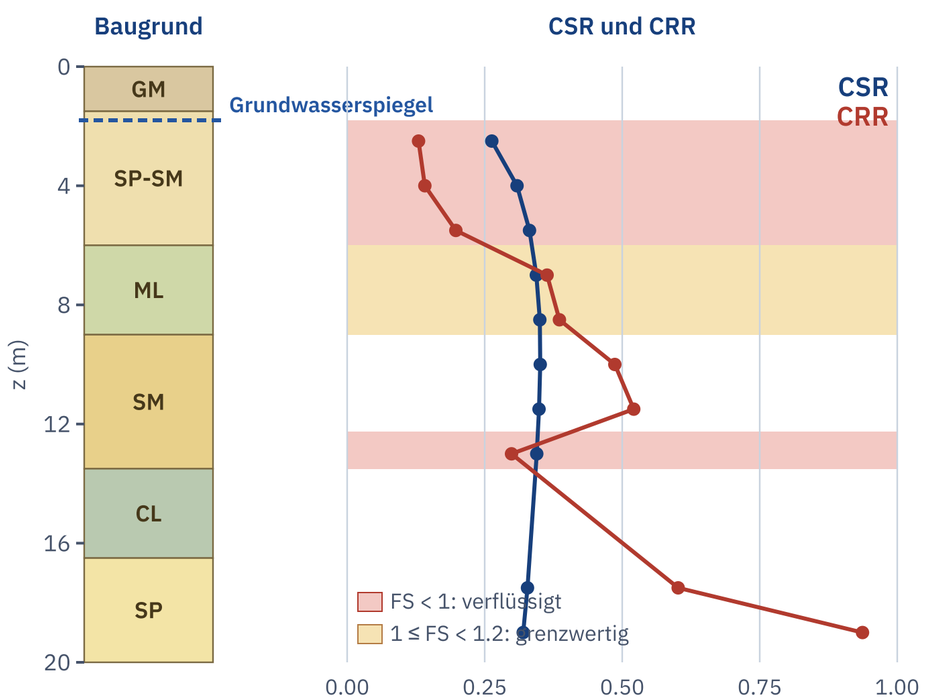
Geotechnische Vorlesungspräsentation · Bodenverflüssigung

Auslösung der Bodenverflüssigung mittels SPT

Vorlesung: Auslösung der Bodenverflüssigung aus SPT (Idriss–Boulanger); eine Bohrung und ein Testpunkt werden durchgängig von Hand gelöst, die übrigen Punkte mit Tabellen.

Korrekturen · CSR · CRR · MSF · Kσ · FS und Zonen · Handrechnerisch lösbar



Einführung

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Die **spannungsbasierte** Bewertung der Bodenverflüssigung: Die Erdbebenbeanspruchung **CSR** wird mit dem Widerstand des Bodens **CRR** verglichen; **FS = CRR / CSR**

Korrekturen von der rohen SPT-Schlagzahl N_{30} zu $\mathbf{(N_1)_{60cs}}$: Energie, Gestängelänge, Überlagerung und Feinkorn

CSR (r_d, σ_v/σ'_v), die CRR-Kurve, der **Magnitudenskalierungsfaktor** MSF und der **Überlagerungsbeiwert** K_σ

Welche Versuche durch **Aussonderung** nicht in die Berechnung eingehen; wie die Zonen und die verflüssigungsfähige Mächtigkeit ermittelt werden

An einer Bohrung den **einzelnen Testpunkt von Anfang bis Ende von Hand**, die übrigen mit denselben Schritten in der Tabelle

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: Bohrung BH-1 (Grundwasserspiegel 1.80 m; 0–1.5 m Auffüllung, 1.5–6 m lockerer Sand …); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, Energierate des Hammers 60 %, $FS_{erforderlich}$ = 1.20.

Welcher Versuch wird ausgewertet?

