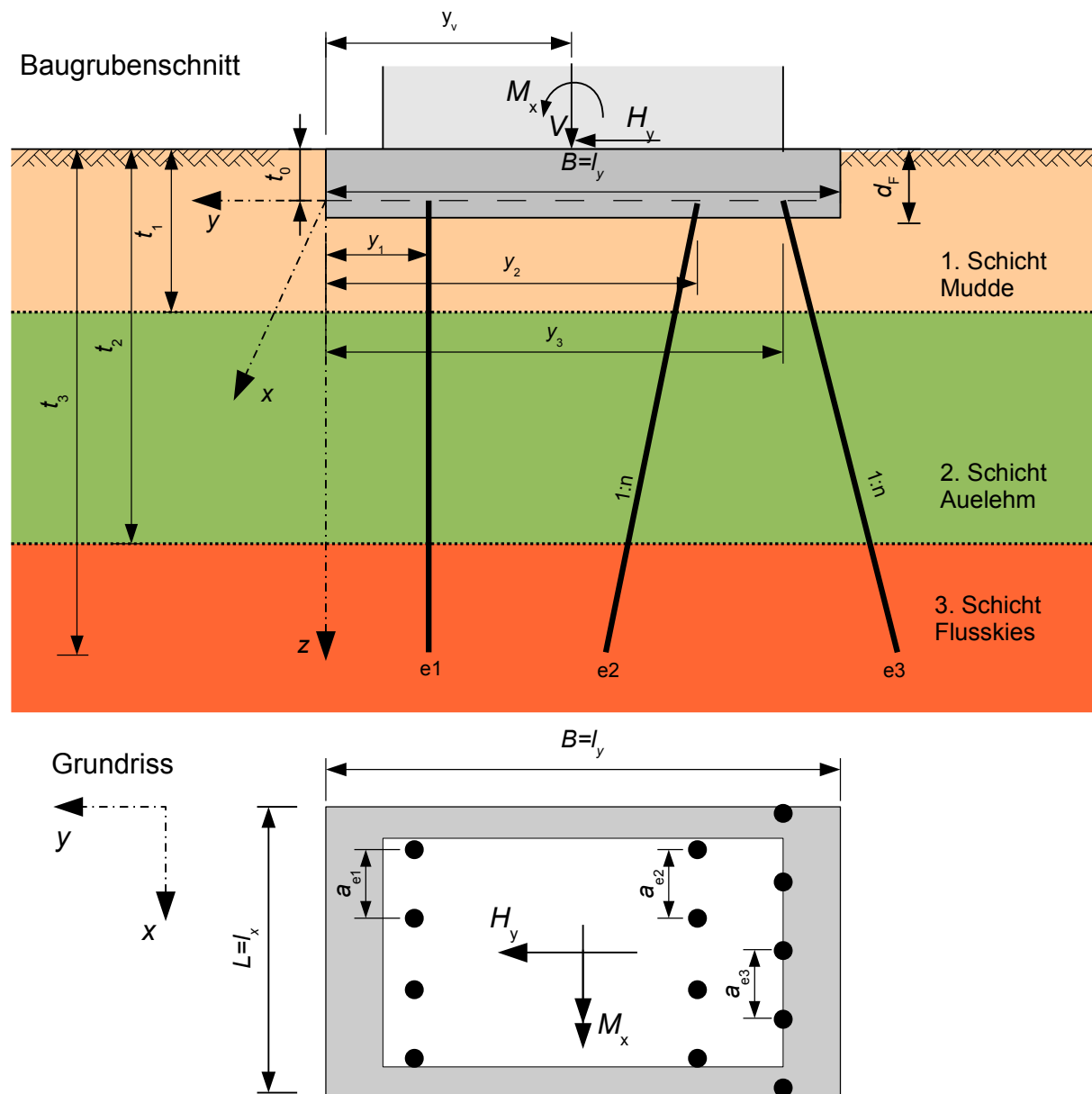


Grundbau, Verdrängungspfähle Bahnbrücke Achse 30

Es ist für den Brückenpfeiler der Achse 30 als Gründungssystem die Variante Pfahlrostgründung mit Stahlrohrrammpfählen zu untersuchen. Dafür ist die Pfahlgründung vorzubemessen. Das Eigengewicht der Pfähle kann vernachlässigt werden.



