

VYZTUŽOVÁNÍ PORUCHOVÝCH OBLASTÍ ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE: NÁVRH VYZTUŽENÍ ŽELEZOBETONOVÉHO VAZNÍKU S VELKÝM OTVOREM



Projekt: Vyztužování poruchových oblastí železobetonové konstrukce

Dílčí část: Návrh konstrukčních prvků s otvory - železobetonový vazník s velkým otvorem

Vypracoval: Ing. Josef Novák, Ph.D. a kolektiv
ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí
Thákurova 7, Praha 6 - Dejvice

Podpora: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky
Karmelitská 529/5, 118 12 Praha 1

Datum: 2017



Obsah

Obsah.....	- 1 -
Seznam použitých symbolů.....	- 2 -
1 Úvod.....	- 4 -
2 Návrh vyztužení oblasti kolem otvoru	- 6 -
2.1 Geometrie.....	- 6 -
2.2 Vnitřní síly.....	- 6 -
2.3 Vlastnosti materiálu	- 7 -
2.3.1 Beton C45/55	- 7 -
2.3.2 Ocel B500B	- 7 -
2.4 Ohybová únosnost plného průřezu	- 7 -
2.5 Únosnost tlačené diagonály plného průřezu	- 8 -
2.6 Návrh vyztužení oblasti kolem otvoru	- 8 -
Reference.....	- 12 -



Seznam použitých symbolů

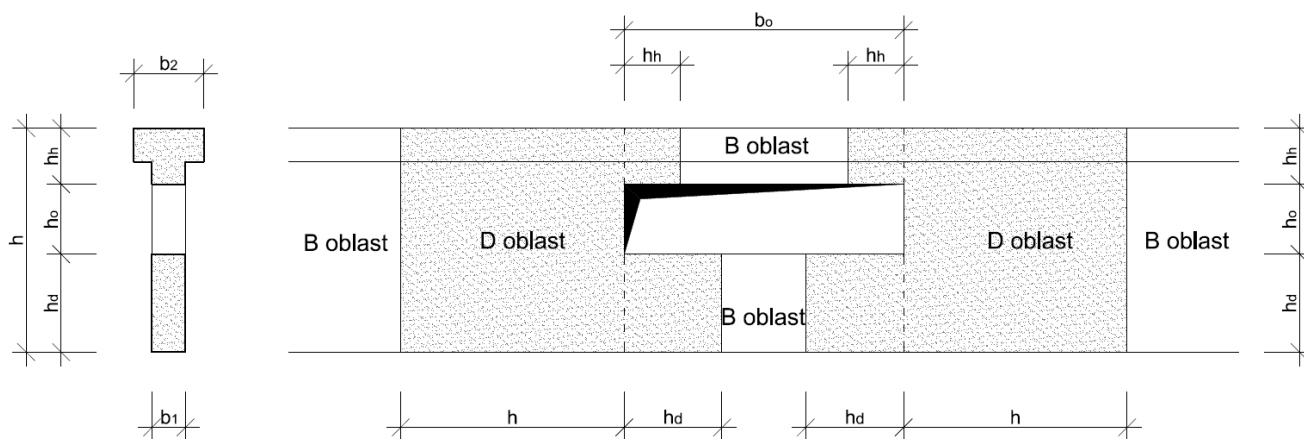
A_d	Plocha průřezu dolního pasu
A_h	Plocha průřezu horního pasu
$A_{h,1}$	Plocha části průřezu horního pasu
$A_{h,2}$	Plocha části průřezu horního pasu
A_s	Celková plocha tažené ohybové výztuže
$A_{s,prov}$	Navržená plocha výztuže
$A_{s,T1,req}$	Požadovaná plocha výztuže pro svislé táhlo
$A_{s,T2,req}$	Požadovaná plocha výztuže pro svislé táhlo
$A_{s,Td,req}$	Požadovaná plocha výztuže pro táhlo v dolním pasu
$A_{s,Th,req}$	Požadovaná plocha výztuže pro táhlo v horním pasu
b_1	Šířka stojiny průřezu
b_2	Šířka pásnice průřezu
b_o	Šířka otvoru
d	Účinná výška plného průřezu
d_1	Vzdálenost těžiště betonářské výztuže k taženému povrchu průřezu
d_{d1}	Vzdálenost těžiště betonářské výztuže k taženému povrchu průřezu dolního pasu
d_h	Účinná výška horního pasu
d_{h1}	Vzdálenost těžiště betonářské výztuže k taženému povrchu průřezu horního pasu
E_{cm}	Modul pružnosti betonu
E_s	Modul pružnosti betonářské výztuže
f_{bd}	Mezní napětí soudržnosti pro žebírkovou výztuž
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
$f_{ct\ 0,05}$	Charakteristická hodnota pevnosti betonu v osovém tahu
f_{ctm}	Střední hodnota pevnosti betonu v osovém tahu
f_d	Návrhová hodnota liniového zatížení včetně vlastní tíhy
f_{yd}	Návrhová hodnota meze kluzu betonářské výztuže
f_{yk}	Charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže
f_{ywd}	Návrhová hodnota meze kluzu smykové výztuže
h	Celková výška průřezu
h_1	Výška stojiny průřezu
h_2	Výška pásnice průřezu
h_d	Výška dolního pasu
h_h	Výška horního pasu
h_o	Výška otvoru
I_d	Moment setrvačnosti dolního pasu

