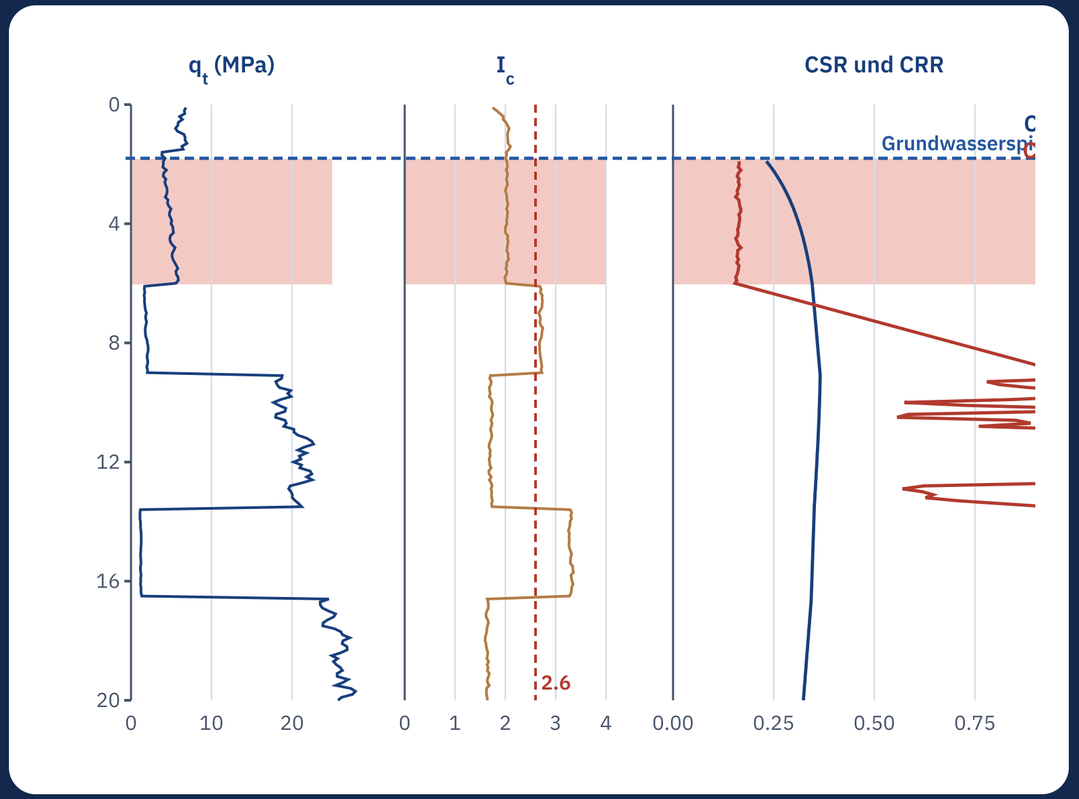
Geotechnische Vorlesungspräsentation · Bodenverflüssigung

Verflüssigungsauslösung mittels CPT

Vorlesung: Auslösung der Bodenverflüssigung mit dem CPT; eine Spitzenwiderstandsmessung wird mit zwei Verfahren (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride) von Anfang bis Ende von Hand gelöst, die übrigen Messungen mit Tabellen.

Kegeldaten · I_c | Zwei Verfahren | CSR · CRR · FS | Bereiche | Handrechnung möglich



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Die Bestimmung des **korrigierten Spitzenwiderstands q_t**, des **Reibungsverhältnisses R_f** und des **Bodenverhaltensindex I_c** aus dem Drucksondierprotokoll (q_c, f_s, u_2)

Den Bodentyp, die Wichte und den Feinkornanteil **aus den Kegeldaten abzuschätzen** (keine Schichttabelle eingegeben)

Zwei vollständige Pakete: Boulanger–Idriss (2014) und Robertson–Wride (1998, NCEER); bei jedem sind Normalisierung, CRR-Kurve, MSF und K_σ in sich konsistent