Eingangsgrößen, Bezeichner, Hinweise

Als Pfahlart sind Stahlrohrpfähle, unten geschlossen, vorgesehen. Anzahl, Länge und Querschnittsabmessungen der Pfähle sind noch nicht bekannt. Deshalb wird zunächst ein statisch bestimmtes Ersatzsystem mit drei Pfahlreihen zugrundegelegt. Die Annahme der Ansatzpunkte und der Neigung ist willkürlich. Sinnvoll ist eine Anordnung, bei der die Feld- bzw. Stützenmomente möglichst klein sind. Der Berechnungsablauf besteht aus folgenden Schritten:

1. statisch bestimmtes Ersatzsystem mit drei Pfahlreihen bilden.
2. Pfahlkräfte (Beanspruchung P_{e1} bis P_{e3}) als Linienkräfte berechnen.
3. Pfahl (Querschnitt und Einbindetiefe) mit Tragfähigkeit R_k wählen.
4. Mindestwerte für Anzahl Pfahlreihen und Pfahlabstand berechnen.
5. Abmessungen und Anzahl festlegen (wählen).

Pfahlrostplatte

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$l_y = 30 \text{ m Breite}$$

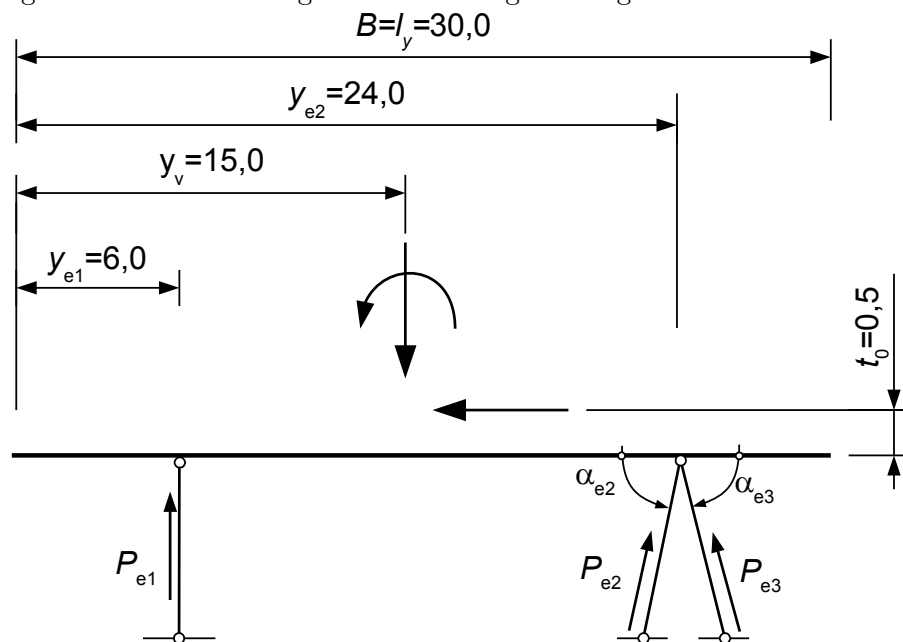
$$l_x = 8 \text{ m Länge des Pfahlrosts}$$

$$d_F = 0.75 \text{ m Dicke der Platte}$$

$$t_0 = 0.5 \text{ m Bezugsebene (Pfahlkopf, Anschluss an das Pfahlrost)}$$

Für das statische Ersatzsystem wird das feste Widerlager rechts (S2) und das verschiebbliche Widerlager links (S1) angenommen. Am rechten Widerlager treffen sich die Pfahlreihen der Ersatzpfähle P_{e2} und P_{e3} . Die Neigungung von P_{e2} und P_{e3} wird mit 1:4 angenommen.

Bei einem gleichmäßig belasteten Träger auf zwei Stützen sind Feld und Stützenmoment gleich groß, wenn die Auflager jeweils im Abstand von 21% der Länge vom Rand gemessen angeordnet werden. Mit gerundeten Werten ergibt sich nachfolgend dargestelltes statisches Ersatzsystem.



