

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**VYUŽITÍ FRP VÝZTUŽE PŘI NÁVRHU
BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ**

APPLICATION OF FRP REINFORCEMENT IN THE DESIGN OF CONCRETE
STRUCTURES

P1.1 STATICKÝ VÝPOČET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Kratochvílová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK GIRGLE, Ph.D.

BRNO 2021

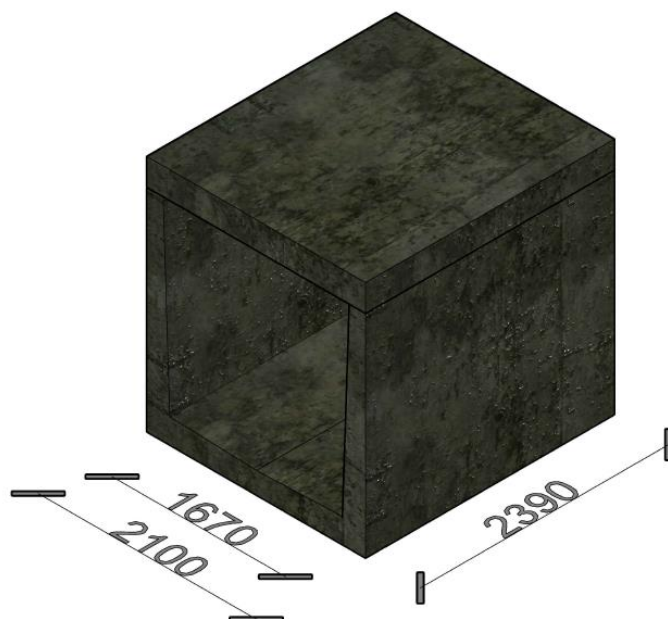
Obsah

1	Model.....	5
2	Geometrie	5
3	Výpočet zemního tlaku na energokanál	6
	3.1 Parametry zeminy	6
	3.2 Vodorovné zatížení stěn.....	6
4	Zatížení	7
	4.1 Součinitelé zatížení	7
	4.2 Proměnné zatížení.....	7
	4.3 Zatížení svislé	7
5	Posouzení únosnosti základové spáry	8
	5.1 Stanovení zatížení v základové spáře	8
6	Statické schéma	10
	6.1 Statické schéma 1.....	10
	6.2 Statické schéma 2.....	10
	OCELOVÁ VÝZTUŽ.....	11
7	Zatěžovací stavy	11
	7.1 ZS1 – Stojka.....	11
	7.2 ZS2 – Vlastní tíha od zákrytové desky	11
	7.3 ZS3 – Ostatní stálé – zemina	12
	7.4 ZS4 – Ostatní stálé – zemní tlak	12
	7.5 ZS5 – Nahodilé – přetížení od povrchu.....	12
	7.6 ZS6 Nahodilé – Tlak od přetížení povrchu	13
8	Kombinace zatěžovacích stavů	13
	8.1 Vnitřní síly na prutech – kombinace MSÚ	14
9	Dimenzování	16
10	Krytí výztuže	16
11	Kritické řezy, v nichž bude výztuž navržena	17
12	Návrh hlavní výztuže v průřezu 1	17
	12.1 Účinná výška průřezu pro odhadnutou výztuž $\phi 16$ mm	17
	12.2 Návrh výztuže	17
	12.3 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\phi 14$ mm.....	17
	12.4 Poloha neutrální osy.....	17
	12.5 Ověření výztuže nad mezí kluzu.....	17
	12.6 Rameno vnitřních sil	18

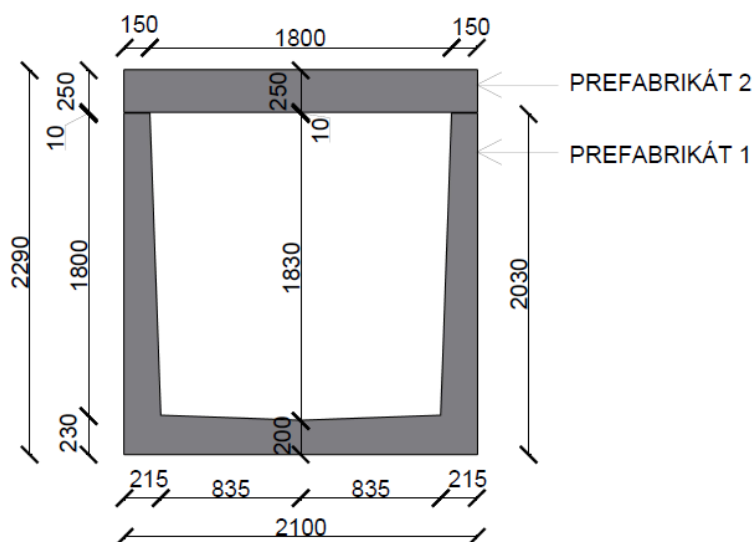
	12.7 Únosnost	18
	12.8 Smyk	18
13	Návrh hlavní výztuže v průřezu 2	19
	13.1 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\varnothing 14$ mm.....	19
	13.2 Poloha neutrální osy	19
	13.3 Ověření výztuže nad mezí kluzu.....	19
	13.4 Rameno vnitřních sil	19
	13.5 Únosnost	19
	13.6 Smyk	19
14	Návrh hlavní výztuže v průřezu 3	20
	14.1 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\varnothing 14$ mm.....	20
	14.2 Poloha neutrální osy	21
	14.3 Ověření výztuže nad mezí kluzu.....	21
	14.4 Rameno vnitřních sil	21
	14.5 Únosnost	21
	14.6 Smyk	21
15	Posouzení a ověření konstrukčních zásad pro navrženou hlavní výztuž	21
	15.1 Posouzení konstrukčních zásad.....	21
	15.2 Ověření konstrukčních zásad	22
16	Výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru	22
	16.1 Kotvení.....	22
17	Příčná rozdělovací výztuž	22
	17.1 Ověření konstrukčních zásad	23
18	Kotvení u horního povrchu.....	23
19	Montážní úchyt.....	24
20	Zatížení prvku s FRP výztuží	26
21	Zatěžovací stavy	26
	21.1 ZS1 – Stojka.....	26
	21.2 ZS2 – Vlastní tíha od zákrytové desky	27
	21.3 ZS3 – Ostatní stálé – zemina	27
	21.4 ZS4 – Ostatní stálé – zemní tlak	27
	21.5 ZS5 – Nahodilé – přetížení od povrchu.....	28
	21.6 ZS6 – Nahodilé – Tlak od přetížení.....	28
22	Vnitřní síly na prutech – kombinace MSÚ.....	28

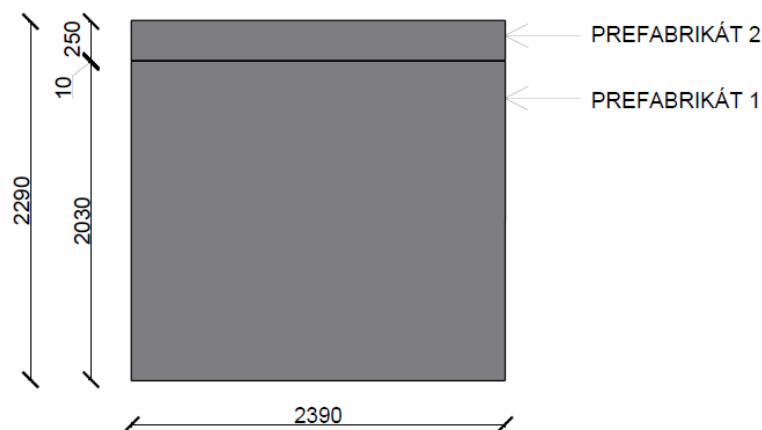
	22.1 Ohybové momenty M_y	28
	22.2 Posouvající síly V_z	29
	22.3 Normálové síly N	29
23	Dimenzování	29
24	Průřez 1.....	30
	24.1 Krátkodobá únosnost při ohybu	30
	24.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu	32
	24.3 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu	35
25	Průřez 2.....	36
	25.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu	37
26	Průřez 3.....	39
	26.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu	40
27	Výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru	42
	27.1 Posouzení konstrukčních zásad.....	42
	27.2 Kotvení.....	42
28	Příčná rozdělovací výztuž	43
	28.1 Ověření konstrukčních zásad	43
29	Kotvení u horního povrchu.....	43