I_h	Moment setrvačnosti horního pasu
l_{bd}	Návrhová kotevní délka
l_e	Délka zakotvení výztuže od líce otvoru
x	Výška tlačené části průřezu
x^*	Vzdálenost nulového ohybového momentu od líce otvoru
x_{otvor}	Vzdálenost podpory od líce otvoru
z	Rameno vnitřních sil plného průřezu
z_{dc}	Rameno vnitřních sil dolního pasu
z_h	Vzdálenost těžiště průřezu horního pásu k tlačnému okraji plného průřezu
$z_{h,1}$	Vzdálenost těžiště průřezu části stojiny k tlačnému okraji plného průřezu
$z_{h,2}$	Vzdálenost těžiště průřezu pásnice k tlačnému okraji plného průřezu
z_{hc}	Rameno vnitřních sil horního pasu
z_{hN}	Vzdálenost těžiště průřezu horního pasu k ose výztuže
M_{Ed}	Návrhová hodnota maximálního ohybového momentu na vazníku
$M_{Ed,líc}$	Návrhová hodnota ohybového momentu v líci otvoru
$N_{Ed,d}$	Návrhová hodnota normálové síly v dolním pasu z ohybového momentu v líci otvoru
$N_{Ed,h}$	Návrhová hodnota normálové síly v horním pasu z ohybového momentu v líci otvoru
T_1	Svislé táhlo
T_{1V}	Síla ve svislém táhle od posouvající síly
T_{1M}	Síla ve svislém táhle od ohybového momentu
T_{1N}	Síla ve svislém táhle od normálové síly
T_2	Svislé táhlo
T_{2V}	Síla ve svislém táhle od posouvající síly
T_{2M}	Síla ve svislém táhle od ohybového momentu
T_{2N}	Síla ve svislém táhle od normálové síly
T_d	Vodorovné táhlo v dolním pasu
T_h	Vodorovné táhlo v horním pasu
V_{Ed}	Návrhová hodnota maximální posouvající síly na vazníku
$V_{Ed,d}$	Návrhová hodnota maximální posouvající síly působící na dolní pas
$V_{Ed,h}$	Návrhová hodnota maximální posouvající síly působící na horní pas
$V_{Ed,líc}$	Posouvající síla ve více namáhaném líci otvoru
θ	Úhel sklonu tlačných diagonál plného průřezu
θ_h	Úhel sklonu tlačných diagonál horního pasu
θ_d	Úhel sklonu tlačných diagonál dolního pasu
η_1	Součinitel zohledňující podmínky soudržnosti
η_2	Součinitel zohledňující průměr prutu
σ_{sd}	Návrhové napětí v betonářské výztuži
\emptyset	Průměr betonářské výztuže

1 Úvod

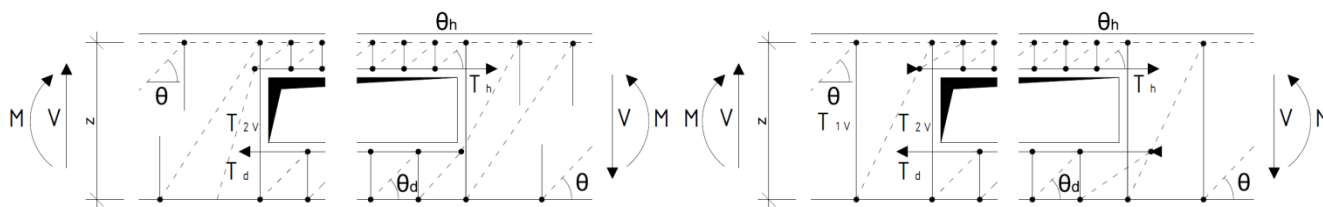
Problematika návrhu smykové vyztuže v oblasti velkých otvorů železobetonových nosníků je výrazně rozsáhlejší než u nosníků s malým otvorem. Poruchová oblast D začíná ve vzdálenosti rovné výšce průřezu od líců otvoru a končí ve vzdálenosti rovné výšce jednotlivých pasů za líci otvoru (Obr. 1). Pro výpočet nelze využít univerzální model náhradní příhradoviny. Model je nutné vždy vybírat s ohledem na geometrii otvoru, geometrii samotného nosníku, možnosti vyztužení a dokonce i způsob zatížení. Běžně se využívají tři modely náhradní příhradoviny, které se liší ve stupni zjednodušení a náročnosti výpočtu:

- Model A
- Model B
- Zjednodušený model podle DAfStB [1]

