

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**ŽELEZOBETONOVÉ NOSNÍKY S OTVORY**

Reinforced concrete beams with openings

**Bc. Jan Pánek**

2022

Vedoucí práce: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pánek Jméno: Jan Osobní číslo: 468186  
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Železobetonové nosníky s otvory  
Název diplomové práce anglicky: Reinforced concrete beams with openings  
Pokyny pro vypracování:  
- Obecný popis problematiky - základní informace, reálné příklady, členění z hlediska konstrukčního návrhu  
- Přehled návrhových přístupů  
- Studie nosníku s otvorem u vybraného objektu - aplikace výpočetních přístupů, vyhodnocení výsledků, zpracování výrobní dokumentace řešeného prvku  
Seznam doporučené literatury:  
Concrete Beams with Openings: Analysis and Design, M.A. Mansur, Kiang-Hwee Tan  
Modelování a vyztužování betonových prvků - lokální modely železobetonových konstrukcí  
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Josef Novák, Ph.D.  
Datum zadání diplomové práce: 23.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*  
\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta(ky)

# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jan Pánek

Název diplomové práce: Železobetonové nosníky s otvory

Základní část: K133 podíl: 100 %

Formulace úkolů: **Zpracování souhrnu informací k problematice železobetonových nosníků s otvorem včetně rozboru návrhových přístupů pro malý a velký otvor. Studie železobetonového nosníku s otvorem u vybraného objektu při uvážení různé velikosti a polohy otvoru, včetně porovnání a vyhodnocení výsledků při uplatnění odlišných výpočetních přístupů pro návrh výztuže. Zpracování výrobní dokumentace nosníku s otvorem.**

Podpis vedoucího DP: ..... Datum: 5.10.2021

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

## Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Železobetonové nosníky s otvory“ zpracoval samostatně s použitím uvedené literatury v seznamu použitých zdrojů a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce. Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s elektronickou verzí, která byla vložena do IS KOS.

V Praze dne: .....

.....

Jan Pánek

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Novákovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícný přístup, cenné rady, připomínky a pomoc při zpracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině za jejich velkou podporu a trpělivost.

## Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu železobetonových nosníků s otvory. V úvodu jsou popsány základní poznatky k navrhování otvorů v železobetonových nosnících. Jedná se zejména o zatřídění otvoru z hlediska konstrukčního návrhu a popis současných návrhových přístupů. Prezentované poznatky byly převzaty z odborných publikací a vědeckých článků. Další část diplomové práce se věnuje konstrukčnímu návrhu nosníku průmyslové haly s malým a velkým otvorem. Zpracován je předběžný statický návrh objektu a podrobná studie chování vybraného železobetonového nosníku s otvorem. Ta se zabývá analýzou nosníku při uvážení různého umístění otvoru v nosníku, polohy otvoru po výšce průřezu a geometrie otvoru. Hlavním výstupem diplomové práce jsou výkresy tvaru a výztuže vybraného nosníku s otvorem a vyhodnocení studie železobetonového nosníku s otvory.

## Klíčová slova

železobetonový nosník, příhradová analogie, nosník s otvorem, návrhové přístupy

## Abstract

The diploma thesis deals with the design of reinforced concrete beams with openings. The main findings about the designing of reinforced concrete beams with openings are described in the introduction. Namely, it concerns the concept of classification of openings in terms of structural design and the description of current design approaches. The presented findings were taken over from technical publications and scientific papers. The other part of the thesis deals with the structural design of a beam with either small or large openings. The preliminary structural design and the detailed study on the behaviour of a selected reinforced concrete beam with an opening were carried out. The study focuses on the analysis of the beam when various geometry, the position of openings along the beam and the depth of cross-section are considered. The main outputs of this thesis are the formwork drawings and the reinforcement drawing of the selected beam as well as the evaluation of the study on reinforced concrete beams with openings.

## Keywords

reinforced concrete beam, strut and tie method, beam with opening, design approaches

# Obsah

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ .....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
ABSTRAKT .....	6
OBSAH .....	7
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	9
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	9
1 ÚVOD .....	15
2 OBECNÉ INFORMACE .....	16
3 CHOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÉHO NOSNÍKU BEZ OTVORU .....	19
4 CHOVÁNÍ OBLASTI KOLEM OTVORU .....	23
5 ČLENĚNÍ OTVORU Z HLEDISKA KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU .....	25
5.1 KLASIFIKACE OTVORŮ Z HLEDISKA VELIKOSTI .....	26
6 VYZTUŽENÍ NOSNÍKU S MALÝM OTVOREM .....	29
6.1 NÁVRHOVÝ PŘÍSTUP VYCHÁZEJÍCÍ Z ACI 318 .....	30
6.1.1 Nosníkové porušení ( <i>beam-type failure</i> ) .....	31
6.1.2 Rámové porušení ( <i>frame-type failure</i> ) .....	33
6.2 NÁVRHOVÝ PŘÍSTUP PODLE AIJ .....	34
6.3 NÁVRHOVÝ PŘÍSTUP VYCHÁZEJÍCÍ Z EC2 .....	35
6.3.1 Metoda příhradové analogie .....	36
7 VYZTUŽENÍ NOSNÍKU S VELKÝM OTVOREM .....	44
7.1 NÁVRHOVÝ PŘÍSTUP VYCHÁZEJÍCÍ Z ACI 318 .....	45
7.2 METODA PŘÍHRADOVÉ ANALOGIE .....	49
8 SHRUTÍ .....	55
9 ZHODNOCENÍ REŠERŠE .....	57
10 STUDIE VAZNÍKU S OTVOREM .....	59
10.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE O PRŮMYSLOVÉ HALE .....	59
10.1.1 Obecný popis objektu .....	59
10.1.2 Nosný systém průmyslové haly .....	61
10.2 VÝSLEDKY STUDIE VAZNÍKU S OTVOREM .....	62
10.2.1 Meze pro umístění otvoru .....	65
10.2.2 Umístění otvoru v blízkosti podpory .....	66
10.2.2.1 Shrnutí poznatků o umístění otvoru v blízkosti podpory .....	71
10.2.3 Umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí .....	72
10.2.3.1 Shrnutí poznatků o umístění otvoru v blízkosti středu .....	76
10.2.4 Analýza malého otvoru podle EC2 .....	76
10.2.5 Změna geometrie malého otvoru .....	78
10.2.6 Změna geometrie velkého otvoru .....	81
10.2.6.1 Změna výšky velkého otvoru .....	82
10.2.6.2 Změna délky velkého otvoru .....	84

10.2.7	Závěry ze studie vazníku s otvorem.....	87
11	ZÁVĚR.....	90
	PŘÍLOHA A – NOSNÍK S MALÝM OTVOREM PODLE ACI 318.....	92
	PŘÍLOHA B – NOSNÍK S MALÝM OTVOREM PODLE EC2 .....	97
	PŘÍLOHA C – NOSNÍK S VELKÝM OTVOREM PODLE ACI 318 .....	105
	PŘÍLOHA D – NOSNÍK S VELKÝM OTVOREM PODLE EC2 .....	111
	POUŽITÁ LITERATURA.....	119
	POUŽITÝ SOFTWARE .....	120



## Seznam použitých zkratek

ACI 318	Americká norma 318 (American concrete institute 318)
AIJ	Japonský přístup od Architectural institute of Japan
EC2	Eurokód 2 – ČSN EN 1992
EC	Evropské normy
FRP	Kompozitní výztuž (fiber reinforced polymer)
MSP	Mezní stav použitelnosti
MSÚ	Mezní stav únosnosti
STM	Model náhradní příhradoviny (strut and tie model)

## Seznam použitých symbolů

Písmena latinské abecedy:

$A_1$	[ $N$ ]	síla v horním táhle STM (model náhradní příhradoviny)
$A_2$	[ $N$ ]	síla v dolním táhle STM
$A_c$	[ $m^2$ ]	průřezová plocha betonu
$A_d$	[ $m^2$ ]	průřezová plocha dolního pásu
$A_{d,prov}$	[ $m^2$ ]	skutečná plocha diagonální výztuže (ACI 318)
$A_{d,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha diagonální výztuže (ACI 318)
$A_h$	[ $m^2$ ]	průřezová plocha horního pásu
$A_{s,max}$	[ $m^2$ ]	maximální plocha betonářské výztuže
$A_{s,min}$	[ $m^2$ ]	minimální plocha betonářské výztuže
$A_{s,prov}$	[ $m^2$ ]	skutečná plocha ohybové výztuže
$A_{s,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha výztuže
$A_{s,A1,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha výztuže pro horní táhlo
$A_{s,A2,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha výztuže pro dolní táhlo
$A_{sh,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha vodorovné výztuže na délku vzpěry
$A_{sv,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha svislé výztuže na délku vzpěry
$A_{v,prov}$	[ $m^2$ ]	skutečná plocha svislé výztuže (ACI 318)
$A_{v,req}$	[ $m^2$ ]	požadovaná plocha svislé výztuže (ACI 318)
$b$	[ $m$ ]	šířka průřezu
	[ $m$ ]	tloušťka tlačené vzpěry ve STM

$b_w$	[ $m$ ]	šířka tažené části průřezu betonu
$c$	[ $m$ ]	šířka tlačené vzpěry ve STM
$c_1$	[ $m$ ]	šířka tlačené vzpěry ve STM
$d$	[ $m$ ]	účinná výška průřezu
$d_0$	[ $m$ ]	svislá délka otvoru
$d_b$	[ $m$ ]	výška dolního pásu
$d_c$	[ $m$ ]	výška průřezu tlačného pásu
$d_v$	[ $m$ ]	svislá vzdálenost mezi těžištěm spodní a horní betonářské výztuže
$D_{max}$	[ $m$ ]	maximální velikost zrna kameniva
$e_1$	[ $m$ ]	šířka táhla ve STM
$E_c$	[ $Pa$ ]	modul pružnosti betonu
$f_c'$	[ $Pa$ ]	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku (ACI 318)
$f_{ck}$	[ $Pa$ ]	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{cd}$	[ $Pa$ ]	návrhová válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{ct}$	[ $Pa$ ]	charakteristická pevnost betonu v tahu
$f_{ctm}$	[ $Pa$ ]	průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu
$f_{yd}$	[ $Pa$ ]	charakteristická mez kluzu diagonální betonářské výztuže (ACI 318)
	[ $Pa$ ]	návrhová mez kluzu betonářské výztuže
$f_{yk}$	[ $Pa$ ]	charakteristická mez kluzu betonářské výztuže
$f_{yv}$	[ $Pa$ ]	charakteristická mez kluzu svislé betonářské výztuže (ACI 318)
$f_{ywd}$	[ $Pa$ ]	návrhová pevnost smykové výztuže
$F_c$	[ $N$ ]	návrhová síla od vnitřních sil pro horní tlačené pás
$F_{c,Rd}$	[ $N$ ]	tlaková síla v betonu
$F_t$	[ $N$ ]	návrhová síla od vnitřních sil pro dolní táhlo
$h$	[ $m$ ]	výška průřezu
$h_b$	[ $m$ ]	výška průřezu dolního pásu
$h_d$	[ $m$ ]	výška od líce otvoru k dolní straně nosníku
$h_h$	[ $m$ ]	výška od líce otvoru k horní straně nosníku
$h_{ot}$	[ $m$ ]	výška otvoru
$h_t$	[ $m$ ]	výška průřezu horního pásu
$I_d$	[ $m^4$ ]	moment setrvačnosti průřezu dolního pásu

$I_{gb}$	$[m^4]$	moment setrvačnosti průřezu dolního pásu
$I_{gt}$	$[m^4]$	moment setrvačnosti průřezu horního pásu
$I_h$	$[m^4]$	moment setrvačnosti průřezu horního pásu
$k_1$	$[-]$	součinitel redukce napětí
$k_2$	$[-]$	součinitel redukce napětí
$k_3$	$[-]$	součinitel redukce napětí
$k_4$	$[-]$	součinitel redukce napětí
$k_p$	$[-]$	součinitel stupně vyztužení
$k_u$	$[-]$	součinitel výšky nosníku, resp. size effect při smykovém namáhání
$K$	$[-]$	součinitel vzpěrné délky
$l_0$	$[m]$	délka otvoru
$l_{01}$	$[m]$	délka otvoru na levé straně od sloupku
$l_{02}$	$[m]$	délka otvoru na pravé straně od sloupku
$l_{ot}$	$[m]$	délka otvoru ve STM
$M_1$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící v horním pásu (levá část)
$M_2$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící v horním pásu (pravá část)
$M_3$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící v dolním pásu (levá část)
$M_4$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící v dolním pásu (pravá část)
$M_{Ed2}$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící ve středu délky betonové vzpěry
$M_{Ed,d}$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící na dolním pásu
$M_{Ed,h}$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící na horním pásu
$M_{Ed,líc}$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící na lici otvoru
$M_m$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící uprostřed otvoru
$M_p$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment působící na sloupku
$M_u$	$[Nm]$	návrhový ohybový moment vyvozené vnějším zatížením v místě středu otvoru
$N_b$	$[N]$	návrhová normálová síla v dolním pásu
$N_c$	$[N]$	návrhová normálová tlaková síla v prutu STM
$N_{Ed}$	$[N]$	návrhová normálová síla od vnějšího zatížení
$N_{Ed2}$	$[N]$	návrhová normálová síla
$N_{Ed,d}$	$[N]$	návrhová normálová síla působící na dolním pásu

$N_{Ed,h}$	[N]	návrhová normálová síla působící na horním pásu
$N_p$	[N]	návrhová normálová síla působící ve sloupku
$N_t$	[N]	návrhová normálová tahová síla v prutu STM
	[N]	návrhová normálová síla v horním pásu
$r$	[m]	poloměr kruhového otvoru
	[m]	poloměr setrvačnosti (ACI 318)
$s$	[m]	rozteč svislých třmínek
$s_{l,min}$	[m]	minimální světlá vzdálenost mezi pruty
$T$	[N]	návrhová příčná tahová síla
$T_1$	[N]	návrhová normálová síla působící v levé části dolního pásu
	[N]	návrhová normálová síla ve svislém táhlu
$T_{1M}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od ohybového momentu
$T_{1N}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od normálové síly
$T_{1V}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od posouvající síly
$T_2$	[N]	návrhová normálová síla působící v pravé části dolního pásu
	[N]	návrhová normálová síla ve svislém táhlu
$T_{2M}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od ohybového momentu
$T_{2N}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od normálové síly
$T_{2V}$	[N]	složka normálové síly vyvozená od posouvající síly
$V$	[N]	charakteristická posouvající síla od vnějšího zatížení v místě středu otvoru
$V_b$	[N]	návrhová posouvající síla v dolním pásu
$V_{b1}$	[N]	návrhová posouvající síla působící v levé části dolního pásu
$V_{b2}$	[N]	návrhová posouvající síla působící v pravé části dolního pásu
$V_c$	[N]	smyková únosnost betonu
$V_{Ed1}$	[N]	návrhová posouvající síla v místě před prostupem
$V_{Ed2}$	[N]	návrhová posouvající síla v místě za prostupem
$V_{Ed,h}$	[N]	návrhová posouvající síla na horním pásu
$V_{Ed,líc}$	[N]	návrhová posouvající síla působící na líci otvoru
$V_m$	[N]	návrhová posouvající síla působící uprostřed otvoru
$V_n$	[N]	celková smyková únosnost průřezu
$V_p$	[N]	návrhová posouvající síla ve sloupku

$V_s$	[N]	smyková únosnost betonářské výztuže
$V_t$	[N]	návrhová posouvající síla v horním pásu
$V_u$	[N]	návrhová posouvající síla vyvozená vnějším zatížením v místě středu otvoru
$w$	[N/m]	návrhové vnější rovnoměrné zatížení
	[–]	součinitel zohledňující geometrii otvoru a pásů
$W_p$	[m]	šířka sloupku
$x$	[m]	výška tlačené oblasti betonu
$z$	[m]	rameno vnitřních sil
	[m]	vzdálenost těžišť dolního a horního pásu
$z_{ot}$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm horního a dolního pásu
$z_1$	[m]	vzdálenost od těžiště tažené výztuže po těžiště průřezu
$z_2$	[m]	vzdálenost od těžiště tlakové síly v betonu po těžiště průřezu
$z_d$	[m]	rameno vnitřních sil na dolním pásu
$z_{d2}$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm dolního pásu a táhla $A_2$
$z_{dN}$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm otvoru a dolního pásu
$z_h$	[m]	rameno vnitřních sil na horním pásu
$z_{h2}$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm horního pásu a táhla $A_1$
$z_{hN}$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm otvoru a horním pásem

#### Písmena řecké abecedy:

$\alpha$	[°]	úhel sklonu diagonální výztuže
	[°]	úhel sklonu tlačené diagonály ve STM
$\alpha_1$	[°]	dílčí úhel sklonu pro tlačanou diagonálu ve STM
$\alpha_2$	[°]	dílčí úhel sklonu pro tlačanou diagonálu ve STM
$\delta_v$	[m]	přídavný průhyb na nosníku od implementování otvoru
$\varepsilon_c$	[–]	poměrné přetvoření betonu
$\varepsilon_{cu}$	[–]	mezní poměrné přetvoření betonu
$\varepsilon_s$	[–]	poměrné přetvoření betonářské výztuže
$\varepsilon_{ud}$	[–]	mezní poměrné přetvoření betonářské výztuže
$\eta$	[–]	součinitel koncentrace ve smyku

	[–]	součinitel definující účinnou návrhovou pevnost
$\theta$	[°]	úhel sklonu tlačené diagonály
$\theta_d$	[°]	úhel sklonu tlačných diagonál na dolním pásu
$\theta_h$	[°]	úhel sklonu tlačných diagonál na horním pásu
$\lambda$	[K <sup>-1</sup> ]	teplotní roztažnost materiálu
	[–]	součinitel definující účinnou výšku tlačené oblasti
$\nu'$	[–]	redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem
$\xi$	[–]	poměrná výška tlačené oblasti
$\overline{\rho_w}$	[–]	stupeň využití smykové výztuže
$\sigma_1$	[Pa]	hlavní tahové napětí
$\sigma_3$	[Pa]	hlavní tlakové napětí
$\sigma_c$	[Pa]	napětí v obecné betonové vzpěře ve STM
$\sigma_{c1}$	[Pa]	napětí v konkrétní označené betonové vzpěře ve STM
$\sigma_{Rd,max}$	[Pa]	mezní návrhové napětí ve podle typu styčnicku
$\emptyset$	[–]	redukční součinitel pro smykové namáhání
$\emptyset_{sw}$	[m]	průměr smykové výztuže

# 1 Úvod

Diplomová práce se věnuje studii železobetonového nosníku s otvorem a analýze, která se zabývá porovnáním návrhových přístupů k vyztužení oblasti kolem otvoru a chováním nosníku z hlediska geometrie a umístění otvoru na nosníku. Výhradně se zabývá železobetonovými nosníky vyztuženými běžnou betonářskou ocelí. Chování předpjatých betonových prvků není blíže zkoumáno. Hlavním cílem diplomové práce je zpracovat souhrn informací k navrhování nosníků s otvorem, zhodnotit efektivnost návrhových přístupů včetně jejich omezení a v neposlední řadě objasnit vliv otvoru na chování železobetonového nosníku pomocí sofistikovaného výpočetního programu.

První část diplomové práce obsahuje teoretické poznatky k navrhování železobetonových nosníků s otvory. Popsána je funkce, uplatnění a chování nosníků včetně rozdělení otvorů z hlediska konstrukčního návrhu nosníku. Hlavní pasáž úvodní části práce se věnuje popisu návrhových přístupů. Podrobně je prezentován návrhový přístup založený na metodě příhradové analogie vycházející z DIN 1045-1 a návrhový přístup vycházející z ACI 318. Uvedené poznatky jsou převzaty z odborných publikací a článků, které byly vyhledány ve vědeckých databázích.

Druhá část diplomové práce se věnuje podrobné studii nosníku s otvorem průmyslové haly. Nejdříve byl zpracován předběžný návrh konstrukčního řešení objektu, díky kterému bylo možné určit orientační rozměry základních nosných prvků. Následně u vybraného železobetonového nosníku střešní konstrukce byl analyzován vliv zabudování otvoru na jeho chování. Konkrétně se zkoumal vliv polohy otvoru po výšce průřezu a vliv dominantního smykového a ohybového namáhání při umístění otvoru v blízkosti podpory, resp. středu rozpětí. Rovněž byl sledován vliv velikosti otvoru. Pro každé uspořádání nosníku byla nejdříve navržena výztuž pro oblast kolem otvoru pomocí vlastního automatizovaného výpočetního programu, který byl vytvořen pro dva návrhové přístupy na základě poznatků z teoretické části diplomové práce. Následně se navržené vyztužení vložilo do numerického modelu nosníku, který se posléze analyzoval ve výpočetním programu. Získaná data umožnila ověřit vybraná kritéria mezních stavů únosnosti a mezních stavů použitelnosti. Zároveň umožnila provést zhodnocení výpočetních přístupů a podrobně objasnit chování nosníků s otvorem.

Hlavními výstupy diplomové práce jsou výkresy tvaru a výztuže nosníku s otvorem a analýza, díky které bylo možné identifikovat omezení a doporučení při ručním návrhu výztuže otvoru v železobetonovém nosníku dle návrhových přístupů.

Hlavním motivem pro výběr tohoto tématu byla snaha rozšířit si znalosti v oblasti návrhu otvoru v železobetonových nosnících. Nosníkům s otvorem je při studiu na univerzitě věnována malá pozornost, ačkoliv se jedná o prvek, který je hojně využívám zejména u prefabrikovaných betonových konstrukcí.

## 2 Obecné informace

Železobetonové nosníky patří k jednoduchým prutovým prvkům, jejichž konstrukční návrh patří k běžným činnostem stavebního inženýra. Pojem nosník představuje v pozemních konstrukcích liniový vodorovný prutový prvek. V odborné literatuře se lze setkat s dalšími termíny pro označení nosníku, jejichž název upřesňuje umístění a tvar tohoto prvku. Lze se setkat s termíny jako např. trám, průvlak, příčel, vaznice, vazník, ztužidlo, základový pás nebo základový práh. Podle definice ČSN EN 1992-1-1 v oddílu 5.3.1 (3) je charakterizován nosník jako prvek, u kterého je délka nosníku nejméně rovna trojnásobku výšky průřezu [14]. Pokud tato definice není splněna, jedná se o tzv. stěnový nosník.

Pro návrh a posouzení železobetonového nosníku podle platných standardních postupů (např. EC2 (Eurokód 2) nebo ACI 318 (americká norma 318)) běžně postačí globální analýza. Při globální analýze je nosník vystaven účinkům vnějšího zatížení ve dvojrozměrném nebo trojrozměrném výpočetním modelu. Vnější zatížení vyvodí v nosníku, za pomoci výpočetní analýzy teorie pružnosti, hladké trajektorie hlavních napětí za předpokladu platnosti Bernoulli-Navierovy hypotézy ohybu. To znamená předpoklad lineárního rozložení poměrných přetvoření po průřezu, kdy jednotlivé průřezy prutu před a po deformaci zůstávají rovinné a kolmé na jejich střednici. Pokud se takto chová nosník, tak v odborné literatuře [1, 2] spadá pod tzv. B-oblast.

Větší pozornost si ovšem žádají železobetonové nosníky, ve kterých jsou umístěné otvory (Obr. 2.1 – Obr. 2.3). Nosníky s otvory se používají zejména pro vedení inženýrských sítí nebo se jedná o architektonický záměr. Popřípadě je možné otvory využít pro umístění montážní konstrukce. Tedy, vloží se kotevní destička do otvoru, na kterou se následně přivaří koutovým svarem lehká konstrukce např. výměna pro světlík.

Díky otvoru lze docílit úspory u výškových nebo administrativních budov, kde rozhoduje o ceně stavby především konstrukční výška podlaží. Konstrukční výšku podlaží lze významně snížit, pokud se zabudují příčné otvory v nosníku. Otvory v nosníku mohou být libovolného tvaru, ale je nutné respektovat napjatost v těsné blízkosti otvoru a řádně oblast kolem otvoru vyztužit. Nejčastěji se lze setkat s kruhovými otvory, které slouží pro vedení kanalizačního potrubí nebo elektrické kabely. Navrhují se čtvercové nebo obdélníkové pro průchod vzduchotechniky.



Obr. 2.1 Ukázka vedení inženýrské sítě otvorem v nosníku [4]





*Obr. 2.2 Ukázka kruhového otvoru v nosníku u halové konstrukci [5]*



*Obr. 2.3 Ukázka obdélníkového otvoru v nosníku u halové konstrukci [6]*

Konstrukční návrh nosníku s otvorem ovlivňuje chování nosníku, zejména v oblasti kolem otvoru. Tato oblast se označuje za tzv. D-oblast (oblast diskontinuit neboli oblast nespojitostí). Jedná se o poruchovou oblast, která bývá nejčastější příčinou poruch železobetonových konstrukcí [1]. Je nutné s respektem přistupovat k těmto oblastem a věnovat jim zvýšenou pozornost lokální analýzou. Podle Saint-Venantovy hypotézy lze říct, že poruchová oblast doznívá zhruba na délce nosníku rovné výšce průřezu od místa působení na každou stranu [1]. Neplatí zde lineární rozdělení poměrného přetvoření po průřezu jako u B-oblasti. Poruchové oblasti lze identifikovat ve výpočetním modelu jako místa, kde dochází ke koncentraci hlavních trajektorií napětí, tedy je narušen ustálený tok vnitřních sil. Patří sem oblasti se statickou nespojitostí (např. namáhané soustředěnou silou, styky konstrukčních prvků, kotevní oblast předpjatých prvků) nebo geometrickou nespojitostí (např. místa náhlé změny průřezu, stěnový nosník, otvor nebo soustava otvorů v nosníku) [1].

Geometrie nosníku s otvorem se odvíjí od požadavků na MSP (mezní stav použitelnosti), MSÚ (mezní stav únosnosti) nebo pro prefabrikované prvky je stěžejním limitem doprava.

Délka, geometrie a materiálové vlastnosti železobetonového nosníku jsou ovlivněny návrhovými okrajovými podmínkami. Mezi okrajové podmínky patří statické uložení prvku, výrobní technologie, vzdálenost a náročnost dopravy od prefabrikované závodu k místu výstavby nebo zvětšení průřezových rozměrů v závislosti na přísnějším požadavku na průhyb. Tento požadavek si určí výrobce citlivé technologie nebo je stanoven normovými kritérii. Mezi speciální normové požadavky na průhyb je konstrukce jeřábové dráhy, která se řídí ČSN EN 1993-6 Tab. 7.1 [15].

Nosníky s otvorem mohou být obecně namáhány na osově namáhání, ve speciálním případě na ohyb a smyk okolo obou hlavních os (např. jeřábový nosník), kroutící moment od volného, vázaného kroucení a bimomentem. S osovým namáháním se lze setkat u předem nebo dodatečně předpjatých prvků, u šikmých nosníků zatížené vlastní tíhou nebo svislou bodovou silou např. od tribunového prvku (Obr. 2.4). Volné kroucení nosníku nastává tehdy, pokud vodorovná i svislá složka síly neprotíná střed smyku průřezu. Vázané kroucení vzniká při bránění ztrátě rovinnosti průřezu. Při sečtení složek vázaného i volného kroucení vzniká celkový kroutící moment. Typickým příkladem vzniku kroutícího momentu je uložení stropní konstrukce na ozubu nosníku, vykonzolovaná deska spojená s nosníkem nebo spojená deska s obvodovým nosníkem. Na tyto namáhání a jejich vzájemné interakce je potřeba navrhnout a posoudit nosník sofistikovaným přístupem.



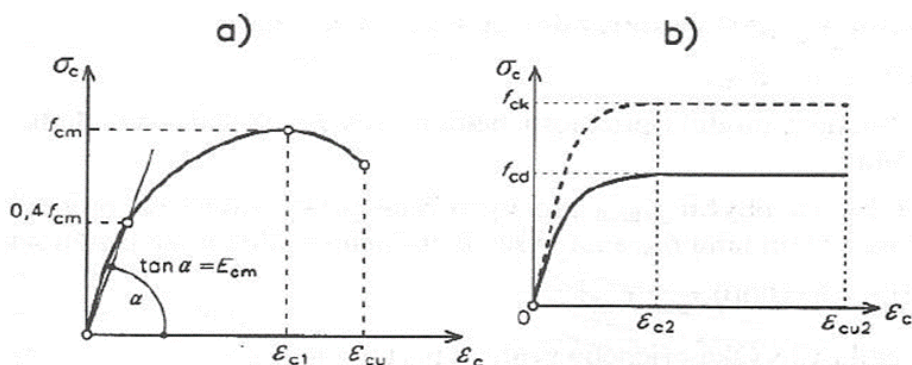
*Obr. 2.4 Detail napojení tribunového prvku na šikmý nosník [3]*

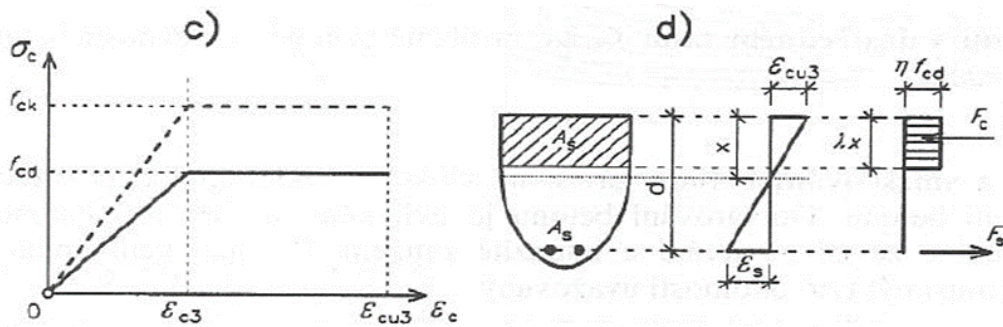
### 3 Chování železobetonového nosníku bez otvoru

Pro pochopení problematiky nosníku s otvorem je důležité pochopit základní principy chování nosníku bez otvoru. Pro návrh a posouzení odolnosti železobetonového nosníku lineárně pružnou analýzou je potřeba zavést zjednodušené předpoklady. Při výpočtu železobetonových konstrukcí se běžně přihlíží níže popsáním předpokladům [7, 8]:

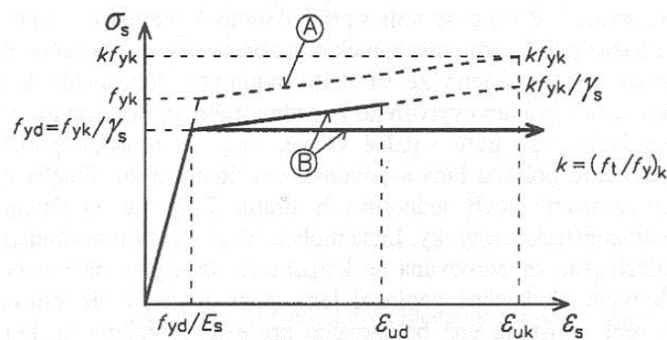
- Platnost Bernoulli-Navierovy hypotézy ohybu.
- Dokonalá a trvalá soudržnost betonářské výztuže a okolního betonu vychází z předpokladu stejného poměrného přetvoření obou materiálů, tedy  $\varepsilon_c = \varepsilon_s$ . Soudržnost je zajištěna spojením hydratujícího cementu na betonářské výztuži. Pro lepší přilnavost obou materiálů je betonářská výztuž opatřena žebírky nebo lehkou korozi, která zdrsňuje povrch výztuže. Zároveň musí platit shodná teplotní roztažnost obou materiálů. Přibližná hodnota teplotní roztažnosti betonu a betonářské výztuže je:  
 $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ . Pokud by tento předpoklad neplatil, došlo by v průběhu času k oddělení betonu a betonářské výztuže.
- Pevnost betonu v tahu je zanedbána,  $f_{ct} = 0$  MPa. Tato skutečnost je dána především nízkou pevností betonu v tahu s porovnáním pevností betonu v tlaku. Překročení pevnosti betonu v tahu má za následek vznik prvních trhlin (Obr. 3.3b). Veškeré tahové účinky namáhání přebírá tahová výztuž.
- Napětí v tlačeném betonu se určí za pomoci idealizovaného návrhového pracovního diagramu (Obr. 3.1). Pro výpočet momentu únosnosti pomocí metody mezního přetvoření se využívá bilineární pracovní rozdělení betonu. Pro zjednodušující výpočet pomocí metody mezní rovnováhy byl zaveden Obr. 3.1d.
- Napětí v betonářské výztuži, popř. předpínací výztuži, se určí z návrhového pracovního diagramu výztuže. Pro běžné případy se uvažuje bilineární pracovní diagram (Obr. 3.2).
- Mezního stavu únosnosti je dosaženo při dosažení mezního poměrného přetvoření betonu nebo betonářské výztuže, tedy  $\varepsilon_{cu}$  nebo  $\varepsilon_{ud}$  (Obr. 3.3d a Obr. 3.3e).

