

Formelsammlung zur Vorlesung Bodenmechanik I

SS 2013

Ausgearbeitet von: D. Rebstock

Überarbeitet von: P. Kudella

Alle Rechte der Vervielfältigung vorbehalten !

Inhaltsverzeichnis

1. DARSTELLUNG VON BOHRPROFILIEN	2
2. BODENKLASSIERUNG	4
3. PORENANTEIL, WASSERGEHALT, WICHTEN	5
4. KONSISTENZ, LAGERUNGSDICHTE	6
5. DURCHSTRÖMUNG, DURCHLÄSSIGKEIT.....	7
6. VERTIKALE ZUSAMMENDRÜCKUNG.....	8
7. SPANNUNGSausBREITUNG	10
8. SETZUNGSBERECHNUNG.....	11
9. KONSOLIDIERUNG	12
10. SCHERFESTIGKEIT	13
11. ERDDRUCK.....	14
12. GELÄNDEBRUCH	18
13. GLEITEN UND GRUNDBRUCH.....	22

Diese Formelsammlung wurde sorgfältig überprüft. Sie ersetzt aber nicht das sorgfältige Studium der grundsätzlichen Zusammenhänge !!!

Eventuelle Druckfehler oder Unklarheiten bitte melden an Peter.Kudella@kit.edu.

1. Darstellung von Bohrprofilen

- Vorschriften:
DIN 4023 (Feb. 2006) Baugrund- und Wasserbohrungen, zeichnerische Darstellung der Ergebnisse
DIN 18196 (Mai 2011) Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen

- Symbole und Farben wichtiger Bodenarten

Benennung		Kurzzeichen		Zeichen		Flächenfarbe
Bodenart	Beimengung	Bodenart	Beimengung	Bodenart	Beimengung	
Kies	kiesig	G	g			hellgelb
Grobkies	grobkiesig	gG	gg			
Mittelkies	mittelkiesig	mG	mg			
Feinkies	feinkiesig	fG	fg			
Sand	sandig	S	s			orangegeb
Grobsand	grobsandig	gS	gs			
Mittelsand	mittelsandig	mS	ms			
Feinsand	feinsandig	fS	fs			
Schluff	schluffig	U	u			oliv
Ton	tonig	T	t			violett
Torf, Humus	torfig, humos	H	h			dunkelbraun
Mudde (Faulschlamm)	-	F	-			helllila
	org. Beimeng.	-	o			-
Auffüllung	-	A	-			-
Steine	steinig	X	x			hellgelb
Blöcke	mit Blöcken	Y	y			hellgelb
Fels allgemein	-	Z	-			dunkelgrün
Fels verwittert	-	Zv	-			

- Symbole geologisch typischer Bodenarten

Benennung	Kurzzeichen	Zeichen	Flächenfarbe
Mutterboden	Mu		hellbraun
Verwitterungslehm, Gehängelehm	L		grau
Geschiebelehm	Lg		grau
Geschiebemergel	Mg		blau
Löß	Lö		helloliv
Lößlehm	Löl		oliv
Klei, Schllick	Kl		lila
Wiesenkalk, Seekalk, Seekreide, Kalkmudde	Wk		hellblau
Bänderton	Bt		violett
Vulkanische Asche	V		dunkelgrau
Braunkohle	Bk		schwarzbraun

- Symbole gemischtkörniger Boden- und Felsarten

Benennung	Kurzzeichen	Zeichen	Flächenfarbe
Grobkies, steinig	gG, x		hellgelb
Feinkies und Sand	fG-S		orangegebl
Grobsand, mittelkiesig	gS, mg		orangegebl
Mittelsand, schluffig, schwach humos	mS, u, h'		orangegebl
Schluff, stark feinsandig	U, fs		kreß (orange)
Torf, feinsandig, schwach schluffig	H, fs, u'		dunkelbraun
Seekreide mit organischen Beimengungen	Wk, o		hellblau
Klei, feinsandig	Kl, fs		lila
Sandstein, schluffig	Sst, u		orangegebl
Salzgestein, tonig	Lst, t		hellgrün
Kalkstein, schwach sandig	Kst, s'		dunkelblau

- Erläuterungszeichen für Bohrprofile

Über der Säule	Links der Säule	Rechts der Säule
Sch = Schurf	P1 + 352,1 = Sonderprobe aus 19,0 m Tiefe = + 352,1 m NN	= naß Vernässungszone oberhalb des Grundwassers
B = Bohrung	K1 + 114,8 = Bohrkern aus 5,2 m Tiefe = + 114,8 m NN für Untersuchung ausgewählt	
BK = Bohrung mit durchgehender Gewinnung gekernter Proben	8,9 (1.4.68) = Grundwasser am 1.4.1968 in 8,9 m unter Gelände angebohrt	= brüchig
BP = Bohrung mit durchgehender Gewinnung nichtgekernter Proben	8,9 (1.4.68) 3h = Grundwasserstand nach Beendigung der Bohrung oder bei Änderung des Wasserspiegels nach seinem Antreffen jeweils mit Angaben der Zeitdifferenz in Stunden (3h) nach Einstellen oder Ruhen der Bohrarbeiten	= weich
BuP = Bohrung mit Gewinnung unvollständiger Proben	+ 118,0 10.5.58 = Ruhewasserstand in einem ausgebauten Bohrloch	= steif
BS = Sondierbohrung	+ 365,7 (12.6.68) 10 = Grundwasser in 15,8 m unter Gelände = + 355,7 m NN angebohrt Anstieg des Wassers bis 5,8 m unter Gelände = + 365,7 m nach 10 Stunden	= fest
3 = Nr. der Bohrung, des Schurfs usw.	+ 11,7 (12.6.68) = Wasser versickert in +11,7 m NN	= klüftig
	= Streichen (hier SW-NE) und Fallen (hier 25° nach SE) von Trennflächen	
	= gekernte Strecke	

2. Bodenklassierung

- Benennung von Böden: Korndurchmesser d [mm]

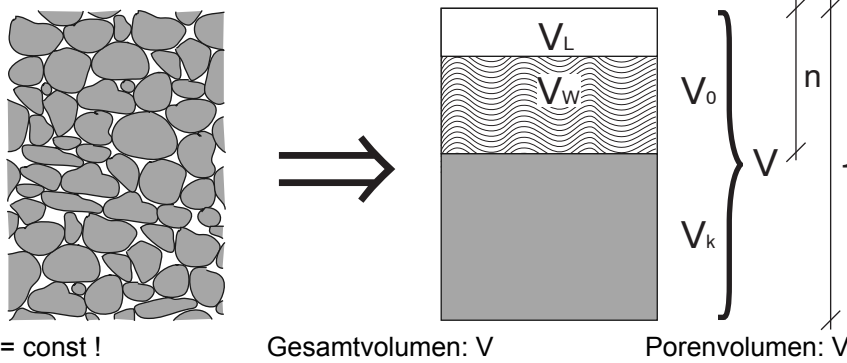
Feinkorn (Schlammkorn)				Grobkorn (Siebkorn)						Steine	Blöcke
TON	SCHLUFF			SAND			KIES				
T	fein fU	mittel mU	Grob GU	fein fS	mittel mS	grob gS	fein fG	mittel mG	grob gG	X	Y
	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2,0	6,0	20	63	200

- Ungleichförmigkeit: $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
- Krümmungszahl: $C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$

- Klassifizierung: DIN 18196

Merkmal	Korngrößenverteilung von der Gesamttrockenmasse $d < 63$ mm sind $\leq 0,06$ mm weniger als 40 %															gleich oder mehr als 40 %				
Hauptgruppe	Kieskorn, Sandkorn											Schluff, Ton								
Merkmal	Massenanteil des Korn ≤ 2 mm bis 60 %						über 60 %			Plastizitätsgrenze I_p unterhalb A-Linie					I_p oberhalb A-Linie					
	Kies (G)			Sand (S)			Schluff (U)					Ton (T)								
Merkmal	Korngrößenverteilung von der Gesamtmasse sind $\leq 0,06$ mm											Plastizitätsgrenze								
	< 5 %			5 ÷ 15 %		15 ÷ 40 %		< 5 %			5 ÷ 15 %		15 ÷ 40 %		Fließgrenze w_l in %			Fließgrenze w_p in %		
Merkmal	$C_U < 6$ C_C bel.	$C_U \geq 6$ $1 \leq C_C \leq 3$	$C_U \geq 6$ $C_C < 1$ $C_C > 3$			$C_U < 6$ C_C bel.	$C_U \geq 6$ $1 \leq C_C \leq 3$	$C_U \geq 6$ $C_C < 1$ $C_C > 3$			< 35	35 ÷ 50	> 50	< 35	35 ÷ 50	> 50				
	Kies enggestuft	Kies weitgestuft	Kies intermitierend gestuft	Kies tonig oder schluffig	Kies stark tonig oder schluffig	Sand enggestuft	Sand weitgestuft	Sand intermitierend gestuft	Sand tonig oder schluffig	Sand stark tonig oder schluffig	Schluff leicht plastisch	Schluff mittel plastisch	Schluff ausgeprägt plastisch	Ton leicht plastisch	Ton mittel plastisch	Ton ausgeprägt plastisch				
Kurzzeichen	GE	GW	GI	GU GT	GU* GT*	SE	SW	SI	SU ST	SU* ST*	UL	UM	UA	TL	TM	TA				
Die Zuordnung zu T bzw. T bei G und S erfolgt anhand der Zustandsgrenzen des Feinkorns																				
Organische und organogene Böden:																				
OU, OT Schluffe / Tone mit organischen Beimengungen																				
OH grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art																				
OK grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkhaltigen, kieseligen Bildungen																				
HN nicht bis mäßig zersetzte Torfe (Humus)																				
HZ zersetzte Torfe																				
F Schlamm als Sammelbegriff für Faulschlamm, Mudde etc.																				
A Auffüllung aus Fremdstoffen																				