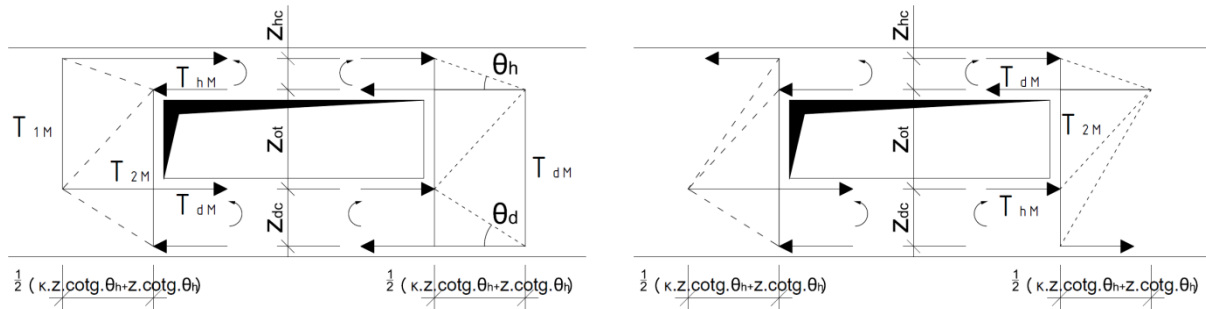


Obr. 1 Umístění D-oblastí kolem velkého otvoru

První dva modely jsou pro praxi velmi složité, a proto se v následující části budeme zabývat zjednodušeným modelem, který však není aplikovatelný na velké otvory umístěné ve středu nosníků se symetrickým zatížením. Při užití zjednodušené metody se nejdříve rozdělí vnitřní síly do primárních účinků a sekundárních účinků. Zatímco primární účinky zahrnují vnitřní síly na plném průřezu na rozhraní s otvorem (Obr.2), sekundární účinky (Obr.3) představují vnitřní síly způsobené vetknutím horního a dolního pasu do plného průřezu. Pro obě skupiny účinků existují rozdílné modely náhradní příhradoviny [2], se kterými je zapotřebí uvažovat při návrhu vyztuže. Následující vzorový příklad využívá modely pro kladnou posouvající sílu.



Obr. 2 Model pro kladnou posouvající sílu - přenos primárních ohybových momentů a posouvajících sil: varianta s rozdělenou první vzpěrou (vlevo) a varianta s rozdvojenou vzpěrou (vpravo)



Obr. 3 Model náhradní přhradoviny pro kladnou posouvající sílu: přenos sekundárních sil - ohybových momentů

Výpočet vyztužení oblasti kolem otvoru se provede v několika krocích:

- Ověření polohy otvoru na průřezu, aby nezasahovala do tlačené části průřezu a tažené výztuže. Navíc výška horního a dolního pasu nad a pod otvorem musí být minimálně 120 mm, aby bylo možné průřezy pasů vyztužit běžnou betonářskou výztuží.
- Ověření únosnosti tlačené diagonály plného průřezu, aby bylo možné navrhnout smykovou výztuž.
- Návrh smykové výztuže v oblasti otvoru:
 - a. Výpočet sekundárních vnitřních sil působících na horní a dolní pas
 - b. Stanovení tahových sil v táhlech
 - c. Návrh výztuže táhel
 - d. Ověření ohybové únosnosti a návrh smykové výztuže horního a spodního pasu běžnými metodami pro B-oblasti

Další příklady a informace k návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru železobetonového vazníku lze dohledat v českých [3] a zahraničních [4,5] publikacích.