Díky zjednodušeným předpokladům se upouští od skutečné únosnosti železobetonových konstrukcí při výpočtu lineárně pružnou analýzou. Lze říct, že zjednodušené předpoklady vytvářejí nevědomé rezervy v únosnosti. Mezi rezervy patří vznik plastických kloubů u staticky neurčité konstrukce, přerozdělení zatížení v případě vzniku trhliny (pokles napětí v daném místě) nebo tahová pevnost v betonu.





Obr. 3.1 a) Pracovní diagram betonu v tlaku  
 b) Parabolicko-rektangulární rozdělení betonu v tlaku  
 c) Bilineární pracovní diagram betonu v tlaku  
 d) Rovnoměrné rozdělení napětí v tlacené oblasti betonu a rovnováha sil v železobetonovém průřezu pro stanovení momentu únosnosti průřezu [8]



Obr. 3.2 Pracovní diagram betonářské výztuže (A – idealizovaný, B – návrhový) [8]

Každý ohýbaný prvek z betonu musí být opatřen minimálně konstrukční výztuží podle ČSN EN 1992-1-1. Konstrukční vyztužení respektuje skutečné provedení prvku a zajišťuje dostatečnou duktilitu prvku. Tedy, vyztužení stanovené podle vztahu (3.1) zamezuje křehkému porušení prvku po vzniku první trhliny (Obr. 3.3b) o šířce 0,4 mm [7]. Princip odvození spočívá ve výpočtu pružného momentu na mezi únosnosti tahové pevnosti betonu (na mezi vzniku trhlin). Pokud u prvku nastane porušení drcení betonu dříve, než dojde k rozvoji trhlin a zplastizování ohybové výztuže, jedná se o tlakové porušení prvku (Obr. 3.3f). Tento typ porušení řeší stanovení maximální plochy výztuže (3.2) a platnost podmínky (3.3). Maximální hodnota poměrné tlacené oblasti je omezena hodnotou 0,45 pro betony do třídy pevnosti C50/60 [7, 14]. Je to hodnota, při které neexistuje v betonu žádná plastická rezerva a udává ji norma ČSN EN 1992-1-1 jako omezení pro rotační kapacitu.

$$A_{s,min} = \min \left[ 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_w \cdot d, 0,0013 \cdot b_w \cdot d \right] \quad (3.1)$$

kde  $f_{ctm}$  je průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu,  
 $f_{yk}$  charakteristická mez kluzu betonářské výztuže,  
 $b_w$  šířka tažené části průřezu betonu (místo umístění betonářské ocele),  
 $d$  účinná výška průřezu.

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c \quad (3.2)$$

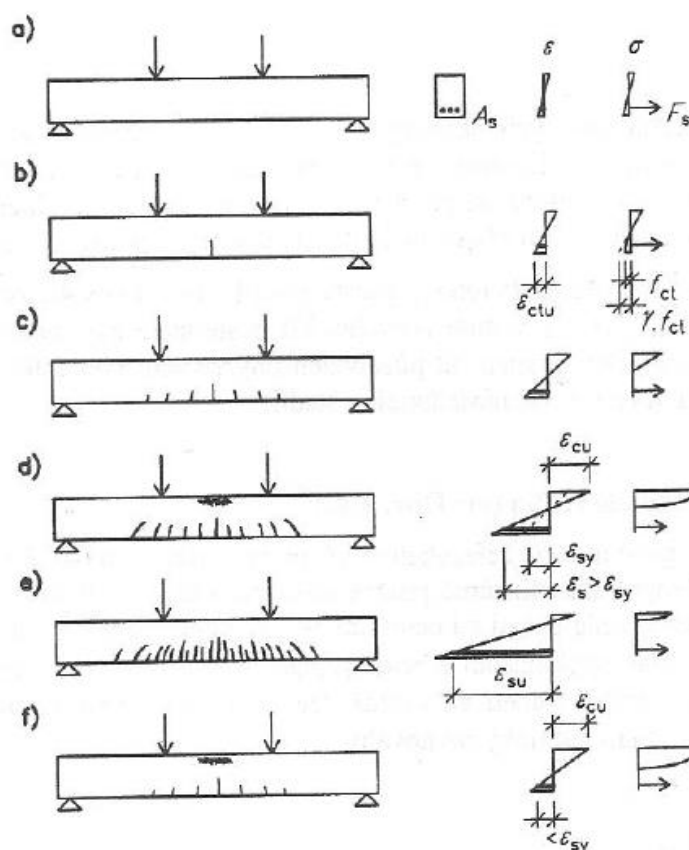
kde  $A_c$  je průřezová plocha betonu.

$$\xi = \frac{x}{d} \leq \xi_{max} = 0,45 \quad (3.3)$$

kde  $x$  je výška tlačené oblasti betonu,  
 $d$  účinná výška průřezu,  
 $\xi$  poměrná výška tlačené oblasti.

Pro Obr. 3.3c je vyčerpána tahová únosnost betonu a dochází k rozvoji trhlin. V tlačené části průřezu působí beton lineárně. Tedy, nedochází k zplastizování betonu. Tento stav napjatosti se běžně vyskytuje za provozu konstrukce. Obvykle se při tomto stavu posuzují požadavky na MSP pro průřez s trhlinami. Stav napjatosti na Obr. 3.3a slouží v MSP pro průřez bez trhlin.

Při správném navržení prvku na MSÚ se předpokládá s tahovým porušením prvku (Obr. 3.3d a Obr. 3.3e). Při porušení v Obr. 3.3d je dosaženo mezního přetvoření betonu v tlaku a zároveň betonářská výztuž se dostala za mez kluzu. Tento způsob porušení zajistí protažení výztuže. To má za následek rozevírání trhlin a zvětšování průhybu. Dalším správným způsobem porušení je Obr. 3.3e, kdy dochází nadměrnému protažení betonářské výztuže bez drcení betonu v tlaku. Tyto způsoby porušení varují před selháním prvku.

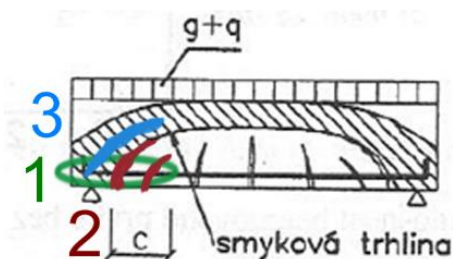


Obr. 3.3 Chování železobetonového nosníku v ohybu při postupném zatěžování [8]

První trhliny na běžně zatíženém nosníku vznikají od ohybových účinků (normálového napětí) kolmo na směr hlavního tahového napětí  $\sigma_1$ . Nebo jinak řečeno ohybové trhliny se rozevírají svisle ve směru hlavního tlakového napětí  $\sigma_3$ . Na běžně zatížený nosník působí smykové namáhání (smykové napětí). Smykové namáhání vyvolá stáčení trajektorií

hlavních napětí, které jsou v každém průniku na sebe kolmé. Trajektorie hlavních napětí a rozvoj trhlin respektuje statické působení konstrukce. Při umístění lokálního břemene v blízkosti podpory nosníku nebo při vylehčení průřezu nosníku lze očekávat první trhliny od smykového působení.

Smykové trhliny se vyvíjí od ohybové trhliny a zakřívují se podle trajektorie tlakového napětí  $\sigma_3$ . Po vzniku a rozvoji trhlin vznikne v nosníku tlačенý oblouk s taženým táhlem (Obr. 3.4). Tímto mechanismem se realizuje přenos zatížení v prvku bez smykové výztuže. Smyková namáhání se přenáší v tlačném betonu za předpokladu pružného chování betonu, tedy tlačенý beton nezplastizuje jako v případě ohybu.



Obr. 3.4 Přenos zatížení po potrhání nosníku ohybem a smykem (barevně zvýrazněno porušení smykem) [8]

Smykové vyztužení prvku umožní rozvoj smykových trhlin nad úroveň jeho vlastní únosnosti bez smykové výztuže. S tím se mění i samotné chování konstrukce i způsoby porušení. Smykové vyztužení změní přenášení vnějšího zatížení z Obr. 3.4. Vznikne rovinná příhradovina, která přenáší zatížení v prvku. Porušení prvku při působení smykového namáhání může být (Obr. 3.4):

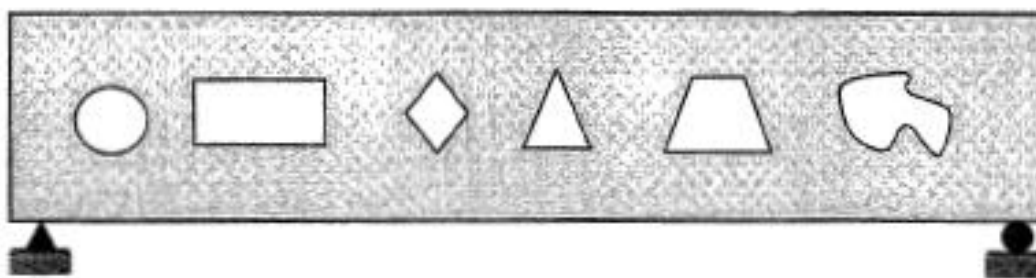
1. Vytržení nebo přetržení podélné tahové výztuže v místě podpory. Podélnou výztuž je nutno řádně zakotvit, aby fungovalo přenášení složek namáhání. Jedná se o předpoklad pro metodu příhradové analogie.
2. Porušení prvku smykem za ohybu. Přetržení smykové výztuže ve smykové trhlině nebo dochází ke zplastizování smykové výztuže a náhlému rozevírání trhliny.
3. Rozdrcení betonu v tlačené diagonále. Porušení hlavní tlakové diagonály.

Úhel  $\theta$  smykové trhliny nebo tlačené diagonály se volně volí v závislosti na využití tlačných diagonál nebo nutné plochy smykové výztuže, kterou protíná smyková trhlinka. Norma ČSN EN 1992-1-1 striktně vymezuje úhel v rozmezí  $21,8^\circ \div 45^\circ$  [14].

Další složkou smykového napětí je kroucení. Kroucení způsobuje natočení prvku. Při bránění nosníku v kroucení dochází k potrhání prvku ze všech stran pod úhlem  $45^\circ$ . První trhlinka vzniká v nejvíce namáhané části průřezu od smykového napětí. Při zvyšujícím zatížením se trhlinka prodlužuje k hraně průřezu. Žádoucím charakterem porušení je zkrucování prvku, kdy výztuž podélná a svislá je za mezí kluzu. Převyztužené prvky na kroucení způsobí nežádoucí způsob porušení v podobě drcení betonu. [8] Vyztužení prvku v kroucení je řešeno prostorovou příhradovou konstrukcí [7].

## 4 Chování oblasti kolem otvoru

Přítomnost otvoru v nosníku vytváří geometrickou nespojitost, oslabuje průřez a mění jednoduché chování nosníku podle kapitoly 3 na složitější [9]. Je zřejmé, že otvor v nosníku způsobí narušení hladkých hlavních trajektorií napětí. Hlavní trajektorie napětí se koncentrují v okolí otvoru. Míra koncentrace napětí se odvíjí od vnějšího zatížení, geometrie (Obr. 4.1) a polohy otvoru na nosníku. Pro snížení koncentrace napětí v otvoru má pozitivní vliv zaoblení hran [9]. Nejpříznivější geometrie otvoru pro redukci koncentrace napětí je otvor kruhový [4].



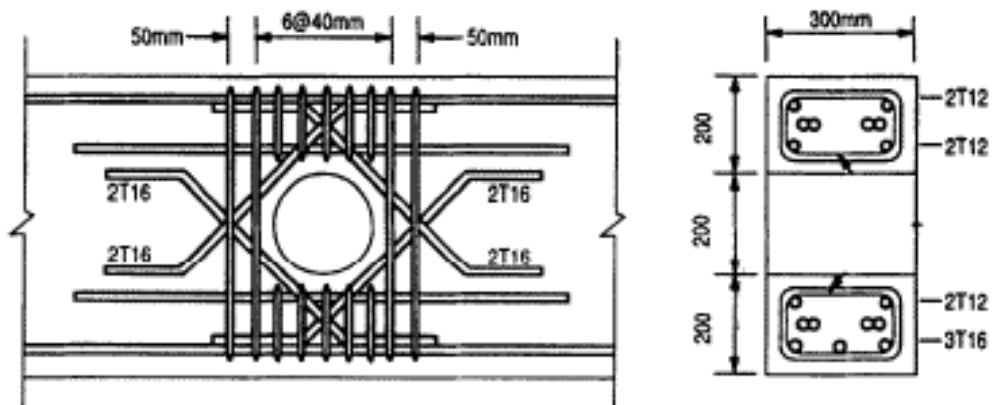
Obr. 4.1 Tvary otvorů v nosníku [9]

Při vyčerpání tahové pevnosti betonu dochází k rozvoji trhlin, beton zplastizuje, poklesne koncentrované napětí a sníží se tuhost betonu. Nevznikají pouze nadměrné trhliny v blízkosti otvoru, ale může dojít k nežádoucímu drcení betonu. To nastane za předpokladu, že je vyčerpána tlaková pevnost betonu ve směru hlavní trajektorie tlakového napětí. Je potřeba ověřit napjatost prvku na maximální přípustné tahové a tlakové napětí, které je definováno vlastnostmi betonu a betonářské výztuže.

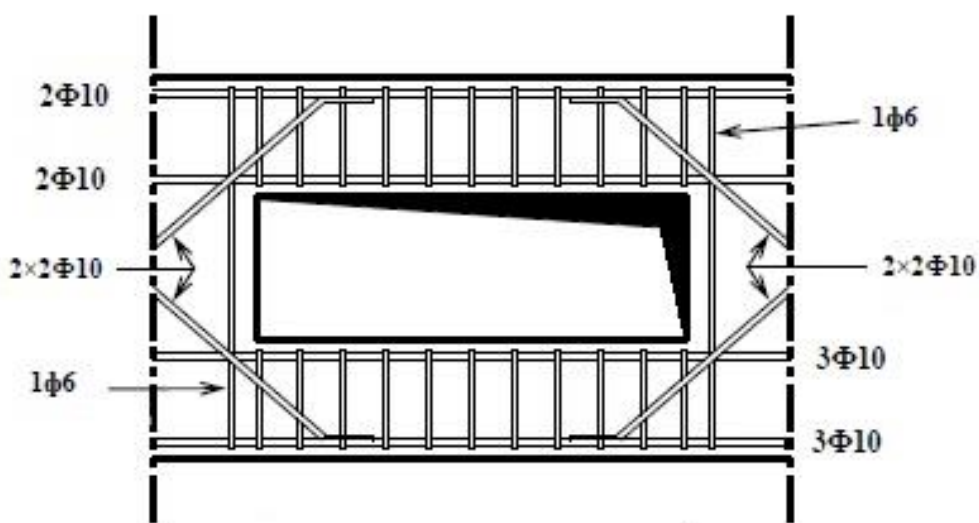
Otvor v nosníku značně oslabí průřez, který vzdoruje vnějšímu zatížení. Dále je potřeba brát do úvahy, že lze očekávat vznik trhlin při nižší úrovni zatížení. Tyto skutečnosti vedou k nadměrným deformacím nosníku v místě otvoru. U staticky neurčitých konstrukcí pokles tuhosti vlivem vzniku trhlin má za následek přerozdělení vnitřních sil na nosníku [9].

Šířku trhliny u otvoru je potřeba řádně podchytit vyztužením, tak aby vznik a rozvoj trhlin vlivem vysokých koncentrací napětí nesnížilo životnost prvku. Trhliny vytvářejí příležitost pro vstup agresivních složek (např. chloridy, sírany) do struktury železobetonového nosníku. Napadají a snižují pevnost betonářské výztuže nebo betonu. Z tohoto ohledu v závislosti na agresivitě prostředí norma ČSN EN 1992-1-1 7.3.1. Tab. 7.1N stanovuje maximální šířku trhliny [14]. Zároveň je potřeba se bránit proti agresivnímu prostředí třídou betonu podle ČSN EN 1992-1-1 NA. 2.125 Tab. E.1CZ a příslušnou velikostí krycí vrstvy stanovenou podle ČSN EN 1992-1-1 4.4.1 [14].

Nejefektivnější směr vyztužení v blízkosti otvoru respektuje hlavní trajektorii tahového napětí. Tedy, umístění výztuže kolmo na očekávanou rozevírací trhlinu neboli kolmo na směr hlavní trajektorie tlakového napětí. Přidává se obvykle do každého rohu otvoru minimálně jedna diagonální vložka (Obr. 4.2 a Obr. 4.3), které se v rohu otvoru natočí pod úhlem  $45^\circ$  a  $135^\circ$ . Průměr prutu a počet řad si volí podle zvyklostí stavebního inženýra.



Obr. 4.2 Detail vyztužení kruhového otvoru [12]



Obr. 4.3 Detail vyztužení obdélníkového otvoru [4]

Za pomoci mnoha experimentů se zjistilo, že diagonální vyztužení otvoru může sloužit jako prevence proti drcení betonu v okolí otvoru. Zároveň brání proti předčasnému odtržení části nosníku u otvoru. Tedy, zajišťuje potřebnou duktilitu prvku u otvoru. [4, 9]

Při vzniku a rozvoji trhlin v okolí otvoru nosníku není nutné v případě prefabrikátu měnit prvek za nově vyrobený. Lze využít populární sanační materiál FRP (kompozitní výztuž). Při nalepení FRP v oblasti otvoru dochází k roznosu vnějšího zatížení. FRP významnou měrou napomáhá snížit napjatost v okolí otvoru. V důsledku nižší napjatosti dochází přirozeně ke snížení rozvoje a šířky trhlin kolem otvoru [10].



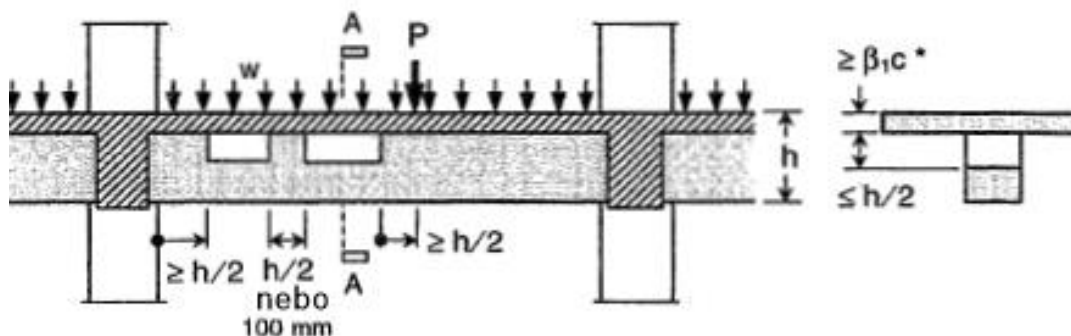
## 5 Členění otvoru z hlediska konstrukčního návrhu

Poloha otvoru na nosníku má vliv na chování nosníku. Nejčastěji se otvor umísťuje u podpory nosníku [4]. Je to právě z důvodu vedení např. dešťového kanalizačního potrubí, který je potřeba napojit pro odvod na svislý prvek (např. sloup). Z pohledu konstrukčního návrhu není umístění otvoru u podpory výhodné pro posouzení nosníku na průhyb. Zároveň je potřeba si uvědomit například u spojitého nosníku o dvou polích, že u prostřední podpory působí nejvyšší ohybový moment a smyková síla. Z toho důvodu samotný návrh geometrie nosníku i vyztužení v oblasti otvoru může být rozhodující při zachování požadované velikosti otvoru. Literatura [9] nabízí konstrukční doporučení pro umístění a velikost otvoru (Obr. 5.1) na základě osvědčených zkušeností. Mezi základní pokyny pro geometrii nosníku s otvorem patří [9]:

- Z Obr. 5.1 si lze povšimnout zarovnání otvorů v jedné linii. Umístění otvoru v nosníku se obvykle nachází uprostřed výšky průřezu. Geometrie otvoru je řešena v podkapitole 5.1. Je třeba dopředu pamatovat na vyztužení horního a dolního pásu u T-průřezu, aby bylo možné dodržet konstrukční zásady vyztužení a zhutnění betonu v požadované kvalitě.
- Pozice otvoru od podpory by měla být větší než polovina výšky průřezu. Tento předpoklad vychází díky znalosti délky teoretické smykové trhliny. Tedy, například u STM (modelu náhradní příhradoviny) je smyková délka rovna  $z \cdot \cot \theta$ .

kde  $z$  je rameno vnitřních sil,  
 $\theta$  úhel sklonu tlačných diagonál.

- Výška otvoru by měla být omezena na polovinu výšky průřezu.
- Délku otvoru není přesně omezena. Je však nutné brát do úvahy, že u delších otvorů může nastat problém se vzpěrnou únosností horního nebo dolního pásu.
- Při zabudování několika otvorů v nosníku je nutné dodržet světlý rozstup otvoru na více jak polovinu výšky průřezu nebo 100 mm. Velikost sloupku mezi otvory se ověřovala za pomoci experimentu. Pokud je sloupek řádně vyztužen a šířka sloupku je vyšší jak polovina výšky průřezu, tak dochází k výraznému přispění únosnosti v oblasti otvoru a zároveň se omezí šířka trhliny. [4]

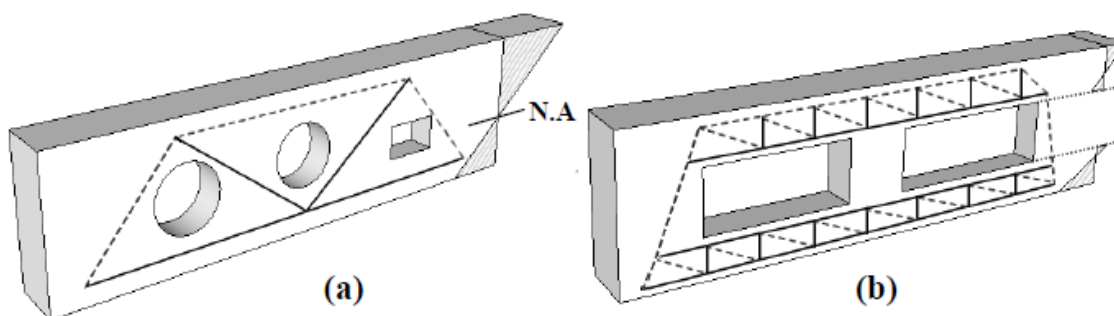


Obr. 5.1 Orientační schéma pro umístění otvoru v nosníku [9]

V odborné literatuře [2, 4, 9, 10, 11, 12] se lze setkat s termínem malý a velký otvor. Díky roztřídění otvoru na malý nebo velký lze navrhnout oblast otvoru podle tradičních návrhových přístupů. Návrhové přístupy slouží pro analytický výpočet. Pokud se navrhuje nosník s otvorem pomocí metody konečných prvků, není důležité roztřídit otvor na malý a velký. Sofistikovaný program na metodu konečných prvků sám vyhodnotí vliv otvoru na nosník.

Podle experimentu bylo zjištěno, že umístění jednoho velkého otvoru u prostého nebo spojitého nosníku značně oslabuje únosnost a tuhost nosníku. Při zabudování více otvorů v nosníku bylo zjištěno, že otvory mají pozitivní vliv na požadavky únosnosti a použitelnosti než právě nosník s jedním otvorem. [4]

Na Obr. 5.2 je ukázán rozdíl v chování malého a velkého otvoru. U malého otvoru platí v rámci zjednodušujícího předpokladu lineární rozdělení přetvoření po výšce průřezu nosníku. U velkého otvoru platí lineární rozdělení přetvoření průřezu na dolním a horním pásu. Zároveň je zde demonstrován STM pro obě varianty otvoru. Z Obr. 5.2 je patrné, že STM pro malý otvor je vytvořen pomocí nakloněných táhel. Díky naklonění třmínků lze dosáhnout maximalizace velikosti otvoru [2]. Nedoporučuje se naklánět třmínky, pokud se jedná o monolitické provedení nosníku s otvorem [2].



Obr. 5.2 Chování a STM model nosníku s malým (vlevo) a velkým (vpravo) otvorem [4]

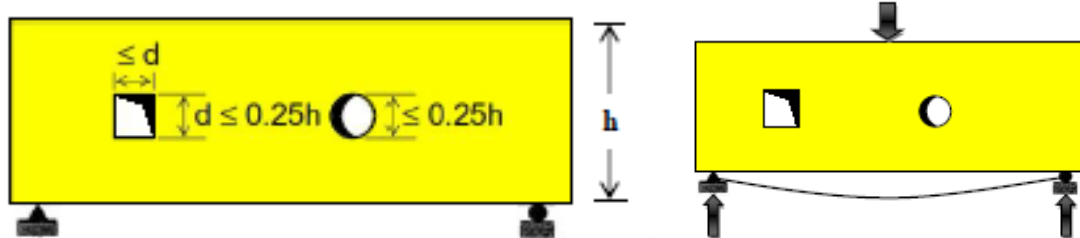
## 5.1 Klasifikace otvorů z hlediska velikosti

**Mansur a Tan** [9] zavedli zjednodušující předpoklad pro uvažování otvoru v nosníku za malý. Pokud otvor splní geometrii výšky i délky otvoru (popř. průměr), že je přibližně menší než 40% výšky nosníku, lze tento otvor považovat za malý [9]. U nosníku s malým otvorem je téměř zachována Bernoulli-Navierova o zachování rovinnosti průřezu (viz kapitola 3) [4,9]. Souvislost s tímto tvrzením lze hledat u STM, kdy není potřeba přidávat další vzpěry a táhla do horního nebo dolního pásu nad otvorem (Obr. 5.2) [4]. Umístění otvoru v nosníku respektuje STM. Tedy, malý otvor v nosníku nezasahuje do geometrie vzpěry nebo táhla.

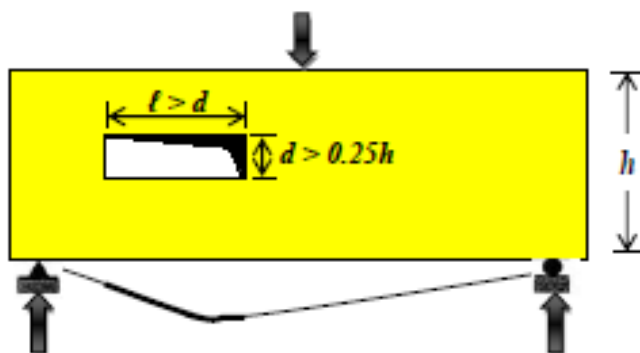
Pokud výška nebo průměr otvoru bude větší než 40% výšky průřezu nosníku, jedná se o velký otvor.

**Somes a Corley** byli konzervativní ve volbě geometrie otvoru vzhledem k výšce průřezu nosníku oproti kolegům Mansur a Tan. Pokud geometrie otvoru je menší než 25% výšky průřezu (Obr. 5.3), chová se nosník v místě průřezu za předpokladu lineárního rozdělení přetvoření (Obr. 5.2) [4].

Pokud je výška nebo průměr otvoru větší než 25% výšky průřezu nosníku, lze tento otvor zařadit do kategorie velkého otvoru. Na Obr. 5.4 je vyobrazeno schéma definice velkého otvoru a uvažovaná deformace nosníku s velkým otvorem.

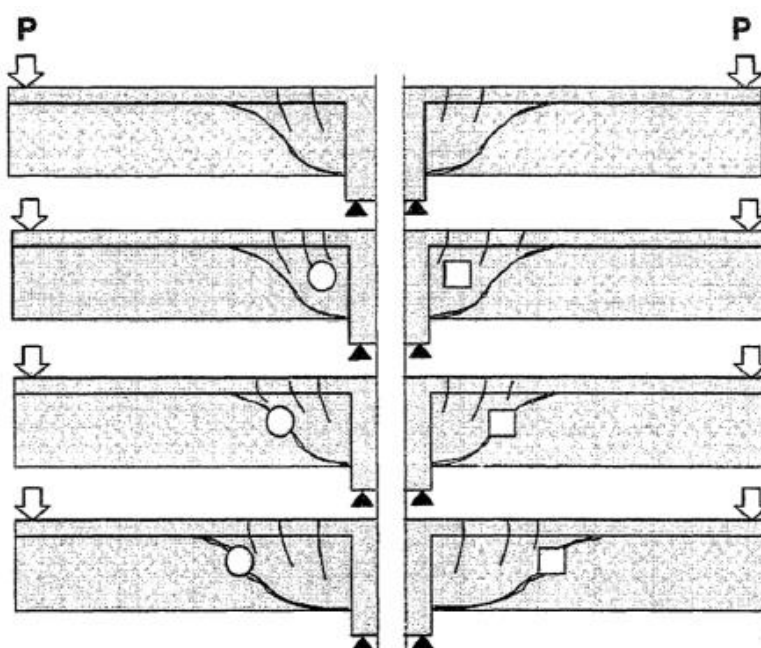


Obr. 5.3 Rozměry malého otvoru (vlevo) a předpokládaný průhyb nosníku s otvorem (vpravo) [4]



Obr. 5.4 Rozměry velkého otvoru a předpokládaný průhyb nosníku s otvorem [4]

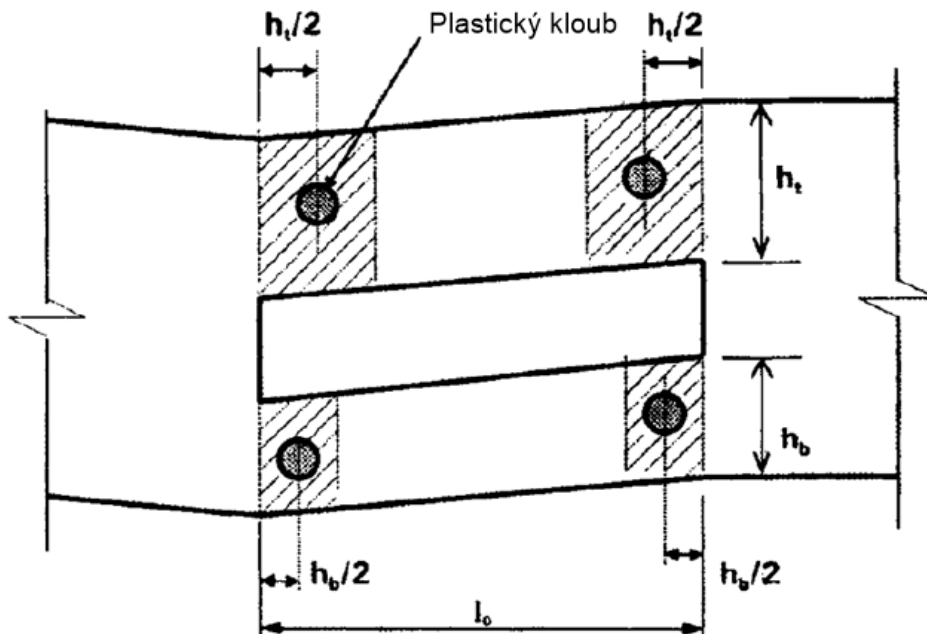
**Hanson, Somes a Corley** zkoumali ve formě experimentů vliv kruhového a čtvercového otvoru na spojitém nosníku v místě podpory (Obr. 5.5). Bylo zjištěno, že umístění otvoru dále od podpory snižuje smykovou únosnost nosníku nebo svislá poloha otvoru po výšce průřezu nemá zásadní vliv na únosnost nosníku. Zásadní parametr, který ovlivní výrazně chování a únosnost nosníku, je právě velikost otvoru. Pokud průměr kruhového otvoru odpovídá 30 % a čtvercový rozměr 20 % výšky průřezu nosníku, platí základní předpoklady chování nosníku bez otvoru. [4]



Obr. 5.5 Porušení nosníku s kruhovým a čtvercovým otvorem ve smyku [4]

Pokud kruhový otvor má průměr větší než 30% výšky průřezu, lze takový otvor označit za velký. Pokud geometrie otvoru odpovídá čtvercovému průřezu s délkou hrany větší jak 20% výšky průřezu nosníku, tento otvor svým chováním na odezvu zatížení odpovídá velkému otvoru.

**Mansur** ze svých závěrů zkoumání vlivu otvoru v nosníku klasifikoval podmínku pro rozdělení otvoru na velký a malý. Vycházel z experimentů Siao a Yapa, kteří sledovali porušení nosníku s otvorem v závislosti na rotační kapacitě. To znamená vytvoření plastického kloubu v pásech (podrobnější informace v kapitole 7). Na Obr. 5.6 je znázornění parametrů, které vstupují pro definici malého a velkého otvoru v závislosti na délce otvoru. Ovšem platí za předpokladu řádného vyztužení pásu pod a nad otvorem. Pokud geometrie otvoru odpovídá kruhu, nahradí se kruh za ekvivalentní čtverec pro stanovení rozměrů  $h_t$  a  $h_b$ . Do kategorie malý otvor lze považovat otvor, u kterého délka otvoru  $l_o$  je menší nebo rovna větší z hodnot  $h_t$  nebo  $h_b$ . Pokud délka otvoru  $l_o$  je větší než větší z hodnot  $h_t$  nebo  $h_b$ , jedná se o velký otvor. [4]



Obr. 5.6 Schéma otvoru pro klasifikaci v závislosti na délce otvoru [4]

## 6 Vyztužení nosníku s malým otvorem

Kapitola bude popisovat řešení nosníku vyztužený běžnou betonářskou výztuží. V současných normách (EC2 nebo ACI 318) neexistuje přesný návod, jak navrhnout nosník s malým otvorem. Normy pouze pro analýzu prvků doporučují využít metodu náhradní příhradové analogie bez uvedení konkrétního STM. Tento postup vede k odhadu a intuici stavebního inženýra, což může mít ve výsledku katastrofální důsledky. Příklady řešení a k nim teoretický manuál lze dohledat v odborné literatuře [2, 4, 9] a člancích [10, 11, 12].