3. Porenanteil, Wassergehalt, Wichten



• Kornwichte:	$\gamma_s = \frac{\text{Trockengewicht}}{\text{Kornvolumen}}$	$= \frac{G_d}{V_k} = \frac{\gamma_d}{1-n} = \frac{\gamma}{(1-n) \cdot (1+w)} = \gamma_w + \frac{\gamma'}{1-n}$
• Trockenwichte:	$\gamma_d = \frac{\text{Trockengewicht}}{\text{Gesamtvolumen}}$	$= \frac{G_d}{V} = (1-n) \cdot \gamma_s = \frac{\gamma}{1+w} = \gamma_r - n \cdot \gamma_w$ $= \gamma_s \cdot \frac{\gamma_r - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} = \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot \gamma_s}{w \cdot \gamma_s + S_r \cdot \gamma_w}$
• Feuchtwichte: Sättigung $S_r < 1$	$\gamma = \frac{\text{Gesamtwicht}}{\text{Gesamtvolumen}}$	$= \frac{G}{V} = (1+w) \cdot \gamma_d = (1+w) \cdot (1-n) \cdot \gamma_s$ $= (1+w) \cdot \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot \gamma_s}{w \cdot \gamma_s + S_r \cdot \gamma_w} = (1+w) \cdot (\gamma_r - n \cdot \gamma_w)$
• Sättigungswichte Sättigung $S_r = 1$	$\gamma_r = \gamma (S_r = 1)$	$= \frac{G_r}{V} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w = (1-n) \cdot \gamma_s + n \cdot \gamma_w = \gamma' + \gamma_w$ $= \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right) \cdot \gamma_d + \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+w} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_s} + \gamma_w$
• Auftriebswichte:	$\gamma' = (1-n) \cdot (\gamma_s - \gamma_w)$	
• Porenzahl:	$e = \frac{\text{Hohlraumvolumen}}{\text{Feststoffvolumen}}$	$= \frac{V_0}{V_k} = \frac{n}{1-n} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = (1+w) \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1$ $= \frac{w \cdot \gamma_s}{S_r \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_s - \gamma_r}{\gamma_r - \gamma_w}$
• Porenanteil:	$n = \frac{\text{Hohlraumvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}}$	$= \frac{V_0}{V} = \frac{e}{1+e} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{\gamma}{(1+w) \cdot \gamma_s}$ $= \frac{w \cdot \gamma_s}{w \cdot \gamma_s + S_r \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_s - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_w}$
• Wassergehalt: Teilsättigung	$w = \frac{\text{Wassergewicht}}{\text{Feststoffgewicht}}$	$= \frac{G_w}{G_d} = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 = \frac{\gamma}{(1-n) \cdot \gamma_s} - 1$ $= \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot S_r \cdot \gamma_w}{(\gamma - S_r \cdot \gamma_w) \cdot \gamma_s} = S_r \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$
• Maximaler Wassergehalt: gesättigt! $S_r = 1$	$w_{\max} = \frac{n}{1-n} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = n \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d} = e \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{\gamma_r}{\gamma_d} - 1 = \frac{(\gamma_s - \gamma_r) \cdot \gamma_w}{(\gamma_r - \gamma_w) \cdot \gamma_s} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$	
• Sättigungszahl:	$S_r = \frac{w}{w_{\max}} = \frac{\gamma - \gamma_d}{n \cdot \gamma_w} = \frac{(1+e) \cdot \gamma - \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} = \frac{w \cdot \gamma \cdot \gamma_s}{\gamma_w [(1+w) \cdot \gamma_s - \gamma]} = \frac{w \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot (\gamma_s - \gamma_d)}$	

4. Konsistenz, Lagerungsdichte

Konsistenz → bindige Böden:

- Fließgrenze: w_L *Schließen einer Furche nach 25 Schlägen – Interpolation aus mind. 4 Versuchen (Wassergehalt über log Schlagzahl)*
schwachbindig: 0 – 30 % bindig: 30 – 100 %
 - Ausrollgrenze: w_P *wenn keine 2 (3) mm Röllchen mehr möglich*
schwachbindig: 0 – 20 % bindig: 20 – 40 %
 - Plastizitätszahl $I_p = w_L - w_P$ schwachbindig: 0 – 10 % bindig: 10 – 90 %
 - Konsistenzzahl $I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P}$

0,25 - 0,50	breiig	$c_u = 10 - 15$
0,50 - 0,75	weichplastisch	$c_u = 15 - 50$
0,75 - 1,00	steifplastisch	$c_u = 100 - 200$
1,00 - 1,25	halbfest	$c_u = 100 - 400$
- Flüssig-breiig: $I_c \rightarrow 0$: natürlicher Wassergehalt gleich Fließgrenze: $w = w_L$
 Steif-plastisch: $I_c = 1$: natürlicher Wassergehalt gleich Ausrollgrenze: $w = w_P$
 Anmerkung: sowohl $I_c < 0$, als auch $I_c > 1$ kommen in der Natur vor.

Lagerungsdichte → nichtbindige Böden:

- Lagerungsdichte: $D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}$ $0 \leq \text{sehr locker} \leq 0,15 < \text{locker} \leq 0,3 < \text{mitteldicht} \leq 0,5 < \text{dicht} \leq 1,0$
- Bezogene Lagerungsdichte: $I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$ $0 \leq \text{locker} < 1/3 \leq \text{mitteldicht} < 2/3 < \text{dicht}$

- Proktorkennwert:

Mit vorgegebener Verdichtungsenergie maximal erreichbare Trockenwichte in Abhängigkeit vom

Wassergehalt: $D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \cdot 100\%$ → Diagramm: γ_d über w

Trockenwichte bei Sättigung: $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + w \cdot \gamma_s / \gamma_w}$

Luftanteil: $n_a = 1 - \gamma_d \left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w} \right)$ (waagrechter Abstand Sättigung / Proctokurve)

6. Vertikale Zusammendrückung

- Änderung der Porenzahl e bei Zusammendrückung:

$$e^* = \frac{h}{h_0}(1 + e_0) - 1$$

$V_k = \text{konst}, V_0 = \text{variabel}$
 Ansatz: $e = V_0/V_k$ $V_0 + V_k = h_0 \rightarrow V_k = h_0/(1+e)$
 e_0 : Anfangsporenzahl h_0 : Anfangshöhe h : Endhöhe

- Setzung bei Änderung der Porenzahl e :

$$h = h_0 \frac{1 + e^*}{1 + e_0} \rightarrow s = h - h_0 = h_0 \frac{e^* - e_0}{1 + e_0}$$

- Relative Zusammendrückung und wirksame Spannung:

Zusammendrückungsgeschwindigkeit: $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \dot{d}}{\Delta d}$ Δd : momentane Dicke
 $\Delta \dot{d}$: Verringerung der Dicke je Zeiteinheit

Relative Zusammendrückung: $\varepsilon \approx \int_{t_0}^t \dot{\varepsilon} dt \approx \frac{\Delta d_0 - \Delta d}{\Delta d_0} \approx \frac{V_0 - V}{V_0}$

Porenzahl: $e \approx e_0 - \varepsilon(1 + e_0)$

Wirksame Spannung: $\sigma' = \sigma - u$ $\sigma = \Delta F / \Delta A$

→ **normalkonsolidiert**: wird eine Bodenschicht genannt, wenn sie in jeder Tiefe diejenige Porenzahl aufweist, die zu der in-situ vorhandenen Vertikalspannung gehört.

→ **überkonsolidiert**: ein vorbelasteter und teilweise wieder entlasteter Boden

- Erstbelastung:

Kompressionsbeiwert: Tangentensteigung im $\ln(\sigma'/\sigma_0) - e$ - Diagramm.

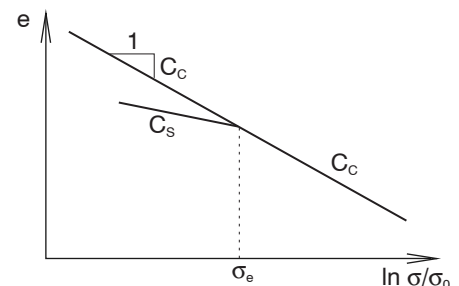
$$C_c = - \frac{d e}{d \ln \frac{\sigma'}{\sigma_0}} = \frac{d \varepsilon (1 + e)}{d \sigma' / \sigma'}$$

Steifemodul: Tangentensteigung im $\sigma' - \varepsilon$ - Diagramm

$$E_s = \frac{d \sigma'}{d \varepsilon} = \sigma' \frac{1 + e}{C_c}$$

Porenzahl: $e = e_0 - C_c \cdot \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0}\right)$

Diagramm: $\ln(\sigma'/\sigma_0)$ über e : körniger Erdstoff: je nach I_D nahezu horizontale Gerade
 bindiger Erdstoff: Gerade mit abweichenden Rändern



Äquivalente Spannung: $\sigma_e = \sigma_0 \exp\left(\frac{e_0 - e}{C_c}\right)$

- Entlastung:

Schwellbeiwert: C_s Tangentensteigung im $\ln(\sigma'/\sigma_0) - e$ - Diagramm bei Entlastung

Geradengleichung: $e = e_v - C_s \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right)$

Steifemodul: $E_s = \sigma' \frac{1 + e}{C_s}$ größer als bei Erstbelastung!

