



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

DÁLNIČNÍ MOST PŘES HLUBOKÉ ÚDOLÍ

HIGHWAY BRIDGE OVER DEEP VALLEY

P4 STATICKÝ VÝPOČET

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Barbora Pírková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV KLUSÁČEK, CSc.

BRNO 2017

OBSAH

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD..... | 7 |
| 1.1 | Podélné uspořádání..... | 7 |
| 1.2 | Příčné uspořádání..... | 7 |
| 1.3 | Mostní svršek..... | 8 |
| 1.3.1 | Vozovkové souvrství..... | 8 |
| 1.3.2 | Mostní římsy..... | 8 |
| 1.3.3 | Bezpečnostní zařízení..... | 8 |
| 2 | PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY | 9 |
| 2.1 | Plný průřez..... | 9 |
| 2.1.1 | V poli | 9 |
| 2.1.2 | Nad podporou..... | 9 |
| 2.2 | Spolupůsobící šířka..... | 10 |
| 2.3 | Efektivní průřez | 11 |
| 2.3.1 | Pole 1 | 11 |
| 2.3.2 | Podpora B | 11 |
| 2.3.3 | Pole 2 | 12 |
| 2.3.4 | Podpora C | 12 |
| 3 | MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY | 13 |
| 3.1 | Beton..... | 13 |
| 3.2 | Betonářská výztuž B 500B..... | 13 |
| 3.3 | Předpínací výztuž Y 1860-S7-15,7-A..... | 14 |
| 3.3.1 | Maximální přípustné napětí během předpínání | 14 |
| 3.3.2 | Maximální napětí bezprostředně po předepnutí a zakotvení | 14 |
| 4 | KRYTÍ VÝZTUŽE | 15 |
| 4.1 | Betonářská výztuž..... | 15 |
| 4.2 | Předpínací výztuž | 15 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | ZATÍŽENÍ | 16 |
| 5.1 | Vlastní tíha | 16 |
| 5.2 | Ostatní stálé | 17 |
| 5.3 | Zatížení dopravou | 17 |
| 5.3.1 | Rozdělení vozovky do zatěžovacích pruhů | 17 |
| 5.3.2 | Regulační součinitele pro ČR | 18 |
| 5.3.3 | Roznos zatížení | 18 |
| 5.3.4 | Modely zatížení | 18 |
| 5.3.5 | Sestavy zatížení | 21 |
| 6 | MODEL KONSTRUKCE | 22 |
| 7 | VNITŘNÍ SÍLY | 23 |
| 7.1 | Vlastní tíha g_{0k} | 23 |
| 7.2 | Ostatní stálé $g_{1k,sup}$ | 23 |
| 7.3 | Ostatní stálé $g_{1k,inf}$ | 24 |
| 7.4 | LM1 – TS | 24 |
| 7.5 | LM1 - UDL | 25 |
| 7.6 | LM3 - 1800/200 | 25 |
| 7.7 | LM3 - 3000/240 | 26 |
| 8 | PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH PŘEDPĚTÍ | 26 |
| 8.1 | Návrh dráhy teoretického kabelu | 27 |
| 8.2 | Přehled ohybových momentů | 28 |
| 9 | PŘESNÝ NÁVRH PŘEDPĚTÍ | 29 |
| 9.1 | Základní charakteristiky předpínací výztuže | 29 |
| 9.2 | Skutečná geometrie kabelových drah | 30 |
| 10 | FÁZE VÝSTAVBY | 31 |
| 10.1 | Ohybové momenty - dotvarování betonu ve fázích výstavby | 33 |
| 10.2 | Ohybové momenty fází výstavby (bez vlivu TDA) | 34 |

| | | |
|--------|--|----|
| 10.3 | Ohybové momenty v čase zatížení dopravou (bez vlivu TDA)..... | 35 |
| 10.4 | Ohybové momenty- dotvarování betonu v čase zatížení dopravou . | 35 |
| 11 | ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ | 36 |
| 11.1 | Okamžité ztráty předpětí..... | 36 |
| 11.1.1 | Celkové krátkodobé ztráty | 36 |
| 11.2 | Dlouhodobé ztráty předpětí..... | 37 |
| 11.2.1 | Ztráty smršťováním betonu | 37 |
| 11.2.2 | Ztráty relaxací výztuže | 39 |
| 11.2.3 | Ztráty dotvarováním betonu | 39 |
| 11.2.4 | Celkové dlouhodobé ztráty | 41 |
| 11.3 | Výsledné hodnoty ztrát a napětí | 41 |
| 12 | MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI | 42 |
| 12.1 | Omezení normálových napětí | 42 |
| 12.1.1 | Omezení tlakových napětí v betonu | 42 |
| 12.1.2 | Omezení tahových napětí v betonu | 43 |
| 12.1.3 | Omezení tahových napětí ve výztuži..... | 43 |
| 12.2 | Omezení normálových napětí – fáze výstavby | 44 |
| 12.2.1 | Fáze 1 | 44 |
| 12.2.2 | Fáze 2 | 44 |
| 12.2.3 | Fáze 3 | 44 |
| 12.2.4 | Fáze 4 | 44 |
| 12.2.5 | Fáze 5 | 44 |
| 12.3 | Omezení normálových napětí – čas t_{∞} | 45 |
| 12.3.1 | Charakteristická kombinace | 46 |
| 12.3.2 | Častá kombinace | 46 |
| 12.3.3 | Kvazistálá kombinace..... | 46 |
| 12.4 | Omezení normálových napětí – v čase zatížení dopravou | 47 |

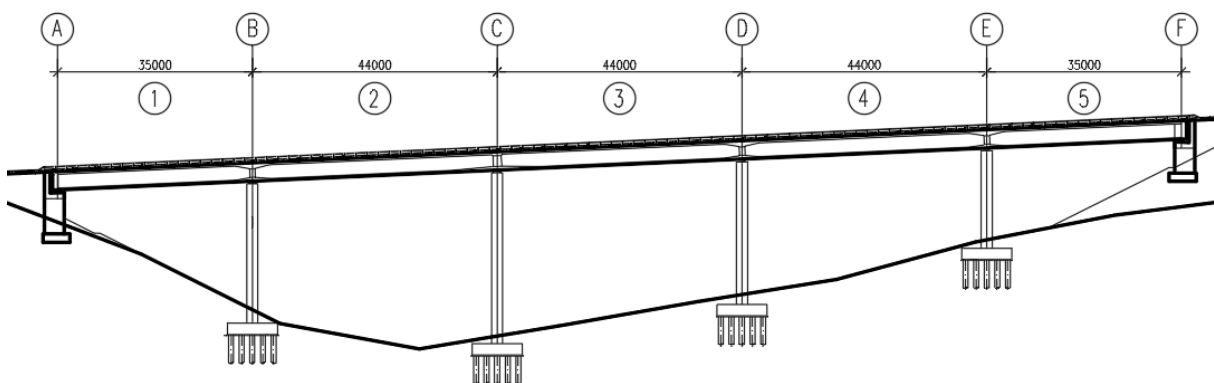
| | | |
|--------|---|----|
| 12.4.1 | Charakteristická kombinace | 48 |
| 12.4.2 | Častá kombinace | 48 |
| 12.4.3 | Kvazistálá kombinace..... | 48 |
| 12.5 | Omezení vzniku trhlin | 49 |
| 12.5.1 | Průřezové charakteristiky ideálního průřezu | 49 |
| 12.5.2 | Průřezové charakteristiky průřezu porušeného trhlínou | 49 |
| 13 | MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI | 52 |
| 13.1 | Posouzení konstrukce na ohyb – N+M | 52 |
| 13.1.1 | Podpěra C | 53 |
| 13.1.2 | ½ 5. pole | 56 |
| 13.2 | Posouzení konstrukce na kombinaci smyku a kroucení | 58 |
| 13.2.1 | Převedení vlivu kroucení na posouvající sílu | 59 |
| 13.2.2 | Rozhodnutí o vzniku trhlin | 59 |
| 13.2.3 | Kritický řez..... | 59 |
| 13.2.4 | Zahrnutí vlivu šikmosti stěn | 60 |
| 13.2.5 | Posouzení únosnosti bez smykové výztuže | 61 |
| 13.2.6 | Návrh smykové výztuže | 62 |
| 13.2.7 | Kroucení..... | 63 |
| 13.2.8 | Konstrukční zásady smykové výztuže..... | 63 |
| 13.3 | Podélný smyk | 64 |
| 13.3.1 | Návrh podélné smykové výztuže..... | 64 |
| 13.3.2 | Podélný smyk mezi stěnou a deskou komory | 65 |
| 13.3.3 | Únosnost bez smykové výztuže | 66 |
| 13.3.4 | Návrh smykové výztuže | 66 |
| 13.4 | Posouzení konstrukce v příčném směru | 68 |
| 13.4.1 | Vlastní tíha | 68 |
| 13.4.2 | Ostatní stálé | 69 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|-----|
| 13.4.3 | Zatížení uvnitř komory..... | 70 |
| 13.4.4 | Zatížení dopravou | 71 |
| 13.4.5 | Posouzení ohybové únosnosti | 79 |
| 13.4.6 | Posouzení smykové únosnosti | 88 |
| 14 | NÁVRH PŘÍČNÍKU | 92 |
| 15 | ZÁVĚR..... | 95 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 96 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 98 |
| | SEZNAM ZKRATEK..... | 100 |

1 ÚVOD

1.1 Podélné uspořádání

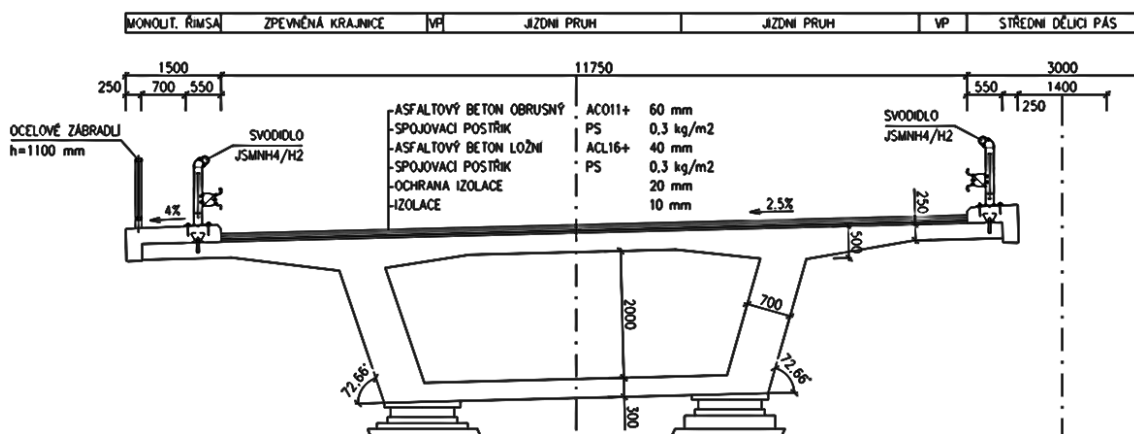
Nosná konstrukce mostu je navržena jako spojitý nosník o 5 polích. Rozpětí jednotlivých polí je 35 - 44 - 44 - 44 - 35 m, celková délka 202 m. Pro snadnější orientaci v následujícím textu jsou jednotlivé podpěry a pole označeny dle následujícího obrázku:



Obr. 1: Schéma podélného uspořádání

1.2 Příčné uspořádání

Po mostě je převáděna pozemní komunikace D 26,5/100, přičemž každý směr má svoji vlastní nosnou konstrukci tvořenou komorovým nosníkem se šikmými stěnami. Budou tedy vybudovány dvě samostatné mostní konstrukce. Podélný sklon mostu je 4% a příčný jednostranný sklon 2,5% - u každého směru na opačnou stranu. Šířka komorového nosníku je 13,55 m a výška průřezu je 2,6 m. V oblastech nad vnitřními podporami bude vytvořen náběh dolní desky nosníku, a to z tloušťky 300 mm na 600 mm. Náběhy u podpor budou symetrické o délce 8 m od osy uložení.



Obr. 2: Příčné uspořádání

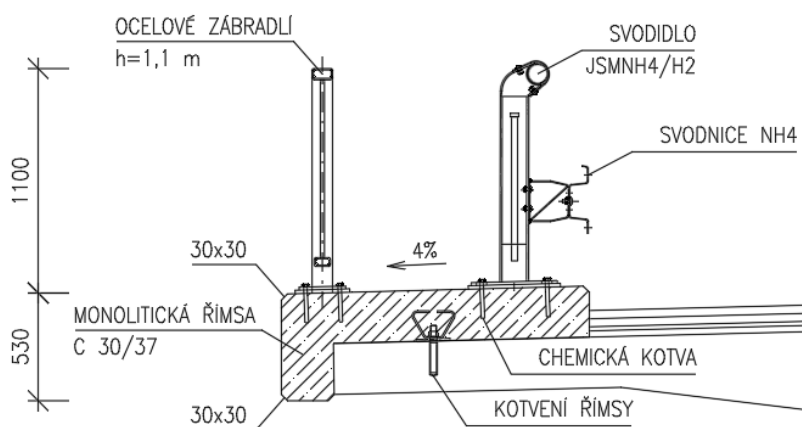
1.3 Mostní svršek

1.3.1 Vozovkové souvrství

Komunikace je tvořena jako netuhá. Skládá se z asfaltového betonu ohrubného ACO11+ tloušťky 60 mm, asfaltového betonu ložního ACL16+ tloušťky 40 mm, ochrany izolace a izolace tloušťky 30 mm. Asfaltové vrstvy jsou spojeny spojovacím postřikem PS 0,3 kg/m².

1.3.2 Mostní římsy

Na mostě jsou navrženy oboustranné monolitické římsy z betonu C30/37. Jedna má šířku 1500 mm, druhá 800 mm. Nosnou konstrukci přesahují obě o 250 mm. Po širších římsách jsou převáděny nouzové chodníky šířky 850 mm.



Obr. 3: Detail římsy

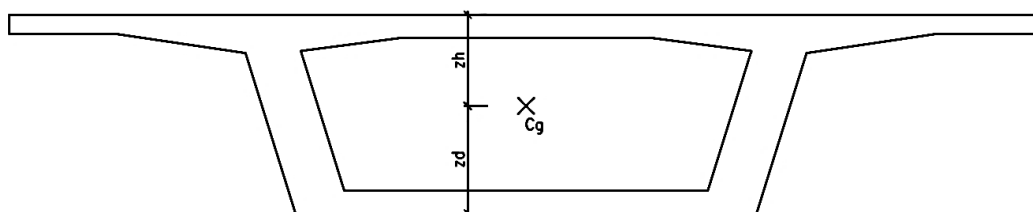
1.3.3 Bezpečnostní zařízení

Na každé straně u obou mostů je osazeno svodidlo typu JSMNH4/H2 a na straně se širší mostní římsou ještě ocelové zábradlí výšky 1,1 m. Kotvení svodidel a zábradlí je provedeno pomocí chemických kotev. Výška obruby je 150

2 PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

2.1 Plný průřez

2.1.1 V poli

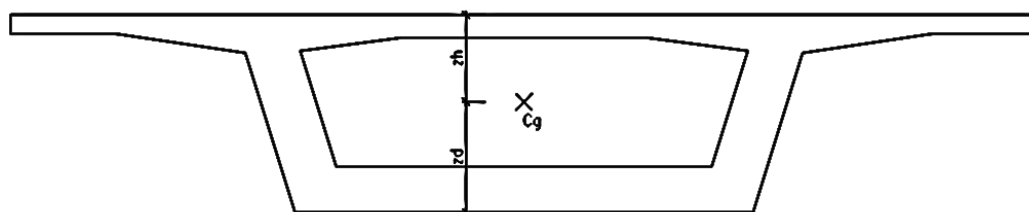


Obr. 4: Plný průřez v poli

| A | I | zh | zd | Wh | Wd |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|
| [m ²] | [m ⁴] | [m] | [m] | [m ³] | [m ³] |
| 9,188 | 8,2168 | 1,193 | 1,407 | 6,888 | 5,840 |

Tab. 1: Průřezové charakteristiky plného průřezu v poli

2.1.2 Nad podporou



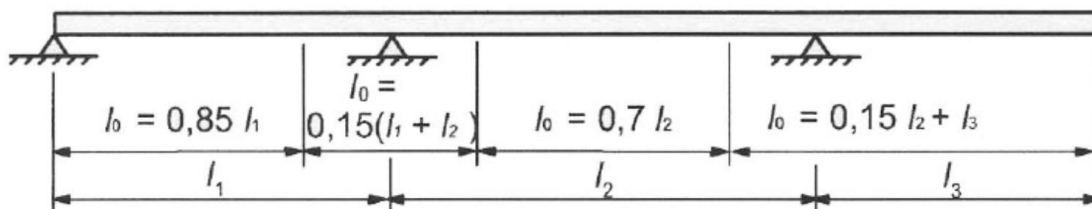
Obr. 5: Plný průřez nad podporou

| A | I | zh | zd | Wh | Wd |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|
| [m ²] | [m ⁴] | [m] | [m] | [m ³] | [m ³] |
| 10,647 | 8,3746 | 1,144 | 1,456 | 7,320 | 5,752 |

Tab. 2: Průřezové charakteristiky plného průřezu nad podporou

2.2 Spolupůsobící šířka

U komorových konstrukcí dochází vlivem smykové deformace desky k nerovnoměrnému rozdělení normálových napětí. Do výpočtu jej zavedeme použitím tzv. efektivních šířek a dále budou uvažovány efektivní průřezové charakteristiky redukovaných průřezů.



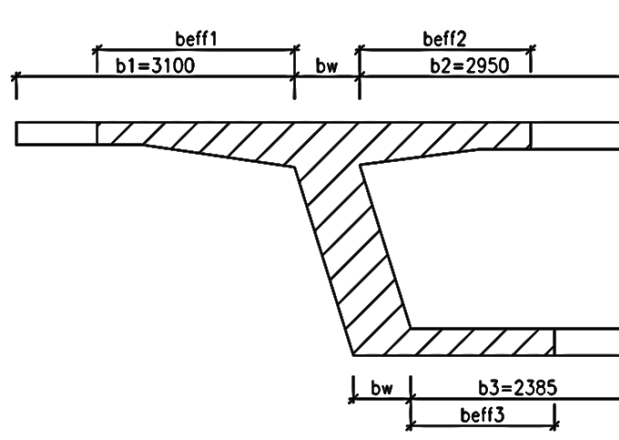
Obr. 6: Definice l_0 pro výpočet spolupůsobící šířky desky

Vzorece pro výpočet efektivní šířky:

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b$$

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0$$

$$b_{eff,i} \leq b_i$$



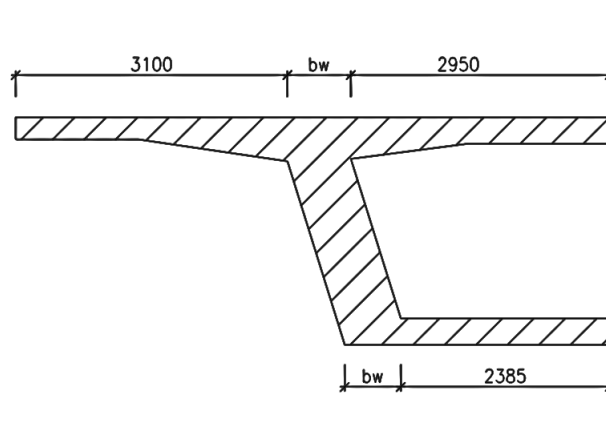
Obr. 7: Označení efektivních šířek

| | | POLE 1 | | | PODPORA B | | | POLE 2 | | | PODPORA C | | |
|---|-------|--------------------|------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|---------------|
| i | b [m] | l ₀ [m] | 0,1 l ₀ [m] | beff,i [m] | l ₀ [m] | 0,1 l ₀ [m] | beff,i [m] | l ₀ [m] | 0,1 l ₀ [m] | beff,i [m] | l ₀ [m] | 0,1 l ₀ [m] | beff,i [m] |
| 1 | 3,100 | 29,75 | 2,98 | 3,10 | 11,85 | 1,19 | 1,81 | 30,80 | 3,08 | 3,10 | 13,20 | 1,32 | 1,68 |
| 2 | 2,950 | 29,75 | 2,98 | 2,95 | 11,85 | 1,19 | 1,78 | 30,80 | 3,08 | 2,95 | 13,20 | 1,32 | 1,68 |
| 3 | 2,385 | 29,75 | 2,98 | 2,39 | 11,85 | 1,19 | 1,66 | 30,80 | 3,08 | 2,39 | 13,20 | 1,32 | 1,65 |

Tab. 3: Hodnoty efektivních šířek

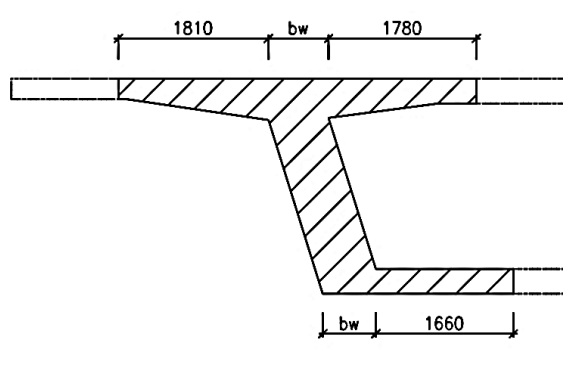
2.3 Efektivní průřez

2.3.1 Pole 1



Obr. 8: Efektivní průřez pole 1

2.3.2 Podpora B

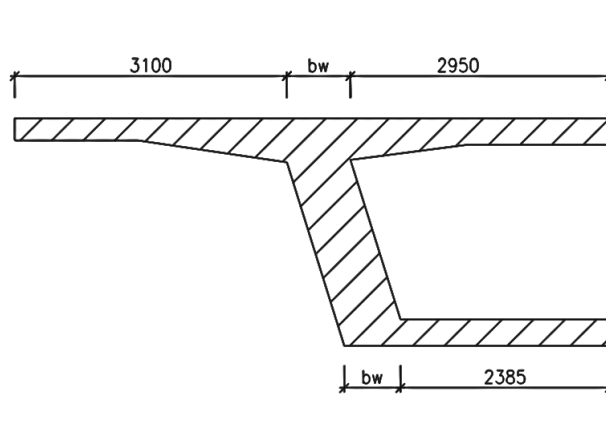


Obr. 9: Efektivní průřez podpora B

| A | I | z_h | z_d | W_h | W_d |
|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [m ²] | [m ⁴] | [m] | [m] | [m ³] | [m ³] |
| 7,405 | 6,2663 | 1,056 | 1,544 | 5,934 | 4,059 |

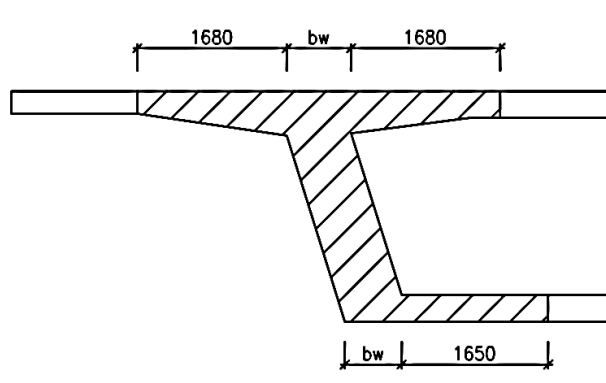
Tab. 4: Průřezové charakteristiky efektivního průřezu - podpora B

2.3.3 Pole 2



Obr. 10: Efektivní průřez pole 2

2.3.4 Podpora C



Obr. 11: Efektivní průřez podpora C

| A | I | z _h | z _d | W _h | W _d |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| [m ²] | [m ⁴] | [m] | [m] | [m ³] | [m ³] |
| 7,272 | 6,1444 | 1,071 | 1,529 | 5,737 | 4,019 |

Tab. 5: Průřezové charakteristiky efektivního průřezu - podpora C

3 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

3.1 Beton

| | |
|--|-------------------------------------|
| charakteristická pevnost v tlaku - válcová | $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ |
| charakteristická pevnost v tlaku - krychelná | $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$ |
| střední hodnota pevnosti v tlaku | $f_{cm} = 43 \text{ MPa}$ |
| součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost | $\alpha_{cc} = 0,9$ |
| součinitel spolehlivosti materiálu | $\gamma_c = 1,5$ |
| modul pružnosti | $E_{cm} = 34 \text{ GPa}$ |
| střední hodnota pevnosti v tahu | $f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$ |
| mezní přetvoření | $\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$ |

návrhová hodnota pevnosti betonu v tlaku

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,9 \cdot \frac{35}{1,5} = 21 \text{ MPa}$$

pevnost betonu v době zavedení předpětí - $t_0 = 10$ dnů

$$\text{tlak: } \beta_{cc}(t) = e^{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]} = e^{0,20 \left[1 - \sqrt{\frac{28}{10}} \right]} = 0,874 \quad (\text{pro cement třídy R: } s = 0,20)$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = 0,874 \cdot 43 = 37,58 \text{ MPa}$$

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} = 37,58 - 8 = 29,58 \text{ MPa}$$

$$\text{tah: } f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha \cdot f_{ctm} = 0,874^1 \cdot 3,2 = 2,80 \text{ MPa}$$

3.2 Betonářská výztuž B 500B

| | |
|------------------------------------|----------------------------|
| charakteristická pevnost v tahu | $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ |
| součinitel spolehlivosti materiálu | $\gamma_s = 1,15$ |
| modul pružnosti | $E_s = 200 \text{ GPa}$ |

návrhová hodnota pevnosti výztuže v tahu

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

3.3 Předpínací výztuž Y 1860-S7-15,7-A

| | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| charakteristická pevnost v tahu | $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ |
| smluvní mez kluzu 0,1 | $f_{p0,1k} = 1640 \text{ MPa}$ |
| součinitel spolehlivosti materiálu | $\gamma_p = 1,15$ |
| modul pružnosti | $E_p = 195 \text{ GPa}$ |
| průměr lana | $\varnothing = 15,7 \text{ mm}$ |
| plocha jednoho lana | $A_p = 150 \text{ mm}^2$ |

návrhová hodnota pevnosti výztuže v tahu

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1640}{1,15} = 1426,09 \text{ MPa}$$

3.3.1 Maximální přípustné napětí během předpínání

$$\begin{aligned}\sigma_{p,\max} &= \min \{0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}\} = \min \{0,8 \cdot 1860; 0,9 \cdot 1640\} = \\ &= \min\{1488; 1476\}\end{aligned}$$

$$\sigma_{p,\max} = 1476 \text{ MPa}$$

3.3.2 Maximální napětí bezprostředně po předeptnutí a zakotvení

$$\begin{aligned}\sigma_{p0,\max} &= \min \{0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}\} = \min \{0,75 \cdot 1860; 0,85 \cdot 1640\} = \\ &= \min\{1395; 1394\}\end{aligned}$$

$$\sigma_{p0,\max} = 1394 \text{ MPa}$$

4 KRYTÍ VÝZTUŽE

| | |
|-------------------|----------|
| třída prostředí: | XD1, XF2 |
| třída konstrukce: | S5 |
| životnost: | 100 let |

4.1 Betonářská výztuž

| | | |
|----------------------------|---------|-----------------------------|
| uvažované průměry výztuže: | podélná | $\emptyset = 32 \text{ mm}$ |
| | třmínky | $\emptyset = 16 \text{ mm}$ |
| | spony | $\emptyset = 8 \text{ mm}$ |

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

$$c_{\text{min}} = \max \{c_{\text{min,b}} = \emptyset + 5; c_{\text{min,dur}}; 10 \text{ mm}\}$$

$$c_{\text{min}} = \max \{37; 40; 10\} = 40 \text{ mm}$$

$$c_{\text{min}} = 40 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm}$$

nominální krycí vrstva betonářské výztuže:

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} = 40 + 10 = 50 \text{ mm}$$

4.2 Předpínací výztuž

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

$$c_{\text{min}} = \max \{c_{\text{min,b}} = \emptyset; c_{\text{min,dur}}; 10 \text{ mm}\}$$

$$c_{\text{min}} = \max \{80; 50; 10\} = 80 \text{ mm}$$

$$c_{\text{min}} = 80 \text{ mm} (= 100 \text{ mm, omezení max } 80 \text{ mm})$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm}$$

nominální krycí vrstva předpínací výztuže:

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} = 80 + 10 = 90 \text{ mm}$$

5 ZATÍŽENÍ

Uvažované zatížení na konstrukci:

- zatížení stálé
 - vlastní tíha konstrukce
 - ostatní stálé zatížení
 - vozovkové souvrství
 - mostní římsy a bezpečnostní zařízení
- zatížení proměnné
 - zatížení dopravou
 - model zatížení 1 (LM1)
 - model zatížení 3 (LM3)

s dalším zatížením jako je např. pokles podpor nebo klimatické zatížení není v rámci diplomové práce počítáno

5.1 Vlastní tíha

Vlastní tíha je generována automaticky výpočetním programem.

$$\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$$

Pro vyrovnání účinků stálého zatížení předpětím byla vlastní tíha spočítána i ručně:

| | |
|---|--------------------------------|
| objemová hmotnost betonu s předpínací výztuží | $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ |
| tíhové zrychlení | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| plocha betonového průřezu - v poli | $A_c = 9,188 \text{ m}^2$ |
| plocha betonového průřezu - nad podporou | $A_c = 10,647 \text{ m}^2$ |
| vlastní tíha nosné konstrukce - v poli | $g_{0k} = 229,70 \text{ kN/m}$ |
| vlastní tíha nosné konstrukce - nad podporou | $g_{0k} = 266,18 \text{ kN/m}$ |

5.2 Ostatní stálé

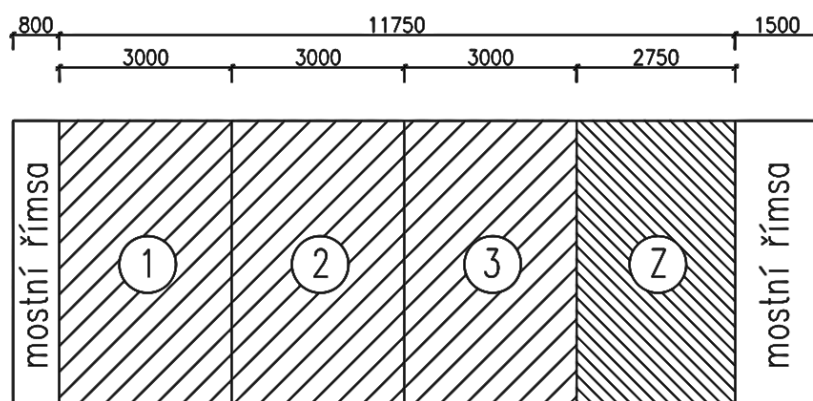
| | γ [kN/m ³] | A [kN/m ²] | g_{1k} [kN/m'] | $g_{1k,sup}$ +40% [kN/m'] | $g_{1k,inf}$ -20% [kN/m'] |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| vozovka | 24,00 | 1,53 | 36,72 | 51,41 | 29,38 |
| římsa pravá | 25,00 | 0,45 | 11,25 | - | - |
| římsa levá | 25,00 | 0,29 | 7,25 | - | - |
| 2 x svodidlo | | | 1,00 | - | - |
| zábradelní svodidlo | | | 0,50 | - | - |
| celkem | | | | 71,41 | 49,38 |

Tab. 6: Výpočet ostatního stálého zatížení

5.3 Zatížení dopravou

5.3.1 Rozdělení vozovky do zatěžovacích pruhů

| | |
|----------------------------|--|
| skupina pozemní komunikace | 1 |
| šířka vozovky | $w = 11,75 \text{ m}$ |
| počet zatěžovacích pruhů | $n = 3$ |
| šířka zatěžovací plochy | $w_{1,2,3} = 3 \text{ m}$ |
| šířka zbytkového pruhu | $w_z = 11,75 - 3 \cdot 3 = 2,75 \text{ m}$ |



Obr. 12: Rozdělení vozovky do zatěžovacích pruhů

5.3.2 Regulační součinitele pro ČR

| skupina pozemních komunikací | α_{Q1} | α_{Q2} | α_{Q3} | α_{q1} | α_{q2} | α_{qi} ($i > 2$) α_{qr} |
|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---|
| 1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,4 | 1,2 |
| 2 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,45 | 1,6 | 1,6 |

Tab. 7: Regulační součinitelé α pro ČR

5.3.3 Roznos zatížení

Zatížení bude uvažováno jako rovnoměrné po celé dotykové ploše kola. Roznos zatížení přes vozovkové souvrství bude uvažován pod úhlem 45° do střednicové roviny horní desky komory.

