen. Die in Bearbeitung befindliche DIN 1054: 2007 wird aber die „innere“ Bemessung eines Flachfundamentes gänzlich der DIN 1045 – 1 zuweisen.

2 Schritte bei der Bemessung einer Gründung



Bild 1: Schritte bei der Bemessung einer Gründung

Die Bemessung startet mit dem **Entwurf** der Gründung eines Bauwerkes als Flach- oder als Tiefgründung, wobei die äußeren Abmessungen geschätzt werden.

Dem Nachweis der **Lagesicherheit** (gemäß DIN 1054: 2005-01: Grenzzustand GZ 1A) sind die Versagensformen Kippen, Abheben und Aufschwimmen zugeordnet. Beim Erreichen eines Grenzzustandes der Lagesicherheit tritt kein Widerstand (in den Tragelementen oder im Boden) auf. In einer Grenzzustandsgleichung werden stabilisierende und destabilisierende Einwirkungen gegenübergestellt. Die Grenzzustandsbedingung wird in der DIN 1055-100 definiert, da diese Norm für Einwirkungen zuständig ist.

Mit dem Nachweis der („**äußeren**“) **Standsicherheit** (Grenzzustand GZ 1B) der Gründung (bzw. Nachweis der Tragfähigkeit des Bodens) werden ausreichende (äußere) Abmessungen der Gründung so nachgewiesen, dass ein Versagen der Gründung durch Bruch im Boden (Grundbruch) oder zwischen Boden und Fundament (Gleiten) mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen ist. Der Nachweis der (äußeren) Standsicherheit umfasst

- bei Flachgründungen den Nachweis gegen Gleiten und Grundbruch,

- bei Pfahlgründungen den Nachweis gegen Versinken (bzw. gegen Herausziehen für Zuggpfähle) und bei Horizontalbeanspruchung des Pfahles den Nachweis gegen Versagen des Erdwiderlagers.

Der Nachweis der **Gebrauchstauglichkeit** (Grenzzustand GZ 2) befasst sich mit der Ermittlung der Größe und mit den Auswirkungen der Verformungen der Gründung auf die Konstruktion und Funktion des Tragwerks, wobei die Verschiebungen der Fundamente durch die Nachgiebigkeit des Baugrunds verursacht werden.

Der Nachweis der („inneren“) **Standicherheit** des Gründungselementes (bzw. der Nachweis der Tragfähigkeit des bewehrten oder nicht bewehrten Betons des Gründungselementes) erfolgt generell nach DIN 1045-1 und wird hier nicht behandelt.

Die Teilsicherheitsbeiwerte, die bei den Stand sicherheitsnachweisen (Lagesicherheit, „äußere“ und „innere“ Standicherheit) bei den **Einwirkungen** zu berücksichtigen sind, werden in Bild 2 zusammenfassend dargestellt.

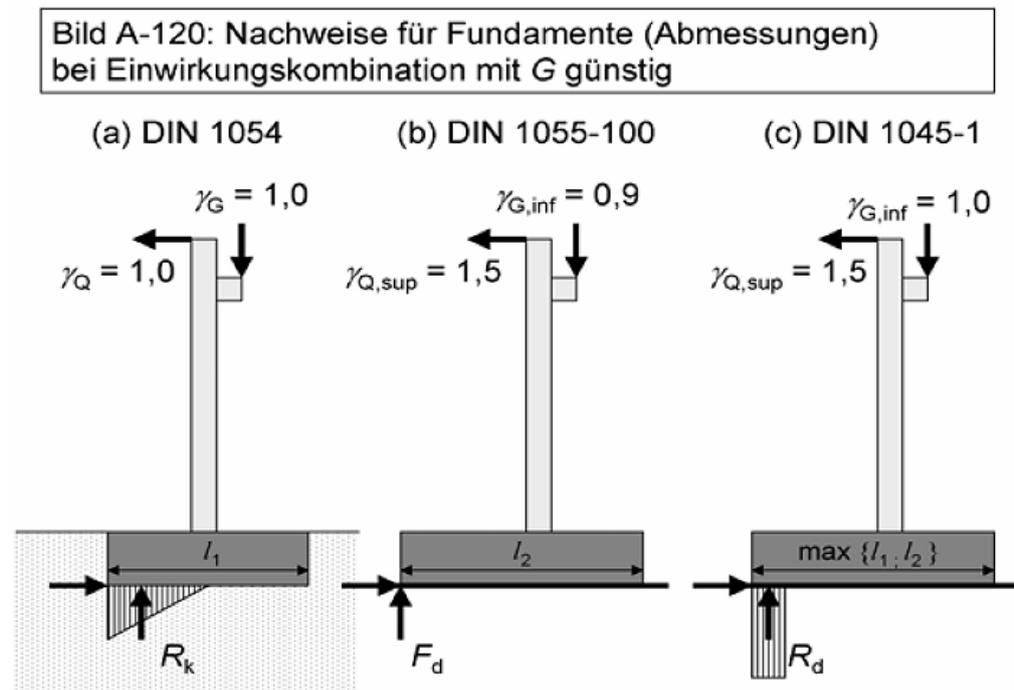


Bild 2: Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen bei den Stand sicherheitsnachweisen für eine Flachgründung (Quelle: Auslegung des NABau zu DIN 1045, Stand 06/2006)

3 System, Gründung und Gründungslasten des Beispiels

Das Fundament für eine Außenstütze einer dreischiffigen Produktionshalle ist zu bemessen. Die Dreigelenk-Rahmen stehen in einem gegenseitigen Abstand von 6,0 m. In dem betrachteten Hallen-Schiff ist ein Kran mit einer Tragfähigkeit von 25 to zu berücksichtigen.

In Bild 3 sind die Stütze, die Einwirkungen und die Baugrundsichtung zusammen mit den Bodenkenngrößen angegeben.