THEORIE

Ein Test wird ausgewertet, wenn er **unterhalb des Grundwasserspiegels (GWS)** liegt, nicht tiefer als $\mathbf{z_{max}}$ (Standard 20 m) und in einem Boden, der sich **wie Sand verhält**

Boden mit Plastizitätsindex PI ≥ PI_{lim} (Standard 7) ist **tonartig**; ist PI nicht angegeben, weist das Symbol CL, CH, OL, OH oder PT darauf hin

Tonähnlicher Boden kann unter zyklischer Belastung **erweichen**, verflüssigt sich aber im hier verwendeten Sinne nicht: dies bleibt dem Nachweis der zyklischen Erweichung vorbehalten

Nicht bewertete Versuche bleiben in allen Tabellen **mit ihren Begründungen** enthalten. Die Folgen der Bodenverflüssigung (Setzung, seitliche Ausbreitung, Verlust der Tragfähigkeit) sind nicht Gegenstand dieser Version

Totale, Porenwasser- und wirksame vertikale Spannung

THEORIE

γ oberhalb des Grundwasserspiegels; **γ_{sat}** darunter; schichtweise summiert. Der Porenwasserdruck ist vom Grundwasserspiegel abwärts **hydrostatisch** (z_W ist die Grundwasserspiegeltiefe der Bohrung)

Die wirksame Spannung σ'_V wird sowohl im CSR als auch bei den Korrekturen für die Überlagerungsspannung verwendet

$$\sigma_v = \sum \gamma_i \, h_i \qquad u = \gamma_w \, (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Die wirksame Spannung wird nur für Versuche unterhalb des Grundwasserspiegels berechnet: Oberhalb des Grundwasserspiegels ist u = 0 und der Versuch wird ausgeschlossen.

Von N_{30} zu N_{60}

THEORIE

Die rohe Schlagzahl N_{30} (letzte 30 cm) wird auf die Standardstange mit **60 % Energie** bezogen: **C_E** = ER/60 (Hammer), **C_B** (Bohrlochdurchmesser), **C_S** (Probenrohr)

C_R hängt von der Gestängelänge ab: Gestängelänge = z + Länge über der Geländeoberfläche (hier 1.5 m)

$$N_{60} = N_{30} \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R$$

Stablänge (m)	< 3	3 – 4	4 – 6	6 – 10	≥ 10
C_R	0.75	0.80	0.85	0.95	1.00

$N_{60} \rightarrow (N_1)_{60} \rightarrow (N_1)_{60cs}$

THEORIE

C_N führt die Messung auf eine wirksame Spannung von 1 atm (P_a = 101.3 kPa) zurück; da der Exponent m vom Ergebnis selbst abhängt, wird er **iterativ** bestimmt; $C_N \leq 1.7$

Feinkorn erhöht den sandartigen Widerstand: Mit FC (in Prozent, der eigene Wert der Probe, falls gemessen, sonst der Schichtwert) wird auf den sauberkornäquivalenten Wert übergegangen

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \qquad m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \qquad (N_1)_{60} = C_N N_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right] \qquad (N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

FC (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	50
$\Delta(N_1)_{60}$	0.00	0.00	1.15	3.26	4.48	5.07	5.36	5.51	5.61