2 Návrh vyztužení oblasti kolem otvoru

2.1 Geometrie

$b_1 = 120 \text{ mm}$ šířka stojiny průřezu

$b_2 = 250 \text{ mm}$ šířka pásnice průřezu

$h = 800 \text{ mm}$ celková výška průřezu

$h_1 = 680 \text{ mm}$ výška stojiny průřezu

$h_2 = 120 \text{ mm}$ výška pásnice průřezu

$h_o = 300 \text{ mm}$ výška otvoru

$b_o = 1000 \text{ mm}$ šířka otvoru

$l = 12\,000 \text{ mm}$ rozpětí vazníku

$h_h = 200 \text{ mm}$ výška horního pasu

$h_d = 300 \text{ mm}$ výška dolního pasu

2.2 Vnitřní síly

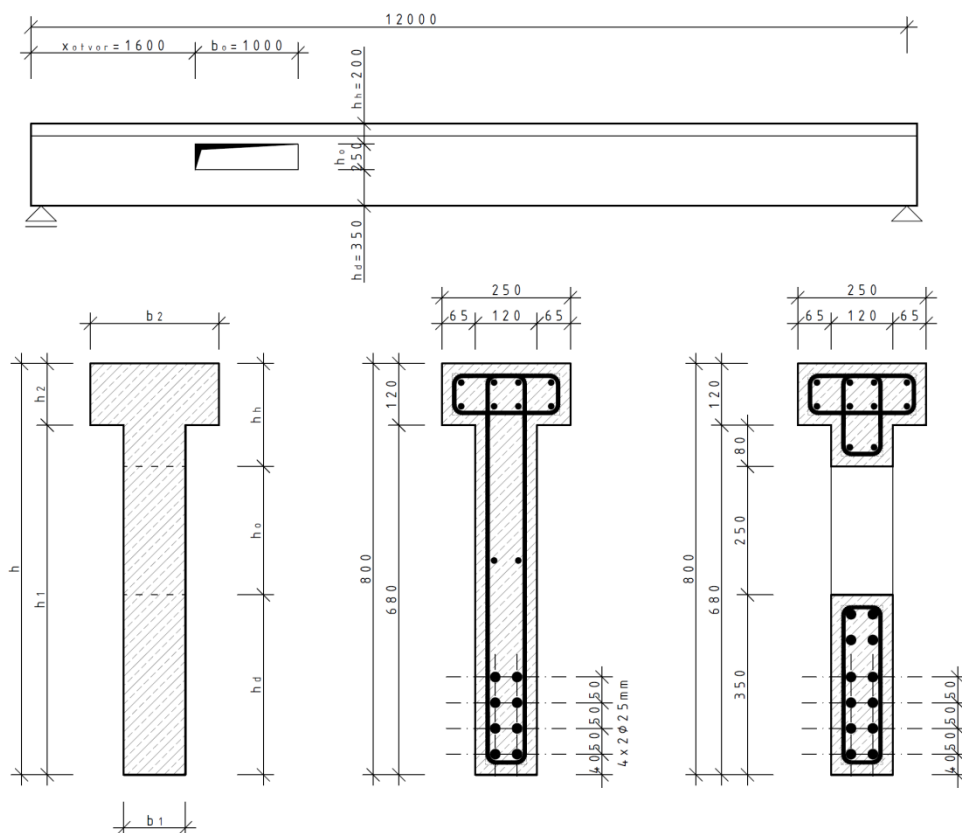
$f_d = 25 \text{ kN/m}$ návrhová hodnota liniového zatížení včetně vlastní tíhy

$V_{Ed} = 1/2 \cdot f_d \cdot l = 1/2 \cdot 25 \cdot 12 = 150 \text{ kN}$ návrhová hodnota maximální posouvající síly na vazníku

$M_{Ed} = 1/8 \cdot f_d \cdot l^2 = 1/8 \cdot 25 \cdot 12^2 = 450 \text{ kNm}$ návrhová hodnota maximálního ohybového momentu na vazníku

$V_{Ed,lic} = V_{Ed} - f_d \cdot 1,6 = 150 - 25 \cdot 1,6 = 110 \text{ kN}$ posouvající síla ve více namáhaném lici otvoru

$M_{Ed,lic} = V_{Ed} \cdot x_{otvor} - f_d \cdot \frac{x_{otvor}^2}{2} = 150 \cdot 1,6 - 25 \cdot \frac{1,6^2}{2} = 208 \text{ kNm}$ hodnota ohybového momentu v lici otvoru



Obr. 4 Geometrie vazníku s otvorem

2.3 Vlastnosti materiálu

2.3.1 Beton C45/55

$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$ charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku

$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_{Mc} = 45/1,5 = 30 \text{ MPa}$ návrhová hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku

$f_{cm} = 53 \text{ MPa}$ střední hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku

$f_{ct\ 0,05} = 2,7 \text{ MPa}$ charakteristická hodnota pevnosti betonu v osovém tahu

$f_{ctd} = f_{ct\ 0,05}/\gamma_{Mc} = 2,7/1,5 = 1,8 \text{ MPa}$ návrhová hodnota pevnosti betonu v osovém tahu

$f_{ctm} = 4,9 \text{ MPa}$ střední hodnota pevnosti betonu v osovém tahu

$E_{cm} = 36\ 000 \text{ MPa}$ modul pružnosti betonu

2.3.2 Ocel B500B

$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže

$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{Ms} = 500/1,15 = 434,7 \text{ MPa}$ návrhová hodnota meze kluzu betonářské výztuže

$f_{y,wd} = f_{yd} = 434,7 \text{ MPa}$ návrhová hodnota meze kluzu smykové výztuže

$E_s = 200 \text{ GPa}$ modul pružnosti betonářské výztuže

$A_s = 1\ 963 \text{ mm}^2$ celková plocha tažené ohybové výztuže (2 x 4 \varnothing 25 mm)

$\cot \theta = 1,5 [-]$ kotangens úhlu sklonu tlačných diagonál plného průřezu

$\cot \theta_d = 1 [-]$ kotangens úhlu sklonu tlačných diagonál dolního pásu (u tažených pásů se uvažuje hodnota = 1)

$\cot \theta_h = 1,19 [-]$ kotangens úhlu sklonu tlačných diagonál horního pásu (u tlačných pásů se uvažuje hodnota < 2)

2.4 Ohybová únosnost plného průřezu

Pro výpočet uvažován jednostranně vyztužený průřez s betonářskou výztuží 8 x \varnothing 25 mm ($A_s = 1\ 963 \text{ mm}^2$).

$$d = h - d_1 = 800 - 115 = 685 \text{ mm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b_2 \cdot f_{cd}} = \frac{1\ 963 \cdot 434,7}{0,8 \cdot 250 \cdot 30} = 142 \text{ mm} > h_2 = 120 \text{ mm}$$

Ačkoliv výška tlačené části průřezu zasahuje do stojiny průřezu, idealizovaný průběh napětí je rozložen pouze v pásnici průřezu. Šířka stojiny a pásnice se navíc výrazně neliší a proto lze pro další výpočet uvažovat se stanovenou výškou tlačené části průřezu $x = 142 \text{ mm}$. Pak je otvor v železobetonovém vazníku umístěn takovým způsobem, že nezasahuje do tlačené části průřezu a jeho polohu není zapotřebí měnit.