1 Model



2 Geometrie





3 Výpočet zemního tlaku na energokanál

3.1 Parametry zeminy

F5	...třída zeminy
$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$...objemová tíha zeminy
$\nu = 0,40$...poissonovo číslo
$h = 4,0 \text{ m}$	
$h_1 = 3,885 \text{ m}$	
$h_2 = 1,960 \text{ m}$	
$h_3 = 1,710 \text{ m}$	
$h_z = 1,925 \text{ m}$	
$K_r = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{0,40}{1-0,40} = \frac{2}{3}$...součinitel zemního tlaku v klidu
$\sigma_z = \gamma \cdot z$...geostatické napětí v hloubce z
$\sigma_r = \sigma_z \cdot K_r$...zemní tlak v klidu

3.2 Vodorovné zatížení stěn

3.2.1.1 Zemním tlakem

$$\sigma_h = 4,0 \cdot 20 \cdot \frac{2}{3} = 53,33 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{h1} = 3,885 \cdot 20 \cdot \frac{2}{3} = 51,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{h2} = 1,960 \cdot 20 \cdot \frac{2}{3} = 26,13 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{hz} = 1,925 \cdot 20 \cdot \frac{2}{3} = 25,67 \text{ kN/m}^2$$

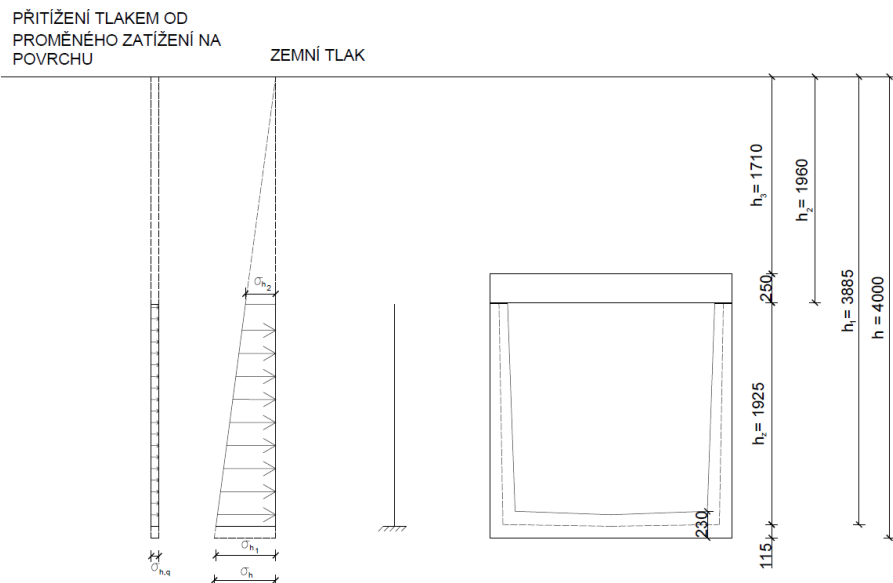
3.2.1.2 Přetížení tlakem od proměnného zatížení na povrchu

$$\sigma_{h,q} = q \cdot K_r$$

$$\sigma_{h,q} = 5 \cdot \frac{2}{3} = 3,33 \text{ kN/m}^2$$

3.2.2 Svislé zatížení poklopu

$$\sigma_v = 1,710 \cdot 20 = 34,2 \text{ kN/m}^2$$



4 Zatížení

Všechna zatížení jsou stanovena v charakteristické hodnotě

4.1 Součinitelé zatížení

$$\gamma_F = 1,35$$

...pro vlastní tíhu, zatížení zeminou

$$\gamma_{Fq} = 1,5$$

...pro proměnné zatížení na povrchu terénu
a zatížení dna kolektoru

4.2 Proměnné zatížení

$$q_k = 5 \text{ kN/m}^2$$

...užitné zatížení: Kategorie G

$$1 \text{ m}$$

...zatěžovací šířka

4.3 Zatížení svislé

4.3.1 Zatížení stropu

	Rozměr (m)	Objemová tíha (KN/m ³)	Zatížení (KN/m)
<u>Vlastní tíha</u>	0,25x1,0	25	6,25
<u>Ostatní stálé</u>			
Násyp zeminy	1,710x1	20	34,2
<u>Nahodilé</u>			
Proměnné spojitě na povrchu	2,1	5	10,5

4.3.2 Zatížení stěn

	Rozměr (m)	Objemová tíha (KN/m ³)	Zatížení (KN/m)
<u>Vlastní tíha</u> <u>G_d</u>	0,15x1,81x1,0+((0,065x1,81)/2)x1,0	25	8,25

Napětí v zemině od stěn

$$\sigma_z = 2 \cdot \frac{G_d}{l_a} = 2 \cdot \frac{8,25}{1,885} = 8,76 \text{ kN/m}^2$$

4.3.3 Zatížení dna

	Rozměr (m)	Objemová tíha (zatížení)	Zatížení (KN/m)
<u>Vlastní tíha</u>	((0,215x0,230)+(0,835x0,2)+ ((0,03x0,835)/2))x2	25	11,45
<u>Ostatní stálé</u> Technologie	1,67	1	1,67
<u>Nahodilé</u>			
Technologie	1,67	3	5,010

5 Posouzení únosnosti základové spáry

Zatížení energokanálu se roznáší v základové spáře rovnoměrně.

5.1 Stanovení zatížení v základové spáře

Vlastní tíha	(6,25+8,25*2+11,45)=34,2 kN/m
Ostatní stálé zásyp	34,20 kN/m
Ostatní stálé technologie	1,67 kN/m
Proměnné na povrchu	10,5 kN/m
Technologie	5,01 kN/m

Kombinace 6.10a

$$1) (34,2+34,20+1,67)*1,35+10,5*0,7*1,5+5,01*1,0*1,5= 112,66 \text{ kN}$$

Kombinace 6.10 b

$$1) (34,2+34,20+1,67)*0,85*1,35+10,5*1,5+5,01*1,0*1,5= 97,83 \text{ kN}$$

$$2) (34,2+34,20+1,67)*0,85*1,35+10,5*0,7*1,5+5,01*1,5= 78,10 \text{ kN}$$

Rozhodující je kombinace 6.10a, u nichž vychází největší zatížení.
Pro tuto kombinaci stanovím napětí v základové spáře.

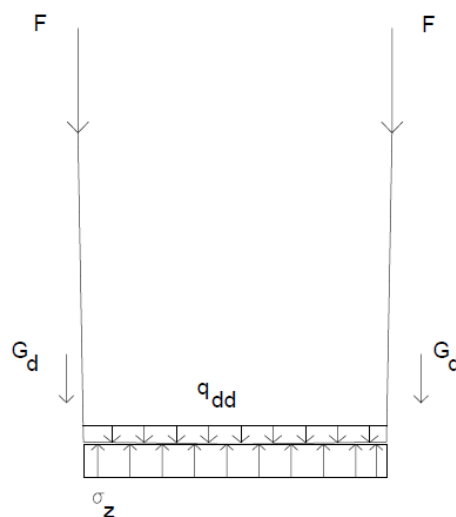
$$\sigma_z = 112,66/2,1 = 53,65 \text{ kPa}$$

Únosnost v základové spáře pro zeminy třídy F5 v konzistenci tuhá
dle ČSN 73 1004 je 150 kPa

$$\sigma_z \leq R_d$$

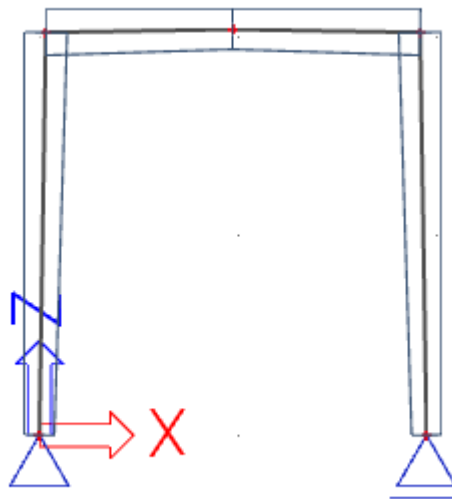
$$56,65 \text{ kPa} \leq 150 \text{ kPa} \quad \dots \text{Vyhovuje}$$

Předpoklad tuhého tělesa, tím rovnoměrné rozdělení napětí.