$$y_{e1} = -6$$

$$y_{e2} = -24$$

$$y_{e3} = -24 \text{ m Pfahlansatzpunkte an der Rostplatte,}$$

$$\alpha_{e2} = \arctan\left(\frac{4}{1}\right)^{\text{deg}}$$

$$= 75.964^\circ \text{ Neigungswinkel der Pfahlreihe 2 (positive Drehrichtung: von y-Achse nach z)}$$

$$\alpha_{e3} = -\arctan\left(\frac{4}{1}\right)^{\text{deg}}$$

$$= -75.964^\circ \text{ Neigungswinkel der Pfahlreihe 3}$$

Einwirkungen aus dem Tragwerk

$$V_{Gk} = 4438.75 \text{ kN/m ständige Lasten}$$

$$V_{Qk} = 996.25 \text{ kN/m veränderliche Lasten}$$

$$H_{y,Qk} = 162.625 \text{ kN/m veränderliche Horizontalkraft}$$

$$M_{x,Qk} = 1362.5 \text{ kNm/m Moment infolge veränderlicher Lasten}$$

$$y_v = -\frac{l_y}{2} = -\frac{30}{2}$$

$$\begin{aligned}
&= -15 \text{ m Abstand der Vertikallasten vom Ursprung} \\
z_H &= 0 - t_0 = 0 - 0.5 = -0.5 \text{ m Abstand der Horizontallast}
\end{aligned}$$

Baugrund

Schicht 1: Mudde

$$t_1 = 5 \text{ m Tiefe der Unterkante Schicht 1 unter GOF}$$

Schicht2: Auelehm, steif

$$t_2 = 7 \text{ m Tiefe der Unterkante Schicht 2 unter GOF}$$

Schicht 3: Kies dicht gelagert

1 Berechnung der Beanspruchung der einzelnen Pfahlreihen

$$\begin{aligned}
G &= l_y \cdot d_F \cdot \gamma_{Beton} = 30 \cdot 0.75 \cdot 24 \\
&= 540 \text{ kN/m Eigengewicht der Rostplatte}
\end{aligned}$$

Pfahlreihe P_{e1}

Summe der Momente um den Schnittpunkt der Wirkungslinien von P_2 und P_3

$$\begin{aligned}
\bar{P}_{e1} &= \frac{(y_v - y_{em}) \cdot (V_{Gk} + V_{Qk} + G) - z_H \cdot H_{y,Qk} + M_{x,Qk}}{y_{e1} - y_{em}} \\
&= \frac{(-15 - -24) \cdot (4438.75 + 996.25 + 540) - -0.5 \cdot 162.625 + 1362.5}{-6 - -24} = 3067.712 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Pfahlreihe P_{e3}

Summe der Horizontalkräfte

$$\begin{aligned}
\bar{P}_{e3} &= \frac{\frac{V_{Gk} + V_{Qk} + G}{\sin \alpha_{e2}^\circ} - \frac{H_{y,Qk}}{\cos \alpha_{e2}^\circ} - \frac{\bar{P}_{e1}}{\sin \alpha_{e2}^\circ}}{\frac{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin \alpha_{e2}^\circ} + \frac{\cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\cos \alpha_{e2}^\circ}} \\
&= \frac{\frac{4438.75 + 996.25 + 540}{\sin 75.964^\circ} - \frac{162.625}{\cos 75.964^\circ} - \frac{3067.712}{\sin 75.964^\circ}}{\frac{\sin(-(-75.964^\circ))}{\sin 75.964^\circ} + \frac{\cos(-(-75.964^\circ))}{\cos 75.964^\circ}} = 1163.122 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Pfahlreihen P_{e2}

Summe der Vertikalkräfte

$$\begin{aligned}
\bar{P}_{e2} &= \frac{\bar{P}_{e3} \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\cos \alpha_{e2}^\circ} + \frac{H_{y,Qk}}{\cos \alpha_{e2}^\circ} \\
&= \frac{1163.122 \cdot \cos(-(-75.964^\circ))}{\cos 75.964^\circ} + \frac{162.625}{\cos 75.964^\circ} = 1833.642 \text{ kN/m} \\
\bar{P}_{e2} &= \frac{H_{y,Qk} + \frac{(V_{Gk} + V_{Qk} + G) \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e1} \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}}{\cos \alpha_{e2}^\circ + \frac{\sin \alpha_{e2}^\circ \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}} \\
&= \frac{162.625 + \frac{(4438.75 + 996.25 + 540) \cdot \cos(-(-75.964^\circ))}{\sin(-(-75.964^\circ))} - \frac{3067.712 \cdot \cos(-(-75.964^\circ))}{\sin(-(-75.964^\circ))}}{\cos 75.964^\circ + \frac{\sin 75.964^\circ \cdot \cos(-(-75.964^\circ))}{\sin(-(-75.964^\circ))}} \\
&= 1833.642 \\
\bar{P}_{e3} &= \frac{V_{Gk} + V_{Qk} + G}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e1}}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e2} \cdot \sin \alpha_{e2}^\circ}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} \\
&= \frac{4438.75 + 996.25 + 540}{\sin(-(-75.964^\circ))} - \frac{3067.712}{\sin(-(-75.964^\circ))} - \frac{1833.642 \cdot \sin 75.964^\circ}{\sin(-(-75.964^\circ))} \\
&= 1163.122 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