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{142}{685} = 0,207 [-] \leq \xi_{lim} = 0,45 [-]$$



$$z = d - 0,4 \cdot x = 685 - 0,4 \cdot 142 = 628 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 1\,963 \cdot 434,7 \cdot 628 = 535 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 50 \text{ kNm}$$

OK

2.5 Únosnost tlačené diagonály plného průřezu

Pro návrh smykové výztuže pro oblast s otvorem je zapotřebí ověřit únosnost tlačené diagonály plného průřezu podle následujícího vztahu [6]:

$$V_{Rd,max} = v \cdot f_{cd} \cdot b_1 \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,492 \cdot 30 \cdot 120 \cdot 628 \cdot \frac{1,5}{1 + 1,5^2} = 513 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 150 \text{ kN}$$

OK

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{45}{250}\right) = 0,492 [-]$$

Únosnost tlačené diagonály plného průřezu je vyšší než maximální návrhová hodnota posouvající síly působící na vazníku - při působení maximální posouvající síly nedojde k porušení prvku drcením betonu a lze tak pokračovat v návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru.

2.6 Návrh vyztužení oblasti kolem otvoru

Při návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru se musí nejprve stanovit vnitřní síly. Primární vnitřní síly v lici otvoru lze dohledat v zadání příkladu, sekundární vnitřní síly stanovíme následujícím způsobem. Pro rozdělení posouvající síly na síly působící na horní a dolní pas se mohou použít tři metody rozdělení - rozdělení v poměru momentů setrvačnosti, rozdělení na základě parametrické studie a rozdělení v poměru upravených momentů setrvačnosti. Ve vzorovém příkladu se posouvající síla rozdělí v poměru momentů setrvačnosti.

Nejdříve se musí stanovit moment setrvačnosti horního a spodního pasu.

$$z_{h,1} = h_2 + \frac{h_h - h_2}{2} = 120 + \frac{200 - 120}{2} = 160 \text{ mm}$$

$$z_{h,2} = \frac{h_2}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm}$$

$$A_{h,1} = (h_h - h_2) \cdot b_1 = (200 - 120) \cdot 120 = 9\,600 \text{ mm}^2$$

$$A_{h,2} = b_2 \cdot h_2 = 250 \cdot 120 = 30\,000 \text{ mm}^2$$

$$A_h = A_{h,1} + A_{h,2} = 30\,000 + 9\,600 = 39\,600 \text{ mm}^2$$

$$z_h = \frac{A_{h,1} \cdot z_{h,1} + A_{h,2} \cdot z_{h,2}}{A_h} = \frac{30\,000 \cdot 60 + 9\,600 \cdot 160}{39\,600} = 84,2 \text{ mm}$$

$$I_h = \frac{1}{12} \cdot b_2 \cdot h_2^3 + A_{h,2} \cdot (z_{h,2} - z_h)^2 + \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot (h_h - h_2)^3 + A_{h,1} \cdot (z_{h,1} - z_h)^2$$

$$I_h = \frac{1}{12} \cdot 250 \cdot 120^3 + 30\,000 \cdot (60 - 84)^2 + \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot (200 - 120)^3 + 9\,600 \cdot (160 - 84)^2 = 113\,847\,273 \text{ mm}^4$$



$$A_d = b_1 \cdot h_d = 120 \cdot 350 = 42\,000 \text{ mm}^2$$

$$z_d = h - \frac{h_d}{2} = 800 - \frac{350}{2} = 625 \text{ mm}$$

$$I_d = \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h_d^3 = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 350^3 = 428\,750\,000 \text{ mm}^4$$

$$z_{dh} = h - \frac{h_d}{2} - z_h = 800 - \frac{350}{2} - 84 = 541 \text{ mm}$$

Nyní lze stanovit posouvající síly působící na horní a dolní pas:

$$V_{Ed,h} = V_{Ed,lic} \cdot \frac{I_h}{I_h + I_d} = 110 \cdot \frac{113\,847\,273}{113\,847\,273 + 428\,750\,000} = 23,1 \text{ kN}$$