6 Statické schéma

6.1 Statické schéma 1



6.2 Statické schéma 2

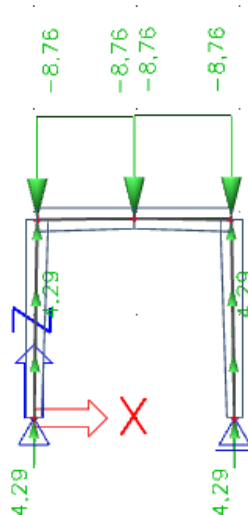


Reakce ze statického schématu 2, působí ve statickém schématu 1

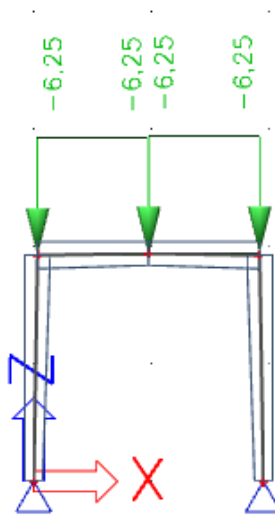
OCELOVÁ VÝZTUŽ

7 Zatěžovací stavy

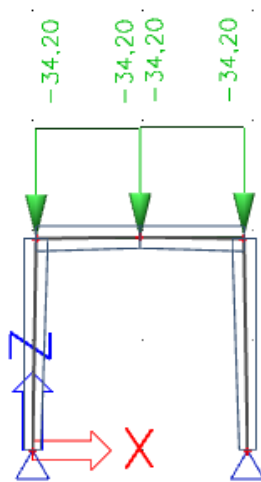
7.1 ZS1 – Stojka



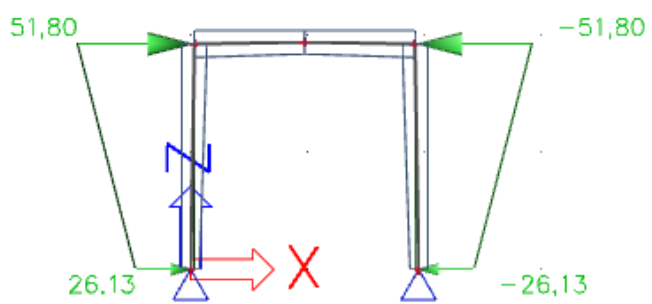
7.2 ZS2 – Vlastní tíha od zákrytové desky



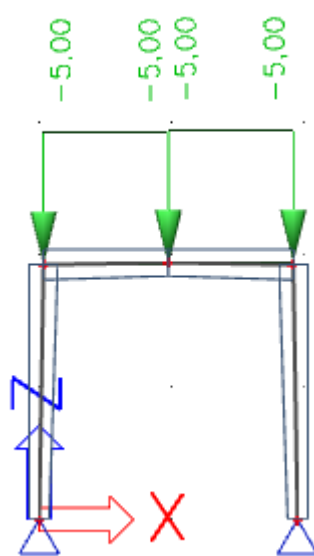
7.3 ZS3 – Ostatní stálé – zemina



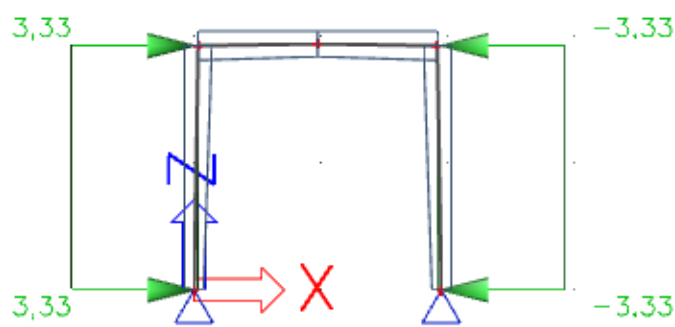
7.4 ZS4 – Ostatní stálé – zemní tlak



7.5 ZS5 – Nahodilé – přetížení od povrchu



7.6 ZS6 Nahodilé – Tlak od přetížení povrchu



8 Kombinace zatěžovacích stavů

Do stanovení vnitřních sil nevstupuje rovnoměrné spojitě zatížení od technologii a vlastní tíhy dna.

Rovnice 6.10a

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Rovnice 6.10b

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Člen $\gamma_P P$ z rovnice vypadne, z důvodu, že zde není navrženo předpětí

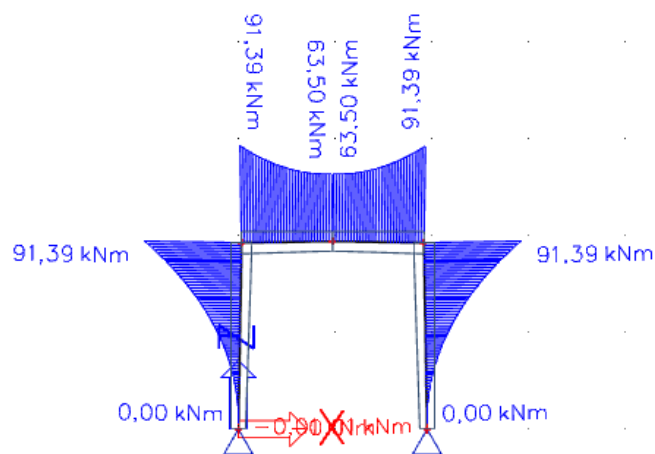
8.1 Vnitřní síly na prutech – kombinace MSÚ

1. Kombinace

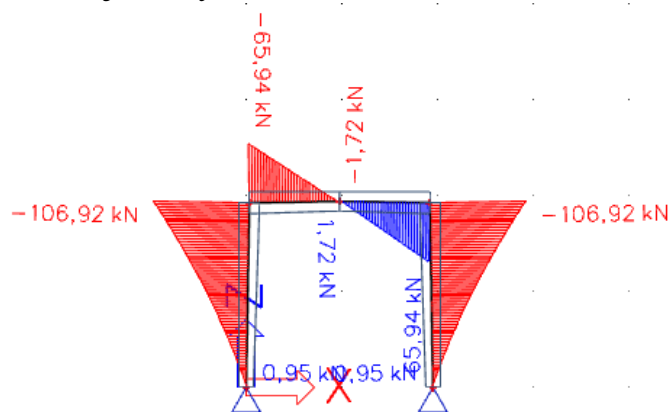
Jméno	Popis	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
MSÚ-Sada B (auto)		EN-MSÚ (STR/GEO) Soubor 5	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSÚ-Sada B (auto)1		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak	1,35 1,35 1,35 1,35
MSÚ-Sada B (auto)2		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak	1,00 1,00 1,00 1,00
MSÚ-Sada B (auto)3		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak	1,15 1,15 1,15 1,15
MSÚ-Sada B (auto)4		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,35 1,35 1,35 1,35 1,05 1,05
MSÚ-Sada B (auto)5		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,00 1,00 1,00 1,00 1,05 1,05
MSÚ-Sada B (auto)6		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,15 1,15 1,15 1,15 1,50 1,50
MSÚ-Sada B (auto)7		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,00 1,00 1,00 1,00 1,50 1,50
MSÚ-Sada B (auto)8		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,35 1,35 1,35 1,35 1,05 1,05
MSÚ-Sada B (auto)9		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu ZS6 - Nahodilé - Tlak od přitížení na povrchu	1,00 1,00 1,00 1,00 1,05 1,05
MSÚ-Sada B (auto)10		Obálka - únosnost	ZS1 - Stojky ZS2 - Vlastní tíha deska ZS3 - Ostatní stálé zemina ZS4 - Ostatní stálé zemní tlak ZS5 - Nahodilé - přitížení na povrchu	1,15 1,15 1,15 1,15 1,05