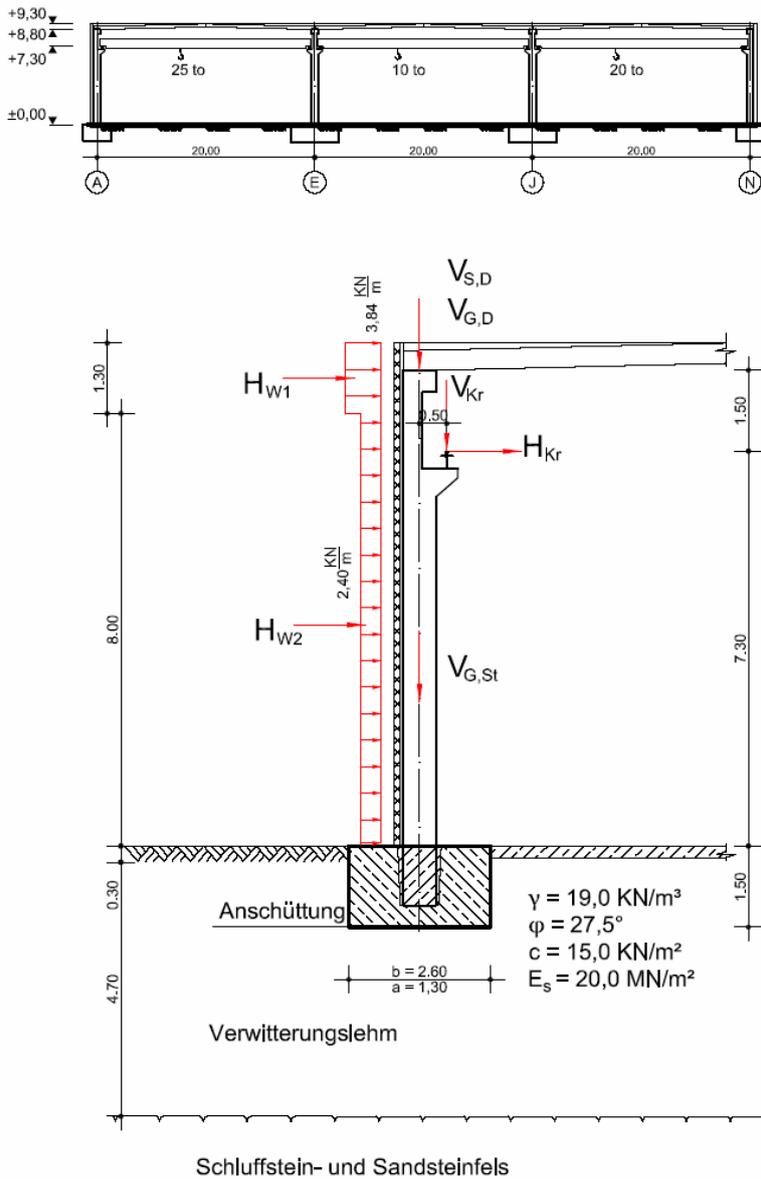


Bild 3: Außenstütze einer dreischiffigen Produktionshalle

	ständig	ständig	veränderlich	verän-	veränderlich		
			abhängig	derlich	abhängig		
	$V_{G,D}$	$V_{G,St}$	$H_{Q,W1}$	$H_{Q,W2}$	$V_{Q,D}$	$V_{Q,Kr}$	$H_{Q,Kr}$
Einwirkung	Dachlast	Stütze und Wand	Wind oben	Wind unten	Schnee	Kranbetrieb	Kranbetrieb
Charakteristischer Wert [kN]	49,6	46,0	5,0	19,2	45,0	328,0	17,5

Tabelle 1: Charakteristische Werte der auf die Hallenstütze einwirkenden Kräfte

Die charakteristischen Werte der Einwirkungen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Es wird eine Flachgründung in Form eines Blockfundamentes mit einer Höhe von 1,50 m und einer Grundrissfläche von 2,60 x 1,30 m gewählt (siehe Bild 3).

Nach DIN 1054:2005-01 sind die **Gründungslasten** als Schnittgrößen in Höhe der Oberkante der Gründungskonstruktion anzugeben. Neben den in Tabelle 1 angegebenen Lasten kommen als Schnittgrößen in Höhe der Oberkante der Gründungskonstruktion die Momentenwirkung aus Wind und Kranlast hinzu:

- Wind: $M_{Q,W} = 5,0 \cdot (0,65 + 8,0) + 19,2 \cdot 4,0 = 43,2 + 76,8 = 120,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$
- Kran: $M_{Q,Kr} = 17,5 \cdot 7,30 + 328,0 \cdot 0,5 = 291,8 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Fundamenteigengewicht: $V_{G,F} = 25,0 \cdot 2,60 \cdot 1,30 \cdot 1,50 = 126,75 \text{ kN}$

4 Nachweis gegen Verlust des Gleichgewichts (Kippen)

Bei einem Flachfundament kann der Verlust des Gleichgewichts durch **Kippen** eintreten. Kippen ist die Drehung des Fundamentes um eine Drehachse in der Fundamentsohle. Die Kippachse liegt bei einer Flachgründung auf Fels am Fundamentrand. Wegen der hohen Randspannungen weicht der Boden bei einer Flachgründung auf Lockergestein am Fundamentrand durch plastisches Fließen aus, so dass die Kippachse in Richtung Fundamentmitte wandert. Die Lage der **Kippachse ist nicht bekannt. Ersatzweise** wird die Kippachse am Fundamentrand angenommen (Ersatznachweis). Die Nachweisgleichung lautet:

$$M_{G,k,dst} \cdot \gamma_{G,dst} + M_{Q,k,dst} \cdot \gamma_{Q,dst} \leq M_{G,k,stab} \cdot \gamma_{G,stab}$$

Gemäß DIN1055 – 100 haben die Teilsicherheitsbeiwerte (sie sind dort mit $\gamma_{G,sup}$, γ_Q und $\gamma_{G,inf}$ bezeichnet) folgende Größen:

$$\gamma_{G,dst} = \gamma_{G,sup} = 1,10; \quad \gamma_{Q,dst} = \gamma_Q = 1,50; \quad \gamma_{G,stab} = \gamma_{G,inf} = 0,90$$

Der Nachweis ist für diejenigen ständigen und veränderlichen Einwirkungen zu führen, die ein destabilisierendes Moment um die angenommene Kippachse (Fundamentrand) bewirken. In dem Beispiel hat **nur die Windeinwirkung ein destabilisierendes Moment** um die als Kippachse angenommene rechte Fundamentkante (siehe Bild 3) zur Folge. Die Einwirkungen $V_{Q,Kr}$ und $H_{Q,Kr}$ sind miteinander gekoppelt, so dass sich aus dieser Einwirkung das Moment um die rechte Fundamentkante wie folgt ergibt (als positiv ist ein destabilisierendes (kippendes) Moment definiert):

$$M_{Kr,k,dst} = H_{Q,Kr} \cdot (7,30 + 1,50) - V_{Q,Kr} \cdot (1,30 - 0,50) = 17,5 \cdot 8,80 - 328,0 \cdot 0,80 = -108,0 \text{ kN} \cdot \text{m},$$

d. h. insgesamt entsteht ein stabilisierendes Moment um den rechten Fundamentrand.