CSR, **FS = CRR/CSR**, ausgeschiedene Messwerte, **Zonen** und verflüssigungsfähige Mächtigkeit

Eine einzelne Ablesung (4.00 m) in einer Bohrung von Hand mit zwei Verfahren; die übrigen Ablesungen in der Tabelle mit denselben Schritten

VORLESUNGSABLAUF

Jedes Thema wird in **drei Schritten** behandelt:

1 · **Theorie**: Formel und Begründung

2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

3 · **Lösung**: Schritt für Schritt, mit Zahlen

Beispiel: CPT-1 (Grundwasserspiegel 1.80 m; 20 m Tiefe, 5 cm Intervall); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, Nettoflächenverhältnis a = 0.80, $FS_{erforderlich}$ = 1.20.

q_t, R_f und Einheiten

THEORIE

Da der **Kegel** eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung liefert (Messintervall 1–5 cm), ist keine Schichttabelle einzugeben.

Bodenart, Wichte und Feinkornanteil werden **aus den Kegeldaten** abgeschätzt.

Folgen der Bodenverflüssigung — Setzung, seitliche Ausbreitung, Verlust der Tragfähigkeit — sind nicht Gegenstand dieser Version.

Der korrigierte Spitzenwiderstand wird mit der Beziehung $q_t = q_c + (1 - a)\cdot u_2$ berechnet; darin ist a das Nettoflächenverhältnis des Kegels (0.65–0.85; üblicher Wert 0.80).

In weichen Tonen und Schluffen, in denen der Wert u_2 deutlich über dem hydrostatischen Wert liegt, ist die Korrektur von Bedeutung, in Sanden bleibt sie dagegen klein; ist u_2 nicht aufgezeichnet, wird $q_t = q_c$ angesetzt.

$$q_t = q_c + (1 - a)\, u_2 \qquad R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\,\%$$

γ aus CPT; zwei Grundwasserspiegel-Tiefen

THEORIE

Die Wichte wird bei jeder Messung aus den CPT-Daten abgeschätzt; **R_f** wird in % angegeben und der Wert wird zwischen 1.5 γ_w und 2.5 γ_w gehalten.

Die Wichte wird von der Geländeoberkante an integriert; alternativ werden zwei konstante Werte verwendet: γ oberhalb des Grundwasserspiegels und γ_{sat} unterhalb davon.

Der Porenwasserdruck wird ab dem Grundwasserspiegel als hydrostatisch angenommen; für **C_N** und **I_c** wird der Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt des Versuchs verwendet, für CSR und K_σ hingegen der Bemessungsgrundwasserspiegel.

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \log R_f + 0.36 \log \frac{q_t}{P_a} + 1.236 \qquad \sigma_v = \int \gamma \, dz \qquad u = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

I_c und Exponent n

THEORIE

Der Bodenverhaltensindex wird mit $I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$ berechnet.

Der Exponent n nimmt in Sanden den Wert 0.5 und in Tonen den Wert 1.0 an und wird durch die Iteration nach Robertson & Wride (1998) bestimmt.

Das Bodenprofil in den Zeichnungen beruht auf dieser Klassifikation; eine Schichtfolge, die dünner als h_{min} ist, wird mit der längeren Nachbarschicht zusammengefasst.

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2\right]^{0.5} \qquad Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \qquad F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100\,\%$$

Bereich von I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Boden (Robertson 1990)	kiesig – dichter Sand	Sand: sauber – schluffig	Sandgemisch	Schluffbeimengung	Ton	organisch

Welcher Messwert wird ausgewertet?

THEORIE

Eine Messung wird ausgewertet, wenn sie unterhalb des maßgebenden Grundwasserspiegels, nicht tiefer als die Tiefe z_{max} und in einem Boden liegt, der sich wie Sand verhält.

Böden mit einem I_c-Wert über $I_{c,lim}$ (Standard 2.6) werden als tonartig behandelt; diese Böden sind dem Nachweis der zyklischen Entfestigung vorbehalten.