Jméno	Popis	Typ	Zatěžovací stavy	Souč.
			796 - Nahodilé - Tlak od přetížení na povrchu	[-]
				1,05

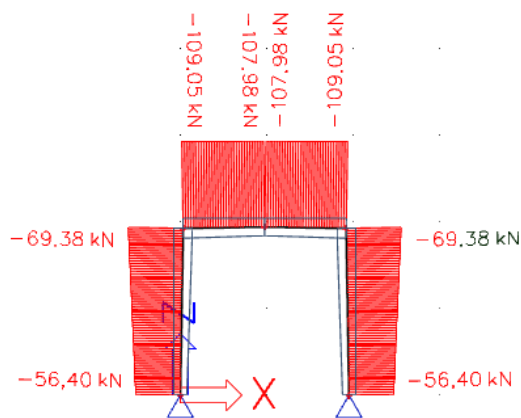
8.1.1 Ohybové momenty M_y



8.1.2 Posouvající síly V_z



8.1.3 Normálové síly N



9 Dimenzování

Beton: C30/37

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk; 0,05} = 1,8 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$$

Ocel: B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,783 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,783}{200 \cdot 10^3} = 2,174 \text{ ‰}$$

Stupeň vlivu prostředí: XC2

Třída konstrukce: S4

10 Krytí výztuže

Odhaduji hlavní nosnou výztuž: $\varnothing 16 \text{ mm}$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\text{mm}\}$$

$$c_{min,b} = 16 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,st} = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$$

$$c_{min} = \max\{16, 25, 10\text{mm}\}$$

$$c_{min} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm} \quad \dots \text{zvoleno z důvodu prefabrikátu}$$

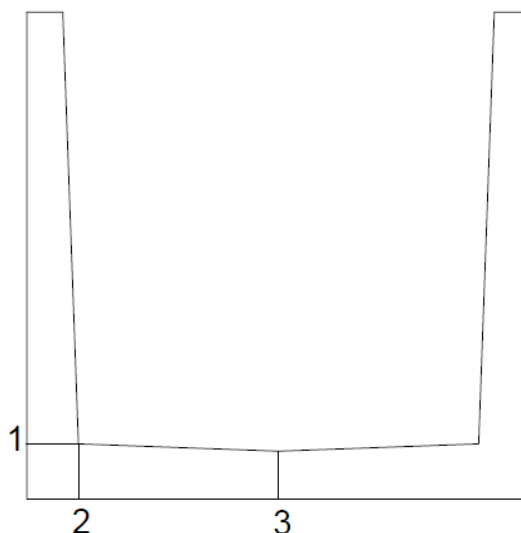
$$c_{nom} = 25 + 5 = 30 \text{ mm}$$

$$c \geq c_{\text{nom}}$$

$$30 \text{ mm} \geq 30 \text{ mm}$$

11 Kritické řezy, v nichž bude výztuž navržena

Místa řezů platí, jak při návrhu ocelové výztuže, tak i kompozitní.



12 Návrh hlavní výztuže v průřezu 1

12.1 Účinná výška průřezu pro odhadnutou výztuž $\varnothing 16 \text{ mm}$

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 30 - \frac{16}{2} = 177 \text{ mm}$$

12.2 Návrh výztuže

$$A_{s,\text{req}} = b \cdot d \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{ED}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right)$$

$$A_{s,\text{req}} = 1 \cdot 0,177 \frac{20}{434,783} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 91,39}{1 \cdot 0,177^2 \cdot 20 \cdot 10^3}} \right) = 12,90 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Použiji výztuž $\varnothing 14 \text{ mm}$ po 100 mm $A_s = 15,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

12.3 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\varnothing 14 \text{ mm}$

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 30 - \frac{14}{2} = 168 \text{ mm} = 0,168 \text{ m}$$

12.4 Poloha neutrální osy

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_{\text{eff}} \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783}{1 \cdot 0,8 \cdot 20} = 0,042 \text{ m}$$

12.5 Ověření výztuže nad mezí kluzu

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot (d - x)$$

$$\varepsilon_s = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,042} \cdot (0,178 - 0,042) = 11,33 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 11,33 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,174 \text{ ‰} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

12.6 Rameno vnitřních sil

$$a_c = \frac{\lambda \cdot x}{2}$$

$$a_c = \frac{0,8 \cdot 0,042}{2} = 0,0168 \text{ m}$$

$$z = d - a_c = 0,178 - 0,0168 = 0,1612 \text{ m}$$

12.7 Únosnost

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783 \cdot 10^3 \cdot 0,1612 = 107,86 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Rd} = 107,86 \text{ kNm/m} \geq M_{Ed} = 91,39 \text{ kNm/m} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

12.8 Smyk

12.8.1 Únosnost bez smykové výztuže

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{178}} = 2,06 \leq 2 \quad \dots \text{NEVYHOVUJE} \Rightarrow k = 2$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_t \cdot d} \leq 0,02$$

$$\rho_l = \frac{15,39 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,178} = 8,65 \cdot 10^{-3} \leq 0,02 \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot c_p \right] \cdot b_w \cdot d$$

$$k_1 \cdot c_p = \text{Vliv normálové síly je zanedbán, konzervativní přístup}$$

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot 1 \cdot 178 = 126,48 \text{ kN/m}$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{\frac{2}{3}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

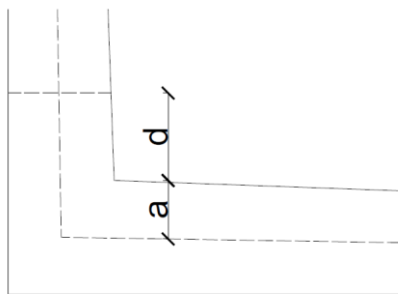
$$\min V_{Rd,c} = v_{\min} \cdot b_w \cdot d$$

$$\min V_{Rd,c} = \left[0,035 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot 30^{\frac{1}{2}} \right] \cdot 1 \cdot 178 = 54,17 \text{ kN/m}$$

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Ed} = 68,43 \text{ kN/m} \quad \dots \text{V místě řezu 1, od podpory}$$

$$126,48 \text{ kN/m} \geq 68,43 \text{ kN/m} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$



13 Návrh hlavní výztuže v průřezu 2

Použiji výztuž $\varnothing 14 \text{ mm}$ po 100 mm $A_s = 15,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

13.1 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\varnothing 14 \text{ mm}$

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 230 - 30 - \frac{14}{2} = 193 \text{ mm} = 0,193 \text{ m}$$

13.2 Poloha neutrální osy

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_{eff} \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783}{1 \cdot 0,8 \cdot 20} = 0,042 \text{ m}$$

13.3 Ověření výztuže nad mezí kluzu

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot (d - x)$$

$$\varepsilon_s = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,042} \cdot (0,193 - 0,042) = 12,58 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 12,58 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,174 \text{ ‰} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

13.4 Rameno vnitřních sil

$$a_c = \frac{\lambda \cdot x}{2}$$

$$a_c = \frac{0,8 \cdot 0,042}{2} = 0,0168 \text{ m}$$

$$z = d - a_c = 0,193 - 0,0168 = 0,1762 \text{ m}$$

13.5 Únosnost

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783 \cdot 10^3 \cdot 0,1762 = 117,90 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Rd} = 117,90 \text{ kNm/m} \geq M_{Ed} = 91,39 \text{ kNm/m} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

13.6 Smyk

13.6.1 Únosnost bez smykové výztuže

$$C_{rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

$$C_{rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{193}} = 2,02 \leq 2 \quad \dots \text{NEVYHOVUJE} \Rightarrow k = 2$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_t \cdot d} \leq 0,02$$

$$\rho_l = \frac{15,39 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,193} = 7,97 \cdot 10^{-3} \leq 0,02 \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Rd,c} = \left[c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot c_p \right] \cdot b_w \cdot d$$

