

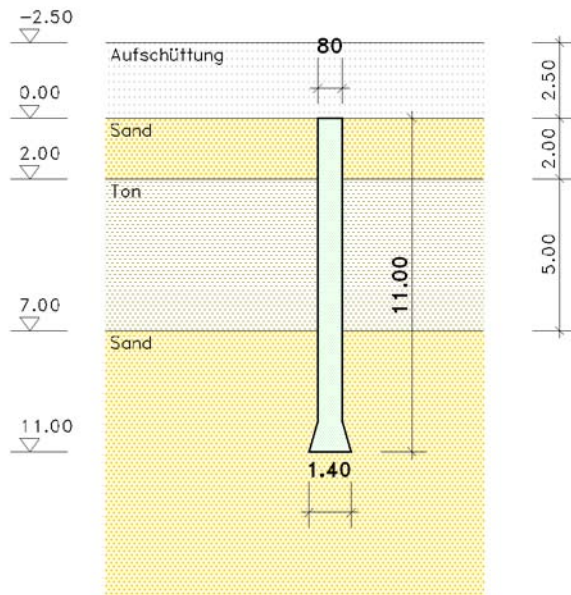
Einzelpfahl, Typ: Bohrfpahl mit Fußverbreiterung

Stahlbetonbemessung nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 mit NA-Deutschland (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04)

Äußere Standsicherheit nach DIN EN 1997-1:2009-09 mit NA-Deutschland

Ergänzende Regeln nach DIN 1054:2010-12

Maßstab 1:250



ZKopf m	ZFuß m	Ø m	Länge m	ØFuß m	lFuß m
0.00	11.00	0.80	11.00	1.40	1.00

ØFuß - Durchmesser Fußverbreiterung lFuß - Länge Fußverbreiterung

1. Bezeichnung und Kennwerte der Bodenschichten

Hinweis: Die Dicke der letzten Schicht wird als unendlich angenommen.

1.1. Schichtdicke und Scherbeiwerte

Die Oberkante der ersten Schicht liegt bei $z_0 = 0.00$ m.

Darauf liegt eine Aufschüttung der Höhe $h_A = 2.50$ m mit $\gamma_A = 18.00$ kN/m².

Schicht	Typ	d m	γ kN/m ³	γ' kN/m ³	ϕ °
Sand	nicht bindig	2.00	19.00	11.00	32.5
Ton	bindig	5.00	19.00	9.00	32.0
Sand	nicht bindig	---	19.00	9.00	32.0

γ - Wichte γ' - Wichte unter Auftrieb ϕ - Reibungswinkel

1.2. Kennwerte für vertikalen Widerstand und E-Moduli

Schicht	Typ	$c_{u,k}$ kN/m ²	q_c MN/m ²	E_s MN/m ²	κ -	E_m MN/m ²
Sand	nicht bindig	---	10.00	10.00	1.00	10.00
Ton	bindig	25.0	---	2.00	1.00	2.00
Sand	nicht bindig	---	15.00	10.00	1.00	10.00

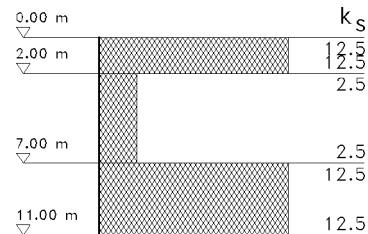
$c_{u,k}$ - char. Kohäsion bzw. Scherfestigkeit des undrännierten Bodens q_c - mittl. Spitzenwiderstand der Drucksonde (nichtbindig)
 E_s - Steifemodul κ - Quotient aus Steifemodul und Zusammendrückungsmodul E_m - mittl. Zusammendrückungsmodul

2. Bettungsansatz

Der Bettungsmodul wird in Abhängigkeit von Steifemodul und Pfahldurchmesser ermittelt:

$$k_s = E_s/D$$

Schicht	k_s MN/m ³
Sand	12.50
Ton	2.50
Sand	12.50



3. Belastung

3.1. Einwirkungsstruktur

Auf der linken Seite sind die Einwirkungen und Lastfälle in einer Baumstruktur dargestellt. Auf der rechten Seite sind deren überlagerungsspezifische Eigenschaften angegeben.