Při návrhu výztuže nosníku s otvorem se postupuje obdobně jako u běžného nosníku bez otvoru. Využijí se standartní postupy pro řešení B-oblasti. U nosníků je smykové namáhání spojeno s ohybovým namáháním až na místa inflexních bodů ohybové čáry (nulový moment) u spojitého nosníku nebo nulové natočení ohybové čáry u prostého nosníku. V následujících podkapitolách je vysvětlena problematika návrhu vyztužení nosníků s otvorem vystaveným ohybovému a smykovému namáhání.

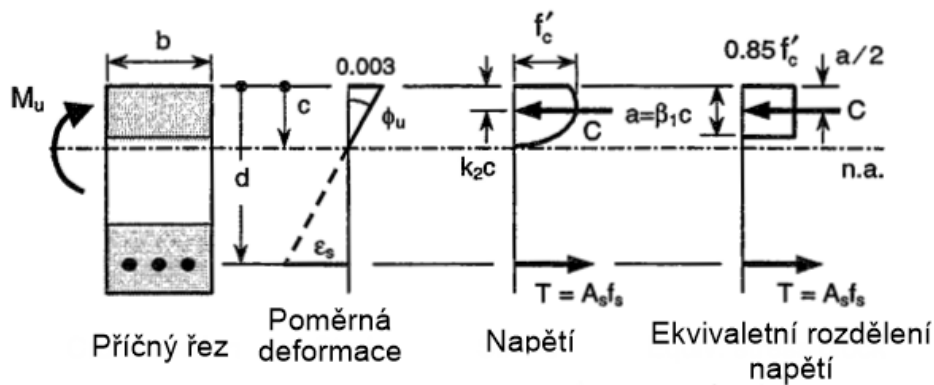
Ohybové namáhání u nosníku s malým otvorem se neřeší. Pouze je potřeba vnímat skutečnost, že ohybový moment je přenášen dvojicí sil ve spodním a horním pásu v rámci průřezu se zabudovaným otvorem.

Při umístění otvoru v místě čistého ohybového namáhání bylo zjištěno za pomoci experimentů (Salam a později ověření od Tana) [4, 9], že nosník selže obvyklým způsobem jako v případě běžného nosníku bez otvoru (podrobně viz kapitola 3). Tato skutečnost však platí pouze v okamžiku, kdy se otvor nenachází mimo tlačnou oblast betonu a betonářská výztuž musí být za mezí kluzu. Tedy, návrh a posouzení ohybové výztuže se provede standartně pomocí metody pro B-oblasti (metoda mezní rovnováhy). [4, 9]

Teoreticky lze říct, že otvor v nosníku výrazně neovlivňuje ohybovou únosnost. Důvodem je i skutečnost, že se při ověření MSÚ zanedbává tahová pevnost betonu. Tato skutečnost však neplatí u skutečného chování nosníku s otvorem, kdy se i pevnost betonu v tahu podílí na ohybové únosnosti. Pokud tak otvor zasahuje do oblasti průřezu namáhaného tahem, která není porušená trhlinou, dochází k mírnému ponížení skutečné únosnosti.

Pokud je umístěn otvor ve zplastizované tlačné oblasti betonu (Obr. 6.1), dochází ke snížení výšky tlačné oblasti betonu na hodnotu od horního líce průřezu k horní hraně otvoru. Při zachování rovnice mezní rovnováhy na průřezu se sníží napětí v betonářské výztuži podle bilineárního pracovního diagramu. Tento efekt může vést k tomu, že betonářská výztuž se nemusí dostat za mez kluzu při porušení nosníku. Hrozí tak riziko porušení v podobě drcení betonu a náhlému kolapsu bez varování ve formě nadměrných průhybů nebo rozvoji širokých trhlin.

Přítomnost otvoru v nosníku rovněž ovlivňuje průřezové vlastnosti. V místě otvoru tak dochází ke snížení tuhosti, což může vést ke vzniku trhlin při nižším ohybovém namáhání. U menších otvorů se však obecně předpokládá, že vliv na MSP je zanedbatelný [4, 9].

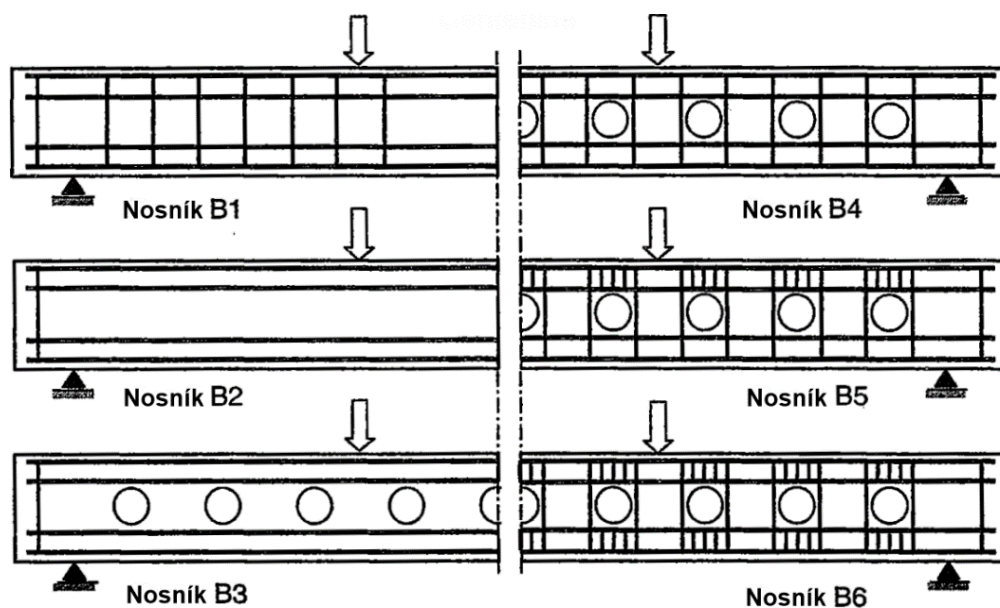


Obr. 6.1 Napětí a přetvoření průřezu v místě otvoru (parametry podle ACI 318) [9]

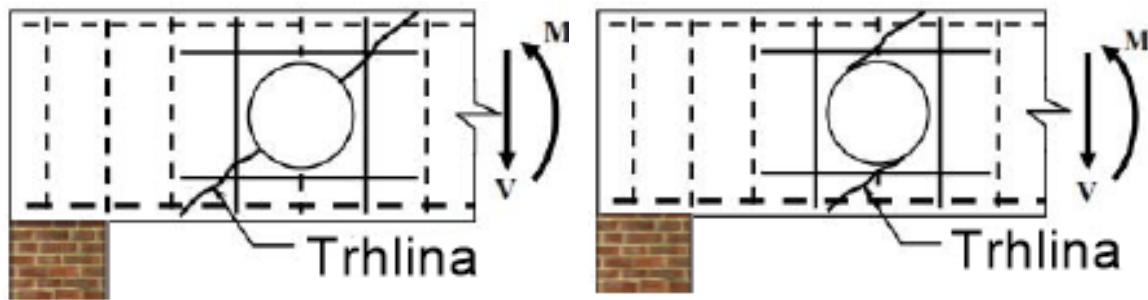
Smykové namáhání u nosníku s malým otvorem je předmětem mnoha odborných článků a experimentů. Je to právě z důvodu změny chování a funkce přenášení posouvající síly v oblasti kolem otvoru. V následujících podkapitolách jsou rozebrány návrhové přístupy, kterými lze navrhnout vyztužení kolem oblasti otvoru na smykové namáhání.

## 6.1 Návrhový přístup vycházející z ACI 318

Zásadní experimentální výzkum, který byl podkladem pro vývoj návrhového přístupu vycházející z ACI 318, byl proveden v roce 1977 [4, 9]. Zaměřil se na účinné vyztužení nosníku v oblasti otvoru (Obr. 6.2). Cílem experimentu bylo stanovit takové vyztužení nosníku, aby únosnost nosníku s otvorem byla srovnatelná s nosníkem bez otvoru. Bylo zjištěno, že vyztužení nosníku B6 na Obr. 6.2 je dostatečné pro plnou únosnost nosníku bez otvoru. Tento nosník s otvorem se poruší obvyklým způsobem typický pro nosník bez otvoru (originálně beam-type failure) (Obr. 6.3). Během experimentu na prvku s označením B4 bylo ovšem zjištěno, že smykové porušení může nastat i v jiné formě. Konkrétně se jedná o vznik dvou nezávislých diagonálních trhlin (Obr. 6.4). Tento typ porušení nosníku lze nazvat rámové porušení (originálně frame-type failure), kde nosník u otvoru je rozdělen na dva samostatné pásy. [4, 9]



Obr. 6.2 Schémata vyztužených nosníků s malým otvorem [9]



Obr. 6.3 Nosníkové porušení nosníku s otvorem [4]

Obr. 6.4 Rámové porušení nosníku s otvorem [4]

U nosníku s otvorem mohou nastat dva způsoby smykového porušení. Obě porušení si žádají samostatný návrh vyztužení nosníku v oblasti otvoru. Následující vztahy pro návrh vyztužení nosníku s otvorem pro oba způsoby porušení vycházejí z ACI 318. ACI 318 pro návrh vyztuže ve smyku předpokládá příhradový model, kdy vzpěry svírají úhel 45° neboli smyková trhлина vzniká pod úhlem 45° [9]. Dalším předpokladem ACI 318 je řešení nosníku ve smyku bez otvoru [9]. Tedy, bylo nutné modifikovat rovnice z ACI 318 pro nosník s otvorem a experimentálně ověřit výstižnost modelu.

### 6.1.1 Nosníkové porušení (beam-type failure)

Ke smykové únosnosti nosníku s otvorem přispívá složka betonu a navržené vyztuže podle následujícího vztahu [4, 9, 12]:

$$V_n = V_c + V_s \quad (6.1)$$

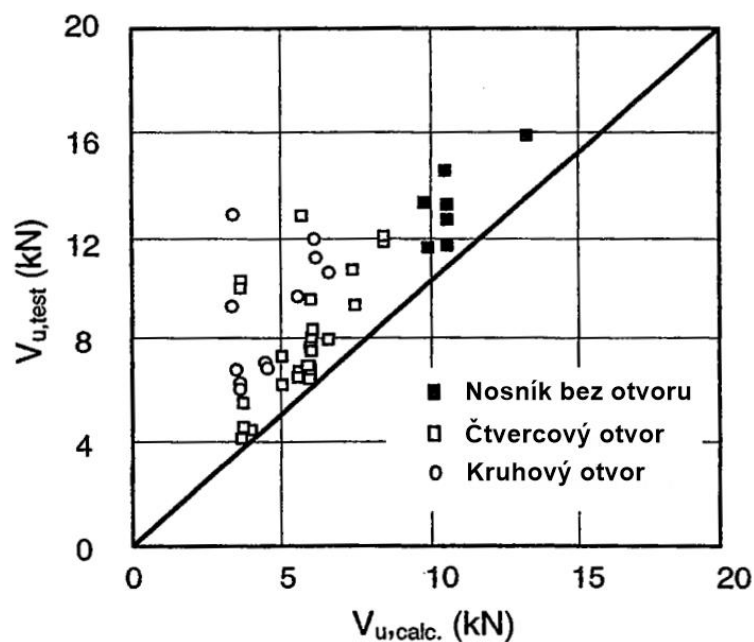
kde  $V_c$  je smyková únosnost betonu,  
 $V_s$  smyková únosnost vyztuže svislé a diagonální.

Vztah z ACI 318 pro výpočet smykové únosnosti betonu je však upraven tak, aby zohlednil vliv otvoru. Od účinné výšky průřezu se proto doporučuje odečíst výšku otvoru [9], což vede na následující vztah:

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \phi \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot (d - d_0) \quad (6.2)$$

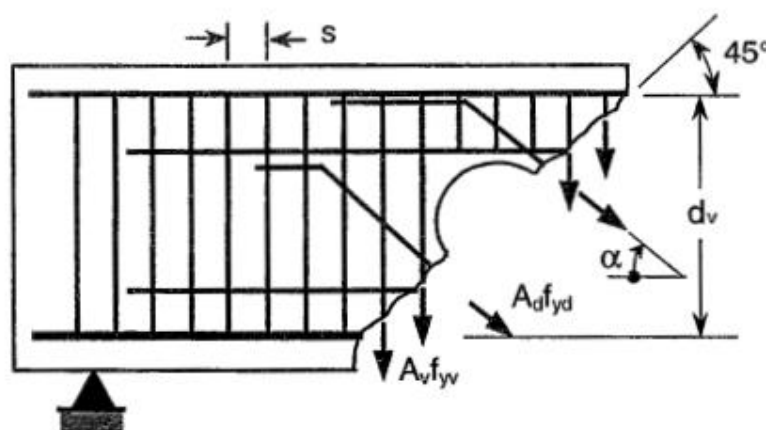
kde  $f_c'$  je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku,  
 $b_w$  šířka tažené části průřezu betonu,  
 $d$  účinná výška průřezu,  
 $\phi$  redukční součinitel pro smykové namáhání (podle ACI 318-19 hodnota 0.75),  
 $d_0$  svislá délka otvoru.

Plastnost upravené rovnice byla experimentálně ověřena pro různé tvary otvorů [9]. Zjištěné poznatky jsou patrné z grafu na Obr. 6.5, který ukazuje pro nosníky podle typu otvoru (kruh a čtverec) jejich výpočtovou a experimentálně stanovenou únosnost ve smyku bez vyztuže. Výsledky ukázaly, že vztah 6.2 je konzervativní oproti skutečně naměřené hodnotě. Dále bylo zjištěno, že otvory umístěné poblíž podpěr vykazovaly zvýšenou smykovou únosnost bez vyztuže.



Obr. 6.5 Porovnání smykové únosnosti bez výztuže podle výpočtu a experimentu [9]

Vývoj vztahu pro návrh smykové výztuže se opírá o předpoklad, že smyková trhлина prochází středem otvoru a svírá úhel  $45^\circ$ , jak znázorňuje Obr. 6.6. Je patrné z Obr. 6.6, že na únosnosti smykové výztuže se podílí diagonální a svislá výztuž. To znamená ta smyková výztuž, která protíná smykovou trhlinu. Na Obr. 6.6 je znázorněna účinná smyková výztuž šipkami.



Obr. 6.6 Parametry pro stanovení smykové únosnosti výztuže pro vztah 5.3 [9]

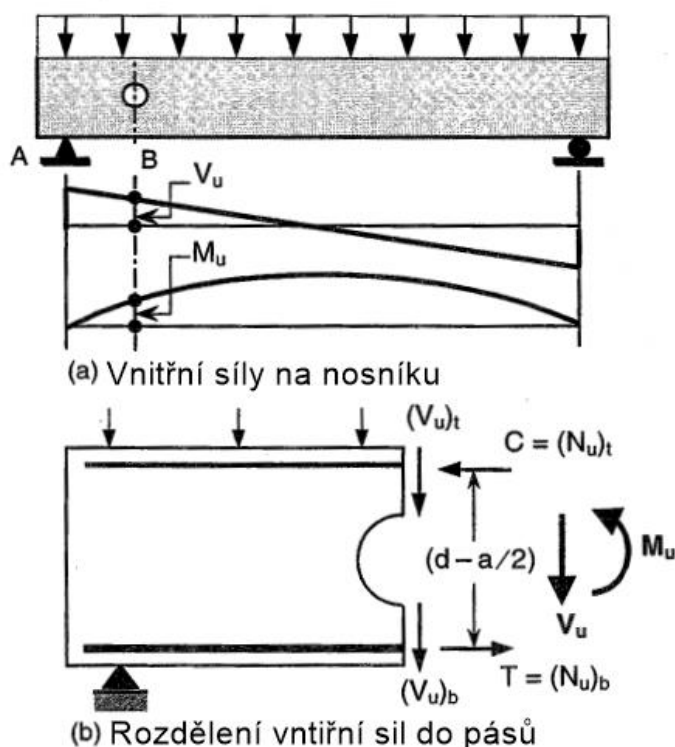
$$V_s = \phi \cdot [V_{sv} + V_{sd}] = \phi \cdot \left[ \frac{A_{v,prov} \cdot f_{yv}}{s} \cdot (d_v - d_0) + A_{d,prov} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha \right] \quad (6.3)$$

kde  $s$  je rozteč svislých třímnků,  
 $f_{yv}$  charakteristická mez kluzu svislé betonářské výztuže,  
 $f_{yd}$  charakteristická mez kluzu diagonální betonářské výztuže,  
 $d_v$  svislá vzdálenost mezi těžištěm spodní a horní betonářské výztuže,  
 $A_{v,prov}$  skutečná plocha svislé výztuže,  
 $A_{d,prov}$  skutečná plocha diagonální výztuže,  
 $\alpha$  úhel sklonu diagonální výztuže.



## 6.1.2 Rámové porušení (frame-type failure)

Při tomto typu porušení dochází ke vzniku dvou nezávislých diagonálních trhlin ve spodním a horním pásu, které vznikají přítomností otvoru v nosníku. Oba pásy se chovají nezávisle oproti předešlému způsobu porušení nosníku s otvorem. Z tohoto důvodu se doporučuje navrhnout i smykovou výztuž samostatně pro horní a spodní pás podle závěrů z experimentální studie [9]. Při návrhu smykové výztuže se předpokládá rozdělení vnitřních sil na průřezu, které znázorňuje Obr. 6.7. Na horní a spodní pás působí posouvající síly, které se získají rozdělením posouvající síly působící v ose otvoru nosníku. Přerozdělení posouvající síly do obou pásů je v poměru ploch průřezu betonu horního a spodního pásu [9]. Je zřejmé z Obr. 6.7, že ohybový moment je přenášen na rameni těžišť spodní podélné výztuže a horního tlačného betonu. Horní pás je namáhán tlakovou silou a dolní pás je tažený. Oba pásy při znalosti vnitřních sil lze navrhnout standardně podle návrhového přístupu ACI 318. Je nutné podotknout, že ohybový moment způsobí tlak v horním pásu. Je zde riziko ztráty stability horního pásu. Pro ztrátu stability je rozhodující štíhlost průřezu, která závisí na délce pásu a průřezu. Pro malé otvory lze konstatovat, že zde nehrozí porušení ztráty stability. To znamená, že oba pásy lze vyztužit standardně pro smykové namáhání podle ACI 318 bez modifikace vztahů 6.2 a 6.3. Ovšem vztah 6.3 bez složky smykové únosnosti diagonální výztuže.



Obr. 6.7 Schéma působení vnitřních sil do spodního a horního pásu [9]

### Navržení výztuže pro kontrolu šířky trhliny v MSP:

Výše navržená výztuž zvyšuje únosnost a duktilitu nosníku v oblasti otvoru. Vysoké koncentrace napětí v oblasti otvoru mohou způsobit rychlejší vznik a rozvoj trhlin, což může vést následně ke snížení trvanlivosti prvku. Bylo ověřeno formou experimentu, že dostatečné množství výztuže pro omezení šířky trhliny lze navrhnout podle doporučení od Mansura

(6.4) [9, 12]. Minimální množství výztuže podle vztahu 6.4 musí být rovnoměrně rozmístěno na čtyři strany otvoru a zároveň tato diagonální výztuž musí být umístěna kolmo na předpokládaný směr rozevírající trhliny [9, 12].

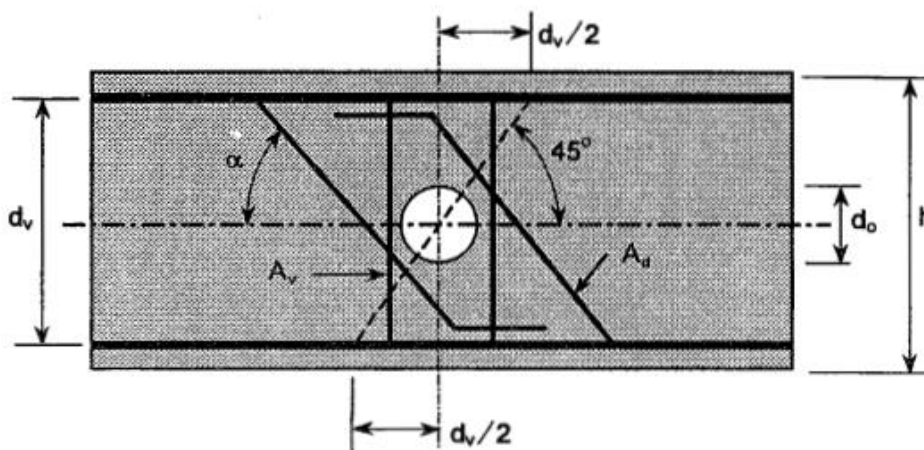
$$A_{d,req} = \frac{V_u}{\phi \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha} \quad (6.4)$$

kde  $V_u$  je posouvající síla vyvozená vnějším zatížením v místě středu otvoru.

Diagonální výztuž pro omezení šířky trhliny podle vztahu 6.4 lze dosadit do vztahu 6.3. Běžně se postupuje při návrhu výztuže obráceně. Tedy, stanoví se odhad diagonální výztuže podle zvyklostí stavebního inženýra a vypočítá se smyková únosnost výztuže podle vztahu 6.3. Následně se ověří použitá diagonální výztuž pro kontrolu šířky trhliny. Nesmí se zapomenout řádně zakotvit diagonální výztuž.

## 6.2 Návrhový přístup podle AIJ

Návrhový přístup pomocí AIJ (Japonský přístup od Architectural institute of Japan) řeší pouze typ porušení typický pro nosník bez otvoru (Obr. 6.3) [12]. Tento přístup byl publikován v roce 1988 a lze se setkat s označením Hirosawův vzorec pro výpočet smykové únosnosti výztuže (6.5) [9]. V tomto empirickém vzorci je zahrnut vliv betonu i výztuže. Z Obr. 6.8 vyplývá, že se předpokládá vznik smykové trhliny pod úhlem  $45^\circ$ , která prochází středem otvoru. Parametry vstupující do vztahu 6.5 jsou znázorněny na Obr. 6.8.



Obr. 6.8 Schéma parametrů vstupující do vzorce 6.5 [9]

$$V_n = \left[ \frac{0,092 \cdot k_u \cdot k_p \cdot (f_c' + 17,7)}{\frac{M_u}{V_u} + 0,12} \cdot \left( 1 - \frac{1,61 \cdot d_0}{h} \right) + 0,846 \cdot \sqrt{\rho_w \cdot f_{yv}} \right] \cdot b \cdot d_v \quad (6.5)$$

kde  $k_u$  je součinitel výšky nosníku, resp. size effect při smykovém namáhání (stanovení podle Obr. 6.9),

$k_p$  součinitel stupně vyztužení (6.6),

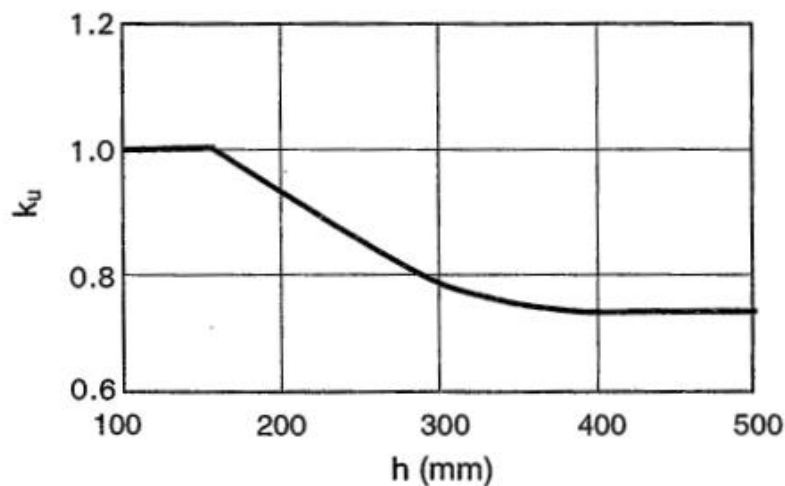
$M_u, V_u$  vnitřní síly stanovené ve středu otvoru, přičemž hodnota poměru vnitřních sil  $M_u/V_u$  musí být ve výpočtu menší než 3,  $\bar{\rho}_w$  stupeň vyztužení (6.7).

$$k_p = 0,82 \cdot \left( \frac{100 \cdot A_{s,prov}}{b \cdot d} \right)^{0,23} \quad (6.6)$$

kde  $b$  je šířka průřezu,  
 $A_{s,prov}$  plocha tažené podélné výztuže.

$$\bar{\rho}_w = \frac{A_{v,prov} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)}{b \cdot d_v} \quad (6.7)$$

kde  $A_{v,prov}$  je skutečná plocha svislé nebo diagonální výztuže.



Obr. 6.9 Graf závislosti  $k_u$  na výšce nosníku [9]

kde  $h$  je výška průřezu.

### 6.3 Návrhový přístup vycházející z EC2

EC2 poskytuje stavební inženýrovi základní informace o analýze, návrhu a pravidel železobetonových konstrukcí. Platí na území státu, které jsou členy organizace Evropského výboru pro normalizaci [14]. V národní příloze si každý stát této organizace stanovuje doporučené hodnoty a doplňující informace pro návrh železobetonových konstrukcí.

Postup výpočtu pro návrh ohybové výztuže není uveden EC2. Lze zde najít pouze předpoklady, které jsou uvedené v této diplomové práci na začátku kapitoly 3. Pokud stavební inženýr navrhuje vyztužení konstrukce na smyk, kroucení nebo protlačení, nalezne v EC2 soupis vztahů pro návrh. Tyto vztahy byly získány na základě řešení dané oblasti pomocí metody příhradové analogie. EC2 odkazuje na tuto metodu pro řešení D-oblastí.

Pro snazší pochopení návrhového přístupu bude na začátku navazující kapitoly stručně popsána podstata metody příhradové analogie a následně podrobně analyzován konkrétní STM pro řešení nosníku s otvorem.

### 6.3.1 Metoda příhradové analogie

Metoda příhradové analogie poskytuje stavebnímu inženýrovi svobodu pro výběr vhodného STM. Lze vytvořit více STM pro jeden typ poruchové oblasti. Tedy lze vytvořit dva STM, kde každý přenáší určitou část zatížení nebo oba modely jsou navrženy na jiný typ namáhání. Pro použití metody příhradové analogie je potřeba znalost a zkušenost stavebního inženýra, pokud se jedná zejména o neověřenou či složitější D-oblast. Bezspornou výhodou této metody je právě skutečnost, že lze zohlednit veškeré druhy namáhání na rovinném nebo při komplexnějším typu namáhání na prostorovém STM.

Při znalosti hlavních trajektorií napětí, stanovených za pomoci lineárně pružné analýzy, lze sestavit odpovídající STM ve formě tlačných (vzpěry) a tažených prutů (táhla) [1]. Při sestavení STM je potřeba respektovat předpokládaný vznik a rozvoj trhlin na konstrukci a model optimalizovat tak, aby navržená táhla byla umístěna co nejbližší k rozvíjejícím se trhlinám. Vzpěry by měly kopírovat směr počátečních trhlin [1].

Principem příhradové metody je sestavení STM, která je tvořena táhly, vzpěry a styčníky. Táhla reprezentují v STM pruty betonářské výztuže nebo předpínací výztuž. Vzpěry jsou tvořeny staticky účinným betonem v prvku pro přenes tlaku. Styčníky (uzly) se nacházejí v místech konstrukce, kde je potřeba odklonit nebo nasměrovat tok vnitřních sil.

Vnitřní síly stanovené na příhradové konstrukci musí být v rovnováze s vnějším zatížením [1]. Podle výsledných hodnot vnitřních sil lze sestavit rozměr šířky taženého prutu s přihlédnutím na požadovanou plochu výztuže. Zároveň je potřeba respektovat minimální vzdálenost mezi pruty. Při znalosti šířky táhel lze v jednotlivých uzlech stanovit šířku betonových vzpěr. Následně se ověří geometrie vzpěr, pokud stanovená šířka vzpěry nevychází ven z konstrukce. Je nutné ověřit napětí na konci betonových vzpěr. Jinými slovy, zda napětí v betonové vzpěře v uzlu nepřekročí povolené mezní napětí. Mezní napětí je stanoveno podle typu styčníku. Pokud šířka vzpěry zasahuje mimo betonový prvek (například do části otvoru, kde se nenachází beton), je potřeba upravit geometrii modelu, zvýšit tloušťku prvku nebo zvýšit třídu betonu. Stejný postup se uplatní, pokud nevyjde ověření napětí ve styčníku. Aby bylo zajištěno správné fungování modelu, je potřeba řádně zakotvit tažené pruty do oblastí tlakového namáhání. Nedílnou součástí návrhu vyztužení je ověření konstrukčních zásad. Konstrukční zásady zajišťují duktilnost vyšetřované D-oblasti. Díky konstrukčním zásadám lze s ohledem na minimální plochu výztuže v D-oblasti omezit šířku trhlin [1].

#### **Základní pravidla pro sestavení STM [1]:**

- Podkladem pro správný návrh STM jsou trajektorie hlavních napětí podle lineárně pružné analýzy. Vzpěry a táhla je nutné umístit podle odpovídajících směrů hlavních napětí. Odklonění vzpěry, táhla od hlavního napětí je možné v intervalu  $\pm 15^\circ$ .
- Vzpěry kopírují směr očekávaných trhlin.
- Geometrie vzpěr a táhel respektuje rozměry velikosti podpor a roznášecích ploch vnějšího zatížení.

- Vzpěry se nesmějí křížit (došlo by rozdrčení oblasti). Táhlo se může křížit s dalším táhlem nebo vzpěrou za předpokladu, že dojde ke změně napětí v táhlu.
- Sklon vzpěry a táhla je potřeba volit v rozmezí  $21,8^\circ \div 45^\circ$ . Je ovšem doporučené volit táhla jako přímé pruty ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ).
- Doporučuje se vyhledat osvědčený STM, u kterého je ověřeno chování a postup návrhu.
- Vnitřní síly ve vzpěře a táhlu jsou jednoosé (normálová síla).
- Vnější zatížení vstupuje do STM v uzlech.

### Tažené pruty – táhla:

Táhlo reprezentuje v STM betonářskou výztuž i v několika vrstvách. Šířka táhla se stanoví z požadované plochy výztuže (6.8). Při rozvrstvení výztuže po vrstvách a řadách (řady nemají vliv na šířku) lze vyměřit šířku táhla. Celková šířka táhla má rozměr vrstev a je ohraničena krycí vrstvou betonu. Při výpočtu celkové šířky táhla lze určit střednici táhla, která vstupuje do STM. [1, 2]

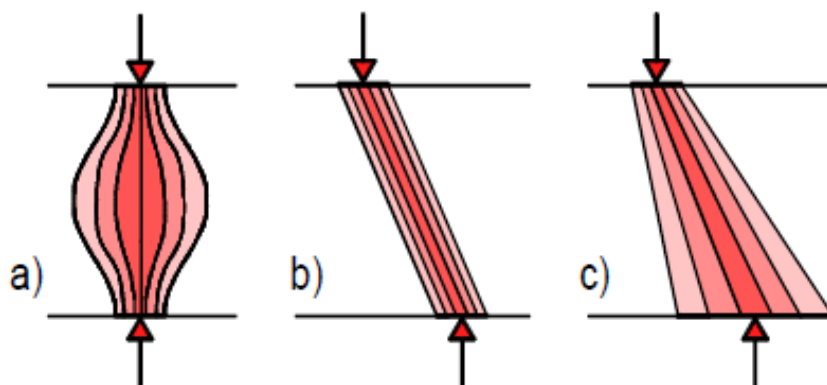
Je nutné respektovat zakotvení táhla za styčником. Další důležitou podmínkou je dodržení minimálního poloměru ohýbání. Je to právě proto, aby se předešlo porušení betonu uvnitř ohybu [1].

$$A_{s,req} = \frac{N_t}{f_{yd}} \quad (6.8)$$

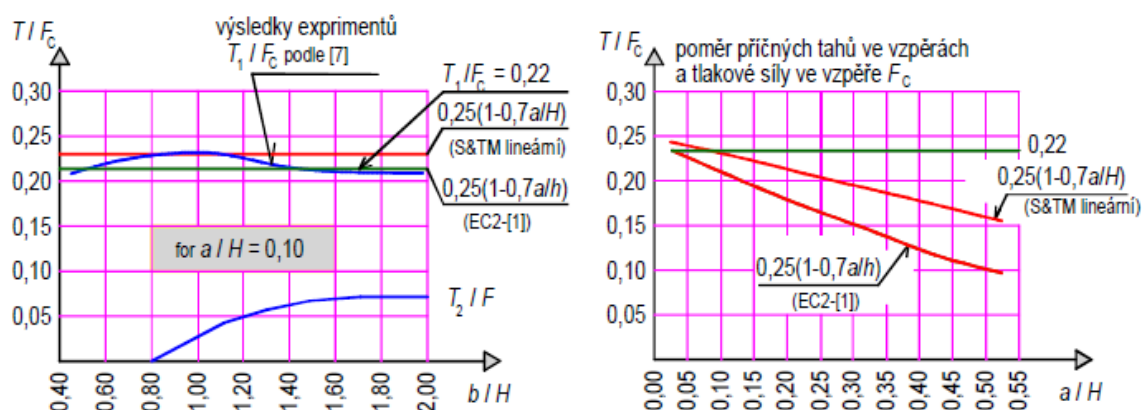
kde  $N_t$  je normálová tahová síla v prutu.