$k_1 \cdot c_p$ = Vliv normálové síly je zanedbán, konzervativní přístup

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 7,97 \cdot 10^{-3} \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot 1 \cdot 193 = 133,44 \text{ kN/m}$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{\frac{2}{3}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

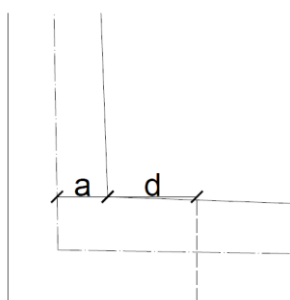
$$\min V_{Rd,c} = v_{\min} \cdot b_w \cdot d$$

$$\min V_{Rd,c} = \left[0,035 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot 30^{\frac{1}{2}} \right] \cdot 1 \cdot 193 = 58,73 \text{ kN/m}$$

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Ed} = 41,76 \text{ kN/m} \quad \dots \text{V místě řezu 2, od podpory}$$

$$133,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \geq 41,76 \text{ kN/m} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$



14 Návrh hlavní výztuže v průřezu 3

Použiji výztuž $\varnothing 14$ mm po 100 mm $A_s = 15,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

14.1 Účinná výška průřezu pro navrženou výztuž $\varnothing 14$ mm

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 200 - 30 - \frac{14}{2} = 163 \text{ mm} = 0,163 \text{ m}$$

14.2 Poloha neutrální osy

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_{eff} \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783}{1 \cdot 0,8 \cdot 20} = 0,042 \text{ m}$$

14.3 Ověření výztuže nad mezí kluzu

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot (d - x)$$

$$\varepsilon_s = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,042} \cdot (0,163 - 0,042) = 10,08 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 10,08 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,174 \text{ ‰} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

14.4 Rameno vnitřních sil

$$a_c = \frac{\lambda \cdot x}{2}$$

$$a_c = \frac{0,8 \cdot 0,042}{2} = 0,0168 \text{ m}$$

$$z = d - a_c = 0,163 - 0,0168 = 0,1462 \text{ m}$$

14.5 Únosnost

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 434,783 \cdot 10^3 \cdot 0,1462 = 97,83 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Rd} = 97,83 \text{ kNm/m} \geq M_{Ed} = 91,39 \text{ kNm/m} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

14.6 Smyk

Z důvodu malé posouvající síly v tomto místě průřezu, zanedbávám výpočet

15 Posouzení a ověření konstrukčních zásad pro navrženou hlavní výztuž

15.1 Posouzení konstrukčních zásad

Volím ji podle konstrukčních zásad normy ČSN EN 1992-1-1.

Pro minimální plochu výztuže $A_{s,min}$ volím to nejnepriznivější kritérium a to je průřez 2, který je největší.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d > 0,0013 \cdot b_t \cdot d$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{2,9}{500} \cdot 1 \cdot 0,193 = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$> 0,0013 \cdot b_t \cdot d = 0,0013 \cdot 1 \cdot 0,193 = 2,51 \cdot 10^{-4}$$

Pro maximální plochu výztuže $A_{s,max}$ volím to nejnepriznivější kritérium a to je průřez 3, který je nejmenší.

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot 1 \cdot 0,200 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max}$$

$$A_{s,min} = 2,46 \cdot 10^{-4} \leq 15,39 \cdot 10^{-4} \leq 80 \cdot 10^{-4} \dots \text{VYHOVUJE}$$

15.2 Ověření konstrukčních zásad

Podle ČSN EN 1992-1-1, NA 2.89, $S_{max,slabs}$ pro hlavní nosnou výztuž:

$$S_{max,slabs} = 2h \leq 300$$

$$S_{max,slabs} = 2 \cdot 200 \leq 300 \Rightarrow 300 \text{ mm}$$

Zvolená výztuž $\varnothing 14$ po 100 mm

$$s \leq s_{max}$$

$$100 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

16 Výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru

$A_{s,min}$ a $A_{s,max}$ volím podle kapitoly 12.

$$A_{s,min} = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{Navrhují výztuž } \varnothing 10 \text{ mm po } 200 \text{ mm}, A_s = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru bude navržena podle konstrukčních zásad bude stejná ve všech posuzovaných řezech.

$$A_{s,max} = 80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max}$$

$$A_{s,min} = 2,46 \cdot 10^{-4} \leq 3,53 \cdot 10^{-4} \leq 80 \cdot 10^{-4}$$

16.1 Kotvení

Podle ČSN EN 1992-1-1, vzhledem k umístění výztuže v tlaku minimální kotevní délku je $10\varnothing$.

$$l_{bd,min} = 10 \cdot \varnothing = 10 \cdot 10 = 100 \text{ mm}$$

Pro výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru $\varnothing 10$ mm po 200 mm, volím kotevní délku 150 mm.

17 Příčná rozdělovací výztuž

Podle ČSN EN 1992-1-1, kapitoly 9.3.1, volím příčnou rozdělovací výztuž o ploše nejméně 20% plochy hlavní nosné výztuže.

$$A_{s,roz} = 0,2 \cdot A_s = 0,2 \cdot 15,39 \cdot 10^{-4} = 3,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Volím výztuž $\varnothing 8$ mm po 150 mm

17.1 Ověření konstrukčních zásad

Podle ČSN EN 1992-1-1, NA 2.89, $S_{\max,slabs}$ pro rozdělovací výztuž:

$$S_{\max,slabs} = 3h \leq 400$$

$$S_{\max,slabs} = 3 \cdot 200 \leq 400 \quad \Rightarrow 400$$

Zvolená výztuž $\varnothing 8$ po 150 mm

$$s \leq s_{\max}$$

$$150 \text{ mm} \leq 400 \text{ mm} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

18 Kotvení u horního povrchu

Volím $\varnothing 10$ mm po 200 mm

$$l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

Dělám v místě, kde je 0 moment $\sigma_{sd} = > 0$ je 0

$$l_{b,rqd} = 0$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd}$$

$$l_{bd} = 0$$

$$l_{bd} \geq l_{bd,min}$$

$$l_{bd,min} = \max\{0,3 l_{b,rqd}; 10\varnothing; 100\text{mm}\} = \max\{0; 100\text{mm}; 100\text{mm}\}$$

$$l_{bd,min} = 100 \text{ mm}$$

Volím si kotevní délku $l_{bd} = 200 \text{ mm}$

19 Montážní úchyt

Vlastní tíha

Dno 11,45

Stěny 8,25*2

Charakteristická hodnota

$$11,45 + 8,25 \cdot 2 = 27,95 \text{ kN/m}$$

$$27,95 \cdot 2,390 = 66,80 \text{ kN}$$

Přilnavost bednění

$$q_k = 2 \text{ kN/m}^2 \quad \dots \text{ odpovídá dřevěnému lakovanému bednění}$$

$$2 \cdot 2,1 \cdot 2,39 = 10,038 \text{ kN}$$

Dynamický součinitel

$$\psi_{dyn} = 1,3 \quad \dots \text{předpokládám zvedání jeřábem}$$

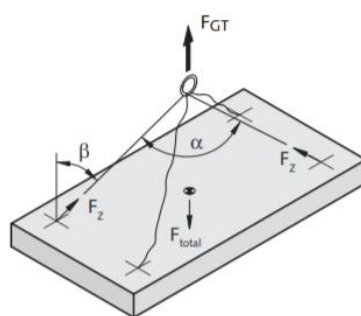
Koeficient sklonu lana

$$\beta = 22,5^\circ$$

$$z = 1 / \cos \beta = 1 / \cos 22,5 = 1,08$$

Zvolený způsob montážního úchytu

With four independent cable runs or two single diagonal cables, only two anchors can be assumed to be load bearing.



