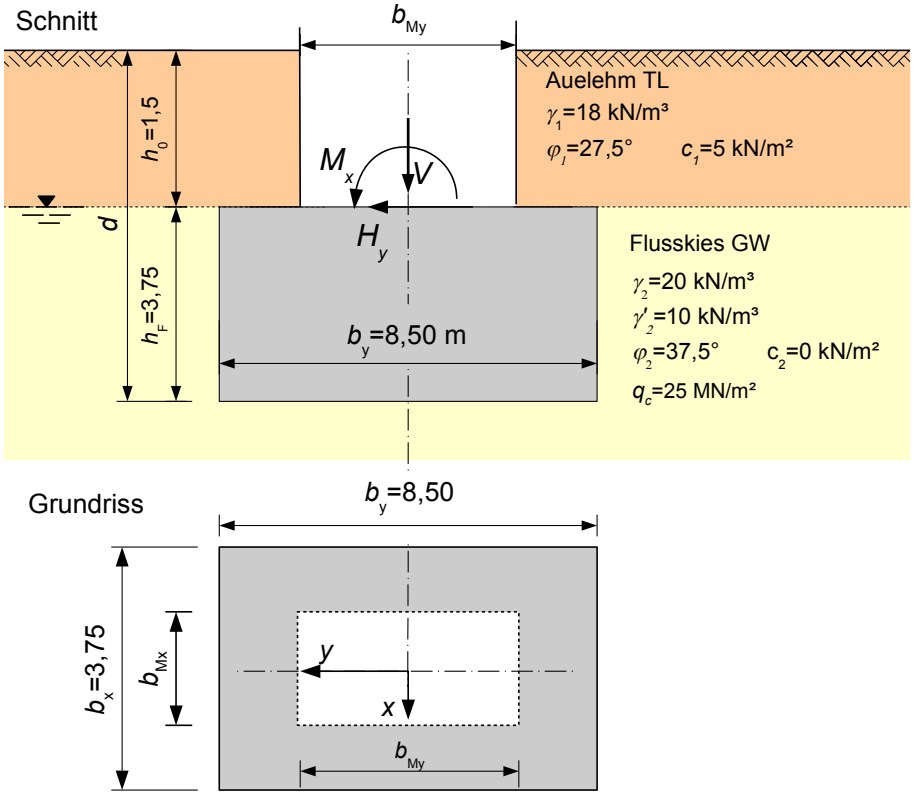
Unbewehrtes Einzelfundament - Straßenbrücke Achse 80, Teil 1

Grundlagen, Aufgabenstellung

Als Ergebnis der Vorbemessung sind die Abmessungen des Einzelfundaments für die Gründung eines Brückenpfeilers festgelegt worden. Im Zuge der Tragwerksplanung sind alle rechnerischen Nachweise zu führen. Dies umfasst die Nachweise des Grenzzustands der Tragfähigkeit ULS und des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit SLS. Die Verkehrslast ist als veränderliche Einwirkung anzusetzen. Es wird die veränderliche Vertikalkraft als Leiteinwirkung angesetzt und auf eine Variation verzichtet. Für die Nachweise sind folgende Schritte abzuarbeiten:

1. Berechnung der Einwirkungen und Beanspruchungen.
2. Nachweis des Sohlwiderstands.
3. Grundbruchnachweis.
4. Gleitsicherheitsnachweis.
5. Kippsicherheitsnachweis.



Belastung, Geometrie

V_G = 23880 kN ständige Last
V_Q = 4630 kN veränderliche Last aus Lastmodell 1
$H_{y,Q}$ = 956.8 kN veränderliche Horizontalkräfte
$M_{x,Q}$ = 11679.6 kNm Moment infolge veränderlicher Lasten
b_{Mx} = 1.75; b_{My} = 4 m Stützenquerschnitt
$\gamma_{Beton,k}$ = 24 kN/m^3 Wichte des Betons C25
γ_w = 10 kN/m^3 Wichte von Wasser
b_x = 3.75; b_y = 8.5 m Grundfläche des unbewehrten Fundaments
h_F = 3.75 m Fundamentdicke
d = 5.25 m Einbindetiefe

Baugrund

Schicht 1: Auelehm (TL)

$\gamma_1 = 18\,\mathrm{kN/m^3}$

Schicht 2: Flusskies (GW)