Erdbebenbeanspruchung: CSR und r_d

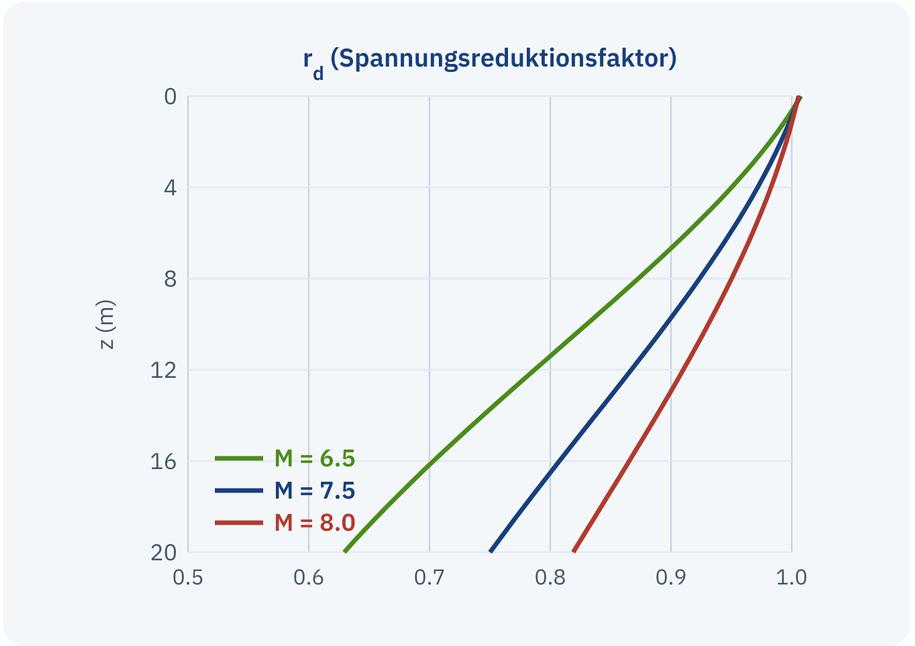
THEORIE

CSR ist das Verhältnis der vom Erdbeben auf den Boden aufgebrachten zyklischen Schubspannung zur wirksamen Spannung; 0.65 trägt die mittlere Spannung, σ_V/σ'_V den Einfluss der Tiefe

r_d (Spannungsreduktionsfaktor) nimmt mit der Tiefe und der Magnitude ab; an der Geländeoberfläche ist er gleich 1

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} a_{max} r_d \qquad r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) M]$$

$$\alpha = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \qquad \beta = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$



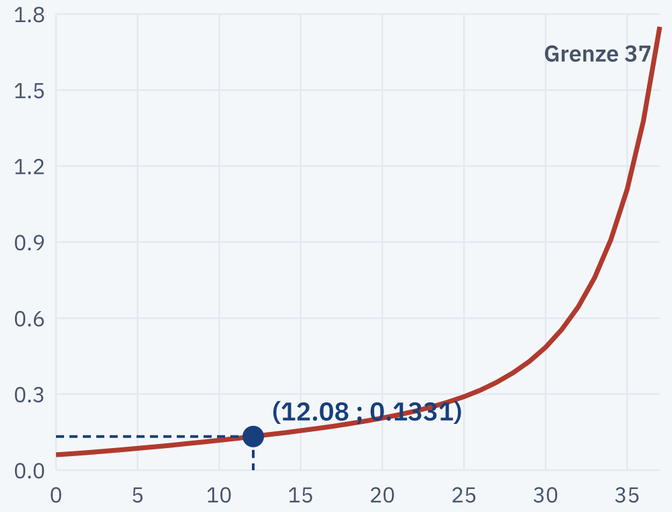
Bodenwiderstand: CRR-Kurve

THEORIE

$CRR_{M=7.5;\ \sigma'=1}$ hängt nur von $\mathbf{(N_1)_{60cs}}$ ab (Kurve nach Idriss–Boulanger); es gilt für M = 7.5 und σ'_v = 1 atm

Die Kurve wird bis $\mathbf{(N_1)_{60cs} = 37}$ verwendet; ein dichterer Versuch wird an dieser Grenze ausgewertet und es wird eine Warnung ausgegeben

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{n}{14.1} + \left(\frac{n}{126}\right)^2 - \left(\frac{n}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{n}{25.4}\right)^4 - 2.8\right] \qquad n = (N_1)_{60cs}$$



MSF und K_σ

THEORIE

MSF Magnitudenskalierung: CRR gilt für M = 7.5; bei anderen Magnituden wird der Unterschied in der Lastspielzahl erfasst. Für M < 7.5 ist MSF > 1

K_σ Überlagerungsbeiwert: Das CRR gilt für 1 atm; mit zunehmendem σ'_V nimmt das Widerstandsverhältnis ab. $K_\sigma \leq 1.1$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)\left(8.64\, e^{-M/4} - 1.325\right) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5}\right)^2 \leq 2.2$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \frac{\sigma'_v}{P_a} \leq 1.1 \qquad C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3$$

FS = CRR / CSR; Zone und Mächtigkeit

THEORIE

CRR = $CRR_{7.5;1}$ · MSF · K_σ; **FS = CRR / CSR**. FS < 1: **Bodenverflüssigung wird ausgelöst**; 1 ≤ FS < $FS_{erforderlich}$ (1.20): **grenzwertig**; der erforderliche Wert ist eine Eingabe aus der Projektspezifikation