Assumed number of load bearing anchors: $n = 2$

Počet nosných úchytů (viz. Obrázek)

$$n=2$$

Návrhová kombinace pro MSÚ

Zdvih s bedněním

$$F_z = (F_G + q_{adh} \times Af) \times z / n$$

$$F_z = (66,8 \cdot 1,35 + 10,038 \cdot 1,5) \cdot 1,08 / 2 = 56,83 \text{ kN}$$

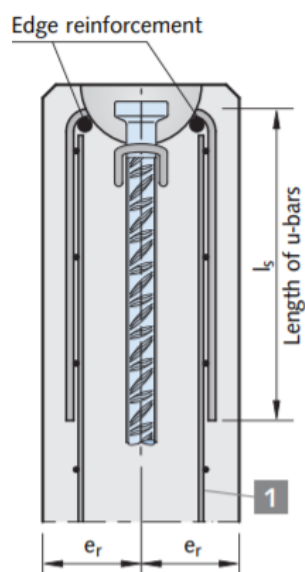
Přeprava na stavbě

$$F_z = F_G \times z \times \psi_{\text{dyn}} / n$$

$$F_z = (66,8 \cdot 1,35) \cdot 1,08 \cdot 1,3 / 2 = 63,31 \text{ kN}$$

Montážní úchyt volím Deha s kulatou hlavou 6050-7,5-0750. Přídavná výztuž byla navržena podle technického listu výrobce vybraného typu montážního úchytu.

Zvolený typ montážního úchytu platí i pro prvek s kompozitní výztuží.



KOMPOZITNÍ VÝZTUŽ

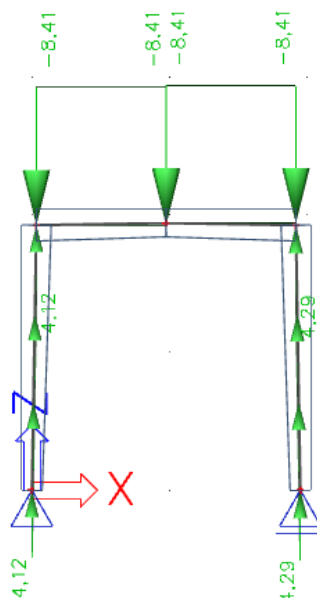
Pro beton s kompozitní výztuží lze použít objemovou hmotnost 24 kN/m^3

20 Zatížení prvku s FRP výztuží

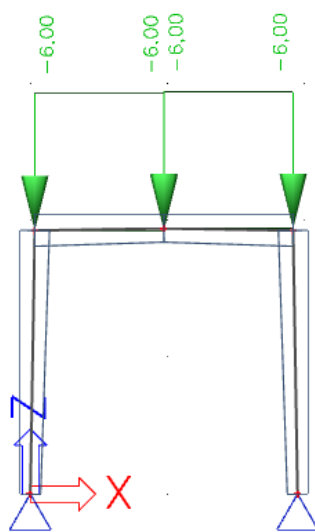
Vycházím ze zatížení prvku z betonu s ocelovou výztuží, zde dochází ke změně objemové hmotnosti z 25 kN/m^3 na 24 kN/m^3 . Přepočet vlastní tíhy prvku je zahrnut v jednotlivých zatěžovacích stavech.

21 Zatěžovací stavy

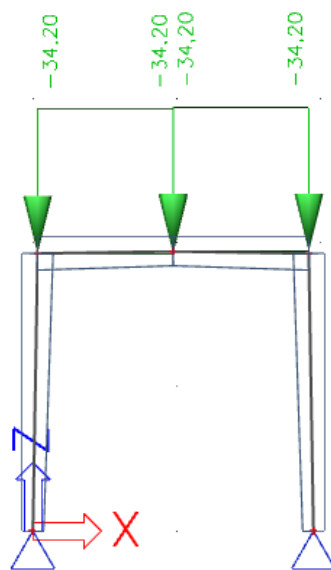
21.1 ZS1 – Stojka



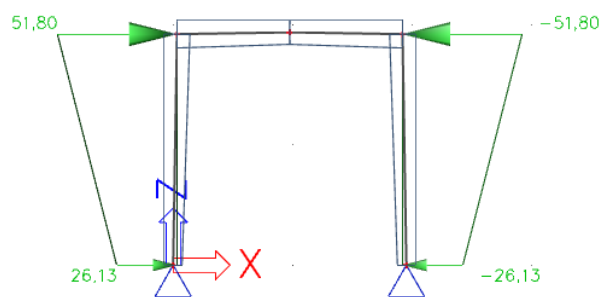
21.2 ZS2 – Vlastní tíha od zákrytové desky



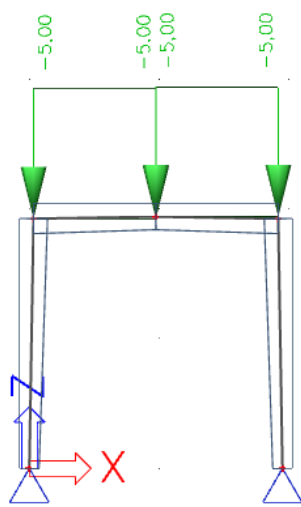
21.3 ZS3 – Ostatní stálé – zemina



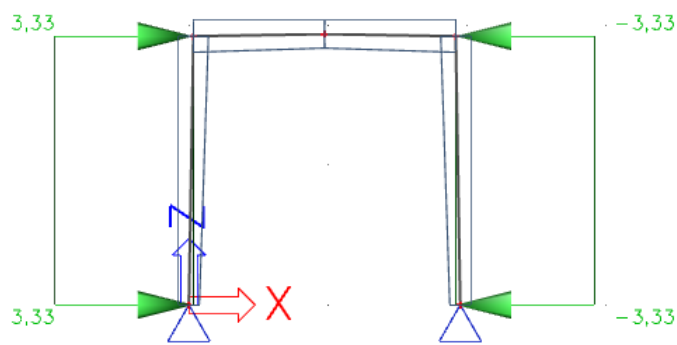
21.4 ZS4 – Ostatní stálé – zemní tlak



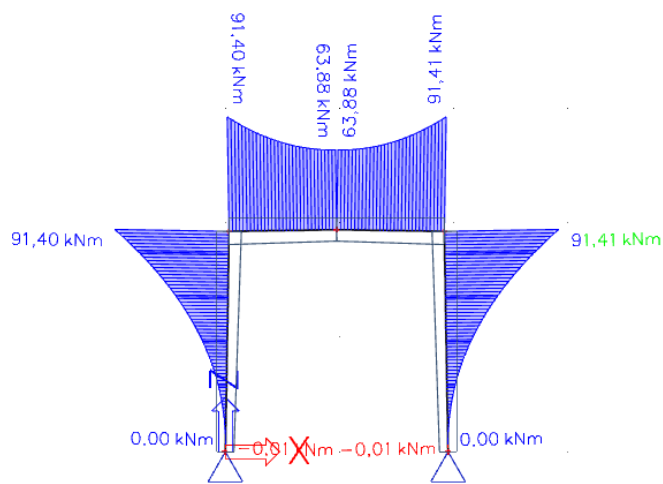
21.5 ZS5 – Nahodilé – přetížení od povrchu