verwendete Symbole: Einwirkung Lastfall

Einwirkungsstruktur	Eigenschaften
1: ständige Lasten	ständige Lasten
1: Eigengewicht (1)	additiv
2: Sonst. veränderl. Lasten	sonstige veränderliche Einwirkungen
2: Sonstige (1)	additiv

3.2. Bemessungssituation der Lastfälle für äußere Standsicherheit

Lastf.	Bezeichnung	BS-P	BS-T
1	Eigengewicht (1)	x	
2	Sonstige (1)	x	

3.3. Charakteristische Pfahlkopflast

Lastf.	N_k kN	Q_k kN	M_k kNm
1	450.00	100.00	0.00
2	250.00	50.00	25.00

3.4. Berücksichtigung einer geometrischen Herstellungsabweichung

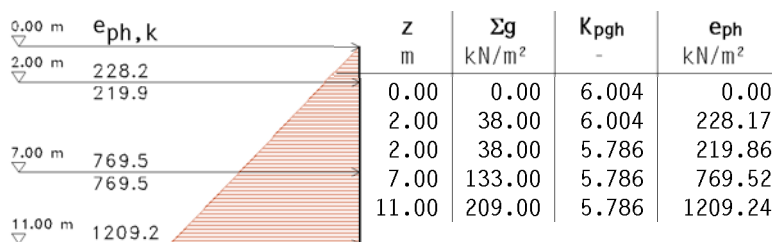
(entsprechend [2], Abschn. 8.1: $e = 0.1 \cdot D_s$ mit $10 \text{ cm} \leq e \leq 15 \text{ cm}$)

Die Kopflast wird mit einer Exzentrizität von $e = 10.0 \text{ cm}$ in der ungünstigsten Richtung angesetzt.

4. Charakteristischer Erdwiderstand

Der Erddruckbeiwert K_{pgh} wird bei $\varphi < 30^\circ$ für ebene Gleitflächen, und bei $\varphi \geq 30^\circ$ für gekrümmte Gleitflächen nach [3], Anhang C ermittelt.

Der Wandreibungswinkel wird mit $\delta_p = -2/3 \cdot \varphi$ angenommen.



Der resultierende max. charakt. Erdwiderstand bei $z_s = 7.33 \text{ m}$ beträgt $E_{phg,k} = 6659.12 \text{ kN/m}$.

5. Axialer Pfahlwiderstand aus Erfahrungswerten

Ermittlung der Widerstands-Setzungs-Linie nach [1], Abschn.5.4.6:

5.1. Pfahlspitzenwiderstand

$R_{b,k}(s) = q_{b,k} \cdot A_b$ mit $s = s_g = 0.1 \cdot D_b$ als Bruchsetzung

$$A_b = 1.539 \text{ m}^2$$

s/D _b	s cm	q _{b,k} ¹⁾ kN/m ²	R _{b,k} kN
0.020	2.80	787.50	1212.26
0.030	4.20	1012.50	1558.62
0.100	14.00	2250.00	3463.61

1) Abminderung der Tabellenwerte auf 75, auf Grund der Fußerverweigerung

$$\Rightarrow R_{b,k}(s_g) = 3463.61 \text{ kN}$$

5.2. Mantelreibung ohne Berücksichtigung von Setzung des umgebenden Bodens

$R_{s,k}(s_{sg}) = \sum q_{s,k,i} \cdot A_{s,i}$ mit $A_{s,i} = l_{s,i} \cdot U$

$$U_s = 2.51 \text{ m}$$

Schicht	q _{s,k} kN/m ²	l _s m	l _{s,eff} ¹⁾ m	A _s m ²	q _{s,k} · A _s kN
Sand	71.67	2.00	2.00	5.027	360.24
Ton	0.00	5.00	5.00	12.566	0.00
Sand	105.00	4.00	3.00	7.540	791.68

1) $l_{s,eff} \leq l_s$ zur Berücksichtigung von Schutzhülsen, Fußerverweigerung und unwirksamen Bereichen inf. neg. Mantelreibung

$$\Rightarrow R_{s,k}(s_{sg}) = 1151.92 \text{ kN}$$

Grenzsetzung zur Aktivierung des vollen Pfahlmantelwiderstandes:

$$s_{sg} = 0.5 \cdot R_{s,k}[\text{MN}] + 0.5 = 1.08 < 3.00 \text{ cm}$$

5.3. Setzungen aus Auflast und Grundwasserabsenkung je Schicht

Auflast $\Delta\sigma_a = 45.00 \text{ kN/m}^2$

\Rightarrow Die zugehörige Grenztiefe liegt bei $z_{\text{Grenz}} = 11.84 \text{ m}$