Jeder ausgewertete Versuch repräsentiert seine eigene Schicht: bis zum **Mittelpunkt** zwischen dem Versuch darüber und dem Versuch darunter; an der Schichtgrenze und am Grundwasserspiegel endet das Intervall

Ergeben benachbarte Intervalle dasselbe Ergebnis, so werden sie zu einer **Zone** zusammengefasst; die **verflüssigungsfähige Mächtigkeit** einer Bohrung ist die Summe der Zonen mit FS < 1

$$CRR = CRR_{7.5,\,1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \qquad FS = \frac{CRR}{CSR}$$

Aufgabe

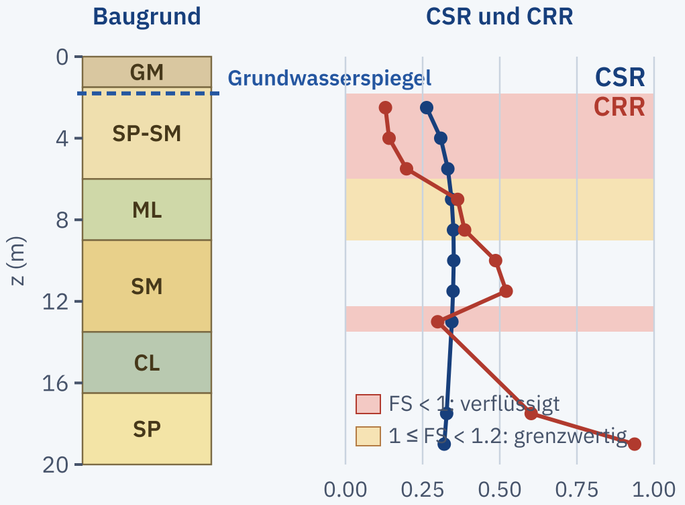
BEISPIEL

Gegeben

Bohrung BH-1	**GWSP $z_w = 1.80$ m; 0–1.5 m Auffüllung (GM): $\gamma = 18.5$; 1.5–6 m lockerer Sand (SP-SM): $\gamma = 18.0$, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m³, FC = 8 %**
Test	**$z = 4.0$ bei $N_{30} = 10$ m (unterhalb des Grundwasserspiegels)**
Erdbeben und Bewehrung	**$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; ER = 60% ($C_E = C_B = C_S = 1$), Stablänge = $z + 1.5$ m; $FS_{req} = 1.20$**

GESUCHT

Spannungen, **N_{60}**, **$(N_1)_{60cs}$** (iterativ), **CSR**, **CRR** und **FS**.



Lösung (1/5)

LÖSUNG

1 Totale vertikale Spannung (Schicht für Schicht; Grundwasserspiegel 1.80 m)

$$\sigma_v = 18.5(1.5) + 18.0(1.80 - 1.5) + 19.5(4.0 - 1.80) = 27.75 + 5.40 + 42.90 = \mathbf{76.05}\ \mathrm{kPa}$$

2 Porenwasserdruck und wirksame Spannung

$$u = \gamma_w (z - z_w) = 9.81(4.0 - 1.80) = \mathbf{21.58}\ \mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 76.05 - 21.58 = \mathbf{54.47}\ \mathrm{kPa}$$

Der Test liegt **2.20 m** unter dem Grundwasserspiegel: σ_v = 76.05, u = 21.58, **σ'_v = 54.47 kPa**. Dieser Punkt ist die Stelle der kleinsten FS der Bohrung (Abbildung auf der Aufgabenseite).