2 Vorbemessung der Pfahlreihen

2.1 Variante 1: Tabellenwerte für Tragfähigkeit

2.1.1 Tragkraft Einzelpfahl

Es ist kein Pfahl verfügbar, der eine Tragfähigkeit aufweist, die größer als die Beanspruchung ist. Deshalb sollte der Pfahl mit der größten Tragfähigkeit gewählt werden.

$$\begin{aligned} R_{k1} &= 1200 \text{ kN axiale Tragkraft für Vorbemessung} \\ &\quad \text{bei } t=8,00 \text{ m Einbindung und Stahlrohr } D = 0,45 \text{ m} \\ t &= 8 \text{ m Einbindung in tragfähige Schicht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{min} &= 3 \cdot D = 3 \cdot 0,45 \\ &= 1,35 \text{ m Mindestabstand (siehe Buch S. 80)} \end{aligned}$$

$$a_{min} = 1 + D = 1 + 0,45 = 1,45 \text{ m hier maßgebend}$$

2.1.2 Pfahlabstände

$$\begin{aligned} a_{e1,max} &= \frac{R_{k1}}{\bar{P}_{e1}} = \frac{1200}{3067,712} \\ &= 0,391 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{e1} &= \frac{a_{min}}{a_{e1,max}} = \frac{1,45}{0,391} \\ &= 3,707 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 1} \end{aligned}$$

$$N_{e1} = 4 \quad \text{gewählte Anzahl der Pfahlreihen}$$

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1,5 \text{ m gewählter Abstand der Pfähle für die Nachweise}$$

$$\begin{aligned} a_{e2} &= \frac{R_{k1}}{\bar{P}_{e2}} = \frac{1200}{1833,642} \\ &= 0,654 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{e2} &= \frac{a_{min}}{a_{e2}} = \frac{1,45}{0,654} \\ &= 2,216 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 2} \end{aligned}$$

$$N_{e2} = 3 \quad \text{gewählte Anzahl der Pfahlreihen}$$

$$a_5 = a_6 = a_7 = 1,75 \text{ m gewählter Pfahlabstand}$$

$$\begin{aligned} a_{e3} &= \frac{R_{k1}}{\bar{P}_{e3}} = \frac{1200}{1163,122} \\ &= 1,032 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 3} \end{aligned}$$

$$N_{e3} = \frac{a_{min}}{a_{e3}} = \frac{1,45}{1,032} = 1,405$$

$$N_{e3} = 2 \quad \text{gewählt}$$

$$a_8 = a_9 = 1,75 \text{ m}$$

2.2 Variante 2: Spitzendruck und Mantelreibung

2.2.1 Tragkraft Einzelpfahl

$$\begin{aligned} q_s &= 35 + \frac{55 - 35}{10 - 5} \cdot (8 - 5) \\ &= 47 \text{ kN/m}^2 \text{ Pfahlmantelwiderstand interpoliert, nichtbindiger Boden (5,0 m - 10,0 m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_b &= 3 + \frac{6 - 3}{10 - 5} \cdot (8 - 5) \\ &= 4,8 \text{ MN/m}^2 \text{ Pfahlsitzenwiderstand interpoliert, nichtbindiger Boden (5,0 m - 10,0 m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{s1} &= U_{Pfahl} \cdot q_s \cdot (t_3 - t_2) = 1,414 \cdot 47 \cdot (15 - 7) \\ &= 531,557 \text{ kN Mantelwiderstand der untersten Schicht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{s2} &= \frac{U_{Pfahl} \cdot q_s \cdot (t_3 - t_2)}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} = \frac{1.414 \cdot 47 \cdot (15 - 7)}{\sin(-(-75.964^\circ))} \\
&= 547.917 \text{ kN Mantelwiderstand der untersten Schicht} \\
R_b &= \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot D \cdot q_b \cdot 1000 = \frac{\pi}{4} \cdot 0.45 \cdot 0.45 \cdot 4.8 \cdot 1000 \\
&= 763.407 \text{ kN Pfahlfußwiderstand} \\
R_{k1} &= R_b + R_{s1} = 763.407 + 531.557 = 1294.964 \text{ kN} \\
R_{k2} &= R_b + R_{s2} = 763.407 + 547.917 = 1311.324 \text{ kN}
\end{aligned}$$