Schicht	Z _o m	Z _u m	S _{Boden} mm
Sand	0.00	2.00	9.0
Ton	2.00	7.00	112.5
Sand	7.00	---	21.8
Σ			143.3

5.4. Belastung des Pfahls infolge negativer Mantelreibung

Mantelreibung für bindige Böden $\tau_{n,k} = \alpha \cdot c_{u,k} \leq q_{s,k}$ mit $\alpha = 1.0$

Mantelreibung für nicht bindige Böden $\tau_{n,k} = \sigma'_v \cdot K_0 \cdot \tan(\varphi) \leq q_{s,k}$ mit $\sigma'_v \leq \gamma \cdot d$

Resultierende Last $E_{n,k} = u_s \cdot \sum \tau_{n,k,i} \cdot l_{s,i}$

5.4.1. Negative Mantelreibung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Grenzwert für Pfahlsetzung $s_{\text{Pfahl},1} = 0.1 \cdot D_b = 14.00 \text{ cm}$

\Rightarrow der neutrale Punkt liegt bei $z = 0.75 \text{ m}$.

Schicht	c _{u,k} kN/m ²	σ'v,ca1 kN/m ²	φ' °	K ₀ -	τ _{n,k} kN/m ²	q _{s,k} kN/m ²	l _s m	τ _{n,k} · l _s kN/m
Sand	---	52.13	32.50	0.46	15.37	71.67	0.75	11.52

$$\Rightarrow E_{n,k,1} = u_s \cdot \sum \tau_{n,k,i} \cdot l_{s,i} = 28.96 \text{ kN}$$

Die Last $E_{n,k,1}$ wird bei allen Tragfähigkeitsnachweisen in Lastkombinationen mit einer Druckbelastung als zusätzliche ständige Einwirkung berücksichtigt.

5.4.2. Negative Mantelreibung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Maximal wirksame Druckkraft $\Sigma N_{k,\text{Druck}} = 700.00 \text{ kN}$

Setzung infolge der maximalen Druckkraft $s_{\text{Pfahl},2} = 1.17 \text{ cm}$

\Rightarrow der neutrale Punkt liegt bei $z = 9.25 \text{ m}$.

Schicht	c _{u,k} kN/m ²	σ'v,ca1 kN/m ²	φ' °	K ₀ -	τ _{n,k} kN/m ²	q _{s,k} kN/m ²	l _s m	τ _{n,k} · l _s kN/m
Sand	---	64.00	32.50	0.46	18.87	71.67	2.00	37.73
Ton	25.00	---	---	---	25.00	0.00	5.00	0.00
Sand	---	199.38	32.00	0.47	58.56	105.00	2.25	131.77
Σ								169.50

$$\Rightarrow E_{n,k,2} = u_s \cdot \sum \tau_{n,k,i} \cdot l_{s,i} = 426.00 \text{ kN}$$

Die Last $E_{n,k,2}$ wird bei allen Gebrauchstauglichkeitsnachweisen in Lastkombinationen mit einer Druckbelastung als zusätzliche ständige Einwirkung berücksichtigt.