Lösung (2/5)

LÖSUNG

3 Stablängenkorrektur und N_{60}

$$L = z + 1.5 = 5.5\ \text{m} \Rightarrow C_R = 0.85 \qquad N_{60} = 10(1)(1)(1)(0.85) = \mathbf{8.50}$$

4 Zunahme des Feinkornanteils

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp[1.63 + 9.7/8.01 - (15.7/8.01)^2] = \exp[-1.0008] = \mathbf{0.3676}$$

5 Überlagerungskorrektur: Da C_N von $(N_1)_{60cs}$ abhängt, ist eine Iteration erforderlich (σ'_v = 54.47 kPa)

Iteration	n (Eingabe)	m	C_N	$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$	$(N_1)_{60cs} = + \Delta$
1	8.5000	0.5601	1.4158	12.0339	12.4015
2	12.4015	0.5135	1.3754	11.6912	12.0587
3	12.0587	0.5173	1.3786	11.7185	12.0861
…	…	…	…	…	…
8	12.0840	0.5170	1.3784	11.7165	12.0840

Es konvergiert in 8 Iterationen: **C_N = 1.3784**, $(N_1)_{60}$ = 11.716, **$(N_1)_{60cs}$ = 12.08**.

Lösung (3/5)

LÖSUNG

6 Spannungsreduktionsfaktor r_d (z = 4.0 m, M = 7.5)

$$\alpha = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{4}{11.73} + 5.133\right) = -0.1971$$

$$\beta = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{4}{11.28} + 5.142\right) = 0.0225$$

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

7 Zyklisches Spannungsverhältnis

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} a_{max}\, r_d = 0.65 \left(\frac{76.05}{54.47}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3087}$$

Das Erdbeben erzeugt in dieser Tiefe eine zyklische Schubspannung von **30.9** Prozent der wirksamen Spannung (CSR = 0.3087).

Lösung (4/5)

LÖSUNG

8 Spitzenwiderstand für M = 7.5 und σ′ = 1 atm ($(N_1)_{60cs}$ = 12.08)

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{12.08}{14.1} + \left(\frac{12.08}{126}\right)^2 - \left(\frac{12.08}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{12.08}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-2.0168] = \mathbf{0.1331}$$

9 Magnituden- und Überlagerungsbeiwerte

$$MSF_{max} = 1.09 + (12.08/31.5)^2 = 1.2372$$

$$MSF = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(18.9 - 2.55\sqrt{12.08}) = 0.0996 \qquad K_\sigma = 1 - 0.0996\ln(54.47/101.325) = \mathbf{1.0619}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1331**; MSF = **1.0000**; K_σ = **1.0619**: Das Produkt dieser drei Werte ergibt CRR (nächste Folie).

Lösung (5/5)

LÖSUNG

10 Widerstand und Sicherheitsfaktor

$$CRR = CRR_{7.5,1} \cdot MSF \cdot K_\sigma = 0.1331(1.0000)(1.0619) = \mathbf{0.1413}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1413}{0.3087} = \mathbf{0.458}$$

FS = 0.458 < 1: Bei diesem Test wird die Bodenverflüssigung **ausgelöst**. Der Test repräsentiert den Bereich 3.25 – 4.75 m (Mittelpunkte zwischen dem Test darüber bei 2.5 m und dem darunter bei 5.5 m). Dieselben zehn Schritte werden bei jedem Test wiederholt.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Bohrung BH-1	**13 SPT:** $z = 1.0$ **–** 19.0 **m; Grundwasserspiegel** 1.80 **m;** $z_{max} = 20$ **m;** $PI_{lim} = 7$
Schichten	**GM (0–1.5), SP-SM (1.5–6), ML** $PI = 5$ **(6–9), SM (9–13.5), CL** $PI = 18$ **(13.5–16.5), SP (16.5–20)**

GESUCHT

Für jeden Versuch die Entscheidung **bewertet / nicht bewertet** und die Begründung.

Lösung

LÖSUNG

z (m)	N_{30}	Baugrund	PI	Grundwasserspiegel?	Tonartig?	Entscheidung
1.0	9	GM	–	**oberhalb**	–	**nicht bewertet**: oberhalb des Grundwasserspiegels
2.5	7	SP-SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
4.0	10	SP-SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
5.5	16	SP-SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
7.0	21	ML	5	unter	nein	wird ausgewertet
8.5	22	ML	5	unter	nein	wird ausgewertet
10.0	27	SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
11.5	29	SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
13.0	25	SM	–	unter	nein	wird ausgewertet
14.5	13	CL	18	unter	ja	**nicht bewertet**: tonartig (PI ≥ 7)
16.0	15	CL	18	unter	ja	**nicht bewertet**: tonartig (PI ≥ 7)
17.5	40	SP	–	unter	nein	wird ausgewertet
19.0	44	SP	–	unter	nein	wird ausgewertet