Die Grenze zwischen sandartigem und tonartigem Verhalten ist nicht scharf; es wird empfohlen, die Berechnung mit $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 und 2.8 zu wiederholen.

Bei einer Messung, bei der der Netto-Spitzenwiderstand $q_t - \sigma_v$ nicht positiv ist, kann der Bodenverhaltensindex nicht definiert werden und die Messung wird nicht ausgewertet; die ausgeschlossenen Messungen bleiben mit ihren Begründungen in allen Tabellen erhalten.

$q_t \rightarrow q_{c1N} \rightarrow q_{c1Ncs}$

THEORIE

Da bei der Normierung nach Boulanger & Idriss (2014) der Exponent vom Ergebnis abhängt, wird C_N iterativ bestimmt, und in der Beziehung für m wird der Wert q_{c1Ncs} zwischen 21 und 254 begrenzt.

In der Beziehung FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137 ist C_{FC} der Anpassungsparameter der Korrelation zwischen I_c und dem Feinkornanteil; 0 entspricht der allgemeinen Korrelation, und ±0.29 ist eine Standardabweichung dieser Korrelation.

Da die Streuung der Korrelation groß ist, ist ein standortspezifischer C_{FC}-Wert geeigneter, der aus den laborbestimmten Feinkornanteilen von Proben aus Bohrungen neben den CPT-Punkten bestimmt wird, und er sollte für jede geologische Einheit getrennt bestimmt werden.

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_t}{P_a} \qquad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \qquad m = 1.338 - 0.249\, q_{c1Ncs}^{0.264}$$

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 \qquad \Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \qquad q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

CRR, MSF und K_σ

THEORIE

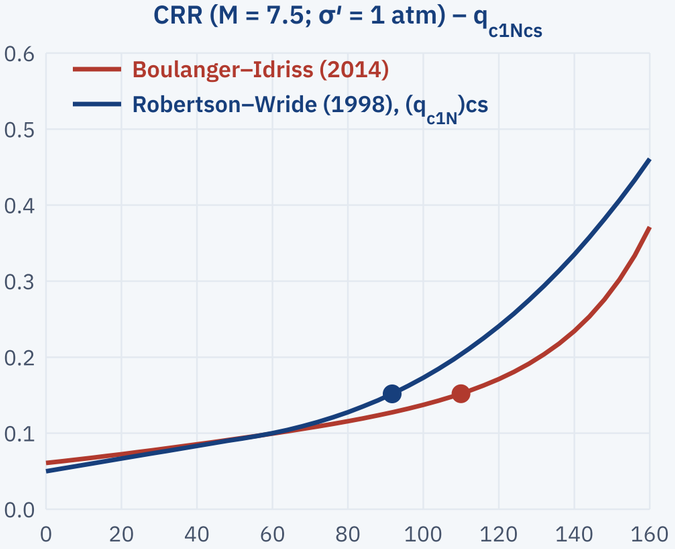
Die Widerstandskurve nach Boulanger & Idriss (2014) ist die im Bericht angegebene deterministische Kurve und beruht auf dem 16. Perzentil der Falldaten (Konstante 2.80).

Die Kurve CRR(M=7.5; σ′=1) wird aus dem Wert q_{c1Ncs} ermittelt; wenn q_{c1Ncs} über 211 liegt, wird der Wert 211 angesetzt, da die Grenze von C_σ erreicht ist.

σ'_V in der Beziehung für K_σ ist die wirksame Spannung, die dem maßgebenden Grundwasserspiegel entspricht.

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{q}{113} + \left(\frac{q}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q}{140}\right)^3 + \left(\frac{q}{137}\right)^4 - 2.80\right] \qquad q = q_{c1Ncs}$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64e^{-M/4} - 1.325) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q}{180}\right)^3 \qquad K_\sigma = 1 - C$$



Kc, CRR und MSF

THEORIE

Der korrigierte Spitzenwiderstand $(q_{c1N})_{cs}$ wird mit der Beziehung $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$ berechnet; K_c hängt von I_c ab und nimmt für $I_c \le 1.64$ den Wert 1 an.