5.3.4 Modely zatížení

Model zatížení LM1

Skládá se ze dvou dílčích soustav:

- soustředěné zatížení od dvojnápravy TS
- rovnoměrné zatížení UDL

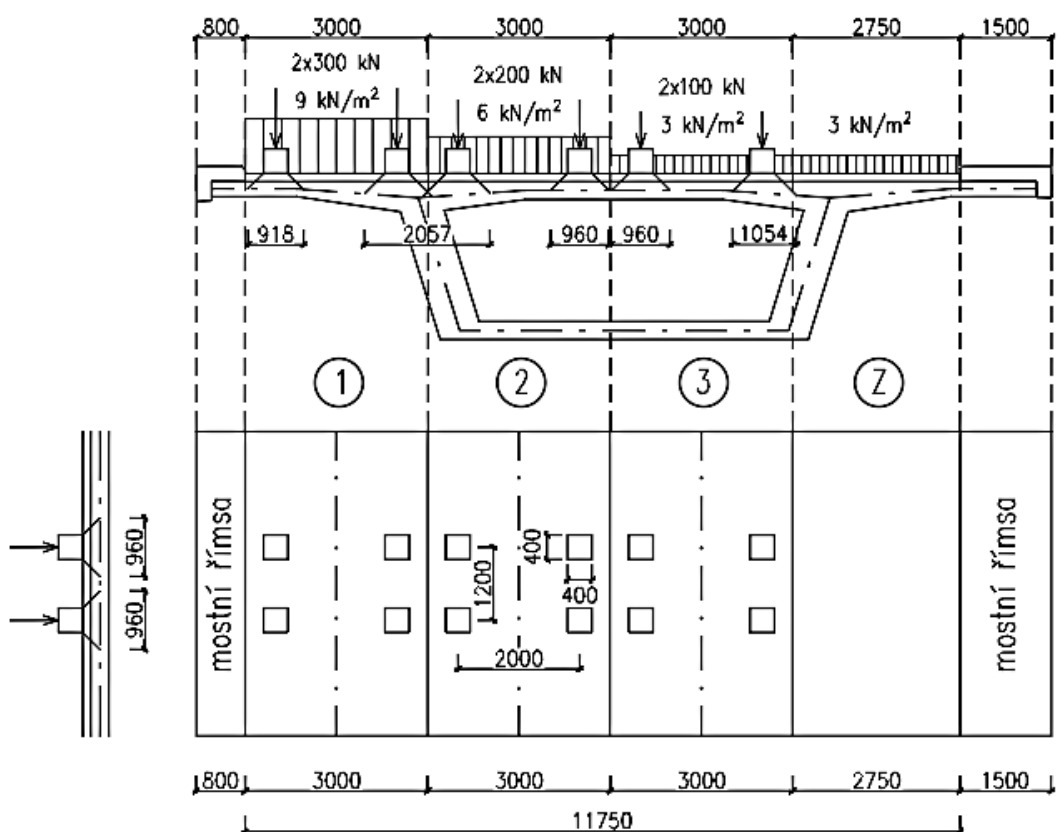
| umístění | dvojnáprava (TS) | rovnoměrné z. (UDL) |
|------------------|------------------|----------------------------------|
| | Q_{ik} [kN] | q_{ik} [kN/m ²] |
| pruh č. 1 | 300 | 9,0 |
| pruh č. 2 | 200 | 2,5 |
| pruh č. 3 | 100 | 2,5 |
| ostatní pruhy | 0 | 2,5 |
| zbývající plocha | 0 | 2,5 |

Tab. 8: Charakteristické hodnoty zatížení

Charakteristické hodnoty zatížení jsou již uvedeny včetně dynamického součinitele.

| pruh | b [m] | počet náprav | $\alpha_{Q1} \cdot Q_{ik}$ [kN] | A_{kola} [m ²] | $0,5 \cdot Q_{ik} / A_{kola}$ [kN/m ²] | $\alpha_{q1} \cdot q_{ik}$ [kN/m ²] |
|------|----------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|---|--|
| 1 | 3,00 | 2 | 300 | 0,9216 | 162,76 | 9,00 |
| 2 | 3,00 | 2 | 200 | 0,9216 | 108,51 | 6,00 |
| 3 | 3,00 | 2 | 100 | 0,9216 | 54,25 | 3,00 |
| z | 2,75 | - | - | - | - | 3,00 |

Tab. 9: Charakteristické hodnoty zatížení LM1 s regulačními součiniteli



Obr. 13: Umístění LM1 na řešenou komunikaci

Model zatížení LM3 (pro dálnice, rychlostní komunikace a vybrané trasy)

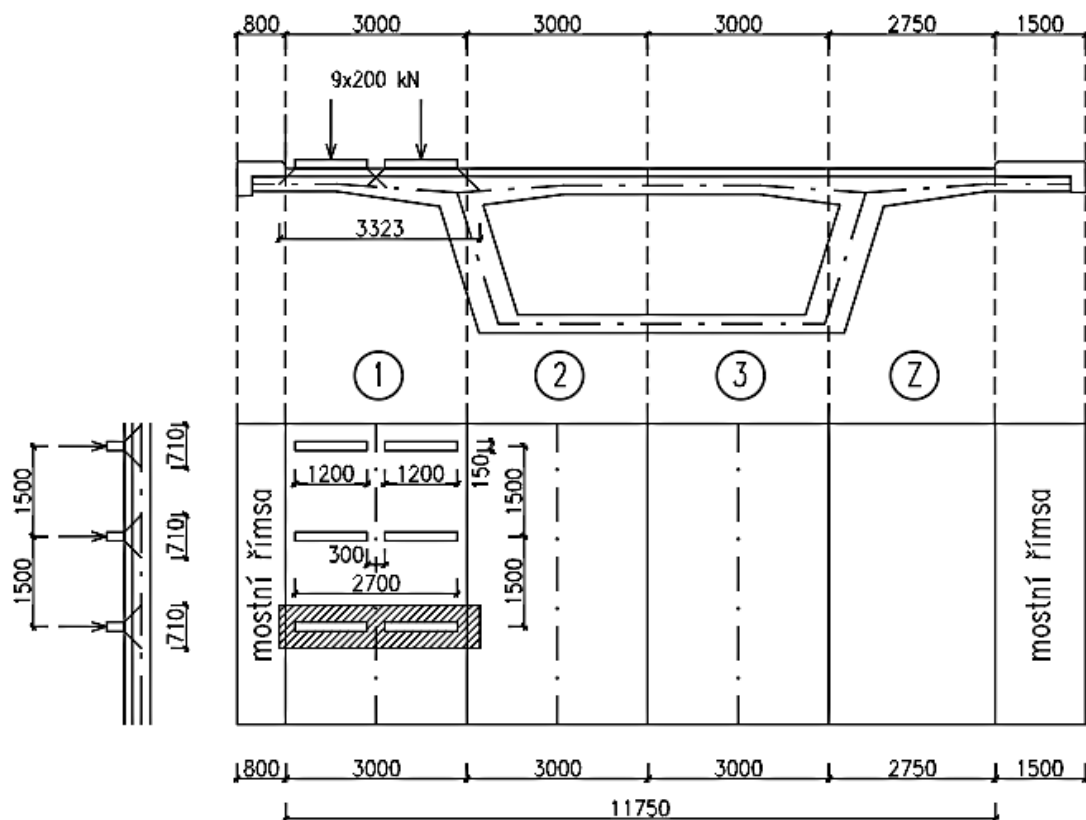
| označení | celková tíha vozidla | šířka vozidla | skladba náprav | vzdálenost náprav |
|----------|-------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1800/200 | 1800 kN | 3 m | 9 po 200 kN | 1,5 m |
| 3000/240 | 3000 kN | 4,5 m | 12 po 240 kN 1 po 120 kN | |

Tab. 10: Požité třídy zvláštních vozidel

| označení, celková tíha | 1800/200, 1800 kN | 3000/240, 3000 kN |
|---------------------------|---|--|
| umístění zatížení | zvláštní vozidlo se pohybuje jako jediné vozidlo v pruhu 1 | zvláštní vozidlo se pohybuje v ideální stopě všech zat. pruhů (možná odchylka $\pm 0,5$ m) |
| kombinace zatížení | v pruhu 2 (a dalších) se uvažuje jen UDL z LM1 ($\alpha_{q1} \cdot q_{ik}$) | po celé délce mostu musí být vyloučena veškerá ostatní doprava |
| rychlost | normální (≤ 70 km/h) | nízká (≤ 5 km/h) |
| dynamický součinitel | $\phi = 1,25$ | $\phi = 1,05$ |
| poznámka | při přejezdu zvláštního vozidla nebude povolen souběžný provoz vozidel nad 5t | jediné vozidlo na mostě |

Tab. 11: Zvláštní vozidla pro dálnice, rychlostní komunikace a vybrané trasy

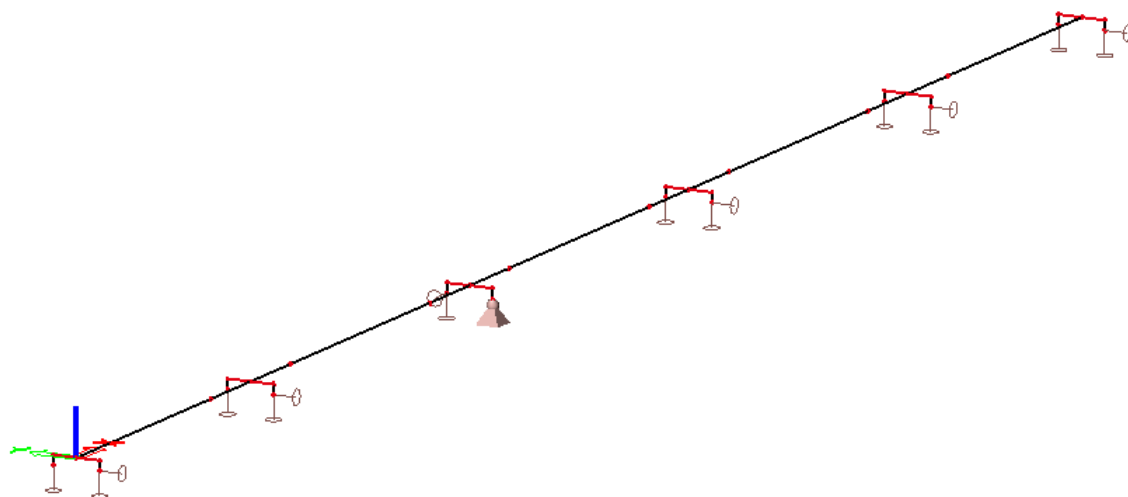
LM3 1800/200



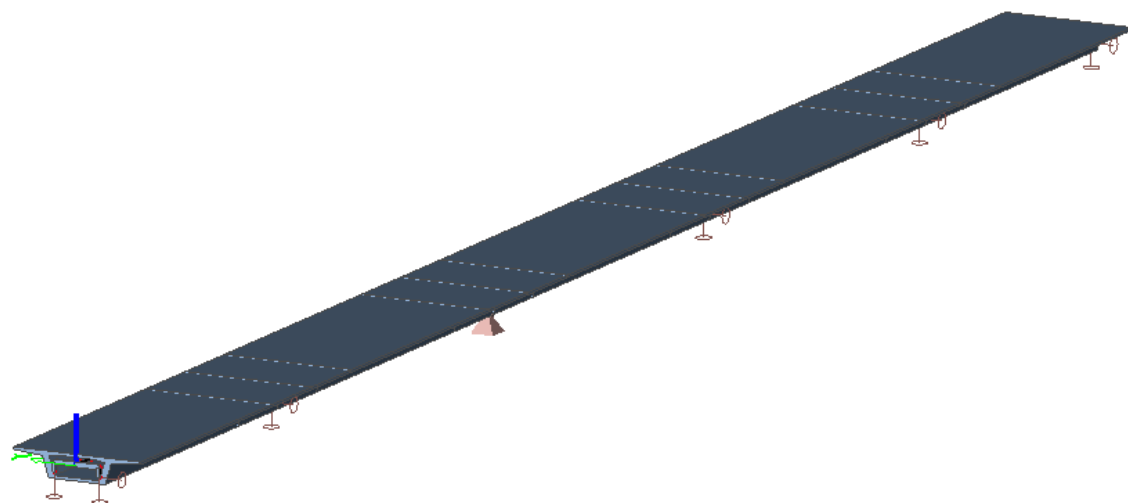
Obr. 14: Umístění LM3 1800/200 na řešenou komunikaci

6 MODEL KONSTRUKCE

Model byl vytvořen v programu Scia Engineer 16, kde byly spočítány vnitřní síly. Pro podélný směr, jeho posouzení a dimenzování byl využit model prutový, pro příčný směr a jeho dimenzování pak model deskostěnový. Uložení je namodelováno tak, aby konstrukce mohla volně dilatovat jak v podélném, tak v příčném směru. Pevná podpora je umístěna u podpory C, konstrukce je tak rozdělena na dva dilatační celky.



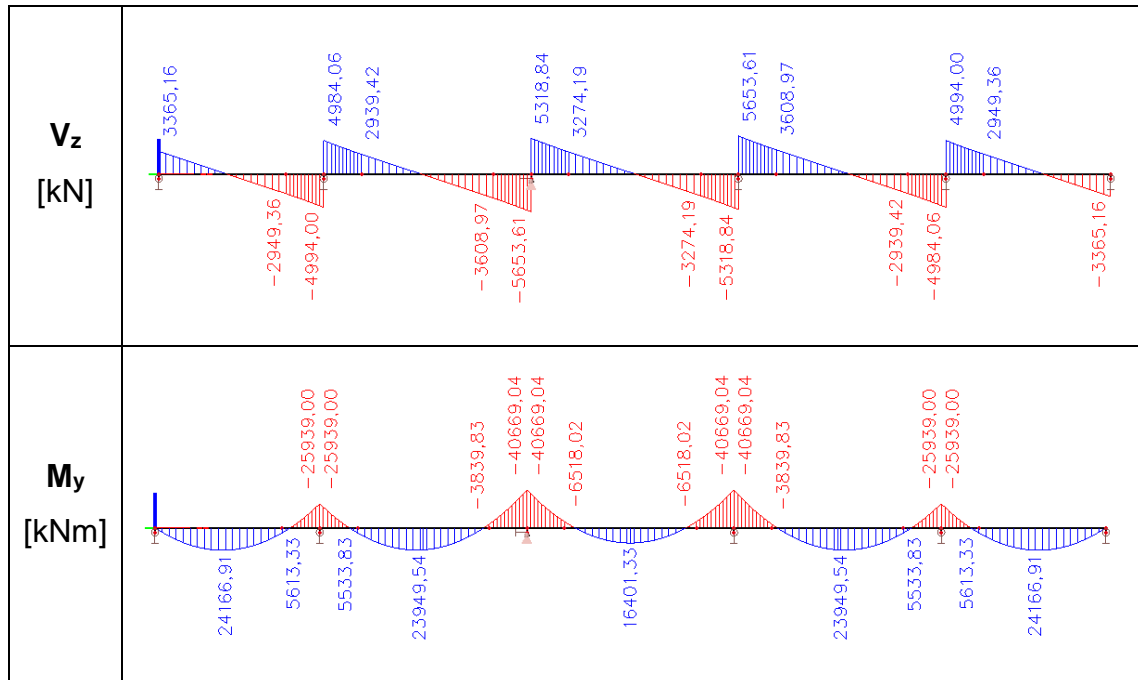
Obr. 16: Prutový model



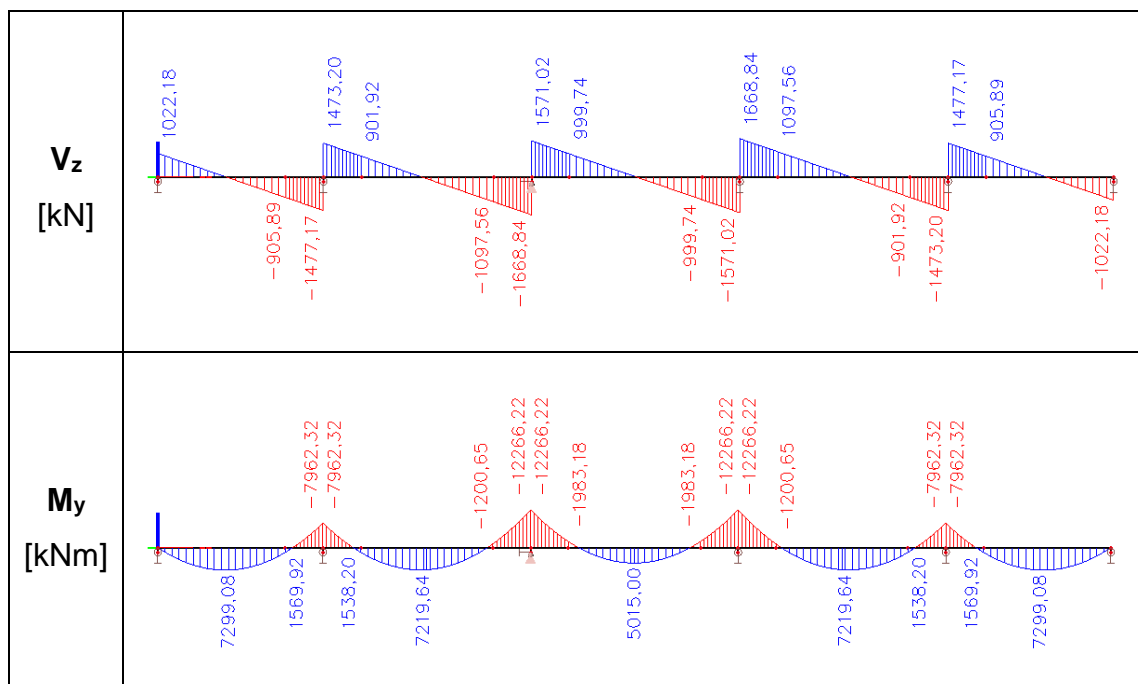
Obr. 17: Pohled na model

7 VNITŘNÍ SÍLY

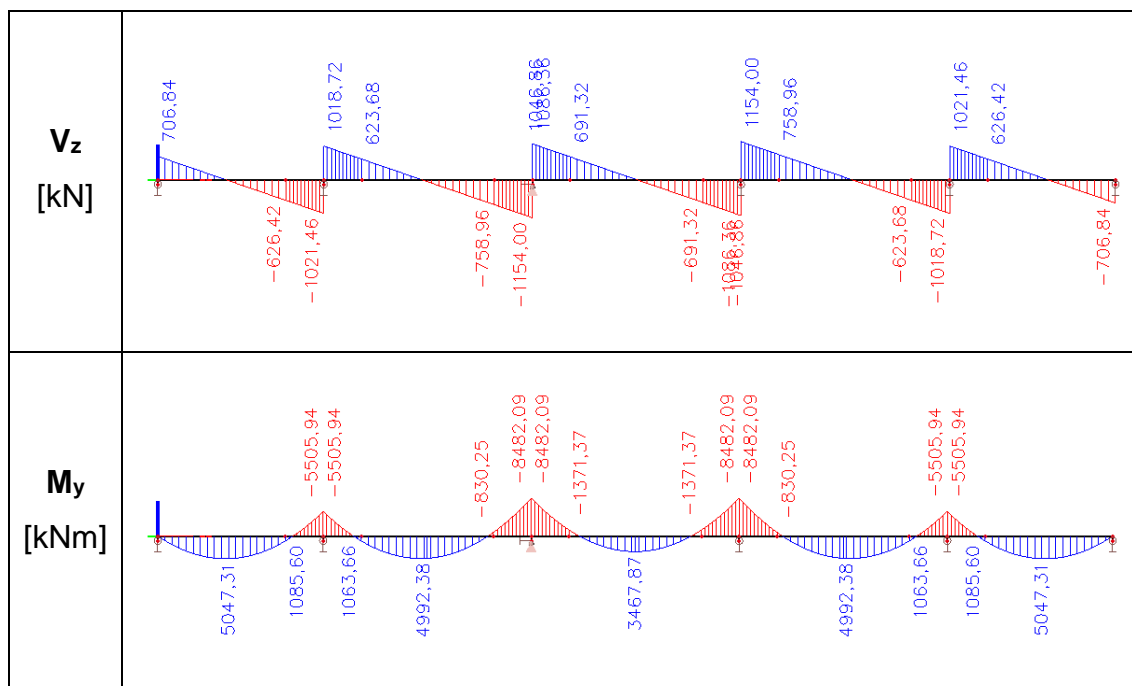
7.1 Vlastní tíha g_{0k}



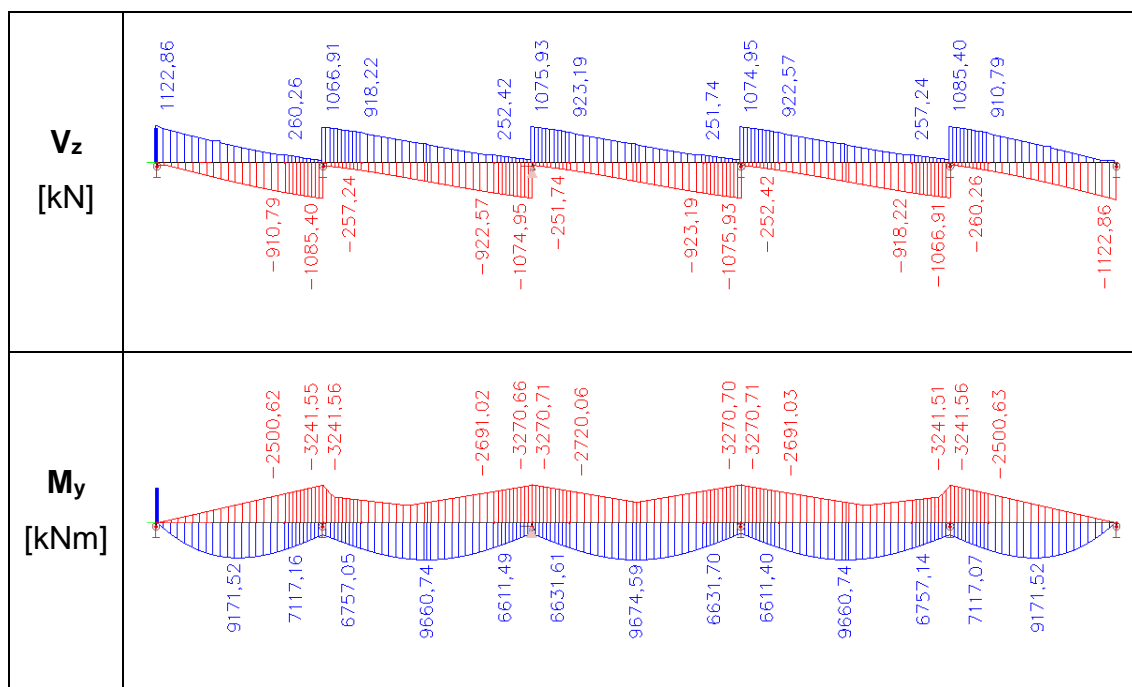
7.2 Ostatní stálé $g_{1k,sup}$



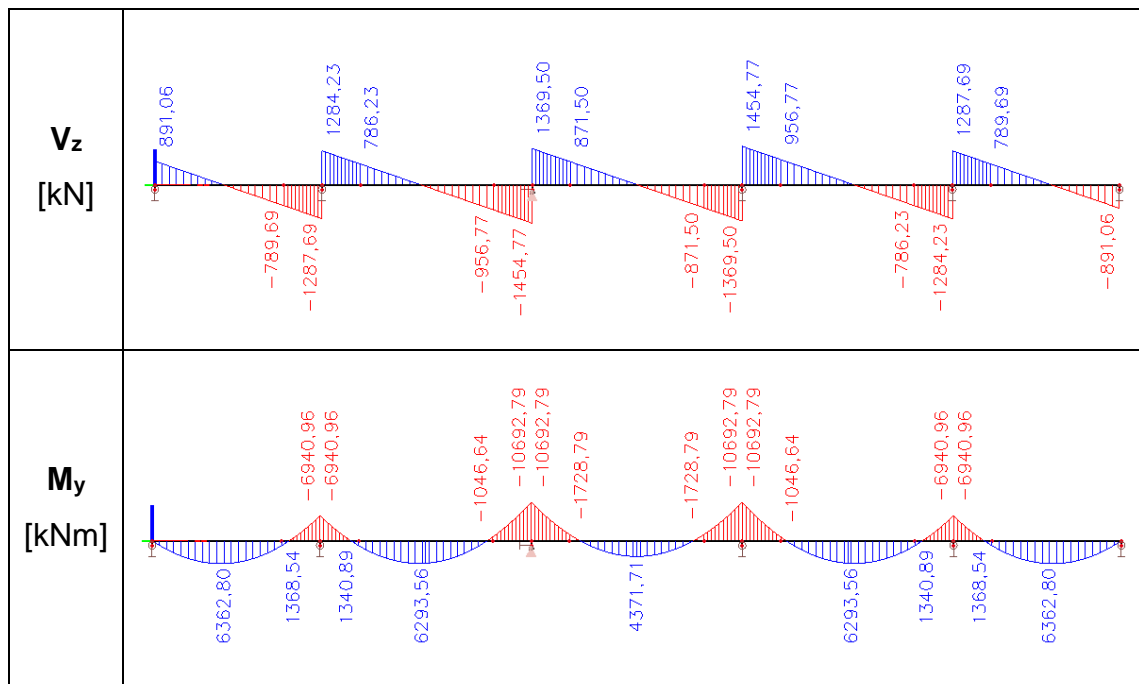
7.3 Ostatní stálé g1k,inf



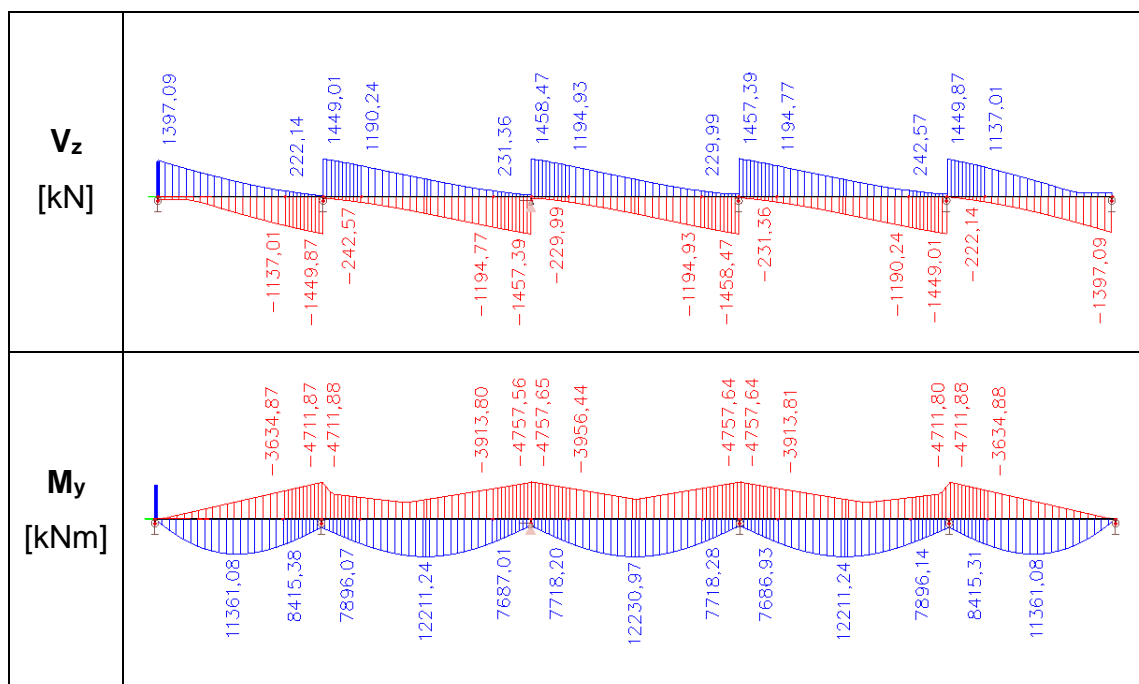
7.4 LM1 – TS



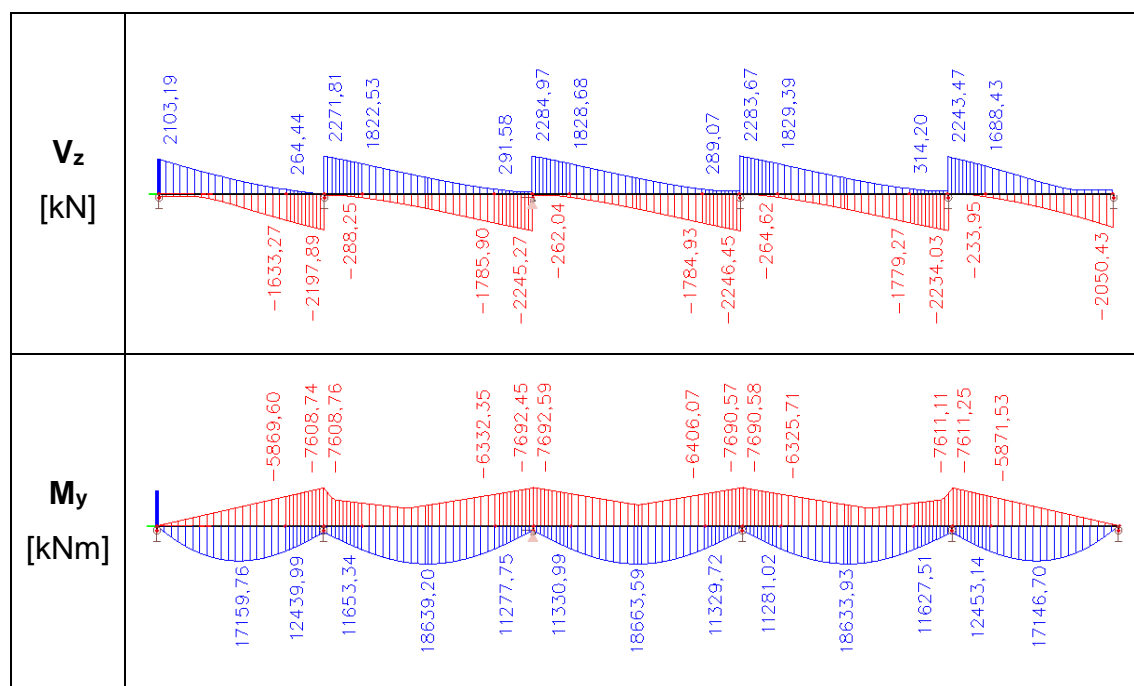
7.5 LM1 - UDL



7.6 LM3 - 1800/200



7.7 LM3 - 3000/240



8 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH PŘEDPĚTÍ

Pro předběžný návrh předpětí byla využita metoda vyrovnání zatížení stálého. Doporučeno je vyrovnat 80-100% stálého zatížení po proběhnutí krátkodobých ztrát, tedy v čase t_0 . Pro návrh předpětí budou ztráty odhadnuty - krátkodobé 10%, dlouhodobé 15%. Předpětí bude provedeno soudržnými kabely vedenými uvnitř šikmých stěn komorové konstrukce.