Der **Nachweis gegen Kippen** wird also wie folgt geführt:

$$[5,0 \cdot (0,65 + 8,0 + 1,5) + 19,2 \cdot (4,0 + 1,5)] \cdot 1,50 \leq (49,6 + 46,0 + 126,75) \cdot 2,60 / 2 \cdot 0,90$$

$$234,53 < 260,15 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{„Ausnutzungsgrad“: } \mu = 234,53 / 260,15 = 0,90$$

5 Nachweis der Standsicherheit (Gleiten und Grundbruch) – Grenzzustand GZ 1

5.1 Kopplung von Einwirkung und Widerstand beim Grundbruch- und Gleitnachweis

Beim Nachweis gegen Gleiten und insbesondere bei demjenigen gegen Grundbruch sind Einwirkung und Widerstand miteinander gekoppelt, d.h. die Größe des Bodenwiderstandes wird von Parametern der Einwirkung (Beanspruchung) beeinflusst. Der Grundbruchwiderstand ist über den Neigungsbeiwert i von der Neigung der einwirkenden Sohldruckresultierenden und über die rechnerischen Fundamentabmessungen a' und b' von deren Exzentrizität abhängig. Werden bei der Berechnung des Grundbruchwiderstandes die **Bemessungswerte** der Neigung der Sohldruckresultierenden δ_d und der Exzentrizität e_d eingesetzt (siehe Bild 4) ergibt sich mit den **charakteristischen Werten** von φ_k , c_k und γ_k

- ein kleinerer Grundbruchwiderstand als bei Berechnung mit δ_k und e_k , weil $\delta_d > \delta_k$ und $e_d > e_k$, sowie
- ein Grundbruchwiderstand, der weder ein charakteristischer Wert noch ein Bemessungswert ist, da bei der Berechnung des Grundbruchwiderstandes als Eingangsgrößen sowohl charakteristische Größen als auch Bemessungsgrößen Verwendung finden.

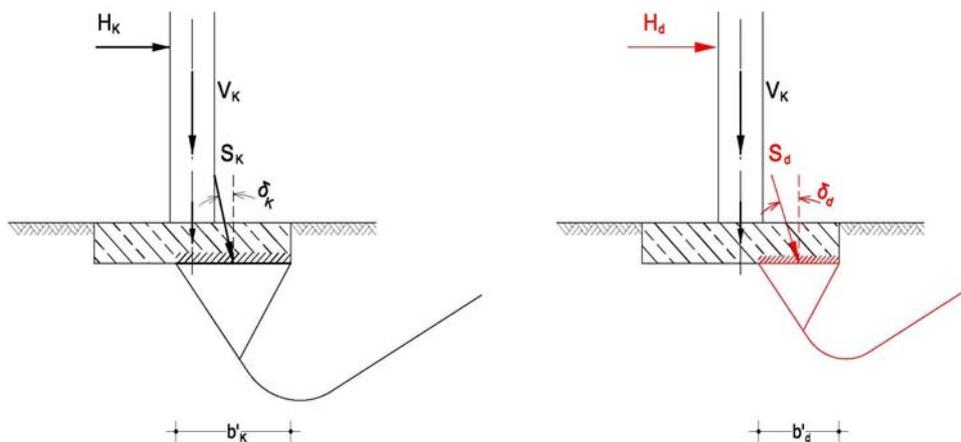


Bild 4: Charakteristischer Wert und Bemessungswert der Sohldruckresultierenden

Für die Ermittlung des **charakteristischen Wertes des Grundbruchwiderstandes** sind also die Parameter des **charakteristischen Wertes der Einwirkung** (Beanspruchung), d.h. die des charakteristischen Wertes der Sohldruckresultierenden, sowie die **charakteristischen Bodenkenngrößen** zu verwenden. Gleiches gilt für die Ermittlung des charakteristischen Wertes des Gleitwiderstandes.

5.2 Charakteristischer Wert der Sohldruckresultierenden

Grundlage der Nachweise der Standsicherheit gegen Gleiten und Grundbruch ist der charakteristische Wert der Sohldruckresultierenden. Die Sohldruckresultierende **beansprucht** den Boden bzw. die Kontaktfläche zwischen Fundament und Boden. Die Sohldruckresultierende besteht aus drei Elementen:

- normal zur Sohlfläche: $N_{G,k}$ und $N_{Q,k}$
- tangential zur Sohlfläche: $T_{G,k}$ und $T_{Q,k}$
- Exzentrizität gegenüber der Fundamentachse: e_G bzw. e_{G+Q}

Die Sohldruckresultierende ist für alle denkbaren Kombinationen von Einwirkungen zu ermitteln, wobei Kombinationsbeiwerte ψ für die nicht ständigen Lasten (Verkehrslasten) verwendet werden dürfen. Im **Beispiel** werden die Einwirkungskombinationen **ohne Berücksichtigung von ψ -Beiwerten** gebildet. In der Tabelle 2 ist die Sohldruckresultierende für die hier möglichen Einwirkungskombinationen angegeben. Die ständigen Lasten umfassen Dachlast, Stütze und Wand sowie das Eigengewicht des Fundamentes ($N_{G,k} = 49,60 + 46,00 + 126,75 = 222,35$ kN)