2.2.2 Pfahlabstände

$$\begin{aligned}
a_{e1} &= \frac{R_{k1}}{\bar{P}_{e1}} = \frac{1294.964}{3067.712} \\
&= 0.422 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 1} \\
N_{e1} &= \frac{a_{min}}{a_{e1}} = \frac{1.45}{0.422} \\
&= 3.435 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 1} \\
N_{e1} &= 4 \quad \text{gewählte Anzahl der Pfahlreihen} \\
a_1 &= a_2 = a_3 = a_4 = 1.5 \text{ m gewählter Abstand der Pfähle für die Nachweise} \\
a_{e2} &= \frac{R_{k2}}{\bar{P}_{e2}} = \frac{1311.324}{1833.642} \\
&= 0.715 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 2} \\
N_{e2} &= \frac{a_{min}}{a_{e2}} = \frac{1.45}{0.715} \\
&= 2.028 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 2} \\
N_{e2} &= 3 \quad \text{gewählte Anzahl der Pfahlreihen} \\
a_5 &= a_6 = a_7 = 1.75 \text{ m gewählter Pfahlabstand siehe Variante 1} \\
a_{e3} &= \frac{R_{k2}}{\bar{P}_{e3}} = \frac{1311.324}{1163.122} \\
&= 1.127 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand Ersatzpfähle 3} \\
N_{e3} &= \frac{a_{min}}{a_{e3}} = \frac{1.45}{1.127} = 1.286 \\
N_{e3} &= 2 \quad \text{gewählt} \\
a_8 &= a_9 = 1.75 \text{ m}
\end{aligned}$$

3 Alternativentwurf: Bohrpfahl

3.1 System und Besonderheiten

Mindestabstand größer dreifacher Durchmesser nur durch Anordnung vieler Pfahlreihen erfüllbar. Als Alternative werden Bohrpfähle mit größerem Durchmesser untersucht.

$$\begin{aligned}
\alpha_{e2} &= \arctan\left(\frac{8}{1}\right)^{deg} \\
&= 82.875^\circ \text{ Neigungswinkel der Pfahlreihe 2 (positive Drehrichtung: von y-Achse nach z)}
\end{aligned}$$

3.2 Beanspruchungen, Pfahlkräfte

Pfahlreihe P_{e1}

Summe der Momente um den Schnittpunkt der Wirkungslinien von P_2 und P_3

$$\begin{aligned}
\bar{P}_{e1} &= \frac{(y_v - y_{em}) \cdot (V_{Gk} + V_{Qk} + G) - z_H \cdot H_{y,Qk} + M_{x,Qk}}{y_{e1} - y_{em}} \\
&= \frac{(-15 - -24) \cdot (4438.75 + 996.25 + 540) - -0.5 \cdot 162.625 + 1362.5}{-6 - -24} \\
&= 3067.712 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Pfahlreihe P_{e3}

Summe der Horizontalkräfte

$$\begin{aligned}\bar{P}_{e3} &= \frac{\frac{V_{Gk}+V_{Qk}+G}{\sin \alpha_{e2}^\circ} - \frac{H_{y,Qk}}{\cos \alpha_{e2}^\circ} - \frac{\bar{P}_{e1}}{\sin \alpha_{e2}^\circ}}{\frac{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin \alpha_{e2}^\circ} + \frac{\cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\cos \alpha_{e2}^\circ}} \\ &= \frac{\frac{4438.75+996.25+540}{\sin 82.875^\circ} - \frac{162.625}{\cos 82.875^\circ} - \frac{3067.712}{\sin 82.875^\circ}}{\frac{\sin(-(-82.875^\circ))}{\sin 82.875^\circ} + \frac{\cos(-(-82.875^\circ))}{\cos 82.875^\circ}} = 809.394\end{aligned}$$