- Wiederbelastung:

Vorspannung: σ_v Übergangspunkt von Wiederbelastung zur Erstbelastung

Porenzahl: $e = e_0 - C_s \ln\left(\frac{\sigma'_e}{\sigma'_0}\right) - C_c \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_e}\right)$

Äquivalente Spannung:
$$\sigma_e = \sigma_0 \exp \left[\frac{C_c \ln \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_0} \right) + C_s \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_v} \right)}{C_c} \right] = \sigma'_v \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_v} \right)^{\frac{C_s}{C_c}}$$

Setzung:
$$s = \frac{H}{1+e} \left[C_s \ln \left(\frac{\sigma_e}{\sigma'_v} \right) + C_c \ln \left(\frac{\sigma'_v + \Delta p}{\sigma_e} \right) \right]$$

7. Spannungsausbreitung

- Eigengewichtsspannung:

$$\sigma_z = \sigma'_z = \gamma \cdot z \quad \text{oberhalb des GW}$$

$$\sigma'_{z,i} = \sigma'_{z,i-1} + \gamma'_i \cdot d_i \quad \text{allgemein; unter GW}$$

→ Abschnittsweise linear mit Knicken an Schichtgrenzen, Grundwasserspiegel

- Spannungen infolge Auflasten:

- Boussinesq; Einzellast q, bzw. kreisförmige Lastfläche mit p_i und A_i

$$\sigma_p = \frac{3F}{2\pi z^2} \cos^5 \vartheta \quad \cos \vartheta = \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \quad r: \text{Abstand auf Oberfläche}$$

Verteilte Lasten: Superposition

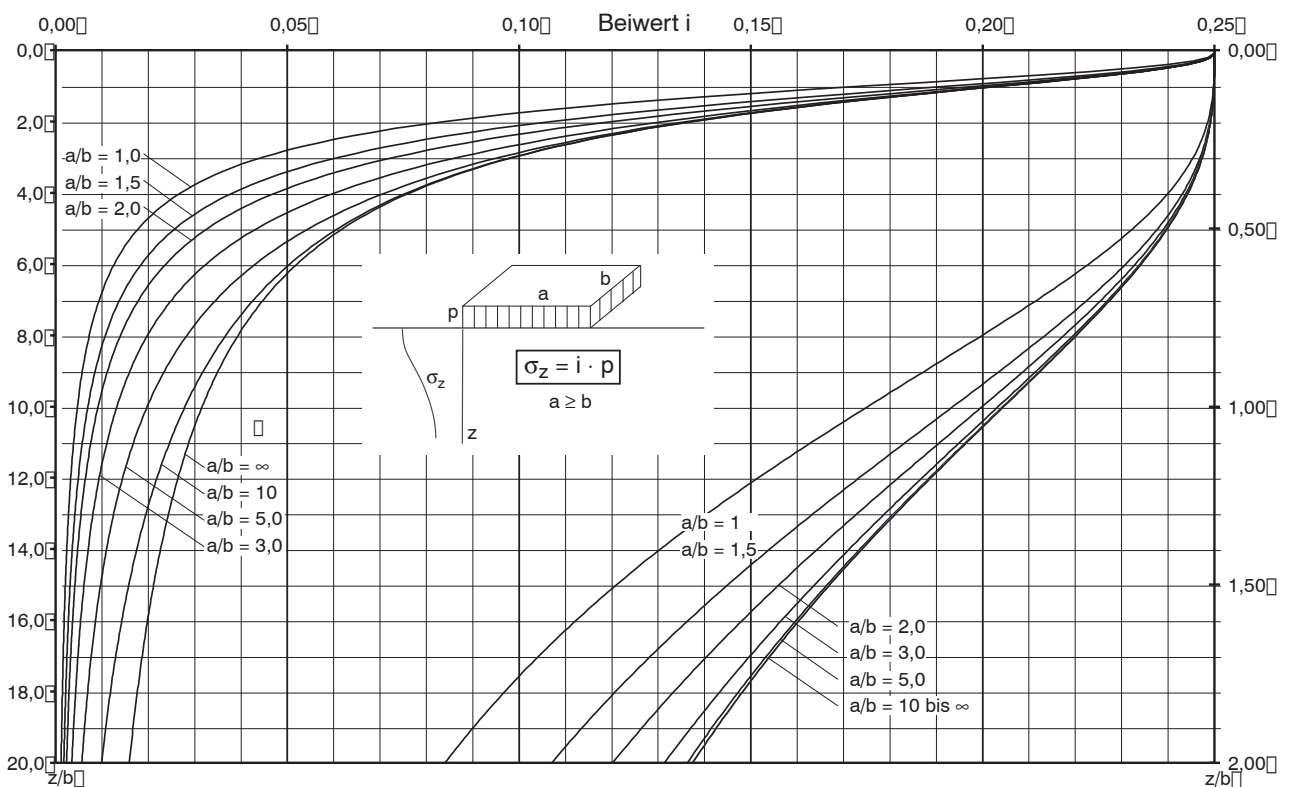
$$\sigma_p = \sum \sigma_{p,i} = \frac{3}{2\pi} z^3 \sum p_i \cdot A_i (z^2 + r_i^2)^{-5/2}$$

- Druckausbreitung unter 45° bei örtlich begrenzter Oberflächenlast

$$\sigma_z = \frac{p}{\left(1 + 2 \cdot \frac{z}{a}\right) \left(1 + 2 \cdot \frac{z}{b}\right)} \quad z: \text{Tiefe} \quad a, b: \text{Abmessungen der Auflast } p$$

- Steinbrenner: Spannung im Randpunkt einer rechteckförmigen, schlaffen Lastfläche

$$\sigma_z = i \cdot p \quad \text{Fläche: } a \geq b$$



- Beliebige Punkte durch vorzeichengerechte Superposition von Teilflächen zu erreichen.

Formel für i:

$$i = f\left(\frac{a}{b}; \frac{z}{b}\right) = \frac{1}{2\pi} \left[\arcsin \frac{a \cdot b}{\sqrt{a^2 + z^2} \sqrt{b^2 + z^2}} + \frac{a \cdot b \cdot z \cdot (r^2 + z^2)}{r \cdot (r^2 \cdot z^2 + a^2 \cdot b^2)} \right]$$

$$r = \sqrt{a^2 + b^2 + z^2}$$

8. Setzungsberechnung

- Steifemodul $E_s \rightarrow$ Verformungsmodul E_v
Erste Näherung: $E_v = E_s$ oder Korrekturfaktor nach DIN 4019
- Direkte Setzungsberechnung (Für schichtweise konstantes E_v)

$$s = \frac{1}{E_v} \int_{z=0}^t \sigma(z) dz$$

$$\text{Nach Steinbrenner: } s = \frac{f_s \cdot b \cdot p_o}{E_v}$$

$$\text{Setzungsbeiwert } f_s = f\left(\frac{a}{b}; \frac{z}{b}\right)$$

E_v = Verformungsmodul
 p_o = Oberflächenlast

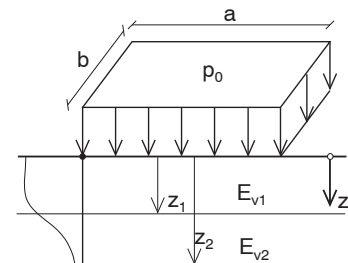
a = Fundamentlänge
 b = Fundamentbreite
 z = Tiefe

in Tabellen oder Diagrammen, hier für $\nu = 0,5$ und Setzung des Eckpunktes (vgl. Bild 7.6 AfBM)

z/b	a/b	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10,0	∞
0,25		0,0622	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623
0,5		0,1222	0,1232	0,1232	0,1233	0,1234	0,1234	0,1234
0,75		0,1770	0,1799	0,1806	0,1812	0,1814	0,1814	0,1814
1,0		0,2247	0,2314	0,2333	0,2346	0,2349	0,2350	0,2350
1,5		0,2988	0,3161	0,3223	0,3264	0,3276	0,3279	0,3279
2,0		0,3500	0,3792	0,3914	0,4003	0,4033	0,404	0,4040
3,0		0,4143	0,4634	0,4880	0,5091	0,5194	0,5221	0,5222
4,0		0,4501	0,5137	0,5484	0,5823	0,6029	0,6094	0,6099
6,0		0,4897	0,5705	0,6196	0,6751	0,7173	0,7358	0,7383
8,0		0,5097	0,5997	0,6574	0,7269	0,7887	0,8232	0,8297
10		0,5217	0,6175	0,6806	0,7593	0,8367	0,8878	0,9007
12		0,5297	0,6295	0,6964	0,7817	0,8711	0,9376	0,9587
15		0,5378	0,6415	0,7126	0,8051	0,9074	0,9923	1,0298
18		0,5432	0,6496	0,7231	0,8207	0,9323	1,0337	1,0880
∞		0,5460	0,6536	0,7283	0,8285	0,9449	1,0553	1,1216