$\gamma_2 = 10\,\mathrm{kN/m^3}$

$\varphi_2 = 37.5\,^\circ$

$c_2 = 0\,\mathrm{kN/m^2}$

$\sigma_{R,d} = 980\,\mathrm{kN/m^2}$ Bemessungswert des Sohlwiderstands

1 Berechnung der Einwirkungen und Beanspruchungen

1.1 Festlegung der Leiteinwirkung

$\psi_0 = 0.8$ Kombinationsbeiwert

Die Leitenwirkung wird hier jeweils als die Einwirkung in Richtung des betrachteten Widerstands gewählt. Beim Grundbruchnachweis ist die Leiteinwirkung die Vertikalkraft V_Q, beim Gleitwiderstand die Horizonatlkraft $H_{y,Q}$ und beim Kippnachweis das Moment $M_{x,Q}$. Auf die genaue Untersuchung der ungünstigsten Kombination wurde verzichtet.

1.2 Eigengewicht, Erdauflast

$$\begin{aligned} G_F &= (\gamma_{Beton,k} - \gamma_w) \cdot b_x \cdot b_y \cdot h_F = (24-10) \cdot 3.75 \cdot 8.5 \cdot 3.75 \\ &= 1673.438\,\mathrm{kN} \text{ Eigengewicht Fundament unter Auftrieb} \\ G_E &= \gamma_1 \cdot (b_x \cdot b_y - b_{Mx} \cdot b_{My}) \cdot (d - h_F) \\ &= 18 \cdot (3.75 \cdot 8.5 - 1.75 \cdot 4) \cdot (5.25 - 3.75) \\ &= 671.625\,\mathrm{kN} \text{ Erdauflast} \end{aligned}$$

2 Nachweis des Sohlwiderstands

2.1 Anfangsangaben

Der Nachweis wird für die Bemessungssituation BS-P geführt und gehört zur Gruppe GEO-2/STR.

$\gamma_G = 1.35$ Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen

$\gamma_Q = 1.5$ Beanspruchungen aus veänderlichen Einwirkungen

2.2 charakteristische Beanspruchung der Sohle (bezogen auf Fundaementmitte

$$\begin{aligned} V_{GQ,k} &= V_G + G_F + G_E + V_Q = 23880 + 1673.438 + 671.625 + 4630 \\ &= 30855.063\,\mathrm{kN} \\ V_{Q,k} &= V_Q = 4630\,\mathrm{kN} \text{ Leiteinwirkung} \\ H_{y,Q,k} &= H_{y,Q,rep} = H_{y,Q} \cdot \psi_0 = 956.8 \cdot 0.8 \\ &= 765.44\,\mathrm{kN} \text{ repräsentativer Wert der veränderliche Last aus Wind} \\ M_{x,Q,rep} &= M_{x,Q} \cdot \psi_0 = 11679.6 \cdot 0.8 = 9343.68\,\mathrm{kNm} \\ M_{x,GQ,k} &= M_{x,Q,rep} + H_{y,Q,rep} \cdot h_F = 9343.68 + 765.44 \cdot 3.75 \\ &= 12214.08\,\mathrm{kNm} \\ e_y &= \frac{M_{x,GQ,k}}{V_{GQ,k}} = \frac{12214.08}{30855.063} = 0.396\,\mathrm{m} \end{aligned}$$

Berechnung der Sohlspannung für den Sohlwiderstandsnachweis mit der wirksamen Fläche!

$b'_x = b_x = 3.75\,\mathrm{m}$ wirksame Breite

$$b'_y = b_y - 2 \cdot e_y = 8.5 - 2 \cdot 0.396 = 7.708\,\text{m} \text{ wirksame Länge}$$

$$\sigma_{e,d} = \frac{(V_G + G_F + G_E) \cdot \gamma_G + V_Q \cdot \gamma_Q}{b'_x \cdot b'_y} = \frac{(23880 + 1673.438 + 671.625) \cdot 1.35 + 4630 \cdot 1.5}{3.75 \cdot 7.708}$$

$$= 1465.048\,\text{kN/m}^2 \text{ Bemessungswert der Beanspruchung}$$

2.3 Sohlwiderstand

Bemessungswert des Sohlwiderstands muss um 40 % reduziert werden, da Grundwasser in Höhe der Sohle
außerdem Abminderung wegen Lastneigung

$$\sigma_{R,d2} = \sigma_{R,d} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{H_{y,Q,k}}{V_{GQ,k}}\right) = 980 \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{765.44}{30855.063}\right)$$

$$= 573.413\,\text{kN/m}^2$$

Erhöhung um 50% da Boden hoher Festigkeit gemäß Tab. 3.6 ansteht

$$\sigma_{R,d} = \sigma_{R,d2} \cdot 1.5 = 573.413 \cdot 1.5 = 860.12\,\text{kN/m}^2$$