Výpočet spojitého zatížení od předpětí (platí pro $f/L \leq 1/15$):

$$p = \frac{8 \cdot P_i \cdot f_i}{L_i^2}$$

Stálé zatížení pro návrh předpětí:

$$g_k = g_{0k} + g_{1k} = 229,70 + 56,72 = 286,42 \text{ kN/m}$$

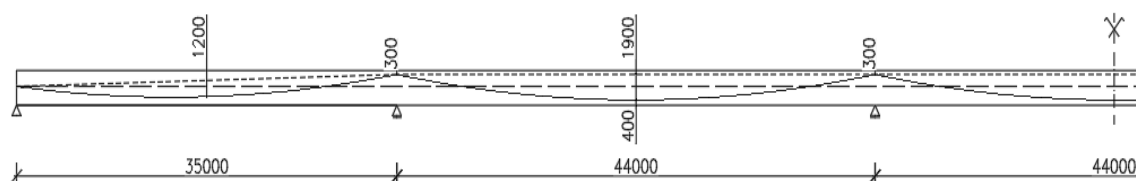
Maximální přípustné napětí během předpínání:

$$\sigma_{p,\max} = 1476 \text{ MPa}$$

Maximální napětí při zakotvení:

$$\sigma_{p0,\max} = 1394 \text{ MPa}$$

8.1 Návrh dráhy teoretického kabelu



Obr. 18: Dráha teoretického kabelu

Pozn.: Svislé složky předpětí se přenesou přímo do podpor, nejsou pro předběžný návrh důležité, a proto nejsou vyčísleny. Excentricita na okrajích konstrukce byla zvolena hodnotou $e = 0$, jelikož případné momenty v krajních opěrách by nepříznivě ovlivnily vyrovnění.

Pro vyrovnění stálého zatížení je potřeba, aby hodnoty zatížení od předpětí p_1 a p_2 byly stejné. To je základní předpoklad pro výpočet vzepětí f_1 a následného určení předpínací síly.

$$p_1 = p_2$$

$$\frac{8 \cdot P_1 \cdot f_1}{L_1^2} = \frac{8 \cdot P_2 \cdot f_2}{L_2^2} \rightarrow f_1 = f_2 \cdot \frac{L_1^2}{L_2^2}$$

$$f_2 = 1900 \text{ mm}$$

$$f_1 = 1,9 \cdot \frac{35^2}{44^2} = 1,2$$

$$f_1 = 1200 \text{ mm}$$

Ekvivalentní zatížení od předpětí je nejdříve počítáno pro sílu 1000 kN. Pomocí koeficientu k je potom určena potřebná předpínací síla.

$$p_1 = \frac{8 \cdot P_1 \cdot f_1}{L_1^2} = \frac{8 \cdot 1000 \cdot 1,2}{35^2} = 7,837 \text{ kN/m}$$

$$p_2 = \frac{8 \cdot P_2 \cdot f_2}{L_2^2} = \frac{8 \cdot 1000 \cdot 1,9}{44^2} = 7,851 \text{ kN/m}$$

$$g_k = 286,42 \text{ kN/m}$$

$$k = \frac{g_k}{p} = \frac{286,42}{7,851} = 36,482$$

$$P_0 = 1000 \cdot k = 1000 \cdot 36,482 = 36\,482 \text{ kN}$$

napětí po krátkodobých ztrátách:

$$\sigma_{pm0} = 1328,40 \text{ MPa}$$

nutná plocha předpínací výztuže:

$$A_p = \frac{P_0}{\sigma_{pm0}} = \frac{36482 \cdot 10^3}{1328,40 \cdot 10^6} = 0,027463 \text{ m}^2$$

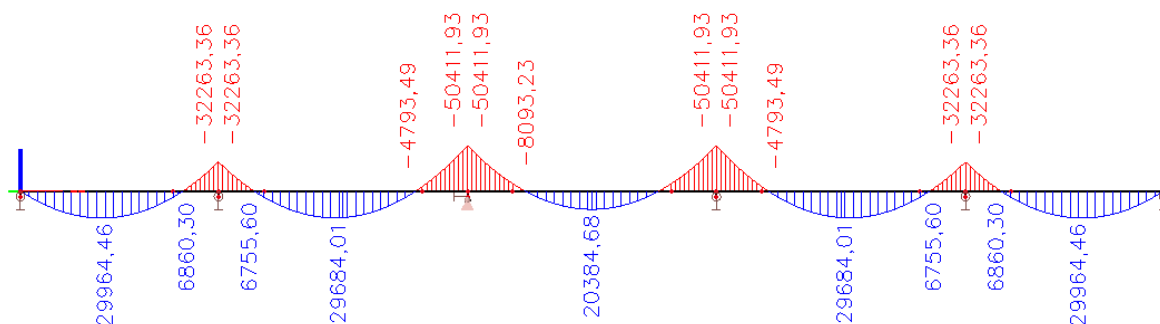
nutný počet lan:

$$n = \frac{A_p}{A_{p1}} = \frac{0,027463}{0,00015} = 183,1$$

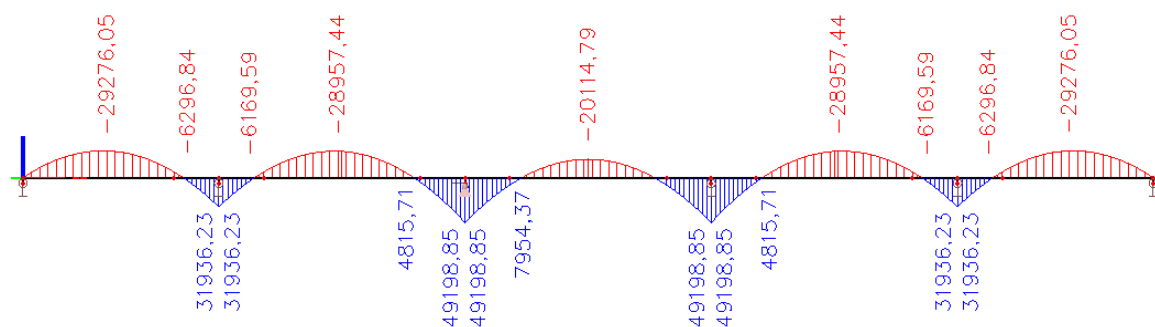
návrh:

8 kabelů po 23 lanech - 184 lan celkem

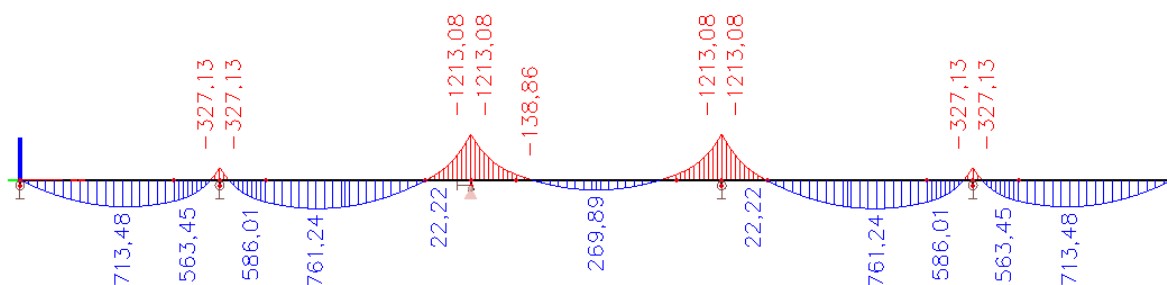
8.2 Přehled ohybových momentů



Obr. 19: Ohybové momenty od stálého zatížení



Obr. 20: Ohybové momenty od předpětí v čase t_0



Obr. 21: Ohybové momenty po vyrovnání zatížení

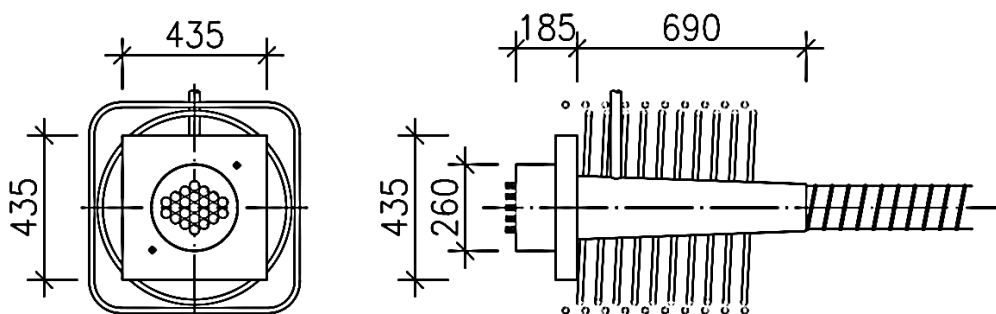
9 PŘESNÝ NÁVRH PŘEDPĚTÍ

Kabely budou v komoře rozmístěny symetricky, každému kabelu v jedné stěně bude odpovídat kabel ve stěně druhé. V každé stěně budou tedy 4 kabely (dvě dvojice). Rozmístění bude provedeno tímto způsobem, aby bylo zaručeno, že těžiště kabelů se nachází v ose komory.

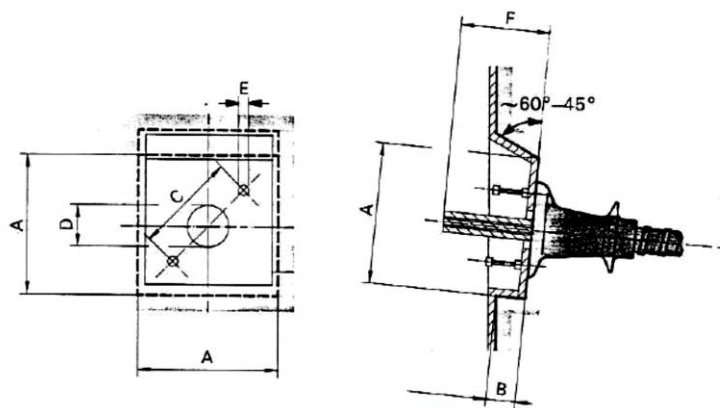
Přesný návrh předpětí je proveden v programu AutoCad 2017. Kvůli provádění je parabolické vedení kabelu nahrazeno úseky přímými a úseky z kružnicových oblouků tak, aby co nejvíce kopírovaly dráhu teoretického kabelu.

9.1 Základní charakteristiky předpínací výztuže

| | |
|------------------------------|---|
| výrobce: | VSL International Ltd. |
| typ lana: | Y1860 - S7 - 15,7, 15 mm (0,6") S; 6 - 31 |
| nominální průměr: | 15,7 mm |
| nominální průřez: | 150 mm ² |
| mez kluzu: | 1640 MPa |
| zaručená pevnost: | 1860 MPa |
| modul pružnosti: | 195 GPa |
| průměr kabelového kanálku: | 130/136 mm |
| relaxace po 1000h, při 20°C: | max 2,5 %p |
| počet lan v kabelu: | 23 |



Obr. 22: Kotva VSL typ E 6-31



Obr. 23: Označení rozměrů výklenku pro aktivní kotvy - typ E

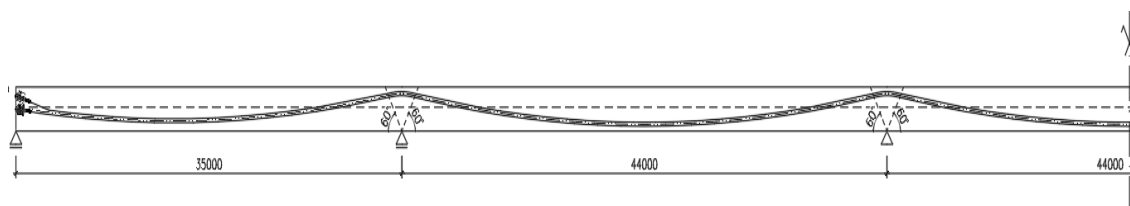
Kotvení typ E, E_c - Prámence 0,6", $A_p=150\text{mm}^2$

| | 6-1 | 6-2 | 6-3 | 6-4 | 6-7 | 6-12 | 6-19 | 6-22 | 6-31 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| A | 200 | 240 | 320 | 320 | 400 | 500 | 500 | 500 | 650 |
| B | 110 | 120 | 120 | 120 | 130 | 140 | 170 | 170 | 200 |
| C | | | 125 | 150 | 190 | 250 | 300 | 340 | 410 |
| Ø D | 40 | 60 | 70 | 80 | 100 | 130 | 170 | 190 | 220 |
| Ø E | | | 12 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| F | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |

Uvedené rozměry rozměry jsou v mm

Tab. 14: Rozměry výklenků pro aktivní kotvy – typ E

9.2 Skutečná geometrie kabelových drah



Obr. 24: Skutečná dráha kabelu

10 FÁZE VÝSTAVBY

Výstavba bude probíhat po částech ve směru staničení, tedy od opěry A po opěru F, na výsuvné skruži. Skruž bude umístěna vždy přes celé pole a ještě na konzole přesahující přes podpěru, kde tedy budou pracovní spáry. Aby se ohybové momenty ve fázích výstavby výrazně nelišily od momentů na definitivní konstrukci, mají být pracovní spáry ideálně v místě nulového ohybového momentu, což odpovídá $1/4 - 1/5$ rozpětí pole. Proto bude ukončení fáze a zároveň i pracovní spára totožná s délkou náběhu, který je 8 m na každou stranu od osy uložení na podpěru. Skruž bude umístěna vždy 3 m od konce konzoly. Při výpočtu je uvažována její tíha hodnotou 60 kN/m.

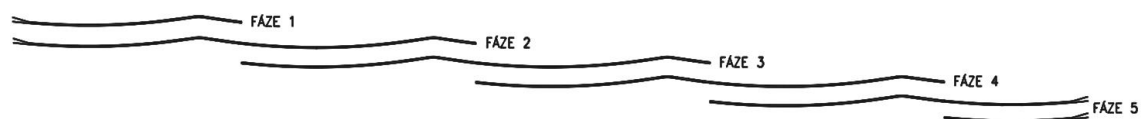
Čerstvý beton bude do bednění ukládán po vrstvách, a to od volného konce směrem k pracovní spáře tak, aby vlivem deformace skruže nedošlo k oddělení čerstvého betonu v pracovní spáře od předchozí části konstrukce. Budou použity ponorné vibrátory a k dosažení požadovanému tvaru povrchu mostovky budou využity vibrační lišty.

Vlivem stlačení bednění, průhybu nosníků skruže, stlačení podpěr atd. by mělo být bednění před betonáží upraveno, a to tak, že se provede jeho nadvýšení cca o 5 cm. V této diplomové práci není nadvýšení počítáno, ale teoreticky při vyčíslení deformace by se mělo uvažovat se zatížením na konci životnosti (100% stálé + 50% nahodilé).

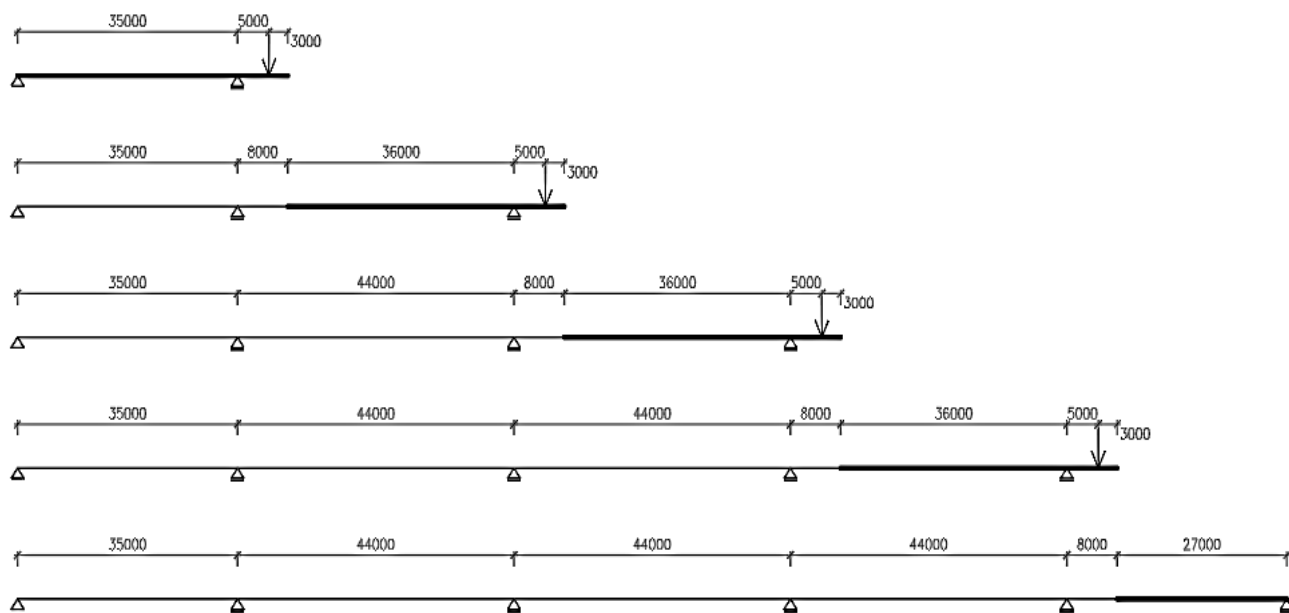
V každé pracovní spáře bude spojováno 50% předpínací výztuže. Další kabely procházejí spárou bez přerušení a spojují se až v následující fázi.

| t [den] | fáze výstavby |
|------------|--------------------------|
| 0 | betonáž pole 1 |
| 7 | předepnutí pole 1 |
| 8-12 | odbednění, přesun skruže |
| 13 | betonáž pole 2 |
| 20 | předepnutí pole 2 |
| 21-25 | odbednění, přesun skruže |
| 26 | betonáž pole 3 |
| 33 | předepnutí pole 3 |
| 34-38 | odbednění, přesun skruže |
| 39 | betonáž pole 4 |
| 46 | předepnutí pole 4 |
| 47-51 | odbednění, přesun skruže |
| 52 | betonáž pole 5 |
| 59 | předepnutí pole 5 |
| 60-64 | odbednění, přesun skruže |
| 180 | ostatní stálé zatížení |
| 270 | uvedení do provozu |
| 36 500 | konec životnosti |

Tab. 15: Průběh výstavby ve dnech

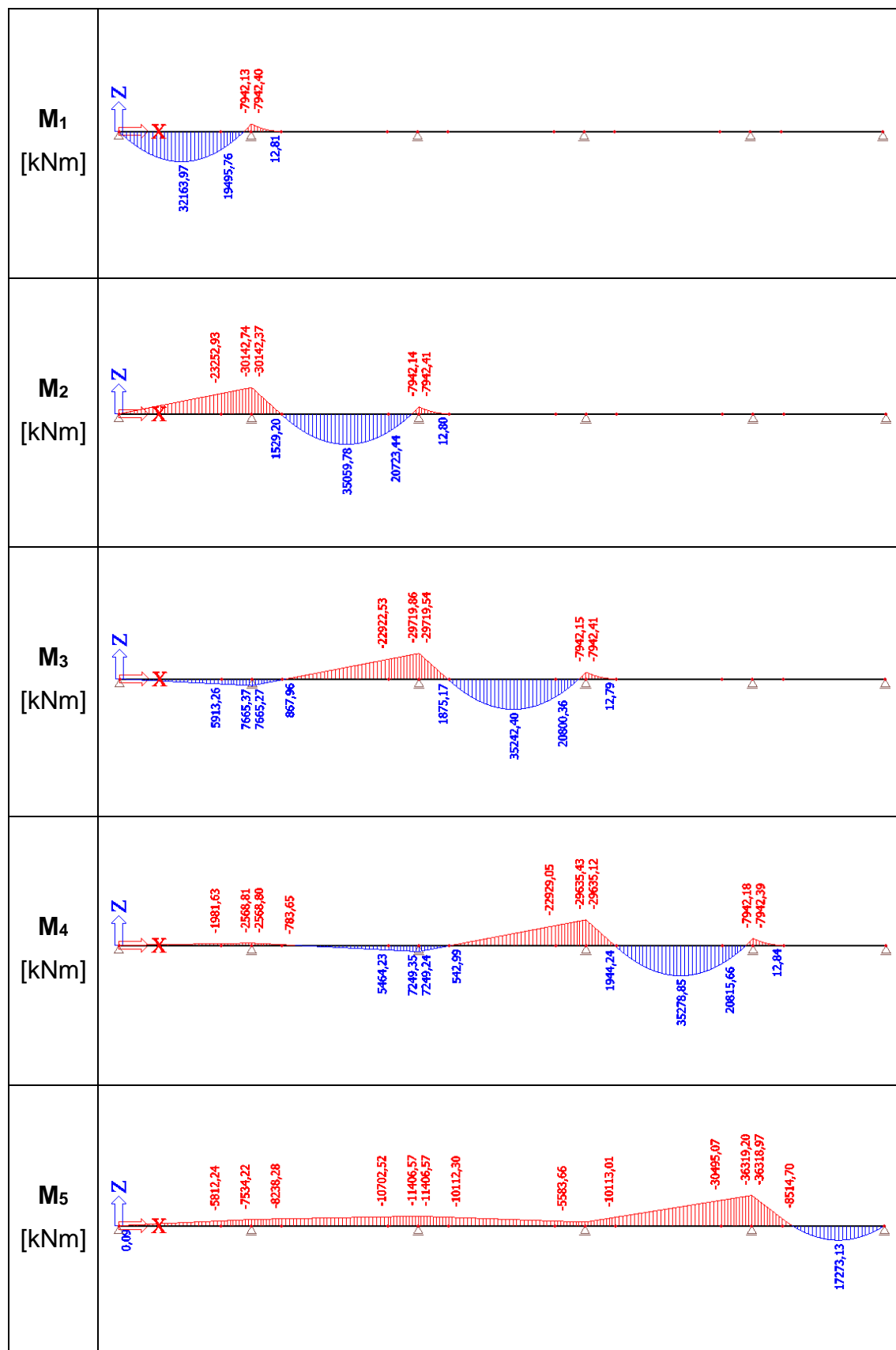


Obr. 25: Fáze napínání kabelů



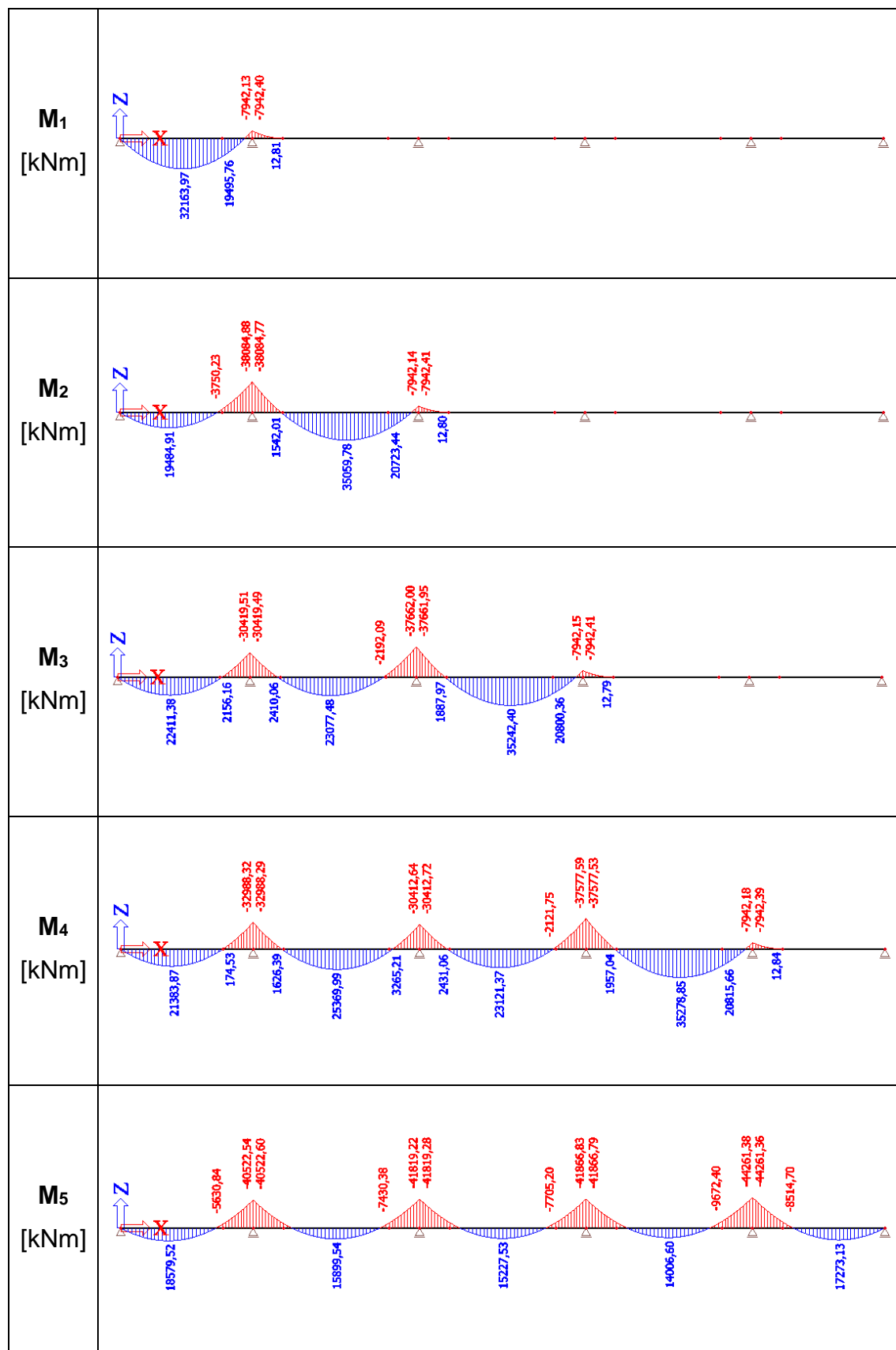
Obr. 26: Fáze výstavby

10.1 Ohybové momenty - dotvarování betonu ve fázích výstavby



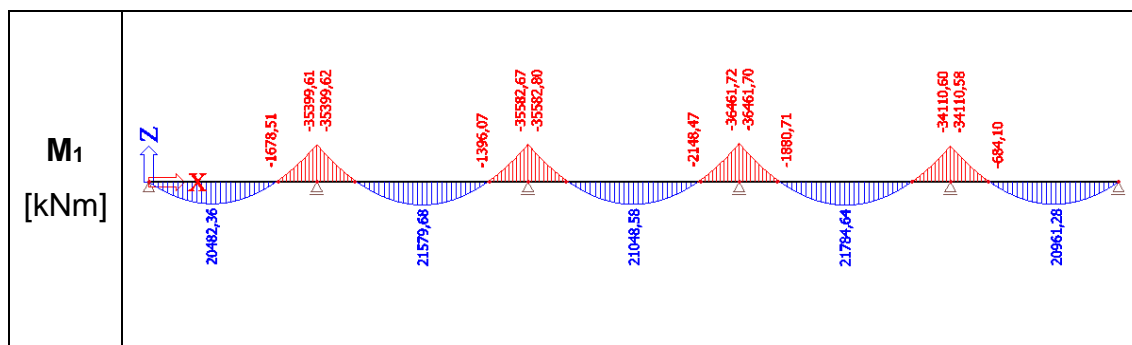
Tab. 16: Průběh ohybových momentů TDA

10.2 Ohybové momenty fází výstavby (bez vlivu TDA)



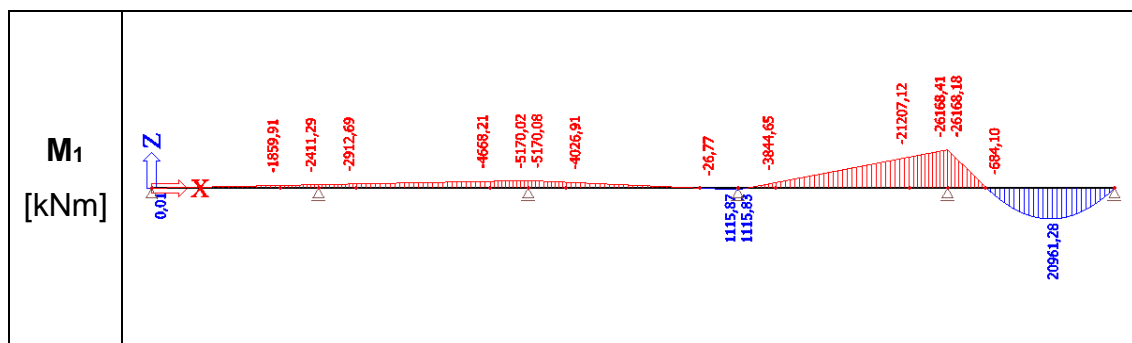
Tab. 17: Průběh ohybových momentů (bez vlivu TDA)

10.3 Ohybové momenty v čase zatížení dopravou (bez vlivu TDA)



Tab. 18: Průběh ohybových momentů v čase zatížení dopravou (bez vlivu TDA)

10.4 Ohybové momenty- dotvarování betonu v čase zatížení dopravou



Tab. 19: Průběh ohybových momentů v čase zatížení dopravou (s vlivem TDA)

11 ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ

11.1 Okamžité ztráty předpětí

Jako okamžité (výrobní) jsou uvažovány ztráty:

- třením kabelu a stěn kabelového kanálku
 - koeficient tření v zakřiveném úseku $\mu = 0,2$
 - nezamýšlená úhlová změna na 1m kabelu: $k = 0,005$
- pokluzem při kotvení
 - hodnotu pokluzu výrobce (VSL) udává: 6 mm
- pružným přetvořením betonu při postupném napínání
- relaxací předpínací výztuže

11.1.1 Celkové krátkodobé ztráty

| ztráty | x [m] | celkem $\Delta\sigma$ [MPa] | ztráty [%] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] |
|-------------|----------|--------------------------------|---------------|-------------------------|------------------|
| A | 0,0 | 119,10 | 8,1 | 1356,90 | 37450,44 |
| 1/2 1. pole | 17,5 | 62,19 | 4,2 | 1413,81 | 39021,16 |
| B | 35,0 | 138,46 | 9,4 | 1337,54 | 36916,10 |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 157,55 | 10,7 | 1318,45 | 36389,22 |
| C | 79,0 | 115,39 | 7,8 | 1360,61 | 37552,84 |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 154,21 | 10,4 | 1321,79 | 36481,40 |
| D | 123,0 | 115,70 | 7,8 | 1360,30 | 37544,28 |
| 1/2 4. pole | 145,0 | 154,21 | 10,4 | 1321,79 | 36481,40 |
| E | 167,0 | 138,46 | 9,4 | 1337,54 | 36916,10 |
| 1/2 5. pole | 184,5 | 91,62 | 6,2 | 1384,38 | 38208,89 |
| F | 202,0 | 147,91 | 10,0 | 1328,09 | 36655,28 |

Tab. 20: Rekapitulace krátkodobých ztrát

Pozn.: Krátkodobé ztráty jsou odečteny z programu Scia Engineer 16. Kabely byly namodelovány ve fázích výstavby.