- Bei geschichteten Untergrundaufbau (für $\nu = 0,5$):

$$s_p = s_1 + s_2 = b \cdot p_o \left[\frac{f_s|_0^{z_1/b}}{E_{v1}} + \frac{f_s|_0^{z_2/b} - f_s|_0^{z_1/b}}{E_{v2}} \right]$$



- Mittelwert bei verschiedenen E_v (z.B. dünnbankig geschichteter Boden)

$$\bar{E}_v = \frac{(x_1 + x_2) \cdot E_{v1} \cdot E_{v2}}{E_{v1} \cdot x_2 + E_{v2} \cdot x_1} \quad \text{Mittelung über Kehrwerte !}$$

- Indirekte Setzungsberechnung

- Einteilung Untergrund in Schichten
- Vorlastzustand σ_{vj} in Schichtmitten (Eigengewicht – GW!, Nachbargebäude, ...)
- Zusatzspannung infolge Baumaßnahme an Schichtgrenzen (evtl. Aushub berücksichtigen)
- Mittlere Zusatzspannung $\Delta\sigma_j$ – Mittelwert der Werte an den Schichtgrenzen
- Mit σ_{vj} und $\Delta\sigma_j$ kann direkt aus dem Drucksetzungsversuch das zugehörige $\Delta\varepsilon_j$ ermittelt werden
- Gesamtsetzung – Summe der Setzungen der einzelnen Schichten:

$$s = \sum_{j=1}^n \Delta\varepsilon_j \cdot \Delta z_j = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\sigma_j}{E_{sj}} \cdot \Delta z_j$$

Grenztiefe: z_g : wenn $\Delta\sigma_g = 20\% \cdot \sigma_{vg}$

- Starr – schlaff: $s_{starr} \approx 0,75 \cdot s_{schlaff}$

9. Konsolidierung

Konsolidierungsbeiwert: $c_v = \frac{k E_s}{\gamma_w}$

Δp : aufgebrachte Belastung Δu : Porenwasserüberdruck $\Delta \sigma'$: effektive Zusatzspannung
 H: Schichtdicke

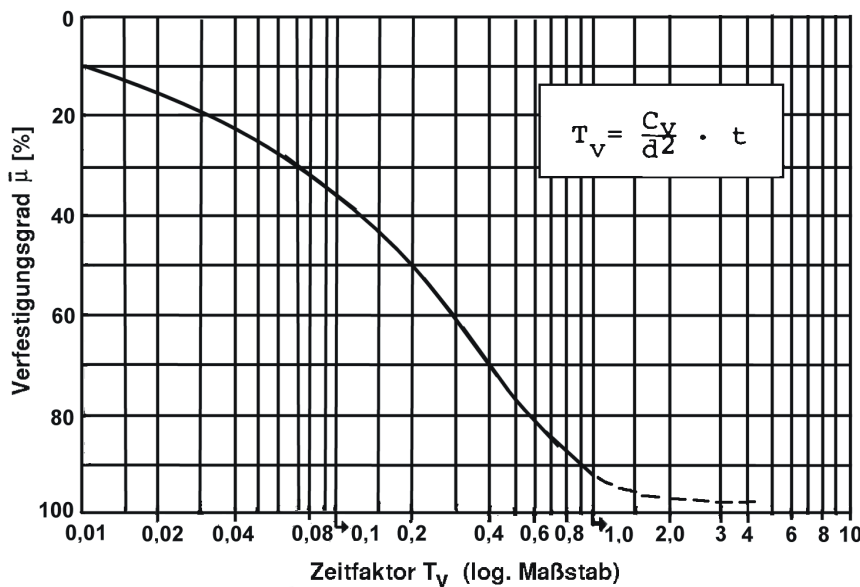
d: Entwässerungslänge, das bedeutet rechnerische Schichtdicke H bei einseitiger Entwässerung, halbe Schichtdicke H/2 bei beidseitiger Entwässerung

μ : Konsolidierungsgrad

$$\mu(z,t) = \frac{\Delta \sigma'(z,t)}{\Delta p} = 1 - \frac{\Delta u(z,t)}{\Delta p} \qquad \bar{\mu}(t) = \frac{s(t)}{s_\infty} = \frac{1}{d} \int_0^d \mu(z,t) dz$$

Abschätzung: $\bar{\mu} \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{c_v \cdot t}{\pi \cdot d^2}}$ bzw. $T_v \approx \frac{\pi}{4} \cdot \bar{\mu}^2$ für $0 \leq \bar{\mu} \leq 0,5$

$T_v \approx -0,405 \cdot (0,21 + \ln(1 - \bar{\mu}))$ für $0,5 \leq \bar{\mu} \leq 0,9$



ACHTUNG:
 d = H, wenn einseitig
 d = H/2, wenn beidseitig
 entwässert

Zeitfaktor: $T_v = \frac{c_v}{d^2} \cdot t$

Zeit bis zum Abschluss der Primärkonsolidierung:

$T_v = 1$
 $t(T_v = 1) = \frac{1 \cdot d^2}{c_v}$

Zeit bis zu der 98% der gesamten Setzung stattgefunden haben:

$t_{98} = \frac{4 \cdot d^2}{c_v}$

Modellgesetz (Terzaghi): $\frac{t_p}{t_M} = \left(\frac{d_p}{d_M} \right)^2$

Momentane Setzung: $s = \sum \bar{\mu}_i \cdot s_{i\infty}$

Isochronen des Porenwasserüberdruckes näherungsweise Parabeln 2. Ordnung (ACHTUNG: obere Grenze beachten → Max der Parabel nicht größer als Belastungsdruck Δp)

Beziehungen: $\Delta p = \Delta u(z) + \Delta \sigma'(z)$

totale Zusatzspannung = Porenwasserüberdruck + effektive Zusatzspannung

$\Delta u_{\max} = \frac{2}{3} (1 - \bar{\mu}) \cdot \Delta p$

$\Delta \sigma'_{\min} = \frac{1}{2} (3\bar{\mu} - 1) \cdot \Delta p$

$\Delta \sigma' = \bar{\mu} \cdot \Delta p$

mittlere effektive Zusatzspannung

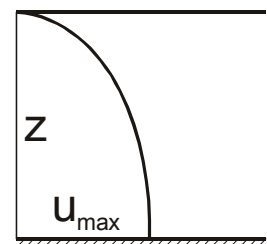
$\Delta u = \Delta p (1 - \bar{\mu}) = \frac{2}{3} \cdot \Delta u_{\max}$

mittlerer Porenwasserüberdruck

$\Delta u(z) = \Delta u_{\max} \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right]$

$\Delta \sigma'(z) = \Delta p - \Delta u(z)$

$\bar{\mu} = 1 - \frac{2}{3} \frac{\Delta u_{\max}}{\Delta p}$



10. Scherfestigkeit

Maßgebende Vorschrift: DIN 18137, T1 u. 2

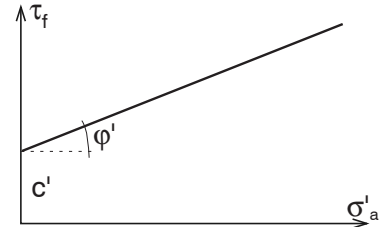
- Rahmenschergerät:

Meßgrößen: Schubkraft T, Horizontalverschiebung s, Auflast p (vorgegeben) Breite des quadratischen Scherkastens: b

Schubspannung: $\tau_f = \frac{T}{b \cdot (b - s)}$ Normalspannung: $\sigma_a = \frac{P}{b^2}$

Schergesetz:

- Coulomb $\tau_f = c' + \sigma'_a \cdot \tan \varphi'$



- Krey-Tiedemann – bindiger Boden

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot \tan \varphi' + \sigma'_a \cdot \tan \varphi'$$

$$\tan \varphi'_s = \tan \varphi' + \tan \varphi_c$$

σ'_v : effektive Spannung vor Versuchsbeginn

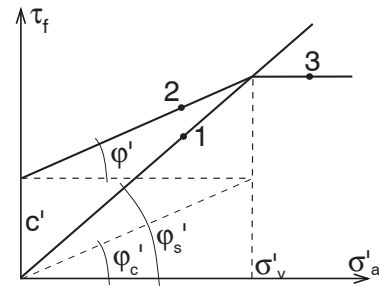
σ'_a : e.S. während des Versuchs

φ_c : Winkel der Kohäsion

φ' : Winkel der inneren Reibung

φ'_s : Winkel der Gesamtscherfestigkeit

$$c_u = \sigma' \cdot \tan \varphi'_s$$



- 1: normalkonsolidiert
- 2: überkonsolidiert
- 3: unterkonsolidiert

- Triaxialversuch:

Meßgrößen: Stempelkraft P₁, Stempelverschiebung Δh, ggf. Volumenänderung ΔV, ggf. Porenwasserdruck u, Seitendruck σ₃ (i.d.R. vorgegeben)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{P_1}{F_a} \quad \varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad F_a: \text{aktuelle Probenfläche} \quad h_0: \text{Anfangsprobenhöhe}$$