3 der 13 Versuche werden ausgeschlossen: 1.0 m (oberhalb des Grundwasserspiegels) sowie 14.5 und 16.0 m (CL, PI = 18 ≥ 7). Die Schicht ML (PI = 5 < 7) gilt nicht als tonartig, die Versuche bei 7.0 und 8.5 m **werden ausgewertet** (FC = 62 %). Die ausgeschlossenen Versuche erscheinen weiterhin in den Tabellen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Bohrung	**BH-1 und die Parameter aus Beispiel 1; zehn Schritte in jedem Test gleich**
Zonenregel	**jeder Versuch reicht in seiner eigenen Schicht bis zum Mittelpunkt der benachbarten Versuche; er endet an der Schichtgrenze und am Grundwasserspiegel**

GESUCHT

Tabelle aller Tests; **verflüssigte Zonen**, **verflüssigte Mächtigkeit** und kleinster FS.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

z (m)	N_{30}	Baugrund	FC %	σ_v	σ'_v	N_{60}	C_N	$(N_1)_{60cs}$	CSR	CRR	FS	Zustand
1.0	9	GM	20	–	–	6.75	1.700	15.95	–	–	–	*über dem Grundwasserspiegel*
2.5	7	SP-SM	8	46.8	39.9	5.95	1.652	10.19	0.263	0.130	0.493	Verflüssigt sich
4.0	**10**	**SP-SM**	**8**	**76.1**	**54.5**	**8.50**	**1.378**	**12.08**	**0.309**	**0.141**	**0.458**	**verflüssigt**
5.5	16	SP-SM	8	105.3	69.0	15.20	1.191	18.46	0.332	0.198	0.596	Verflüssigt sich
7.0	21	ML	62	134.1	83.0	19.95	1.079	27.13	0.344	0.363	1.056	An der Grenze
8.5	22	ML	62	162.6	96.8	22.00	1.017	27.98	0.350	0.386	1.102	An der Grenze
10.0	27	SM	18	191.9	111.4	27.00	0.966	30.18	0.351	0.487	1.386	Sicher
11.5	29	SM	18	221.6	126.4	29.00	0.924	30.89	0.349	0.521	1.494	Sicher
13.0	25	SM	18	251.2	141.4	25.00	0.878	26.03	0.345	0.299	0.867	Verflüssigt sich
14.5	13	CL	88	–	–	13.00	0.816	16.12	–	–	–	*tonartig (PI ≥ 7)*
16.0	15	CL	88	–	–	15.00	0.788	17.34	–	–	–	*tonartig (PI ≥ 7)*
17.5	40	SP	4	338.7	184.6	40.00	0.812	32.50	0.328	0.602	1.835	Sicher
19.0	44	SP	4	369.4	200.7	44.00	0.799	35.15	0.320	0.937	2.928	Sicher

Kleinster FS = 0.458 (z = 4.0 m). Verflüssigungszonen: **1.80 – 6.00 m** und **12.25 – 13.50 m**; im Grenzbereich: 6.00 – 9.00 m. Verflüssigte Mächtigkeit = 5.45 m. Die Zeile bei 4.0 m ist Beispiel 1, das von Hand gerechnet wurde.