11.2 Dlouhodobé ztráty předpětí

Jako dlouhodobé jsou uvažovány ztráty:

- smršťováním betonu
- pružným přetvořením betonu
- relaxací předpínací výztuže
- dotvarováním betonu

Jsou uvažovány následující časy:

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| ukončení ošetřování betonu: | $t_s = 5$ dní |
| předepnutí nosníku po vybetonování: | $t_0 = 7$ dní |
| zavedení ostatního stálého zatížení: | $t_g = 6$ měsíců |
| uvedení do provozu: | $t_q = 9$ měsíců |
| ukončení relaxace výztuže: | $t_r = 57$ let |
| životnost konstrukce: | $t_\infty = 100$ let = 36 500 dní |

11.2.1 Ztráty smršťováním betonu

$$\Delta\sigma_{ps} = E_p \cdot \varepsilon_{cs}$$

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

vysychání betonu

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

autogenní smršťování

$$\varepsilon_{ca}(t, t_s) = \beta_{as}(t, t_s) \cdot \varepsilon_{ca,\infty}$$

○ vysychání betonu

plocha oslabeného průřezu:

$$A_c = 9,188 \text{ m}^2$$

obvod prvku vystavený vysychání:

$$u = 30,747 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 9,188}{30,747} = 0,598 \text{ m} = 598 \text{ mm} \geq 500 \text{ mm} \rightarrow k_h = 0,7$$

$$\text{relativní vlhkost } RH = 80 \% \rightarrow \varepsilon_{cd,0} = 0,255 \text{ ‰}$$

$$\beta_{ds}(t_0, t_s) = \frac{t_0 - t_s}{(t_0 - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = \frac{10 - 7}{(10 - 7) + 0,04 \cdot \sqrt{598^3}} = 0,0051$$

$$\beta_{ds}(t_\infty, t_s) = \frac{t_\infty - t_s}{(t_\infty - t_0) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = \frac{36500 - 7}{(36500 - 10) + 0,04 \cdot \sqrt{598^3}} = 0,984$$

$$\beta_{ds}(t_\infty, t_0) = \beta_{ds}(t_\infty; t_s) - \beta_{ds}(t_0; t_s)$$

$$\beta_{ds}(t_\infty, t_0) = 0,984 - 0,0051 = 0,979$$

$$\varepsilon_{cd}(t_\infty, t_0) = \beta_{ds}(t_\infty; t_0) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

$$\varepsilon_{cd}(t_\infty, t_0) = 0,979 \cdot 0,7 \cdot 0,000255 = 1,748 \cdot 10^{-4}$$

○ autogenní smršťování betonu

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = -2,5 \cdot (35 - 10) \cdot 10^{-6} = -6,25 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_{as}(t_0) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t_0}} = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{10}} = 0,469$$

$$\beta_{as}(t_\infty) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t_\infty}} = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{36500}} = 1,000$$

$$\varepsilon_{ca}(t_0) = \beta_{as}(t_0) \cdot \varepsilon_{ca,\infty} = 0,4687 \cdot (-6,25 \cdot 10^{-5}) = -2,929 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{ca}(t_\infty) = \beta_{as}(t_\infty) \cdot \varepsilon_{ca,\infty} = 1 \cdot (-6,25 \cdot 10^{-5}) = -6,250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{ca}(t_\infty, t_0) = \varepsilon_{ca}(t_\infty) - \varepsilon_{ca}(t_0) = -6,250 \cdot 10^{-5} - (-2,929 \cdot 10^{-5}) = -3,321 \cdot 10^{-5}$$

Celkové ztráty od smršťování

$$\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0) = \varepsilon_{cd}(t_\infty, t_0) + \varepsilon_{ca}(t_\infty, t_0)$$

$$\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0) = 1,748 \cdot 10^{-4} + 3,321 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0) = 2,08 \cdot 10^{-4} = 0,208 \text{ ‰}$$

$$\Delta\sigma_{ps}(t_\infty, t_0) = E_p \cdot \varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$$

$$\Delta\sigma_{ps}(t_\infty, t_0) = 195 \cdot 10^3 \cdot 2,08 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta\sigma_{ps}(t_\infty, t_0) = \mathbf{40,56 \text{ MPa}}$$

11.2.2 Ztráty relaxací výztuže

$$t_0 = 10 \text{ dní} = 240 \text{ h}$$

$$t_\infty = 36\,500 \text{ dní} = 876\,000 \text{ h}$$

$$k_r(t_\infty, t_0) = -0,66 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,09 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t_\infty - t_0}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1 - \mu)}$$

$$\Delta\sigma_{pr}(t_\infty, t_0) = k_r \cdot \sigma_{p\mu}$$

| ztráty | σ_{pm0} [MPa] | μ | k_r | $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa] |
|-------------|-------------------------|----------|--------|------------------------------|
| A | 1356,90 | 0,729516 | 0,0495 | 67,12 |
| 1/2 1. pole | 1413,81 | 0,760113 | 0,0559 | 79,06 |
| B | 1337,54 | 0,719108 | 0,0474 | 63,46 |
| 1/2 2. pole | 1318,45 | 0,708844 | 0,0455 | 60,03 |
| C | 1360,61 | 0,731511 | 0,0499 | 67,85 |
| 1/2 3. pole | 1321,79 | 0,710640 | 0,0459 | 60,62 |
| D | 1360,30 | 0,731344 | 0,0498 | 67,79 |
| 1/2 4. pole | 1321,79 | 0,710640 | 0,0459 | 60,62 |
| E | 1337,54 | 0,719108 | 0,0474 | 63,46 |
| 1/2 5. pole | 1384,38 | 0,744290 | 0,0525 | 72,66 |
| F | 1328,09 | 0,714027 | 0,0465 | 61,74 |

Tab. 21: Ztráty relaxací výztuže

11.2.3 Ztráty dotvarováním betonu

$$\Delta\sigma_{pc} = E_p \cdot \varepsilon_{cc}(t_0, t_\infty)$$

$$\Delta\sigma_{pc} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp(g+p)}}{E_{cm}} \cdot \varphi(t_0, t_\infty)$$

$$\sigma_{cp(g+p)} = \frac{P_{mo}}{A_c} + \frac{P_{mo}}{I} \cdot e_{pr}^2 + \frac{M_{g0k}}{I} \cdot e_{pr}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 35 + 8 = 43 \text{ MPa}$$

$$RH = 80 \% \quad h_0 = 598 \text{ mm}$$

$$\varphi(t_\infty, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_{c(t_\infty, t_0)}$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta_{(f_{cm})} \cdot \beta_{(t_0)}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - 80/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{598}} \cdot 0,866 \right] \cdot 0,960 = 1,188$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} = \left[\frac{35}{43} \right]^{0,7} = 0,866$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} = \left[\frac{35}{43} \right]^{0,2} = 0,960$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} = \left[\frac{35}{43} \right]^{0,5} = 0,902$$

$$\beta_{(f_{cm})} = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{36,34}} = 2,787$$

$$f_{cm(t=28 \text{ dní})} = 36,34 \text{ MPa}$$

$$\beta_{(t_0)} = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 10^{0,2}} = 0,594$$

$$\varphi_0 = 1,188 \cdot 2,787 \cdot 0,594 = 1,967$$

$$\beta_c(t_\infty, t_0) = \left(\frac{t_\infty - t_0}{\beta_H + t_\infty - t_0} \right)^{0,3} = \left(\frac{876000 - 240}{1552,7 + 876000 - 240} \right)^{0,3} = 0,999$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot 80)^{18}] \cdot 598 + 250 \cdot 0,902 \leq 1500 \cdot 0,902$$

$$\beta_H = 1552,7 \leq 1353$$

$$\varphi(t_\infty, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_{c(t_\infty; t_0)} = 1,967 \cdot 0,999 = 1,965$$

| ztráty | M_{g0k} [kNm] | A_c [m ²] | I [m ⁴] | e_{pr} [m] | P_{m0} [kN] | $\sigma_{cp(g+p)}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{pc}$ [MPa] |
|-------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------|
| A | 0 | 9,188 | 8,2168 | 0 | 37450,44 | 4,08 | 0,46 |
| 1/2 1. pole | 24166,91 | 9,188 | 8,2168 | 0,7510 | 39021,16 | 9,13 | 0,10 |
| B | -25939,00 | 7,405 | 6,2663 | -0,8120 | 36916,10 | 12,23 | 0,14 |
| 1/2 2. pole | 23949,54 | 9,188 | 8,2168 | 1,0070 | 36389,22 | 11,39 | 0,13 |
| C | -40669,04 | 7,272 | 6,1444 | -0,8120 | 37552,84 | 14,57 | 0,16 |
| 1/2 3. pole | 16401,33 | 9,188 | 8,2168 | 1,0070 | 36481,40 | 10,48 | 0,12 |
| D | -40669,04 | 7,272 | 6,1444 | -0,8120 | 37544,28 | 14,57 | 0,16 |
| 1/2 4. pole | 23949,54 | 9,188 | 8,2168 | 1,0070 | 36481,40 | 11,41 | 0,13 |
| E | -25939,00 | 7,405 | 6,2663 | -0,8120 | 36916,10 | 12,23 | 0,14 |
| 1/2 5. pole | 24166,91 | 9,188 | 8,2168 | 0,7510 | 38208,89 | 8,99 | 0,10 |
| F | 0 | 9,188 | 8,2168 | 0 | 36655,28 | 3,99 | 0,04 |

Tab. 22: Ztráty dotvarováním betonu

11.2.4 Celkové dlouhodobé ztráty

$$\Delta\sigma_{p,c+r+s}(t_0; t_\infty) = \frac{\Delta\sigma_{ps} + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \Delta\sigma_{pc}}{1 + \psi_{c,r} \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t_0; t_\infty)]}$$

| ztráty | x [m] | celkem $\Delta\sigma_{ps}$ [MPa] | celkem $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa] | celkem $\Delta\sigma_{pc}$ [MPa] | celkem $\Delta\sigma$ [MPa] | ztráty [%] | $\sigma_{pm\infty}$ [MPa] | $P_{m\infty}$ [kN] |
|-------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------|
| A | 0,0 | 40,56 | 67,12 | 0,46 | 88,33 | -6,0 | 1381,03 | 38116,52 |
| 1/2 1. pole | 17,5 | 40,56 | 79,06 | 0,10 | 96,91 | -6,6 | 1389,61 | 38353,25 |
| B | 35,0 | 40,56 | 63,46 | 0,14 | 85,30 | -6,3 | 1440,67 | 39762,54 |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 40,56 | 60,03 | 0,13 | 82,74 | -6,2 | 1417,95 | 39135,31 |
| C | 79,0 | 40,56 | 67,85 | 0,16 | 88,60 | -6,8 | 1390,85 | 38387,41 |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 40,56 | 60,62 | 0,12 | 83,16 | -6,4 | 1385,41 | 38237,43 |
| D | 123,0 | 40,56 | 67,79 | 0,16 | 88,55 | -6,8 | 1390,80 | 38386,16 |
| 1/2 4. pole | 145,0 | 40,56 | 60,62 | 0,13 | 83,17 | -6,4 | 1385,42 | 38237,70 |
| E | 167,0 | 40,56 | 63,46 | 0,14 | 85,30 | -6,6 | 1387,55 | 38296,43 |
| 1/2 5. pole | 184,5 | 40,56 | 72,66 | 0,10 | 92,13 | -7,1 | 1394,38 | 38484,92 |
| F | 202,0 | 40,56 | 61,74 | 0,04 | 83,93 | -6,4 | 1386,18 | 38258,65 |

Tab. 23: Rekapitulace dlouhodobých ztrát

11.3 Výsledné hodnoty ztrát a napětí

| řez | x [m] | t_0 | | | | t_∞ | | | |
|-------------|----------|----------------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|--------------------|--------------|------------|
| | | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | ztráty [MPa] | ztráty [%] | $\sigma_{pm\infty}$ [MPa] | $P_{m\infty}$ [kN] | ztráty [MPa] | ztráty [%] |
| A | 0,0 | 1356,90 | 37450,44 | 119,10 | 8,1 | 1268,57 | 35012,44 | 207,43 | 14,1 |
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | 39021,16 | 62,19 | 4,2 | 1316,90 | 36346,43 | 159,10 | 10,8 |
| B | 35,0 | 1337,54 | 36916,10 | 138,46 | 9,4 | 1252,24 | 34561,77 | 223,76 | 15,2 |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 1318,45 | 36389,22 | 157,55 | 10,7 | 1235,71 | 34105,71 | 240,29 | 16,3 |
| C | 79,0 | 1360,61 | 37552,84 | 115,39 | 7,8 | 1272,01 | 35107,52 | 203,99 | 13,8 |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 1321,79 | 36481,40 | 154,21 | 10,4 | 1238,63 | 34186,07 | 237,37 | 16,1 |
| D | 123,0 | 1360,30 | 37544,28 | 115,70 | 7,8 | 1271,75 | 35100,22 | 204,25 | 13,8 |
| 1/2 4. pole | 145,0 | 1321,79 | 36481,40 | 154,21 | 10,4 | 1238,62 | 34185,80 | 237,38 | 16,1 |
| E | 167,0 | 1337,54 | 36916,10 | 138,46 | 9,4 | 1252,24 | 34561,77 | 223,76 | 15,2 |
| 1/2 5. pole | 184,5 | 1384,38 | 38208,89 | 91,62 | 6,2 | 1292,25 | 35666,07 | 183,75 | 12,4 |
| F | 202,0 | 1328,09 | 36655,28 | 147,91 | 10,0 | 1244,16 | 34338,74 | 231,84 | 15,7 |

Tab. 24: Výsledné hodnoty ztrát

12 MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

Konstrukce je posouzena z hlediska:

- omezení normálových napětí v betonu a ve výztuži
- omezení vzniku trhlin

Dle ČSN EN 1992 se v rámci možného rozptylu předpínací síly mají uvažovat následující hodnoty:

- | | |
|---|---------------------------------------|
| - střední hodnota předpínací síly: | $P_{mt(x)}$ |
| - horní charakteristická hodnota předpínací síly: | $P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{mt(x)}$ |
| - dolní charakteristická hodnota předpínací síly: | $P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{mt(x)}$ |

V této diplomové práci je uvažováno pouze se zjednodušeně střední hodnotou předpínací síly $P_{mt(x)}$ ($r_{sup} = r_{inf} = 1,0$)

12.1 Omezení normálových napětí

12.1.1 Omezení tlakových napětí v betonu

12.1.1.1 Charakteristická kombinace

Souvisí se vznikem podélných trhlin, které se mohou objevovat, pokud úroveň napětí při charakteristické kombinaci překročí hodnotu:

$$|\sigma_c| \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

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

12.1.1.2 Kvazistálá kombinace

Ve výpočtu je možné uvažovat linearitu dotvarování, pokud je napětí v betonu při této kombinaci menší nebo rovno hodnotě:

$$|\sigma_c| \leq 0,45 \cdot f_{ck}$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

12.1.2 Omezení tahových napětí v betonu

12.1.2.1 Častá kombinace

$$|\sigma_c| \leq f_{ctm}$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

12.1.3 Omezení tahových napětí ve výztuži

Střední hodnota napětí v předpínací výztuži by neměla překročit hodnotu:

$$\sigma_p \leq 0,75 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1860 = 1395 \text{ MPa}$$

| zatížení | značka | | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|-------------|------------------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|
| dopravou | gr1a | TS (dvounápravy) | 0.75 | 0.75 | 0 |
| | | UDL (rovnorné zatížení) | 0.40 | 0.40 | 0 |
| | | chodci a cyklisti | 0.40 | 0.40 | 0 |
| | gr1b (jednotlivá náprava) | | 0 | 0.75 | 0 |
| | gr2 (vodorovné síly) | | 0 | 0 | 0 |
| | gr3 (zatížení chodci) | | 0 | 0.40 | 0 |
| | gr4 (zatížení davem lidí) | | 0 | - | 0 |
| | gr5 (zvláštní vozidla) | | 0 | - | 0 |
| větre | F_{wk} - trvalé návrhové situace | | 0.6 | 0.2 | 0 |
| | - provádění | | 0.8 | - | 0 |
| | F_w^* | | 1.0 | - | 0 |
| teplotou | T_k | | 0.6 | 0.6 | 0.5 |
| sněhem | $Q_{s\eta,k}$ (během provádění) | | 0.8 | - | - |
| staveništní | Q_c | | 1.0 | - | 1.0 |

Tab. 25: Hodnoty součinitelů ψ pro mosty pozemních komunikací

normálové napětí v betonu v horních/dolních vláknech je počítána podle vzorce:

$$\sigma_{c,h/d} = \frac{P_m}{A} + \frac{P_m \cdot e_p}{I} \cdot z_{h/d} + \frac{M}{I} \cdot z_{h/d}$$

12.2 Omezení normálových napětí – fáze výstavby

12.2.1 Fáze 1

| řez | x [m] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | -39021,16 | 0,7510 | 32163,97 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -4,66 | -3,76 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | 35,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -9862,40 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -8,37 | -0,03 | | VYHOVUJE |

Tab. 26: Posouzení napětí fáze 1

12.2.2 Fáze 2

| řez | x [m] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | -39021,16 | 0,7510 | 2260,58 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,32 | -8,88 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | 35,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -68227,6 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | 1,46 | -14,41 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 1318,45 | -36389,22 | 1,0070 | 35059,78 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -3,73 | -4,23 | | VYHOVUJE |
| C | 79,0 | 1360,61 | -37552,84 | -0,8120 | -9862,41 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -8,76 | -0,03 | | VYHOVUJE |

Tab. 27: Posouzení napětí fáze 2

12.2.3 Fáze 3

| řez | x [m] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | -39021,16 | 0,7510 | 26572,56 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -3,85 | -4,71 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | 35,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -22754,14 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -6,20 | -3,21 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 1318,45 | -36389,22 | 1,0070 | 5253,00 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,60 | -9,34 | | VYHOVUJE |
| C | 79,0 | 1360,61 | -37552,84 | -0,8120 | -67381,86 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | 1,27 | -14,34 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 1321,79 | -36481,40 | 1,0070 | 35242,40 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -3,75 | -4,23 | | VYHOVUJE |
| D | 123,0 | 1360,30 | -37544,28 | -0,8120 | -9862,41 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -8,75 | -0,03 | | VYHOVUJE |

Tab. 28: Posouzení napětí fáze 3

12.2.4 Fáze 4

| řez | x [m] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | -39021,16 | 0,7510 | 19915,99 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,88 | -5,85 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | 35,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -35557,13 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -4,04 | -6,36 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 1318,45 | -36389,22 | 1,0070 | 28379,68 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,76 | -5,38 | | VYHOVUJE |
| C | 79,0 | 1360,61 | -37552,84 | -0,8120 | -23163,37 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -6,44 | -3,34 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 1321,79 | -36481,40 | 1,0070 | 11090,11 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,25 | -8,36 | | VYHOVUJE |
| D | 123,0 | 1360,30 | -37544,28 | -0,8120 | -67213,02 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | 1,24 | -14,30 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | 145,0 | 1321,79 | -36481,40 | 1,0070 | 35278,85 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -3,76 | -4,22 | | VYHOVUJE |
| E | 167,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -9862,39 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -8,37 | -0,03 | | VYHOVUJE |

Tab. 29: Posouzení napětí fáze 4

12.2.5 Fáze 5

| řez | x [m] | σ_{pm0} [MPa] | P_{m0} [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | 17,5 | 1413,81 | -39021,16 | 0,7510 | 14704,74 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,13 | -6,75 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | 35,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -48056,85 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -1,94 | -9,44 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | 57,0 | 1318,45 | -36389,22 | 1,0070 | 6253,22 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,45 | -9,16 | | VYHOVUJE |
| C | 79,0 | 1360,61 | -37552,84 | -0,8120 | -53225,85 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -1,20 | -10,82 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | 101,0 | 1321,79 | -36481,40 | 1,0070 | 7379,64 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,29 | -9,00 | | VYHOVUJE |
| D | 123,0 | 1360,30 | -37544,28 | -0,8120 | -46156,09 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -2,43 | -9,06 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | 145,0 | 1321,79 | -36481,40 | 1,0070 | -6297,39 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 2,28 | -11,34 | | VYHOVUJE |
| E | 167,0 | 1337,54 | -36916,10 | -0,8120 | -44261,38 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -2,58 | -8,51 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | 184,5 | 1384,38 | -38208,89 | 0,7510 | 17273,13 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,50 | -6,11 | | VYHOVUJE |

Tab. 30: Posouzení napětí fáze 5

12.3 Omezení normálových napětí – čas t_{∞}

| řez | vlastní tíha | ostatní stálé | gr1a | | | gr5 | | | | předpětí |
|-------------|-----------------|------------------|----------|---------|-----------|----------------|----------|----------------|----------|-----------|
| | | | LM1 - TS | | LM1 - UDL | LM3 - 1800/200 | | LM3 - 3000/240 | | |
| | | | min | max | | min | max | min | max | |
| 1/2 1. pole | 14704,74 | 5797,56 | -1806,01 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -4239,17 | 17159,76 | -28803,29 |
| B | -48056,85 | -6324,36 | -3241,55 | 3300,86 | -6940,96 | -4711,87 | 2812,03 | -7608,76 | 3250,11 | 32287,18 |
| 1/2 2. pole | 6253,22 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4171,86 | 18639,20 | -39409,25 |
| C | -53225,85 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,12 | -10692,79 | -4757,65 | 2272,96 | -7692,59 | 2313,38 | 31170,58 |
| 1/2 3. pole | 7379,64 | 3983,35 | -1772,76 | 9674,59 | 4371,71 | -2584,42 | 12230,97 | -4187,20 | 18663,59 | -38505,10 |
| D | -46156,09 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,17 | -10692,79 | -4757,64 | 2272,96 | -7692,58 | 2314,98 | 31169,56 |
| 1/2 4. pole | -6297,39 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4173,19 | 18633,93 | -38505,37 |
| E | -44261,38 | -6324,36 | -3241,50 | 3300,82 | -6940,96 | -4711,88 | 2812,03 | -7611,25 | 3251,43 | 31096,70 |
| 1/2 5. pole | 17273,13 | 5797,56 | -1806,02 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -3588,16 | 17146,70 | -28902,18 |

Tab. 31: Ohybové momenty od účinků zatížení čas t_{∞} [kNm]

| řez | $N_{p\infty}$ |
|-------------|---------------|
| 1/2 1. pole | 38353,25 |
| B | 39762,54 |
| 1/2 2. pole | 39135,31 |
| C | 38387,41 |
| 1/2 3. pole | 38237,43 |
| D | 38386,16 |
| 1/2 4. pole | 38237,70 |
| E | 38296,43 |
| 1/2 5. pole | 38484,92 |

Tab. 32: Normálová síla od účinků předpětí čas t_{∞} [kN]

| řez | charakteristická kombinace M_{Ek} | častá kombinace $M_{Ek\psi1}$ | kvazistálá kombinace $M_{Ek\psi2}$ |
|-------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1/2 1. pole | 29643,61 | 1122,77 | -8300,99 |
| B | -39622,20 | -27301,57 | -22094,03 |
| 1/2 2. pole | 13191,85 | -17658,59 | -27421,56 |
| C | -50978,55 | -38528,31 | -31798,16 |
| 1/2 3. pole | 12757,08 | -18137,48 | -27142,11 |
| D | -43909,79 | -31459,57 | -24729,42 |
| 1/2 4. pole | 14134,64 | -16710,53 | -26473,51 |
| E | -37019,68 | -24696,55 | -19489,04 |
| 1/2 5. pole | 32100,05 | 3592,27 | -5831,49 |

Tab. 33: Kombinace ohybových momentů čas t_{∞} [kNm]

normálové napětí v betonu v horních/dolních vláknech je počítána podle vzorce:

$$\sigma_{c,h/d} = \frac{P_m}{A} + \frac{P_m \cdot e_p}{I} \cdot z_{h/d} + \frac{M}{I} \cdot z_{h/d}$$

12.3.1 Charakteristická kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,6 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | -38353,25 | 0,7510 | 29643,61 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -4,30 | -4,03 | ≤ -21 | VYHOVUJE |
| B | -39762,54 | -0,8120 | -39622,20 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -4,13 | -7,18 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -39135,31 | 1,0070 | 13191,85 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,45 | -8,75 | | VYHOVUJE |
| C | -38387,41 | -0,8120 | -50978,55 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -1,82 | -10,20 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -38237,43 | 1,0070 | 12757,08 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,42 | -8,57 | | VYHOVUJE |
| D | -38386,16 | -0,8120 | -43909,79 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -3,05 | -8,45 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -38237,70 | 1,0070 | 14134,64 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,62 | -8,33 | | VYHOVUJE |
| E | -38296,43 | -0,8120 | -37019,68 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -4,17 | -6,63 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38484,92 | 0,7510 | 32100,05 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -4,65 | -3,64 | | VYHOVUJE |

Tab. 34: Posouzení napětí charakteristická kombinace t_∞

12.3.2 Častá kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq f_{ctm}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| 1/2 1. pole | -38353,25 | 0,7510 | 1122,77 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,16 | -8,91 | $\leq 3,2$ | VYHOVUJE |
| B | -39762,54 | -0,8120 | -27301,57 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -6,21 | -4,14 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -39135,31 | 1,0070 | -17658,59 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 4,03 | -14,03 | | VZNIK TRHLIN |
| C | -38387,41 | -0,8120 | -38528,31 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -3,99 | -7,11 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -38237,43 | 1,0070 | -18137,48 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 4,06 | -13,86 | | VZNIK TRHLIN |
| D | -38386,16 | -0,8120 | -31459,57 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -5,22 | -5,35 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -38237,70 | 1,0070 | -16710,53 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 3,86 | -13,62 | | VZNIK TRHLIN |
| E | -38296,43 | -0,8120 | -24696,55 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -6,25 | -3,59 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38484,92 | 0,7510 | 3592,27 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,51 | -8,52 | | VYHOVUJE |

Tab. 35: Posouzení napětí častá kombinace t_∞

12.3.3 Kvazistálá kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | -38353,25 | 0,7510 | -8300,99 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 1,21 | -10,53 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | -39762,54 | -0,8120 | -22094,03 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -7,09 | -2,86 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -39135,31 | 1,0070 | -27421,56 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 5,44 | -15,70 | | VYHOVUJE |
| C | -38387,41 | -0,8120 | -31798,16 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -5,17 | -5,43 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -38237,43 | 1,0070 | -27142,11 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 5,37 | -15,40 | | VYHOVUJE |
| D | -38386,16 | -0,8120 | -24729,42 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -6,40 | -3,67 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -38237,70 | 1,0070 | -26473,51 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 5,27 | -15,29 | | VYHOVUJE |
| E | -38296,43 | -0,8120 | -19489,04 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -7,13 | -2,31 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38484,92 | 0,7510 | -5831,49 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,85 | -10,14 | | VYHOVUJE |

Tab. 36: Posouzení napětí kvazistálá kombinace t_∞

12.4 Omezení normálových napětí – v čase zatížení dopravou

| řez | vlastní tíha | ostatní stálé | gr1a | | | gr5 | | | | předpětí |
|-------------|-----------------|------------------|----------|---------|-----------|----------------|----------|----------------|----------|-----------|
| | | | LM1 - TS | | LM1 - UDL | LM3 - 1800/200 | | LM3 - 3000/240 | | |
| | | | min | max | | min | max | min | max | |
| 1/2 1. pole | 19242,40 | 5797,56 | -1806,01 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -4239,17 | 17159,76 | -28803,29 |
| B | -37810,95 | -6324,36 | -3241,55 | 3300,86 | -6940,96 | -4711,87 | 2812,03 | -7608,76 | 3250,11 | 32287,18 |
| 1/2 2. pole | 17789,29 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4171,86 | 18639,20 | -39409,25 |
| C | -40752,88 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,12 | -10692,79 | -4757,65 | 2272,96 | -7692,59 | 2313,38 | 31170,58 |
| 1/2 3. pole | 19021,76 | 3983,35 | -1772,76 | 9674,59 | 4371,71 | -2584,42 | 12230,97 | -4187,20 | 18663,59 | -38505,10 |
| D | -35345,85 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,17 | -10692,79 | -4757,64 | 2272,96 | -7692,58 | 2314,98 | 31169,56 |
| 1/2 4. pole | 9257,68 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4173,19 | 18633,93 | -38505,37 |
| E | -34110,60 | -6324,36 | -3241,50 | 3300,82 | -6940,96 | -4711,88 | 2812,03 | -7611,25 | 3251,43 | 31096,70 |
| 1/2 5. pole | 20961,28 | 5797,56 | -1806,02 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -3588,16 | 17146,70 | -28902,18 |

Tab. 37: Ohybové momenty od účinků zatížení [kNm]

| řez | N_{p0} |
|-------------|----------|
| 1/2 1. pole | 39021,16 |
| B | 36916,10 |
| 1/2 2. pole | 36389,22 |
| C | 37552,84 |
| 1/2 3. pole | 36481,40 |
| D | 37544,28 |
| 1/2 4. pole | 36481,40 |
| E | 36916,10 |
| 1/2 5. pole | 38208,89 |