Einwirkungskombination	$N_{G,k}$	$N_{Q,k}$	$T_{G,k}$	$T_{Q,k}$	e_G bzw. e_{G+Q}
ständig	222,35	0	0	0	0,00
ständig + Wind	222,35	0	0	24,20	0,70
ständig + Kran	222,35	328,00	0	17,50	0,58
ständig + Schnee	222,35	45,00	0	0,00	0,00
ständig + Wind + Kran	222,35	328,00	0	41,70	0,86
ständig + Wind + Schnee	222,35	45,00	0	24,20	0,58
ständig + Kran + Schnee	222,35	373,00	0	17,50	0,53
ständig + Wind + Kran + Schnee	222,35	373,00	0	24,20	0,80

Tabelle 2: Charakteristische Werte der Sohldruckresultierenden für mögliche Einwirkungskombinationen (ohne ψ -Beiwerte)

5.3 Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten

a) Grenzzustandsbedingung; DIN 1054 – 7.5.3 (1))

„(1) Zur Einhaltung einer ausreichenden Sicherheit gegen Gleiten ist nachzuweisen, dass für den Grenzzustand GZ 1B die Bedingung

$$T_d \leq R_{t,d} + E_{p,d} \quad (20)$$

erfüllt ist. Dabei ist:

T_d der Bemessungswert der Beanspruchung parallel zur Fundamentsohlfäche nach 7.3.2 (2);
 $R_{t,d}$ der Bemessungswert des Gleitwiderstandes nach 7.4.3;
 $E_{p,d}$ der Bemessungswert des Erdwiderstandes parallel zur Sohlfläche an der Stirnseite des Fundamentes nach 7.4.1.“

b) Charakteristischer Wert des Gleitwiderstandes

Der anstehende bindige Boden ist nicht wassergesättigt.

$$R_{t,k} = N_k \cdot \tan \delta_{s,k} \quad (\text{DIN 1054 – 7.4.3 (2)})$$

$$\tan \delta_{s,k} = \tan \varphi_k = \tan 27,5^\circ \quad (\text{DIN 1054 – 7.4.3 (3)})$$

Auswertung für die hinsichtlich Gleiten ungünstigste Einwirkungskombination **ständig + Wind** (der Leser möge dies für andere Einwirkungskombinationen überprüfen):

$$R_{t,k} = 222,35 \cdot \tan 27,5^\circ = 115,75 \text{ kN}$$

c) Bemessungswert der Beanspruchung; DIN 1054 – 7.3.2 (2)

„(2) Der Bemessungswert T_d der Beanspruchung parallel zur Fundamentsohlfäche setzt sich zusammen aus dem ständigen Anteil $T_{G,k}$ der charakteristischen Beanspruchung, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_G nach Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B und dem veränderlichen Anteil $T_{Q,k}$ der charakteristischen Beanspruchung, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_Q nach Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B:

$$T_d = T_{G,k} \cdot \gamma_G + T_{Q,k} \cdot \gamma_Q \quad (7)$$

(3) Falls die Bemessungsbeanspruchung in der Fundamentsohlfäche in zwei Richtungen x und y gleichzeitig wirkt, ist der Ansatz

$$T_d = \sqrt{T_{d,x}^2 + T_{d,y}^2} \quad (8)$$

maßgebend.“

$$T_{G,k} = 0; \quad T_{Q,k} = 24,20 \text{ kN}$$

$$\gamma_Q \text{ nach DIN 1054 – Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B, Lastfall LF 1: } \gamma_Q = 1,50$$

$$T_d = 0 + 24,20 \cdot 1,50 = 36,30 \text{ kN}$$

d) Bemessungswert des Gleitwiderstandes; DIN 1054 – 7.4.3 (4)

„(4) Der Bemessungswert des Gleitwiderstandes $R_{t,d}$ ergibt sich nach 6.4.2 (2) aus dem charakteristischen Gleitwiderstand $R_{t,k}$ durch Division mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{Gl} im Grenzzustand GZ 1B Tabelle 3:

$$R_{t,d} = R_{t,k} / \gamma_{Gl} \quad (16)$$

$$\gamma_{Gl} \text{ nach DIN 1054 – Tabelle 3 für den Grenzzustand GZ 1B, Lastfall LF 1: } \gamma_{Gl} = 1,10$$

$$R_{t,d} = 115,75 / 1,10 = 105,23 \text{ kN}$$

e) Nachweis der Gleitsicherheit (siehe a))

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

Erdwiderstand an der Stirnfläche des Fundamentes wird nicht angesetzt; $E_{p,d} = 0$

$$36,30 < 105,23 \text{ kN} \quad \mu = T_d / R_{t,d} \text{ (Ausnutzungsgrad)} = 36,30 / 105,23 = 0,34$$

5.4 Nachweis der Sicherheit gegen Grundbruch

a) Grenzzustandsbedingung; DIN 1054 – 7.5.2 (1)

„(1) Zur Einhaltung einer ausreichenden Sicherheit gegen Grundbruch ist nachzuweisen, dass für den Grenzzustand GZ 1B die Bedingung

$$N_d \leq R_{n,d} \quad (19)$$

erfüllt ist. Dabei ist:

N_d der Bemessungswert der Beanspruchung senkrecht zur Fundamentsohlfläche nach 7.3.2 (1);

$R_{n,d}$ der Bemessungswert des Grundbruchwiderstandes nach 7.4.2.“

b) Charakteristischer Wert des Grundbruchwiderstandes; DIN 1054 – 7.4.2 (1):

„(1) Der charakteristische Grundbruchwiderstand $R_{n,k}$ im Grenzzustand GZ 1B ist nach DIN 4017 unter Berücksichtigung von Neigung und Ausmittigkeit der resultierenden charakteristischen Beanspruchung in der Sohlfläche nach 7.3.1 zu ermitteln.“

Im Anhang ist beispielhaft die Berechnung des charakteristischen Wertes des Grundbruchwiderstandes nach DIN 4017:2006-3 für die Einwirkungskombination ständig + Wind + Kran (ungünstigste Einwirkungskombination hinsichtlich der Grundbruchsicherheit; bitte überprüfen) gezeigt: $R_{n,k} = 1116,16 \text{ kN}$

c) Bemessungswert der Beanspruchung; DIN 1054 – 7.3.2 (1)