2.4 Nachweis

darf geführt werden wenn $T_k/N_k < 0,2$

$$\kappa_T = \frac{H_{y,Q,k}}{V_{GQ,k}} = \frac{765.44}{30855.063} = 0.025 \qquad \text{Bedingung wird nicht erfüllt}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{e,d}}{\sigma_{R,d2}} = \frac{1465.048}{573.413}$$

$$= 2.555 \qquad \text{Nachweis ebenfalls nicht erfüllt}$$

Der Nachweis des Sohlwiderstands ist nicht erfüllt. Es müssen alle Nachweise der Grenzzustände ULS und SLS geführt werden.

3 Grundbruchnachweis

3.1 Anfangsangaben

Der Nachweis wird für die Bemessungssituation BS-P geführt und gehört zur Gruppe GEO-2/STR.

$\gamma_G = 1.35$ Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen

$\gamma_Q = 1.5$ Beanspruchungen aus veänderlichen Einwirkungen

$\gamma_{R,v} = 1.4$ Grundbruchwiderstand

3.2 Beanspruchung

3.2.1 Einwirkung – Reaktion an der Stirnseite B_k (nur bei Grundbruch)

Ansatz einer Bodenreaktion an der Stirnseite, Erddruckbeiwert nach Sokolovski/Pregl

$\delta_{p2} = 0\,^\circ$ passiver Erddruckneigungswinkel

Es darf eine Reaktionskraft B_k an der Stirnseite berücksichtigt werden, die höchstens die Größe der charakteristischen Beanspruchungen bzw. 50% des mit $\delta_p = 0$ ermittelten passiven Erddrucks betragen darf.

$$K_{pgh} = KpghP\left[0; 0; \delta^\circ_{p2}; \varphi^\circ_2\right] = KpghP\left[0; 0; 0^\circ; 37.5^\circ\right] = 4.112$$

$$B_{k,y1} = 0.5 \cdot E_{phy} = 0.5 \cdot 1084.211$$

$$= 542.105\,\text{kN} \text{ horizontale Reaktionskraft in y-Richtung}$$

$$B_{k,y2} = H_{y,Q,k} = 765.44\,\text{kN} \text{ Summe der Einwirkungen}$$

$$B_{k,y} = \begin{cases} B_{k,y1} & : \quad B_{k,y1} < B_{k,y2} \\ B_{k,y2} & : \quad sonst \end{cases} = \begin{cases} 542.105 & : \quad 542.105 < 765.44 \\ 765.44 & : \quad sonst \end{cases}$$

$$= 542.105\,\text{kN} \text{ kleinerer Wert maßgebend}$$

$$
\begin{aligned}
z_{h,Bk} &= \frac{2 \cdot e_{pgho} + e_{pghu}}{3 \cdot (e_{pgho} + e_{pghu})} \cdot h_F = \frac{2 \cdot 0 + 154.199}{3 \cdot (0 + 154.199)} \cdot 3.75 \\
&= 1.25\,\text{m Hebelarm von } B_k \\
V_{Q,k} &= V_Q = 4630\,\text{kN Leiteinwirkung} \\
V_{GQ,k} &= V_G + G_F + G_E + V_{Q,k} = 23880 + 1673.438 + 671.625 + 4630 \\
&= 30855.063\,\text{kN} \\
H_{y,Q,k} &= H_{y,Q,rep} = H_{y,Q} \cdot \psi_0 = 956.8 \cdot 0.8 \\
&= 765.44\,\text{kN repräsentativer Wert der veränderliche Last aus Wind} \\
M_{x,Q,rep} &= M_{x,Q} \cdot \psi_0 = 11679.6 \cdot 0.8 = 9343.68\,\text{kNm} \\
M_{x,GQ,k} &= M_{x,Q,rep} + H_{y,Q,rep} \cdot h_F = 9343.68 + 765.44 \cdot 3.75 \\
&= 12214.08\,\text{kNm} \\
M_{x2} &= M_{x,GQ,k} - B_{k,y} \cdot z_{h,Bk} = 12214.08 - 542.105 \cdot 1.25 \\
&= 11536.448\,\text{kNm} \\
e_{y2} &= \frac{M_{x2}}{V_{GQ,k}} = \frac{11536.448}{30855.063} = 0.374\,\text{m (Außermitte)} \\
b'_{y2} &= b_y - 2 \cdot e_{y2} = 8.5 - 2 \cdot 0.374 = 7.752\,\text{m wirskame Länge} \\
H_k &= H_{y,Q,k} - B_{k,y} = 765.44 - 542.105 \\
&= 223.335\,\text{kN tangentiale Beanspruchung in der Sohle}
\end{aligned}
$$