### Tlačené pruty – vzpěry:

Vzpěra reprezentuje v STM beton. Únosnost betonové vzpěry závisí na typu vzpěry, příčném napětí a potrhání vzpěry [1]. Ve STM lze rozeznat celkem tři tvary betonové vzpěry (Obr. 6.10). Při výpočtu se všechny typy vzpěr zohledňují jako prismatické vzpěry. Rozšiřující se tvar vzpěry se zohledňuje za pomoci zavedení příčných tahových sil  $T$ . Na tuto tahovou příčnou sílu je potřeba navrhnout přídatnou výztuž. Lze si to představit tak, že v první a poslední čtvrtině délky vzpěry jsou umístěna příčná táhla. Celková síla, na kterou se navrhne vyztužení, se rovná  $2 \cdot T$ . Při vzniku a rozvoji trhlin se aktivuje tato příčná výztuž a její účel je zachytat příčné tahy od tlačené vzpěry. V literatuře [1, 2] jsou vyjádřeny konkrétní vztahy pro výpočet tahové síly v závislosti na geometrii vzpěry v konstrukci. Pro zjednodušení lze pro pozemní stavby brát hodnotu příčných tahů  $T$  jako hodnotu 22% tlakové síly ve vzpěře [2]. Literatura [1] se uvádí velikost příčného tahu  $T$  jako hodnota 25% tlakové síly ve vzpěře. V literatuře [2] lze dohledat analyzování velikosti příčných tahů v betonové vzpěře v závislosti na poměru šířky betonové vzpěry ve styčнику a délky vzpěry (Obr. 6.11). Z Obr. 6.11 je patrné, že hodnota  $0,25 \cdot N_c$  je velice konzervativní kritérium.



Obr. 6.10 Geometrie vzpěry: a) baňkovitá (lahvovitá) vzpěra, b) vzpěra s rovnoběžnými vlákny (prismatická vzpěra), c) vějířovitá vzpěra [2]



Obr. 6.11 Velikost příčné síly v betonové vzpěře v závislosti na geometrii vzpěry

$$2 \cdot T \approx 2 \cdot (0,22 \div 0,25) \cdot N_c \quad (6.9)$$

kde  $T$  je příčná tahová síla,  
 $N_c$  normálová tlaková síla v prutu.

Napětí na konci vzpěry (6.10) je potřeba porovnat s mezním napětím (napětí na mezi únosnosti). Hodnota mezního napětí závisí na typu příčného namáhání. Pokud je vzpěra příčně tlačena nebo bez příčného namáhání, mezní napětí ve vzpěře se rovná návrhové válcové pevnosti betonu v tlaku (6.11). Takto namáhané vzpěry se neporuší trhlinami. Pokud je vzpěra příčně tažena a v důsledku příčných tahů dochází k rozvoji trhlin, je potřeba redukovat únosnost vzpěry podle 6.13.

$$\sigma_c = \frac{N_c}{c \cdot b} \quad (6.10)$$

kde  $c$  je šířka tlačené vzpěry,  
 $b$  tloušťka tlačené vzpěry (hodnota šířky průřezu).

$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd} \quad (6.11)$$

kde  $f_{cd}$  je návrhová válcová pevnost betonu v tlaku.

Pokud se vzpěra nachází v oblastech s víceosým tlakem a je příčně tlačena nebo bez příčného namáhání, lze uvažovat vyšší únosnost tlačené vzpěry na hodnotu dle 6.12 [14].

$$\sigma_{Rd,max} = k_4 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.12)$$

kde  $k_4$  je součinitel redukce napětí, podle národní přílohy v EC2 je  $k_4 = 3,0$ .

Přístup ČSN EN 1992-1-1 v oddíle 6.5.2 (2) konzervativně redukuje pevnost vzpěry s trhlinami podle 6.13 [14]. Pokud se prokáže návrhová pevnost vzpěry s trhlinami zkouškou, lze využít takto stanovenou hodnotu do výpočtu.

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.13)$$

kde  $v'$  je redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem (6.14).

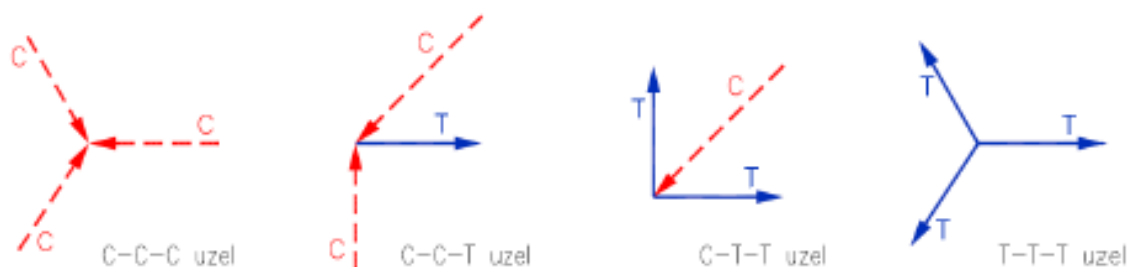
$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (6.14)$$

kde  $f_{ck}$  je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku.

#### Styčníky (uzly):

Styčníky představují v STM body, v nichž dochází ke styku táhel a vzpěr. Ve všech styčnicích musí být zajištěna rovnováha sil. V rovinném STM je styčník definován nejméně průnikem třech sil (Obr. 6.12). [1, 2] Šířka vzpěry uvedená ve vztahu 6.10 se uvažuje jako nejmenší kolmý rozměr tlačného prutu.

Podle typu styčníku je potřeba redukovat návrhovou pevnost betonové vzpěry podle doporučených hodnot z národní přílohy (EC2). Níže vyjádřené vztahy 6.15, 6.16 a 6.17 jsou převzaty z EC2. Metodika postupu výpočtu STM podle ACI 318 je totožná s návrhovým přístupem podle EC2. Jediný rozdíl mezi EC2 a ACI 318 je pouze v odlišných hodnotách součinitelů bezpečnosti pro vyjádření mezního napětí podle typu styčníku.



Obr. 6.12 Typy styčniců podle průniku vzpěr (C) a táhel (T) [1]

### **C-C-C styčník:**

Maximální mezní napětí na hraně styčníku C-C-C se stanoví podle vztahu 6.15. [14]

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.15)$$

kde  $k_1$  je součinitel redukce napětí, podle národní přílohy v EC2 je  $k_1 = 1,0$ .

Pokud se styčník C-C-C nachází uvnitř konstrukce, lze vycházet z hydrostatického namáhání pro stanovení šířky vzpěry. Tedy, pro stanovení šířky vzpěry se vyhází, že je ve styčníku na všech stranách stejné napětí. Pokud je dán rozměr roznášecí plochy, jedná se o tzv. nehydrostatické namáhání. To znamená, že se stanoví šířka vzpěry podle geometrie styčníku.

### **C-C-T styčník:**

Maximální mezní napětí na hraně styčníku C-C-T se stanoví podle vztahu 6.16. [14]

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.16)$$

kde  $k_2$  je součinitel redukce napětí, podle národní přílohy v EC2 je  $k_2 = 0,85$ .

### **C-T-T styčník:**

Maximální mezní napětí na hraně styčníku C-T-T se stanoví podle vztahu 6.17. [14]

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.17)$$

kde  $k_3$  je součinitel redukce napětí, podle národní přílohy v EC2 je  $k_3 = 0,75$ .

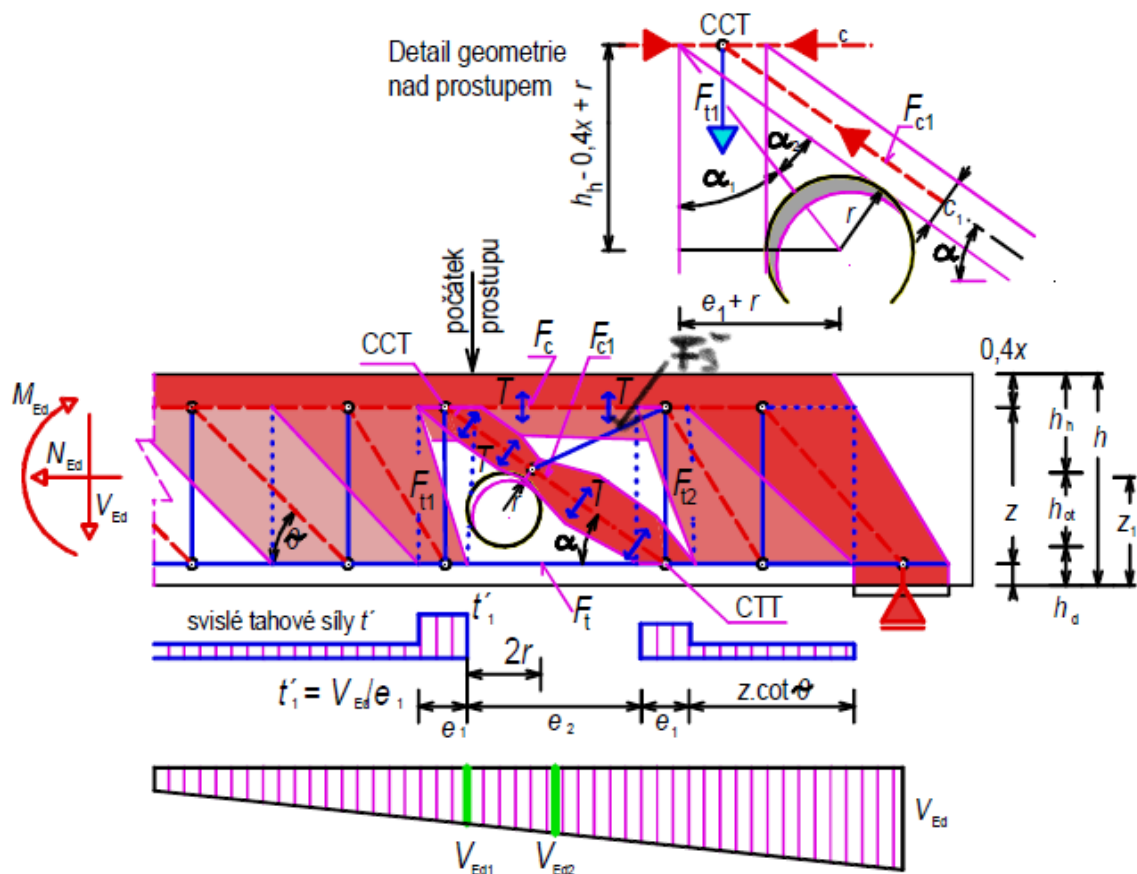
### **Konstrukční vyztužení D-oblasti:**

Pro omezení šířky trhliny D-oblasti a zajištění duktility konstrukce je potřeba dodržet konstrukční zásady. Jednou z konstrukčních zásad je stanovení minimální plochy výztuže, která při obou površích konstrukce musí odpovídat minimálně 0,3% plochy betonu. Maximální vzdálenost prutů je po 250 mm.

### **Nosník s malým otvorem:**

Pro řešení nosníku s otvorem pomocí metody příhradové analogie neexistuje mnoho ověřených a popsaných postupů. V literatuře [2] lze najít postup řešení pomocí metody příhradové analogie vycházející z DIN 1045-1 při zabudování otvoru v nosníku. Za pomoci tohoto STM lze zohlednit posouvající sílu, normálovou sílu a ohybový moment. Na Obr. 6.13 je znázorněno schéma pro výpočet. Lze si povšimnout, že svislá táhlo je umístěno na vzdálenost  $z \cdot \cot \theta$ . V postupu při navržení oblasti otvoru pomocí STM se neuvažuje šikmé táhlo ( $F_s$ ) z Obr. 6.13. Posoudí se pouze dva styčníky (CCT a CTT), jedna betonová vzpěra ( $F_c$ ) a táhlo ( $F_{t1}$ ).





Obr. 6.13 STM pro malý otvor v nosníku [2]

**Návrh táhla:**

$$A_{sv,req} = \frac{|V_{Ed1}|}{f_{ywd}} \quad (6.18)$$

kde  $f_{ywd}$  je návrhová pevnost smykové výztuže,  
 $V_{Ed1}$  návrhová posouvající síla v místě před prostupem.

Šířka táhla  $e_1$  znázorněna na Obr. 6.13 se stanoví na základě minimální světlé vzdálenosti (6.19), počet průměr profilu  $a$  celou oblast táhla bude lemovat krytí výztuže.

$$s_{l,min} \geq \max[20 \text{ mm}, 1.2 \cdot \phi_{sw}, D_{max} + 5 \text{ mm}] \quad (6.19)$$

kde  $\phi_{sw}$  je průměr smykové výztuže,  
 $D_{max}$  maximální velikost zrna kameniva.

**Betonová vzpěra:**

Nejdříve je potřeba zkontrolovat, zda je dodržen sklon tlačené diagonály  $\alpha$ . Podle ČSN EN 1992-1-1 [14] se musí úhel  $\alpha$  nacházet v intervalu  $21,8^\circ \div 45^\circ$ .

$$\alpha = 90^\circ - (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (6.20)$$

kde  $\alpha_1$  je dílčí sklon z Obr. 6.12 (6.21),  
 $\alpha_2$  dílčí sklon z Obr. 6.12 (6.22).

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{e_1 + r}{h_h - 0,4 \cdot x + r}\right) \quad (6.21)$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{r}{\sqrt{(e_1 + r)^2 + (h_h - 0,4 \cdot x + r)^2}}\right) \quad (6.22)$$

kde  $r$  je poloměr kruhového otvoru,  
 $h_h$  výška od líce otvoru k horní straně nosníku.

Při znalosti úhlu tlačené diagonály lze určit hodnotu šířky vzpěry (6.23) a následně ověřit napětí v betonové vzpěře při vzniku trhlin (6.24).

$$c_1 = e_1 \cdot \sin \alpha \quad (6.23)$$

$$\sigma_{c1} = \frac{|V_{Ed1}|}{b \cdot c_1 \cdot \sin \alpha} \leq \sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot v' \cdot f_{cd} \quad (6.24)$$

### Styčníky:

Je potřeba ověřit, jestli dříve navržená ohybová výztuž splňuje podmínku minimální plochy výztuže (6.26) pro dolní táhlo  $F_t$  (Obr.6.13).

$$F_t = \frac{M_{Ed2} + N_{Ed2} \cdot z_1}{z} + \frac{|V_{Ed2}|}{\tan \alpha} + N_{Ed2} \quad (6.25)$$

kde  $z_1$  je vzdálenost od těžiště tažené výztuže po těžiště průřezu,  
 $M_{Ed2}$  návrhový ohybový moment působící ve středu délky betonové vzpěry,  
 $V_{Ed2}$  návrhová posouvající síla v místě za prostupem,  
 $N_{Ed2}$  návrhová normálová síla (pro tažený nosník udává kladná hodnota).

$$A_{s,req} = \frac{F_t}{f_{yd}} \leq A_{s,prov} \quad (6.26)$$

kde  $f_{yd}$  je návrhová mez kluzu betonářské výztuže.

Následně se ověří dříve spočtená tlaková síla v betonu (6.28), která na rameni vnitřních sil definuje moment únosnosti průřezu. Tato tlaková síla v betonu musí být větší nebo rovna síle tlakové v horním pásu (6.27), která vzniká sekundárními silami způsobené zabudováním otvoru v nosníku.

$$F_c = -\frac{M_{Ed2} + N_{Ed2} \cdot z_2}{z} - \frac{|V_{Ed2}|}{\tan \alpha} + N_{Ed2} \quad (6.27)$$

kde  $z_2$  je vzdálenost od těžiště tlakové síly v betonu po těžiště průřezu.

$$F_{c,Rd} = \lambda \cdot x \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd} \quad (6.28)$$

kde  $F_{Rd,c}$  je tlaková síla v betonu,  
 $\lambda$  součinitel definující účinnou výšku tlačené oblasti,  
 $\eta$  součinitel definující účinnou návrhovou pevnost.

Následně se ověří, že tlaková síla v horním pásu spočtená podle vztahu 6.27 je rovna nebo menší mezní síle ve styčníku C-C-T (6.16).

### Návrh příčné výztuže v rovině nosníku:

Dále je potřeba navrhnout příčnou ortogonální výztuž (6.29 a 6.30) v rovině nosníku v místě betonové vzpěry. Tato výztuž se navrhne za pomoci zjednodušeného vztahu 6.9. Navrženou výztuž je potřeba umístit ve čtvrtině vzpěry z každé strany. Je nutné zajistit statickou funkci příčné výztuže, aby zajistila přenos příčných tahů od tlačené vzpěry. To se provede správným zakotvením na kotevní délku od hranice lahvovité vzpěry. V polovině lahvovité vzpěry vzniká největší šířka, kterou lze vyjádřit vztahem 6.31 [1, 2]. Při znalosti této hodnoty trajektorie lahvovité vzpěry jsou zakřiveny směrem ke styčníku. Od hranice trajektorie se provede zakotvení příčné výztuže na kotevní délku stanovenou podle ČSN EN 1992-1-1 [14].

$$A_{sh,req} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot \sigma_{c1} \cdot b \cdot c_1 \cdot \cos \alpha}{f_{yd}} \quad (6.29)$$

kde  $A_{sh,req}$  je požadovaná plocha vodorovné výztuže na délku vzpěry.

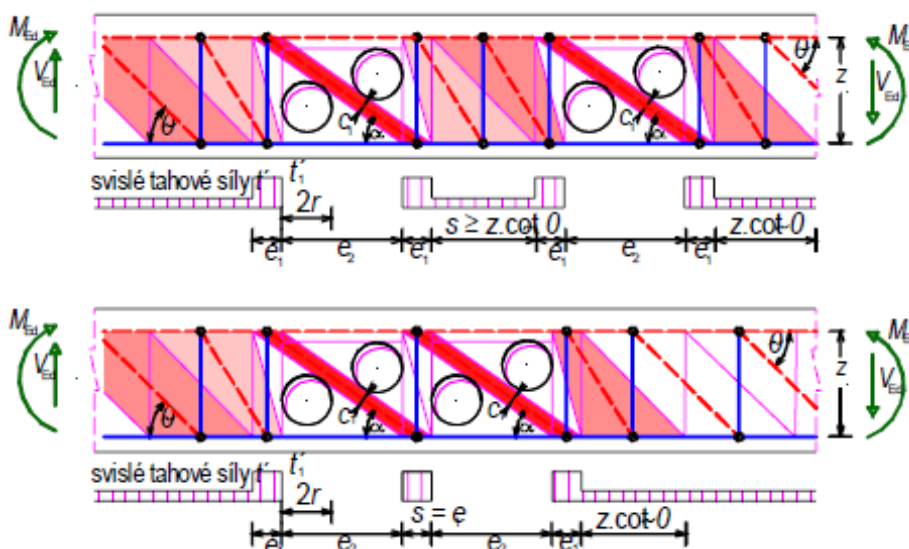
$$A_{sv,req} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot \sigma_{c1} \cdot b \cdot c_1 \cdot \sin \alpha}{f_{yd}} \quad (6.30)$$

kde  $A_{sv,req}$  je požadovaná plocha svislé výztuže na délku vzpěry.

$$b_{ef} = 0,5 \cdot \frac{z}{\sin(\alpha)} + 0,65 \cdot c_1 \quad (6.31)$$

### Více otvorů v nosníku:

Při umístění více otvorů v nosníku je potřeba dodržet, aby otvory nezasahovaly do prizmatické vzpěry nebo nenarušili šířku táhla. Na Obr. 6.14 jsou znázorněny dvě ukázky zabudování otvorů v nosníku. U horního schématu, kdy dvojice otvorů je od sebe osazena na vzdálenost větší než  $z \cdot \cot \theta$ , se při posouzení STM postupuje pro obě dvojice otvorů odděleně. U dolního schématu není dodrženo kritérium odsazení otvorů na vzdálenost větší jak  $z \cdot \cot \theta$ . Pro posouzení STM je nutné řešit obě dvojice otvorů v nosníku jako jednu D-oblast. Budou se posuzovat tři táhla, dvě vzpěry, dolní táhlo, horní tlačný pás a styčníky. [2]

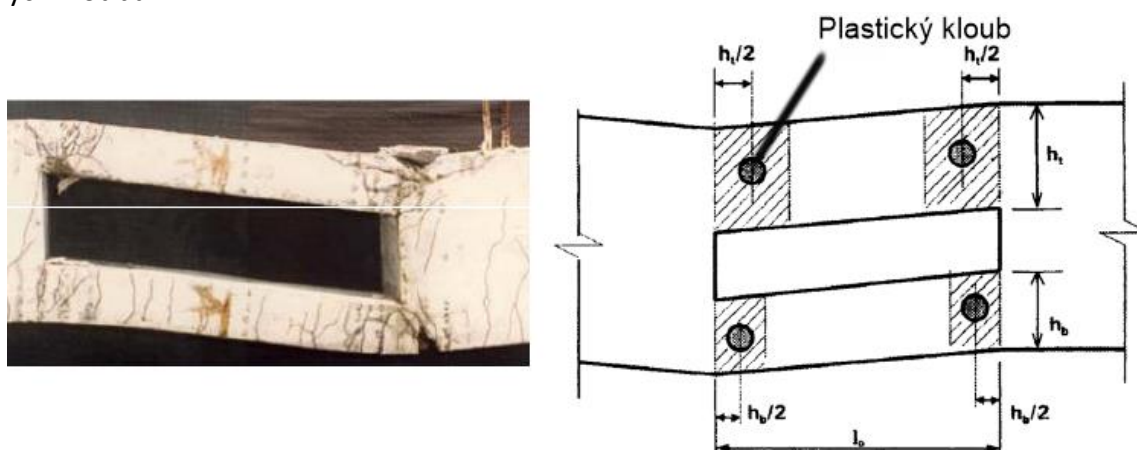


Obr. 6.14 Ukázky vzorů STM pro více malých otvorů v nosníku [2]

## 7 Vyztužení nosníku s velkým otvorem

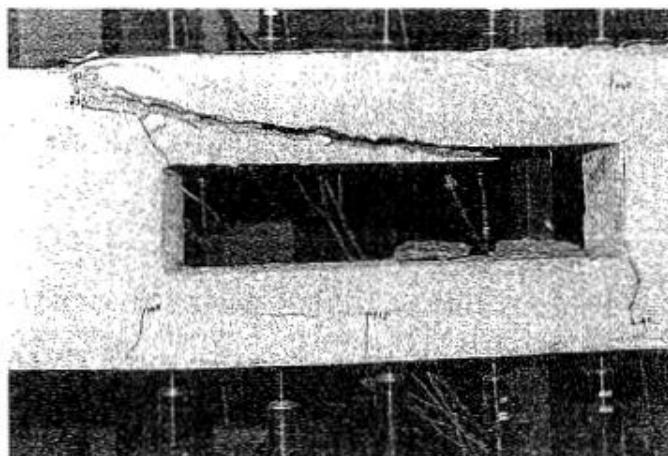
Konstrukční návrh a posouzení nosníků s velkým otvorem vyžaduje zvýšenou pozornost a rozsáhlou znalost problematiky. U nosníku s velkým otvorem neplatí předpoklad Bernoulli-Navierovy hypotézy ohybu. V porovnání s nosníkem s malým otvorem se tak výrazně mění chování. Při navrhování nosníku s velkým nebo s malým otvorem platí, že otvory neovlivňují ohybovou únosnost prvku, pokud otvor nezasahuje do oblasti tlačené výšky. Nosníky s velkým otvorem se nejčastěji umísťují k podpoře (místo dominantního smykového namáhání) [4].

Poznatky z uskutečněných experimentů demonstrují, že nosník s velkým otvorem se chová podobně jako Vierendeelův nosník. Zabudováním velkého otvoru do nosníku se vytvoří horní a dolní pás. Porušení nosníku s velkým otvorem je dosaženo mechanismem čtyř plastických kloubů, které vznikají v polovině výšky horního a dolního pásu (Obr. 7.1). Na Obr. 7.1 vlevo lze vidět, že dochází k drcení betonu a rozvoji trhlin v místech tlačných plastických kloubů.



Obr. 7.1 Schéma mechanismu porušení velkého nosníku s otvory [4]

Pokud není dolní a horní pás řádně vyztužen smykovou a ohybovou výztuží, dochází k náhlému kolapsu nosníku s velkým otvorem. Tento typ porušení nevaruje a porušení nastává rozdrčením betonového pásu diagonální trhlinou (Obr. 7.2). [9]



Obr. 7.2 Porušení nosníku s velkým otvorem při nedostatečném vyztužení [9]

Při navrhování velkého otvoru je potřeba věnovat pozornost hornímu a dolnímu pásu. Tyto pásy jsou náchylné na ztrátu stability při tlakovém namáhání. Je potřeba splnit normová kritéria o dovolené štíhlosti nebo detailně posoudit štíhlý pás.

## 7.1 Návrhový přístup vycházející z ACI 318

V publikaci [11] je tento návrhový přístup označen jako metoda plastického kloubu (v originále plastic hinge method). Autoři této metody jsou Mansur a Tan, kteří poprvé v roce 1996 publikovali základní koncept návrhu. Do roku 2006 upravovali metodu plastického kloubu, a proto se lze v odborné literatuře setkat s revizemi, které jsou označeny římskými číslicemi. Poslední zmíněná revize je označena římskou III. [11]

### 1. Rozdělení vnitřních sil do horního a dolního pásu:

Pro rozdělení posouvající síly mezi horní a dolní pás byly celkem zaznamenány tři myšlenky. Podle Lorenstena tlačенý pás přenáší posouvající sílu a tažený pás je vystaven nulové posouvající síle. Je potřeba zmínit, že tento stav nastane za předpokladu malé výšky průřezu taženého pásu a velké výšky průřezu tlačенého pásu. Nasser, Rogan, Warwaruk uvádí, že rozdělení posouvající síly mezi horní a dolní pás lze provést v poměru plochy průřezu. Barney a jeho kolektiv doporučují rozdělit posouvající sílu mezi horní a spodní pás v ohybové tuhosti obou prvků. [11]

V modelových příkladech a komentovaných postupech řešení nosníku s velkým otvorem [4, 9] se uvádí rozdělení síly do horního a dolního pásu pomocí poměru ohybové tuhosti průřezu.

$$V_t = V_m \cdot \left( \frac{I_{gt}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (7.1)$$

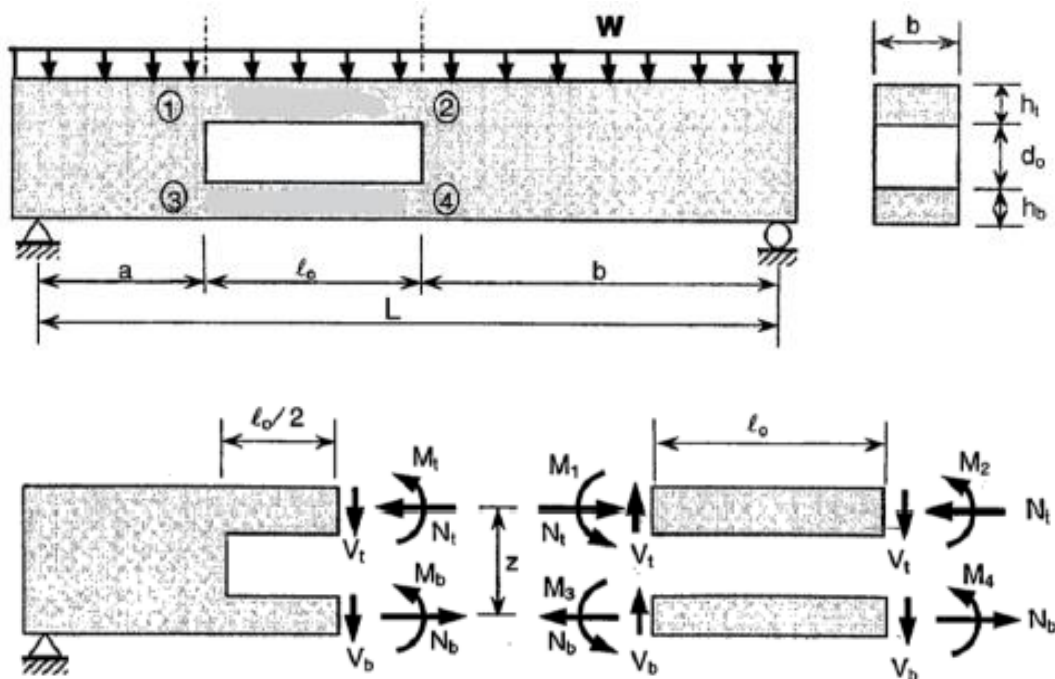
$$V_b = V_m \cdot \left( \frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (7.2)$$

kde  $V_m$  je návrhová posouvající síla působící uprostřed otvoru,  
 $I_{gt}$  moment setrvačnosti průřezu horního pásu,  
 $I_{gb}$  moment setrvačnosti průřezu dolního pásu.

$$N_t = -N_b = \frac{M_m}{z} \quad (7.3)$$

kde  $M_m$  je návrhový ohybový moment působící uprostřed otvoru,  
 $z$  vzdálenost těžišť dolního a horního pásu.

Ohybový moment je přenášen dvojicí pásů na rameni (7.3). Tedy, při kladném momentu vzniká tlaková síla v horním pásu a tahová síla v dolním pásu. Zároveň v každém rohu pásu vzniká ohybový moment od posouvající síly a v případě horního pásu přídavný moment od rovnoměrného zatížení 7.4 – 7.7.



Obr. 7.3 Schéma konvence působících vnitřních sil v horním a dolním pásu [4]

$$M_1 = -\frac{w \cdot l_0^2}{8} - \frac{V_t \cdot l_0}{2} \quad (7.4)$$

$$M_2 = -\frac{w \cdot l_0^2}{8} + \frac{V_t \cdot l_0}{2} \quad (7.5)$$

$$M_3 = -\frac{V_b \cdot l_0}{2} \quad (7.6)$$

$$M_4 = \frac{V_b \cdot l_0}{2} \quad (7.7)$$

kde  $w$  je návrhové vnější rovnoměrné zatížení,  
 $l_0$  délka dolního a horního pásu.

## 2. Kritérium štíhlosti tlačенého pásu:

Pokud je splněno kritérium štíhlosti 7.8 (kladný moment, tedy tlačенý horní pás) nebo 7.10 (záporný moment, tedy tlačенý dolní pás), lze tlačенý pás uvažovat jako masivní a účinky druhého řádu lze zanedbat.

$$\frac{K \cdot l_0}{r} < 34 - 12 \cdot \frac{M_3}{M_1} \quad (7.8)$$

kde  $K$  je součinitel vzpěrné délky (konzervativně lze uvažovat hodnotu 1),  
 $r$  poloměr setrvačnosti (zjednodušeně pro čtvercový průřez vztah 7.9).

$$r = 0,3 \cdot d_c \quad (7.9)$$

kde  $d_c$  je výška průřezu tlačенého pásu.

$$\frac{K \cdot l_0}{r} < 22 \quad (7.10)$$

### 3. Návrh ohybové a smykové výztuže:

Ohybová výztuž se navrhne za pomoci interakčního diagramu N+M. Smyková výztuž se navrhne standartně podle podkapitoly 6.1 pro oba pásy.