Für reinen Sand mit 1.64 < Ic < 2.36 und einer Reibungszahl unter 0.5 % wird $K_c = 1$ angesetzt und keine Feinkornkorrektur vorgenommen.

Die Kurve für reinen Sand endet bei $(q_{c1N})_{cs} = 160$; das Modul setzt dieselbe kubische Beziehung bis 250 fort ($CRR_{7.5} = 1.5$) und markiert den abgelesenen Wert.

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} \quad C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \le 1.7 \qquad (q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N} \qquad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0.05 \; (< 50) \quad 93 \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \; (50 \ldots 160) \qquad MSF = \frac{102.24}{M^{2.56}} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1}$$

CSR und die Beziehung r_d der beiden Verfahren

THEORIE

Das zyklische Spannungsverhältnis wird als CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d ausgedrückt; darin sind σ_v und σ'_v die mit dem maßgebenden Grundwasserspiegel berechneten Spannungen.

Für den Tiefenabminderungsbeiwert r_d wird beim B&I;-Verfahren die Beziehung nach Idriss und beim R&W;-Verfahren die Beziehung nach Liao–Whitman verwendet; die Magnituden- und Überlagerungskorrekturen werden auf den Widerstand und nicht auf die Beanspruchung angewendet.

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d \qquad r_d^{BI} = \exp[\alpha + \beta M] \qquad r_d^{RW} = 1.0 - 0.00765z\ (z \le 9.15\ \mathrm{m})$$

z (m)	2	4	6	8	10	15	20
r_d nach Boulanger–Idriss (M = 7.5)	0.991	0.972	0.949	0.924	0.896	0.822	0.750
r_d nach Robertson–Wride	0.985	0.969	0.954	0.939	0.907	0.773	0.640

FS = CRR / CSR

THEORIE

Jede Messung repräsentiert die halbe Entfernung zur darüber und darunter liegenden Messung; diese repräsentative Entfernung überschreitet in beiden Richtungen 0.25 m nicht, bzw. 3/4 des üblichen Messintervalls, falls dieser Wert größer ist.

Eine Lücke im Aufzeichnungsverlauf wird nicht auf die Ergebnisse extrapoliert; sie bleibt eine nicht als „keine Messwerte“ bewertete Reihe und wird in einer Warnung aufgeführt.

Aufeinanderfolgende Messwerte mit demselben Ergebnis bilden eine Serie; eine Serie mit nur einem Ergebnis, die dünner als h_{min} (Standard 0.10 m) ist, übernimmt das Ergebnis der längeren Nachbardserie, und benachbarte Serien mit demselben Ergebnis bilden Zonen.

Jedes Verfahren bildet ein Ganzes; der Spannungsreduktionsfaktor, die Normierung, die Korrektur für reinen Sand, die Magnituden- und Überlagerungsbeiwerte sowie die Widerstandskurve werden gemeinsam aus einer Falldatenbank abgeleitet.

Die Quellen der beiden Verfahren sehen vor, dass die Komponenten des einen Verfahrens nicht mit denen des anderen vermischt werden; im Modul werden bei der Verfahrensauswahl alle diese Komponenten gemeinsam geändert.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \mathrm{FS} < 1 : \ \text{verflüssigt sich} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\ (1.20) : \ \text{am Rand}$$

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Lesen	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; Nettoflächenverhältnis** $a = 0.80$
Baugelände	**Grundwasserspiegel** $z_w = 1.80$ **m (der Bemessungs-Grundwasserspiegel ist derselbe); Wichte aus der CPT (80 Messwerte von 0 bis 4 m)**
Erdbeben	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; **Robertson–Wride** $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

GESUCHT

q_t, σ'_v, I_c; mit Boulanger–Idriss und Robertson–Wride **q_{c1Ncs}, CRR, CSR, FS**.