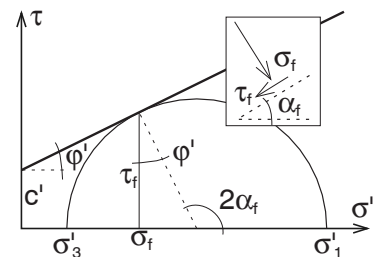
Schergesetz:

- Mohr-Coulomb:

Auftragung der effektiven Hauptspannungen σ₁' und σ₃' beim Bruch → φ' und c': Endstandsicherheit

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \cdot \sin \varphi' + 2 \cdot c' \cdot \cos \varphi'$$

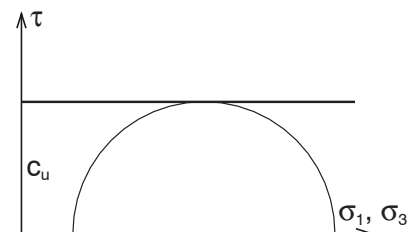
$$\alpha_f = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}$$



- Tresca:

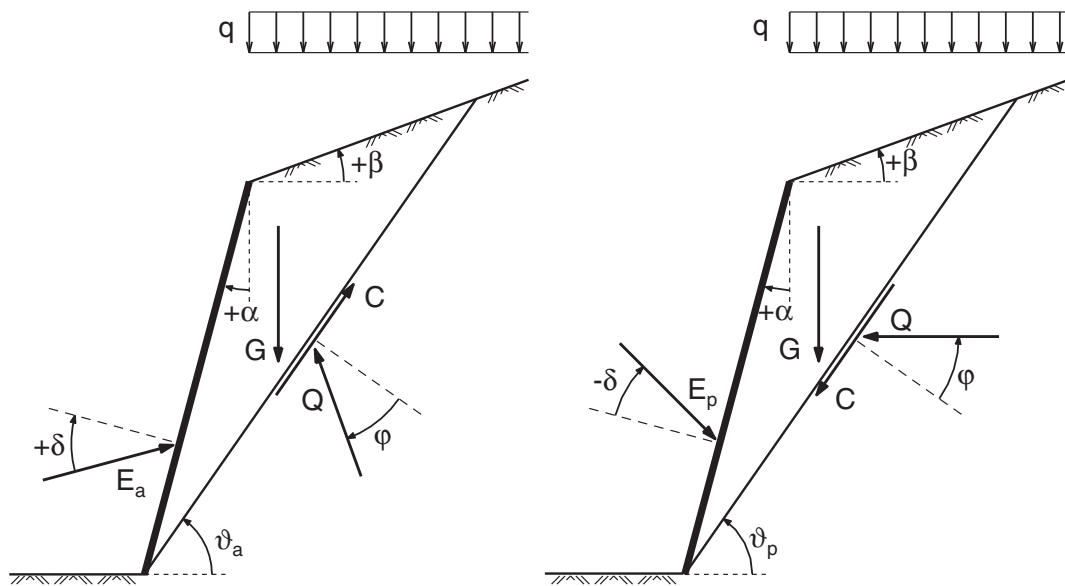
Auftragung der totalen Spannungen σ₁ und σ₃ beim Bruchzustand → c_u: Anfangsstandsicherheit

$$c_u = \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



11. Erddruck

- aktiv: Wandbewegung vom Boden weg
- passiv: Wandbewegung zum Boden hin



- Erddruck:

$$e_{ah} = \sigma'_z \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ah}} \cdot \sqrt{\cos(\alpha - \delta)}$$

$$E_{ah} = \int_z e_{ah} dz$$

- Erdruhedruck: ($\alpha = \beta = \delta = 0$)

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

- Erhöhter aktiver Erddruck:

$$K = \frac{K_0 + K_{ah}}{2}$$

- Bei vorgegebener Gleitfuge ϑ (z.B. ansteigender Fels hinter Wand)

$$E_{a,p} = G \cdot \frac{\sin(\vartheta_{a,p} \mp \varphi)}{\cos(\vartheta_{a,p} \mp \varphi + \alpha - \delta)} = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot \frac{\sin(\vartheta_{a,p} \mp \varphi)}{\cos(\vartheta_{a,p} \mp \varphi + \alpha - \delta) \cdot \cos^2 \alpha \cdot [\tan(\vartheta_{a,p} + \alpha) - \tan(\alpha + \beta)]}$$

- Evtl. zusammengesetzte Mechanismen \rightarrow BM II/III

- Einseitig begrenzte Auflast:

Normaler Erddruckbeiwert, Spannungsverlauf ab Reibungswinkel ansteigend bis Gleitfugeneigung zunehmend, dann konstant.

- Erddruck auf eine Stützwand

Lastausbreitung (Verkehrslasten – Streifenlasten)

einfach – rechteckförmig:

oben: $\leq \varphi$

unten: ϑ_a

erweiterte, z.B. trapezförmig:

oben und unten je φ und ϑ_a

Umverteilung in Ersatzlastfigur abhängig von der Wandart \rightarrow EAB

- Freie Standhöhe:

$$E_a = 0: h_2 = \frac{4 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}} - \frac{2 \cdot q}{\gamma}$$

$$e_a = 0: h_1 = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}} - \frac{q}{\gamma}$$

- Erddruckbeiwerte – Aktiv

- Fall 1 $\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\delta = 0$ **aktiv**

$$K_{ah} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \pi/4 = 45^\circ !$$

$$\vartheta_a = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$$

$$e_{ah} = [\gamma \cdot h + q] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ah}}$$

$$E_{ah} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 + q \cdot h \right] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{K_{ah}}$$

$$E_{av} = 0 \quad E_a = E_{ah}$$

- Fall 2 $\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\delta \neq 0$ **aktiv**

$$K_{ah} = \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2}$$

$$\vartheta_a = \varphi + \operatorname{arccot} \left[\tan \varphi + \frac{\sqrt{1 + \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}}}{\cos \varphi} \right] \quad \operatorname{arccot}[\dots] = 90^\circ - \operatorname{arctan}[\dots]$$

$$e_{ah} = [\gamma \cdot h + q] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ah}} \cdot \sqrt{\cos \delta}$$

$$E_{ah} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 + q \cdot h \right] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{K_{ah}} \cdot \sqrt{\cos \delta}$$

$$E_{av} = E_{ah} \cdot \tan \delta \quad E_a = \frac{E_{ah}}{\cos \delta}$$

- Fall 3 $\alpha \neq 0$ $\beta \neq 0$ $\delta \neq 0$ **aktiv**

$$K_{ah} = \frac{\cos^2(\varphi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \cos(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

$$\vartheta_a = \varphi + \operatorname{arccot} \left[\tan(\alpha + \varphi) + \frac{1}{\cos(\alpha + \varphi)} \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta - \alpha)}} \right]$$

$$e_{ah} = [\gamma \cdot h + q] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ah}} \cdot \sqrt{\cos(\delta - \alpha)}$$

$$E_{ah} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 + q \cdot h \right] \cdot K_{ah} - 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{K_{ah}} \cdot \sqrt{\cos(\delta - \alpha)}$$

$$E_{av} = E_{ah} \cdot \tan|\delta - \alpha| \quad E_a = \frac{E_{ah}}{\cos|\delta - \alpha|}$$

- Erddruckbeiwerte – Passiv

- Fall 1 $\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\delta = 0$ **passiv**

$$K_{ph} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \pi/4 = 45^\circ !$$

$$\vartheta_p = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$$

$$E_{ph} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 + q \cdot h \right] \cdot K_{ph} + 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{K_{ph}}$$

$$E_{pv} = 0 \quad E_p = E_{ph}$$

- Fall 2 $\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\delta \neq 0$ **passiv**

$$K_{ph} = \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \cdot \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2}$$

$$\vartheta_p = -\varphi + \operatorname{arccot} \left[\tan(-\varphi) + \frac{\sqrt{1 + \frac{\tan \delta}{\tan(-\varphi)}}}{\cos(-\varphi)} \right] \quad \operatorname{arccot}[\dots] = 90^\circ - \operatorname{arctan}[\dots]$$

$$E_{ph} = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 + q \cdot h \right] \cdot K_{ph} + 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{K_{ph}} \cdot \sqrt{\cos \delta}$$

$$E_{pv} = E_{ph} \cdot \tan|\delta| \quad E_p = \frac{E_{ph}}{\cos|\delta|}$$

- Fall 3 $\alpha \neq 0$ $\beta \neq 0$ $\delta \neq 0$ **passiv**

Formelle Bestimmung nach Coulomb nicht üblich → Erddruckbeiwert aus gekrümmter Gleitfuge oder zusammengesetztem Bruchmechanismus.