3.3 Grundbruchwiderstand

$$
\begin{aligned}
b' &= b_x = 3.75\,\text{m wirksame Breite} \\
a' &= b'_{y2} = 7.752\,\text{m wirksame Länge} \\
R_{N,k} &= a' \cdot b' \cdot (\gamma_2 \cdot d \cdot N_{d0} \cdot \nu_d \cdot i_d + \gamma_2 \cdot b' \cdot N_{b0} \cdot \nu_b \cdot i_b) \\
&= 7.752 \cdot 3.75 \cdot (10 \cdot 5.25 \cdot 45.811 \cdot 1.294 \cdot 0.99 + 10 \cdot 3.75 \cdot 34.385 \cdot 0.855 \cdot 0.983) \\
&= 121147.877\,\text{kN}
\end{aligned}
$$

3.4 Nachweis

$$
\begin{aligned}
R_{N,d} &= \frac{R_{N,k}}{\gamma_{R,v}} = \frac{121147.877}{1.4} = 86534.198\,\text{kN} \\
V_d &= (V_G + G_E + G_F) \cdot \gamma_G + V_Q \cdot \gamma_Q \\
&= (23880 + 671.625 + 1673.438) \cdot 1.35 + 4630 \cdot 1.5 \\
&= 42348.834\ \text{kN Bemessungswert der Normalkraft in der Sohlfläche} \\
\mu_V &= \frac{V_d}{R_{N,d}} = \frac{42348.834}{86534.198} = 0.489
\end{aligned}
$$

4 Gleitsicherheit

4.1 Anfangsangaben

$$
\delta_{S,k} = \frac{2}{3} \cdot \varphi_2 = \frac{2}{3} \cdot 37.5 = 25\,^\circ \text{ Sohlreibung}
$$

Der Nachweis wird für die Bemessungssituation BS-P geführt.

$$
\begin{aligned}
\gamma_G &= 1.35 && \text{Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen} \\
\gamma_Q &= 1.5 && \text{Beanspruchungen aus veänderlichen Einwirkungen} \\
\gamma_{R,h} &= 1.1 && \text{Teilsicherheitsbeiwert Gleitwiderstand} \\
\gamma_{R,e} &= 1.4 && \text{Teilsicherheitsbeiwert passiver Erddruck}
\end{aligned}
$$

4.2 Beanspruchung

$$
V_{Q,k} = V_Q \cdot \psi_0 = 4630 \cdot 0.8
$$

$$
\begin{aligned}
&= 3704\,\text{kN repräsentativer Wert der veränderliche Last}\\
V_{GQ,k} &= V_G + G_F + G_E + V_{Q,k} = 23880 + 1673.438 + 671.625 + 3704\\
&= 29929.063\,\text{kN}\\
H_{y,Q,k} &= H_{y,Q} = 956.8\,\text{kN Leiteinwirkung}\\
M_{x,Q,rep} &= M_{x,Q} \cdot \psi_0 = 11679.6 \cdot 0.8 = 9343.68\,\text{kNm}\\
M_{x,GQ,k} &= M_{x,Q,rep} + H_{y,Q,k} \cdot h_F = 9343.68 + 956.8 \cdot 3.75\\
&= 12931.68\,\text{kNm}\\
e_y &= \frac{M_{x,GQ,k}}{V_{GQ,k}} = \frac{12931.68}{29929.063} = 0.432\,\text{m}
\end{aligned}
$$