5.5. Mantelreibung infolge Setzung des umgebenden Bodens

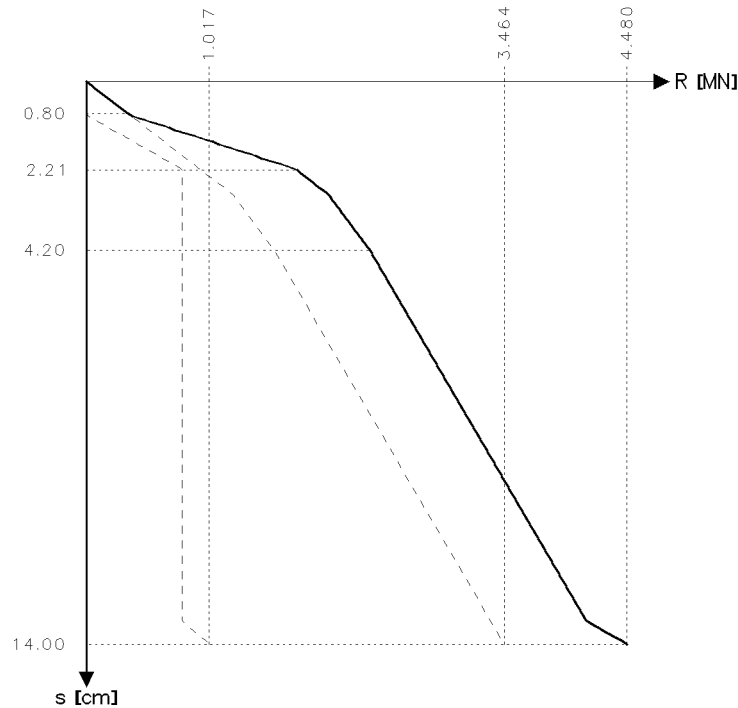
Resultierende Werte für positive und negative Mantelreibung und Lage des neutralen Punktes in Abhängigkeit der Pfahlkopfsetzung.

Grenzwert für Pfahlsetzung $s_{Pfahl,1} = 0.1 \cdot D_b = 14.00 \text{ cm}$

s cm	ZnP m	Enk kN	R _{s,k} kN
0.00	12.00	552.17	0.00
0.80	10.06	552.17	0.00
2.21	6.98	94.83	791.68
14.00	0.75	28.96	1016.83

5.6. Widerstands-Setzungs-Linie

Resultierender Pfahlwiderstand bei Druckbelastung



s cm	R _{b,k} kN	R _{s,k} kN	R _k kN
0.80	347.60	0.00	347.60
2.21	955.91	791.68	1747.59
4.20	1558.62	791.68	2350.30
14.00	3463.61	1016.83	4480.43

$q_{b,k}$ - Pfahlspitzenwiderstand s - Pfahlkopfsetzung D_b - Pfahlfußdurchmesser A_b - Pfahlfußfläche
 U_s - Schaftumfang $q_{s,k}$ - bezogene Pfahlmantelreibung in der Schicht i $l_{s,i}$ - Pfahllänge in der Schicht i
 $A_{s,i}$ - Pfahlmantelfläche in der Schicht i s_{Boden} - Setzung des umgeb. Bodens $\sigma'_{v,i}$ - effektive Vertikalspannung
 K_0 - Erdruhedruckbeiwert Z_{nP} - Z-Koord. des neutralen Punktes E_{nk} - result. Last aus neg. Mantelreibung

6. Stahlbetonbemessung - Nachweis der Tragfähigkeit

6.1. Längsbewehrung

Es wird eine gleichmäßig auf den Umfang verteilte Bewehrung angenommen.

Stahlrandabstand $d_s = 5.0 \text{ cm}$

Maximal zulässiger Bewehrungsgrad $\rho_1 = 8.00 \%$

6.2. Nachweisparameter Biege- und Schubbemessung

Beton: C30/37

Verformungsberechnungen mit Kriechen ($\varphi_{\infty,t0} = 3.795$) und Schwinden ($\epsilon_{cs,\infty} = -0.460\%$)

Längsbewehrung: BSt 500, Mindestbewehrung für Stützen

Schubbewehrung BSt 500

ohne Schubmindestbewehrung

Druckstrebenwinkel minimal, Wirksamkeitsfaktor der Rundbügel $\alpha_k = 1.00$

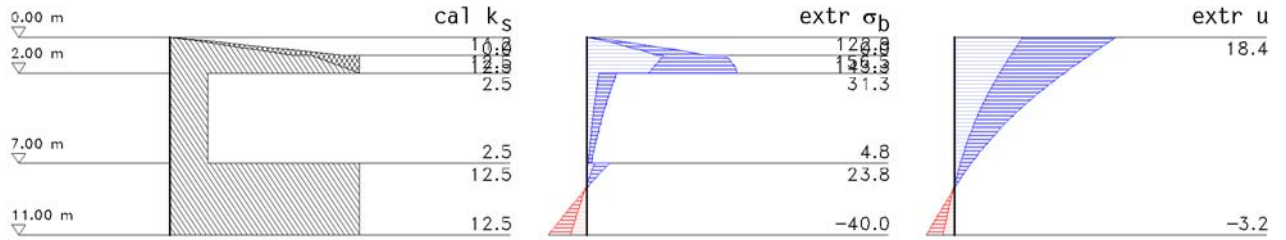
6.3. Faktorisierung der Lastfallkombinationen