12. Geländebruch

- Ebene Gleitfläche:

Unendlich ausgedehnte Böschung:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{T_{fd}}{T_d} = \frac{\tan \varphi_d}{\tan \beta} \geq 1$$

$$T_d = G_d \cdot \sin \beta = G_k \cdot \gamma_G \cdot \sin \beta$$

$$N_d = G_d \cdot \cos \beta = G_k \cdot \gamma_G \cdot \cos \beta$$

$$T_{fd} = N_d \cdot \tan \varphi_d = N_d \cdot \tan \varphi_k / \gamma_\varphi$$

Hangparallel durchströmte Böschung:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\tan \varphi_d}{\tan \beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma_w}{\gamma'_d}} \geq 1$$

$$T_d = V \cdot (\gamma'_k \cdot \gamma_G \cdot \sin \beta + \gamma_w \cdot \sin \beta)$$

$$N_d = G'_d \cdot \cos \beta = V \cdot \gamma'_k \cdot \gamma_G \cdot \cos \beta$$

$$T_{fd} = N_d \cdot \tan \varphi_d = N_d \cdot \tan \varphi_k / \gamma_\varphi$$

Begrenzte Böschung (kohäsiver Boden, $\beta > 60^\circ$):

$$G_d = \frac{1}{2} \gamma_d \cdot h^2 (\cot \vartheta - \cot \beta) = \frac{1}{2} \gamma_k \cdot \gamma_G \cdot h^2 (\cot \vartheta - \cot \beta)$$

$$T_d = G_d \cdot \sin \vartheta = G_k \cdot \gamma_G \cdot \sin \vartheta \quad N_d = G_d \cdot \cos \vartheta$$

$$T_{fd} = C_d + N_d \cdot \tan \varphi_d = c_d \cdot \frac{h}{\sin \vartheta} + \frac{1}{2} \gamma_d \cdot h^2 (\cot \vartheta - \cot \beta) \cdot \cos \vartheta \cdot \tan \varphi_d$$

Maximalwert: $\left(\frac{2 \cdot c_d}{\gamma_d \cdot h} \right)_{\max} = \left(\frac{2 \cdot c_k}{\gamma_k \cdot h \cdot \gamma_c} \right)_{\max} = \frac{\sin^2 \left(\frac{\beta - \varphi_d}{2} \right)}{\sin \beta \cdot \cos \varphi_d}$ für $\vartheta_0 = \frac{\varphi_d + \beta}{2}$

Oder GEO-3 Gleiten: $\frac{R_d}{E_d} = \frac{T_{d,m\ddot{o}glich}}{T_{d,vorhanden}} = \frac{C_d + N_d \cdot \tan \varphi_d}{G_d \cdot \sin \beta} = \frac{\frac{C_k}{\gamma_c} + N_d \cdot \frac{\tan \varphi_k}{\gamma_\varphi}}{G_d \cdot \sin \beta} \geq 1$

- Gekrümmte Gleitfläche – homogener Boden

Rein kohäsiver Boden: zu G ggf. noch veränderliche Lasten P mit $G_d + P_d = G_k \cdot \gamma_G + P_k \cdot \gamma_Q$

Ausnutzungsgrad: $\mu = \frac{M_{d,treibend}}{M_{d,haltend}} = \frac{G_d \cdot r_G + P_d \cdot r_Q}{r \cdot \int \tau_{fd} ds} = \frac{G_d \cdot r_G + P_d \cdot r_Q}{r^2 \cdot c_d \cdot \psi_0}$ bzw.

Teilsicherheitsfaktor: $\gamma_{c'} = \frac{r^2 \cdot c_k \cdot \psi_0 \cdot \mu}{G_d \cdot r_G + P_d \cdot r_Q}$

Böden mit Reibung:

Kohäsion: C hat Richtung der Sekante des Gleitkreises.

$$C_d = 2 \cdot c_d \cdot r \cdot \sin(\psi_0 / 2) \quad r_c = \frac{r \cdot \psi_0}{2 \sin(\psi_0 / 2)}$$

Resultierende Q (nach DIN 4084 - inzwischen ist das Zeichen Q für veränderliche Einwirkungen reserviert !) aus Reibung und Normalkraft:

Differenzielle Resultierende dQ berührt den Reibungskreis mit Radius $r_Q = r \cdot \sin \varphi$

Stand sicherheitsnachweis:

- Ermittlung von G (zuzüglich veränd. Lasten P wie oben) nach Größe, Lage und Richtung
- Zusammenfassung zu einer Resultierenden der treibenden Kräfte R mit Hebelarm r_R
- Aus Kräfteck ergibt sich eine Kraft Q, die mit R und C im Kräftegleichgewicht ist.
- Momentengleichgewicht erfüllt, wenn Kraft Q durch den Schnittpunkt von R und C geht
- Ausnutzungsgrad:

$$\mu = \frac{M_{d,treibend}}{M_{d,haltend}} \approx \frac{R \cdot r_R}{r^2 \cdot c_d \cdot \psi_0 + Q \cdot r \cdot \sin \varphi_d} = \frac{R \cdot r_R}{r^2 \cdot \frac{c_k}{\gamma_c} \cdot \psi_0 + Q \cdot r \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \varphi_k}{\gamma_\varphi} \right) \right)}$$

- oder Teilsicherheitsfaktor (bei bekanntem, festem $\gamma_{c'}$):

$$\gamma_\varphi = \frac{\tan(\varphi_k)}{\tan(\varphi_d)} \quad \text{mit} \quad \varphi_d = \arcsin\left(\frac{r_Q(R, C, r_c, r_R)}{r}\right)$$

- Gekrümmte Gleitfläche – inhomogener Boden (Fellenius)

Gleitkörper in Lamellen unterteilen (bessere Abschätzung der Druckverteilung, Berücksichtigung der Schichtung).

Lamellenbreite b_i , Neigung der Gleitfläche jeweils ϑ_i . An jeder Lamelle wirken:

- Resultierende der äußeren Kräfte (Gewichte G_i , Auflast P_i) mit Hebelarm r :

$$\sum (G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \sin \vartheta_i$$

- Porenwasserdruck u_i auf die Gleitfläche der Länge $l_i = b_i / \cos \vartheta_i$ (gleichwertig ersetzbar durch Strömungskräfte in den Lamellen mit errechneten Hebelarmen \rightarrow Zusatzmoment)

- E_i und E_{i+1} : Erddrücke an den Lamellengrenzen links und rechts unter den Winkeln δ_i

- Normalkraft N_i in der Gleitfuge je nach Annahme für δ_i :

$$\delta_i = \vartheta_i \rightarrow N_{d,i} = (G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \cos \vartheta_i - u_i \cdot l_i \quad (\text{nach Fellenius, nur für Voruntersuchungen})$$

$$\delta_i = 0 \rightarrow N_{d,i} = \frac{G_{d,i} + P_{d,i} - u_i \cdot l_i \cdot \cos \vartheta_i - \mu \cdot c_{d,i} \cdot l_i \cdot \sin \vartheta_i}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi_{d,i}} \quad (\text{Krey-Bishop vereinfacht})$$

$$\delta_i = \varepsilon_i \rightarrow N_{d,i} = \frac{(G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \cos \varepsilon_i - u_i \cdot l_i \cdot \cos(\vartheta_i - \varepsilon_i) - \mu \cdot c_{d,i} \cdot l_i \cdot \sin(\vartheta_i - \varepsilon_i)}{\cos(\vartheta_i - \varepsilon_i) + \mu \cdot \sin(\vartheta_i - \varepsilon_i) \cdot \tan \varphi'_{d,i}} \quad (\text{Bishop erweitert})$$

- T_i : Schubkraft in der Gleitfuge

$$T_{d,i} = c_{d,i} \cdot l_i + N_{d,i} \cdot \tan \varphi_{d,i} \quad (\text{Fellenius, nur für Voruntersuchungen})$$

$$T_{d,i} = \mu \cdot (c_{d,i} \cdot l_i + N_{d,i} \cdot \tan \varphi_{d,i}) \quad (\text{Krey-Bishop})$$

Nachzuweisen: Ausnutzungsgrad $\mu = \frac{M_{E,d}}{M_{R,d}} = \frac{r \cdot \sum (G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \sin \vartheta_i}{r \cdot \sum (c_{d,i} \cdot l_i + N_{d,i} \cdot \tan \varphi_{d,i})} \leq 1$

$$\mu = \frac{r \cdot \sum (G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \sin \vartheta_i}{r \cdot \sum \left(\frac{c_{k,i}}{\gamma_c} \cdot \frac{b_i}{\cos \vartheta_i} + \left[(G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \cos \vartheta_i - u_i \cdot \frac{b_i}{\cos \vartheta_i} \right] \cdot \frac{\tan \varphi_{k,i}}{\gamma_\varphi} \right)} \quad (\text{Fellenius})$$

$$\mu = \frac{r \cdot \sum (G_{d,i} + P_{d,i}) \cdot \sin \vartheta_i}{r \cdot \sum \left(\frac{\frac{c_{k,i}}{\gamma_c} \cdot b_i + [(G_{d,i} + P_{d,i}) - u_i \cdot b_i] \cdot \frac{\tan \varphi_{k,i}}{\gamma_\varphi}}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \frac{\tan \varphi_{k,i}}{\gamma_\varphi}} \right)} \quad (\text{Krey-Bishop vereinfacht})$$

iterativ durch Annahme von μ und Einsetzen (DIN 4084)