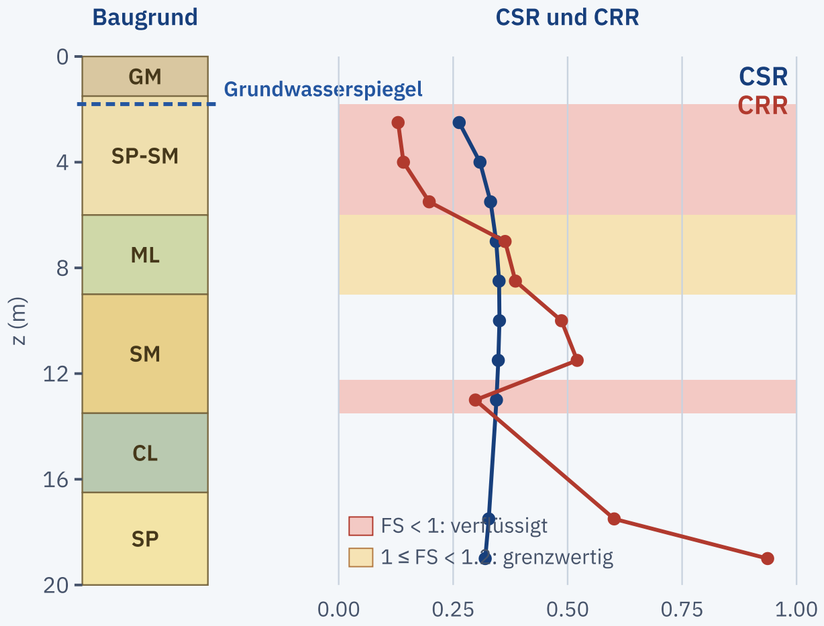
Lösung (2/2)

LÖSUNG

1 Jeder Versuch repräsentiert seinen eigenen Bereich; benachbarte Bereiche mit gleichem Ergebnis werden zusammengefasst

Bereich	Bereich (m)	Dicke (m)	Versuche	Bereich des Sicherheitsfaktors FS
Verflüssigungsgefährdet 1	1.80 – 6.00	4.20	2.5; 4.0; 5.5 m	0.458 – 0.596
An der Grenze	6.00 – 9.00	3.00	7.0; 8.5 m	1,056 – 1,102
Verflüssigungsgefährdet 2	12.25 – 13.50	1.25	13.0 m	0.867
Gesamt verflüssigt		**5.45**		

Beispiel: Der Test bei 4.0 m repräsentiert 3.25 – 4.75 m; der Test bei 2.5 m erfasst 1.80 – 3.25 m (endet am Grundwasserspiegel), der Test bei 5.5 m erfasst 4.75 – 6.00 m (endet an der Schichtgrenze): insgesamt **4.20 m**. Die verflüssigungsfähige Mächtigkeit der Bohrung beträgt 5.45 m.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Basisfall	**BH-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, **Grundwasserspiegel** 1.80 **m, ER = 60%**
Veränderliche	**jeweils nur eines:** $a_{max} = 0.25g$ **/** $0.45g$**;** $M = 6.5$ **/** 8.0**; Grundwasserspiegel** 3.0 **m /** 1.0 **m; Entlastungsplatte 45 % / 80 %**

GESUCHT

Der **kleinste FS** und die **Mächtigkeit der verflüssigten Schicht** von BH-1; manuelle Kontrolle des MSF im Test mit 4.0 m.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

Zustand	Änderung	Kleinster FS	z (m)	Verflüssigte Mächtigkeit (m)	An der Grenze (m)
Sohle	a_{max} 0.35g; M 7.5; Grundwasserspiegel 1.8; ER 60	**0.458**	4.0	5.45	3.00
a_{max} nimmt ab	0.25g	**0.641**	4.0	4.20	0.00
a_{max} nimmt zu	0.45g	**0.356**	4.0	8.45	3.25
Die Magnitude nimmt ab	M 6.5	**0.510**	4.0	4.20	0.00
Die Magnitude nimmt zu	M 8.0	**0.436**	4.0	8.45	3.25
Der Grundwasserspiegel liegt tiefer	3.0 m	**0.517**	4.0	4.00	3.00
Grundwasserspiegel steigt	1.0 m	**0.412**	2.5	5.75	3.00
Energie nimmt ab	ER %45 (C_E 0.75)	**0.388**	4.0	15.20	0.00
Energie nimmt zu	ER %80 (C_E 1.33)	**0.560**	4.0	4.20	0.00

a_{max} ist die einflussreichste Eingabe: bei 0.25g beträgt die verflüssigbare Mächtigkeit 4.20 m, bei 0.45g 8.45 m. Der Einfluss der **Hammenergie** ist unerwartet groß: bei ER 45 % nimmt N_{60} ab und die verflüssigbare Mächtigkeit steigt auf 15.20 m. Die gemessene Energiekennzahl zu **kennen** ist daher wichtig.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