LK	Bemessungssit.	Faktorisierung
1	ständig	Lf1
2	ständig	1.35 · Lf1
3	ständig	Lf1+1.5 · Lf2
4	ständig	1.35 · Lf1+1.5 · Lf2

6.4. Bemessungswerte Pfahlkopflast

LK	N _d kN	H _d kN	M _d kNm
1	478.96	100.00	0.00
2	646.60	135.00	0.00
3	853.96	175.00	37.50
4	1021.60	210.00	37.50

6.5. Extremale Bettungsreaktionen und Verschiebungen



z m	cal k _s		σ _b		u	
	Min MN/m ³	Max MN/m ³	Min kN/m ²	Max kN/m ²	Min mm	Max mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.75	18.35
1.00	9.30	12.50	80.14	143.27	6.41	15.40
2.00	12.50	12.50	64.21	156.46	5.14	12.52
7.00	2.50	2.50	1.70	4.77	0.68	1.91
7.00	12.50	12.50	8.48	23.83	0.68	1.91
11.00	12.50	12.50	-39.96	-16.72	-3.20	-1.34

6.6. Nachweis des Erdwiderlagers

$$\mu = B_{h,d} / E_{rph,d}$$

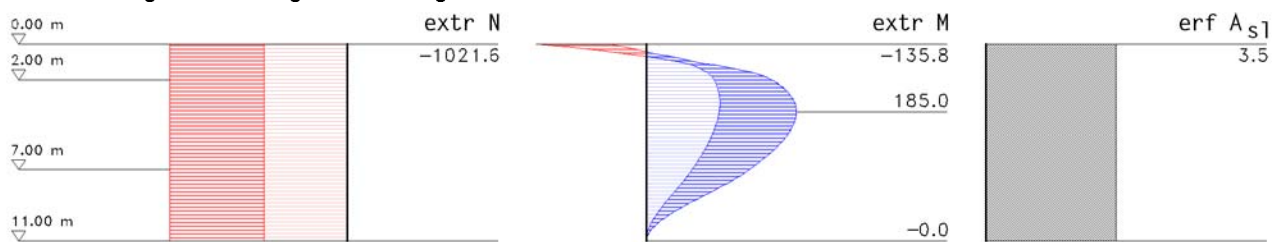
LK	ZDrehpunkt m	B _{h,d} kN	E _{rph,d} kN	μ
1	8.21	118.96	5483.40	0.02
2	8.21	160.59	5483.40	0.03
3	8.39	209.98	5751.92	0.04
4	8.37	252.62	5720.25	0.04

$\mu_{\min} = 0.044 < 1.0 \Rightarrow$ Nachweis gegen Versagen des Erdwiderlagers eingehalten

B_{h,d} - Bem.wert der Horizontalkomp. der res. Bettungsreaktion bis zum Drehpunkt

E_{rph,d} - Bem.wert der Horizontalkomp. des res. räumlichen Erdwiderstandes bis zum Drehpunkt

6.7. Extremale Ergebnisse Biegebemessung



z m	N		M		erf A _s cm ²
	Min kN	Max kN	Min kNm	Max kNm	
0.00	-1021.60	-478.96	-135.75	-45.00	3.52
3.30	-1021.60	-478.96	90.76	182.89	3.52
3.80	-1021.60	-478.96	89.93	185.05	3.52
11.00	-1021.60	-478.96	-0.00	-0.00	3.52

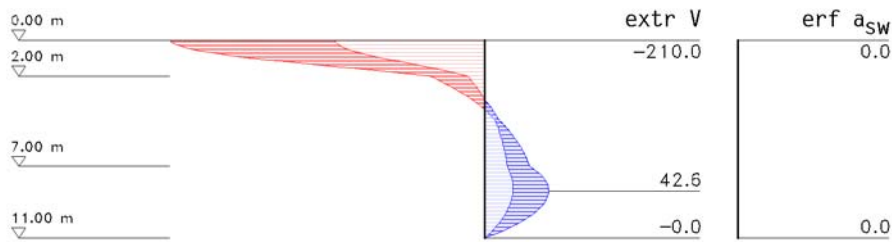
Maßgebende Bewehrung:

Die erforderliche Bewehrung ist über den ganzen Pfahl konstant

\Rightarrow erf A_{s1} = 3.52 cm²

6.8. Extremale Ergebnisse Schubmessung

Der innere Hebelarm wird mit $z = 0.9d \leq d - 2d_c$ angenommen.



z m	V		erf a _{sw} cm ² /m
	Min kN	Max kN	
0.00	-210.00	-100.00	0.00
8.20	18.97	42.47	0.00
8.40	18.88	42.65	0.00
11.00	-0.00	0.00	0.00

⇒ Eine Schubbewehrung ist statisch nicht erforderlich.

7. Stahlbetonbemessung - Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Spannungsdehnungslinie für den Beton nach [4] 9.1.5 (wirklichkeitsnah).

7.1. Rissnachweis

Anfangsbewehrung $A_{s01} = 0.00 \text{ cm}^2$ (aus Grundbewehrung)

7.1.1. Nachweisparameter Rissnachweis

Verfahren nach Norm (Berechnung der Rissbreite)

Grenz-Ø der Längsbewehrung: $d_{sa} = 16 \text{ mm}$

rechnerische Rissbreite: $w_k = 0.30 \text{ mm}$

Rissbildung aus Lastbeanspruchung: ja

Mindestbewehrung: Erstrissbildung aus zentrischem Zwang

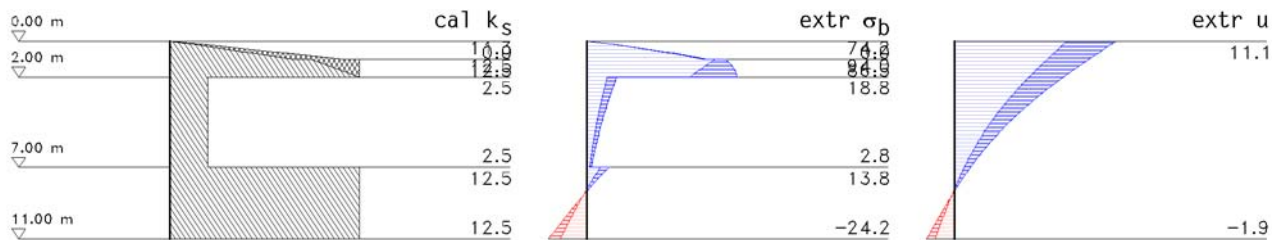
7.1.2. Faktorisierung der Lastfallkombinationen

LK	Bemessungssit.	Faktorisierung
1	ständig	Lf1
2	ständig	Lf1+0.5·Lf2

7.1.3. Bemessungswerte Pfahlkopflast

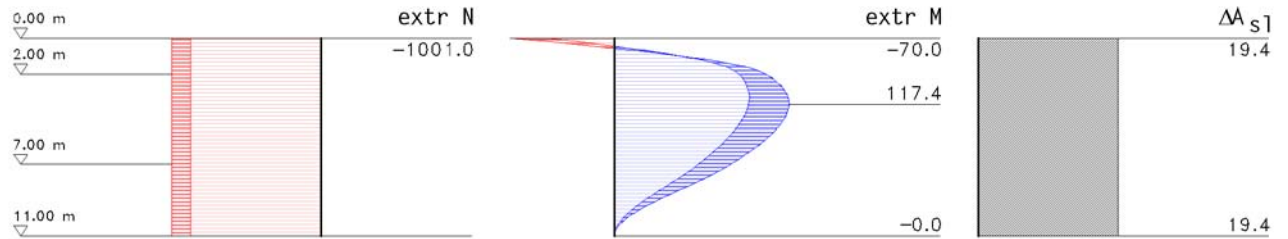
LK	N _d kN	H _d kN	M _d kNm
1	876.00	100.00	0.00
2	1001.00	125.00	12.50