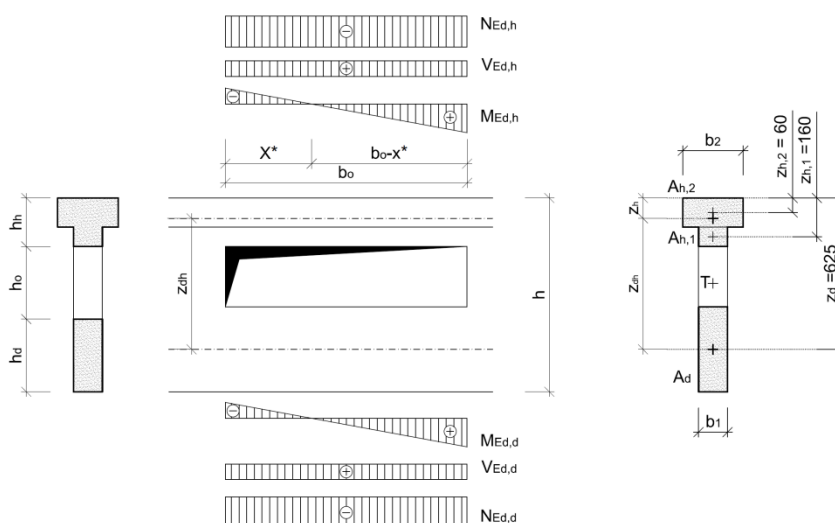
$$V_{Ed,d} = V_{Ed,lic} \cdot \frac{I_d}{I_h + I_d} = 110 \cdot \frac{428\,750\,000}{113\,847\,273 + 428\,750\,000} = 86,9 \text{ kN}$$

V další fázi výpočtu musíme stanovit ohybové momenty působící na dolním a horním pasu (Obr.5). Ačkoliv u skutečné konstrukce obvykle působí liniové zatížení přímo na horní pas vazníku (stropní deska, ostatní stálé zatížení na stropní desce apod.), pro návrh vyztužení oblasti kolem otvoru takové zatížení zanedbáme a budeme uvažovat pouze lineární průběh ohybových momentů.

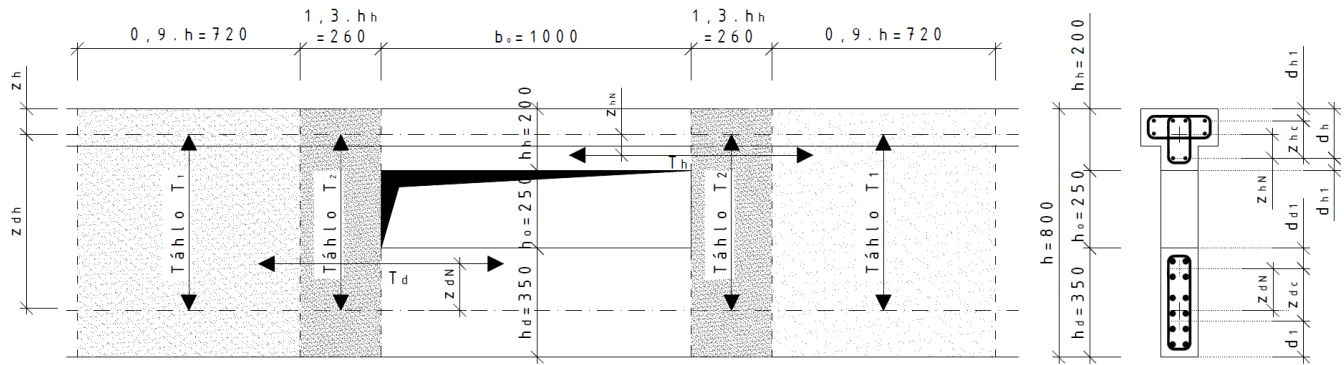
Abychom mohli stanovit hodnoty ohybových momentů na horním a dolním pasu, musíme najít polohu bodu s nulovým ohybovým momentem podle následujícího vzorce:

$$\delta = \frac{\frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d}}{z_{dh}^2 \cdot \frac{I_h}{I_d} + \left(\frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d} \right)} = 0,083 [-]$$

$$x^* = b_o \cdot \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{M_{Ed,lic}}{V_{Ed,lic} \cdot b_o} + \frac{1}{2} \right) \cdot \delta \right] = 1 \cdot \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{208}{110 \cdot 1} + \frac{1}{2} \right) \cdot 0,083 \right] = 301 \text{ mm}$$



Obr. 5 Sekundární vnitřní síly na horním a dolním pasu



Obr. 6 Zjednodušený model pro návrh vyztužení oblasti kolem otvoru

Návrhové ohybové momenty působící na horním a dolním pasu v místě vetknutí:

$$M_{Ed,h} = \max\{V_{Ed,h} \cdot x^*; V_{Ed,h} \cdot (b_o - x^*)\} = \max\{23,1 \cdot 0,301; 23,1 \cdot (1 - 0,301)\} = 16,1 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,d} = \max\{V_{Ed,d} \cdot x^*; V_{Ed,d} \cdot (b_o - x^*)\} = \max\{86,9 \cdot 0,301; 86,9 \cdot (1 - 0,301)\} = 60,8 \text{ kNm}$$

Návrhové normálové síly v dolním a horním pasu z nahrazení ohybového momentu působícího v lici otvoru:

$$N_{Ed,h} = -\frac{M_{Ed,lic}}{z_{dh}} = -\frac{208}{0,541} = -368 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,d} = \frac{M_{Ed,lic}}{z_{dh}} = \frac{208}{0,541} = 368 \text{ kN}$$