### 4. Posouzení sloupku mezi otvory:

Podle závěrů z experimentálního výzkumu Barneyho a kolektivu z roku 1977. Se doporučuje uvádět rozměry sloupku v poměru šířce ku výšce otvoru nejméně hodnotou 2 [4, 9]. Na Obr. 7.4 je znázorněno jednoduché schéma vnitřních sil působících na sloupek (7.11 – 7.13). Na tyto stanovené vnitřní síly se standartně navrhne vyztužení sloupku.

$$V_p = T_2 - T_1 \quad (7.11)$$

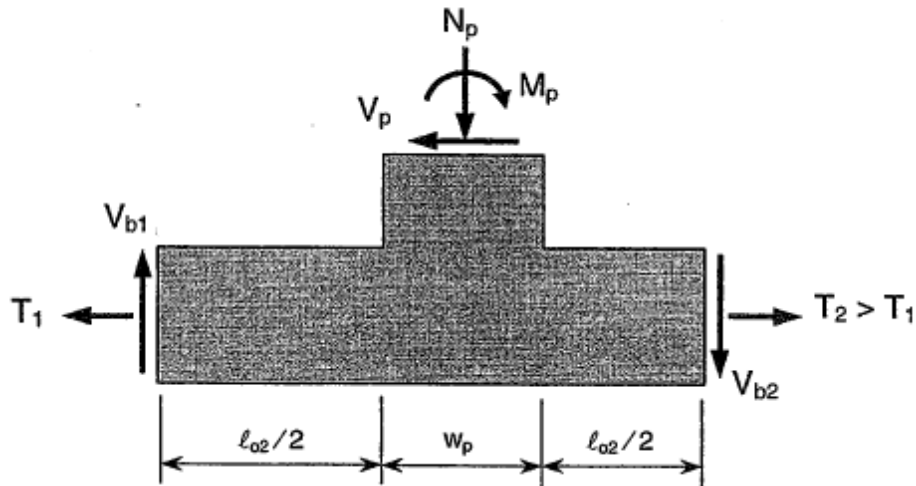
kde  $T_1$  je návrhová normálová síla působící v levé části dolního pásu,  
 $T_2$  návrhová normálová síla působící v pravé části dolního pásu.

$$N_p = V_{b1} - V_{b2} \quad (7.12)$$

kde  $V_{b1}$  je návrhová posouvající síla působící v levé části dolního pásu,  
 $V_{b2}$  návrhová posouvající síla působící v pravé části dolního pásu.

$$M_p = (T_2 - T_1) \cdot \left(d_0 + \frac{d_b}{2}\right) - V_{b1} \cdot \left(\frac{l_{01} + W_p}{2}\right) - V_{b2} \cdot \left(\frac{l_{02} + W_p}{2}\right) \quad (7.13)$$

kde  $d_0$  je výška otvoru,  
 $d_b$  výška dolního pásu,  
 $l_{01}$  délka otvoru na levé straně od sloupku,  
 $l_{02}$  délka otvoru na pravé straně od sloupku,  
 $W_p$  šířka sloupku.



Obr. 7.4 Schéma působících sil na sloupku [4]

### 5. Návrh výztuže pro omezení šířky trhliny:

Mansur doporučuje využít pro omezení šířky trhliny vzájemnou kombinaci svislé a diagonální výztuže. Svislé vyztužení převezme 25 % působícího smykového namáhání a diagonální vyztužení převezme 75 % smykového namáhání na nosníku. Tedy, minimální plocha diagonální výztuže se stanoví ze vztahu 7.14 a minimální plocha svislé výztuže se stanoví ze vztahu 7.15. Kritérium minimální plochy svislé a diagonální výztuže se rovnoměrně rozmístí na každou stranu otvoru. [12, 13]

$$A_{d,req} = \frac{0,75 \cdot \eta \cdot V_m}{\Phi \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha} \quad (7.14)$$

kde  $\eta$  je součinitel koncentrace ve smyku (volí se obvykle hodnota 2),  
 $\Phi$  redukční součinitel pro smykové namáhání (podle ACI 318-19 hodnota 0.75).

$$A_{v,req} = \frac{0,25 \cdot \eta \cdot V_m}{\Phi \cdot f_{ywd}} \quad (7.15)$$

### 6. Přírůstek průhybu vlivem začlenění velkého otvoru do nosníku:

Barney a kolektiv v roce 1977 analyzovali průhyb s velkým nosníkem. Na základě zjištěných poznatků vyjádřil analytický vztah 7.15 pro přídatný průhyb na prostém nosníku, který se přičte k průhybu stanoveném na nosníku bez otvoru. [4]

$$\delta_v = \frac{V \cdot l_0^3}{12 \cdot E_c \cdot (I_{gt} + I_{gb})} \quad (7.16)$$

kde  $V$  je charakteristická posouvající síla od vnějšího zatížení v místě středu otvoru,  
 $E_c$  modul pružnosti betonu.

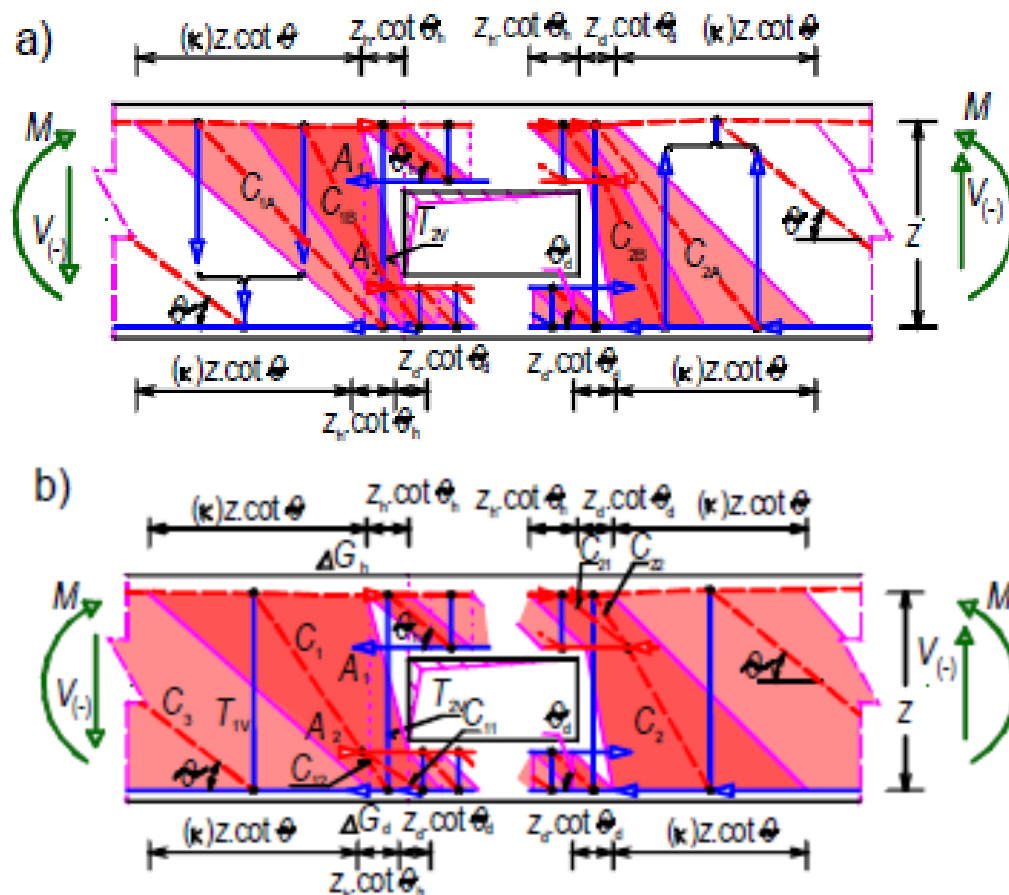


## 7.2 Metoda příhradové analogie

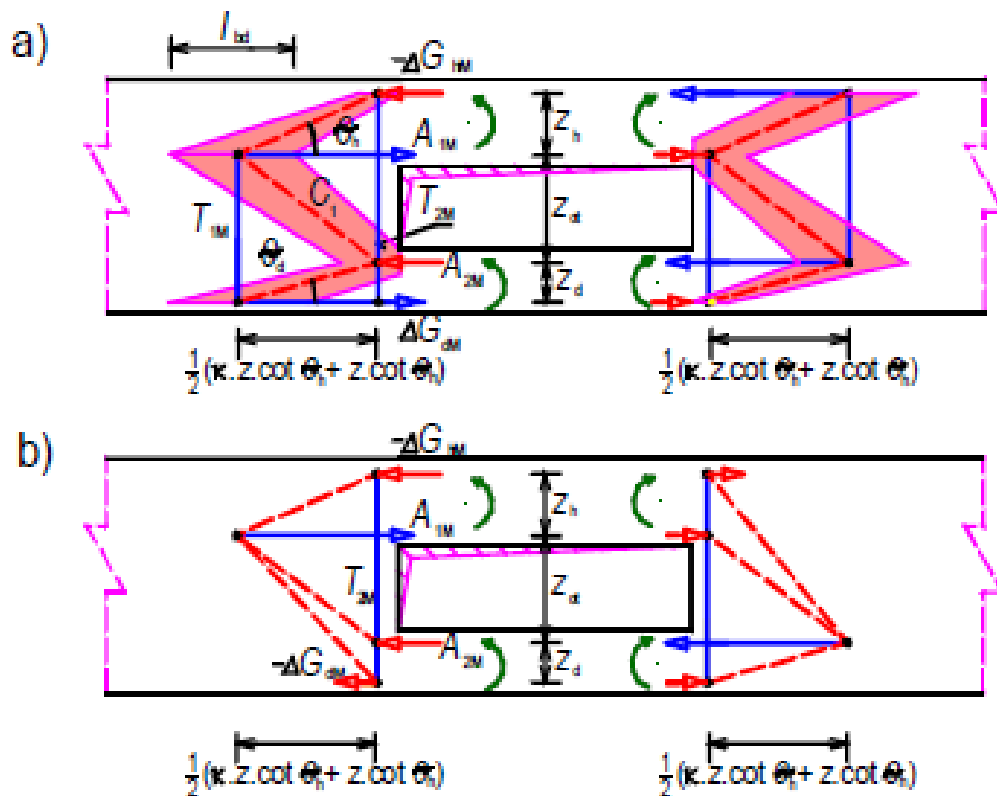
U nosníku s velkým otvorem neexistuje jeden univerzální STM. Celkem jsou popsány tři modely. Modely jsou citlivé na vstupní návrhové okrajové podmínky, kterými jsou geometrie otvoru, vyztužení oblasti nebo na zatěžovací kombinace. Výhoda modelu A a B oproti zjednodušenému modelu DAfStB 459 spočívá v úspoře výztuže a lepšího popisu chování oblasti kolem otvoru. Všechny tři modely nelze použít, pokud otvor je umístěn ve středu rozpětí se symetrickým zatížením. Pokud nastane tento případ umístění otvoru v nosníku, postupuje se standartně jako při návrhu výztuže při ohybovém namáhání. Tedy, horní táhlo ve STM se přemění na horní tlačný pás. [2]

Postupy výpočtu pro model A a B jsou uvedeny v literatuře [2]. Oba tyto modely se v praxi nepoužívají. Je to právě z důvodu složitosti návrhu. Při posuzování velkého otvoru v nosníku metodou A je nutné každou kombinaci zatížení ověřit zvlášť.

Podstatou zjednodušeného modelu DAfStB 459 je rozdělení vnitřních sil do primárních a sekundárních účinků. Mezi primární účinky patří vnitřní síly spočítané na plném nosníku před otvorem. Sekundární účinky si lze představit jako vnitřní síly, které vznikají vetknutím horního a dolního pásu do plného nosníku. Pro primární vnitřní síly je vytvořen zvlášť STM, který přenáší ohybový moment, zápornou nebo kladnou posouvající sílu (Obr. 7.5). Ukázka STM pro přenos sekundárních účinků je uveden na Obr. 7.6. [2]



Obr. 7.5 Zjednodušený model pro přenos primárních účinků (záporná posouvající síla) [2]



Obr. 7.6 Zjednodušený model pro přenos sekundárních účinků (záporná posouvající síla) [2]

Pro návrh vyztužení oblasti otvoru je nutné přerozdělit primární vnitřní síly na líci otvoru do dolního a horního pásu. Za lícovou stranu otvoru se považuje ta strana s největší posouvající silou. Primární posouvající síla se rozdělí do jednotlivých pásů v poměru momentů setrvačnosti průřezu. Vztahy 7.1 a 7.2 odpovídají sekundárním posouvajícím silám ve spodním a horním pásu. V těchto vztazích je nutné místo posouvající síly uprostřed otvoru dosadit posouvající sílu na líci otvoru. Pro stanovení ohybového momentu na dolním a horním pásu se pro zjednodušení neuvažuje působení na horním/dolním pásu liniové zatížení. Dříve než se stanoví analyticky návrhové sekundární vnitřní síly je potřeba vypočítat vzdálenost nulového ohybového momentu (Obr. 7.7).

Pro stanovení polohy nulového ohybového momentu je potřeba vyjádřit součinitel  $w$  podle 7.17.

$$w = \frac{\frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d}}{z_{ot}^2 \cdot \frac{I_h}{I_d} + \frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d}} \quad (7.17)$$

kde  $A_d$  je průřezová plocha dolního pásu,  
 $A_h$  průřezová plocha horního pásu,  
 $I_d$  moment setrvačnosti dolního pásu,  
 $I_h$  moment setrvačnosti horního pásu,  
 $z_{ot}$  vzdálenost mezi těžištěm horního a dolního pásu.

$$x = l_{ot} \cdot \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{M_{Ed,líc}}{V_{Ed,líc} \cdot l_{ot}} + \frac{1}{2} \right) \cdot w \right] \quad (7.18)$$

kde  $l_{ot}$  je délka otvoru,  
 $w$  součinitel zohleňující geometrii otvoru a pásů,  
 $M_{Ed,líc}$  návrhový ohybový moment působící na líci otvoru,  
 $V_{Ed,líc}$  návrhová posouvající síla působící na líci otvoru.

V literatuře [2] je pro zjednodušení výpočtu uveden zjednodušující výpočet pro polohu nulového ohybového momentu v závislosti na poměru mezi výškou otvoru a výškou nosníku. Pokud platí  $h_{ot}/h \leq 0,5$  lze uplatnit následující vztah 7.19 pro výpočet polohy nulového ohybového momentu.

$$x = l_{ot} \cdot \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{M_{Ed,líc}}{37 \cdot V_{Ed,líc} \cdot l_{ot}} \cdot \left( \frac{\max(h_h, h_d)}{\min(h_h, h_d)} \right)^3 \right) \right] \quad (7.19)$$

kde  $h_d$  je výška od líce otvoru k dolní straně nosníku.

Pokud platí  $h_{ot}/h > 0,5$  lze uplatnit následující vztah 7.20 pro výpočet polohy nulového ohybového momentu.

$$x = l_{ot} \cdot \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{M_{Ed,líc}}{5 \cdot V_{Ed,líc} \cdot l_{ot}} \cdot \left( \frac{\min(h_h, h_d)}{\max(h_h, h_d)} \right)^3 \right) \right] \quad (7.20)$$

Návrhový ohybový moment působící na horním pásu se stanoví ze vztahu 7.21. Stejný postup se aplikuje i pro stanovení ohybového momentu pro dolní pás.

$$M_{Ed,h} = \max[V_{Ed,h} \cdot x; V_{Ed,h} \cdot (l_{ot} - x)] \quad (7.21)$$

kde  $V_{Ed,h}$  je návrhová posouvající síla na horním pásu.

Návrhová normálová síla působící na horním pásu se stanoví jako dvojice sil z návrhového ohybového momentu na líci otvoru (7.22).

$$N_{Ed,h} = - \frac{M_{Ed,líc}}{z_{dN} + z_{hN}} \quad (7.22)$$

kde  $z_{dN}$  je vzdálenost mezi těžištěm otvoru a dolního pásu,  
 $z_{hN}$  vzdálenost mezi těžištěm otvoru a horním pásem.



Stanovení minimální plochy výztuže pro horní táhlo  $A_1$  z Obr. 7.8:

$$A_1 = \frac{-M_{Ed,h} - N_{Ed,h} \cdot z_{h2}}{z_h} + \frac{|V_{Ed,h}|}{\tan \theta_h} \quad (7.23)$$

kde  $z_{h2}$  je vzdálenost mezi těžištěm horního pásu a táhla  $A_1$ ,  
 $z_h$  rameno vnitřních sil na horním pásu,  
 $\theta_h$  úhel sklonu tlačných diagonál na horním pásu.

Hodnota síly v horním táhlu  $A_2^*$  (Obr. 7.8) odpovídá síle spočtené podle vztahu 7.23. Úhel sklonu tlačné diagonály na horním pásu  $\theta_h$  se doporučuje podle [2] zvolit  $30^\circ$ .

$$A_{s,A1,req} = \frac{A_1}{f_{yd}} \quad (7.24)$$

Stanovení minimální plochy výztuže pro dolní táhlo  $A_2$  z Obr. 7.8:

$$A_2 = \frac{M_{Ed,d} + N_{Ed,d} \cdot z_{d2}}{z_d} + \frac{|V_{Ed,d}|}{\tan \theta_d} \quad (7.25)$$

kde  $z_{d2}$  je vzdálenost mezi těžištěm dolního pásu a táhla  $A_2$ ,  
 $\theta_d$  úhel sklonu tlačných diagonál na dolním pásu,  
 $M_{Ed,d}$  návrhový ohybový moment dolního pásu,  
 $N_{Ed,d}$  návrhová normálová síla působící na horním pásu,  
 $z_d$  rameno vnitřních sil na dolním pásu.

Hodnota síly v dolním táhlu  $A_1^*$  (Obr. 7.8) odpovídá síle spočtené podle vztahu 7.25. Úhel sklonu tlačné diagonály na dolním pásu  $\theta_d$  se doporučuje podle [2] zvolit  $45^\circ$ .

$$A_{s,A2,req} = \frac{A_2}{f_{yd}} \quad (7.26)$$

Stanovení normálové síly ve svislém táhlu  $T_1$  z Obr. 7.8:

$$T_{1N} = N_{Ed} \cdot \frac{z_{dN}}{z_{dN} + z_{hN}} \cdot \frac{z_{hN}}{0,9 \cdot h + 1,3 \cdot h_h} \quad (7.27)$$

kde  $N_{Ed}$  je normálová síla od vnějšího zatížení.

Při vyjádření vztahu pro  $T_{1N}^*$  se ve vztahu 7.27 použije místo  $h_h$  hodnota  $h_d$ .

$$T_{1V} = |V_{Ed,líc}| \quad (7.28)$$

$$T_{1M} = \frac{1,3 \cdot A_1 \cdot h_d \cdot h_h + 1,6 \cdot A_2 \cdot h_d \cdot (0,8 \cdot h_h + 1,1 \cdot h_{ot})}{0,7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} \geq 0 \quad (7.29)$$

kde  $h_{ot}$  je výška otvoru.

$$T_1 = T_{1V} + T_{1M} + T_{1N} \quad (7.30)$$

kde  $T_{1M}$  je složka normálové síly vyvozená od ohybového momentu,  
 $T_{1N}$  složka normálové síly vyvozená od normálové síly,  
 $T_{1V}$  složka normálové síly vyvozená od posouvající síly.

Hodnota síly v táhle  $T_1^*$  (Obr. 7.8) se oproti vypočtené hodnotě  $T_1$  liší pouze ve výpočtu složky  $T_{1N}^*$ .

Stanovení normálové síly ve svislém táhlu  $T_2$  z Obr. 7.8:

$$T_{2N} = -N_{Ed} \cdot \frac{z_{dN}}{z_{dN} + z_{hN}} \cdot \frac{z_{hN}}{0,9 \cdot h + 1,3 \cdot h_h} \quad (7.31)$$

Při vyjádření vztahu pro  $T_{2N}^*$  se ve vztahu 7.31 použije místo  $h_h$  hodnota  $h_d$ .

$$T_{2V} = |V_{Ed,h}| \quad (7.32)$$

$$T_{2M} = \frac{1,3 \cdot A_2 \cdot h_d \cdot h_h + 1,6 \cdot A_1 \cdot h_h \cdot (0,8 \cdot h_d + 1,1 \cdot h_{ot})}{0,7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} \geq 0 \quad (7.33)$$

$$T_2 = T_{2V} + T_{2M} + T_{2N} \quad (7.34)$$

kde  $T_{2M}$  je složka normálové síly vyvozená od ohybového momentu,  
 $T_{2N}$  složka normálové síly vyvozená od normálové síly,  
 $T_{2V}$  složka normálové síly vyvozená od posouvající síly.

Hodnota síly v táhle  $T_2^*$  (Obr. 7.8) se oproti vypočtené hodnotě  $T_2$  liší pouze ve výpočtu složky  $T_{2N}^*$ .

Při návrhu smykové a ohybové výztuže horního a dolního pásu se provede standartním způsobem pro B-oblasti. Dolní i horní pás jsou namáhaný návrhovými vnitřními silami, které byly dříve spočteny a vstupují do výpočtu zjednodušeného modelu DAFStB 459 (Obr. 7.7).

## 8 Shrnutí

V této kapitole jsou stručně shrnuty základní informace z rešerše o nosníku s otvorem.

- EC2 definuje nosník jako liniový prutový prvek, u kterého je délka nejméně rovna trojnásobku výšky průřezu.
- Nosníky s otvorem se nejčastěji navrhují pro rozvody TZB. U výškových budov nebo administrativních objektech mohou otvory v nosníku ušetřit finance investorovi.
- Zabudování otvoru v nosníku naruší tok hlavních napětí. Kolem otvoru se koncentruje napětí. Z hlediska koncentrace je nejpříznivější kruhový tvar otvoru. Pokud se navrhuje čtvercový nebo obdélníkový tvar otvoru je doporučeno zaoblit rohy průřezu. Je to právě kvůli nižší koncentraci napětí v rozích otvoru.
- Doporučuje se umístit otvor od podpory, od lokálního zatížení nebo od dalšího otvoru na vzdálenost větší jak polovina výšky nosníku. V případě STM se jedná o vzdálenost  $z \cdot \cot \theta$ . Zároveň se nedoporučuje umístit otvor do tlačené části průřezu. Poloha otvoru na průřezu nosníku se volí s ohledem na výšku dolního a horního pásu. Je potřeba dodržet rozměr výšky průřezu, aby bylo možné horní a spodní pás při vybetonování zhutnit.
- Malé otvory lze definovat tak, že výška otvoru je menší nebo rovna přibližně 0,40 výšky nosníku. Je vhodné malé otvory ve STM umístit tak, aby nedošlo k narušení geometrie vzpěr a táhel.
- Velké otvory lze definovat tak, že výška otvoru je větší než 0,40 výšky nosníku. Velký otvor naruší ustálený tok napětí a neplatí zde Bernoulli-Navierova hypotéza. Pro tento typ otvoru se musí sestavit speciální STM. V odborné literatuře jsou uvedeny a ověřeny celkem tři STM.
- Zabudováním otvoru v nosníku se vytvoří horní a spodní pás. Při implementování otvoru v místě významného ohybového momentu vzniká v jednom z pásů tlaková normálová síla, která hraje významnou roli při ztrátě stability. Při uvažování malého otvoru lze zanedbat stabilitní posouzení pásu. Otvor v nosníku lze považovat za malý, pokud délka otvoru je menší nebo rovna větší z hodnot výšky průřezu horního nebo spodního pásu.
- Navrhování malého otvoru v nosníku má zanedbatelný vliv na průhyb na rozdíl od zabudování velkého otvoru.
- U malého a velkého otvoru je nutné navrhnout svislé a diagonální vyztužení. Hlavním úkolem diagonální vyztuže je omezit rozvoj širokých trhlin. Mansur ve svých experimentálních závěrech analyticky vyjádřil vztah pro minimální plochu diagonální vyztuže pro malý a velký otvor. Obecně diagonální vyztužení kolem otvoru se stanovuje na základě zkušenosti stavebního inženýra.

- Podle experimentů byly zjištěny dva způsoby smykového porušení v oblasti malého otvoru. Pro oba způsoby porušení lze navrhnout vyztužení podle modifikovaného návrhového přístupu ACI 318.
- Pro návrh vyztužení oblasti kolem malého a velkého otvoru lze využít metodu příhradové analogie, uplatňovanou zejména v Evropě, a návrhový přístup vycházející z americké normy ACI 318.
- Při uplatnění příhradové analogie získává stavební inženýr svobodu ve volbě nebo návrhu vhodného STM. Musí se dodržet doporučené zásady pro návrh STM. Metoda příhradové analogie respektuje hlavní trajektorie napětí spočtené za pomoci lineárně pružné analýzy.
- Pro návrh vyztužení kolem oblasti malého otvoru existuje pouze jeden ověřený model. Pro více otvorů v nosníku není nikde publikován osvědčený model.
- Základní myšlenkou pro návrh velkého otvoru v nosníku podle návrhového přístupu ACI 318 je vytvoření mechanismu čtyř plastických kloubů. Plastické klouby vznikají na koncích obou pásů (vetknutí pásů do nosníku).
- STM označený jako metoda A a metoda B jsou příliš náročné na výpočet. Zároveň je nutné posoudit metodou A pro každou kombinaci zatížení zvlášť. Z toho důvodu byl navržen zjednodušený model vycházející z DAFStB 459, který nabízí jednoduché vyztužení oblasti. Vyztužení oblasti kolem otvoru zjednodušenou metodou má za následek větší spotřebu výztuže.
- Metoda A, B a zjednodušený model vycházející z DAFStB 459 nelze použít, pokud je otvor umístěn uprostřed se symetrickým zatížením. Při této úvaze se posuzuje nosník v oblasti otvoru standardně podle B-oblasti.



## 9 Zhodnocení řešerše

- Souhrn aktuálních poznatků k návrhu vyztužení nosníků s otvory neposkytuje informace k problematice zatížení od teploty způsobeným sáláním teplovodních trubek, které mohou být umístěné v přípravných otvorech.
- Diagonální vyztužení slouží primárně pro omezení šířky trhliny v exponovaných místech oblasti kolem otvoru. Vedlejším efektem diagonálního vyztužení, jak naznačují informace z odborné literatury, je snížení rizika předčasného porušení vlivem drcení betonu v oblasti kolem otvoru. Diagonální vyztužení zapříčiní snížení napětí v betonu, protože betonářská výztuž díky své přirozené tuhosti převezme tlakové napětí v betonu. Z toho plyne, že přídatné vyztužení může snížit či oddálit drcení betonu v oblasti otvoru. V literatuře ovšem nelze dohledat bližší informace, do jaké míry může přítomná výztuž snížit napětí v betonu a zda by mělo smysl uvažovat se snížením namáhání betonu při posouzení nosníků.
- Respektováním hlavních toků napětí na nosníku by bylo možné docílit maximalizace rozměrů otvoru v nosníku. Nakloněním smykové výztuže do směru tahových namáhání lze zvětšit oblast „nevyztuženého“ betonu, do které lze následně umístit otvor větších rozměrů. Tento způsob vyžaduje použití smykových kozlíků. Sestrojení STM se skloněnými táhly není v odborné literatuře blíže popsáno. Neexistují žádné ověřené STM a publikované výpočetní postupy k této problematice.
- V literatuře [4, 9] jsou znázorněny vzorové příklady, které nejsou dostatečně ověřeny, pro výpočet průhybu se zavedením velkého otvoru v železobetonovém nosníku. Tyto příklady předpokládají beton za lineárně pružný materiál bez vzniku trhlin a bez vlivu ohybové výztuže. Postup výpočtu lze přirovnat pro nosník z oceli. Je potřeba si uvědomit, že pro výpočet dlouhodobého průhybu železobetonového nosníku vstupuje do výpočtu parametr součinitele dotvarování a je vyloučena ze spolupůsobení tažená část betonového průřezu. Toto ignorování vytváří nižší průhyb než skutečný vypočtený podle standartního výpočtu dle EC2.
- Není v žádné literatuře řečena informace o velikosti šířky trhliny, se kterou se předpokládá ve výpočtu vyztužení oblasti velkého otvoru pomocí vztahy 7.14 a 7.15 (v případě malého otvoru vztah 6.4). Vyztužení oblasti otvoru pro omezení šířky trhliny podle vztahů 7.14 a 7.15 (6.4) lze uplatnit pouze v případě, pokud nejsou stanoveny žádné speciální podmínky na omezení velikosti šířky trhliny. Pokud majitel objektu nechce žádné viditelné trhliny nebo nosník s otvorem je umístěn v agresivním prostředí, kde se musí splnit přísnější kritéria na omezení šířky trhliny, nezbyvá vyztužit nosník s otvorem pomocí sofistikovaného programu.
- Nikde není provedená studie, která se zabývá koncentrací napětí kolem otvoru z hlediska geometrie otvoru. Pouze je řečena informace, že kruhový otvor je z pohledu koncentrace napětí nejpříjemnější. Koncentrace napětí kolem otvoru způsobí rannější vznik trhliny a má vliv na šířku rozevírající trhliny. Při nedostatečném vyztužení může dojít k drcení betonu v oblasti otvoru. Informace o vlivu geometrie otvoru na

koncentraci napětí může sloužit jako vstupní informace pro architekta, který se snaží stavebního inženýra dotlačit k návrhu problematictějšího typu otvoru.

- Pokud se použije návrh výztuže velkého otvoru za pomoci návrhového přístupu ACI 318, vyztuží se pouze horní a dolní pás, popřípadě sloupek mezi otvory. Lze navrhnout svislé a diagonální vyztužení na omezení neznámé velikosti šířky trhliny. V žádné publikaci nebyla uvedena zmínka o návrhu svislé výztuže po stranách otvoru zleva a zprava. Metoda příhradové analogie řeší tento nedostatek ve svých třech modelech. Popsaný zjednodušený model DAfStB 459 v této diplomové práci tuto svislou výztuž označuje  $T_2$ ,  $T_2^*$  a  $T_1$ ,  $T_1^*$  (Obr. 7.8).
- V žádné literatuře nejsou stanoveny přesné doporučení nebo omezení metod, do jaké míry je lze použít.

## 10 Studie vazníku s otvorem

Předmětem studie je železobetonový vazník s otvorem halového objektu, který byl řešen v rámci předchozího předmětu – 133P03C. Pro účely diplomové práce byla nejdříve provedena optimalizace konstrukčního systému, která umožnila zabývat se podrobně chováním vazníku s otvorem. Následně byl zpracován předběžný návrh základních konstrukčních prvků (samostatná příloha – předběžný statický výpočet), který obsahuje výpočet zatížení, předběžné vyztužení a geometrii základních nosných prvků halového objektu. Primární úlohou praktické části diplomové práce ovšem byla studie vazníku s otvorem, která se zabývá porovnáním návrhových přístupů k vyztužení oblasti kolem otvoru a chováním vazníku z hlediska geometrie a pozice otvoru ve vazníku. Vyhodnocení studie se zakládá na rozsáhlém souboru výpočtů, které byly z velké části zpracovány ve vlastním automatizovaném výpočtu zpracovaném v PTC Mathcad. S ohledem na objem zpracovaných dat a z důvodu přehlednosti byly vzorové výpočty zařazeny mezi přílohy diplomové práce A - D. V hlavní části proto budou analyzovány a porovnány pouze konečné výsledky studie.

### 10.1 Základní údaje o průmyslové hale

Kapitola základní údaje o průmyslové hale, kde jsou popsány prvky, je vztažena na konstrukční řešení, které lze vidět na Obr. 10.1 a 10.2.

#### 10.1.1 Obecný popis objektu

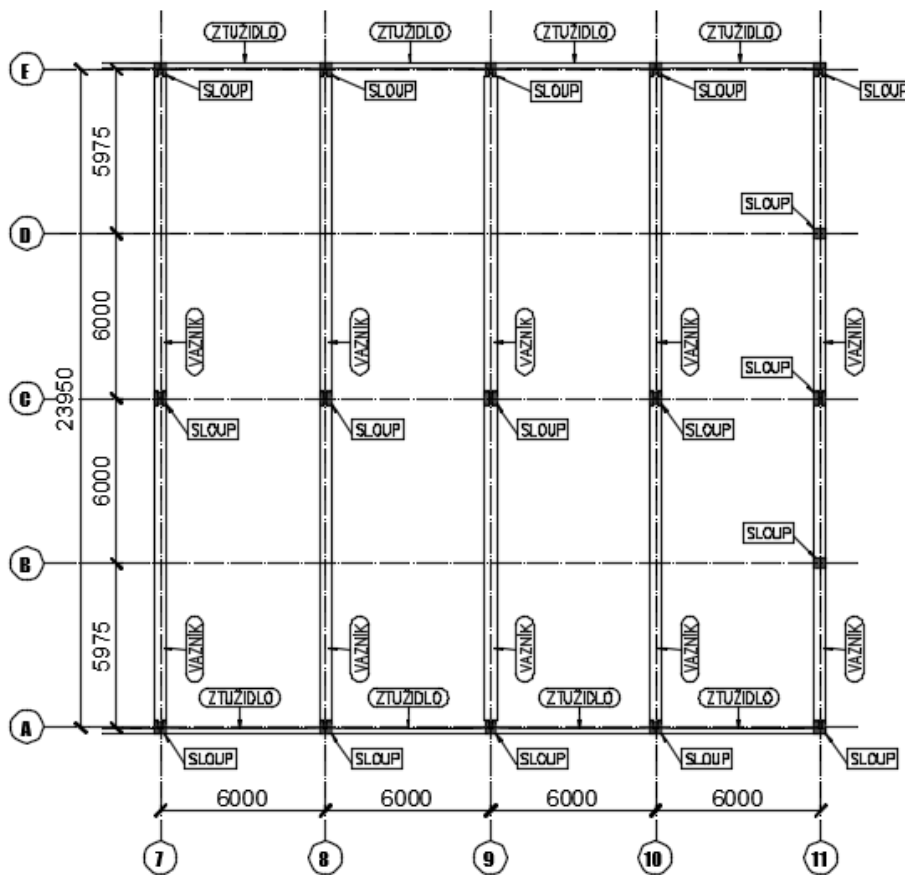
Předmětem praktické části diplomové práce je přístavba průmyslové haly k stávajícímu objektu ve městě Lanškroun. Jedná se o železobetonovou prefabrikovanou konstrukci haly, která bude napojena ke stávajícímu objektu na severní straně. Objekt bude napojen na stávající inženýrské sítě, které jsou vedeny v přilehlé komunikaci.