7.1.4. Extremale Bettungsreaktionen und Verschiebungen



z m	cal k _s		σ _b		u	
	Min MN/m ³	Max MN/m ³	Min kN/m ²	Max kN/m ²	Min mm	Max mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.75	11.12
1.00	9.30	12.50	80.14	86.48	6.41	9.29
2.00	12.50	12.50	64.21	94.03	5.14	7.52
7.00	2.50	2.50	1.70	2.75	0.68	1.10
7.00	12.50	12.50	8.48	13.76	0.68	1.10
11.00	12.50	12.50	-24.15	-16.72	-1.93	-1.34

7.1.5. Extremale Ergebnisse Rissnachweis



z m	N		M		As1,Min cm ²	erf As1 cm ²	ΔAs1 cm ²
	Min kN	Max kN	Min kNm	Max kNm			
0.00	-1001.00	-876.00	-70.00	-45.00	19.44	19.44	19.44
3.30	-1001.00	-876.00	90.76	116.73	19.44	19.44	19.44
3.70	-1001.00	-876.00	90.23	117.38	19.44	19.44	19.44
11.00	-1001.00	-876.00	-0.00	-0.00	19.44	19.44	19.44

⇒ Für den Rissnachweis ist eine zusätzliche Bewehrung von $\Delta A_{s1} = 19.44 \text{ cm}^2$ erforderlich.

8. Äußere Standsicherheit - Nachweis der Tragfähigkeit (ULS)

8.1. Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite

Entsprechend [5] Tabelle A 2.1

8.2. Teilsicherheitsbeiwerte auf Widerstandsseite

Entsprechend [5] Tabellen A 2.2 und A 2.3

8.3. Faktorisierung der Lastfallkombinationen

LK	Bemessungssit.	Faktorisierung
1	LF 1	Lf1
2	LF 1	1.35 · Lf1
3	LF 1	Lf1+1.5 · Lf2
4	LF 1	1.35 · Lf1+1.5 · Lf2

8.4. Bemessungswerte Pfahlkopflast

LK	N _d kN	H _d kN	M _d kNm
1	478.96	100.00	0.00
2	646.60	135.00	0.00
3	853.96	175.00	37.50
4	1021.60	210.00	37.50

Zugehörige charakteristische Werte

LK	N _k kN	H _k kN	M _k kNm
1	478.96	100.00	1.00
2	478.96	100.00	1.00
3	728.96	150.00	26.00
4	728.96	150.00	26.00

8.5. Nachweis des Erdwiderlagers

$$\mu = B_{h,d} / E_{rph,d}$$

LK	ZDrehpunkt m	B _{h,d} kN	E _{rph,d} kN	μ
1	8.21	118.96	5483.40	0.02
2	8.21	160.59	5483.40	0.03
3	8.39	209.98	5751.92	0.04
4	8.37	252.62	5720.25	0.04

$\mu_{min} = 0.044 < 1.0 \Rightarrow$ Nachweis gegen Versagen des Erdwiderlagers eingehalten

B_{h,d} - Bem.wert der Horizontalkomp. der res. Bettungsreaktion bis zum Drehpunkt

E_{rph,d} - Bem.wert der Horizontalkomp. des res. räumlichen Erdwiderstandes bis zum Drehpunkt

8.6. Nachweis der axialen Tragfähigkeit im Grenzzustand GEO-2

$$\mu = R_{ULS,d} / E_{ULS,d}$$

$$R_{ULS,d} = R_{ULS,k} / \gamma_P \text{ mit } R_{ULS,k} = R_{b,k}(s_{sg}) + R_{s,k}(s_{sg})$$

$$E_{ULS,d} = E_{G,k} \gamma_G + E_{Q,k} \gamma_Q + E_{n,k} \gamma_G$$

LK	R _{ULS,k} kN	γ _P	R _{ULS,d} kN	E _{ULS,d} kN	μ
1	4480.43	1.40	3200.31	478.96	0.15
2	4480.43	1.40	3200.31	646.60	0.20
3	4480.43	1.40	3200.31	853.96	0.27
4	4480.43	1.40	3200.31	1021.60	0.32