Lösung (1/8)

LÖSUNG

1 Korrigierter Spitzenwiderstand und Reibungsverhältnis

$$q_t = q_c + (1-a)u_2 = 4956 + (1-0.80)(21.6) = \mathbf{4{,}960.32}\ \text{kPa}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}960.32} \times 100 = \mathbf{0.9314}\ \%$$

2 Wichte (Robertson–Cabal)

$$\gamma = (0.27 \log R_f + 0.36 \log \tfrac{q_t}{P_a} + 1.236)\gamma_w = (1.8360)(9.81) = \mathbf{18.01}\ \text{kN/m}^3$$

3 Spannungen

$$\sigma_v = \sum \tfrac{1}{2}(\gamma_{k-1} + \gamma_k)\Delta z = \mathbf{73.64}\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(4.00 - 1.80) = 21.58\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 73.64 - 21.58 = \mathbf{52.05}\ \text{kPa}$$

Wirksame vertikale Spannung **σ′V = 52.05 kPa**.

Lösung (2/8)

LÖSUNG

4 Netto-Spitzenwiderstand und F

$$q_t - \sigma_v = 4{,}960.32 - 73.64 = \mathbf{4{,}886.68}\ \mathrm{kPa}$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}886.68} \times 100 = \mathbf{0.9454}\ \%$$

5 Iteration des Exponenten n (Robertson–Wride): zunächst n = 1.0 (Versuch für Ton)

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{1} = 93.88$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \leq 2.6 \ \Rightarrow\ \text{kein Ton}$$

Lösung (3/8)

LÖSUNG

6 n = 0.5 (Sand) wird versucht

$$Q = 48.2278 \left(\frac{101.325}{52.05} \right)^{0.5} = 67.29$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 67.29)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{2.0312} \leq 2.6 \;\Rightarrow\; n = 0.5$$

I_c = 2.031 ≤ 2.6: nicht tonartig, die Messung wird ausgewertet.

Lösung (4/8)

LÖSUNG

7 Feinkornanteil ($C_{FC} = 0$)

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

8 m und C_N sind gekoppelt: Iteration mit q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Iteration	q_{c1Ncs} (Eingabe)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (Ausgabe)
1	48.955	0.6425	1.5341	75.100	44.128	119.227
2	119.227	0.4582	1.3569	66.427	42.590	109.017
3	109.017	0.4788	1.3756	67.342	42.752	110.094
4	110.094	0.4766	1.3736	67.242	42.734	109.977
…	…	…	…	…	…	…
13	109.988	0.4768	1.3738	67.252	42.736	109.988

Konvergiert in 13 Iterationen: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

Lösung (5/8)

LÖSUNG

9 Spitzenwiderstand (M = 7.5; 1 atm), MSF und K_σ (q_{c1Ncs} = 109.99)

$$CRR_{7.5,1} = \exp[q/113 + (q/1000)^2 - (q/140)^3 + (q/137)^4 - 2.80] \quad (q = 109.99)$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-1.8840] = \mathbf{0.1520}$$

$$MSF_{max} = 1.09 + (109.99/180)^3 = 1.3181$$

$$MSF = 1 + (1.3181 - 1)(8.64e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(37.3 - 8.27(109.99)^{0.264}) = 0.1150$$

$$K_\sigma = 1 - 0.1150 \ln(52.05/101.325) = \mathbf{1.0766}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1520**; MSF = **1.0000**; K_σ = **1.0766** → CRR = **0.1636**.

Lösung (6/8)

LÖSUNG

10 Beanspruchung (Idriss r_d) und Sicherheitsfaktor

$$r_d = \exp[\alpha + \beta M] = \exp[-0.1971 + 0.0225(7.5)] = 0.9718$$

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3127}$$

$$CRR = CRR_{7.5,1} \cdot MSF \cdot K_\sigma = 0.1520(1.0000)(1.0766) = 0.1636$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1636}{0.3127} = \mathbf{0.523}$$

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, Bodenverflüssigung wird ausgelöst.