„(1) Der Bemessungswert N_d der Beanspruchung rechtwinklig zur Fundamentsohlfläche setzt sich zusammen aus dem ständigen Anteil $N_{G,k}$ der charakteristischen Beanspruchung, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_G nach Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B und dem veränderlichen Anteil $N_{Q,k}$ der charakteristischen Beanspruchung, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_Q nach Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B:

$$N_d = N_{G,k} \cdot \gamma_G + N_{Q,k} \cdot \gamma_Q \quad (6)$$

γ_G und γ_Q nach DIN 1054 – Tabelle 2 für den Grenzzustand GZ 1B, Lastfall LF 1:

$$\gamma_G = 1,35; \quad \gamma_Q = 1,50$$

Für die Einwirkungskombination: ständig + Wind + Kran

$$N_d = 222,35 \cdot 1,35 + (0 + 328,00) \cdot 1,50 = 792,17 \text{ kN}$$

Anmerkung: Nach DIN 1055-10: 2004-07 (Einwirkungen infolge Krane und Maschinen), Tabelle A.1 – Teilsicherheitsbeiwerte - beträgt der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Kraneinwirkungen im Lastfall LF1: $\gamma_{Qsup} = 1,35$. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Einwirkungen aus dem Kran auch nach DIN 1055-10 ermittelt wurden. Da dieses im vorliegenden Beispiel nicht sichergestellt ist, wird oben mit $\gamma_Q = 1,50$ gerechnet.

d) Bemessungswert des Grundbruchwiderstandes; DIN 1054 – 7.4.2 (5)

„(5) Der Bemessungswert $R_{n,d}$ des Grundbruchwiderstandes ergibt sich nach 6.4.2 (2) aus dem charakteristischen Grundbruchwiderstand $R_{n,k}$ nach 7.4.2 (1) durch Division mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{Gr} für den Grenzzustand GZ 1B nach Tabelle 3:

$$R_{n,d} = R_{n,k} / \gamma_{Gr} \quad (12)$$

γ_{Gr} nach DIN 1054 – Tabelle 3 für den Grenzzustand GZ 1B, Lastfall LF 1: $\gamma_{Gr} = 1,40$

Für die Einwirkungskombination: ständig + Wind + Kran::

$$R_{n,d} = 1116,16 / 1,40 = 797,26 \text{ kN}$$

e) Nachweis der Grundbruchsicherheit; DIN 1054 – 7.5.2 (1):

$$N_d \leq R_{n,d} : 792,17 < 797,26 \text{ kN} \quad \mu = 792,17 / 797,26 = 0,99$$

5.5 Bemerkung

Die Standsicherheit des Fundamentes ist auch für die Einwirkungskombination: „ständig + Windsog + horizontaler Kranstoß nach außen“ zu prüfen.

Hierfür beträgt das Moment um den Mittelpunkt der Sohlfläche:

$$M_{s,k} = -(c_{psog} / c_{pDruck}) \cdot M_{s,k \text{ Wind}} - H_{Kr} \cdot (7,30 + 1,50) + V_{Kr} \cdot 0,5$$

$$M_{s,k} = -(0,5 / 0,8) \cdot 156,3 - 17,5 \cdot 8,80 + 328,0 \cdot 0,5 = -87,7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Da dieses Moment kleiner ist als das Moment bei Winddruck und Kranstoß nach innen, kann das Fundament wirtschaftlicher (d.h. mit kleineren Abmessungen) bemessen werden, wenn die Stütze exzentrisch (nach außen) in dem Fundament eingespannt ist. Beträgt die Exzentrizität z. B. 0,4 m, ergeben sich folgende Momente um den Mittelpunkt der Sohlfläche:

Einwirkungskombination 1: ständig + Winddruck + Kranstoß nach innen:

$$M_{s,k1} = -(49,6 + 45,0) \cdot 0,4 + 328,0 \cdot 0,1 + 17,5 \cdot 8,80 + 156,3$$

$$M_{s,k1} = 305,3 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (gegenüber vorher } 474,3 \text{ kN} \cdot \text{m)}$$

Einwirkungskombination: ständig + Windsog + Kranstoß nach außen:

$$M_{s,k2} = -(49,6 + 45,0) \cdot 0,4 + 328,0 \cdot 0,1 - 17,5 \cdot 8,80 - (0,5 / 0,8) \cdot 156,3$$

$$M_{s,k2} = -256,7 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (gegenüber } -87,7 \text{ kN} \cdot \text{m)}$$

5.6 Nachweis der Sicherheit gegen Materialversagen

Die Ermittlung der **Bemessungswerte der Schnittgrößen** von Einzel- und Streifenfundamenten erfolgt gemäß DIN 1045 – 1 mit den Teilsicherheitsbeiwerten der Einwirkungen nach Bild 2 rechts. Die auf die (innere) Beanspruchung des Gründungskörpers

bezogenen Abschnitte 7.3.1 (4) und 7.3.2 (4) der DIN 1054: 2005-01 werden in einer Neuauflage der DIN 1054 nicht mehr auftauchen. Die „innere“ Bemessung von Einzel- und Streifenfundamenten wird hier nicht behandelt.

6 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit – Grenzzustand GZ 2

6.1 Nachweismethode

- Es sind die zulässigen Exzentrizitäten der Sohldruckresultierenden (charakteristischer Wert) infolge ständiger Einwirkungen und infolge ständiger + veränderlicher Einwirkungen einzuhalten (siehe 6.2).
- Es ist zu prüfen, ob eine Befreiung vom Nachweis der Größe der Verformungen (vertikal, horizontal, Drehung) des Fundamentes aufgrund von Erfahrungswerten (DIN 1054 – 7.6.2 (1); 7.6.3 (6); 7.6.4 (1)) vorliegt.
- Gegebenenfalls ist die Größe der Verformungen (DIN 1054 – 7.6.2 (2); 7.6.3 (1), (2), (3) und (5); 7.6.4 (2)) rechnerisch abzuschätzen und diese hinsichtlich der Auswirkungen auf die Konstruktion und Funktion des Tragwerkes (DIN 1054 – 7.6.2 (2); 7.6.3 (4); 7.6.4 (2)) zu beurteilen.