$\mu_{\max} = 0.32 < 1.0 \Rightarrow$ Axialer Pfahlwiderstand ausreichend

9. Äußere Standsicherheit - Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

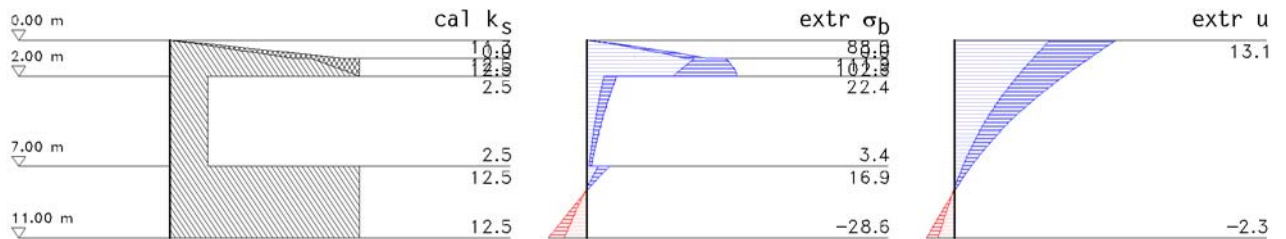
9.1. Faktorisierung der Lastfallkombinationen

LK	Bemessungssit.	Faktorisierung
1	LF 1	Lf1
2	LF 1	Lf1+Lf2

9.2. Bemessungswerte Pfahlkopflast

LK	N _k kN	H _k kN	M _k kNm
1	876.00	100.00	0.00
2	1126.00	150.00	25.00

9.3. Extreme Bettungsreaktionen und Verschiebungen



z m	cal k _s		σ _b		u	
	Min MN/m ³	Max MN/m ³	Min kN/m ²	Max kN/m ²	Min mm	Max mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.75	13.14
1.00	9.30	12.50	80.14	102.55	6.41	11.02
2.00	12.50	12.50	64.21	111.92	5.14	8.95
7.00	2.50	2.50	1.70	3.39	0.68	1.36
7.00	12.50	12.50	8.48	16.95	0.68	1.36
11.00	12.50	12.50	-28.61	-16.72	-2.29	-1.34

9.4. Pfahlkopfverschiebung (SLS)

$$\mu = u_{\text{vorh}} / u_{\text{zul}}$$

Verträgliche Pfahlkopfverschiebung $u_{\text{zul}} = 2.0 \text{ cm}$

LK	u _{vorh} cm	μ
1	0.77	0.39
2	1.31	0.66

$\mu_{\min} = 0.66 < 1.0 \Rightarrow$ Zulässige Pfahlkopfverschiebung wird eingehalten

9.5. Pfahlkopfsetzung (SLS)

$$\mu = R_{SLS,d} / E_{SLS,d}$$

$$E_{SLS,d} = E_{G,k} + E_{Q,k} + E_{n,k}$$

Verträgliche Pfahlkopfsetzung $s_{\text{zul}} = 2.00 \text{ cm}$

$$R_{SLS,d}(2.00 \text{ cm}) = R_{b,k}(2.00 \text{ cm}) + R_{s,k}(2.00 \text{ cm}) = 865.90 \text{ kN} + 688.01 \text{ kN} = 1553.91 \text{ kN}$$

LK	R _{SLS,d} kN	E _{SLS,d} kN	μ	S _{vorh} cm
1	1553.91	876.00	0.56	1.3
2	1553.91	1126.00	0.72	1.6

$\mu_{\min} = 0.72 < 1.0 \Rightarrow$ Zulässige Pfahlkopfsetzung wird eingehalten

10. Zusammenfassung

Alle Nachweise konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Maßgebende Bewehrung:

erf $A_{s1} = 19.44 \text{ cm}^2$ bzw. erf $\rho_1 = 0.387 \%$ (aus Rissnachweis)

erf $a_{sw} = 0.00 \text{ cm}^2/\text{m}$

Maximale Ausnutzung der achsialen Tragfähigkeit (GEO-2): $\mu_{\max} = 0.32$

Maximale Pfahlkopfverschiebung (SLS): 1.31 cm

Maximale Pfahlkopfsetzung (SLS): 1.58 cm

Maximale Ausnutzung des Erdwiderlagers: $\mu_{\max} = 0.04$

[1] Empf. des Arbeitskreises 'Pfähle', Ernst und Sohn, 2. Aufl., 2012

[2] DIN EN 1536: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle, Dezember 2010

[3] DIN 4085: Baugrund, Berechnung des Erddrucks, Mai 2011

[4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, August 2008

[5] DIN 1054: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regeln zu DIN EN 1997-1, Dezember 2010