Lösung (7/8)

LÖSUNG

11 C_Q und q_{c1N} (n = 0.5 gleich)

$$C_Q = (P_a/\sigma'_v)^{0.5} = (101.325/52.05)^{0.5} = 1.3952$$

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} = 1.3952(48.955) = 68.300$$

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36, aber F = 0.945 % ≥ 0.5: Feinkornkorrektur VORHANDEN)

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 = \mathbf{1.3430}$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \, q_{c1N} = 1.3430(68.300) = \mathbf{91.727}$$

Bei Robertson–Wride ist der Feinkorneinfluss der **Beiwert K_c** (1.343), bei Boulanger–Idriss wird Δq_{c1N} **addiert** (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Lösung (8/8)

LÖSUNG

13 Widerstand, Beanspruchung (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$, da $\sigma'_v < P_a$) und FS

$$CRR_{7.5} = 93\left(\frac{91.727}{1000}\right)^3 + 0.08 = 0.1518 \qquad MSF = \frac{102.24}{7.5^{2.56}} = 0.9996$$

$$r_d = 1 - 0.00765(4) = 0.9694 \qquad CSR = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9694) = 0.3120$$

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}\,MSF\,K_\sigma = \frac{0.1518}{0.3120}(0.9996)(1) = \mathbf{0.486}$$

Beide Pakete kommen zum selben Ergebnis: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; beide < 1. Der Unterschied zwischen ihnen stammt aus der Feinkornkorrektur und r_d.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Bohrung	**CPT-1: 20 m, 400 Messwerte im Abstand von 5 cm; Grundwasserspiegel 1.80 m**
Verfahren	**Boulanger–Idriss und Robertson–Wride; jede Messung wird mit den Schritten aus Beispiel 1 gelöst**

GESUCHT

Für die Messung in jedem Meter: **q_t, R_f, I_c, Boden, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (zwei Verfahren) und die Entscheidung.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

z (m)	q_t (MPa)	R_f %	I_c	Baugrund	σ'_v	q_{c1Ncs} (BI)	CSR (BI)	FS (BI)	$(q_{c1N})cs$ (RW)	FS (RW)	Entscheidung (BI / RW)
1	6.58	2.27	2.04	Sand	19.4	–	–	–	–	–	*über Grundwasserspiegel*
2	4.02	0.93	2.04	Sand	36.0	108.4	0.238	0.691	90.1	0.626	Verflüssigt / Verflüssigt
3	4.46	0.87	2.02	Sand	43.9	107.1	0.283	0.569	88.8	0.514	Verflüssigt / Verflüssigt
4	**4.96**	**0.93**	**2.03**	**Sand**	**52.1**	**110.0**	**0.313**	**0.523**	**91.7**	**0.486**	**Verflüssigt / Verflüssigt**
5	5.12	0.95	2.05	Sand	60.3	109.7	0.332	0.483	90.2	0.445	Verflüssigt / Verflüssigt
6	5.57	0.84	2.02	Sand	68.6	107.2	0.346	0.445	88.4	0.415	Verflüssigt / Verflüssigt
7	1.92	2.43	2.66	Schluffbeimengung	76.4	–	–	–	–	–	*tonartig*
8	2.03	2.40	2.68	Schluffbeimengung	84.3	–	–	–	–	–	*tonartig*
9	2.03	2.55	2.73	Schluffbeimengung	92.3	–	–	–	–	–	*tonartig*
10	17.69	1.00	1.74	Sand	102.5	173.9	0.364	1.579	184.9	1.808	Sicher / Sicher
11	20.25	1.03	1.72	Sand	112.8	192.7	0.361	3.455	199.1	2.187	Sicher / Sicher
12	20.21	0.88	1.69	Sand	123.3	186.2	0.357	2.527	186.1	1.821	Sicher / Sicher
13	19.88	0.95	1.73	Sand	133.8	177.5	0.353	1.758	180.8	1.689	Sicher / Sicher
14	1.17	3.85	3.28	Ton	142.9	–	–	–	–	–	*tonartig*
15	1.21	3.91	3.30	Ton	150.6	–	–	–	–	–	*tonartig*
16	1.22	3.91	3.33	Ton	158.3	–	–	–	–	–	*tonartig*
17	24.54	0.77	1.63	Sand	167.3	206.1	0.341	6.842	188.5	1.951	Sicher / Sicher
18	26.33	0.71	1.60	Sand	177.7	218.9	0.335	9.233	196.2	2.212	Sicher / Sicher
19	26.27	0.79	1.64	Sand	188.3	213.7	0.330	9.199	189.9	2.069	Sicher / Sicher
20	25.71	0.76	1.65	Sand	198.9	203.9	0.324	5.959	181.1	1.868	Sicher / Sicher