Tab. 38: Normálová síla od účinků předpětí v čase zatížení dopravou [kN]

| řez | charakteristická kombinace M_{Ek} | častá kombinace $M_{Ek\psi1}$ | kvazistálá kombinace $M_{Ek\psi2}$ |
|-------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1/2 1. pole | 34181,27 | 5660,43 | -3763,33 |
| B | -29376,30 | -17055,67 | -11848,13 |
| 1/2 2. pole | 24727,92 | -6122,52 | -15885,49 |
| C | -38505,58 | -26055,34 | -19325,19 |
| 1/2 3. pole | 24399,20 | -6495,36 | -15499,99 |
| D | -33099,55 | -20649,33 | -13919,18 |
| 1/2 4. pole | 17094,93 | -13750,24 | -23513,22 |
| E | -26868,90 | -14545,77 | -9338,26 |
| 1/2 5. pole | 35788,20 | 7280,42 | -2143,34 |

Tab. 39: Kombinace ohybových momentů čas $t \infty$ [kNm]

normálové napětí v betonu v horních/dolních vláknech je počítána podle vzorce:

$$\sigma_{c,h/d} = \frac{P_m}{A} + \frac{P_m \cdot e_p}{I} \cdot z_{h/d} + \frac{M}{I} \cdot z_{h/d}$$

12.4.1 Charakteristická kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,6 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | -39021,16 | 0,7510 | 34181,27 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -4,95 | -3,41 | ≤ -21 | VYHOVUJE |
| B | -36916,10 | -0,8120 | -29376,30 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -5,09 | -4,84 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -36389,22 | 1,0070 | 24727,92 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,23 | -6,00 | | VYHOVUJE |
| C | -37552,84 | -0,8120 | -38505,58 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -3,76 | -7,15 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -36481,40 | 1,0070 | 24399,20 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -2,18 | -6,08 | | VYHOVUJE |
| D | -37544,28 | -0,8120 | -33099,55 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -4,70 | -5,81 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -36481,40 | 1,0070 | 17094,93 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -1,12 | -7,33 | | VYHOVUJE |
| E | -36916,10 | -0,8120 | -26868,90 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -5,51 | -4,22 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38208,89 | 0,7510 | 35788,20 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -5,19 | -2,94 | | VYHOVUJE |

Tab. 40: Posouzení napětí charakteristická kombinace v čase zatížení dopravou

12.4.2 Častá kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq f_{ctm}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| 1/2 1. pole | -39021,16 | 0,7510 | 5660,43 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -0,81 | -8,30 | $\leq 3,2$ | VYHOVUJE |
| B | -36916,10 | -0,8120 | -17055,67 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -7,16 | -1,80 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -36389,22 | 1,0070 | -6122,52 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 2,25 | -11,28 | | VYHOVUJE |
| C | -37552,84 | -0,8120 | -26055,34 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -5,93 | -4,06 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -36481,40 | 1,0070 | -6495,36 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 2,31 | -11,37 | | VYHOVUJE |
| D | -37544,28 | -0,8120 | -20649,33 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -6,87 | -2,71 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -36481,40 | 1,0070 | -13750,24 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 3,36 | -12,62 | | VZNIK TRHLIN |
| E | -36916,10 | -0,8120 | -14545,77 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -7,59 | -1,18 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38208,89 | 0,7510 | 7280,42 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | -1,05 | -7,83 | | VYHOVUJE |

Tab. 41: Posouzení napětí častá kombinace v čase zatížení dopravou

12.4.3 Kvazistálá kombinace

| řez | $P_{m\infty}$ [kN] | e_{pr} [m] | M [kNm] | A [m ²] | I [m ⁴] | z_h [m] | z_d [m] | $\sigma_{c,h}$ [MPa] | $\sigma_{c,d}$ [MPa] | $\leq 0,45 \cdot f_{ck}$ [MPa] | posouzení |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1/2 1. pole | -39021,16 | 0,7510 | -3763,33 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,55 | -9,91 | $\leq -15,75$ | VYHOVUJE |
| B | -36916,10 | -0,8120 | -11848,13 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -8,04 | -0,52 | | VYHOVUJE |
| 1/2 2. pole | -36389,22 | 1,0070 | -15885,49 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 3,67 | -12,96 | | VYHOVUJE |
| C | -37552,84 | -0,8120 | -19325,19 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -7,11 | -2,38 | | VYHOVUJE |
| 1/2 3. pole | -36481,40 | 1,0070 | -15499,99 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 3,61 | -12,92 | | VYHOVUJE |
| D | -37544,28 | -0,8120 | -13919,18 | 7,277 | 6,1444 | -1,071 | 1,529 | -8,05 | -1,04 | | VYHOVUJE |
| 1/2 4. pole | -36481,40 | 1,0070 | -23513,22 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 4,78 | -14,29 | | VYHOVUJE |
| E | -36916,10 | -0,8120 | -9338,26 | 7,405 | 6,2663 | -1,056 | 1,544 | -8,46 | 0,10 | | VYHOVUJE |
| 1/2 5. pole | -38208,89 | 0,7510 | -2143,34 | 9,188 | 8,2168 | -1,193 | 1,407 | 0,32 | -9,44 | | VYHOVUJE |

Tab. 42: Posouzení napětí kvazistálá kombinace v čase zatížení dopravou

12.5 Omezení vzniku trhlin

limitní šířka trhliny:

$w_{\max} = 0,4 \text{ mm}$ pro kvazistálou kombinaci

$$w_k = s_{r,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{\max}$$

12.5.1 Průřezové charakteristiky ideálního průřezu

$$A_c = 9,188 \text{ m}^2$$

$$I_c = 8,2168 \text{ m}^4$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200}{35} = 5,714$$

$$A_i = A_c + A_{st} \cdot \alpha_e = 9,188 + 0,028140 \cdot 5,714 = 9,350 \text{ m}^2$$

$$t_i = \frac{A_{st} \cdot \alpha_e \cdot a_s}{A_i} = \frac{0,028140 \cdot 5,714 \cdot 1,35}{9,350} = 0,023216 \text{ m}$$

$$I_i = I_c + A_c \cdot t_i^2 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (a_s - t_i)^2$$

$$I_i = 8,2168 + 9,188 \cdot 0,023216^2 + 5,714 \cdot 0,028140 \cdot (1,35 - 0,023216)^2$$

$$I_i = 8,505 \text{ m}^4$$

$$\sigma_{c,h} = \frac{P_{m\infty}}{A_i} + \frac{P_{m\infty} \cdot e_p}{I_i} \cdot z_h + \frac{M_{Ek,\psi 1}}{I_i} \cdot z_h$$

$$\sigma_{c,h} = \frac{-38\,237,43}{9,350} + \frac{-38\,237,43 \cdot 1,007}{8,505} \cdot (-1,193) + \frac{-18\,137,48}{8,505} \cdot (-1,193)$$

$$\sigma_{c,h} = 3,86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,h} = 3,86 \text{ MPa} > f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

VZNIK TRHLIN

12.5.2 Průřezové charakteristiky průřezu porušeného trhlinou

$$x_r = \frac{-A_{st} \pm \sqrt{A_{st}^2 + 2 \cdot A_{st} \cdot d \cdot b \cdot \frac{1}{\alpha_e}}}{\frac{1}{\alpha_e} \cdot b}$$

$$x_r = \frac{-0,028140 \pm \sqrt{0,028140^2 + 2 \cdot 0,028140 \cdot 2,542 \cdot 13,55 \cdot \frac{1}{5,714}}}{\frac{1}{5,714} \cdot 13,55} = 0,234 \text{ m}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_r^3 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (d - x_r)^2$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \cdot 13,55 \cdot 0,234^3 + 5,714 \cdot 0,028140 \cdot (2,542 - 0,234)^2$$

$$I_{cr} = 0,9144 \text{ m}^4$$

$$\sigma_s = \alpha_e \cdot \frac{M_{Ek,\psi 2} \cdot (d - x_r)}{I_{cr}} = 5,714 \cdot \frac{27\,142,11 \cdot 10^{-3} \cdot (2,542 - 0,234)}{0,9144}$$

$$\sigma_s = 391,46 \text{ MPa}$$

$$s_{r,\max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \emptyset}{\rho_{p,\text{eff}}}$$

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,5$$

$$k_3 = 3,4$$

$$k_4 = 0,425$$

$$h_{c,\text{eff}} = \min \left\{ 2,5 \cdot (h - d); \frac{h - x}{3}; \frac{h}{2} \right\}$$

$$h_{c,\text{eff}} = \min \left\{ 2,5 \cdot (2,6 - 2,542); \frac{2,6 - 0,234}{3}; \frac{2,6}{2} \right\}$$

$$h_{c,\text{eff}} = \min \{ 0,145; 0,789; 1,3 \}$$

$$h_{c,\text{eff}} = 145 \text{ mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} = h_{c,\text{eff}} \cdot b = 0,145 \cdot 13,55 = 1,965 \text{ m}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} = \frac{A_{st}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{0,028140}{1,965} = 0,014321$$

$$s_{r,\max} = 3,4 \cdot 0,050 + \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 0,032}{0,014321} = 207,99 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{391,46 - 0,4 \cdot \frac{3,2}{0,014321} \cdot (1 + 5,714 \cdot 0,014321)}{200 \cdot 10^3} \geq 0,6 \cdot \frac{391,46}{200 \cdot 10^3}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,001474 \geq 0,001174 \quad \text{VYHOVÍ}$$

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max}$$

$$w_k = 207,99 \cdot 0,001474 \leq 0,4$$

$$w_k = 0,31 \text{ mm} \leq 0,4 \text{ mm} \quad \text{VYHOVÍ}$$

13 MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI

13.1 Posouzení konstrukce na ohyb – N+M

V mezním stavu únosnosti bude konstrukce posouzena v řezech s maximálním ohybovým momentem, které jsou určeny až po výpočtu kombinace ohybových momentů od účinků všech zatížení podle návrhových situací 6.10a a 6.10b.

Výpočet je proveden metodou mezního přetvoření za uvažování několika podmínek:

- spolupůsobení betonu a výztuže $\varepsilon_c = \varepsilon_s$ (v tlaku i tahu)
- Platí Bernoulli-Navierova hypotéza o zachování rovinnosti průřezu i po deformaci - platí přímá úměra mezi poměrným přetvořením a vzdáleností vlákna od neutrální osy
- beton v tahu nepůsobí, veškeré tahové namáhání přebírá betonářská výztuž
- napětí v betonu a ve výztuži se určí pomocí idealizovaného pracovního diagramu
- v krajních vláknech betonu je uvažováno mezní poměrné přetvoření $\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$, které nesmí být překročeno

| Trvalé a dočasné návrhové situace | Stálá zatížení | | Předpětí | Hlavní proměnné zatížení | Vedlejší proměnná zatížení | |
|--|----------------------------------|------------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Nepříznivá | Příznivá | | | Nejúčinější | Ostatní |
| Výraz 6.10 | $\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$ | $\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$ | $\gamma_p P$ | $\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$ | | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |
| 6.10a | $\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$ | $\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$ | $\gamma_p P$ | | $\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$ | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |
| 6.10b | $\xi \gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$ | $\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$ | $\gamma_p P$ | $\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$ | | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |
| $\gamma_{Gj,sup} = 1.35$ $\gamma_{Gj,inf} = 1.00$ $\gamma_Q = 1.35$ nepříznivě působící zatížení silniční dopravou a chodci $\gamma_Q = 1.45$ zatížení železniční dopravou, sestavy gr11 až gr31 (s výjimkou 16,17, 26 a 27) $\gamma_Q = 1.20$ zatížení železniční dopravou, sestavy gr16 a 17 a model SW/2 $\gamma_Q = 1.50$ ostatní zatížení dopravou a další proměnná zatížení $\xi = 0.85$ | | | | | | |

Tab. 43: Kombinace zatížení pro mezní stavy únosnosti

| řez | vlastní tíha | ostatní stálé | LM1 - TS | | LM1 - UDL | LM3 - 1800/200 | | LM3 - 3000/240 | | předpětí |
|-------------|--------------|---------------|----------|---------|-----------|----------------|----------|----------------|----------|-----------|
| | | | min | max | | min | max | min | max | |
| 1/2 1. pole | 14704,74 | 5797,56 | -1806,01 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -4239,17 | 17159,76 | -28803,29 |
| B | -48056,85 | -6324,36 | -3241,55 | 3300,86 | -6940,96 | -4711,87 | 2812,03 | -7608,76 | 3250,11 | 32287,18 |
| 1/2 2. pole | 6253,22 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4171,86 | 18639,20 | -39409,25 |
| C | -53225,85 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,12 | -10692,79 | -4757,65 | 2272,96 | -7692,59 | 2313,38 | 31170,58 |
| 1/2 3. pole | 7379,64 | 3983,35 | -1772,76 | 9674,59 | 4371,71 | -2584,42 | 12230,97 | -4187,20 | 18663,59 | -38505,10 |
| D | -46156,09 | -9742,89 | -3270,71 | 2934,17 | -10692,79 | -4757,64 | 2272,96 | -7692,58 | 2314,98 | 31169,56 |
| 1/2 4. pole | 6297,39 | 5734,47 | -1768,56 | 9660,74 | 6293,56 | -2577,06 | 12211,24 | -4173,19 | 18633,93 | -38505,37 |
| E | -44261,38 | -6324,36 | -3241,50 | 3300,82 | -6940,96 | -4711,88 | 2812,03 | -7611,25 | 3251,43 | 31096,70 |
| 1/2 5. pole | 17273,13 | 5797,56 | -1806,02 | 9171,52 | 6362,80 | -2625,19 | 11361,08 | -3588,16 | 17146,70 | -28902,18 |

Tab. 44: Ohybové momenty od účinků zatížení [kNm]

| řez | 6.10a | 6.10b |
|-------------|-----------|-----------|
| 1/2 1. pole | 13010,45 | 38750,09 |
| B | -48938,77 | -60351,91 |
| 1/2 2. pole | -8581,40 | 19377,40 |
| C | -63932,44 | -75471,33 |
| 1/2 3. pole | -9658,12 | 18337,26 |
| D | -54389,28 | -65928,15 |
| 1/2 4. pole | -7617,89 | 20333,01 |
| E | -45005,31 | -56422,19 |
| 1/2 5. pole | 16378,90 | 42098,95 |

Tab. 45: Kombinace ohybových momentů [kNm]

Jako horší z návrhových situací vyšla 6.10b, z které jsou vybrány dva nejhorší průřezy namáhané ohybovým momentem. Je to průřez nad podpěrou C a průřez v polovině 5. pole.

13.1.1 Podpěra C

základní napětí v předpínací výztuži:

$$\sigma_p^0 = \sigma_{pt} - \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{p\infty} = 1\,272,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{I} \cdot e_p = \frac{-35\,107,52}{7,272} + \frac{-75\,471,33}{6,1444} \cdot (-0,8120) = 5,15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p^0 = 1\,272,01 - \frac{195}{34} \cdot 5,15 = 1\,242,47 \text{ MPa}$$

tomu odpovídá přetvoření předpínací výztuže:

$$\varepsilon_p^0 = \frac{\sigma_p^0}{E_p} = \frac{1\,242,47 \cdot 10^6}{195 \cdot 10^9} = 0,006372 = 6,372 \text{ ‰}$$

je omezena hodnotou:

$$\varepsilon_p^0 \leq \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1\,426,09 \cdot 10^6}{195 \cdot 10^3} = 0,007313 = 7,313 \text{ ‰}$$

maximální možná změna napětí ve výztuži:

$$\Delta\sigma_p^0 = f_{pd} - \sigma_p^0 = 1\,426,09 - 1\,242,47 = 183,62 \text{ MPa}$$

změna velikosti předpínací síly:

$$\Delta F_p = \Delta\sigma_p^0 \cdot A_p = 183,62 \cdot 10^6 \cdot 0,00015 \cdot 8 \cdot 23 = 5\,067,91 \text{ kN}$$

při určení momentu únosnosti se vychází z podmínky:

$$N_{Ed} = N_{Rd}$$

$$N_{Rd} = F_c + \Delta F_p$$

$$F_c = -N_{Ed} + \Delta F_p = 35\,107,52 + 183,62 = 35\,291,14 \text{ kN}$$

$$A_c = \frac{F_c}{f_{cd}} = \frac{35\,291,14 \cdot 10^3}{21} = 1\,680\,530,48 \text{ mm}^2$$

$$x_c = \frac{A_c}{b} = \frac{1\,680\,530,48}{4\,580} = 360 \text{ mm}$$

poznámka: protože je průřez komory v místě stěn šikmý, byla plocha a následně hodnota x zjištěna z programu AutoCad, proto neodpovídá přesně výpočtu podle vzorce

$$x = \frac{x_c}{\lambda} = \frac{360}{0,8} = 450 \text{ mm}$$

$$z_c = z_d - \frac{x_c}{2} = 1\,529 - \frac{360}{2} = 1\,349 \text{ mm} = 1,349 \text{ m}$$

$$M_{Rd} = \Delta F_p \cdot e_p + F_c \cdot z_c = 5\,067,91 \cdot 0,812 + 35\,291,14 \cdot 1,349$$

$$M_{Rd} = 51\,722,89 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$75\,471,33 \text{ kNm} \leq 51\,722,89 \text{ kNm} \quad \textbf{NEVYHOVÍ}$$

→ nutný návrh betonářské výztuže na zbytkový moment ΔM_{Ed}

$$\Delta M_{Ed} = M_{Ed} - M_{Rd}$$

$$\Delta M_{Ed} = 75\,471,33 - 51\,722,89$$

$$\Delta M_{Ed} = 23\,748,44 \text{ kNm}$$

odhad ramene vnitřních sil: $z_s = 0,95 \cdot d = 0,95 \cdot 2,485 = 2,361 \text{ m}$

$$A_{s,req} = \frac{\Delta M_{Ed}}{z_s \cdot f_{yd}} = \frac{23\,748,44}{2,361 \cdot 434,78 \cdot 10^3} = 0,023135 \text{ m}^2$$

návrh: 35 Ø32 mm; $A_s = 0,028140 \text{ m}^2$

$$F_{sd} = A_s \cdot f_{yd} = 0,028140 \cdot 434,78 \cdot 10^6 = 12\,234,71 \text{ kN}$$

$$F_c = -N_{Ed} + \Delta F_p + F_{sd} = 35\,107,52 + 183,62 + 12\,234,71 = 47\,525,85 \text{ kN}$$

$$A_c = \frac{F_c}{f_{cd}} = \frac{47\,525,85 \cdot 10^3}{21} = 2\,263\,135,72 \text{ mm}^2$$

$$x_c = \frac{A_c}{b} = \frac{2\,263\,135,72}{4\,580} = 480 \text{ mm}$$

poznámka: protože je průřez komory v místě stěn šikmý, byla plocha a následně hodnota x zjištěna z programu AutoCad, proto neodpovídá přesně výpočtu podle vzorce

$$x = \frac{x_c}{\lambda} = \frac{480}{0,8} = 600 \text{ mm}$$

$$z_c = z_d - \frac{x_c}{2} = 1\,529 - \frac{480}{2} = 1\,289 \text{ mm} = 1,289 \text{ m}$$

$$M_{Rd} = \Delta F_p \cdot e_p + F_c \cdot z_c + F_s \cdot z_s$$

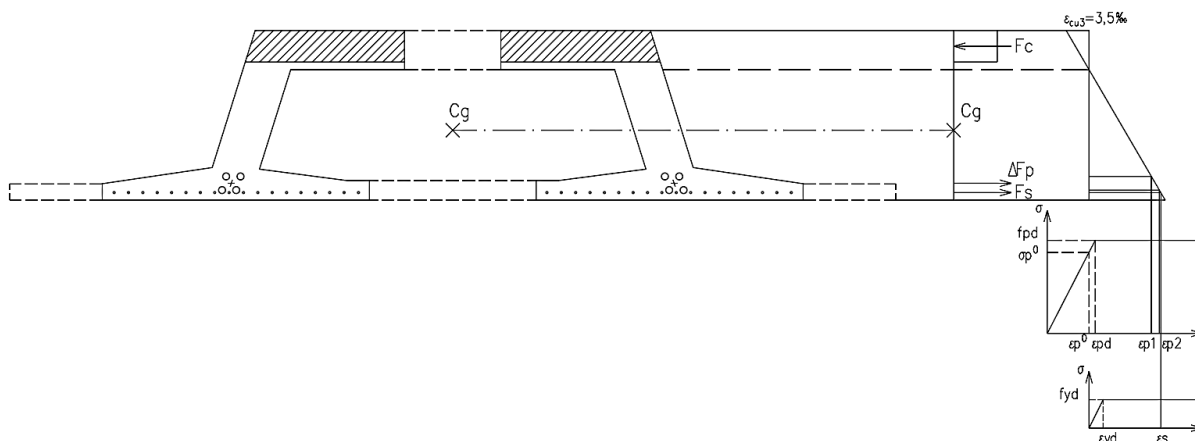
$$M_{Rd} = 5\,067,91 \cdot 0,812 + 47\,525,85 \cdot 1,289 + 12\,234,71 \cdot 0,96$$

$$M_{Rd} = 77\,121,29 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$75\,471,33 \text{ kNm} \leq 77\,121,29 \text{ kNm}$$

VYHOVÍ



Obr. 27: Průběh přetvoření podpěra C

13.1.2 ½ 5. pole

základní napětí v předpínací výztuži:

$$\sigma_p^0 = \sigma_{pt} - \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{p\infty} = 1\,292,25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{I} \cdot e_p = \frac{-35\,666,07}{9,188} + \frac{42\,098,95}{8,2168} \cdot 0,7510 = -0,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p^0 = 1\,292,25 - \frac{195}{34} \cdot (-0,04) = 1\,292,48 \text{ MPa}$$

tomu odpovídá přetvoření předpínací výztuže:

$$\varepsilon_p^0 = \frac{\sigma_p^0}{E_p} = \frac{1\,292,48 \cdot 10^6}{195 \cdot 10^9} = 0,006628 = 6,628\text{‰}$$

je omezena hodnotou:

$$\varepsilon_p^0 \leq \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1\,426,09 \cdot 10^6}{195 \cdot 10^9} = 0,007313 = 7,313\text{‰}$$

maximální možná změna napětí ve výztuži:

$$\Delta\sigma_p^0 = f_{pd} - \sigma_p^0 = 1\,426,09 - 1\,292,48 = 133,61 \text{ MPa}$$

změna velikosti předpínací síly:

$$\Delta F_p = \Delta\sigma_p^0 \cdot A_p = 133,61 \cdot 10^6 \cdot 0,00015 \cdot 8 \cdot 23 = 3\,687,64 \text{ kN}$$

při určení momentu únosnosti se vychází z podmínky:

$$N_{Ed} = N_{Rd}$$

$$N_{Rd} = F_c + \Delta F_p$$

$$F_c = -N_{Ed} + \Delta F_p = 35\,666,07 + 3\,687,64 = 39\,353,71 \text{ kN}$$

$$A_c = \frac{F_c}{f_{cd}} = \frac{39\,353,71 \cdot 10^3}{21} = 1\,873\,986,19 \text{ mm}^2$$

$$x_c = \frac{A_c}{b} = \frac{1\,873\,986,19}{13\,550} = 138 \text{ mm}$$

$$x = \frac{x_c}{\lambda} = \frac{138}{0,8} = 173 \text{ mm}$$

$$z_c = z_d - \frac{x_c}{2} = 1\,193 - \frac{138}{2} = 1\,124 \text{ mm} = 1,124 \text{ m}$$

$$M_{Rd} = \Delta F_p \cdot e_p + F_c \cdot z_c = 3\,687,64 \cdot 0,751 + 39\,353,71 \cdot 1,124$$

$$M_{Rd} = 47\,002,99 \text{ kNm}$$

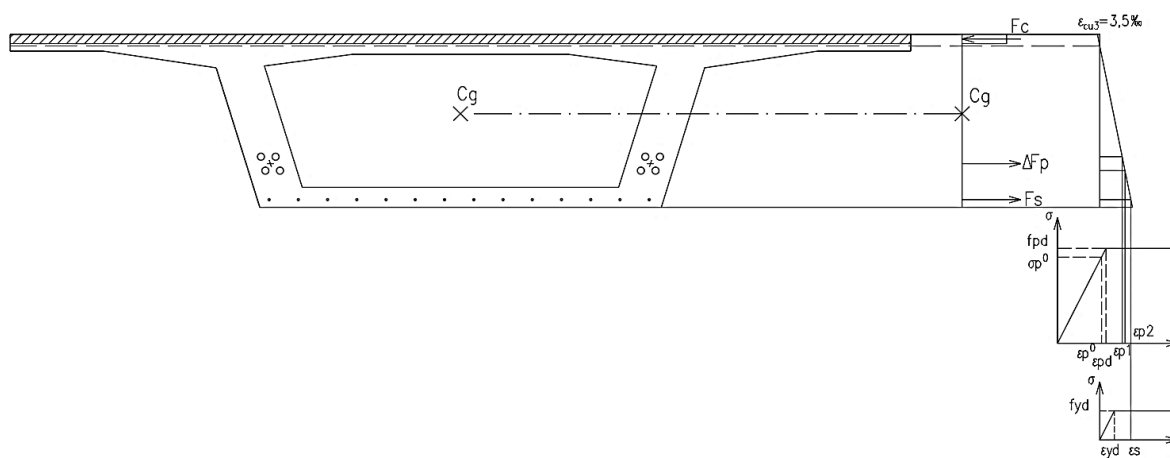
$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$42\,098,95 \text{ kNm} \leq 47\,002,99 \text{ kNm}$$

VYHOVÍ

→ betonářská výztuž konstrukčně

návrh: 35 Ø16 mm; $A_s = 0,007035 \text{ m}^2$



Obr. 28: Průběh přetvoření ½ 5. pole

13.2 Posouzení konstrukce na kombinaci smyku a kroucení

Při výpočtu je uvažována interakce smyku a kroucení, proto jsou vyčísleny 2 kombinace. Jedna je pro maximální posouvající sílu a jí odpovídající kroutící moment, druhá pro maximální kroutící moment a jemu odpovídající posouvající sílu.

| podpěra B | | max V + odpovídající T | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6167,30 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6144,20 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 5924,81 | 0,00 | 32287,18 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | -5908,91 | 0,00 | 32287,18 | -39762,54 |
| předpětí | ZLEVA | -2373,09 | -4759,31 | -19131,37 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 2351,14 | 4767,61 | -19131,37 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2615,58 | -4759,31 | -19107,55 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | 2586,43 | 4767,61 | -19107,55 | -39762,54 |
| součet | ZLEVA | -2615,58 | -4759,31 | -19107,55 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | 2586,43 | 4767,61 | -19107,55 | -39762,54 |

| podpěra B | | max T + odpovídající V | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6167,30 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6144,20 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 5924,81 | 0,00 | 32287,18 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | -5908,91 | 0,00 | 32287,18 | -39762,54 |
| předpětí | ZLEVA | -1835,36 | -6056,68 | -25472,24 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 1817,45 | 5997,59 | -25472,24 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2077,85 | -6056,68 | -25448,42 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | 2052,74 | 5997,59 | -25448,42 | -39762,54 |
| součet | ZLEVA | -2077,85 | -6056,68 | -25448,42 | -39762,54 |
| | ZPRAVA | 2052,74 | 5997,59 | -25448,42 | -39762,54 |

Tab. 46: Kombinace V + T podpěra B

| podpěra C | | max V + odpovídající T | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6959,14 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6566,68 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 6693,57 | 0,00 | 31170,58 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | -6301,24 | 0,00 | 31170,58 | -38387,41 |
| předpětí | ZLEVA | -2529,72 | -4998,65 | -25165,08 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 2445,43 | 4865,62 | -25165,08 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2795,29 | -4998,65 | -44406,43 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | 2710,87 | 4865,62 | -44406,43 | -38387,41 |
| součet | ZLEVA | -2795,29 | -4998,65 | -44406,43 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | 2710,87 | 4865,62 | -44406,43 | -38387,41 |

| podpěra C | | max T + odpovídající V | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6959,14 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6566,68 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 6693,57 | 0,00 | 31170,58 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | -6301,24 | 0,00 | 31170,58 | -38387,41 |
| předpětí | ZLEVA | -1947,43 | -6426,53 | -34502,56 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 1886,61 | 6225,81 | -34502,56 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2213,00 | -6426,53 | -53743,91 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | 2152,05 | 6225,81 | -53743,91 | -38387,41 |
| součet | ZLEVA | -2213,00 | -6426,53 | -53743,91 | -38387,41 |
| | ZPRAVA | 2152,05 | 6225,81 | -53743,91 | -38387,41 |

Tab. 47: Kombinace V + T podpěra C

| podpěra D | | max V + odpovídající T | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6566,68 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6979,14 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 6301,24 | 0,00 | 31169,56 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | -6693,57 | 0,00 | 31169,56 | -38386,16 |
| předpětí | ZLEVA | -2445,43 | -4865,62 | -25164,99 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 2529,72 | 4998,65 | -25164,99 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2710,87 | -4865,62 | -44407,36 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | 2815,29 | 4998,65 | -44407,36 | -38386,16 |
| součet | ZLEVA | -2710,87 | -4865,62 | -44407,36 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | 2815,29 | 4998,65 | -44407,36 | -38386,16 |

| podpěra D | | max T + odpovídající V | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6566,68 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6979,14 | 0,00 | -50411,93 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 6301,24 | 0,00 | 31169,56 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | -6693,57 | 0,00 | 31169,56 | -38386,16 |
| předpětí | ZLEVA | -1886,61 | -6225,81 | -34502,56 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 1947,43 | 6426,53 | -34502,56 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2152,05 | -6225,81 | -53744,93 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | 2233,00 | 6426,53 | -53744,93 | -38386,16 |
| součet | ZLEVA | -2152,05 | -6225,81 | -53744,93 | -38386,16 |
| | ZPRAVA | 2233,00 | 6426,53 | -53744,93 | -38386,16 |

Tab. 48: Kombinace V + T podpěra D

| podpěra E | | max V + odpovídající T | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6154,21 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6167,30 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 5908,91 | 0,00 | 31096,70 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | -5924,81 | 0,00 | 31096,70 | -38296,43 |
| předpětí | ZLEVA | -2351,14 | -4707,61 | -19131,39 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 2373,09 | 4759,31 | -19131,39 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2596,44 | -4707,61 | -20298,05 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | 2615,58 | 4759,31 | -20298,05 | -38296,43 |
| součet | ZLEVA | -2596,44 | -4707,61 | -20298,05 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | 2615,58 | 4759,31 | -20298,05 | -38296,43 |

| podpěra E | | max T + odpovídající V | | | |
|-----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V _{Ed} | T _{Ed} | M _{Ed} | N _{Ed} |
| stálé | ZLEVA | -6154,21 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 6167,30 | 0,00 | -32263,36 | 0,00 |
| zatížení | ZLEVA | 5908,91 | 0,00 | 31096,70 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | -5924,81 | 0,00 | 31096,70 | -38296,43 |
| předpětí | ZLEVA | -1817,45 | -5997,59 | -25472,24 | 0,00 |
| | ZPRAVA | 1835,36 | 6056,68 | -25472,24 | 0,00 |
| užitné | ZLEVA | -2062,75 | -5997,59 | -26638,90 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | 2077,85 | 6056,68 | -26638,90 | -38296,43 |
| součet | ZLEVA | -2062,75 | -5997,59 | -26638,90 | -38296,43 |
| | ZPRAVA | 2077,85 | 6056,68 | -26638,90 | -38296,43 |

Tab. 49: Kombinace V + T podpěra E

Rozhodující dvojice vnitřních sil jsou:

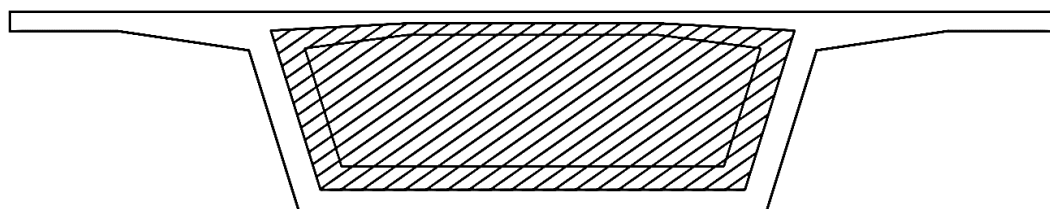
$$V_{Ed,max} = 2\,815,29 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,odp} = 4\,998,65 \text{ kNm}$$

$$T_{Ed,max} = 6\,426,53 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,odp} = 2\,233,00 \text{ kN}$$

13.2.1 Převedení vlivu kroucení na posouvající sílu



Obr. 29: Střednicová plocha a obvod průřezu nad podporou D

$$A_k = 16,599 \text{ m}^2$$

$$o_k = 13,109 \text{ m}$$

$$\text{délka střednice stěny stojiny: } l = 2,155 \text{ m}$$

13.2.2 Rozhodnutí o vzniku trhlin

Možnost vzniku trhlin je ověřena pro návrhovou situaci, napětí nemá přesáhnout hodnotu f_{ctd} .

$$N_{Ed} = -39\,762,54 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = -53\,744,93 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{ctd} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{I} \cdot z_h = \frac{-39\,762,54}{7,272} + \frac{-53\,744,93}{6,1444} \cdot (-1,071) = 3,90 \text{ MPa}$$

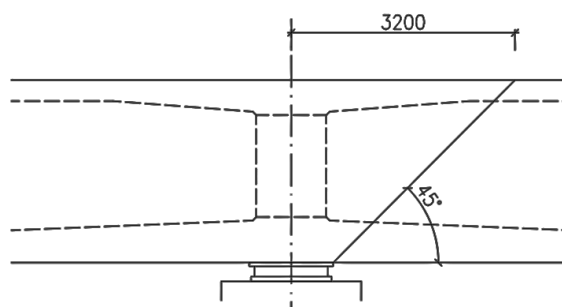
$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{2,2}{1,5} = 1,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ctd} = 3,90 \text{ MPa} \geq f_{ctd} = 1,47 \text{ MPa}$$

pro účinky smyku je nutné
počítat s průřezem s trhlinou

13.2.3 Kritický řez

Kritický řez je uvažován na konci smykové trhliny vedené pod úhlem 45° od okraje uložení.