Jedná se o železobetonovou prefabrikovanou halu o půdorysných rozměrech 60,45 x 24,40 m. Hala je dvoulodní (2 x 12,20 m) se stropní konstrukcí v celém půdorysu. V traktu mezi osy D-H (Obr. 10.2) je situována jeřábová dráha s nosností 16 tun.

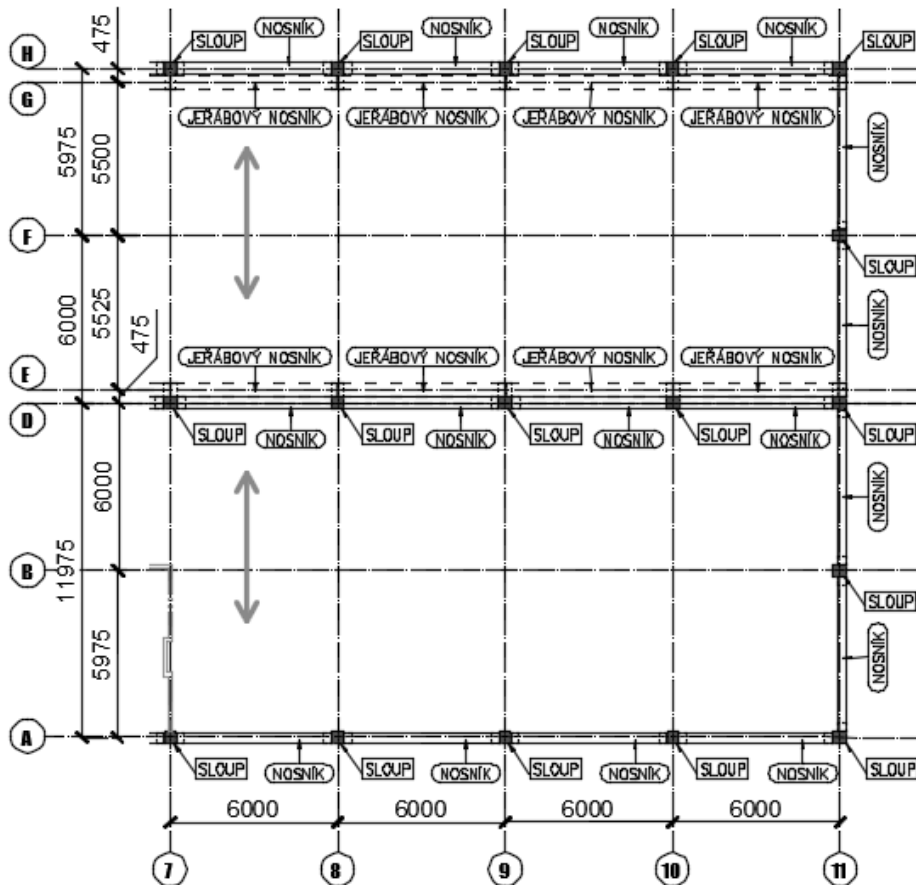
Střešní konstrukce haly (Obr. 10.1) je tvořena vazníky délky 11,950 m, které jsou ukládány do vidlic sloupů ve spádů s vrcholem v ose C. Na vazníky je namontovaný skládaný střešní plášť. Střechu dále doplňují ztužidla v podélném směru. Střecha je plochá se sklonem 3 %. Bude odvodněna do žlabů a dále do svodů.

Stropní konstrukce haly (Obr. 10.2) je tvořena předpjatými dutinovými panely Spiroll tl. 400 mm, které jsou ukládány na nosníky v podélném směru. Ve schodišťovém prostoru jsou navrženy předpjaté dutinové panely Spiroll tl. 200 mm.

Schodiště je řešeno jako železobetonové prefabrikované, tříramenné. Ztužení objektu je zajištěno prefabrikovanými železobetonovými ztužidly a stropní konstrukcí. Stabilita objektu je zajištěna kotvením sloupů do zhlaví pilot. Tvar, velikost a umístění objektu nevyžaduje návrh dilatačních celků. Konstrukce tvoří jeden dilatační celek.



Obr. 10.1 Výšek konstrukčního řešení – střešní konstrukce



Obr. 10.2 Výšek konstrukčního řešení – stropní konstrukce

## 10.1.2 Nosný systém průmyslové haly

### **Základové konstrukce:**

Údaje o geologických poměrech v místě stavby byly převzaty z webových stránek České geologické služby. Svrchní vrstva geologického profilu do hloubky cca 5,5 m je tvořena štěrkokopísky třídy zeminy G3.

ŽB prefabrikované sloupy budou vetknuty do kruhových kalichů o průměru 1,55 m a výšce 1,40 m. Následně uloženy na pilotách o průměru 1,2 m.

Monolitická základová deska tl 250 mm pod výtahovou šachtou má půdorysné rozměry 2600 x 3350 mm. Základová deska má v konstrukci zabudované kotevní prvky. Tyto prvky slouží k upevnění stěnového prefabrikovaného dílce výtahové šachty.

Pod nástupním ramenem schodišťového prvku se nachází monolitický ŽB pás o půdorysných rozměrech 1400 x 575 mm a výšce 300 mm.

Podlahová konstrukce bude provedena z podkladního betonu tloušťky 150 mm (krytí 30 mm) na hutném štěrkokopískovém podsypu tl. 250 mm.

### **Svislé nosné konstrukce:**

Železobetonové prefabrikované sloupy, které tvoří nosný systém sportovní haly, jsou o rozměrech 450/450, 400/400 a 450/400 mm. Všechny navržené sloupy jsou průběžné a u sloupů, na které se umístí vodorovný prvek (průvlaky, ztužidlo nebo vaznice), je připravena krátká konzolka nebo vidlice s osazovacím trnem. Sloupy budou ukládány v podélném směru v rastru po 6 metrech. V příčném směru budou štítové sloupy ukládány v rastru po 6 metrech, ale umístění prvního sloupu od rohového sloupu bude 5,975 m. V příčném směru ve směru hlavní vazby budou sloupy ukládány v rastru 11,975 m. Všechny sloupy jsou vetknuty do kalichů. Zálivka kalichu bude provedena zálivkovou maltou min. třídy C30/37 - XC2 -  $D_{max} = 4 \text{ mm}$ .

Prefabrikovaná výtahová šachta tl. 200 mm složená ze dvou stěnových dílců bude připojena k základové desce pomocí koutového svaru kotevních destiček. Dílce výtahové šachty budou navzájem svařeny taktéž pomocí kotevních destiček. Tento styk v podobě svaření prefabrikovaných dílců k sobě lze uvažovat jako pevný (vetknutý).

### **Vodorovné nosné konstrukce:**

Vazníky mají průřez ve tvaru „T“ s výškou 900 mm, rozpětí vazníku je 11,75 m. Vazníky se ukládají na elastomerová ložiska s vyčnívajícím trnem ze sloupu. Prostup s trnem po osazení prvku zalít zálivkovou maltou min. třídy C20/25. Sloupy jsou proměnné výšky a uložení vazníku je s výškovým rozdílem.

Ztužidla mají obdélníkový tvar 180 x 300 mm. Jsou ukládány v podélném směru na vyčnívající trny ze sloupu přes elastomerové ložisko. Prostup s trnem po osazení prvku zalít zálivkovou maltou min. třídy C20/25.

Okrajové nosníky mají obdélníkový tvar 200 x 500 mm. Jsou ukládány v příčném směru na vyčnívající trny ze sloupu přes elastomerové ložisko. Prostup s trnem po osazení prvku zalít záливkovou maltou min. třídy C20/25.

Panely Spiroll tl. 400 mm jsou ukládány na elastomerová ložiska podél vyčnívajících ozubů z průvleků. Dutiny panelů budou opatřeny krytkami, aby při betonáži nedocházelo k zatékání směsi do dutin. V panelech lze provádět prostupy v místě dutin (maximálně 150 mm). Případné jiné prostupy je nutné konzultovat se statikem.

Vnější podélné průvlastky jsou v ose A a H (Obr. 10.2) o rozměru 450 x 600 mm s horním „křídlem“, které slouží k bednění pro záливku. Vnitřní podélný průvlastek v ose D (Obr. 10.2) je o rozměru 450 x 600 mm. Jeřábový nosník v ose F a G (Obr. 10.2) je o rozměru 480 x 400 mm. Všechny nosníky jsou ukládány na elastomerová ložiska s vyčnívajícím trnem z konzolky ze sloupu. Prostup s trnem po osazení prvku zalít záливkovou maltou min. třídy C20/25.

#### Svislé komunikační prvky:

Hlavní schodiště je prefabrikované železobetonové deskové třiramenné. Jednotlivé desky jsou řešeny jako jednosměrně pnuté. Tloušťky podest a mezipodest jsou 250 mm. Uložení ramen a podest je řešeno přes montážní trny.

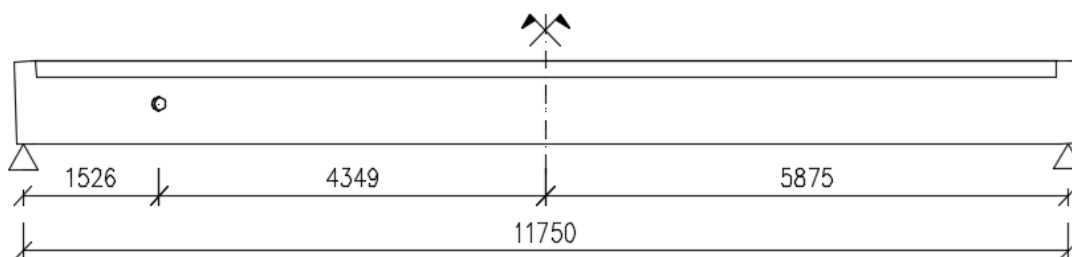
#### Zajištění vodorovného ztužení:

Vodorovné ztužení konstrukce sportovní haly zajišťuje dostatečné vetknutí sloupů v kombinaci se ztužidly a tuhými stropními konstrukcemi.

## 10.2 Výsledky studie vazníku s otvorem

Ve studii vazníku s otvorem bylo zkoumáno následující:

- 1) Vliv polohy malého a velkého otvoru po výšce průřezu v blízkosti podpory (dominantní smykové namáhání) na chování vazníku.
- 2) Vliv polohy malého a velkého otvoru po výšce průřezu v blízkosti středu rozpětí (dominantní ohybové namáhání) na chování vazníku.
- 3) Vliv změny geometrie (průměru) kruhového malého otvoru v blízkosti středu rozpětí a podpory na chování vazníku.
- 4) Vliv změny geometrie obdélníkového (změna výška a délky) velkého otvoru v blízkosti středu rozpětí a podpory na chování vazníku.



Obr. 10.3 Schéma tvaru vazníku s malým otvorem v blízkosti podpory

V rámci diplomové práce se provedla studie návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru podle návrhových přístupů vycházející z ACI 318 a metody příhradové analogie vycházející z DIN 1045-1, která odkazuje na EC2. U velkého otvoru byl aplikován zjednodušený model náhradní příhradoviny podle DAfStB 459. Byla zkoumána geometrie otvoru a změna polohy otvoru po výšce průřezu u podpory (převládá smykové namáhání) a přibližně ve středu rozpětí vazníku (převládá ohybové namáhání). Nejprve se provedl ruční návrh vyztužení za pomoci obou přístupů pro malý a velký otvor ve vazníku. Oba přístupy mají své limity, a proto se při výpočtu bude respektovat doporučení z rešeršní části diplomové práce. Z návrhu výztuže kolem otvoru podle obou přístupů se získá odlišné schéma vyztužení, a proto prvním zkoumaným parametrem bude celková spotřeba výztuže ve vazníku s otvorem. Následně se navržená výztuž ručním výpočtem vloží do programu IDEA StatiCa. Vyhodnotí se vliv otvoru na celkový průhyb vazníku a v oblasti kolem otvoru šířka trhliny, využití pevnosti betonu nebo omezené napětí v betonu a v betonářské výztuži podle příslušné návrhové kombinace při uvážení odlišného vyztužení z ručních výpočtů.

Návrhová metodika ACI 318 odkazuje pro určení velikosti zatížení sněhem a větrem na normu ASCE, která je platná pouze pro Spojené státy americké. Nelze zde najít sněhovou nebo větrnou oblast pro státy Evropské unie. Proto se použije pro oba přístupy stejná velikost zatížení stanovená podle norem [16] a [17]. Kombinace zatížení pro ruční výpočet budou převzaty a dodrženy z příslušných návrhových přístupů ACI 318 a EC (Evropské normy). Velikost krytí výztuže, charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku nebo pevnost betonářské výztuže bude stanovena na základě platných norem EC2. Je to právě z důvodu konzistentní porovnatelnosti obou metodik návrhu výztuže kolem otvoru. Vyztužení vazníku s otvorem se vymodeluje v softwaru StatiCa IDEA. Pro porovnání obou typů vyztužení z odlišných přístupů se použije v programu kombinace zatížení v MSÚ a MSP podle EC.

V příloze A–D je znázorněn vzorový ruční výpočet vyztužení pro vazník s malým a velkým otvorem u podpory (dominantní namáhání posouvající silou). Pro velký otvor není znázorněn v příloze výpočet únosnosti v ohybu a smyku pro běžný plný vazník s otvorem. Tento výpočet je uveden pouze u vazníku s malým otvorem. Umístění otvoru od líce podpory respektuje vzdálenost  $z \cdot \cot \theta$ . Tedy hodnotu vycházející z metody příhradové analogie. Doporučení pro přístup vycházející z ACI 318 je minimálně polovina výšky nosníku. Umístění otvoru od středu vazníku je na vzdálenost  $z \cdot \cot \theta$ .

Při srovnání poměru návrhového ohybového momentu od vnějšího zatížení ku únosnosti průřezu v ohybu pro plný vazník bez otvoru vychází konzervativnější návrhový přístup ACI 318 až o 8 %. Výkres tvaru a výztuže je proveden podle přílohy B a v předběžném statickém výpočtu lze najít výpočet přepravních úchytlů od společnosti HALFEN. Druhý otvor byl umístěn v místě „nevyztuženého“ betonu, který je definován jako oblast nosníku mezi táhly a vzpěrami.

Pro analyzování polohy otvoru po výšce průřezu u podpory (10.2.2) a v blízkosti středu rozpětí vazníku (10.2.3) je nutné zvolit pevnou geometrii otvoru. Volba geometrie musí respektovat kritéria z rešeršní části diplomové práce. Pro malý kruhový otvor byl zvolen průměr 150 mm. Pro velký otvor byl zvolen průřez obdélníkového tvaru s výškou 380 mm a

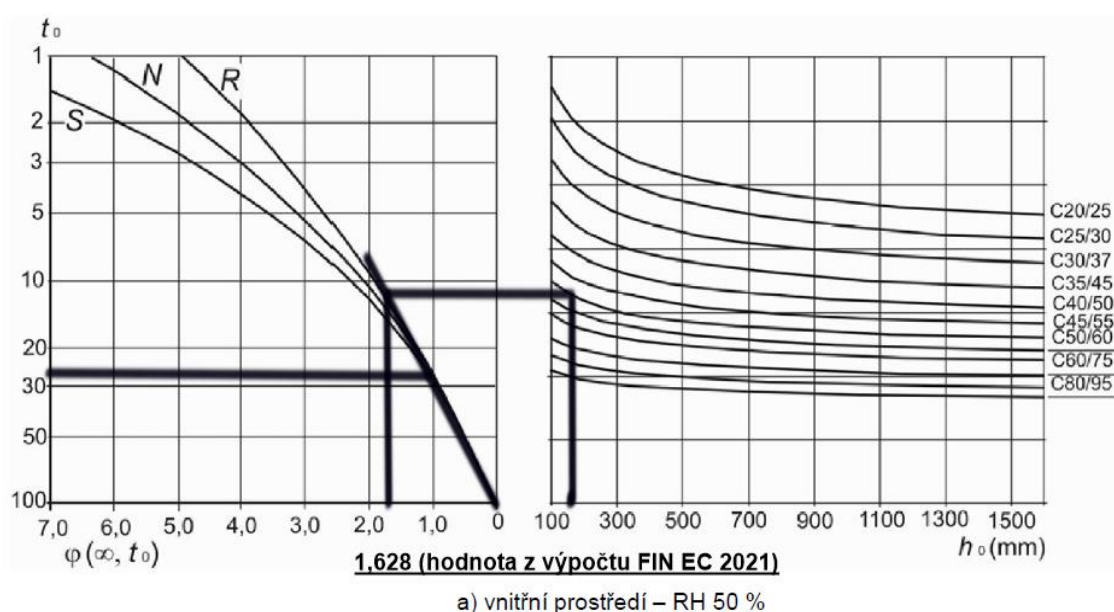
délkou 600 mm. Při volbě délky otvoru se přihlíželo ke kritériím z rešerše, ale podstatně důležitější kritérium je stanovení limitní délky. Níže stanovená limitní délka tlačného pásu při umístění otvoru pod přírubou vychází 850 mm. Hodnota normálové síly byla zvolena konzervativně při umístění otvoru v oblasti středu vazníku. Součinitel vzpěru byl zvolen konzervativně hodnotou jedna.

### OVĚŘENÍ ŠTÍHLosti Tlačného PÁSU NAD OTVOREM

$l =$	0,85	[m]	... délka prvku
$\beta =$	1,00	[-]	... součinitel vzpěru
$h =$	0,175	[-]	... výška průřezu
$b =$	0,450	[-]	... šířka průřezu
$A =$	0,70	[-]	... vliv dotvarování betonu
$B =$	1,10	[-]	... vliv vyztužení
$C =$	0,70	[-]	... vliv koncových ohybových momentů
$N_{Ed} =$	965,98	[kN]	... normálová síla (tlak)
$f_{ck} =$	50,00	[MPa]	... charakteristická válcová pevnost betonu
$\gamma_c =$	1,50	[-]	... součinitel materiálu
$f_{cd} =$	33,33	[MPa]	... návrhová válcová pevnost betonu
$\lambda_{lim, EC2} =$	75,00	[-]	... omezující hodnota z národní přílohy EC2
$\lambda =$	16,83	[-]	... štíhlost prvku
$\lambda_{lim, 1} =$	17,77	[-]	... vypočtená limitní štíhlost
$\lambda_{lim} =$	17,77	[-]	... limitní štíhlost

**Posouzení štíhlosti :** **Masivní tlačný prvek.**

Pro výpočet a stanovení hodnoty průhybu, omezení napětí podle podkapitoly 7.2 [14] a velikosti šířky trhliny je potřeba ve StatiCe IDEE uživatelsky definovat konečnou hodnotu součinitele dotvarování. Tuto hodnotu lze vypočítat nebo stanovit podle grafu na Obr. 10.4 [14]. Výpočtem podle [14] byla vypočtena hodnota dotvarování v programu FIN EC 2021.



Obr. 10.4 Stanovení hodnoty konečného součinitele dotvarování podle ČSN EN 1992-1-1 [14]

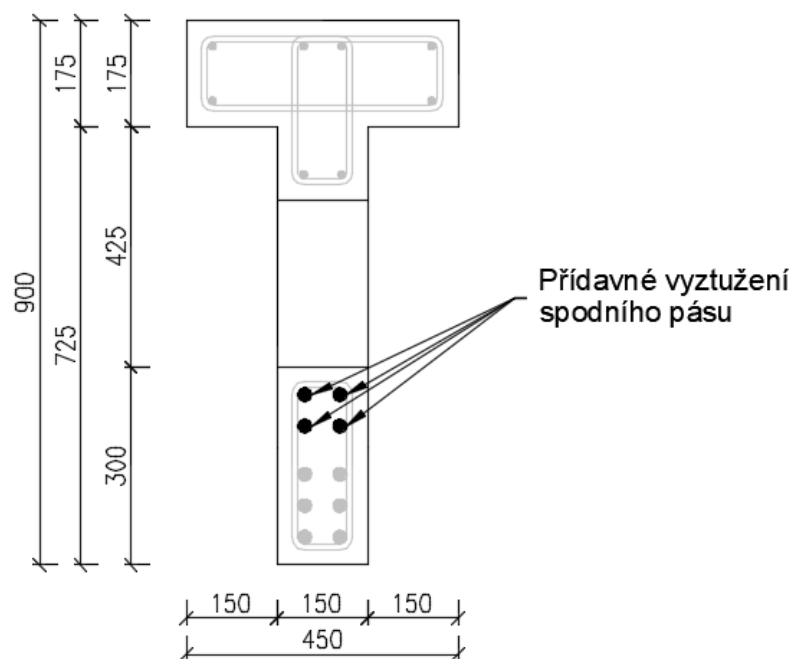


Program StatiCa IDEA neumí zohlednit vnější zatížení v podobě vlastní tíhy prvku. Zatěžovací stav vlastní tíha konstrukce se musí stanovit uživatelsky v prostředí StatiCa IDEA. V níže provedených výpočtech nebylo uvažováno s nižší hodnotou vlastní tíhy prvku vlivem zabudování otvoru.

### 10.2.1 Meze pro umístění otvoru

Pro studii vazníku s otvorem se nejdříve určily meze pro umístění otvoru v blízkosti podpory a po výšce průřezu, které vycházejí ze zásad obou uplatněných výpočetních přístupů.

Poloha otvoru byla zvolena na základě způsobu vyztužení vycházejícího z výpočetních přístupů. Metoda příhradové analogie podle EC2 navrhuje vyztužení oblasti kolem otvoru na větší vzdálenost směrem k podporám. Je potřeba dodržet konstrukční zásady a geometrii rozmístění výztuže podle návrhového přístupu. Svislá výztuž se při umístění za líc podpory stává neefektivní. Při umístění malého otvoru v blízkosti horní příruby dosahuje úhel sklonu tlačené diagonály nízkých hodnot a tím se zvyšuje vzdálenost táhla (oblast vyztužení) od otvoru. Pro velký otvor podle EC2 je v každé poloze v řezu stejná vzdálenost vyztužení kolem otvoru. Při umístění otvoru blíže k přírubě se zvětšuje vzdálenost vyztužení směrem k podpoře a klesá úměrně vzdálenost vyztužení oblasti směrem ke středu vazníku.



Obr. 10.5 Schéma průřezu s velkým otvorem s přidavným vyztužením spodního pásu

Při analyzování polohy otvoru v řezu vazníku byla dodržena omezení, které vyplývají z podstaty působení a pravidel metody příhradové analogie. Návrhový přístup vycházející z ACI 318 neklade pro umístění malého a velkého otvoru v řezu speciální omezení. Pouze horní hrana otvoru musí nebo je to určitá mez, na kterou se může jít. Pro omezení dolní polohy otvoru se přihlíželo k velikosti šířky táhla spodní ohybové výztuže. Spodní výztuž se navrhne standartně na ohybové namáhání plného nosníku. Velikost šířky spodního táhla je 186 mm. Tedy, od dolní hrany vazníku po vzdálenost 186 mm nelze umístit otvor. Od vzdálenosti 186 mm (od dolní hrany) po výšku stojiny 725 mm lze sledovat polohu otvoru v řezu. Této

skutečnosti bylo využito při aplikování malého otvoru (podle EC2 a ACI 318) a velkého otvoru podle návrhového přístupu vycházející z ACI 318. Při sledování polohy velkého otvoru v řezu podle návrhového přístupu z EC2 se přihlíželo k přídatnému vyztužení podélné polohky výztuže pod otvorem (Obr. 10.5). Na základě analyzování návrhu spodní výztuže pod otvorem bylo stanovena velikost spodního pásu na hodnotu 300 mm. Tedy, pro velký otvor podle EC2 se bude analyzovat poloha otvoru v řezu od dolní hrany vazníku na vzdálenost 300 mm po výšku stojiny 725 mm.

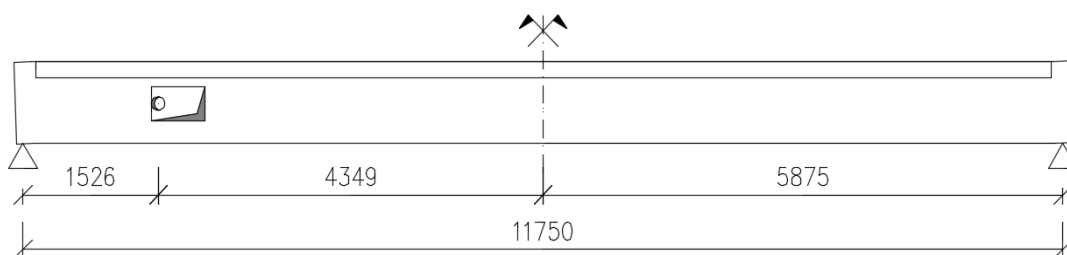
Výpočet pro kapitoly 10.2.2 a 10.2.3 se prováděl tak, že se opakoval výpočet vazníku s malým otvorem, u kterého se měnila pozice otvoru po výšce průřezu, zhruba po 50 mm krocích. Výpočet pro velký otvor se opakoval po 20 mm krocích.

### 10.2.2 Umístění otvoru v blízkosti podpory

Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s malým a velkým otvorem umístěným v blízkosti podpory při uvážení různé polohy otvoru po výšce průřezu. S ohledem na umístění otvoru lze konstatovat, že oblast s otvorem je vystavena především smykovému namáhání.

Na Obr. 10.6 je znázorněno statické schéma a analyticky vyjádřena poloha otvoru na vazníku podle prvotních odhadů vyztužení oblasti. Níže jsou shrnuty poznatky při analyzování otvoru v řezu průřezu. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat ze StatiCa IDEY.

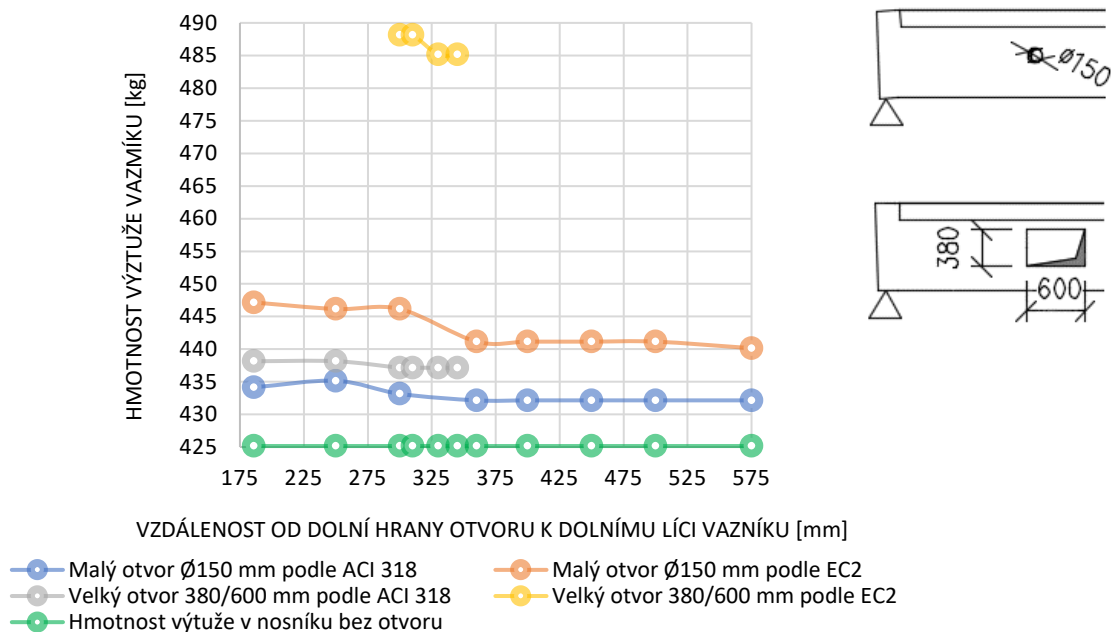
Při analyzování velkého otvoru pomocí ACI 318 bylo zjištěno, že je potřeba provést analýzu ztráty stability horního pásu při umístění otvoru u dolní hrany příruby. Při umístění otvoru o 20 mm níže, směrem k dolnímu líci podpory, není potřeba provádět podrobnou analýzu horního pásu.



Obr. 10.6 Poloha velkého a malého otvoru na vazníku v blízkosti podpory

#### Spotřeba výztuže:

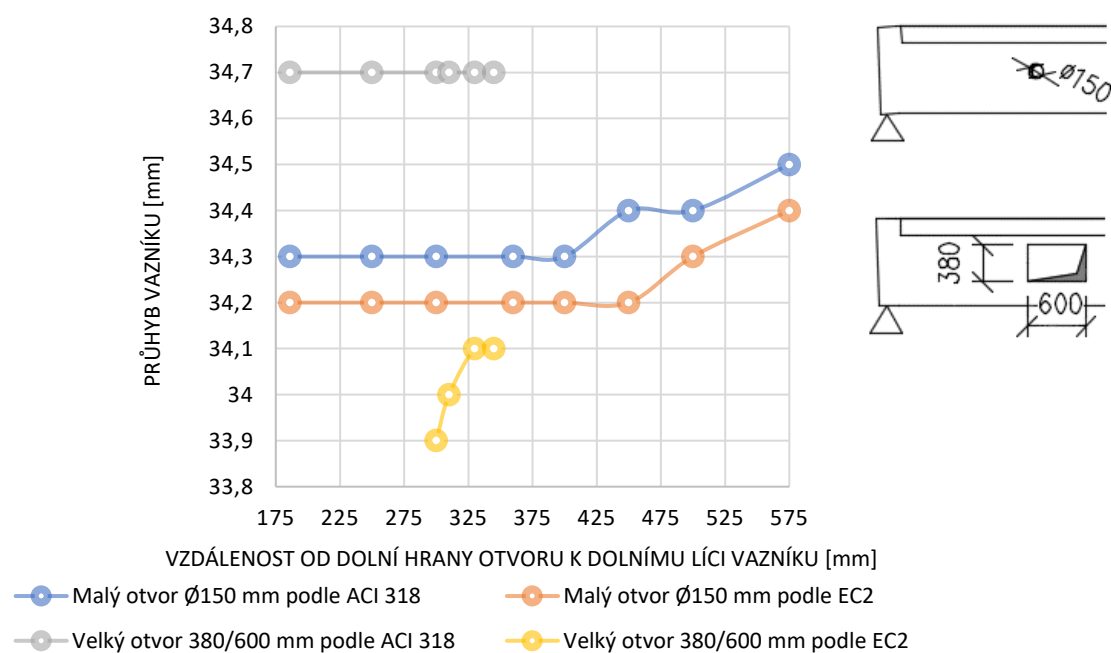
Z Obr. 10.7 je patrné, že metoda příhradové analogie podle EC2 stanovuje větší množství navržené výztuže než přístup vycházející z ACI 318. Pokud je potřeba umístit otvor ve vazníku v blízkosti podpory, je ekonomicky výhodnější umístit otvor co nejbližší k dolní hraně příruby. Pokud se navrhne malý otvor podle návrhového přístupu z EC2, vzroste spotřeba výztuže cca o 13 kg než při vyztužení malého otvoru podle ACI 318. Při porovnání vyztužení velkého otvoru podle obou návrhových přístupů lze zjistit, že vyztužení oblasti kolem otvoru podle návrhového přístupu vycházejícího z ACI 318 se sníží spotřeba výztuže až o 51 kg.



Obr. 10.7 Grafické znázornění celkové spotřeby výztuže na vazník s otvorem

### Průhyb:

Průhyb vazníku bez otvoru, při standartním vyztužení pro vazník bez otvoru, je 34,3 mm. Pokud otvor se umístí u podpory, způsobí přírůstek průhybu uprostřed vazníku. Při pohled na Obr. 10.8 je patrná skutečnost, že návrhové přístupy podle EC2 snížily průhyb o řád desetin milimetru při umístění otvoru blíže k dolní ohybové výztuži. Lze si všimnout, že návrh výztuže velkého otvoru podle EC2 dokonce snížil průhyb vazníku o 0,5 mm při umístění otvoru k ohybové výztuži. V konečném výsledku lze konstatovat, že se nejedná o značné změny a výsledky jsou téměř totožné bez ohledu na umístění otvoru po výšce průřezu.