Pro návrh vyztužení oblasti kolem otvoru použijeme zjednodušený model (Obr.6), který lze s ohledem na umístění otvoru (otvor není umístěn ve střední části nosníku) aplikovat na řešenou konstrukci. Pro vyčíslení sil v táhlech musíme nejdříve stanovit následující parametry průřezu:

$$d_h = h_h - d_{h1} = 200 - 40 = 160 \text{ mm}$$

$$z_{hc} = d_h - d_{h1} = 160 - 40 = 120 \text{ mm}$$

$$z_{hN} = d_h - z_h = 160 - 84,2 = 76 \text{ mm}$$

$$z_{dc} = h_d - d_1 - d_{d1} = 350 - 115 - 65 = 170 \text{ mm}$$

$$z_{dN} = \frac{h_d}{2} - d_{d1} = \frac{350}{2} - 65 = 135 \text{ mm}$$

V dalším kroku výpočtu postupně navrhujeme výztuž pro všechny táhla náhradní příhradoviny. Pro horní táhlo navržena výztuž $2\phi 16$, $A_{s,prov} = 402 \text{ mm}^2$

$$T_h = \frac{-M_{Ed,h} - N_{Ed,h} \cdot z_{hN}}{z_{hc}} + \frac{|V_{Ed,h}|}{\tan \theta_h} = \frac{-16,1 + 368 \cdot 0,076}{0,120} + \frac{|23,1|}{\tan 40} = 136 \text{ kN}$$

$$A_{s,Th,req} = \frac{T_h}{f_{yd}} = \frac{136 \cdot 1000}{434} = 312 \text{ mm}^2 \leq A_{s,prov} = 402 \text{ mm}^2$$

OK

$$l_{bd} = \frac{\sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{\sigma_{sd}}{4} \cdot \frac{A_{s,Th,req}}{A_{s,prov}} = \frac{16}{4} \cdot \frac{312}{2,84} = 1\,093 \text{ mm}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,8 = 2,84 \text{ MPa}$$

$$l_e = 0,6 \cdot (h + h_h + l_{bd}) = 0,6 \cdot (0,8 + 0,2 + 1,093) = 1,256 \text{ m}$$

Pro dolní táhlo navržena výztuž ve dvou řadách 2 x 2Ø25, $A_{s,prov} = 1963 \text{ mm}^2$

$$T_d = \frac{M_{Ed,d} + N_{Ed,d} \cdot z_{dN}}{z_{dc}} + \frac{|V_{Ed,d}|}{\tan \theta_d} = \frac{60,8 + 368 \cdot 0,11}{0,170} + \frac{|86,9|}{\tan 45} = 693 \text{ kN}$$

$$A_{s,Td,req} = \frac{T_d}{f_{yd}} = \frac{693\,000}{434} = 1595 \text{ mm}^2 \leq A_{s,prov} = 1963 \text{ mm}^2$$

OK

$$l_{bd} = \frac{\sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{\sigma_{sd}}{4} \cdot \frac{A_{s,Td,req}}{A_{s,prov}} = \frac{25}{4} \cdot \frac{1595}{2,84} = 1\,788 \text{ mm}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,8 = 2,84 \text{ MPa}$$

$$l_e = 0,6 \cdot (h + h_h + l_{bd}) = 0,6 \cdot (0,8 + 0,2 + 1,788) = 1,673 \text{ m}$$

Pro svislé táhlo T_1 navrženy dvou-střížné třmínky 5 x TR Ø 12, $A_{s,prov} = 5 \cdot 2 \cdot 113 = 1130 \text{ mm}^2$

$$T_1 = T_{1V} + T_{1M} + T_{1N} = 110 + 298 + 0 = 408 \text{ kN}$$

$$T_{1V} = |V_{Ed,lic}| = 110 \text{ kN}$$

$$T_{1M} = \frac{1,3 \cdot T_h \cdot h_h \cdot h_d + 1,6 \cdot T_d \cdot h_d \cdot (0,8 \cdot h_h + 1,1 \cdot h_o)}{0,7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} =$$

$$T_{1M} = \frac{1,3 \cdot 136 \cdot 0,2 \cdot 0,35 + 1,6 \cdot 693 \cdot 0,35 \cdot (0,8 \cdot 0,2 + 1,1 \cdot 0,3)}{0,7 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 0,8} = 298 \text{ kN}$$

$$T_{1N} = N \frac{z_h \cdot z_d}{(z_h + z_d) \cdot (0,9 \cdot h + 1,3 \cdot h_h)} = 0 \text{ kN}$$

$$A_{s,T1,req} = \frac{T_1}{f_{yd}} = \frac{408\,000}{434} = 939 \text{ mm}^2 \leq A_{s,prov} = 1130 \text{ mm}^2$$

OK

Pro svislé táhlo T_2 navrženy dvou-střížné třmínky 3 x TR Ø 12, $A_{s,prov} = 3 \cdot 2 \cdot 113 = 678 \text{ mm}^2$

$$T_2 = T_{2V} + T_{2M} + T_{2N} = 23 + 143 + 0 = 166 \text{ kN}$$

$$T_{2V} = |V_{Ed,h}| = 23 \text{ kN}$$

$$T_{2M} = \frac{1,3 \cdot T_d \cdot h_h \cdot h_d + 1,6 \cdot T_h \cdot h_h \cdot (0,8 \cdot h_d + 1,1 \cdot h_o)}{0,7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} =$$