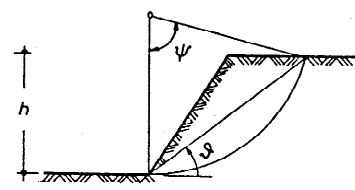
- Vereinfachte Gleitkreisberechnung

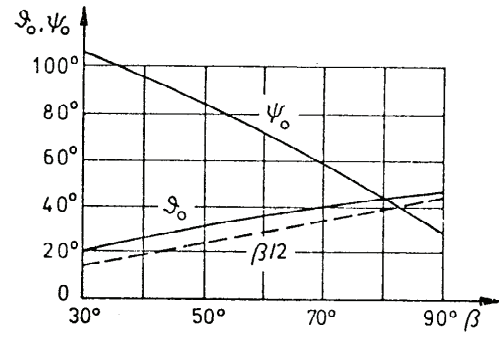
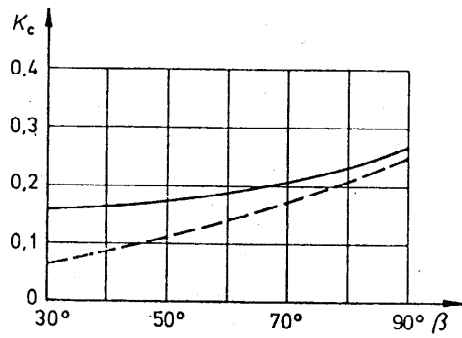
$$c = c_u, \varphi = 0$$

kleinster Sicherheitsfaktor

$$\gamma_{cu} = \frac{c_{uk}}{K_c \cdot \gamma_d \cdot h} \quad \text{bei } \vartheta = \vartheta_0 \text{ und } \psi = \psi_0$$

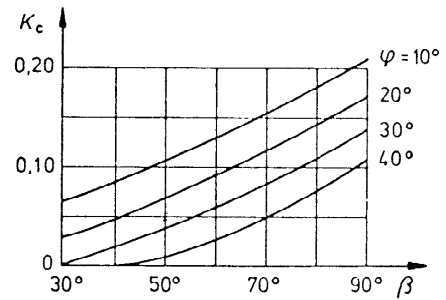
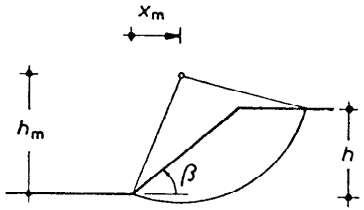
Gestrichelt: Lösung bei $\psi = 0$ (Gleitebene)





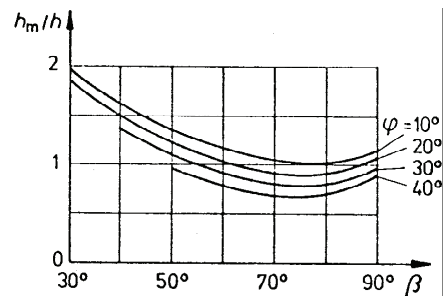
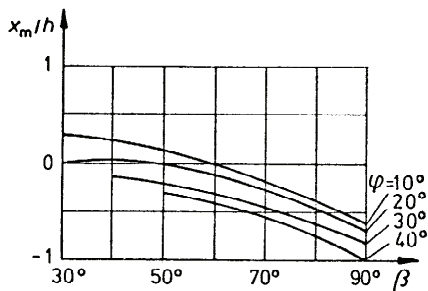
$c > 0, \varphi > 0$ (Ableitung für $\varphi = \varphi_d$)

mit Reibungskreisannahme

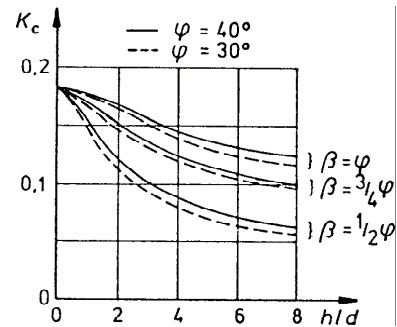
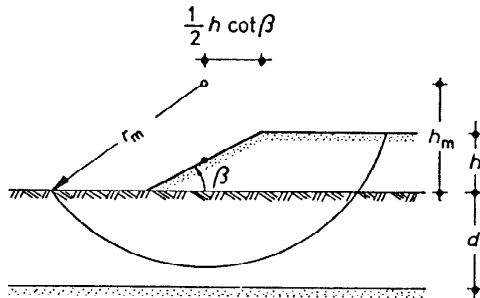


kleinster Sicherheitsfaktor mit den Koordinaten x_m und h_m des Kreismittelpunkts (Ableitung für $\varphi = \varphi_d$):

$$\gamma_c = \frac{c_k}{K_c \cdot \gamma_d \cdot h}$$

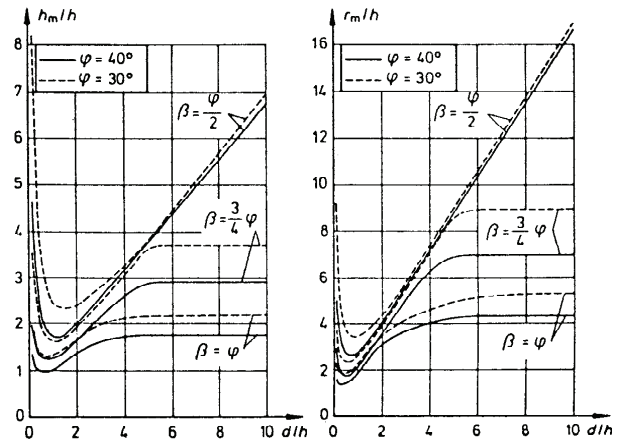


Damm ($c = 0, \varphi > 0$, Ableitung für $\varphi = \varphi_d$) auf c_u -Boden



kleinster Sicherheitsfaktor mit dem Radius r_m und der Mittelpunkthöhe h_m
 (Ablesung für $\varphi = \varphi_d$):

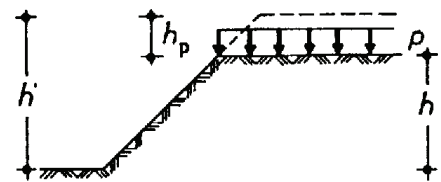
$$\gamma_c = \frac{c_{uk}}{K_c \cdot \gamma_d \cdot h}$$



- Gewichtete Parameter – Auflast → Zusätzliche Höhe

Bedingung:
$$p_k \leq \frac{\gamma_d \cdot h}{3} \cdot \frac{\gamma_G}{\gamma_Q}$$

entspricht zusätzlicher Böschungshöhe:
$$h_p = \frac{p_k}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_Q}{\gamma_G}$$



- Boden aus mehreren verschiedenen Schichten:

Gerade Gleitfuge: entweder Annahme des kleineren der beiden (wenn fast gleich), oder Gewichtung

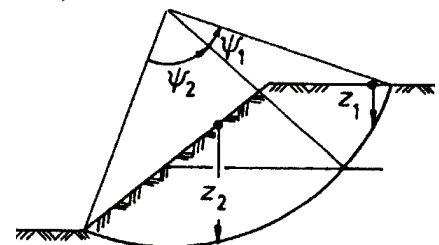
Kohäsion:
$$\bar{c} = \frac{c_1 \cdot h_1 + c_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2}$$

Reibungswinkel:
$$\bar{\varphi} = \varphi_1 \cdot \frac{h_1^2}{(h_1 + h_2)^2} + \varphi_2 \cdot \left(1 - \frac{h_1^2}{(h_1 + h_2)^2} \right)$$

Gekrümmte Gleitfuge:

Kohäsion:
$$\bar{c} = \frac{c_1 \cdot \psi_1 + c_2 \cdot \psi_2 + \dots}{\psi_1 + \psi_2 + \dots}$$

Reibungswinkel:
$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 \cdot z_1 \cdot \psi_1 + \varphi_2 \cdot z_2 \cdot \psi_2 + \dots}{z_1 \cdot \psi_1 + z_2 \cdot \psi_2 + \dots}$$



- Teilsicherheitsbeiwerte (DIN 1054:2010):

GEO-3

Verlust der Gesamtstandsicherheit

	Bemess.-situation	BS-P	BS-T	BS-A
Ständige Einwirkung	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünst. Veränderl. Einwirkung	γ_Q	1,30	1,20	1,00
Scherfestigkeit Reibungsbeiwert	$\gamma_{\varphi}, \gamma_{\varphi u}$	1,25	1,15	1,10
Scherfestigkeit Kohäsion	γ_c, γ_{cu}	1,25	1,15	1,10

13. Gleiten und Grundbruch

- Sicherheitsmodell:
 - Bezugsgröße Kraft: Gleiten $H_d \leq R_d + R_{p,d}$ Bemessungswert der Beanspruchung in Richtung der Fundamentsohle \leq Bemessungswert des Gleitwiderstands + Erdwiderstand
 - Grundbruch $V_d \leq R_d$ Bemessungswert der Beanspruchung senkrecht zur Fundamentsohle \leq Bemessungswert des Grundbruchwiderstands

- Teilsicherheitsbeiwerte (DIN 1054:2010):

GEO-2		Bemessungssituation	BS-P	BS-T	BS-A
Versagen von Bauwerken	Ständige Einwirkung	γ_G	1,35	1,20	1,10
	Ungünst. Veränderl. Einwirkung	γ_Q	1,50	1,30	1,10
	Erd- und Grundbruchwiderstand	$\gamma_{R,e}, \gamma_{R,v}$	1,40	1,30	1,20
	Gleitwiderstand	$\gamma_{R,h}$	1,10	1,10	1,10