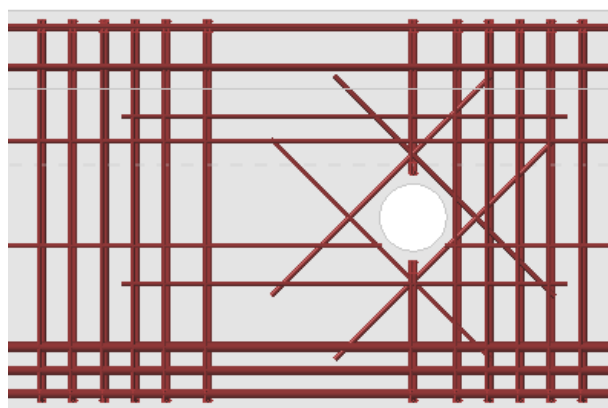


Obr. 10.8 Grafické znázornění průhybu vazníku s otvorem v polovině rozponu

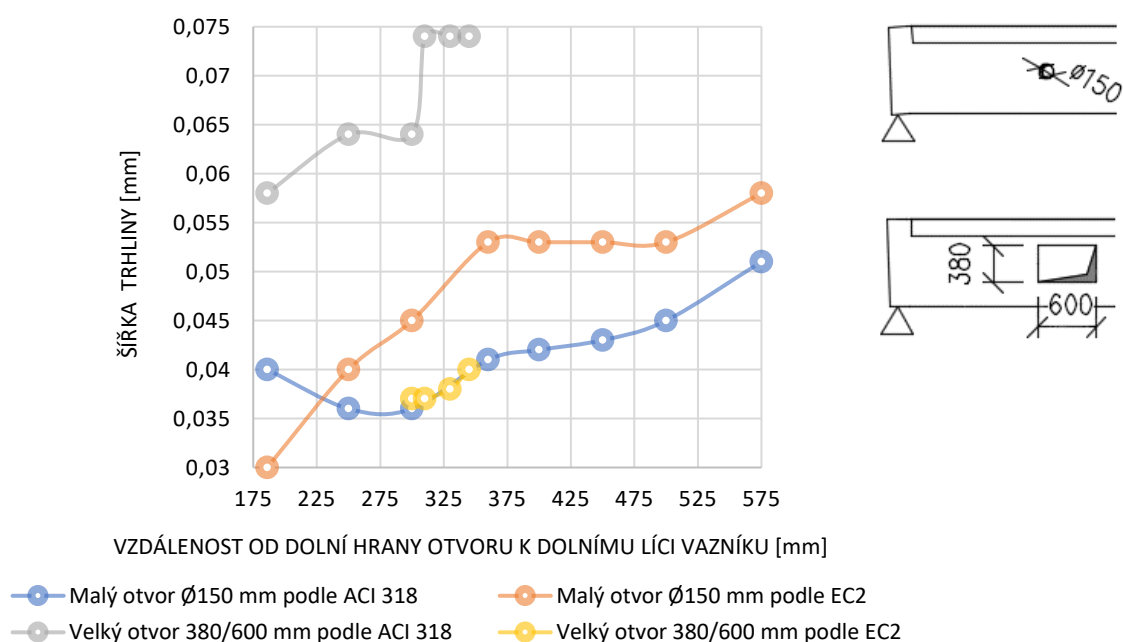
## Šířka trhliny:

U každého typu návrhového přístupu byla navržena diagonální výztuž  $4 \times 2\text{Ø}12$  mm. Šířka trhliny byla spočtena v blízkosti navržené betonářské výztuže. Při pohledu na Obr. 10.10 je patrné, že velikost šířky trhliny nezávisí pouze na stanovení diagonální výztuže. Je velice podstatná celá oblast vyztužení kolem otvoru. Při návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru vychází nejlépe malý otvor podle ACI 318 a velký otvor podle EC2. Je to právě díky principu vyztužení oblasti kolem otvoru. Například při návrhu výztuže pro malý otvor podle EC2 (Obr. 10.9) je jedna strana otvoru dostatečně vyztužena svislým táhlem, a naopak na druhé straně otvoru chybí svislá výztuž a prochází nad otvorem tlačena vzpěra, která způsobí rozvoj trhlín kolem otvoru.

ČSN EN 1992-1-1 omezuje velikost šířky trhliny v závislosti na agresivitě prostředí, typu železobetonové konstrukce a požadavcích investora. V případě průmyslové haly se jedná o agresivitu prostředí XC1 a obvykle vyztuženou železobetonovou konstrukci. Tedy, maximální přípustná velikost šířky trhliny je 0,4 mm [14].



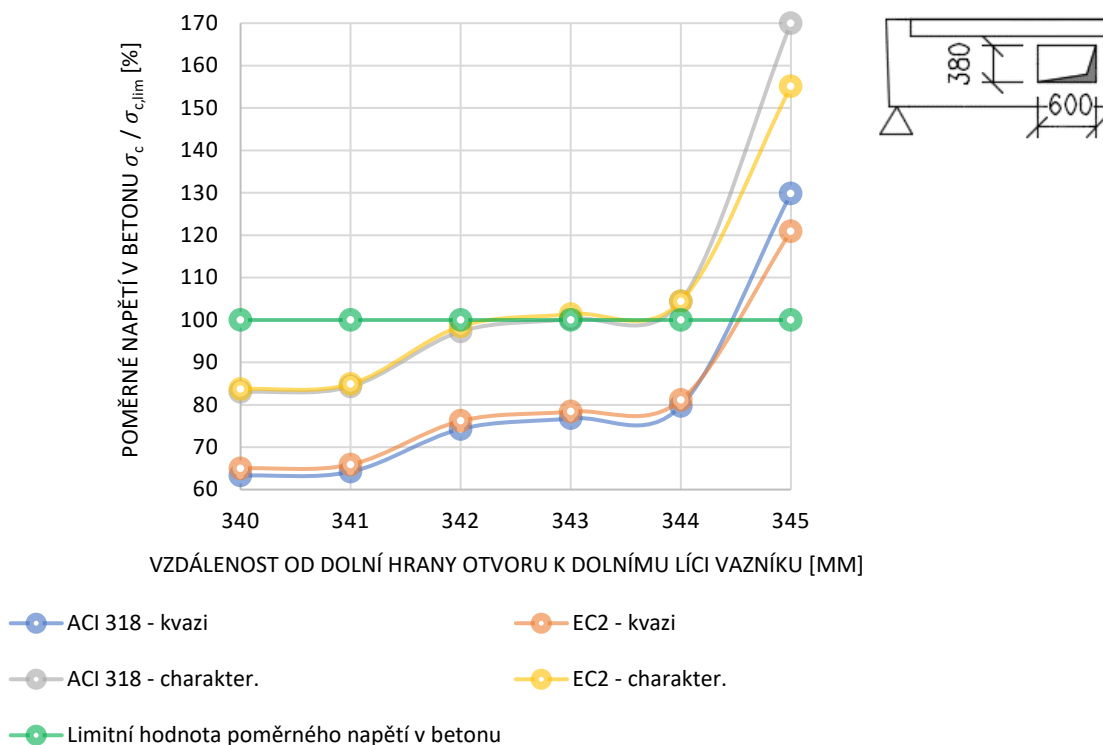
Obr. 10.9 Schéma vyztužení malého otvoru podle EC2



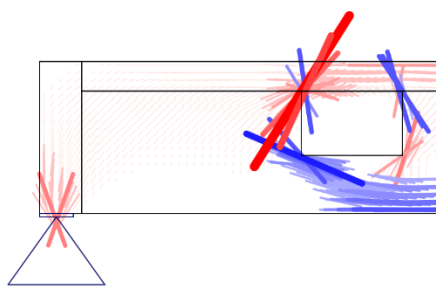
Obr. 10.10 Grafické znázornění velikosti šířky trhliny u otvoru

## Omezení napětí v betonu a v betonářské výztuži (MSP):

Jedná se o kontrolu dovoleného napětí v betonu a v betonářské výztuži podle normy ČSN EN 1992-1-1 podkapitola 7.2. Do softwaru StatiCa IDEA byly vloženy koeficienty, které lze dohledat v národní příloze. Pokud je umístěn velký otvor těsně pod přírubou, je rozhodujícím kritériem právě MSP – omezení napětí. Při pohled na Obr. 10.11 lze zjistit, že odsazení velkého otvoru od dolní hrany příruby způsobí razantní pokles napětí v betonu. Například odsazení otvoru o 5 mm způsobí při kvazi-stálé kombinaci pokles napětí kolem otvoru až o 60 % a pro charakteristickou kombinaci zatížení až o 70 %. Vysoké hodnoty napětí jsou dány díky skutečnosti, že velký otvor narušil ustálený tok napětí (Obr. 10.12).



Obr. 10.11 Grafické znázornění posudku omezeného napětí v betonu v oblasti velkého otvoru



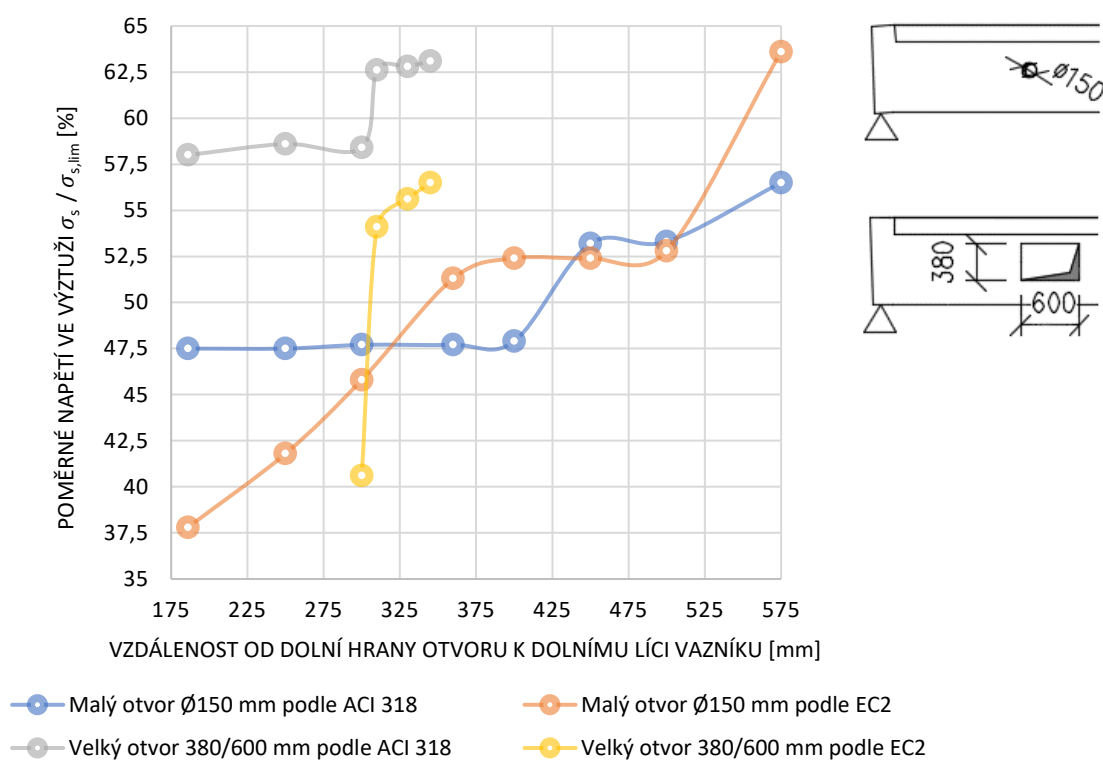
Obr. 10.12 Tok napětí v oblasti kolem velkého otvoru

Pokud je překročeno dovolené napětí při charakteristické kombinaci zatížení může dojít ke vzniku podélných trhlin. Koeficient  $k_1$  se použije pro přísnější omezení napětí u konstrukcí v agresivním prostředí XD, XF a XS [14]. Řešený vazník s otvorem se nachází v agresivitě

prostředí XC1. Pro účely diplomové práce bylo použito snížení dovoleného napětí koeficientem  $k_1$  z důvodu analyzování změny napjatosti v betonu při změně polohy v řezu.

Při překročení hodnoty limitního napětí v betonu u kvazi-stálé kombinace zatížení dochází k nelineárnímu dotvarování. StatiCa IDEA v modulu detail nelze řešit konstrukci při nelineárním dotvarování. Pro tyto případy je dobré provést analýzu konstrukce na účinky nelineárního dotvarování například v programu ATENA nebo ANSYS. S ohledem na omezené množství času v rámci diplomové práce nebyla tato část řešena.

Pokud se umístí otvor blíže k dolní hraně příruby, tak stoupá procento využití betonářské výztuže. Nejvýraznější využití betonářské výztuže je při návrhovém přístupu EC2 pro malý otvor. V tomto případě je rozptyl využití betonářské výztuže o cca 25 % v závislosti na poloze otvoru v řezu.



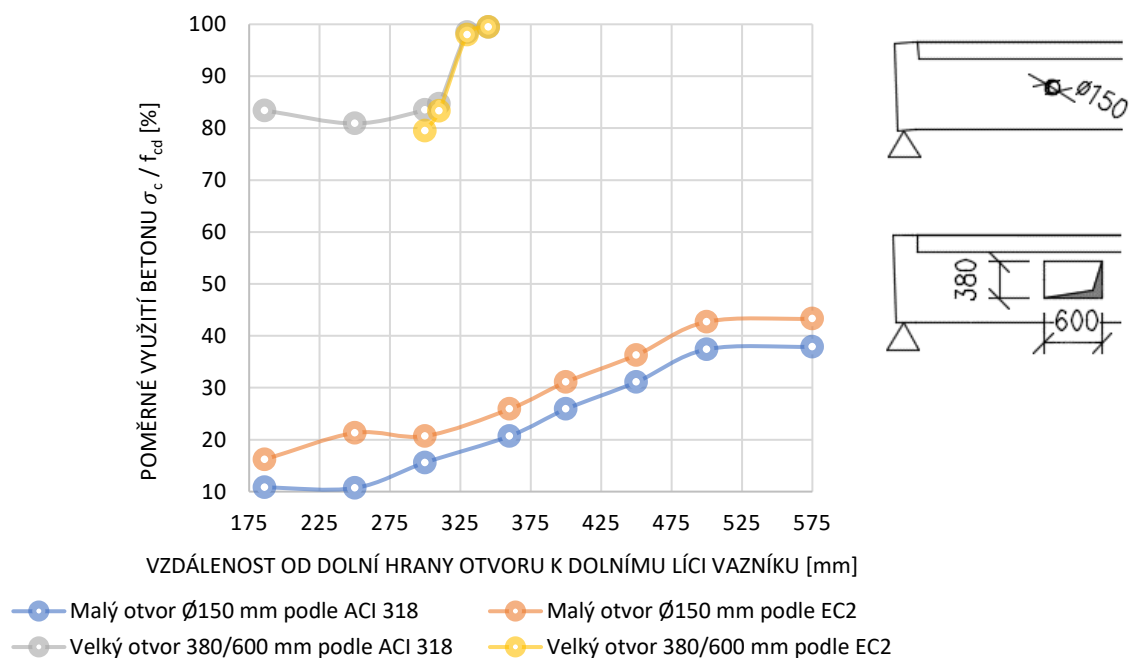
Obr. 10.13 Grafické znázornění posudku omezeného napětí ve výztuži v oblasti otvoru

### Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru v MSÚ:

Při zabudování velkého otvoru ve vazníku je narušen tok vnitřních sil. Jak ukazuje Obr. 10.14, míra koncentrace napětí závisí na poloze otvoru po výšce průřezu.

Pokud se velký otvor umístí blíže k dolnímu líci příruby, stoupne napětí v betonu až o 20 %.

Vyztužení malého otvoru pomocí návrhového přístupu EC2 zvyšuje napjatost kolem otvoru o více jak 5 % než vyztužení podle návrhového přístupu vycházejícího z ACI 318.



Obr. 10.14 Grafické znázornění posudku využití betonu v oblasti kolem otvoru

### 10.2.2.1 Shrnutí poznatků o umístění otvoru v blízkosti podpory

V této kapitole budou analyzovány všechny sledující parametry. Pro lepší přehlednost byla sestrojena tabulka se šipkami (Tab. 10.1), přičemž šipka dolů znamená pokles sledované veličiny a šipka nahoru nárůst sledované veličiny. Tabulka je platná pro velký a malý otvor dohromady, pokud není uvedeno jinak.

	Poloha otvoru k dolní hraně vazníku	Poloha otvoru k dolní hraně příruby
Spotřeba výztuže	↑	↓
Průhyb	↓	↑
Velikost šířky trhliny	↓	↑
Napětí v oblasti otvoru	↓	↑

Tab. 10.1 Ovlivnění sledovaných parametrů v závislosti na poloze otvoru v řezu

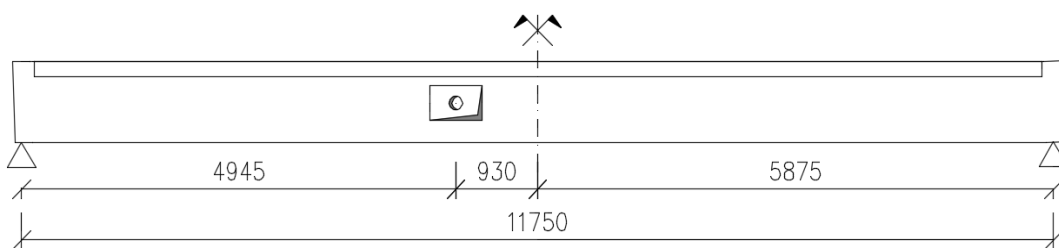
Z Tab. 10.1 vyplývá zajímavý poznatek o umístění malého a velkého otvoru po výšce průřezu. Pokud není kladen požadavek na přesnou polohu otvoru v nosníku (rozvody TZB nebo přání architekta), je staticky výhodné umístit otvor co nejblíže k dolní hraně vazníku. Ovšem je dobré mít na paměti, že tímto způsobem dochází k nepatrnému navýšení spotřeby výztuže.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že umístění velkého otvoru v blízkosti příruby přináší pro stavebního inženýra komplikace. Vysoká pozornost se musí věnovat napětí betonu při MSP a zároveň délce otvoru, protože při nedodržení limitní délky otvoru je potřeba vyšetřit ztrátu stability tlačeného pásu. Kritérium limitní délky podle návrhového přístupu ACI 318 závisí na velikosti momentu na hraně vetknutých pásu do vazníku. Při umístění otvoru blíže k podporám vznikají nepříznivé hodnoty ohybových momentů na tlačeném páse a tím je značně omezena velikost délky otvoru.

### 10.2.3 Umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí

Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s malým a velkým otvorem umístěným v blízkosti středu rozpětí vazníku při uvážení různé polohy otvoru po výšce průřezu. S ohledem na umístění otvoru lze konstatovat, že oblast s otvorem je vystavena především ohybovému namáhání.

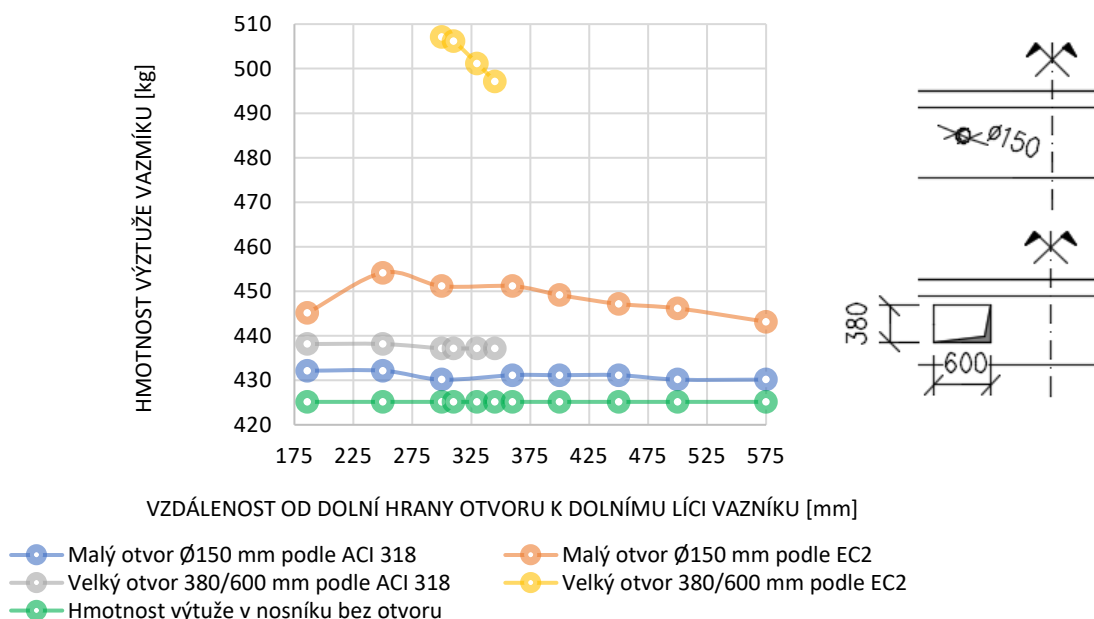
Na Obr. 10.15 je znázorněno statické schéma a analyticky vyjádřena poloha otvoru na vazníku. Níže jsou shrnuty poznatky při analyzování otvoru v řezu průřezu. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat ze softwaru StatiCa IDEA.



Obr. 10.15 Poloha velkého a malého otvoru na vazníku v blízkosti středu

#### Spotřeba výztuže:

Spotřeba výztuže při umístění otvoru blíže ke středu vazníku vychází obdobně jako při umístění otvoru u podpory. V kapitole 10.2.4 je analyzován malý otvor, který je navržený podle metody příhradové analogie. Lze jistit, že ručně vypočtená výztuž podle EC2 nevyhovuje v dolním pásu. Je to právě z důvodu malé výšky spodního pásu a s tím souvisejícím nedostatečným vyztužením. Je nutné brát hodnoty spotřeby výztuže podle ručního výpočtu 186 mm a 250 mm s rezervou na Obr. 10.16. I přes nevyhovující závěry z ručního výpočtu, byly splněny všechna kritéria únosnosti a použitelnosti podle posudku ze softwaru StatiCa IDEA.



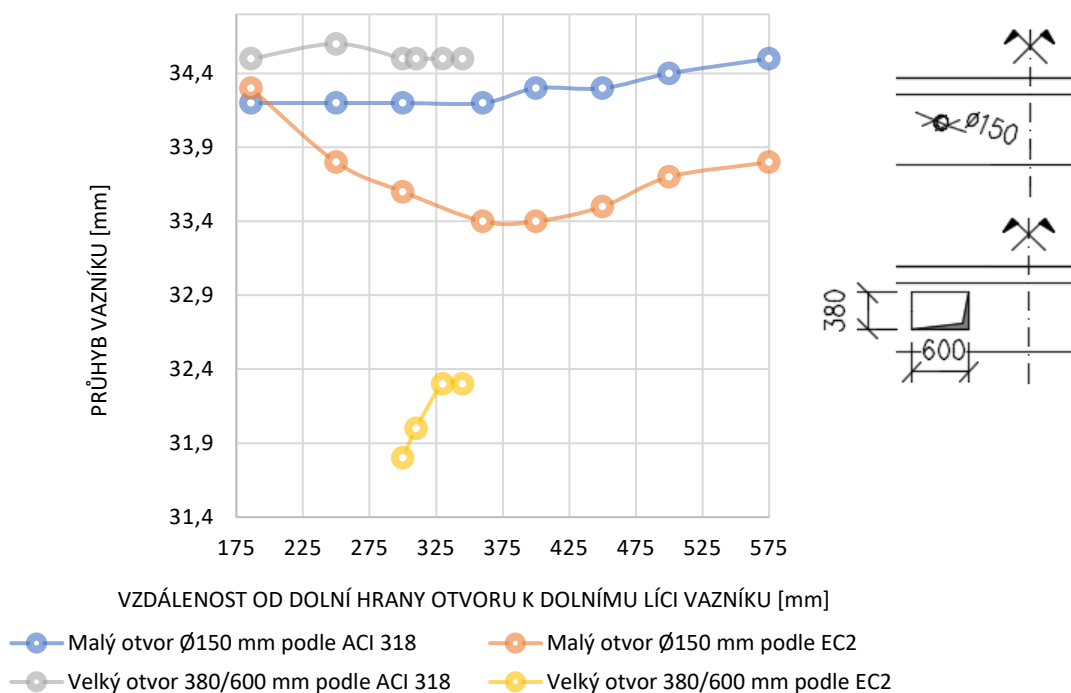
Obr. 10.16 Grafické znázornění celkové spotřeby výztuže na vazník s otvorem



## Průhyb:

Průhyb vazníku bez otvoru, při standartním vyztužení dle přílohy A–B (plný nosník), je 34,3 mm. Srovnatelnou hodnotu průhybu vazníku bez otvoru splňují otvory vyztužené podle EC2. Vyztužení oblasti kolem velkého otvoru podle návrhového přístupu EC2 snižuje původní průhyb 34,3 mm na 31,8 – 32,3 mm. Ke snížení průhybu dochází vlivem zvýšeného vyztužení oblasti kolem otvoru. Takto vyztužená oblast kolem otvoru zvyšuje tuhost a tedy, dochází ke snížení průhybu.

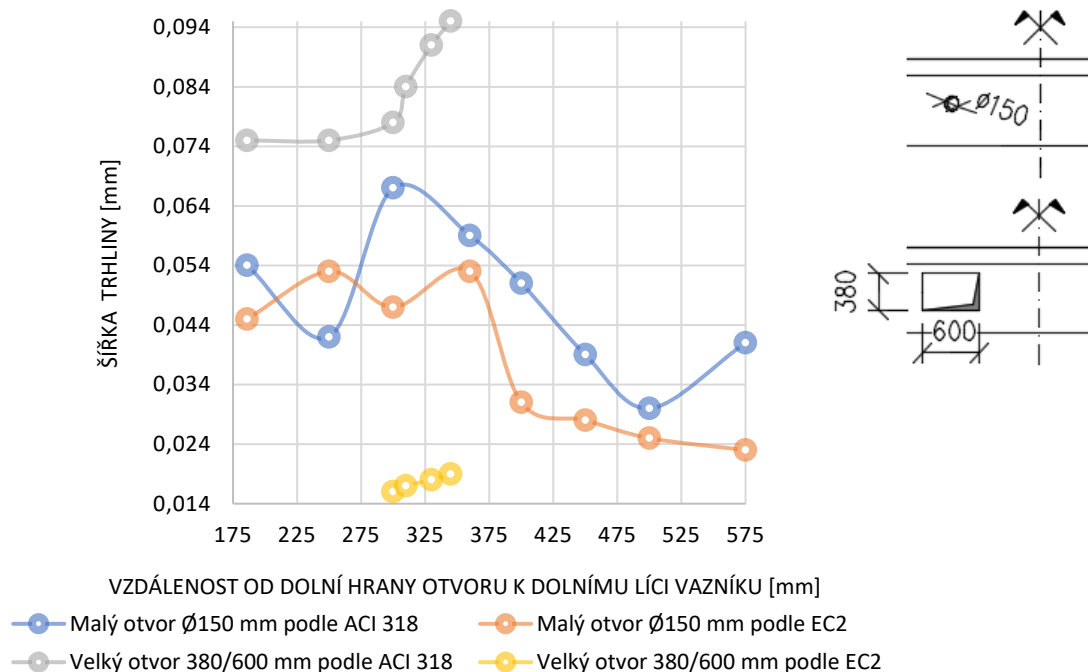
Pro vazník s malým otvorem dle EC2 pro vzdálenosti 186 mm a 250 mm od dolního okraje vazníku nevycházejí v ručním výpočtu požadavky na mezní stavy únosnosti. Při akceptovatelnosti vyztužení oblasti kolem otvoru z ručního výpočtu v těchto bodech lze zjistit, že navržená výztuž v software StatiCa IDEA vyhověla na požadavky únosnosti a na průhyb. Průhyb se změnil v těchto vyšetřovaných vzdálenostech neznatelně. V rámci grafu a znalosti vyztužení kolem otvoru dle EC2 při různých úrovních odsazení otvoru od dolní hrany vazníku lze konstatovat, že přídavná spodní výztuž snižuje průhyb až o 1 mm.



Obr. 10.17 Grafické znázornění průhybu vazníku s otvorem v polovině rozponu

## Šířka trhliny:

U každého typu návrhového přístupu byla navržena diagonální výztuž  $4 \times 2 \varnothing 12$  mm. Šířka trhliny byla spočtena v blízkosti navržené betonářské výztuže. Při pohledu na Obr. 10.18 je patrné, že návrhové přístupy podle EC2 značně omezují velikost šířky trhliny. Při umístění otvoru blíže k dolní hraně příruby snižuje velikost šířky trhliny v oblasti kolem otvoru. Ke snížení velikosti šířky trhliny dochází vlivem poklesu napětí v betonu a v betonářské výztuži v oblasti kolem otvoru.



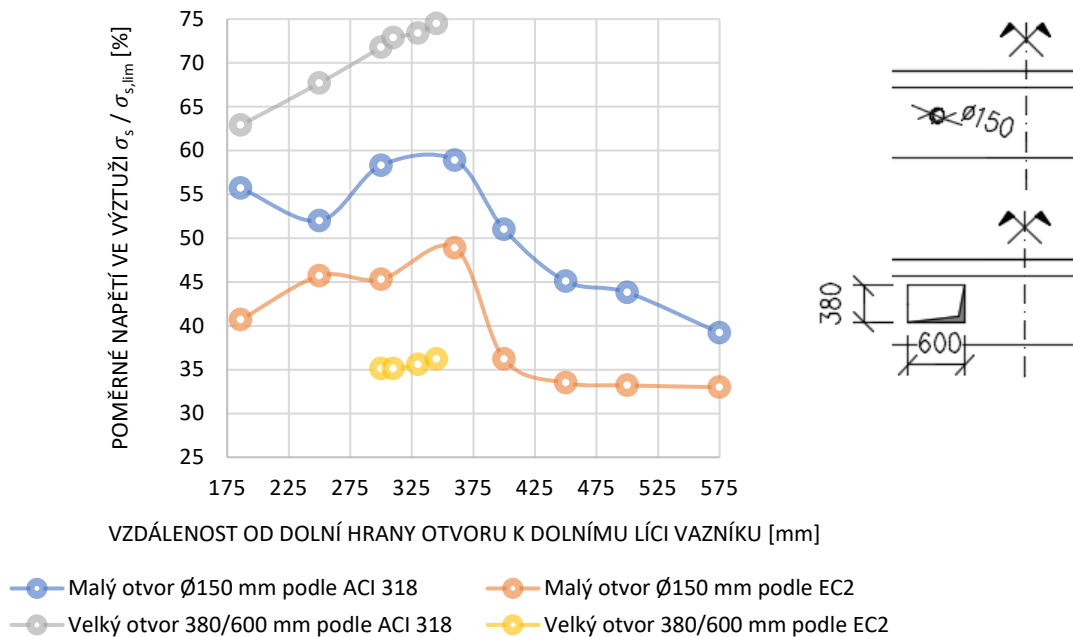
Obr. 10.18 Grafické znázornění velikosti šířky trhliny u otvoru

### Omezení napětí v betonu a v betonářské výztuži (MSP):

Jedná se o kontrolu dovoleného napětí v betonu a v betonářské výztuže podle normy ČSN EN 1992-1-1 podkapitola 7.2. Do softwaru StatiCa IDEA byly vloženy koeficienty, které lze dohledat v národní příloze.

Při zpracování dat a vyhodnocení v grafu se zjistilo, že hodnoty omezení napětí v betonu pro kvazi-stálou kombinaci vychází mezi 37–45 % využití. Pro charakteristickou kombinaci vychází omezené napětí v betonu v rozptylu 47–55 % využití. Lze konstatovat, že posouzení omezení napětí v betonu je téměř stejné bez ohledu na polohu otvoru po výšce průřezu.

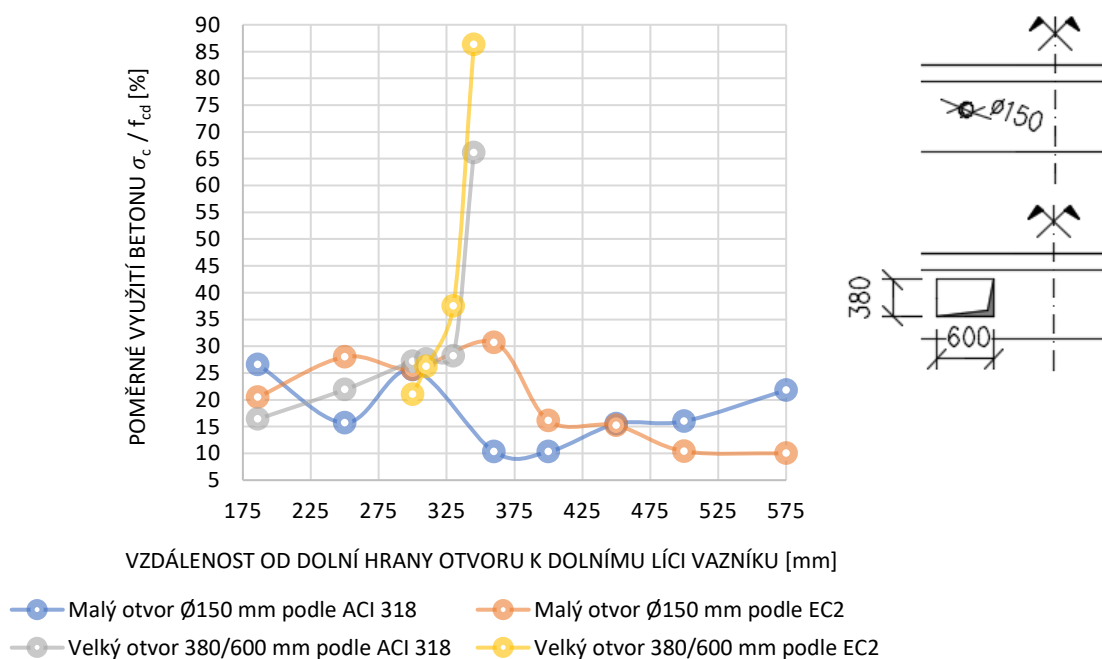
Pokud se umístí malý otvor blíže k dolní hraně příruby, tak klesá procento využití betonářské výztuže. Jedná-li se o polohu velkého otvoru u dolní hrany příruby, tak návrhový přístup vycházející podle ACI 318 lépe využívá navrženou výztuž. Z průběhu křivky popisující malý otvor 150 mm podle EC2 (Obr. 10.19) lze vyčíst, že napjatost výztuže dosahuje nejvyšších hodnot v okamžiku, kdy se otvor nachází ve střední části výšky průřezu.