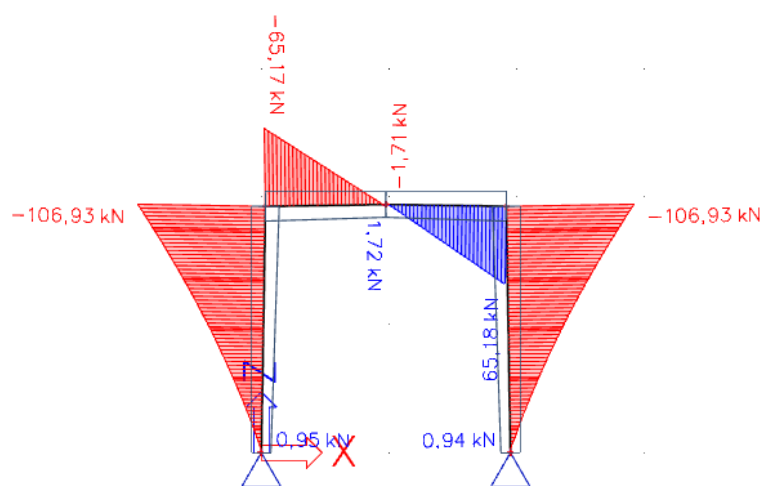
21.6 ZS6 – Nahodilé – Tlak od přetížení



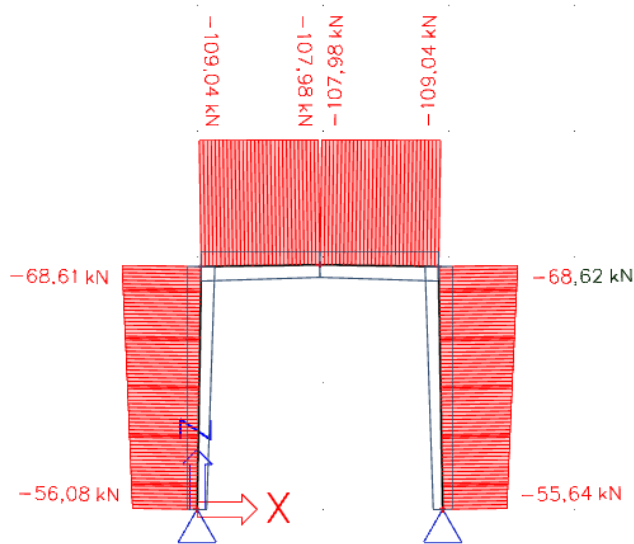
22 Vnitřní síly na prutech – kombinace MSÚ

22.1 Ohybové momenty M_y 

22.2 Posouvající síly V_z



22.3 Normálové síly N



23 Dimenzování

Beton: C30/37

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk; 0,05} = 1,8 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$$

GFRP výztuž Schöck ComBAR

Modul pružnosti

$$E_f = 60 \text{ GPa}$$

Součinitel spolehlivosti

$$\gamma_f = 1,3$$

Minimální charakteristická návrhová pevnost

$$f_{fk} = 1000 \text{ MPa}$$

Návrhová počáteční pevnost v tahu

$$f_{fd} = \frac{1000}{1,3} = 769,231 \text{ MPa}$$

Mez přetvoření

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} = \frac{769,231}{60 \cdot 10^3} = 12,82 \text{ ‰}$$

Minimální charakteristická dlouhodobá pevnost

$$f_{fk;1000h} = 580 \text{ MPa}$$

Návrhová dlouhodobá pevnost

$$f_{fd} = \frac{580}{1,3} = 445 \text{ MPa}$$

Mez přetvoření

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} = \frac{445}{60 \cdot 10^3} = 7,42 \text{ ‰}$$

24 Průřez 1

24.1 Krátkodobá únosnost při ohybu

Výztuž $\varnothing 12/150 \text{ mm}$ $A_f = 7,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Krytí:

$$c = d_f + c = 12 + 5 = 17 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 17 - \frac{12}{2} = 192 \text{ mm} = 0,192 \text{ m}$$

24.1.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,01282} \cdot 0,192 = 0,0412 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 7,54 \cdot 10^{-4} \cdot 769,231 \cdot 10^3 = 580,00 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0412 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 659,20 \text{ kN}$$

$$F_c = 659,20 \text{ kN} > F_T = 580,00 \text{ kN}$$

Dojde k přetržení výztuže

24.1.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se porušení výztuže, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \alpha \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_c = 0,003066$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \cdot 0,003066} = 0,782561$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,003066}{0,01282 + 0,003066} \cdot 0,192 = 0,037056 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 7,54 \cdot 10^{-4} \cdot 769,231 \cdot 10^3 = 580,00 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \alpha \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,782561 \cdot 0,037056 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 579,97 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$579,97 \text{ kN} \approx 580,00 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Krátkodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 580,00 \cdot \left(0,192 - \frac{0,782561 \cdot 0,037056}{2} \right) = 102,95 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 102,95 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm}$$

24.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu

Návrhová počáteční pevnost v tahu

$$f_{fd} = 445 \text{ MPa}$$

Mezní přetvoření výztuže

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fud}}{E_f} = \frac{445}{60 \cdot 10^3} = 7,42 \text{ ‰}$$

$$\text{Výztuž } \varnothing 12/150 \text{ mm } A_f = 7,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 12 + 5 = 17 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 17 - \frac{12}{2} = 192 \text{ mm} = 0,192 \text{ m}$$

24.2.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00742} \cdot 0,192 = 0,0615 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 7,54 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 335,53 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0615 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 984,0 \text{ kN}$$

$$F_c = 984,0 \text{ kN} > F_T = 335,53 \text{ kN}$$

Dojde k přetržení výztuže

24.2.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se porušení výztuže, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \alpha \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_c = 0,0014413$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \cdot 0,0014413} = 0,537455$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,0014413}{0,00742 + 0,0014413} \cdot 0,192 = 0,031229 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 7,54 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 335,53 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \alpha \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,537455 \cdot 0,031229 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 335,68 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$335,68 \text{ kN} \approx 335,53 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Dlouhodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 335,53 \cdot \left(0,192 - \frac{0,537455 \cdot 0,031229}{2} \right) = 61,61 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 61,61 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm} \dots \text{NEVYHOVUJE}$$

Na základě tohoto výpočtu byla zvětšena výztuž $\varnothing 16/150 \text{ mm}$

PRŮŘEZ 1 – ÚPRAVA PLOCHY VÝZTUŽE

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 21 - \frac{16}{2} = 186 \text{ mm} = 0,186 \text{ m}$$

24.2.3 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,01282} \cdot 0,186 = 0,0399 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 769,231 \cdot 10^3 = 1030,77 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0399 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 638,40 \text{ kN}$$

$$F_c = 638,40 \text{ kN} < F_T = 1030,77 \text{ kN}$$

Dojde k drcení betonu

24.2.4 Moment na mezi únosnosti

Očekává se drcení betonu, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \lambda \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_f = 0,009766$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_f + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,0035}{0,009766 + 0,0035} \cdot 0,186 = 0,0491 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 0,009766 \cdot 60 \cdot 10^6 = 785,186 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \lambda \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0491 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 785,6 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$785,6 \approx 785,186 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Krátkodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 785,186 \cdot \left(0,186 - \frac{0,8 \cdot 0,0491}{2} \right) = 130,62 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 130,62 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

24.3 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu

Návrhová počáteční pevnost v tahu

$$f_{fd} = 445 \text{ MPa}$$

Mezní přetvoření výztuže

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fud}}{E_f} = \frac{445}{60 \cdot 10^3} = 7,42 \text{ ‰}$$

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 215 - 21 - \frac{16}{2} = 186 \text{ mm} = 0,186 \text{ m}$$

24.3.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00742} \cdot 0,186 = 0,0596 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0596 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 953,60 \text{ kN}$$

$$F_c = 953,60 \text{ kN} > F_T = 596,30 \text{ kN}$$

Dojde k přetržení výztuže

24.3.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se porušení výztuže, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \alpha \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_c = 0,002211$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \cdot 0,002211} = 0,69848$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,002211}{0,00742 + 0,002211} \cdot 0,186 = 0,0427 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \alpha \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,69848 \cdot 0,0427 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 596,49 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$596,49 \text{ kN} = 596,30 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Dlouhodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 596,30 \cdot \left(0,186 - \frac{0,69848 \cdot 0,0427}{2} \right) = 103,21 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 102,02 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

25 Průřez 2

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 230 - 21 - \frac{16}{2} = 201 \text{ mm} = 0,201 \text{ m}$$

25.1.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,01282} \cdot 0,201 = 0,0431 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 769,231 \cdot 10^3 = 1030,77 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0431 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 689,60 \text{ kN}$$

$$F_c = 689,60 \text{ kN} < F_T = 1030,77 \text{ kN}$$

Dojde k drcení betonu

25.1.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se drcení betonu, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \lambda \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_f = 0,010211$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_f + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,0035}{0,010211 + 0,0035} \cdot 0,201 = 0,051309 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 0,010211 \cdot 60 \cdot 10^6 = 820,96 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \lambda \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,051309 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 820,94 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$820,94 \approx 820,96 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Krátkodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 820,96 \cdot \left(0,201 - \frac{0,8 \cdot 0,051309}{2} \right) = 148,16 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 148,16 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