Obr. 30: Umístění kritického řezu

Hodnoty posouvajících sil a kroutících momentů z rozhodujících kombinací jsou uvažovány v kritickém řezu.

Rozhodující dvojice vnitřních sil v kritickém řezu:

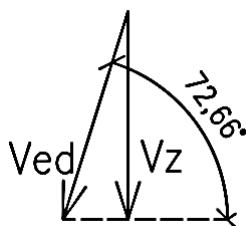
$$V_{Ed,max} = 2\,425,42 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,odp} = 4\,299,40 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,max} = 5\,531,48 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,odp} = 1\,923,53 \text{ kN}$$

13.2.4 Zahrnutí vlivu šikmosti stěn



Obr. 31: Zahrnutí vlivu šikmosti stěn

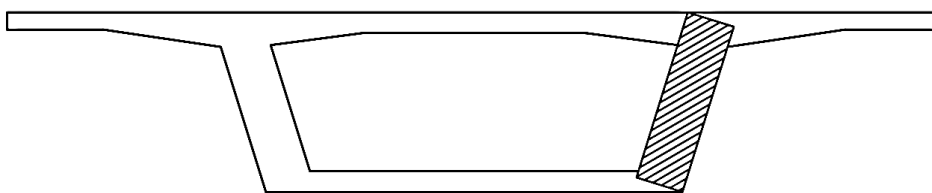
$$V_{Ed,max} = \frac{V/2}{\sin \alpha} = \frac{2\,425,42/2}{\sin 72,66} = 1\,270,45 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,odp} = \frac{T/2}{\sin \alpha} = \frac{4\,299,40/2}{\sin 72,66} = 2\,252,05 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,max} = \frac{V/2}{\sin \alpha} = \frac{5\,531,48/2}{\sin 72,66} = 2\,897,42 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,odp} = \frac{T/2}{\sin \alpha} = \frac{1\,923,53/2}{\sin 72,66} = 1\,007,56 \text{ kN}$$

13.2.5 Posouzení únosnosti bez smykové výztuže



Obr. 32: Plocha stěny

$$A = 1,754 \text{ m}^2$$

$$l = 2,51 \text{ m}$$

$$t = 0,70 \text{ m}$$

$$V_{Ed,1} = 1\,270,45 + 169,96 = 1\,440,41 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,2} = 1\,007,56 + 218,52 = 1\,226,08 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1\,440,41 \text{ kN}$$

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{2510}} = 1,282 \leq 2,0$$

$$b_w = 700 - 2 \cdot \phi_{\text{kanálku}} = 700 - 2 \cdot 130 = 440 \text{ mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{0,007035}{0,44 \cdot 2,51} = 0,0064 < 0,02$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5} = 0,035 \cdot 1,282^{1,5} \cdot 35^{0,5} = 0,313$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{39\,762,54}{7,272} = 5,47 \text{ MPa}$$

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

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= [0,12 \cdot 1,282 \cdot (100 \cdot 0,0064 \cdot 35)^{1/3} + 0,15 \cdot 5,47] \cdot 440 \cdot 2510 = \\ &= 1\,385,10 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_{Rd,c,\min} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c,min} = (0,313 + 0,15 \cdot 5,47) \cdot 440 \cdot 2510 = 1\,251,84 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,min} \leq V_{Rd,c}$$

$$1\,251,84 \text{ kN} \leq 1\,385,10 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 1\,385,10 \text{ kN} < V_{Ed} = 1\,440,41 \text{ kN} \rightarrow \text{nutný návrh smykové výztuže}$$

13.2.6 Návrh smykové výztuže

rameno vnitřních sil:

$$z' = z_c + \frac{z_p \cdot A_p + z_s \cdot A_s}{A_p + A_s} = 1,289 + \frac{0,812 \cdot 0,0138 + 0,96 \cdot 0,028140}{0,0138 + 0,028140} = 2,2 \text{ m}$$

$$z = \frac{z'}{\sin \alpha} = \frac{2,2}{\sin 72,66} = 2,31 \text{ m}$$

navržená výztuž: 2střížné třmínky $\varnothing 12 \text{ mm}$ po 150 mm

$$A_{sw} = 226 \text{ mm}^2$$

$$\cotg \theta = 1,5$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s})$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta = \frac{226}{150} \cdot 2310 \cdot 434,78 \cdot 1,5 = 2\,269,81 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{5,47}{21} = 1,26$$

$$v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{35}{250} \right] = 0,516$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cotg \theta + \tg \theta} = \frac{1,26 \cdot 0,44 \cdot 2,31 \cdot 0,516 \cdot 21}{1,5 + 1/1,5} = 6\,404,90 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(6\,404,90; 2\,269,81) = 2\,269,81 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

$$1\,440,41 \text{ kN} \leq 2\,269,81 \text{ kN}$$

VYHOVÍ

13.2.7 Kroucení

$$T_{Rd,c} = f_{ctd} \cdot t \cdot 2 \cdot A = 1,47 \cdot 10^6 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 1,754 = 3\,609,73 \text{ kN}$$

$$T_{Ed} < T_{Rd,c}$$

$$2\,897,42 \text{ kN} < 3\,609,73 \text{ kN}$$

$$T_{Rd,max} = 2 \cdot v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A \cdot t \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$T_{Rd,max} = 2 \cdot 0,516 \cdot 1,26 \cdot 21 \cdot 1,754 \cdot 0,7 \cdot \sin 35 \cdot \cos 35$$

$$T_{Rd,max} = 15\,752,63 \text{ kN}$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1,0$$

$$\frac{2\,897,42}{15\,752,63} + \frac{1\,440,41}{6\,404,90} \leq 1,0$$

$$0,41 \leq 1,0$$

VYHOVÍ

13.2.8 Konstrukční zásady smykové výztuže

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s \cdot \sin \alpha} = \frac{226}{440 \cdot 200 \cdot \sin 90} = 0,002568$$

$$\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{35}}{500} = 0,000947$$

$$\rho_{w,max} = 0,5 \cdot v \cdot \frac{f_{cd}}{f_{ywk}} = 0,5 \cdot 0,516 \cdot \frac{21}{434,78} = 0,012461$$

$$\rho_{w,min} < \rho_w < \rho_{w,max}$$

$$0,000947 < 0,002568 < 0,012461$$

VYHOVÍ

$$s_{max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \cotg \alpha) = 0,75 \cdot 2510 \cdot (1 + 0) = 1\,882,5 \text{ mm} < 400 \text{ mm}$$

$$s_{max} = 400 \text{ mm}$$

$$s < s_{max}$$

$$150 \text{ mm} < 400 \text{ mm}$$

VYHOVÍ

13.3 Podélný smyk

13.3.1 Návrh podélné smykové výztuže

$$H_{Ed} = \left(V_{Ed} + \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A} \cdot u \right) \cdot \cotg \theta = \left(1\,440,41 + \frac{2\,897,42}{2 \cdot 16,599} \cdot 13,109 \right) \cdot 1,5$$

$$H_{Ed} = 3\,876,79 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{H_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{3\,876,79}{434,78 \cdot 10^3} = 0,008917 \text{ m}^2$$

navržená výztuž: $\varnothing 12 \text{ mm}$; $A_{s1} = 0,000113 \text{ m}^2$

$$\text{nutný počet prutů: } n = \frac{A_{s,req}}{A_{s1}} = \frac{0,008917}{0,000113} = 78,91$$

návrh: 100 $\varnothing 12 \text{ mm}$; $A_s = 0,0113 \text{ m}^2$

rozmístění výztuže:

| | |
|---------------------|---|
| horní deska+konzoly | 54 ks $\varnothing 12 \text{ mm}$ po 500 mm ve 2 vrstvách |
| stěny | 20 ks $\varnothing 12 \text{ mm}$ po 300 mm ve 2 vrstvách |
| spodní deska | 26 ks $\varnothing 12 \text{ mm}$ po 500 mm ve 2 vrstvách |

$$V_{Rd} = n \cdot A_{s1} \cdot f_{yd} = 100 \cdot 0,000113 \cdot 434,78 \cdot 10^3 = 4\,913,01 \text{ kN}$$

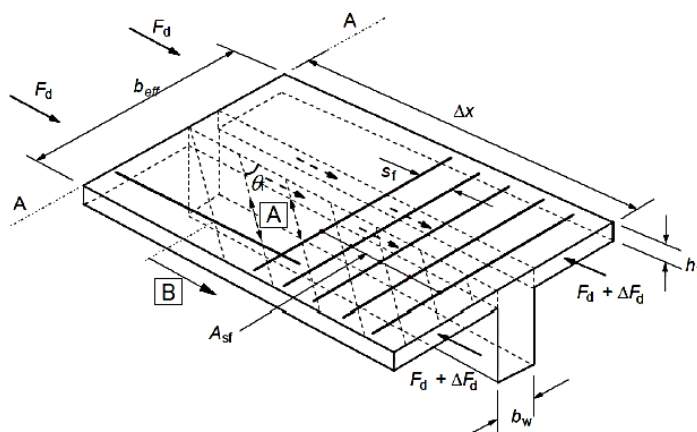
$$\frac{H_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{3\,876,79}{4\,913,01} \leq 1,0$$

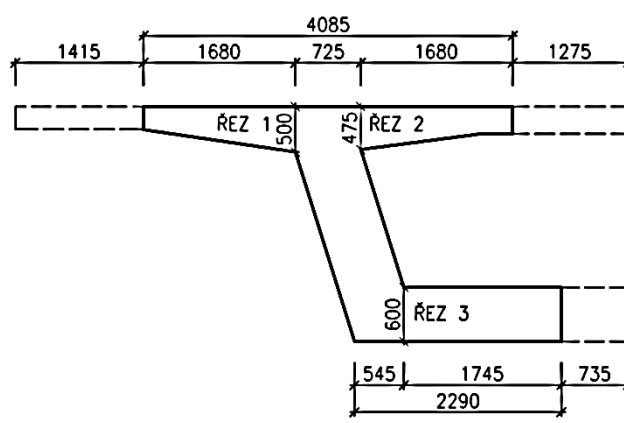
$$0,79 \leq 1,0$$

VYHOVÍ

13.3.2 Podélný smyk mezi stěnou a deskou komory



Obr. 33: Spolupůsobení desky se stěnou komory



Obr. 34: Spolupůsobení desky se stěnou komory

$$\Delta F_{cc} = \frac{V_{Ed,z}}{2} = \frac{2\,425,42}{2} = 1\,212,71 \text{ kN}$$

ŘEZ 1

$$z = 2,2 \text{ m}$$

$$\Delta x = 1 \text{ m}$$

$$h_f = 500 \text{ mm}$$

$$\Delta F_d = \Delta F_{cc} \cdot \frac{b_{eff}}{b_f} = 1\,212,71 \cdot \frac{1,680}{4,085} = 498,74 \text{ kN}$$

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x \cdot h_f} = \frac{498,74}{1 \cdot 0,5} = 0,99 \text{ MPa}$$

ŘEZ 2

$$z = 2,2 \text{ m}$$

$$\Delta x = 1 \text{ m}$$

$$h_f = 475 \text{ mm}$$

$$\Delta F_d = \Delta F_{cc} \cdot \frac{b_{eff}}{b_f} = 1\,212,71 \cdot \frac{1,680}{4,085} = 498,74 \text{ kN}$$

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x \cdot h_f} = \frac{498,74}{1 \cdot 0,475} = 1,05 \text{ MPa}$$

ŘEZ 3

$$z = 2,2 \text{ m}$$

$$\Delta x = 1 \text{ m}$$

$$h_f = 600 \text{ mm}$$

$$\Delta F_d = \Delta F_{cc} \cdot \frac{b_{eff}}{b_f} = 1\,212,71 \cdot \frac{1,745}{2,290} = 924,10 \text{ kN}$$

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x \cdot h_f} = \frac{924,10}{1 \cdot 0,475} = 1,95 \text{ MPa}$$

13.3.3 Únosnost bez smykové výztuže

$$v_{Ed} \leq 0,4 \cdot f_{ctd} = 0,4 \cdot 1,47 = 0,59 \text{ MPa}$$

$$0,99 \text{ MPa} \leq 0,59 \text{ MPa}$$

NEVYHOVÍ

13.3.4 Návrh smykové výztuže

$$\text{úhel tlačných diagonál } \theta = 45^\circ; \cotg \theta = 1,0$$

ŘEZ 1

$$A_{s,req} = \frac{v_{Ed} \cdot s \cdot h_f}{f_{yd} \cdot \cotg \theta} = \frac{0,99 \cdot 200 \cdot 500}{434,78 \cdot 1,0} = 0,000229 \text{ m}^2$$

$$\text{návrh: } 8 \text{ ks } \varnothing 12 \text{ mm po } 200 \text{ mm; } A_{st} = 0,000904 \text{ m}^2$$

$$v_{Rd,s} = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} \cdot \cotg \theta}{s \cdot h_f} = \frac{0,000904 \cdot 434,78 \cdot 1}{0,2 \cdot 0,5} = 3,93 \text{ MPa}$$

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,s}$$

$$0,99 \text{ MPa} \leq 3,93 \text{ MPa}$$

VYHOVÍ

ŘEZ 2

$$A_{s,req} = \frac{v_{Ed} \cdot s \cdot h_f}{f_{yd} \cdot \cotg \theta} = \frac{1,05 \cdot 200 \cdot 475}{434,78 \cdot 1,0} = 0,000229 \text{ m}^2$$

návrh: 8 ks Ø12 mm po 200 mm; $A_{st} = 0,000904 \text{ m}^2$

$$v_{Rd,s} = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} \cdot \cotg \theta}{s \cdot h_f} = \frac{0,000904 \cdot 434,78 \cdot 1}{0,2 \cdot 0,475} = 4,14 \text{ MPa}$$

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,s}$$

$$1,05 \text{ MPa} \leq 4,14 \text{ MPa}$$

VYHOVÍ

ŘEZ 3

$$A_{s,req} = \frac{v_{Ed} \cdot s \cdot h_f}{f_{yd} \cdot \cotg \theta} = \frac{1,95 \cdot 200 \cdot 600}{434,78 \cdot 1,0} = 0,000538 \text{ m}^2$$

návrh: 8 ks Ø12 mm po 200 mm; $A_{st} = 0,000904 \text{ m}^2$

$$v_{Rd,s} = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} \cdot \cotg \theta}{s \cdot h_f} = \frac{0,000904 \cdot 434,78 \cdot 1}{0,2 \cdot 0,6} = 3,27 \text{ MPa}$$

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,s}$$

$$1,95 \text{ MPa} \leq 3,27 \text{ MPa}$$

VYHOVÍ

$$v_{Rd,max} = v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta \cdot \cotg \theta = 0,516 \cdot 21 \cdot \sin 45 \cdot \cotg 45 = 7,66 \text{ MPa}$$

$$v_{Ed,max} \leq v_{Rd,max}$$

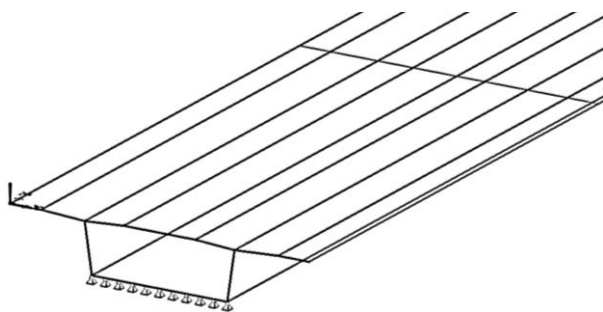
$$1,95 \text{ MPa} \leq 7,66 \text{ MPa}$$

VYHOVÍ

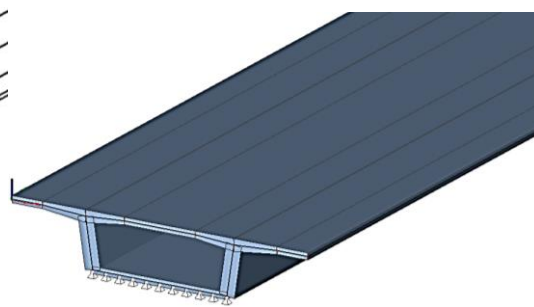
Poznámka: návrh výztuže je pouze předběžný, přesný návrh je proveden v posouzení příčného směru, kdy je uvažována interakce s ohybem

13.4 Posouzení konstrukce v příčném směru

Příčný směr byl modelován pomocí deskostěnového modelu vytvořeného v programu Scia Engineer 16. Vymodelováno bylo pouze jedno prostřední pole o rozpětí 44 m a průřez takový, že odpovídá skutečnému tvaru komorového průřezu. Pro zjednodušení byl náběh spodní desky zanedbán a podepření na okrajích konstrukce zvoleno liniové.



Obr. 35: Pohled na model

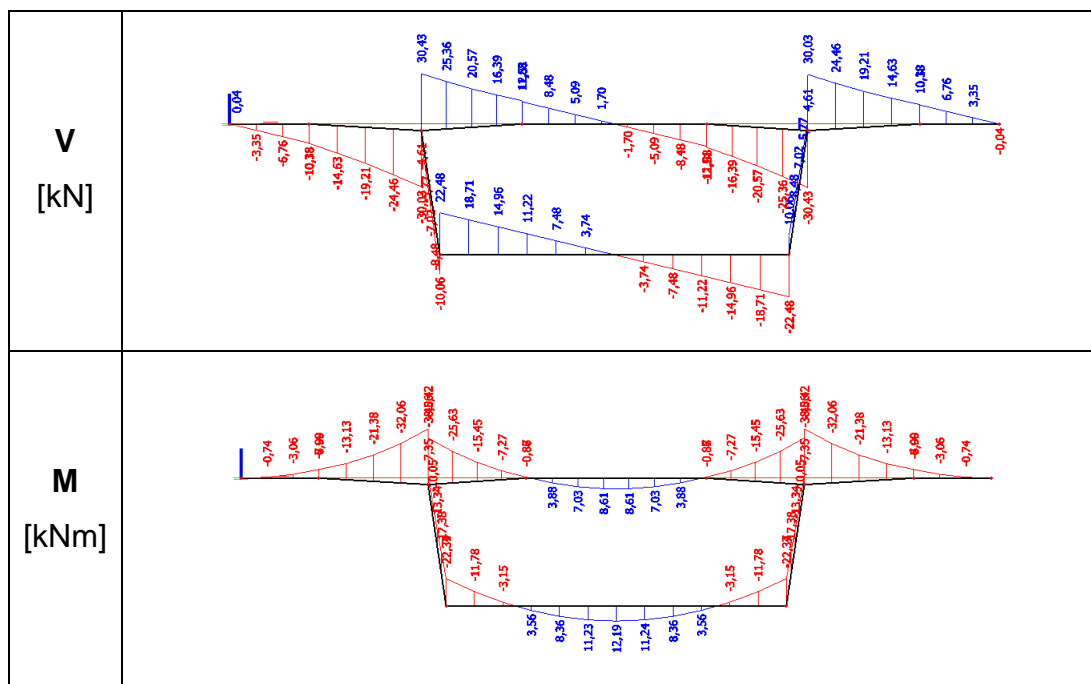


Obr. 36: Rendrovaný model

Uvažované ohybové momenty v příčném směru jsou z kritického řezu uprostřed rozpětí. Zatížení je bráno stejné jako v kapitole 5.

13.4.1 Vlastní tíha

Vlastní tíha je generována automaticky výpočetním programem, objemová tíha betonu je 25 kN/m^3 .



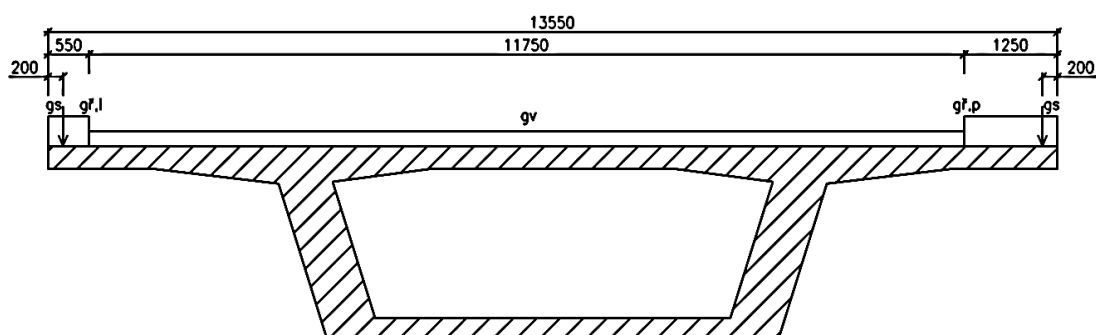
13.4.2 Ostatní stálé

vozovka: $g_v = \frac{g_{1k}}{b_v} = \frac{36,72}{11,75} = 3,13 \text{ kN/m}^2$

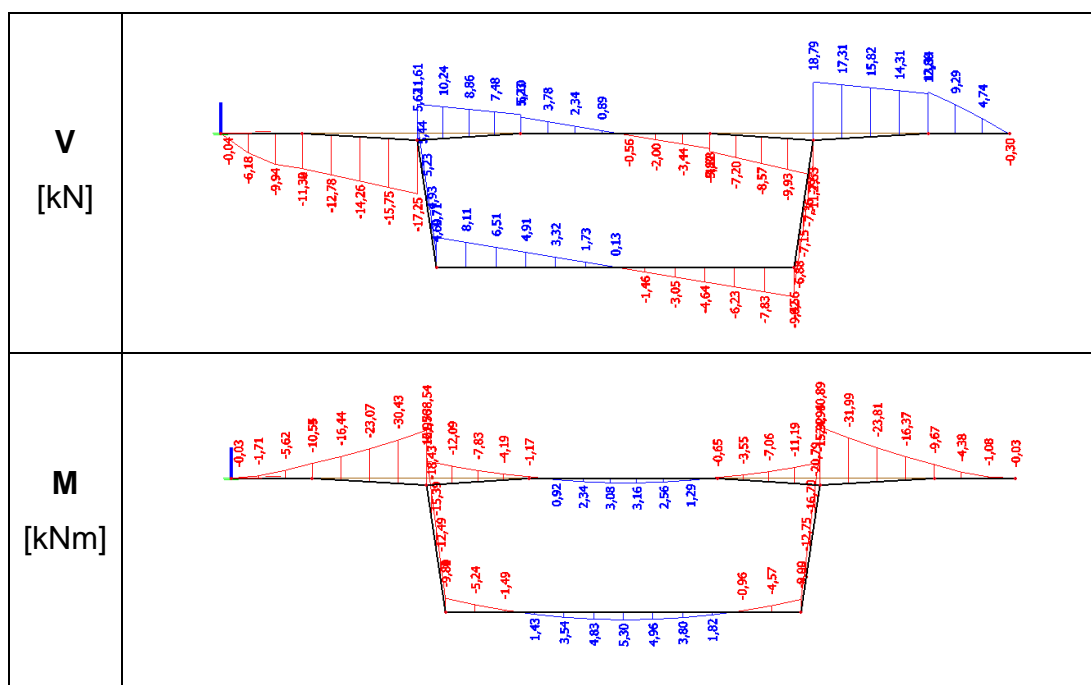
římsa levá: $g_{r,l} = \frac{g_{1k}}{b_{r,l}} = \frac{7,25}{0,55} = 13,18 \text{ kN/m}^2$

římsa pravá: $g_{r,p} = \frac{g_{1k}}{b_{r,p}} = \frac{11,25}{1,25} = 9,00 \text{ kN/m}^2$

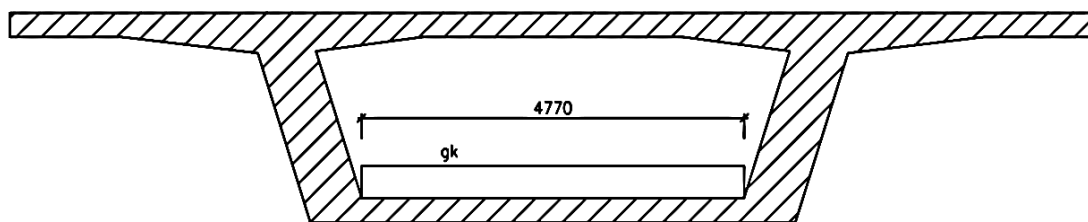
2x svodidlo: $g_s = 2 \times 1,00 \text{ kN/m}$



Obr. 37: Rozmístění ostatního stálého zatížení

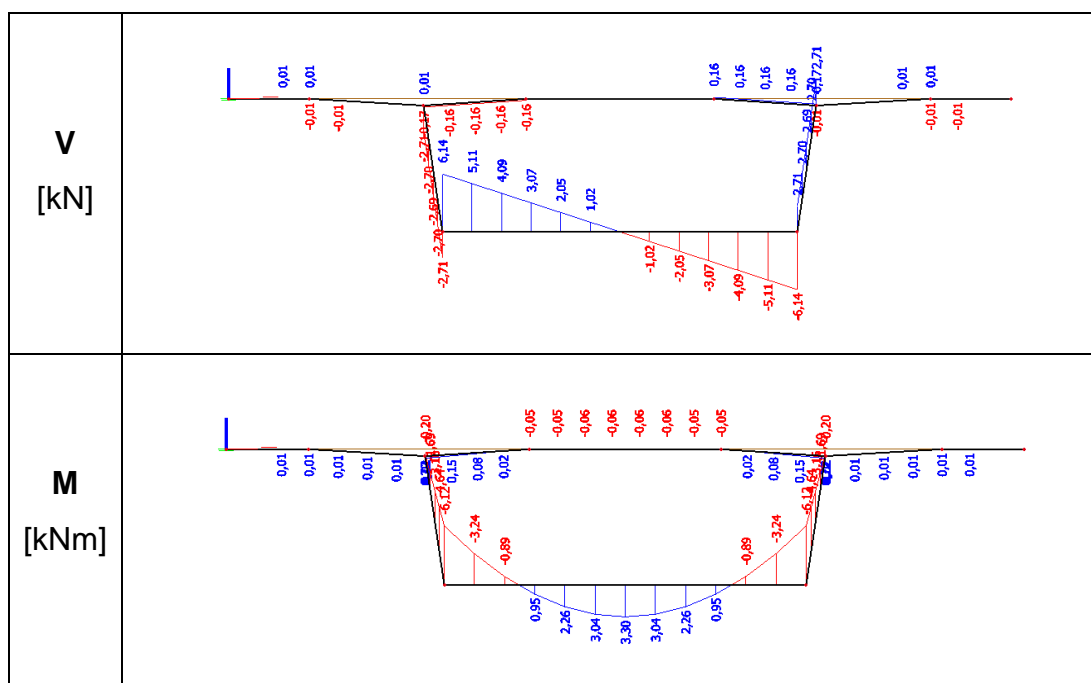


13.4.3 Zatížení uvnitř komory



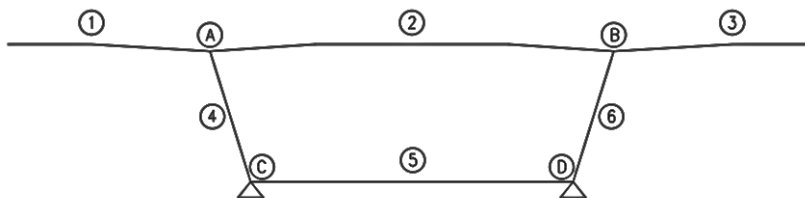
Obr. 38: Umístění zatížení uvnitř komory

zatížení: $g_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$



13.4.4 Zatížení dopravou

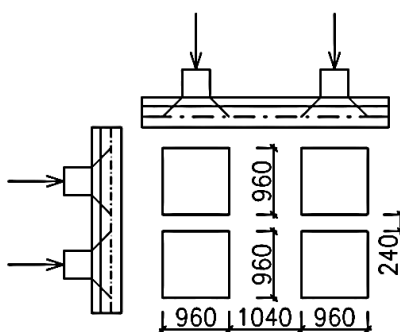
Pomocí příčinkových čar byla nalezena extrémní poloha vozidel. Byl vytvořen identický prutový model, aby mohly být vyčísleny příčinkové čáry. Postavení vozidel je následně použito na deskostěnový model. Hodnoty ohybových momentů a posouvajících sil jsou na průřezu zjištěny v kritických místech podle obrázku.