- Einwirkung und Widerstand Gleiten:

$$H_d = H_{G,k} \cdot \gamma_G + H_{Q,k} \cdot \gamma_Q \text{ (Bemessungsbeanspruchung)}$$

$$R_{p,d} = R_{p,k} / \gamma_{R,e} \text{ (Bodenreakton an der Stirnseite des Fundamentkörpers)}$$

$$R_d = R_{t,k} / \gamma_{R,h} \text{ (Bemessungs-Gleitwiderstand) mit } R_{t,k} = A \cdot c_{u,k} \text{ (Anf.-zustand } c_u\text{-Fall)}$$

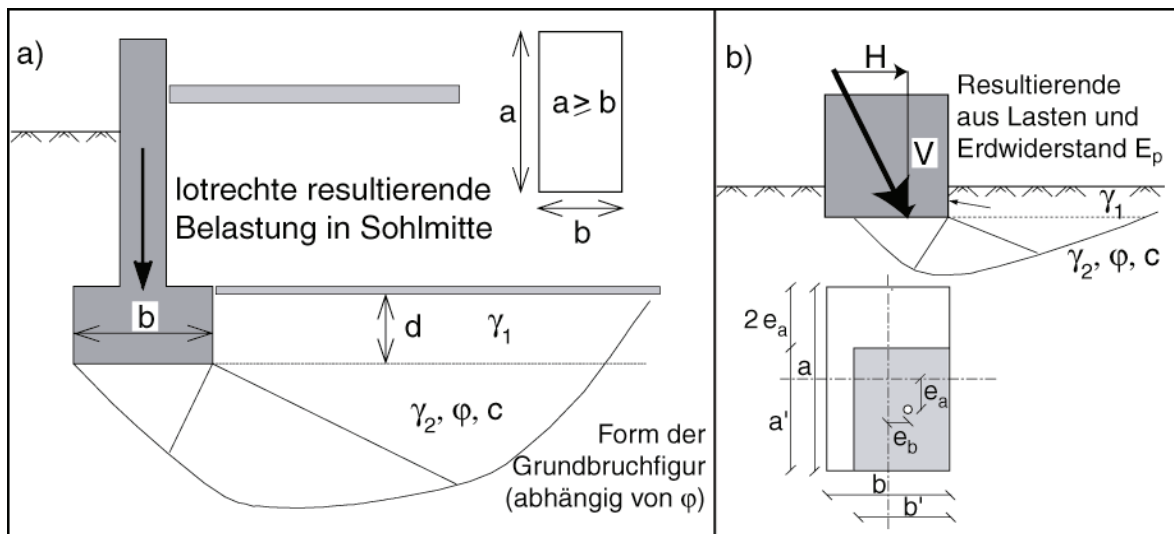
bzw. $R_{t,k} = V_k \cdot \tan \delta_k$ (Endzustand nach Konsolidierung)

bzw. $R_{t,k} = V_k \cdot \tan \phi'_k + A \cdot c'_k$ (Bruchfläche im Boden)

- Einwirkung und Widerstand Grundbruch:

$$V_d = V_{G,k} \cdot \gamma_G + V_{Q,k} \cdot \gamma_Q \text{ (Bemessungsbeanspruchung)}$$

$$R_d = R_{n,k} / \gamma_{R,v} \text{ (Bemessungs-Grundbruchwiderstand)}$$



- Grundbruchlast (schräg und außermittig belastete Fundamente):

$$R_{nk} = b' \cdot a' \cdot (\underbrace{c_k \cdot N_c}_{\text{Kohäsion}} + \underbrace{\gamma_{1k} \cdot d \cdot N_d}_{\text{Gründungstiefe}} + \underbrace{\gamma_{2k} \cdot b' \cdot N_b}_{\text{Gründungsbreite}}) \text{ mit}$$

d = geringste Gründungstiefe unter GOK b' = rechnerische Breite, a' = rechnerische Länge
wobei immer gelten muss: $b' \leq a'$

γ_{1k} : Wichte Boden oberhalb Gründungssohle γ_{2k} : Wichte Boden unterhalb Gründungssohle

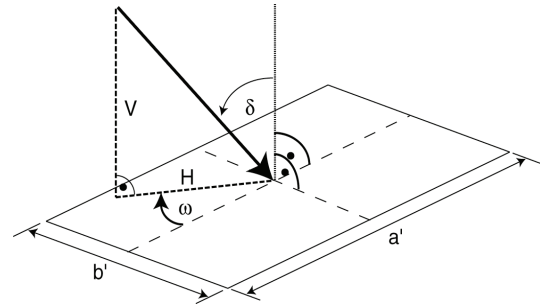
$$N_b = N_{b0} \cdot \nu_b \cdot i_b \cdot \lambda_b \cdot \xi_b$$

$$N_d = N_{d0} \cdot \nu_d \cdot i_d \cdot \lambda_d \cdot \xi_d$$

$$N_c = N_{c0} \cdot \nu_c \cdot i_c \cdot \lambda_c \cdot \xi_c$$

Tragfähigkeitsbeiwerte für den Einfluss der Grundrissform (ν) und der Neigungen der Einwirkung (i), des Geländes (λ) und der Sohlfläche (ξ)

a', b': rechnerische Länge, bzw. Breite des
 Gründungskörpers a' > b'
 $x' = x - 2 \cdot e_x$ a, b → x!
 $e_x = M_x / V$ (M auf Mittelpunkt Sohle bezogen)



N_{d0}: Tragfähigkeitsbeiwerte:

φ _k	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5
N _{c0}	5,0	6,5	8,5	11,0	15,0	17,5	20,5	25,0	30,0	37,0	46,0	53,0	75,0	99,0
N _{d0}	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	8,0	10,5	14,0	18,0	25,0	33,0	46,0	64,0	92,0
N _{b0}	0,0	0,0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,5	7,0	10,0	15,0	23,0	34,0	53,0	83,0

$$N_{d0} = \exp(\pi \cdot \tan \varphi_k) \cdot \tan^2\left(\frac{\varphi_k}{2} + 45^\circ\right) \quad N_{c0} = \frac{N_{d0} - 1}{\tan \varphi_k} \quad N_{b0} = (N_{d0} - 1) \cdot \tan \varphi_k$$

v_x: Formbeiwerte:

Grundrißform	v _c (φ ≠ 0)	v _c (φ = 0)	v _d	v _b
Streifen	1,0	1,0	1,0	1,0
Rechteck	$\frac{v_d \cdot N_{d0} - 1}{N_{d0} - 1}$	1 + 0,2 · b / a	1 + b / a · sin φ _k	1 - 0,3 · b / a
Quadrat / Kreis	$\frac{v_d \cdot N_{d0} - 1}{N_{d0} - 1}$	1,2	1 + sin φ _k	0,7

Bei lotrecht und mittig belasteten Kreisfundamenten gilt: a = b = D

i_x: Neigungsbeiwerte: abhängig von der Lastneigung δ = arctan(H_k/V_k) gegen das Lot auf die Sohlfläche und ggf. von ω im Grundriss (Winkel von H gegen die Richtung von a')

φ_k > 0° und c_k ≥ 0 kN/m²

δ > 0°: $i_b = (1 - \tan \delta)^{m+1}$ mit $m = \frac{2 + \frac{a'}{b'}}{1 + \frac{a'}{b'}} \cos^2 \omega + \frac{2 + \frac{b'}{a'}}{1 + \frac{b'}{a'}} \sin^2 \omega$

$i_d = (1 - \tan \delta)^m$

$i_c = (i_d N_{d0} - 1) / (N_{d0} - 1)$

δ < 0°: $i_b = (1 - 0,04 \cdot \delta)^{0,64+0,028 \cdot \varphi_k}$

$i_d = (1 - 0,0244 \cdot \delta)^{0,03+0,04 \cdot \varphi_k}$

$i_c = (i_d N_{d0} - 1) / (N_{d0} - 1)$

φ_k = 0° und c_k > 0 kN/m²

$i_b = 1$

$i_d = 1$

$i_c = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - \frac{H_k}{A \cdot c_k}}$

i_b entfällt

λ_x: Neigungsbeiwerte: abhängig von Geländeneigung β < φ_k (quer zum Gründungskörper, λ_x = 1 für β = 0)

φ_k > 0° und c_k ≥ 0 kN/m², β ≤ φ_k

$\lambda_b = (1 - 0,5 \tan \beta)^6$

$\lambda_d = (1 - \tan \beta)^{1,9}$

$\lambda_c = \frac{N_{d0} \cdot e^{-0,0349 \cdot \beta \cdot \tan \varphi_k} - 1}{N_{d0} - 1}$

φ_k = 0° und c_k > 0 kN/m²

$\lambda_c = 1 - 0,4 \tan \beta$

$\lambda_d = (1 - \tan \beta)^{1,9}$

λ_b entfällt wegen N_b = N_{b0} = tan(φ_k) = 0

ξ_x: Neigungsbeiwerte: abhängig von der Sohlflächenneigung α (positiv bei in Verschiebungsrichtung ansteigender Sohle, ξ_x = 1 für α = 0)

φ_k > 0° und c_k ≥ 0 kN/m²

$\xi_b = \xi_d = \xi_c = e^{-0,045 \cdot \alpha \cdot \tan \varphi_k}$

φ_k = 0° und c_k > 0 kN/m²

$\xi_d = 1,0$

$\xi_c = 1 - 0,0068 \alpha$

ξ_b entfällt wegen N_b = N_{b0} = tan(φ_k) = 0

Winkel müssen in den Gleichungen in Grad [°] eingesetzt werden!