1 Magnitudenskalierungsfaktor für M = 6.5 und M = 8.0 ($(N_1)_{60cs}$ = 12.08)

$$MSF_{6.5} = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-6.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0892}$$

$$MSF_{8.0} = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-8.0/4} - 1.325) = \mathbf{0.9631}$$

2 Beim selben Versuch (4.0 m) FS

M	r_d	CSR	MSF	CRR	FS
6.5	0.9502	0.3018	1.0892	0.1539	**0.510**
7.5	0.9718	0.3087	1.0000	0.1413	**0.458**
8.0	0.9828	0.3122	0.9631	0.1361	**0.436**

Eine kleinere Magnitude bedeutet weniger Zyklen: MSF wächst und FS wird 0.458 → **0.510**; für M = 8.0 beträgt FS 0.436. Sowohl r_d als auch MSF sind von der Magnitude abhängig; beide wirken in dieselbe Richtung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Bohrungen	**BH-1 (Grundwasserspiegel 1.80 m), BH-2 (2.40 m), BH-3 (3.10 m); gleiche Parameter**
Schnitt	**BH-1 $x = 0$, BH-2 $x = 32$, BH-3 $x = 70$ m**

GESUCHT

Die **kleinste FS** jeder Bohrung, die **verflüssigten** und **grenzwertigen** Mächtigkeiten; Projektzusammenfassung.

Lösung

LÖSUNG

Bohrung	Grundwasserspiegel (m)	Test	Ausgesiebt	Kleinster FS	z (m)	Verflüssigte Bereiche (m)	Dicke (m)	An der Grenze (m)
BH-1	1.80	13	3	**0.458**	4.0	1.80–6.00; 12.25–13.50	5.45	3.00
BH-2	2.40	13	3	**0.697**	3.0	2.40–5.25	2.85	3.50
BH-3	3.10	13	6	**0.841**	6.0	5.00–8.25	3.25	1.75

In allen drei der drei Bohrungen wird Bodenverflüssigung ausgelöst. Kleinste FS = 0.458 (BH-1, 4.0 m); der dickste verflüssigte Boden liegt in BH-1 (5.45 m). Von 39 Versuchen wurden 27 ausgewertet und 12 ausgeschlossen (über dem Grundwasserspiegel oder tonartig).

Liegt eine Schnittlinie vor, wird das Farbband zwischen den Bohrungen linear interpoliert; der graue Bereich ist nicht bewerteter Baugrund.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

FS = CRR / CSR; CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d; CRR = $CRR_{7.5;1}$ · MSF · K_σ

N_{60} = N_{30} C_E C_B C_S C_R; **$(N_1)_{60cs}$** = C_N N_{60} + Δ(FC), wobei C_N iterativ bestimmt wird

Beispiel (BH-1, 4.0 m): σ'_v 54.47 kPa; N_{60} 8.50; C_N 1.378; $(N_1)_{60cs}$ 12.08; CSR 0.3087; CRR 0.1413 (MSF 1.000, K_σ 1.062) → **FS 0.458**

Filterung: Versuche oberhalb des Grundwasserspiegels, unterhalb von z_{max} und tonartige (PI ≥ 7) werden in der Berechnung nicht berücksichtigt; **Zone**: Die Versuche reichen bis zu ihren benachbarten Mittelpunkten

Empfindlichkeit: a_{max} und die gemessene Hammerenergie sind die Eingaben, die das Ergebnis am stärksten verändern; die Folgen der Bodenverflüssigung sind eine separate 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.

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

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2006). Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(11).

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

Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J. Soil Mech. Found. Div., 97(SM9).

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

Geben Sie Ihre eigenen Bohrungen, SPT-Ergebnisse, den Grundwasserspiegel und die Erdbebenparameter in GeoTerva ein; das Modul liefert die Korrekturen für jede Prüfung, CSR, CRR, FS, die Zonen, die verflüssigungsfähige Mächtigkeit und den farbbandierten Schnitt zusammen mit der schrittweisen Lösung und dem Bericht.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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