6.2 Zulässige Exzentrizität der Sohldruckresultierenden

- *„Bei Gründungen auf nichtbindigen und bindigen Böden darf in der Sohlfläche infolge der aus ständigen Einwirkungen resultierenden charakteristischen Beanspruchung keine klaffende Fuge auftreten.“*

Da im Beispiel $e_y = 0$ ist, muss also gelten:

$$e_x \leq b_x / 6 \rightarrow e_x \leq 2,60 / 6 \rightarrow e_x \leq 0,43 \text{ m}$$

Infolge ständiger Einwirkungen ist im Beispiel $e_x = 0$.

- Nach DIN 1054: 2005–01 Abschnitt 7.5.1 wurde **bisher** der Standsicherheitsnachweis gegen Kippen durch Einhaltung einer zulässigen Ausmittigkeit für die Gesamtlasten (ständig + veränderlich) geführt. Da **jetzt** der Kippnachweis nach DIN 1055-100 geführt wird (siehe Abschnitt 4) ist nun der **Nachweis der zulässigen Ausmittigkeit für die Gesamtlasten als Gebrauchstauglichkeitsnachweis** zu führen:

„Die Ausmittigkeit der Sohldruckresultierenden darf höchstens so groß werden, dass die Gründungssohle noch bis zu ihrem Schwerpunkt durch Druck belastet bleibt (2. Kernweite)...“

Für Rechteckfundamente gilt (DIN 1054 – 7.5.1 (3))

$$\left(\frac{x_e}{b_x}\right)^2 + \left(\frac{y_e}{b_y}\right)^2 \leq \frac{1}{9} \quad \text{hier: } y_e = 0 \rightarrow x_e \leq \frac{b_x}{3}$$

$$b_x / 3 = 2,60 / 3 = 0,87 \text{ m}$$

$$x_e = \Sigma M_{s,k} / \Sigma V_{s,k} \quad \mu = x_e / 0,87 \text{ („Ausnutzungsgrad“)}$$

Die größte Ausmittigkeit ergibt sich für das Beispiel gemäß Tabelle 2 für die Einwirkungskombination ständig + Wind + Kran zu $e_x = 0,86 \text{ m}$:

$$e_x = 0,86 \text{ m} < b_x / 3 = 0,87 \text{ m} \quad \mu = 0,86 / 0,87 = 0,99$$

Hinweis: Sinnvoller Weise sollten diese beiden Gebrauchtauglichkeitsnachweise unmittelbar nach der Ermittlung der charakteristischen Sohldruckresultierenden (Tabelle 2) geführt werden, da der Nachweis der zulässigen Exzentrizität für die Gesamtlasten (ständig + veränderlich) häufig für die Grundrissabmessungen des Fundamentes maßgebend wird.

6.3 Verschiebungen in der Sohlfläche – DIN 1054 – 7.6.2. (1)

„(1) Bei Flach- und Flächengründungen darf der Nachweis gegen unzuträgliche Verschiebungen des Fundamentes in der Sohlfläche als erbracht angesehen werden, wenn

- beim Nachweis der Gleitsicherheit nach 7.5.3 auf der Stirnseite des Fundamentes keine Bodenreaktion angesetzt wird oder, wenn
- bei mindestens mitteldicht gelagerten nichtbindigen Böden bzw. bei mindestens steifen bindigen Böden bei Ansatz des vollen Wertes des charakteristischen Gleitwiderstandes eine Bodenreaktion von weniger als 30 % des charakteristischen Erdwiderstandes vor der Stirnseite des Fundamentkörpers zur Herstellung des Gleichgewichtes der charakteristischen Kräfte parallel zur Sohlfläche erforderlich ist.“

Für das Beispiel darf der Nachweis gegen unzuträgliche Verschiebungen in der Sohlfläche als erbracht angesehen werden, da beim Nachweis der Gleitsicherheit (siehe 5.3 e) auf der Stirnseite des Fundamentes keine Bodenreaktion angesetzt wurde.

6.4 Setzungen – DIN 1054 – 7.6.3

a) Berechnung der Größe der Setzungen

„(1) Die Größe der Setzungen von Flach- und Flächengründungen darf auf der Grundlage der DIN 4019 ermittelt werden, soweit die dort genannten Voraussetzungen erfüllt sind.“

Veränderliche Einwirkungen dürfen bei der Ermittlung der Konsolidationssetzungen vernachlässigt werden, wenn deren Einwirkungszeit wesentlich kleiner ist als die zum Ausgleich des Porenwasserüberdrucks erforderliche Zeit. Eine kurze Einwirkungszeit wird für das Beispiel für die Windlast (W) und die Kranlast vorausgesetzt.

Aus Tabelle 2 folgt:

$$V_{s,k} = 222,35 + 45,0 = 267,35 \text{ kN} \quad \text{zentrisch wirkend}$$

$$\sigma_{\text{Bauwerk}} = 267,35 / (2,60 \cdot 1,30) = 79,10 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{Aushub} = 0,3 \cdot 20,0 + 1,2 \cdot 19,0 = 28,80 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_o = \sigma_{Bauwerk} - \sigma_{Aushub} = 79,10 - 28,80 = 50,30 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{setzungserzeugender Sohldruck})$$

$$a/b = 2,60/1,30 = 2,0$$

$$z/b = (5,0 - 1,5)/1,25 = 2,8$$

Setzungsbeiwert f für den kennzeichnenden Punkt, z. B. nach den Empfehlungen „Verformungen des Baugrundes bei baulichen Anlagen“ – EVB: $f = 0,8704$

$$s = (\sigma_o \cdot b \cdot f) / E_s = 50,30 \cdot 1,30 \cdot 0,8704 / 20.000 = 0,003 \text{ m} \quad s \approx 0,5 \text{ cm}$$

b) Beurteilung der Setzungen; DIN 1054 – 7.6.3 (4)

„(4) Die rechnerischen Setzungen der einzelnen Gründungselemente eines Gebäudes oder anderer baulicher Anlagen sind unter Berücksichtigung der Konstruktion des Tragwerkes zu beurteilen (siehe z. B. EVB).“

Für das Beispiel ist hierzu – insbesondere mit Rücksicht auf die Kranbahn – die Kenntnis der Setzungen der anderen Hallenstützen erforderlich.