25.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu

Návrhová počáteční pevnost v tahu

$$f_{fd} = 445 \text{ MPa}$$

Mezní přetvoření výztuže

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fud}}{E_f} = \frac{445}{60 \cdot 10^3} = 7,42 \text{ ‰}$$

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 230 - 21 - \frac{16}{2} = 201 \text{ mm} = 0,201 \text{ m}$$

25.2.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00742} \cdot 0,201 = 0,0644 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0644 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 1030,4 \text{ kN}$$

$$F_c = 1030,4 \text{ kN} > F_T = 596,30 \text{ kN}$$

Dojde k přetržení výztuže

25.2.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se porušení výztuže, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \alpha \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačených vláknech

$$\varepsilon_c = 0,002076$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \cdot 0,002076} = 0,67887$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,002076}{0,00742 + 0,002076} \cdot 0,201 = 0,0439 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \alpha \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,67887 \cdot 0,0439 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 596,05 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$596,05 \text{ kN} \approx 596,30 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Dlouhodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 596,30 \cdot \left(0,201 - \frac{0,67887 \cdot 0,0439}{2} \right) = 110,97 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 110,97 \text{ kNm} > M_{Ed} = 91,41 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

26 Průřez 3

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 200 - 21 - \frac{16}{2} = 171 \text{ mm} = 0,171 \text{ m}$$

26.1.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,01282} \cdot 0,171 = 0,0367 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 769,231 \cdot 10^3 = 1030,770 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0367 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 587,2 \text{ kN}$$

$$F_c = 587,00 \text{ kN} < F_T = 1030,770 \text{ kN}$$

Dojde k drcení betonu

26.1.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se drcení betonu, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \lambda \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_f = 0,009303$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,009303 + 0,0035} \cdot 0,171 = 0,046747 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 0,009303 \cdot 60 \cdot 10^6 = 747,96 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \lambda \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,046747 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 747,952 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$747,952 \approx 747,96 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Krátkodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 747,96 \cdot \left(0,171 - \frac{0,8 \cdot 0,046747}{2} \right) = 113,92 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 113,92 \text{ kNm} > M_{Ed} = 63,88 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

26.2 Dlouhodobá únosnost při prostém ohybu

Návrhová počáteční pevnost v tahu

$$f_{fd} = 445 \text{ MPa}$$

Mezní přetvoření výztuže

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fud}}{E_f} = \frac{445}{60 \cdot 10^3} = 7,42 \text{ ‰}$$

$$\text{Výztuž } \varnothing 16/150 \text{ mm } A_f = 13,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Krytí:

$$c = d_f + c = 16 + 5 = 21 \text{ mm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - \frac{\emptyset}{2} = 200 - 21 - \frac{16}{2} = 171 \text{ mm} = 0,171 \text{ m}$$

26.2.1 Balanční stupeň vyztužení

Poloha neutrální osy při balančním porušení:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} \cdot d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00742} \cdot 0,171 = 0,0548 \text{ m}$$

Síla ve výztuži při dosažení mezního stavu

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části betonu při dosažení mezního stavu

$$F_c = \lambda \cdot x_{bal} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 0,0548 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 = 876,80 \text{ kN}$$

$$F_c = 876,80 \text{ kN} > F_T = 596,30 \text{ kN}$$

Dojde k přetržení výztuže

26.2.2 Moment na mezi únosnosti

Očekává se porušení výztuže, z toho důvodu hodnotu momentu na mezi únosnosti lze určit při rovnováze tažené a tlačené síly ze vztahů:

$$F_c = F_T$$

$$F_c = x \cdot b \cdot \alpha \cdot f_{cd}$$

$$F_T = A_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

Přetvoření v krajních tlačných vláknech

$$\varepsilon_c = 0,0023752$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \cdot 0,0023752} = 0,7193$$

Výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} \cdot d = \frac{0,0023752}{0,00742 + 0,0023752} \cdot 0,171 = 0,04147 \text{ m}$$

Síla ve výztuži

$$F_T = A_f \cdot f_{fd} = 13,40 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^3 = 596,30 \text{ kN}$$

Síla v tlačené části průřezu

$$F_c = \alpha \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,71932 \cdot 0,04147 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 10^3 \\ = 596,60 \text{ kN}$$

$$F_c = F_T$$

$$596,59 \text{ kN} \approx 596,30 \text{ kN} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Dlouhodobá ohybová únosnost průřezu

$$M_{Rd} = F_T \cdot \left(d - \frac{\alpha \cdot x}{2} \right)$$

$$M_{Rd} = 596,30 \cdot \left(0,171 - \frac{0,7193 \cdot 0,04147}{2} \right) = 93,07 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 93,07 \text{ kNm} > M_{Ed} = 63,88 \text{ kNm} \dots \text{VYHOVUJE}$$

27 Výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru

27.1 Posouzení konstrukčních zásad

Volím ji podle konstrukčních zásad normy ČSN EN 1992-1-1.

Pro minimální plochu výztuže $A_{s,min}$ volím to nejnepriznivější kritérium a to je průřez 2, který je největší.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d > 0,0013 \cdot b_t \cdot d$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{2,9}{1000} \cdot 1 \cdot 0,201 = 1,515 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$> 0,0013 \cdot b_t \cdot d = 0,0013 \cdot 1 \cdot 0,201 = 2,613 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Navrhují výztuž } \varnothing 12 \text{ mm po } 300 \text{ mm}, A_s = 3,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Pro maximální plochu výztuže $A_{s,max}$ volím to nejnepriznivější kritérium a to je průřez 3, který je nejmenší.

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot 1 \cdot 0,200 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max}$$

$$2,613 \cdot 10^{-4} \leq 3,77 \cdot 10^{-4} \leq 80 \cdot 10^{-4} \dots \text{VYHOVUJE}$$

27.2 Kotvení

Podle ČSN EN 1992-1-1, vzhledem k umístění výztuže v tlaku minimální kotevní délku je $10\varnothing$.

$$l_{bd,min} = 10 \cdot \varnothing = 10 \cdot 12 = 120 \text{ mm}$$

Pro výztuž u vnitřního povrchu v podélném směru $\varnothing 12 \text{ mm}$ po 300 mm , volím kotevní délku 150 mm , s kombinací s kotevní hlavicí (kotevní

hlavice je zvolena podle technického listu Schöck Combar pro danou výztuž).

28 Příčná rozdělovací výztuž

Podle ČSN EN 1992-1-1, kapitoly 9.3.1, volím příčnou rozdělovací výztuž o ploše nejméně 20% plochy hlavní nosné výztuže.

$$A_{s,roz} = 0,2 \cdot A_s = 0,2 \cdot 13,40 \cdot 10^{-4} = 2,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Volím výztuž $\varnothing 8$ mm po 150 mm

28.1 Ověření konstrukčních zásad

Podle ČSN EN 1992-1-1, NA 2.89, $S_{max,slabs}$ pro rozdělovací výztuž:

$$S_{max,slabs} = 3h \leq 400$$

$$S_{max,slabs} = 3 \cdot 200 \leq 400 \quad \Rightarrow 400$$

Zvolená výztuž $\varnothing 8$ po 150 mm

$$s \leq s_{max}$$

$$150 \text{ mm} \leq 400 \text{ mm} \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

29 Kotvení u horního povrchu

Volím $\varnothing 12$ mm po 300 mm

$$l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

Dělám v místě, kde je 0 moment $\sigma_{sd} = > 0$ je 0

$$l_{b,rqd} = 0$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd}$$

$$l_{bd} = 0$$

$$l_{bd} \geq l_{bd,min}$$

$$l_{bd,min} = \max\{0,3 l_{b,rqd}; 10\varnothing; 100\text{mm}\} = \max\{0; 120\text{mm}; 100\text{mm}\}$$

$$l_{bd,min} = 120 \text{ mm}$$

Volím si kotevní délku $l_{bd} = 200 \text{ mm}$