Obr. 39: Označení řezů v příčném směru

13.4.4.1 Sestava gr1a

Pro roznos zatížení do střednice desky je uvažována nejmenší tloušťka desky 300 mm a zatížení od dvojnápravy je rozneseno na střednici pod úhlem 45°. Na roznášecí ploše je zatížení uvažováno jako rovnoměrné.



Obr. 40: Roznos zatížení od dvojnápravy

roznášecí plocha na jedno kolo:

$$A_{roz} = 0,96 \cdot 0,96 = 0,9216 \text{ m}^2$$

hodnoty jednotlivých zatížení od dvojnápravy v jednotlivých zatěžovacích pruzích na 1 kolo:

pruh 1:

$$q_{TS,roz,1} = \frac{\alpha_{Q1} \cdot Q_1}{A_{roz}} = \frac{1,0 \cdot 150}{0,9216} = 162,76 \text{ kN/m}^2$$

pruh 2:

$$q_{TS,roz,2} = \frac{\alpha_{Q2} \cdot Q_2}{A_{roz}} = \frac{1,0 \cdot 100}{0,9216} = 108,51 \text{ kN/m}^2$$

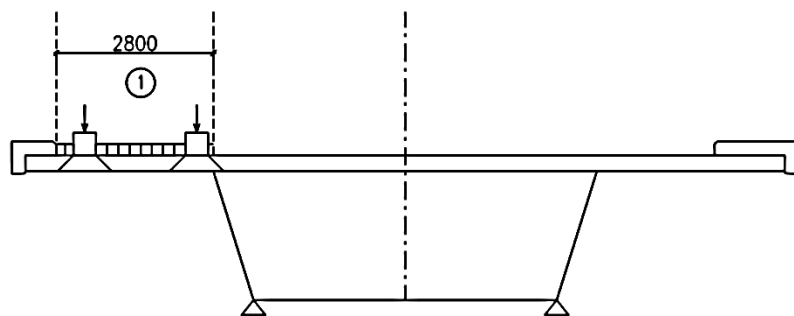
pruh 3:

$$q_{TS,roz,3} = \frac{\alpha_{Q3} \cdot Q_3}{A_{roz}} = \frac{1,0 \cdot 50}{0,9216} = 54,25 \text{ kN/m}^2$$

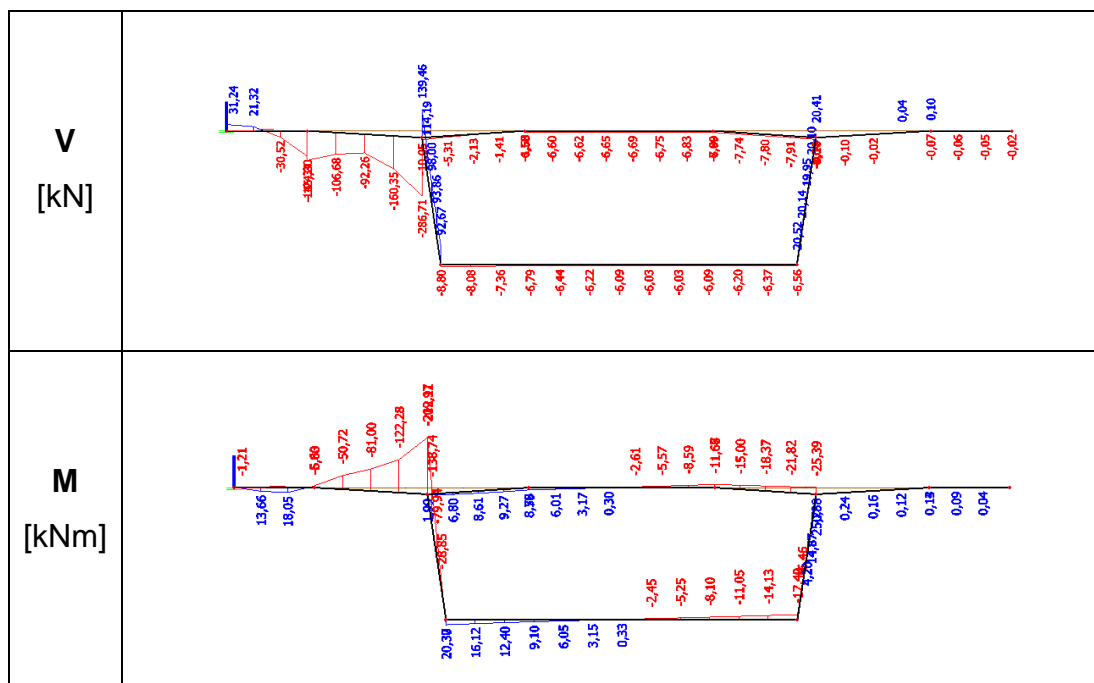
| | |
|--------------|-----------------|
| horní deska: | M_2, M_A, V_A |
| stěna: | M_A, M_C, M_4 |
| konzola: | M_A, V_A |
| dolní deska: | M_5, V_C |

| M [kNm] | V [kN] |
|------------|-----------|
| | |

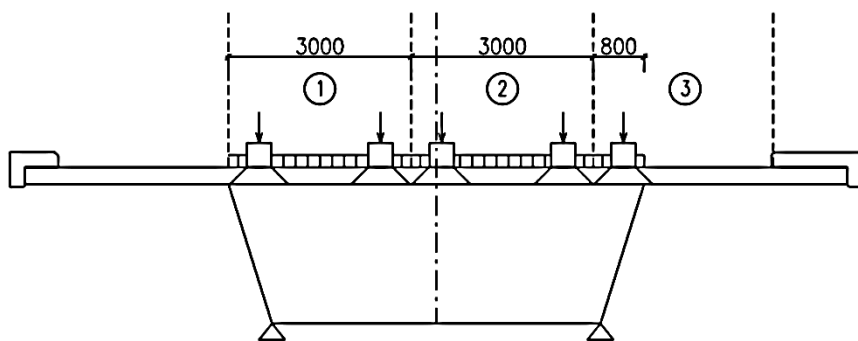
LM1 – max M_A zleva
– max V_A zleva



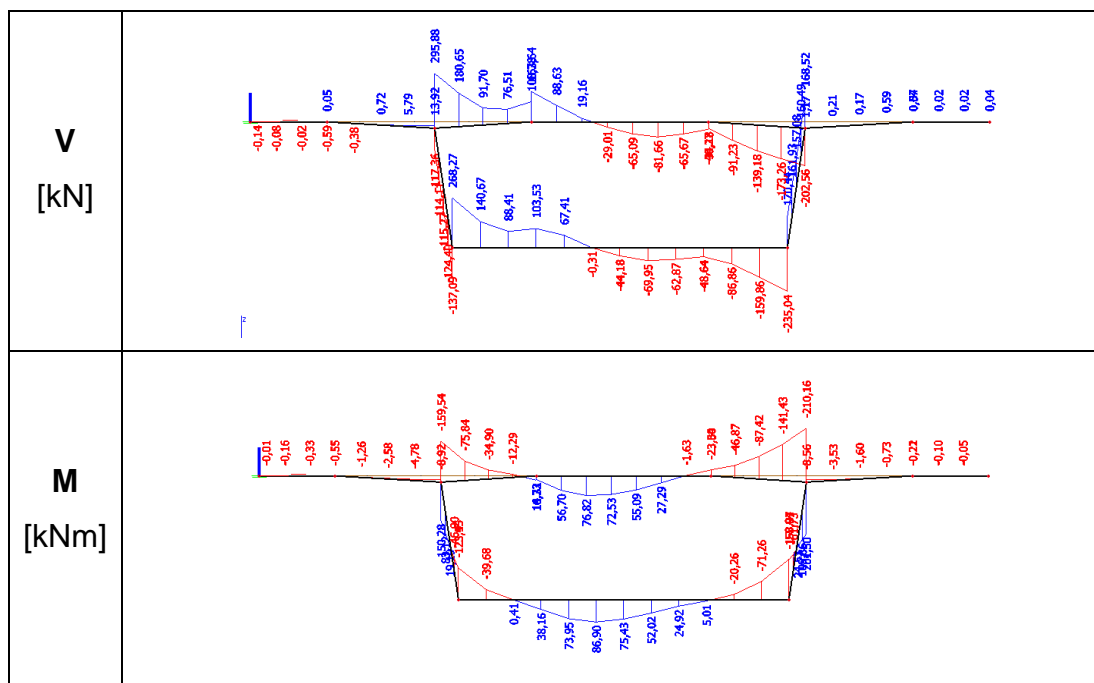
Obr. 42: Rozmístění vozidel pro max M_A a max V_A zleva



LM1 – max V_A zprava

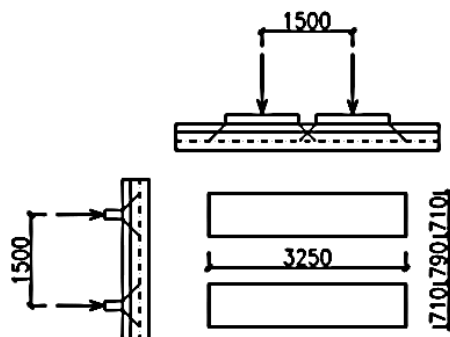


Obr. 43: Rozmístění vozidel pro max V_A zprava



13.4.4.2 Sestava gr5

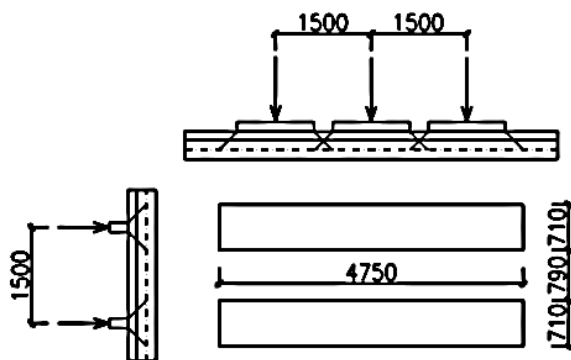
Pro roznos zatížení do střednice desky je uvažována nejmenší tloušťka desky 300 mm a zatížení od vozidla 1800/200 a 3000/240 je rozneseno na střednici pod úhlem 45°. Na roznášecí ploše je zatížení uvažováno jako rovnoměrné.



Obr. 44: Roznos zatížení od vozidla 1800/200

$$A_{\text{roz},1800/200} = 0,71 \cdot 3,25 = 2,3075 \text{ m}^2$$

$$q_{1800/200} = \frac{Q}{A_{\text{roz},1800/200}} = \frac{200}{2,3075} = 86,67 \text{ kN/m}^2$$



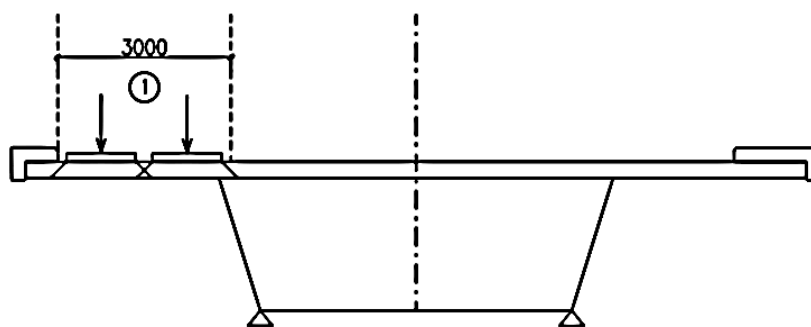
Obr. 45: Roznos zatížení od vozidla 1800/200

$$A_{\text{roz},3000/240} = 0,71 \cdot 4,75 = 3,3725 \text{ m}^2$$

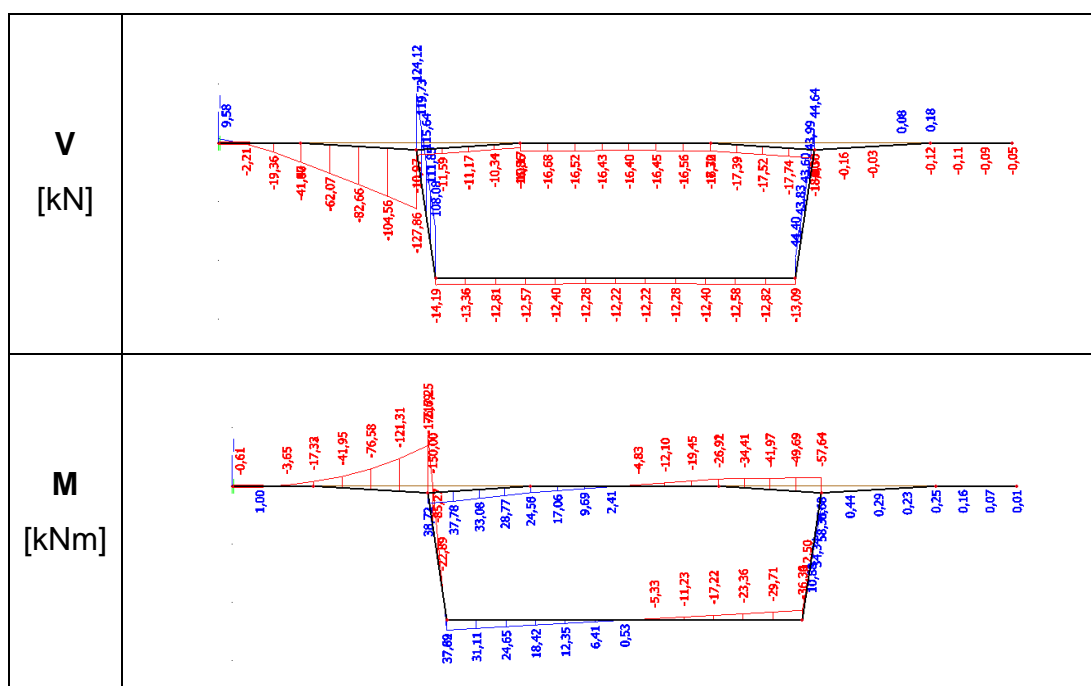
$$q_{3000/240} = \frac{Q}{A_{\text{roz},3000/240}} = \frac{240}{3,3725} = 71,16 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{3000/120} = \frac{Q}{A_{\text{roz},3000/120}} = \frac{120}{3,3725} = 35,58 \text{ kN/m}^2$$

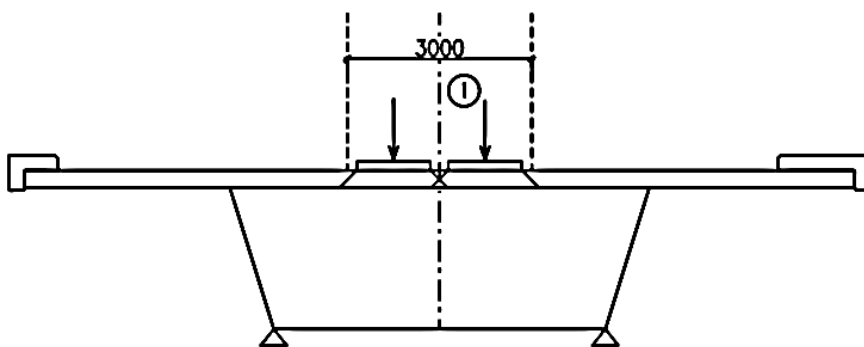
LM3 – 1800/200 max M_A



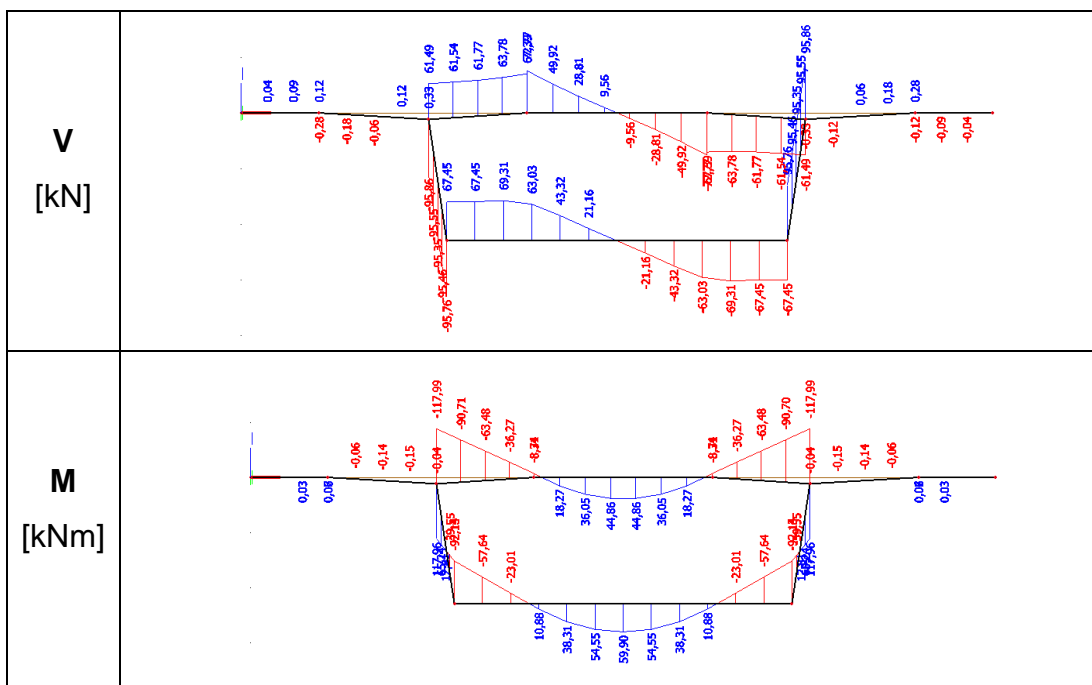
Obr. 46: Umístění vozidla 1800/200 pro max M_A



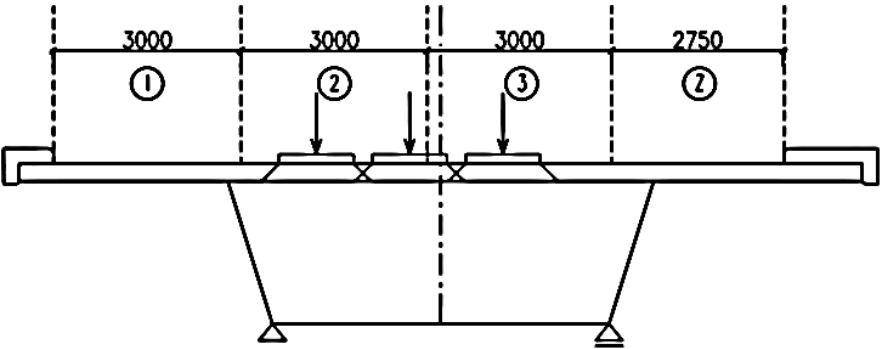
LM3 – 1800/200 max M_2



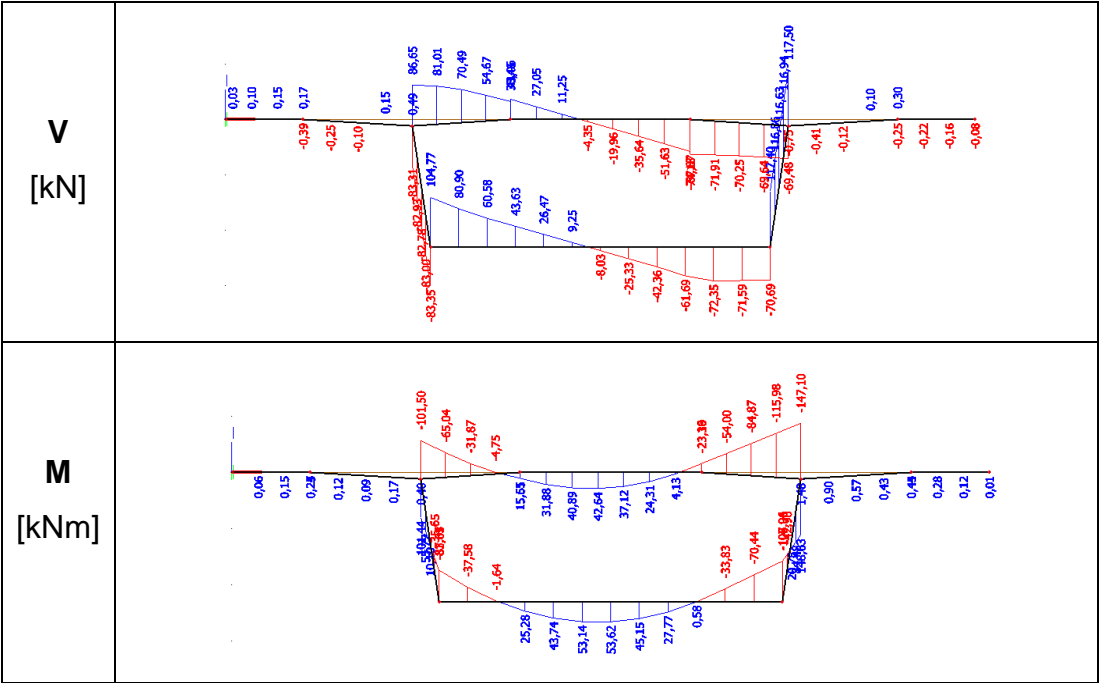
Obr. 47: Umístění vozidla 1800/200 pro max M_2



LM3 – 3000/240



Obr. 48: Umístění vozidla 3000/240



13.4.5 Posouzení ohybové únosnosti

13.4.5.1 Kombinace zatížení

| zatěžovací stav | M [kNm] | | | | |
|-----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| | řez | | | | |
| | A zleva | A zprava | 2 | C | 5 |
| vlastní tíha | -45,42 | -38,06 | 8,61 | -22,34 | 12,19 |
| ostatní stálé | -38,54 | -21,56 | 3,16 | -9,80 | 5,30 |
| uvnitř komory | 0,02 | 0,22 | -0,06 | -6,12 | 3,30 |
| LM1 | -209,97 | -159,54 | 76,25 | -127,15 | 89,90 |
| LM3 - 1800/200 | -176,69 | 38,72 | 44,86 | -92,19 | 59,90 |
| LM3 - 3000/240 | 0,40 | -101,50 | 42,64 | -83,05 | 53,62 |
| kombinace 6.10b | -428,27 | -319,50 | 130,18 | -242,38 | 162,92 |

Tab. 50: Kombinace ohybových momentů pro příčný směr

| zatěžovací stav | V [kN] | | |
|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| | řez | | |
| | A zleva | A zprava | C |
| vlastní tíha | -30,03 | 30,43 | 22,48 |
| ostatní stálé | -17,25 | 11,61 | 9,71 |
| uvnitř komory | 0,01 | -0,17 | 6,14 |
| LM1 | -286,71 | 226,82 | 211,02 |
| LM3 - 1800/200 | -127,86 | 61,49 | -12,22 |
| LM3 - 3000/240 | 0,49 | 86,65 | 104,77 |
| kombinace 6.10b | -493,88 | 396,75 | 368,28 |

Tab. 51: Kombinace posouvajících sil pro příčný směr

13.4.5.2 Řez A zleva

$$M_{Ed} = -428,27 \text{ kNm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 500 - 50 - \frac{20}{2} = 440 \text{ mm}$$

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

$$A_{s,req} = \frac{1000 \cdot 440 \cdot 21}{434,78} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 428,27}{1000 \cdot 440^2 \cdot 21}} \right) = 0,002239 \text{ m}^2$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d = 0,26 \cdot \frac{3,2}{500} \cdot 1000 \cdot 440 = 0,000732 \text{ m}^2$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h = 0,04 \cdot 1000 \cdot 500 = 0,02 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø20 po 130 mm; $A_s = 0,002417 \text{ m}^2$

$$x_c = \frac{f_{cd} \cdot A_s}{f_{yd} \cdot b} = \frac{434,78 \cdot 2417}{21 \cdot 1000} = 50,04 \text{ mm}$$

$$x = \frac{x_c}{\lambda} = \frac{50,04}{0,8} = 62,55 \text{ mm}$$

$$z = d - \frac{x_c}{2} = 440 - \frac{50,04}{2} = 414,98 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = f_{yd} \cdot A_s \cdot z = 434,78 \cdot 2417 \cdot 414,78 = 435,88 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$428,27 \text{ kNm} \leq 435,88 \text{ kNm}$$

VYHOVÍ

ověření započitatelnosti výztuže:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu3} \cdot \frac{d - x}{x} = 3,5 \cdot \frac{440 - 62,55}{62,55} = 21,12 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

tažená výztuž je plně započitatelná

INTERAKCE PODÉLNÉHO SMYKU A PŘÍČNÉHO OHYBU

Protože je uvažována deplanace průřezu, je do tlačené oblasti průřezu přidáno 20% nutné ohybové výztuže a do tažené oblasti 10%.

A_{sf} = výztuž v podélném směru

$$A_{sf} = 0,000904 \text{ m}^2$$

A_{st} = výztuž v příčném směru

$$A_{st} = 0,002417 \text{ m}^2$$

návrh výztuže horní povrch desky nad stěnou (tažený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,1 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 1,0 \cdot 0,002417 + 0,1 \cdot 0,002417\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,002885\}$$

$$A_s = 0,002885 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø25 po 150 mm; $A_s = 0,003272 \text{ m}^2$

návrh výztuže dolní povrch desky nad stěnou (tlačený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 0 \cdot 0,002417 + 0,2 \cdot 0,002417\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,000709\}$$

$$A_s = 0,000709 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø12 po 150 mm; $A_s = 0,000754 \text{ m}^2$

13.4.5.3 Řez A zprava

| | | | |
|-----------------|----------|----------------|----------|
| M_{Ed} | 319,5 | kNm | |
| b | 1 000 | mm | |
| h | 475 | mm | |
| c_{nom} | 50 | mm | |
| \emptyset | 20 | mm | |
| d | 415 | mm | |
| $A_{s,req}$ | 0,001771 | m ² | |
| $A_{s,min}$ | 0,000691 | m ² | |
| $A_{s,max}$ | 0,019000 | m ² | |
| A_s | 0,001963 | m ² | VYHOVUJE |
| vzdálenost | 160 | mm | |
| x_c | 40,64 | mm | |
| x | 50,80 | mm | |
| z | 394,68 | mm | |
| M_{Rd} | 336,85 | kNm | VYHOVUJE |
| ϵ_{yd} | 2,17 | ‰ | |
| ϵ_s | 25,09 | ‰ | VYHOVUJE |

INTERAKCE PODÉLNÉHO SMYKU A PŘÍČNÉHO OHYBU

Protože je uvažována deplanace průřezu, je do tlačené oblasti průřezu přidáno 20% nutné ohybové výztuže a do tažené oblasti 10%.

A_{sf} = výztuž v podélném směru

$$A_{sf} = 0,000904 \text{ m}^2$$

A_{st} = výztuž v příčném směru

$$A_{st} = 0,001963 \text{ m}^2$$

návrh výztuže horní povrch desky nad stěnou (tažený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,1 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 1,0 \cdot 0,001963 + 0,1 \cdot 0,001963\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,002385\}$$

$$A_s = 0,002417 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø22 po 150 mm; $A_s = 0,002534 \text{ m}^2$

návrh výztuže dolní povrch desky nad stěnou (tlačený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 0 \cdot 0,001963 + 0,2 \cdot 0,001963\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,000600\}$$

$$A_s = 0,000600 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø12 po 150 mm; $A_s = 0,000754 \text{ m}^2$

13.4.5.4 Řez 2

| | | | |
|-----------------|----------|----------------|----------|
| M_{Ed} | 130,18 | kNm | |
| b | 1 000 | mm | |
| h | 300 | mm | |
| c_{nom} | 50 | mm | |
| \emptyset | 16 | mm | |
| d | 242 | mm | |
| $A_{s,req}$ | 0,001237 | m ² | |
| $A_{s,min}$ | 0,000403 | m ² | |
| $A_{s,max}$ | 0,012000 | m ² | |
| A_s | 0,001340 | m ² | VYHOVUJE |
| vzdálenost | 150 | mm | |
| x_c | 27,74 | mm | |
| x | 34,68 | mm | |
| z | 228,13 | mm | |
| M_{Rd} | 132,91 | kNm | VYHOVUJE |
| ϵ_{yd} | 2,17 | ‰ | |
| ϵ_s | 20,92 | ‰ | VYHOVUJE |

INTERAKCE PODÉLNÉHO SMYKU A PŘÍČNÉHO OHYBU

Protože je uvažována deplanace průřezu, je do tlačené oblasti průřezu přidáno 20% nutné ohybové výztuže a do tažené oblasti 10%.

A_{sf} = výztuž v podélném směru

$$A_{sf} = 0 \text{ m}^2$$

A_{st} = výztuž v příčném směru

$$A_{st} = 0,001340 \text{ m}^2$$

návrh výztuže horní povrch desky v poli (tlačený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0; 0,25 \cdot 0 + 0 \cdot 0,001340 + 0,1 \cdot 0,001340\}$$

$$A_s = \max\{0; 0,000134\}$$

$$A_s = 0,000134 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: $\emptyset 12$ po 150 mm; $A_s = 0,000754 \text{ m}^2$

návrh výztuže dolní povrch desky nad stěnou (tažený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0; 0,25 \cdot 0 + 1,0 \cdot 0,001340 + 0,2 \cdot 0,001340\}$$

$$A_s = \max\{0; 0,001608\}$$

$$A_s = 0,001608 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø18 po 150 mm; $A_s = 0,001696 \text{ m}^2$

13.4.5.5 Řez C

| | | | |
|-----------------|----------|--------------|----------|
| M_{Ed} | 242,38 | kNm | |
| b | 1 000 | mm | |
| h | 300 | mm | |
| c_{nom} | 50 | mm | |
| Ø | 20 | mm | |
| d | 240 | mm | |
| $A_{s,req}$ | 0,002323 | m^2 | |
| $A_{s,min}$ | 0,000399 | m^2 | |
| $A_{s,max}$ | 0,012000 | m^2 | |
| A_s | 0,002856 | m^2 | VYHOVUJE |
| vzdálenost | 110 | mm | |
| x_c | 59,13 | mm | |
| x | 73,91 | mm | |
| z | 210,43 | mm | |
| M_{Rd} | 261,30 | kNm | VYHOVUJE |
| ϵ_{yd} | 2,17 | ‰ | |
| ϵ_s | 7,86 | ‰ | VYHOVUJE |

INTERAKCE PODÉLNÉHO SMYKU A PŘÍČNÉHO OHYBU

Protože je uvažována deplanace průřezu, je do tlačené oblasti průřezu přidáno 20% nutné ohybové výztuže a do tažené oblasti 10%.