6.5 Verdrehungen – DIN 1054 – 7.6.4

„(1) Bei Einhaltung der zulässigen Ausmittigkeit der Sohldruckresultierenden nach 7.6.1 darf angenommen werden, dass bei Einzel- und Streifenfundamenten auf mindestens mitteldicht gelagertem nichtbindigem Boden bzw. mindestens steifem bindigem Boden keine unzuträglichen Verdrehungen des Bauwerkes auftreten.“

7 Bemessung des Fundamentes mit Hilfe des aufnehmbaren Sohldrucks

7.1 Überprüfung der Voraussetzungen – DIN 1054 – 7.7.1

Das Fundament wurde mit den Abmessungen des Bildes 3 entworfen. Die in DIN 1054 – 7.7.1 (1) genannten Voraussetzungen sind zu prüfen:

- Die Geländeoberfläche und die Schichtgrenzen verlaufen waagrecht.
- Der Baugrund weist bis in $\bar{z} = 3,50 \text{ m}$ ($> 2,0 \text{ m}$ und $> 2 \cdot b = 2 \cdot 1,30 = 2,60 \text{ m}$) eine ausreichende Festigkeit auf.
- Die auf das Fundament einwirkende Kranlast ist eine zyklische und keine dynamische Beanspruchung.
- Die Neigung der resultierenden charakteristischen Beanspruchung in der Sohlfäche beträgt für die ungünstigste Einwirkungskombination: ständig + Wind (Tabelle 2):

$$\tan \delta_E = H_{s,k} / V_{s,k} = 24,2 / 222,35 = 0,11 < 0,2$$

(indirekter Nachweis ausreichender Gleitsicherheit)

- Die zulässigen Ausmittigkeiten der Sohldruckresultierenden sind eingehalten (siehe Abschnitt 6.2). (Teil des Nachweises der Gebrauchstauglichkeit)

- f) Weil der Nachweis der Kippsicherheit nach DIN 1055 – 100 geführt werden muss, wird in einer Neuausgabe der DIN 1054 hier der Hinweis erforderlich, dass die Kippsicherheit nachgewiesen sein muss.

7.2 Ermittlung des aufnehmbaren Sohldrucks σ_{zul} – DIN 1054 – 7.7.3 in Verbindung mit DIN 1054 – 7.7.1 (2)

DIN 1054 – 7.7.3.1

„(1) Der unter den in 7.7.1 genannten Voraussetzungen bei bindigem Baugrund von Streifenfundamenten aufnehmbare Sohldruck σ_{zul} darf den Tabellen A.3 bis A.6 des Anhangs A entnommen werden. Die Sohldruckbeanspruchung darf senkrecht oder geneigt angreifen.“

Maßgebend für den anstehenden Boden ist Tabelle A.4 „Aufnehmbarer Sohldruck σ_{zul} für Streifenfundamente auf gemischtkörnigem Boden:

Steife Konsistenz; Einbindetiefe 1,50 m: $\rightarrow \sigma_{zul} = 220 \text{ kN/m}^2$

Erhöhung des aufnehmbaren Sohldrucks nach DIN 1054 – 7.7.3.2.

„Bei Rechteckfundamenten mit einem Seitenverhältnis $b_x : b_y < 2$ bzw. $b'_x : b'_y < 2$ und bei Kreisfundamenten darf der in den Tabellen A.3 bis A.6 angegebene bzw. der nach 7.7.3.3 für größere Fundamentbreiten ermittelte aufnehmbare Sohldruck σ_{zul} um 20 % erhöht werden.“

Für die Einwirkungskombination „Ständig + Wind + Kran“ (G + W + K) gilt (siehe Tabelle 2):

$$e_x = 0,86 \text{ m} \qquad e_y = 0 \text{ m}$$

$$b'_x = 2,60 - 2 \cdot 0,86 = 0,88 \text{ m} \qquad b'_y = b'_y = 1,30 \text{ m}$$

$$b'_x / b'_y = 0,88 / 1,30 = 0,68 < 2 :$$

$$\bar{\sigma}_{zul} = 1,20 \cdot \sigma_{zul} = 1,20 \cdot 220,0 = 264,0 \text{ kN/m}^2$$

Verminderung des aufnehmbaren Sohldrucks nach DIN 1054 – 7.7.3.3 (1)

„(1) Bei Fundamentbreiten zwischen 2,00 und 5,00 m muss der in den Tabellen A.3 bis A.6 angegebene aufnehmbare Sohldruck σ_{zul} um 10 % je m zusätzlicher Fundamentbreite vermindert werden.“

Nach allgemeiner bodenmechanischer Auffassung ist die „Fundamentbreite“ die kleinere Seitenlänge des Fundamentes, also hier: $b = 1,30 \text{ m}$.

7.3 Ermittlung des vorhandenen Sohldrucks σ_{vorh} – DIN 1054 – 7.7.1 (2)

„(2) Zur Ermittlung des charakteristischen Sohldruckes bei ausmittiger Lage der resultierenden Beanspruchung in der Fundament-Sohlfläche darf nur derjenige Teil A' der Sohlfläche angesetzt werden, für den die Resultierende der Einwirkungen im Schwerpunkt steht, also bei Rechteckfundamenten mit den Seitenlängen b_x und b_y und zugeordneten Ausmittigkeiten e_x und e_y die Fläche (siehe Bild 1):

$$A' = b'_x \cdot b'_y = (b_x - 2 \cdot e_x) \cdot (b_y - 2 \cdot e_y) \quad (21)$$

$$A' = b'_x \cdot b'_y = 0,88 \cdot 1,30 = 1,144 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = \Sigma V_{s,k} / A' = (222,35 + 328,0) / 1,144 = 481,08 \text{ kN / m}^2$$

7.4 Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegen Grundbruch – DIN 1054 – 7.7.1

„(3) Eine ausreichende Sicherheit gegen Grundbruch darf als nachgewiesen angesehen werden, wenn die Bedingung $\sigma_{\text{vorh}} \leq \sigma_{\text{zul}}$ (22) erfüllt ist.“

Hier ist $\sigma_{\text{vorh}} = 481,1 \text{ kN/m}^2$ größer als $\bar{\sigma}_{\text{zul}} = 264,0 \text{ kN/m}^2$. Für die untersuchte Einwirkungskombination ist der Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Grundbruch über den aufnehmbaren Sohldruck nicht möglich.