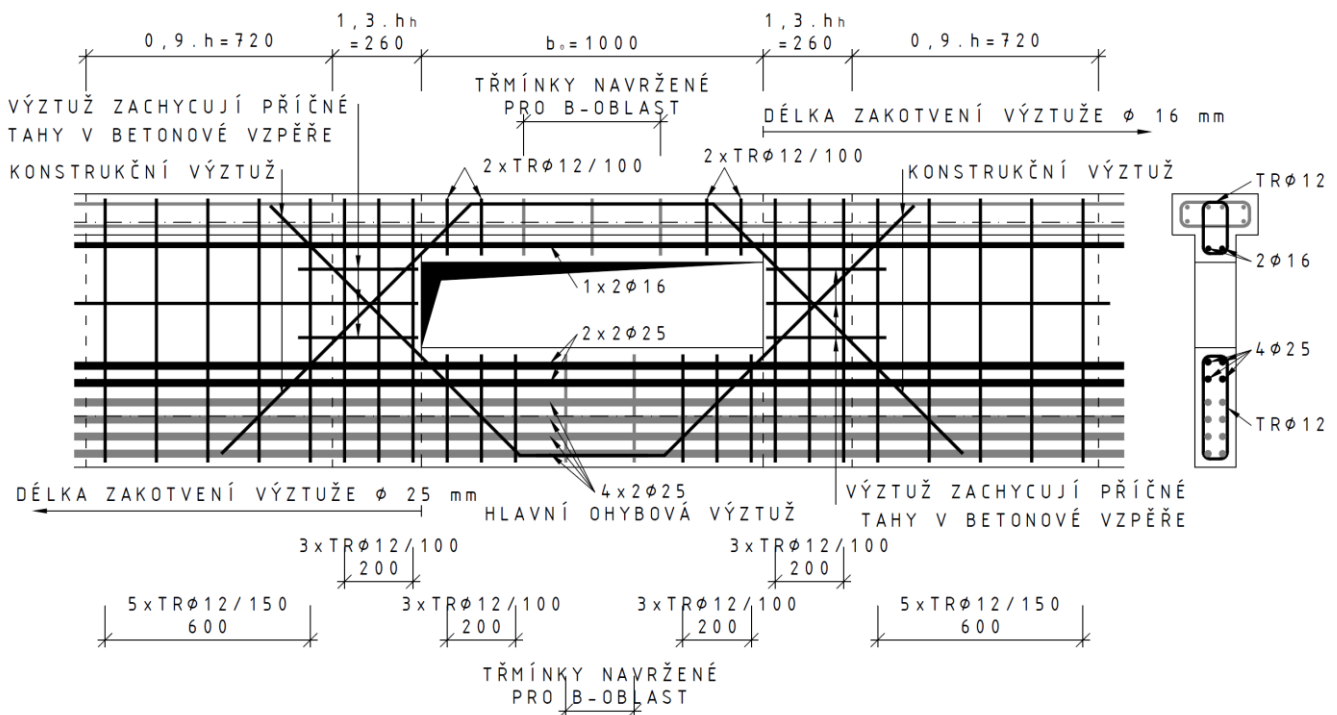
$$T_{2M} = \frac{1,3 \cdot 693 \cdot 0,2 \cdot 0,35 + 1,6 \cdot 136 \cdot 0,35 \cdot (0,8 \cdot 0,2 + 1,1 \cdot 0,3)}{0,7 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 0,8} = 143 \text{ kN}$$

$$T_{2N} = -N \frac{z_h \cdot z_d}{(z_h + z_d) \cdot (0,9 \cdot h + 1,3 \cdot h_h)} = 0 \text{ kN}$$



$$A_{s,T2,req} = \frac{T_2}{f_{yd}} = \frac{166\,000}{434} = 383\,mm^2 \leq A_{s,prov} = 678\,mm^2$$

V poslední fázi se musí provést ověření únosnosti v tlaku za ohybu a návrh smykové výztuže horního a spodního pasu běžnými metodami pro B-oblasti. Pro výpočet se uvažují sekundární vnitřní síly působící na řešených částech konstrukce. Vzhledem k tomu, že takové výpočty se vyučují v základních předmětech zaměřených na betonové konstrukce, návrh výztuže pro B-oblasti zde není prezentován.



Obr. 7 Skica vyztužení oblasti kolem otvoru

Reference

- [1] DAFStb Heft 525 Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [2] Šmejkal J, Procházka J. 2010. Navrhování prostupů nosníků s použitím modelů náhradní příhradoviny: Design of openings in beams using strut-and-tie models. *Beton - Technologie, Konstrukce, Sanace* 10:48-56.
- [3] Kohoutková A, Procházka J, Šmejkal J. 2013. Modelování a vyztužování betonových prvků. Lokální modely železobetonových konstrukcí. Praha: České vysoké učení technické.
- [4] El-Metwally S, Chen W. 2017. *Structural Concrete: Strut-and-Tie Models for Unified Design*. CRC Press.
- [5] Williams Ch, Deschenes D, Bayrak O. 2012. *Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges*. (Final Report). Center for Transportation Research.
- [6] ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 2006.