4.3 Widerstände

$$
\begin{aligned}
R_{h,k} &= V_{GQ,k} \cdot \tan\delta_{S,k}^{\circ} = 29929.063 \cdot \tan 25^{\circ} = 13956.151\,\text{kN}\\
E_{phy,k} &= E_{phy} = 1084.211\,\text{kN}
\end{aligned}
$$

4.4 Nachweis

$$
\begin{aligned}
H_{y,d} &= H_{y,Q,k} \cdot \gamma_Q = 956.8 \cdot 1.5\\
&= 1435.2\,\text{kN Bemessungswert der Beanspruchung}\\
R_{h,d} &= \frac{R_{h,k}}{\gamma_{R,h}} = \frac{13956.151}{1.1}\\
&= 12687.41\,\text{kN Bemessungswert des Sohlwiderstands}\\
E_{ph,d} &= \frac{E_{phy,k}}{\gamma_{R,e}} = \frac{1084.211}{1.4}\\
&= 774.436\,\text{kN Bemessungswert des Erdwiderstands}\\
\mu_H &= \frac{H_{y,d}}{R_{h,d} + E_{ph,d}} = \frac{1435.2}{12687.41 + 774.436} = 0.107 \qquad \text{Ausnutzungsgrad}
\end{aligned}
$$

5 Kippsicherheit

5.1 Anfangsangaben

Der Nachweis gegen Gleichgewichtsverlust gehört zur Gruppe EQU.

$$
\begin{aligned}
\gamma_{G,dst} &= 1.1 \qquad \text{ständige, ungünstige destabilisierende Einwirkungen}\\
\gamma_{G,stb} &= 0.9 \qquad \text{günstige wirkende ständige Einwirkungen}
\end{aligned}
$$

5.2 Beanspruchungen, charakteristische Werte

$$
\begin{aligned}
V_{Q,k} &= V_{Q,rep} = V_Q \cdot \psi_0 = 4630 \cdot 0.8\\
&= 3704\,\text{kN repräsentativer Wert}\\
V_{GQ,k} &= V_G + G_F + G_E + V_{Q,k} = 23880 + 1673.438 + 671.625 + 3704\\
&= 29929.063\,\text{kN}\\
H_{y,Q,k} &= H_{y,Q,rep} = H_{y,Q} \cdot \psi_0 = 956.8 \cdot 0.8\\
&= 765.44\,\text{kN repräsentativer Wert der veränderliche Last}\\
M_{x,Q,k} &= M_{x,Q} = 11679.6\,\text{kNm Leiteinwirkung}\\
M_{x,GQ,k} &= M_{x,Q,rep} + H_{y,Q,rep} \cdot h_F = 9343.68 + 765.44 \cdot 3.75\\
&= 12214.08\,\text{kNm}\\
e_{y3} &= \frac{M_{x,GQ,k}}{V_{GQ,k}} = \frac{12214.08}{29929.063} = 0.408\,\text{m Ausmitte}\\
M_{dst,k} &= M_{x,GQ,k} = 12214.08\,\text{kNm}\\
M_{stb,k} &= \frac{V_{GQ,k} \cdot b_y}{2} = \frac{29929.063 \cdot 8.5}{2} = 127198.516\,\text{kNm}
\end{aligned}
$$

5.3 Nachweis

$$
\begin{aligned}
M_{dst,d} &= \gamma_{G,dst} \cdot M_{dst,k} = 1.1 \cdot 12214.08 = 13435.488\,\text{kNm} \\
M_{stb,d} &= \gamma_{G,stb} \cdot M_{stb,k} = 0.9 \cdot 127198.516 = 114478.664\,\text{kNm} \\
\mu_M &= \frac{M_{dst,d}}{M_{stb,d}} = \frac{13435.488}{114478.664} = 0.117
\end{aligned}
$$

Die Kippsicherheit ist nachgewisen, wenn infolge der Belastung durch ständige und veränderliche Einwirkungen die Sohle höchstens bis zum Schwerpunkt klafft. Es müssen außerdem die Grundbruch- und Gleitsicherheitsnachweise erfüllt sein. Die ungünstigste Lastkombination ist zu verwenden. Der Nachweis ist bei Rechteckfundamenten erbracht, wenn die Resultierende in der 2. Kernweite liegt (Ausmitte $< b/3$).

$$
\frac{e_{y3}}{b_y} < \frac{1}{3} = \frac{0.408}{8.5} < \frac{1}{3} = 1
$$