Lösung (2/2)

LÖSUNG

1 Von der Messung zur Zone: jede Messung repräsentiert bis zu den benachbarten Mittelpunkten (höchstens 0.25 m); gleiche Ergebnisse werden zusammengefasst

Verfahren	Verflüssigungsgefährdete Zone (m)	Dicke (m)	An der Grenze (m)	Kleinster FS	z (m)
Boulanger–Idriss	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.445	6.00
Robertson–Wride	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.415	6.00

Beide Verfahren werten den Bereich **1.83 – 6.03 m** (4.20 m) in CPT-1 als verflüssigungsgefährdet aus; der kleinste FS liegt bei beiden bei 6.0 m. Die Zeile bei 4.0 m ist Beispiel 1, das von Hand gelöst wurde. Die schluffartige Schicht zwischen 6 – 9 m ($I_c > 2.6$) wird als tonartig eingestuft und in den Zeilen von 7 – 9 m ausgeschlossen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Bohrungen	**CPT-1 (Grundwasserspiegel 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); gleiche Parameter**
Vergleich	**jedes Verfahren mit seinem eigenen Paket**

GESUCHT

Die **kleinste FS**, die Mächtigkeiten des **verflüssigten** und des **grenzwertigen** Bereichs jeder Bohrung.

Lösung

LÖSUNG

Bohrung	Grundwasserspiegel (m)	Verfahren	Kleinster FS	z (m)	Verflüssigte Bereiche (m)	Dicke (m)	An der Grenze (m)
CPT-1	1.80	Boulanger–Idriss	**0.445**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
		Robertson–Wride	**0.415**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
CPT-2	2.40	Boulanger–Idriss	**0.605**	7.10	2.62 – 7.53	4.90	0.85
		Robertson–Wride	**0.640**	7.10	2.67 – 7.53	4.85	0.25
CPT-3	3.10	Boulanger–Idriss	**0.655**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00
		Robertson–Wride	**0.683**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00

In jeder Bohrung lösen beide Verfahren Bodenverflüssigung aus; die verflüssigten Mächtigkeiten sind nahezu gleich (4.2 – 5.0 m). Die Unterschiede liegen bei den grenzwertigen Mächtigkeiten (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) und beim minimalen FS. Der minimale FS ist **rauschempfindlich**; die Mächtigkeit ist der stabilere Wert.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Basisfall	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **maßgebender Grundwasserspiegel = Grundwasserspiegel der Untersuchung** (1.80 **m**)
Veränderliche	**jeweils nur eines:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29 **;** a_{max} **0.25g / 0.45g; Grundwasserspiegel im Entwurf 1.0 m**

GESUCHT

Die **minimale Sicherheit FS** und die **verflüssigte Mächtigkeit** von CPT-1 (zwei Verfahren); manuelle Kontrolle des Feinkornanteils FC für C_{FC}.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