Pfahlreihen P_{e2}

Summe der Vertikalkräfte

$$\begin{aligned}\bar{P}_{e2} &= \frac{\bar{P}_{e3} \cdot \cos(-\alpha_{e3}^\circ)}{\cos \alpha_{e2}^\circ} + \frac{H_{y,Qk}}{\cos \alpha_{e2}^\circ} \\ &= \frac{809.394 \cdot \cos(-82.875^\circ)}{\cos 82.875^\circ} + \frac{162.625}{\cos 82.875^\circ} = 2120.519 \text{ kN/m} \\ \bar{P}_{e2} &= \frac{H_{y,Qk} + \frac{(V_{Gk}+V_{Qk}+G) \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e1} \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}}{\cos \alpha_{e2}^\circ + \frac{\sin \alpha_{e2}^\circ \cdot \cos(-(\alpha_{e3}^\circ))}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))}} \\ &= \frac{162.625 + \frac{(4438.75+996.25+540) \cdot \cos(-(-82.875^\circ))}{\sin(-(-82.875^\circ))} - \frac{3067.712 \cdot \cos(-(-82.875^\circ))}{\sin(-(-82.875^\circ))}}{\cos 82.875^\circ + \frac{\sin 82.875^\circ \cdot \cos(-(-82.875^\circ))}{\sin(-(-82.875^\circ))}} \\ &= 2120.519 \\ \bar{P}_{e3} &= \frac{V_{Gk} + V_{Qk} + G}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e1}}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} - \frac{\bar{P}_{e2} \cdot \sin \alpha_{e2}^\circ}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} \\ &= \frac{4438.75 + 996.25 + 540}{\sin(-(-82.875^\circ))} - \frac{3067.712}{\sin(-(-82.875^\circ))} - \frac{2120.519 \cdot \sin 82.875^\circ}{\sin(-(-82.875^\circ))} \\ &= 809.394 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

3.3 Vorbemessung der Bohrpfähle

3.3.1 Pfahltragkraft

Es werden die Angaben der Tabelle 4.3 zugrunde gelegt.

$$q_s = 130 \text{ kN/m}^2 \text{ Pfahlmantelwiderstand, nichtbindiger Boden, } q_c \geq 25 \text{ MN/m}^2$$

$$q_b = 4 \text{ MN/m}^2 \text{ Pfahlsitzenwiderstand, nichtbindiger Boden, } q_c \geq 25 \text{ MN/m}^2$$

$$t = 6 \text{ m Einbindung in tragfähige Schicht}$$

$$D = 1 \text{ m angenommener Pfahldurchmesser}$$

$$\begin{aligned}A_{sP2,3} &= \frac{\pi \cdot D \cdot t}{\sin(-(\alpha_{e3}^\circ))} = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 6}{\sin(-(-82.875^\circ))} \\ &= 18.996 \text{ m}^2 \text{ Mantelfläche Pfahl 2 und 3, Schicht 2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{sP1} &= \pi \cdot D \cdot t = \pi \cdot 1 \cdot 6 \\ &= 18.85 \text{ m}^2 \text{ Mantelfläche Pfahl 1, Schicht 2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_s &= \pi \cdot D \cdot q_s \cdot t = \pi \cdot 1 \cdot 130 \cdot 6 \\ &= 2450.442 \text{ kN Mantelwiderstand der untersten Schicht}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_b &= \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot D \cdot q_b \cdot 1000 = \frac{\pi}{4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 1000 \\ &= 3141.593 \text{ kN Pfahlfußwiderstand}\end{aligned}$$

$$R_k = R_b + R_s = 3141.593 + 2450.442 = 5592.035 \text{ kN}$$

3.3.2 Entwurf, Pfahlabstände

$$a_{min2} = 3 \cdot D = 3 \cdot 1 = 3 \text{ m Mindestabstand}$$

$$\begin{aligned}
a_{e1} &= \frac{R_k}{\bar{P}_{e1}} = \frac{5592.035}{3067.712} \\
&= 1.823 \text{ m maximaler theoretischer Pfahlabstand} \\
N_{e1} &= \frac{a_{min2}}{a_{e1}} = \frac{3}{1.823} \\
&= 1.646 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 1} \\
a_{e2} &= \frac{R_k}{\bar{P}_{e2}} = \frac{5592.035}{2120.519} = 2.637 \\
N_{e2} &= \frac{a_{min2}}{a_{e2}} = \frac{3}{2.637} \\
&= 1.138 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 1} \\
a_{e3} &= \frac{R_k}{\bar{P}_{e3}} = \frac{5592.035}{809.394} = 6.909 \\
N_{e3} &= \frac{a_{min2}}{a_{e3}} = \frac{3}{6.909} \\
&= 0.434 \quad \text{Mindestanzahl der realen Pfahlreihen für Ersatzpfahlreihe 1}
\end{aligned}$$

Festlegung des endgültigen Systems: je 2 Pfahlreihen P_{e1} und P_{e2} , eine Reihe für P_{e3} .

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 3 \text{ m}$$

$$a_5 = 6 \text{ m}$$