7.5 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

- Zulässige Lage der Sohldruckresultierenden bereits in 7.1 überprüft.
- Verschiebung in der Sohlfläche: keine Bodenreaktion an der Stirnseite angesetzt, da $H_k/V_k \leq 0,2$ gefordert wird.
- Verdrehungen: zulässige Ausmittigkeit der Sohldruckresultierenden ist eingehalten.
- Setzungen: DIN 1054 – 7.7.3.1 (3):

„(3) Die Anwendung der genannten Werte für den aufnehmbaren Sohldruck kann bei mittig belasteten Fundamenten zu Setzungen in der Größenordnung von 2 bis 4 cm führen.“

Beurteilung der Setzungen je nach Tragwerk und Nutzung wie in Abschnitt 6.4 b)

8 Literaturhinweise

- [1] Weißenbach, A.: Stützbauwerke. Vortrag auf der Gemeinschaftstagung „Bemessung und Erkundung in der Geotechnik“ am 04./05.02.2002 in Heidelberg.
- [2] Smoltczyk, U./Netzel, D./Kany, M.: Flachgründungen. Abschnitt 3.1 des Grundbau-Taschenbuches, 6. Auflage. Ernst & Sohn, 2001.
- [3] DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Januar 2005.
- [4] DIN 4017: Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen. März 2006

Anhang: Berechnung des charakteristischen Wertes des Grundbruchwiderstandes nach DIN 4017: 2006-3 für die Einwirkungskombination: ständig + Wind + Kran des Beispiels einer Hallenstütze.

- Reduzierte Fundamentabmessungen

$$b' = 2,60 - 2 \cdot e_x = 2,60 - 2 \cdot 0,86 = 0,88 \text{ m}$$

$$a' = a = 1,30 \text{ m}$$

- Grundwerte der Tragfähigkeitsbeiwerte

$$\varphi = 27,5^\circ: \quad N_{do} = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi} = 13,94$$

$$N_{bo} = (N_{do} - 1) \cdot \tan \varphi = 6,74$$

$$N_{co} = (N_{do} - 1) / \tan \varphi = 24,86$$

- Formbeiwerte

$$v'_b = 1 - 0,3 \cdot b' / a' = 1 - 0,3 \cdot 0,88 / 1,30 = 0,797$$

$$v'_d = 1 + b' / a' \cdot \sin \varphi = 1 + 0,88 / 1,30 \cdot \sin 27,5^\circ = 1,313$$

$$v'_c = (v'_d \cdot N_{do} - 1) / (N_{do} - 1) = (1,313 \cdot 13,94 - 1) / 12,94 = 1,337$$

- Neigungsbeiwerte nach DIN 4017: 2006-3

$$T_k = T_{G,k} + T_{Q,k} = 0 + 41,70 = 41,70 \text{ kN}$$

$$N_k = N_{G,k} + N_{Q,k} = 222,35 + 328,00 = 550,35 \text{ kN}$$

$$\tan \delta_k = T_k / N_k = 41,70 / 550,35 = 0,0757$$

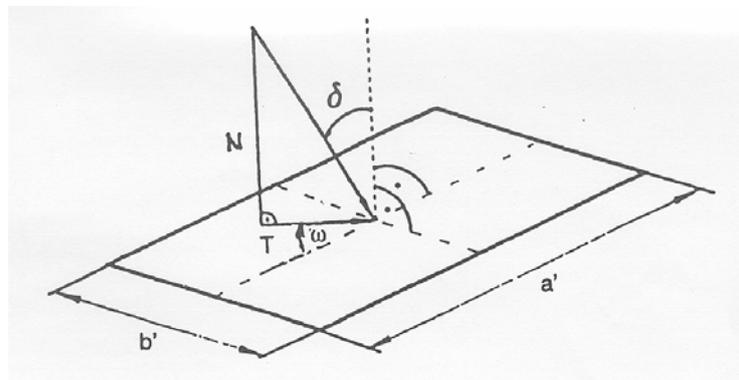


Bild A.1: Definition des Winkels ω nach DIN 4017: 2006-03

Gemäß Bild A.1 ist $\omega = 90^\circ$ (T_k parallel zur kürzeren Seite b')

$$m = m_a \cdot \cos^2 \omega + m_b \cdot \sin^2 \omega \rightarrow m = m_b$$

$$m_b = (2 + b' / a') / (1 + b' / a') = (2 + 0,88 / 1,30) / (1 + 0,88 / 1,30) = 1,596$$

$$i_b = (1 - \tan \delta)^{m+1} = (1 - 0,0757)^{1,596+1} = 0,815$$

$$i_d = (1 - \tan \delta)^m = (1 - 0,0757)^{1,596} = 0,882$$

$$i_c = (i_d \cdot N_{do} - 1) / (N_{do} - 1) = (0,882 \cdot 13,94 - 1) / 12,94 = 0,873$$

- Tragfähigkeitsbeiwerte

$$N_b = N_{bo} \cdot v'_b \cdot i_b = 6,74 \cdot 0,797 \cdot 0,815 = 4,378$$

$$N_d = N_{do} \cdot v'_d \cdot i_d = 13,94 \cdot 1,313 \cdot 0,882 = 16,143$$

$$N_c = N_{co} \cdot v'_c \cdot i_c = 24,86 \cdot 1,337 \cdot 0,873 = 29,017$$

- charakteristischer Wert des Grundbruchwiderstandes

$$R_{n,k} = a' \cdot b' \cdot (\gamma_1 \cdot d \cdot N_d + \gamma_2 \cdot b' \cdot N_b + c \cdot N_c)$$

Wichte Fußboden-Halle \approx Wichte Boden

$$R_{n,k} = 1,30 \cdot 0,88 \cdot [(0,3 \cdot 20,0 + 1,2 \cdot 19,0) \cdot 16,143 + 19,0 \cdot 0,88 \cdot 4,378 + 15,0 \cdot 29,17]$$

$$R_{n,k} = 1,144 \cdot [464,92 + 73,20 + 437,55] = 1116,16 \text{ kN}$$