A_{sf} = výztuž v podélném směru

$$A_{sf} = 0,000904 \text{ m}^2$$

A_{st} = výztuž v příčném směru

$$A_{st} = 0,002856 \text{ m}^2$$

návrh výztuže horní povrch desky nad stěnou (tažený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,1 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 1,0 \cdot 0,002856 + 0,1 \cdot 0,002856\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,003068\}$$

$$A_s = 0,003068 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø25 po 150 mm; $A_s = 0,003272 \text{ m}^2$

návrh výztuže dolní povrch desky nad stěnou (tlačený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0,000904; 0,25 \cdot 0,000904 + 0 \cdot 0,002856 + 0,2 \cdot 0,002856\}$$

$$A_s = \max\{0,000452; 0,000747\}$$

$$A_s = 0,000747 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø12 po 150 mm; $A_s = 0,000754 \text{ m}^2$

13.4.5.6 Řez 5

| | | | |
|-----------------|----------|----------------|----------|
| M_{Ed} | 162,92 | kNm | |
| b | 1 000 | mm | |
| h | 300 | mm | |
| c_{nom} | 50 | mm | |
| \emptyset | 20 | mm | |
| d | 240 | mm | |
| $A_{s,req}$ | 0,001561 | m ² | |
| $A_{s,min}$ | 0,000399 | m ² | |
| $A_{s,max}$ | 0,012000 | m ² | |
| A_s | 0,001963 | m ² | VYHOVUJE |
| vzdálenost | 160 | mm | |
| x_c | 40,64 | mm | |
| x | 50,80 | mm | |
| z | 219,68 | mm | |
| M_{Rd} | 187,49 | kNm | VYHOVUJE |
| ϵ_{yd} | 2,17 | ‰ | |
| ϵ_s | 13,03 | ‰ | VYHOVUJE |

INTERAKCE PODÉLNÉHO SMYKU A PŘÍČNÉHO OHYBU

Protože je uvažována deplanace průřezu, je do tlačené oblasti průřezu přidáno 20% nutné ohybové výztuže a do tažené oblasti 10%.

A_{sf} = výztuž v podélném směru

$$A_{sf} = 0 \text{ m}^2$$

A_{st} = výztuž v příčném směru

$$A_{st} = 0,001963 \text{ m}^2$$

návrh výztuže horní povrch desky v poli (tlačený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0; 0,25 \cdot 0 + 0 \cdot 0,001963 + 0,1 \cdot 0,001963\}$$

$$A_s = \max\{0; 0,000134\}$$

$$A_s = 0,000196 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø12 po 150 mm; $A_s = 0,000754 \text{ m}^2$

návrh výztuže dolní povrch desky nad stěnou (tažený):

$$A_s = \max\{0,5 \cdot A_{sf}; 0,25 \cdot A_{sf} + 1,0 \cdot A_{st} + 0,2 \cdot A_{st}\}$$

$$A_s = \max\{0,5 \cdot 0; 0,25 \cdot 0 + 1,0 \cdot 0,001963 + 0,2 \cdot 0,001963\}$$

$$A_s = \max\{0; 0,002159\}$$

$$A_s = 0,001608 \text{ m}^2$$

navržena výztuž: Ø18 po 150 mm; $A_s = 0,001696 \text{ m}^2$

13.4.5.7 Kotvení a stykování výztuží

$$f_{ctd} = \alpha_c \cdot \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{3,2}{1,5} = 2,13 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = 1,0 \quad \text{pro dobré podmínky soudržnosti}$$

$$\eta_2 = 1,0 \quad \text{pro } \varnothing \leq 32 \text{ mm}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,13 = 4,793 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

základní kotevní délka:

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

návrhová kotevní délka:

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

$$\alpha_{1-5} = 1,0 \quad \text{odhad na stranu bezpečnou}$$

návrhová přesahová délka:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd}$$

v jednom místě bude stykováno 50% výztuže:

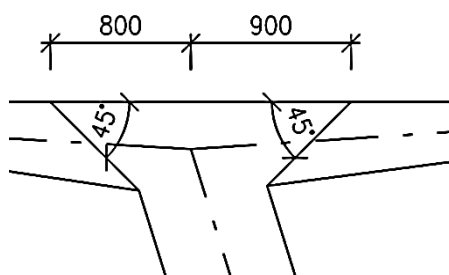
$$\alpha_6 = \sqrt{\rho_1/25} = \sqrt{50/25} = 1,4$$

| \varnothing | návrhová kotevní dl. | navržená kotevní dl. | návrhová přesahová dl. | navržená přesahová dl. |
|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| [mm] | | | | |
| 8 | 181 | 190 | 254 | 260 |
| 10 | 227 | 230 | 317 | 320 |
| 12 | 272 | 280 | 381 | 390 |
| 14 | 317 | 320 | 444 | 450 |
| 16 | 363 | 370 | 508 | 510 |
| 18 | 408 | 410 | 571 | 580 |
| 20 | 454 | 460 | 635 | 640 |
| 22 | 499 | 500 | 698 | 700 |
| 24 | 544 | 550 | 762 | 770 |

Tab. 52: Kotevní a stykací délky

13.4.6 Posouzení smykové únosnosti

Smyková únosnost je posouzena na konci smykové trhliny, která je vedena pod úhlem 45°. Posouvající síly jsou odečteny v kritickém řezu.



Obr. 49: Umístění kritického řezu pro smykovou únosnost

13.4.6.1 Řez A zleva

$$V_{Ed} = 198,64 \text{ kN}$$

$$b = 1\,000 \text{ mm}$$

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - \frac{\varnothing}{2} = 500 - 50 - \frac{20}{2} = 440 \text{ mm}$$

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

$$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/440} = 1,674 \leq 2,0$$

$$b_w = 1\,000 \text{ mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{0,002885}{1 \cdot 0,44} = 0,0066 < 0,02$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5} = 0,035 \cdot 1,674^{1,5} \cdot 35^{0,5} = 0,448$$

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

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= [0,12 \cdot 1,674 \cdot (100 \cdot 0,0066 \cdot 35)^{1/3}] \cdot 1\,000 \cdot 440 = \\ &= 251,73 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$V_{Rd,c,min} = 0,448 \cdot 440 \cdot 1\,000 = 197,12 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,min} \leq V_{Rd,c}$$

$$197,12 \text{ kN} \leq 251,73 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 189,64 \text{ kN} < V_{Rd,c} = 251,73 \text{ kN} \rightarrow \text{není nutný návrh smykové výztuže}$$

→ spony navrženy dle konstrukčních zásad

13.4.6.2 Řez A zprava

$$V_{Ed} = 171,84 \text{ kN}$$

$$b = 1\,000 \text{ mm}$$

$$h = 475 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - \frac{\varnothing}{2} = 475 - 50 - \frac{20}{2} = 415 \text{ mm}$$

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

$$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/415} = 1,694 \leq 2,0$$

$$b_w = 1\,000 \text{ mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{0,002417}{1 \cdot 0,415} = 0,0058 < 0,02$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5} = 0,035 \cdot 1,694^{1,5} \cdot 35^{0,5} = 0,457$$

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

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= [0,12 \cdot 1,694 \cdot (100 \cdot 0,0058 \cdot 35)^{1/3}] \cdot 1\,000 \cdot 415 = \\ &= 230,13 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$V_{Rd,c,min} = 0,457 \cdot 415 \cdot 1\,000 = 189,66 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,min} \leq V_{Rd,c}$$

$$189,66 \text{ kN} \leq 230,13 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 171,84 \text{ kN} < V_{Rd,c} = 230,13 \text{ kN} \rightarrow \text{není nutný návrh smykové výztuže}$$

→ spony navrženy dle konstrukčních zásad

13.4.6.3 Řez 5

$$V_{Ed} = 144,61 \text{ kN}$$

$$b = 1\,000 \text{ mm}$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 300 - 50 - \frac{20}{2} = 240 \text{ mm}$$

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

$$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/240} = 1,913 \leq 2,0$$

$$b_w = 1\,000 \text{ mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{0,002244}{1 \cdot 0,240} = 0,0094 < 0,02$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5} = 0,035 \cdot 1,913^{1,5} \cdot 35^{0,5} = 0,548$$

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

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 1,913 \cdot (100 \cdot 0,0094 \cdot 35)^{1/3} \right] \cdot 1\,000 \cdot 240 = \\ = 176,54 \text{ kN}$$

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

$$V_{Rd,c,min} = 0,548 \cdot 240 \cdot 1\,000 = 131,52 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,min} \leq V_{Rd,c}$$

$$131,52 \text{ kN} \leq 176,54 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 144,61 \text{ kN} < V_{Rd,c} = 176,54 \text{ kN} \rightarrow \text{není nutný návrh smykové výztuže}$$

→ spony navrženy dle konstrukčních zásad

13.4.6.4 Konstrukční zásady pro rozmístění smykové výztuže

vzdálenost spon:

$$s_l = 0,75 \cdot d$$

$$d_{\min} = 240 \text{ mm}$$

$$s_l = 0,75 \cdot 240 = 180 \text{ mm}$$

→ spony budou v každé části desky v jiných vzdálenostech z důvodu proměnné účinné výšky

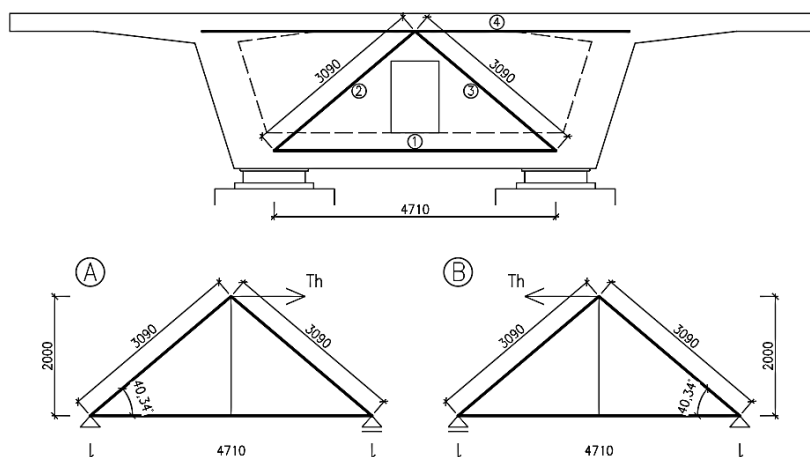
→ konstrukční zásada: 5 – 9 spon/1 m

$$1\,000/180 = 5,56 \text{ ks}$$

→ min 6 ks spon/1 m

14 NÁVRH PŘÍČNÍKU

Příčník je navržen pomocí metody S&T (vzpěra a táhlo). Uložení konstrukce na ložiska bude provedeno jako přímé, reakce tedy budou směřovat do stěn průřezu. Příčník je dimenzován na maximální kroutící moment.



Obr. 50: Příhradový model příčníku

síla od kroucení:

$$T_H = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot l = \frac{6\,426,53}{2 \cdot 16,599} \cdot 4,710 = 911,77 \text{ kN}$$

model A:

$$N_1 = \frac{T_H}{2} = \frac{911,77}{2} = 455,89 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_2 = \frac{T_H}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{911,77}{2 \cdot \cos 40,34} = 598,10 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_3 = \frac{T_H}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{911,77}{2 \cdot \cos 40,34} = 598,10 \text{ kN (tah)}$$

$$N_4 = \frac{T_H}{2} = \frac{911,77}{2} = 455,89 \text{ kN (tah)}$$

model B:

$$N_1 = \frac{T_H}{2} = \frac{911,77}{2} = 455,89 \text{ kN (tah)}$$

$$N_2 = \frac{T_H}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{911,77}{2 \cdot \cos 40,34} = 598,10 \text{ kN (tah)}$$

$$N_3 = \frac{T_H}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{911,77}{2 \cdot \cos 40,34} = 598,10 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_4 = \frac{T_H}{2} = \frac{911,77}{2} = 455,89 \text{ kN (tah)}$$

NÁVRH VÝZTUŽE:

$$\sigma_{sd,max} = 250 \text{ MPa}$$

prut 1,4 (vzpěra i táhlo)

$$N_{Ed} = \pm 455,89 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{sd,max}} = \frac{455,89 \cdot 10^3}{250} = 1\,823,56 \text{ mm}^2$$

navržena výztuž: 8 Ø20; $A_s = 0,002513 \text{ m}^2$

$$N_{Rd} = A_s \cdot \sigma_{sd,max} = 0,002513 \cdot 250 \cdot 10^3 = 628,25 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$455,89 \text{ kN} \leq 628,25 \text{ kN}$$

VYHOVÍ

prut 2,3 (vzpěra i táhlo)

$$N_{Ed} = \pm 598,10 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{sd,max}} = \frac{598,10 \cdot 10^3}{250} = 2\,392,40 \text{ mm}^2$$

navržena výztuž: 10 Ø20; $A_s = 0,003140 \text{ m}^2$

$$N_{Rd} = A_s \cdot \sigma_{sd,max} = 0,003140 \cdot 250 \cdot 10^3 = 785,00 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

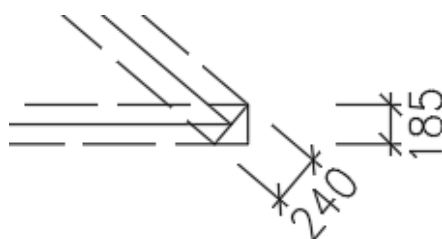
$$598,10 \text{ kN} \leq 785,00 \text{ kN}$$

VYHOVÍ

POSOUZENÍ VZPĚŘ:

b = délka příčnicku

$$b = 1,5 \text{ m}$$



Obr. 51: Styčník u podpory

vzpěra 2,3

$$N_{Ed} = \pm 598,10 \text{ kN}$$

$$A_c = b \cdot h = 1,5 \cdot 0,24 = 0,36 \text{ m}^2$$

$$k_1 = 0,85 \text{ (vzpěra + táhlo)}$$

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{35}{250} = 0,86$$

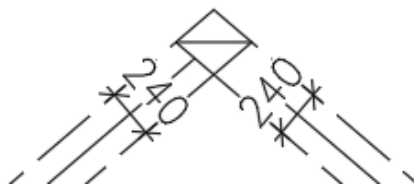
$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot v' \cdot f_{cd} = 0,85 \cdot 0,86 \cdot 21 = 15,351 \text{ MPa}$$

$$N_{Rd,c} = A_c \cdot \sigma_{Rd,max} = 0,36 \cdot 15,351 = 5\,526,36 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,c}$$

$$598,10 \text{ kN} \leq 5\,526,36 \text{ kN}$$

VYHOVÍ



Obr. 52: Styčník

vzpěra 1,4

$$N_{Ed} = 455,89 \text{ kN}$$

$$A_c = b \cdot h = 1,5 \cdot 0,24 = 0,36 \text{ m}^2$$

$$k_1 = 0,75 \text{ (vzpěra + 2x táhlo)}$$

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{35}{250} = 0,86$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot v' \cdot f_{cd} = 0,75 \cdot 0,86 \cdot 21 = 13,545 \text{ MPa}$$

$$N_{Rd,c} = A_c \cdot \sigma_{Rd,max} = 0,36 \cdot 13,545 = 4\,876,20 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,c}$$

$$455,89 \text{ kN} \leq 4\,876,20 \text{ kN}$$

VYHOVÍ

15 ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo navrhnout a posoudit mostní konstrukce z dodatečně předpjatého betonu. Most se nachází na dálnici D1 na Slovensku a přemostňuje komunikaci D26,5/100 přes hluboké údolí. Pro řešení tohoto přemostění byly navrženy tři varianty, z nichž byla vybrána varianta 3 k podrobnému zpracování. Jedná se o variantu dvou souběžných komorových mostů, pro každý směr komunikace jeden most, o konstantní výšce průřezu, vedených vedle sebe. Protože jsou oba mosty totožné byl celý výpočet proveden pouze pro jeden most.

V programu Scia Engineer 16 byly vymodelovány tři výpočtové modely. Pro podélný směr byl použit model prutový 3D, pro příčný směr deskostěnový 3D a pro analýzu TDA prutový 2D model. Prutový 3D model sloužil k návrhu předpětí a posouzení v podélném směru. Deskostěnový 3D model byl využit pro posouzení v příčném směru. Tyto dva modely byly zatíženy vlastní tíhou, ostatním stálým zatížením a zatížením od dopravy. Pro posouzení fází výstavby a zahrnutí vlivu dotvarování betonu byl využit prutový 2D model.

Předběžný návrh předpětí byl realizován pomocí metody vyrovnání zatížení. Bylo vyrovnáno 90 – 100% stálého zatížení. Dle předběžného návrhu bylo v konstrukci navrženo 8 kabelů po 23 lanech. Krátkodobá ztráty byly odečteny z 2D prutového modelu, kde byly kabely namodelovány podle fází výstavby. Dlouhodobé ztráty byly vypočítány ručně v kritických řezech.

Stanoveny byly kombinace jak pro mezní stav použitelnosti – charakteristická, častá a kvazistálá, tak pro mezní stav únosnosti podle rovnic 6.10a a 6.10b. Byl proveden posudek na mezní stav použitelnosti, a to omezení napětí v různých časech působení konstrukce a omezení vzniku trhlin. Konstrukce byla také posouzena v mezním stavu únosnosti. Dále byl průřez nad podporou posouzen na účinky smyku a kroucení. Následoval posudek v příčném směru, a to na účinky příčného ohybu a smyku.

Na základě statického výpočtu – navržených rozměrů a dimenzí, byla zpracována výkresová dokumentace, která je doplněna o 3D vizualizaci.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Schéma podélného uspořádání
- Obr. 2: Příčné uspořádání
- Obr. 3: Detail římsy
- Obr. 4: Plný průřez v poli
- Obr. 5: Plný průřez nad podporou
- Obr. 6: Definice l_0 pro výpočet spolupůsobící šířky desky
- Obr. 7: Označení efektivních šířek
- Obr. 8: Efektivní průřez pole 1
- Obr. 9: Efektivní průřez podpora B
- Obr. 10: Efektivní průřez pole 2
- Obr. 11: Efektivní průřez podpora C
- Obr. 12: Rozdělení vozovky do zatěžovacích pruhů
- Obr. 13: Umístění LM1 na řešenou komunikaci
- Obr. 14: Umístění LM3 1800/200 na řešenou komunikaci
- Obr. 15: Umístění LM3 3000/240 na řešenou komunikaci
- Obr. 16: Prutový model
- Obr. 17: Pohled na model
- Obr. 18: Dráha teoretického kabelu
- Obr. 19: Ohybové momenty od stálého zatížení
- Obr. 20: Ohybové momenty od předpětí v čase t_0
- Obr. 21: Ohybové momenty po vyrovnaní zatížení
- Obr. 22: Kotva VSL typ E 6-31
- Obr. 23: Označení rozměrů výklenku pro aktivní kotvy - typ E
- Obr. 24: Skutečná dráha kabelu
- Obr. 25: Fáze napínání kabelů
- Obr. 26: Fáze výstavby
- Obr. 27: Průběh přetvoření podpěra C
- Obr. 28: Průběh přetvoření $\frac{1}{2}$ 5. pole
- Obr. 29: Střednicová plocha a obvod průřezu nad podporou D
- Obr. 30: Umístění kritického řezu
- Obr. 31: Zahrnutí vlivu šikmosti stěn
- Obr. 32: Plocha stěny

Obr. 33: Spolupůsobení desky se stěnou komory
Obr. 34: Spolupůsobení desky se stěnou komory
Obr. 35: Pohled na model
Obr. 36: Rendrovaný model
Obr. 37: Rozmístění ostatního stálého zatížení
Obr. 38: Umístění zatížení uvnitř komory
Obr. 39: Označení řezů v příčném směru
Obr. 40: Roznos zatížení od dvojnápravy
Obr. 41: Rozmístění vozidel pro max M_2
Obr. 42: Rozmístění vozidel pro max M_A a max V_A zleva
Obr. 43: Rozmístění vozidel pro max V_A zprava
Obr. 44: Roznos zatížení od vozidla 1800/200
Obr. 45: Roznos zatížení od vozidla 1800/200
Obr. 46: Umístění vozidla 1800/200 pro max M_A
Obr. 47: Umístění vozidla 1800/200 pro max M_2
Obr. 48: Umístění vozidla 3000/240
Obr. 49: Umístění kritického řezu pro smykovou únosnost
Obr. 50: Příhradový model příčnicku
Obr. 51: Styčnick u podpory
Obr. 52: Styčnick

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1: Průřezové charakteristiky plného průřezu v poli
- Tab. 2: Průřezové charakteristiky plného průřezu nad podporou
- Tab. 3: Hodnoty efektivních šířek
- Tab. 4: Průřezové charakteristiky efektivního průřezu - podpora B
- Tab. 5: Průřezové charakteristiky efektivního průřezu - podpora C
- Tab. 6: Výpočet ostatního stálého zatížení
- Tab. 7: Regulační součinitelé α pro ČR
- Tab. 8: Charakteristické hodnoty zatížení
- Tab. 9: Charakteristické hodnoty zatížení LM1 s regulačními součiniteli
- Tab. 10: Požité třídy zvláštních vozidel
- Tab. 11: Zvláštní vozidla pro dálnice, rychlostní komunikace a vybrané trasy
- Tab. 12: Charakteristické hodnoty zatížení LM3 1800/200
- Tab. 13: Charakteristické hodnoty zatížení LM3 3000/240
- Tab. 14: Rozměry výklenků pro aktivní kotvy – typ E
- Tab. 15: Průběh výstavby ve dnech
- Tab. 16: Průběh ohybových momentů TDA
- Tab. 17: Průběh ohybových momentů (bez vlivu TDA)
- Tab. 18: Průběh ohybových momentů v čase zatížení dopravou (bez vlivu TDA)
- Tab. 19: Průběh ohybových momentů v čase zatížení dopravou (s vlivem TDA)
- Tab. 20: Rekapitulace krátkodobých ztrát
- Tab. 21: Ztráty relaxací výztuže
- Tab. 22: Ztráty dotvarováním betonu
- Tab. 23: Rekapitulace dlouhodobých ztrát
- Tab. 24: Výsledné hodnoty ztrát
- Tab. 25: Hodnoty součinitelů ψ pro mosty pozemních komunikací
- Tab. 26: Posouzení napětí fáze 1
- Tab. 27: Posouzení napětí fáze 2
- Tab. 28: Posouzení napětí fáze 3
- Tab. 29: Posouzení napětí fáze 4
- Tab. 30: Posouzení napětí fáze 5
- Tab. 31: Ohybové momenty od účinků zatížení čas t_{∞} [kNm]
- Tab. 32: Normálová síla od účinků předpětí čas t_{∞} [kN]

Tab. 33: Kombinace ohybových momentů čas t_{∞} [kNm]

Tab. 34: Posouzení napětí charakteristická kombinace t_{∞}

Tab. 35: Posouzení napětí častá kombinace t_{∞}

Tab. 36: Posouzení napětí kvazistálá kombinace t_{∞}

Tab. 37: Ohybové momenty od účinků zatížení [kNm]

Tab. 38: Normálová síla od účinků předpětí v čase zatížení dopravou [kN]

Tab. 39: Kombinace ohybových momentů čas t_{∞} [kNm]

Tab. 40: Posouzení napětí charakteristická kombinace v čase zatížení dopravou

Tab. 41: Posouzení napětí častá kombinace v čase zatížení dopravou

Tab. 42: Posouzení napětí kvazistálá kombinace v čase zatížení dopravou

Tab. 43: Kombinace zatížení pro mezní stavy únosnosti

Tab. 44: Ohybové momenty od účinků zatížení [kNm]

Tab. 45: Kombinace ohybových momentů [kNm]

Tab. 46: Kombinace V + T podpěra B

Tab. 47: Kombinace V + T podpěra C

Tab. 48: Kombinace V + T podpěra D

Tab. 49: Kombinace V + T podpěra E

Tab. 50: Kombinace ohybových momentů pro příčný směr

Tab. 51: Kombinace posouvajících sil pro příčný směr

Tab. 52: Kotevní a stykovací délky

SEZNAM ZKRATEK

| | |
|--------------|--|
| A_c | plocha betonu |
| $A_{c,eff}$ | efektivní tlačená plocha betonu |
| A_i | plocha ideálního průřezu |
| A_p | průřezová plocha předpínací výztuže |
| A_{p1} | průřezová plocha jednoho předpínacího lana |
| $A_{p,req}$ | nutná plocha předpínací výztuže |
| A_{sl} | plocha výztuže, která je zakotvena na kotevní délku l_{bd} |
| A_{st} | průřezová plocha betonářské výztuže |
| b | šířka průřezu |
| b_w | nejmenší šířka průřezu vzdorující smyku |
| c | betonová krycí vrstva |
| c_{min} | minimální hodnota betonové krycí vrstvy |
| $c_{min,b}$ | minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti |
| $c_{min,b}$ | minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí |
| c_{nom} | nominální hodnota betonové krycí vrstvy |
| d | účinná výška |
| E_{cm} | sečnový modul pružnosti betonu |
| e_p | excentricita předpínací síly |
| E_p | modul pružnosti předpínací výztuže |
| E_s | modul pružnosti betonářské výztuže |
| f_{cd} | návrhová hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku |
| f_{ck} | charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku |
| f_{cm} | střední hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku |
| f_{ctm} | střední hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu |
| f_{pd} | návrhová hodnota pevnosti v tahu předpínací výztuže |
| f_{pk} | charakteristická hodnota pevnosti v tahu předpínací výztuže |
| $f_{p0,1,k}$ | smluvní mez kluzu předpínací výztuže |
| $f_{ct,eff}$ | průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu v okamžiku prvního očekávaného vzniku trhlin |
| f_{yd} | návrhová hodnota meze kluzu betonářské výztuže |

| | |
|----------------|--|
| f_{yk} | charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže |
| F_c | výslednice tlaku betonu (vnitřní síla v průřezu) |
| F_p | výslednice tahu v předpínací výztuži (vnitřní síla v průřezu) |
| F_s | výslednice tahu v betonářské výztuži (vnitřní síla v průřezu) |
| g_d | návrhová hodnota stálého zatížení |
| g_k | charakteristická hodnota stálého zatížení |
| g_{0k} | charakteristická hodnota vlastní tíhy konstrukce |
| g_{1k} | charakteristická hodnota ostatního stálého zatížení |
| h | výška konstrukce |
| h_0 | náhradní konstrukce |
| $h_{c,eff}$ | efektivní výška konstrukce |
| I_c | moment setrvačnosti betonového průřezu |
| I_{cr} | moment setrvačnosti ideálního průřezu porušeného trhlinami |
| I_i | moment setrvačnosti plně působícího ideálního průřezu |
| k | empiricky stanovená nezamýšlená úhlová změna na jednotku délky kabelu |
| k_h | součinitel závislý na náhradní tloušťce h_0 |
| L | rozpětí konstrukce |
| l_{bd} | kotevní délka |
| $M_{g_{0,k}}$ | charakteristická hodnota ohybového momentu od vlastní tíhy $k - ce$ |
| $M_{g_{1k}}$ | charakteristická hodnota ohybového momentu od ostatního stálého zatížení |
| M_{Ek} | charakteristická hodnota ohybového momentu od svislého zatížení a předpětí |
| M_{Ed} | návrhová hodnota ohybového momentu od svislého zatížení a předpětí |
| M_{Fk} | charakteristická hodnota ohybového momentu od svislého zatížení |
| $M_{Fk\psi_1}$ | častá hodnota ohybového momentu od svislého zatížení |
| $M_{Fk\psi_2}$ | kvazistálá hodnota ohybového momentu od svislého zatížení |
| M_{Pk} | charakteristická hodnota ohybového momentu způsobeného předpínací silou |

| | |
|---------------|---|
| M_{qk} | charakteristická hodnota ohybového momentu od užitého zatížení |
| M_{Rd} | moment na mezi únosnosti |
| \emptyset | profil, průměr výztužné vložky |
| n_{req} | nutný počet předpínacích lan |
| N_{Ed} | návrhová hodnota normálové síly od svislého zatížení a předpětí |
| N_{Ek} | charakteristická hodnota normálové síly od svislého zatížení a předpětí |
| P | normálová předpínací |
| P_{m0} | normálová síla od předpětí v čase t_0 |
| $P_{m\infty}$ | normálová síla od předpětí v čase t_∞ – kvazistálá kombinace |
| q_k | charakteristická hodnota užitého zatížení |
| q_d | návrhová hodnota užitého zatížení |
| RH | relativní vlhkost |
| $s_{r,max}$ | maximální vzdálenost mezi sousedními trhlinami |
| t | čas |
| t_i | vzdálenost těžiště ideálního průřezu od těžiště betonového průřezu |
| u | obvod průřezu vystavený vzduchu |
| V_{Ek} | návrhová hodnota posouvající síly od svislého zatížení |
| $V_{Rd,c}$ | návrhová smyková únosnost betonu a podélné výztuže |
| v_{min} | minimální smykové napětí |
| w_k | charakteristická šířka trhliny |
| w_{max} | maximální dovolená šířka trhliny |
| x | vzdálenost neutrální osy od horního/spodního okraje průřezu |
| x_c | výška tlačené části betonu |
| x_r | výška tlačené části betonu na průřezu porušeném trhlinou |
| z_c | vzdálenost výslednice tlaku v betonu od těžiště betonové části průřezu |

| | |
|---------------------|---|
| α_e | poměr modulů pružnosti oceli a betonu |
| γ_c | dílčí součinitel betonu |
| γ_p | dílčí součinitel předpínací oceli |
| γ_s | dílčí součinitel betonářské oceli |
| Δ | přírůstek, změna |
| $\Delta\sigma_p$ | změna napětí v předpínací výztuži |
| ε_c | poměrné přetvoření betonu |
| ε_{ca} | poměrné přetvoření od autogenního smršťování betonu |
| ε_{cc} | poměrné přetvoření od dotvarování betonu |
| ε_{cd} | poměrné přetvoření od vysychání betonu |
| ε_{cm} | průměrné poměrné betonu |
| ε_{cu} | mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku |
| ε_{cs} | poměrné přetvoření od smršťování betonu |
| ε_p | poměrné přetvoření předpínací výztuže |
| ε_s | průměrné poměrné přetvoření betonářské výztuže |
| φ | koeficient dotvarování |
| μ | součinitel tření |
| ρ | stupeň vyztužení |
| $\rho_{p,eff}$ | efektivní stupeň vyztužení |
| σ_c | napětí v betonu |
| σ_{cp} | napětí v betonu v úrovni předpínací výztuže |
| $\sigma_{c1,2}$ | napětí v betonu ve spodních a horních vláknech průřezu |
| $\sigma_{p,max}$ | maximální přípustné napětí v předpínací výztuži během předpínání |
| $\sigma_{p0,max}$ | maximální přípustné napětí v předpínací výztuži po vnesení předpětí do betonu |
| σ_{pm0} | napětí v čase zakotvení, po krátkodobých ztrátách |
| $\sigma_{pm\infty}$ | napětí na konci životnosti konstrukce |
| σ_p | napětí v předpínací výztuži |
| σ_p^0 | základní napětí v předpínací výztuži |
| σ_s | napětí v betonářské výztuži |
| ψ | součinitel pro kombinace zatížení |