Zustand	Änderung	FS_{min} (BI)	z (m)	Dicke (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Dicke (m)
Sohle	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ nimmt ab	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ wächst	2.8	0.318	8.80	**7.20**	0.391	8.45	**7.20**
C_{FC}	−0.29	0.318	6.00	**4.20**	–	–	–
C_{FC}	+0.29	0.579	6.00	**4.20**	–	–	–
a_{max} nimmt ab	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} nimmt zu	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
Bemessungsgrundwasserspiegel steigt	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 ist die einflussreichste Eingabe: Der siltige Sand zwischen 6 und 9 m (I_c 2.6 – 2.8) wird berücksichtigt, die verflüssigungsfähige Mächtigkeit steigt von 4.2 → **7.2 m**, FS_{min} ≈ 0.32. C_{FC} existiert nur bei B&I und verschiebt FS zwischen 0.32 und 0.58; a_{max} und der maßgebende Grundwasserspiegel ändern die Mächtigkeit kaum.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

1 Einfluss von C_{FC} auf den Feinkornanteil bei der Ablesung im Beispiel (I_c = 2.031)

$$C_{FC} = -0.29: \; FC = 80(2.0312 - 0.29) - 137 = \mathbf{2.30\ \%}$$

$$C_{FC} = 0: \; FC = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

$$C_{FC} = +0.29: \; FC = 80(2.0312 + 0.29) - 137 = \mathbf{48.70\ \%}$$

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 % (die Unsicherheit in I_c verschiebt FC stark): Die Feinkornkorrektur Δq_{c1N} ist daher unsicher, und ein **standortspezifischer C_{FC}** erfordert laborbestimmte Feinkornanteile neben der Bohrung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Kegelaufzeichnung → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (aus CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (n Iterationen); $I_c > 2.6$ tonartig, ausgeschieden

Zwei Pakete: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) und Robertson–Wride (multipliziert K_c, kubisches CRR); ihre Komponenten werden nicht vermischt

Beispiel (4.00 m): σ'_v 52.05 kPa, I_c 2.031; B&I q_{c1Ncs} 109.99, CRR 0.1636, CSR 0.3127 → **FS 0.523**; R&W $(q_{c1N})cs$ 91.73, $CRR_{7.5}$ 0.1518, CSR 0.3120 → **FS 0.486**

Zone: reicht bis zu den benachbarten Mittelpunkten (≤ 0.25 m), unter $h_{min} = 0.10$ m vereinigt; CPT-1 verflüssigbar 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Empfindlichkeit: $I_{c,lim}$ und C_{FC} sind einflussreich; der minimale FS reagiert empfindlich auf Störungen, die Mächtigkeit ist stabiler; die Ergebnisse betreffen nur die Auslösung, die Folgen (Setzung, seitliche Ausbreitung) erfordern eine gesonderte Berechnung

Literatur

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/CGM-14/01, University of California, Davis.

Robertson, P.K., Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442–459.

Youd, T.L., Idriss, I.M. et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817–833.

Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151–158.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach.

Idriss, I.M. (1999). An update to the Seed–Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Proc. TRB Workshop, FHWA-RD-99-165.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J. Geotech. Eng., ASCE, 112(3).

Hynes, M.E., Olsen, R.S. (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc. International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Balkema.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph MNO-12.

HINWEIS

Alle Zahlenbeispiele wurden mit der moduleigenen Berechnungsengine erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte. Das Startprojekt des Moduls sind diese drei Bohrungen (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Fügen Sie Ihre eigenen Drucksondierungen (q_c, f_s, u_2) ein oder lesen Sie sie aus einer Datei ein; geben Sie den Grundwasserspiegel und die Erdbebenparameter ein. Für jede Messung liefert das Modul I_c, CSR, CRR, FS, die Zonen, die verflüssigbare Mächtigkeit, die Ergebnisse der beiden Verfahren, den farbbandierten Schnitt, die schrittweise Lösung und den Bericht zusammen.

Modul öffnen → | **Theorieseite →**

Auf dem Smartphone öffnen
Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

Falls Sie sie in Ihren Vorlesungen verwenden möchten: info@geoterva.com