Obr. 10.19 Grafické znázornění posudku omezeného napětí ve výztuži v oblasti otvoru

### Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru v MSÚ:

Při zabudování otvoru ve vazníku je narušen tok vnitřních sil. Jak ukazuje Obr. 10.20, míra koncentrace napětí závisí pouze na poloze velkého otvoru v řezu. Pokud se velký otvor umístí blíže k dolnímu líci příruby, stoupne napětí v betonu při vyztužení z EC2 až o 70 % a vyztužení z ACI 318 až o 50 %. Podle Obr. 10.16 pro napjatost kolem malého otvoru pro oba přístupy lze konstatovat, že největší koncentrace napětí vzniká při umístění otvoru blíže k vymezeným okrajům průřezu.



Obr. 10.20 Grafické znázornění posudku využití betonu v oblasti kolem otvoru

### 10.2.3.1 Shrnutí poznatků o umístění otvoru v blízkosti středu

V tomto oddíle budou analyzovány všechny sledující parametry. Pro lepší přehlednost byla sestrojena tabulka se šipkami (Tab. 10.2), přičemž šipka dolů znamená pokles sledované veličiny a šipka nahoru nárůst sledované veličiny. Tabulka je platná pro velký a malý otvor dohromady, pokud není uvedeno jinak.

	Poloha otvoru k dolní hraně vazníku	Poloha otvoru uprostřed stojiny vazníku	Poloha otvoru k dolní hraně příruby
Spotřeba výztuže dle ACI 318	Přibližně stejný naměřený průhyb		
Spotřeba výztuže dle EC2 (malý otvor)	↑	↓	↓↓
Spotřeba výztuže dle EC2 (velký otvor)	↓	↓	↓↓
Průhyb	↑	↑	↑↑
Průhyb pro malý otvor dle EC2	↓	↓↓	↑
Velikost šířky trhliny (malý otvor)	↑	↓	↓↓
Velikost šířky trhliny (velký otvor)	↑	↑	↑↑
Napětí v oblasti otvoru (malý otvor)	↑	↓	↑
Napětí v oblasti otvoru (velký otvor)	↑	↑	↑↑

Tab. 10.2 Ovlivnění sledovaných parametrů v závislosti na poloze otvoru v řezu

Z Tab. 10.2 vyplývá obdobný poznatek vycházející z Tab. 10.1. Staticky výhodné je umístit otvor co nejbližší k dolní hraně vazníku. Oproti smykovému namáhání není potřeba při výrazném ohybovém namáhání se ohlížet kritériem limitní délky podle ACI 318. Při umístění otvoru na dolní hraně příruby není potřeba řešit ztrátu stability tlačeného pasu ani hlídat velikost napětí betonu kolem otvoru.

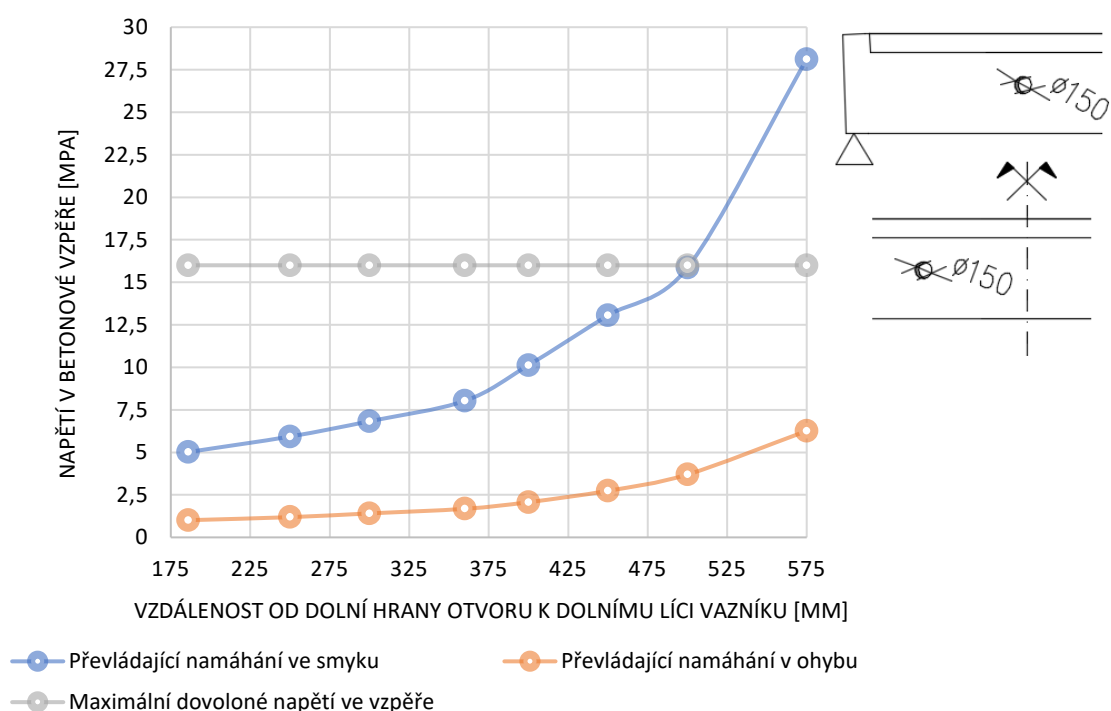
### 10.2.4 Analýza malého otvoru podle EC2

Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s malým otvorem podle EC2 umístěným v blízkosti podpory a středu rozpětí vazníku při uvážení různé polohy otvoru po výšce průřezu. Výpočet se prováděl tak, že se opakoval ruční výpočet vazníku s otvorem, u kterého se měnila pozice otvoru po výšce průřezu, konkrétně po 50 mm krocích. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat z ručního automatizovaného výpočtu malého otvoru dle EC2.

Při analyzování malého otvoru pomocí metody náhradní příhradoviny (vztahy podle EC2) bylo zjištěno, že není dodrženo kritérium dovoleného napětí (vztah z rešeršní části 6.13)

v betonové vzpěře. ČSN EN 1992-1-1 tento vztah doporučuje, ale nepřikazuje. Software StatiCa IDEA umí přesněji charakterizovat chování betonu při zatížení. Díky této skutečnosti byl zabudován do softwaru diagram, který odečítá koeficient faktoru trhlin  $k_{c2}$  v závislosti na přetvoření betonu. Při zohlednění křehkosti betonu v podobě redukčního součinitele (více v publikaci fib Model Code 2010 nebo v programu StatiCa IDEA) lze vyčíslit hodnotu dovoleného napětí v betonové vzpěře.

Betonová vzpěra v softwaru StatiCa IDEA vyhověla s využitím okolo 38 %. Je to právě díky nižší deformaci betonu v betonové vzpěře ( $k_{c2} = 1$ ) a nižšího napětí od vnějšího zatížení v betonové vzpěře. Na Obr. 10.21 lze vyčíslit, že využití betonové vzpěry je okolo 175 %.



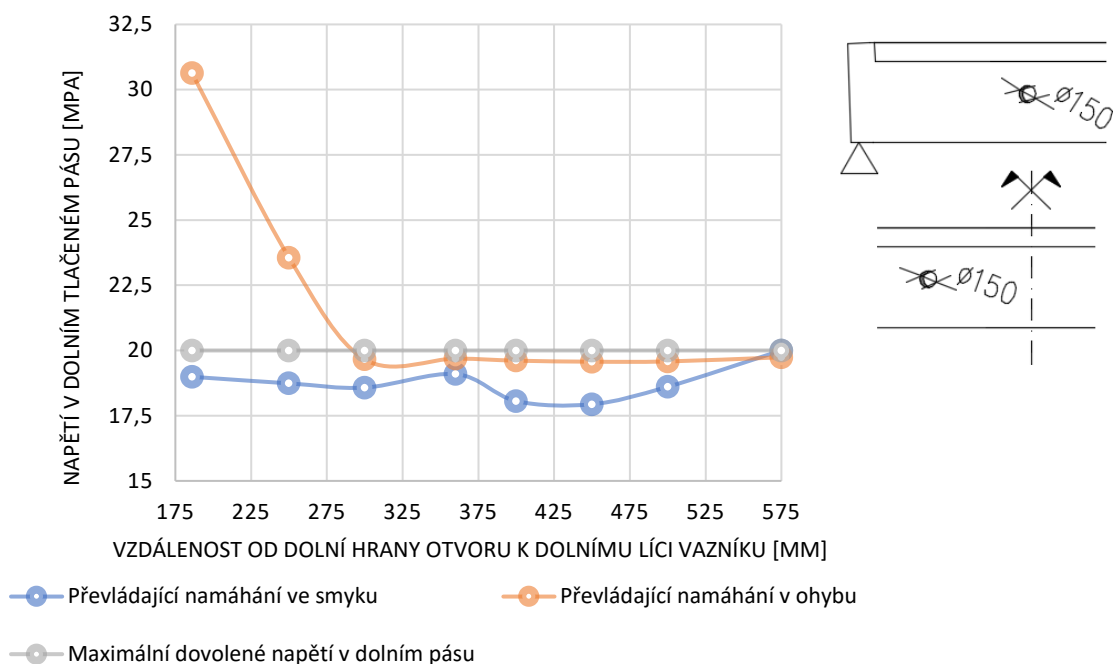
Obr. 10.21 Grafické znázornění napětí v betonové vzpěře

Velikost napětí v betonové vzpěře lze ovlivnit šířkou navrženého svislého táhla, výškou otvoru, polohou otvoru v řezu a ohybovou výztuží. Je dobré si uvědomit spojitost mezi velikostí šířky táhla, úhlem sklonu tlačené vzpěry a šířkou betonové vzpěry. V určitém stádiu interakce lze zjistit, že při výrazném zvětšení šířky táhla nedochází k výraznému snížení napětí v betonové vzpěře. Je to právě díky snížení úhlu sklonu betonové vzpěry a tím v podstatě vykompenzování zvětšující se šířky betonové vzpěry. Pokud nevyjde napětí v betonové vzpěře v řádu MPa je potřeba změnit polohu otvoru v řezu, zvolit vyšší třídu betonu nebo rozšířit šířku stojiny.

Pokud se otvor nachází v blízkosti podpory, je potřeba věnovat poloze otvoru v řezu důslednou pozornost. Při umístění otvoru postupně k dolní hraně příruby exponenciálně stoupá napětí v betonové vzpěře, jak naznačuje Obr. 10.21.

Pokud je otvor umístěn ve středu nebo blízkosti středu rozpětí vazníku, je potřeba naopak věnovat pozornost napětí v horním a dolním pásu u styčnicků. Přídavné síly, které vznikají zabudováním otvoru ve vazníku, způsobí navýšení napětí v obou pásech. Dostatečné

vyztužení dolního pásu má za následek nejefektivnější snížení napětí v dolním i horním pásu. Je důležité si pohlídat dostatečnou šířku spodního pásu. Z provedené studie vyháží (Obr. 10.22), že při vynásobení původní šířky táhla 186 mm koeficientem 1,61 je docíleno splnění hodnoty povoleného napětí ve styčnicku C-T-T pro dolní pás a ve styčnicku C-C-T pro horní pás. Koeficient 1,61 je vypočten na základě konstrukčního vyztužení pásu a pro řešený případ v diplomové práci. Při detailnějším bádání lze zjistit, že tento koeficient ovlivní poloha otvoru na vazníku, šířka stojiny a velikost zatížení. Zjištěnou hodnotu proto nelze brát jako obecnou. Bylo by potřeba provést detailnější analýzu pro stanovení přesnějších závěrů.



Obr. 10.22 Grafické znázornění napětí dolním pásu u styčnicku C-T-T

### 10.2.5 Změna geometrie malého otvoru

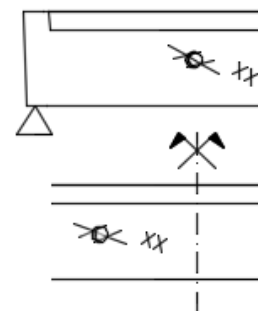
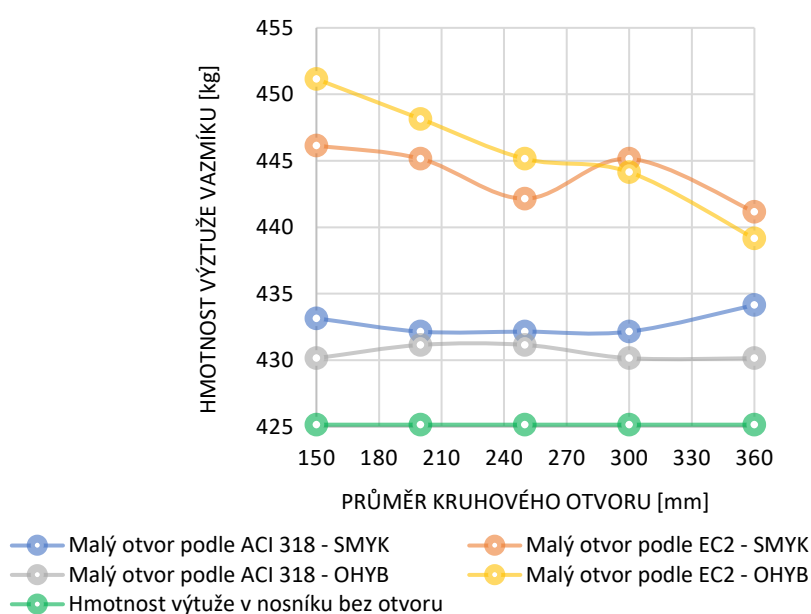
Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s malým otvorem umístěným v blízkosti podpory a středu rozpětí vazníku při uvážení různé výšky otvoru.

Tato kapitola se zaměřuje na vliv změny velikosti geometrie otvoru na výsledné chování vazníku s otvorem. Aby bylo možné porovnat výsledky změny geometrie otvoru při smykovém a ohybovém namáhání, umístí se dolní líc kruhového otvoru 300 mm od dolní hrany vazníku. Je to právě z důvodu popsané problematiky v kapitole 10.2.4. Minimální velikost malého otvoru je 150 mm. Maximální velikost malého otvoru je 360 mm (40 % výšky průřezu). Výpočet se prováděl tak, že se opakoval výpočet vazníku s otvorem, u kterého se měnila velikost otvoru, konkrétně po 50 mm krocích. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat ze softwaru StatiCa IDEA.

#### Spotřeba výztuže:

Je patrné, že návrhové přístupy podle EC2 navyšují spotřebu výztuže do 10 kg oproti ACI 318. Lze si všimnout, že vyztužení podle EC2 při zvyšování velikosti průměru otvoru klesá. Důvodem je klesající úhel sklonu betonové vzpěry s rostoucí velikostí otvoru. U nejmenšího

otvoru je úhel sklonu betonové vzpěry  $44^\circ$  (smykové a ohybové namáhání) a u největšího otvoru odpovídá úhlu sklonu betonové vzpěry  $31,9^\circ$  (ohybové namáhání) a  $25,5^\circ$  (smykové namáhání). U velikosti otvoru cca 285 mm si lze povšimnout (Obr. 10.23), že dochází k průniku křivek EC2 a spotřeba výztuže u smykového namáhání výrazně stoupá oproti ohybovému namáhání. V tento moment bylo potřeba snížit napětí ve styčnicku C-T-T pro smykové namáhání (sekundární síly navýšili sílu ve spodním táhle) a navrhla se přídatná spodní výztuž. Pro průměr kruhového otvoru 300 mm se navrhlo přídatné spodní vyztužení, aby se snížilo napětí v dolním táhle a částečně omezila velikost v betonové vzpěře. Lze konstatovat, že při zvětšování velikosti otvoru vystavenému převážně ohybovému namáhání má spotřeba výztuže tendenci téměř lineárně klesat.



Obr. 10.23 Grafické znázornění celkové spotřeby výztuže na vazník s otvorem

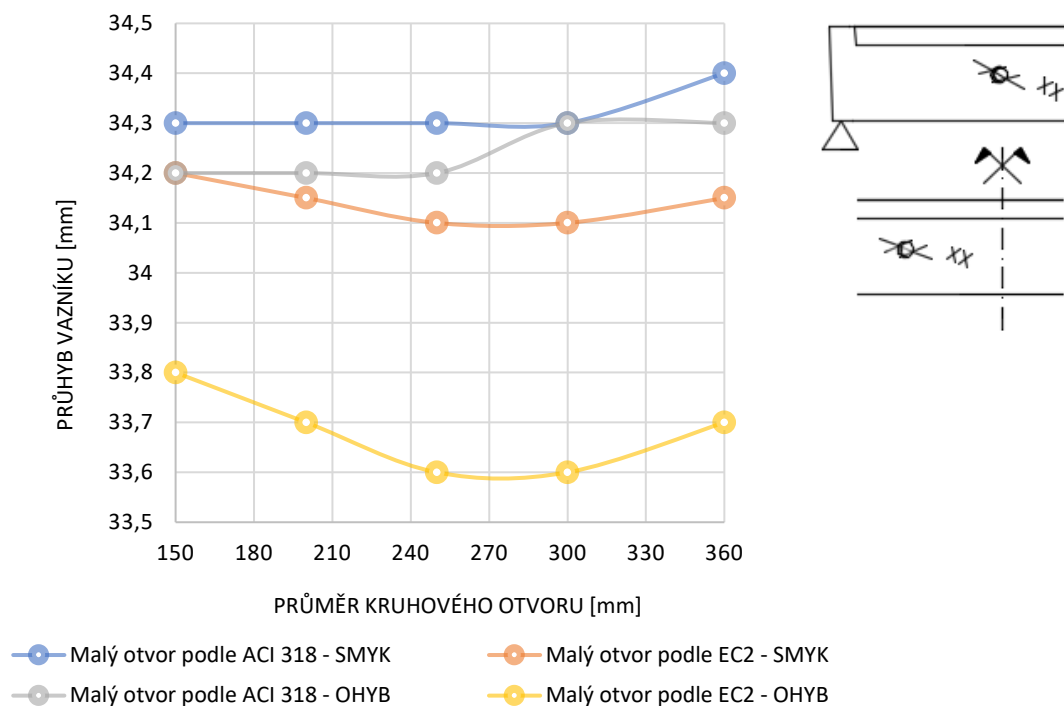
### Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru v MSÚ:

Ze znamenaných dat bylo zjištěno, že při zvětšování velikosti otvoru dochází ke zvýšení napětí v oblasti otvoru. Nejvyšší navýšení napětí v betonu převládá u otvoru vystavené smykovému namáhání. Například u EC2 byl zaznamenán nárůst napětí v betonu až o 45 %.

### Průhyb:

Průhyb vazníku bez otvoru je 34,3 mm. Z Obr. 10.24 si lze všimnout, že umístění otvoru v blízkosti podpory zapříčiní výraznější průhyb vazníku uprostřed pole než umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí vazníku. Pokud se navrhne vyztužení otvoru podle ACI 318, tak se průhybová křivka ve smyku a v ohybu zřetelně nezmění.

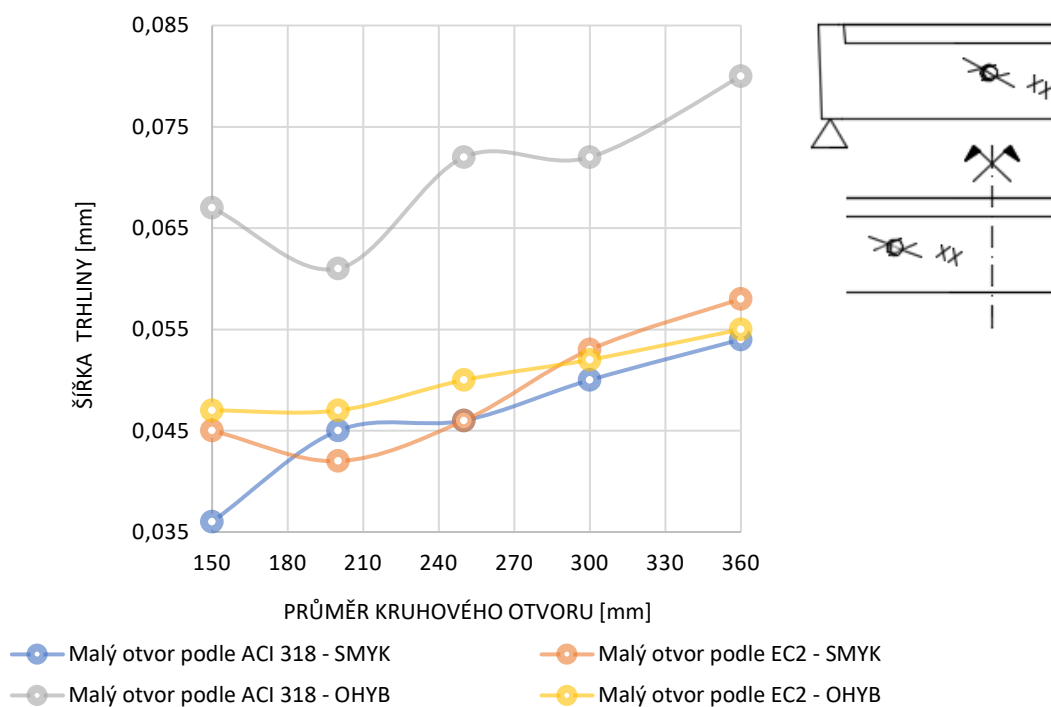
Vyztužení oblasti kolem otvoru podle EC2 pro oba typy namáhání popisuje přibližně stejný funkční předpis křivky průhybu. Rozdíl lze spatřit pouze při jiných okrajových podmínkách. Kdy pro průhybovou křivku smykového namáhání je dán počáteční průhyb 34,2 mm a pro průhybovou křivku ohybové namáhání 33,8 mm.



Obr. 10.24 Grafické znázornění průhybu vazníku

### Šířka trhliny:

U každého typu návrhového přístupu byla navržena diagonální výztuž  $4 \times 2\emptyset 12$  mm. Šířka trhliny byla spočtena v blízkosti navržené betonářské výztuže. Při pohledu na Obr. 10.25 je patrné, že při zvětšování velikosti otvoru dochází k úměrnému navýšení velikosti šířky trhliny. Nejvýraznější velikost šířky trhliny vzniká při ohybovém namáhání.



Obr. 10.25 Grafické znázornění velikosti šířky trhliny u otvoru

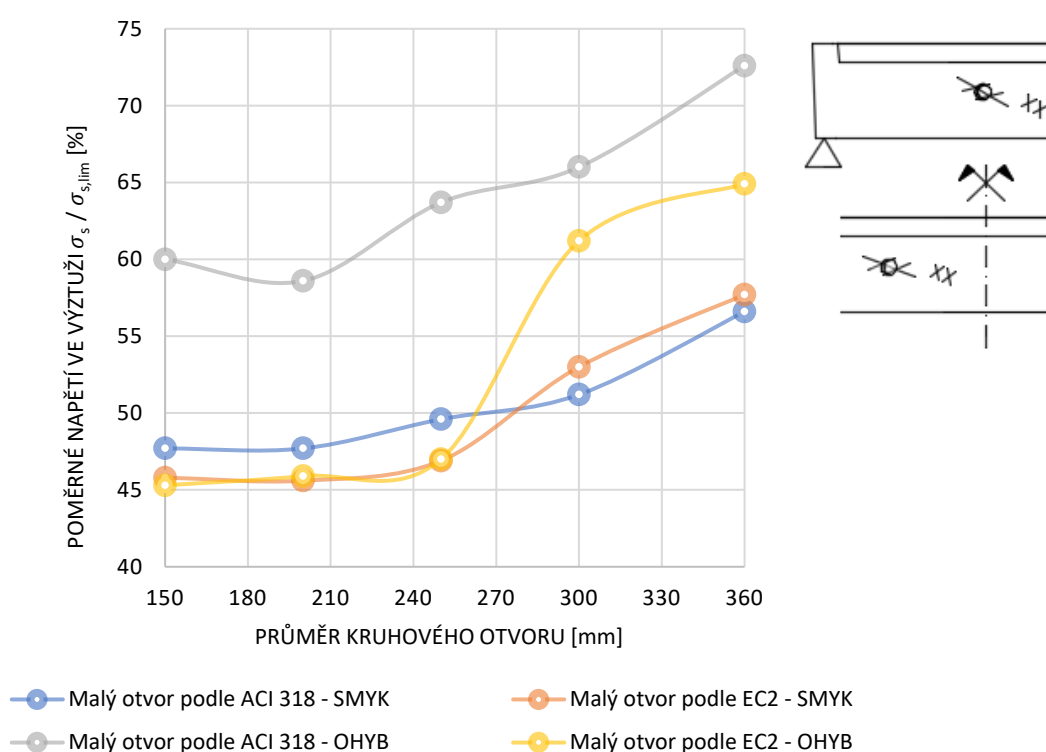


### Omezení napětí v betonu a v betonářské výztuži (MSP):

Jedná se o kontrolu dovoleného napětí v betonu a v betonářské výztuže podle normy ČSN EN 1992-1-1 podkapitola 7.2. Do softwaru StatiCa IDEA byly vloženy koeficienty, které lze dohledat v národní příloze.

Při zpracování dat a vyhodnocení v grafu se zjistilo, že hodnoty omezení napětí v betonu pro kvazi-stálou a charakteristickou kombinaci vychází v minimálních hodnotách napětí. Lze konstatovat, že posouzení omezení napětí v betonu je téměř stejné pro různou polohu otvoru v řezu.

Při analyzování Obr. 10.26 lze konstatovat, že výztuž v oblasti kolem otvoru je lépe využita u ohybového namáhání a při zvyšování velikosti otvoru.



Obr. 10.26 Grafické znázornění posudku omezeného napětí ve výztuži v oblasti otvoru

### 10.2.6 Změna geometrie velkého otvoru

Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s velkým otvorem umístěným v blízkosti podpory a středu rozpětí vazníku při uvažování různé výšky a délky otvoru.

Tato kapitola se zaměřuje na vliv změny velikosti geometrie otvoru na výsledné chování vazníku s otvorem. Aby bylo možné porovnat výsledky změny geometrie otvoru při smykovém a ohybovém namáhání, umístí se dolní líc obdélníkového otvoru 300 mm od dolní hrany vazníku. Hodnota 300 mm byla stanovena už při analyzování velkého otvoru v řezu v kapitolách 10.2.2 a 10.2.3, kdy se pod velkým otvorem pomocí zjednodušené metody DAfStB 459 navrhne přídatná horní výztuž u spodního pasu. Minimální velikost velkého otvoru je 360 mm (40 % výšky průřezu). Volba výšky otvoru je omezena výškou stojiny, ale

zároveň bude přihlédnuto k dřívějšímu závěru při analyzování velkého otvoru u podpory. Je potřeba odsadit horní hranu otvoru od dolní hrany příruby na vzdálenost 25 mm. Je to právě z důvodu, že při smykovém namáhání došlo k nesplnění kritéria limitní délky podle ACI 318. Maximální délka otvoru byla zvolena 850 mm. Je to právě z důvodu přihlédnutí ke kritériu limitní délky podle EC2 a ACI 318.

### 10.2.6.1 Změna výšky velkého otvoru

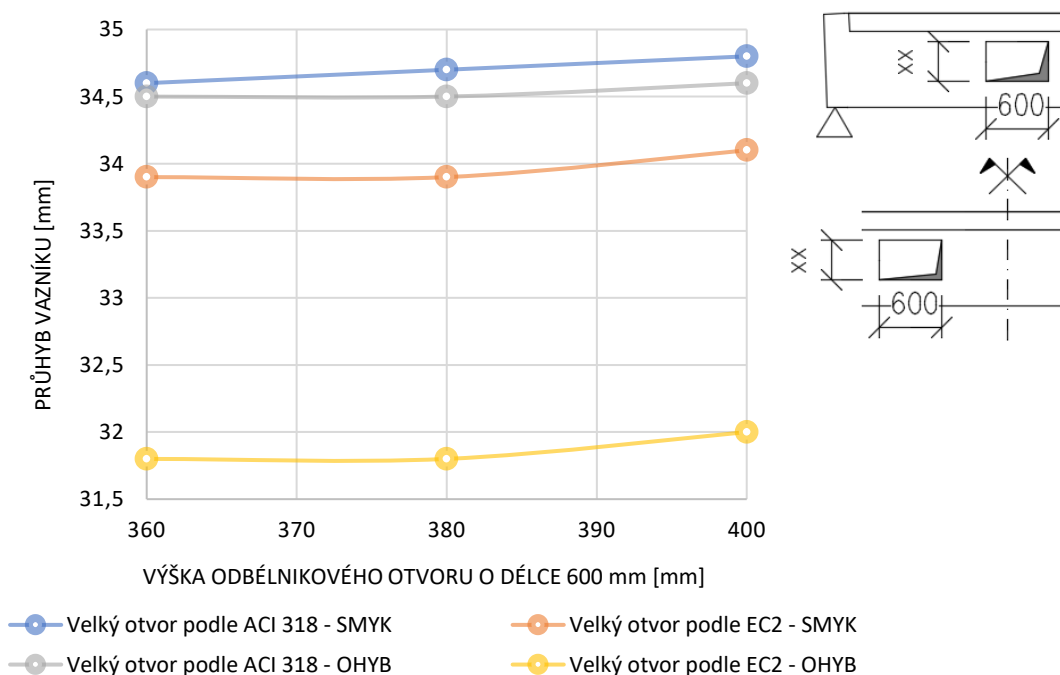
Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s velkým otvorem umístěným v blízkosti podpory a středu rozpětí vazníku při uvážení různé výšky otvoru. Výpočet se prováděl tak, že se opakoval výpočet vazníku s otvorem, u kterého se měnila velikost výšky otvoru, konkrétně po 20 mm krocích. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat ze softwaru StatiCa IDEA.

#### Spotřeba výztuže:

Spotřeba výztuže se nepatrně navyšuje při zvětšení výšky otvoru pro jednotlivé návrhové přístupy. Pokud se navrhne vyztužení v oblasti kolem velkého otvoru pomocí návrhové přístupu EC2, je nutné rozlišit polohu otvoru. V místě podpory vychází až o 15 kg nižší spotřeba výztuže než při umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí vazníku.

#### Průhyb:

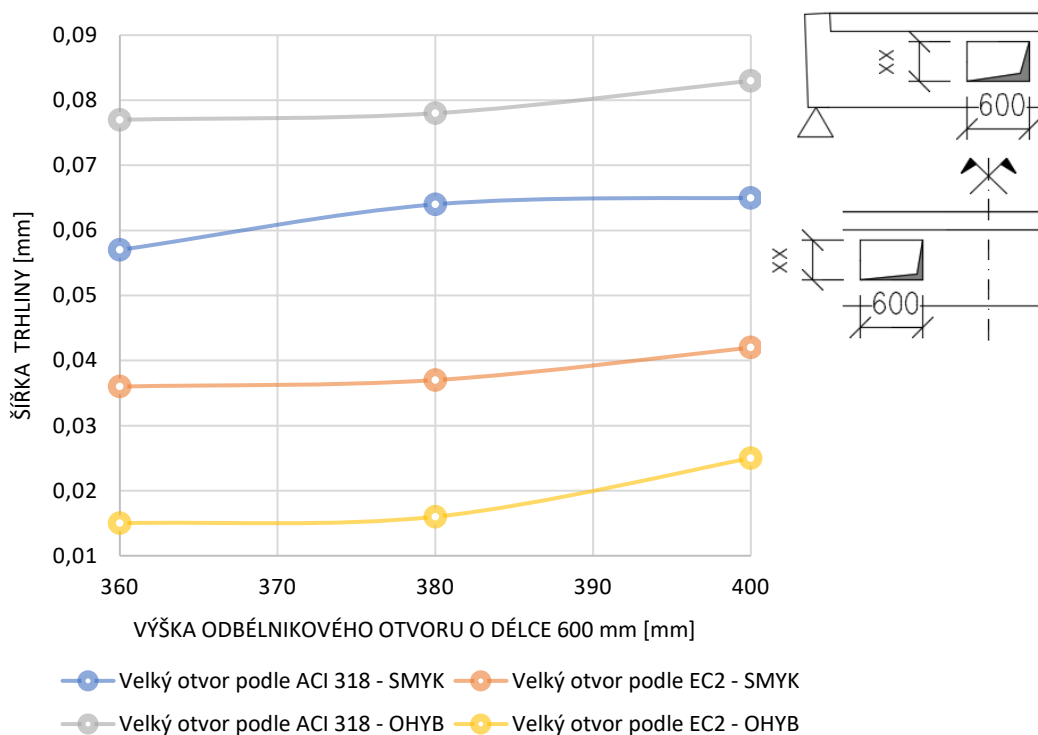
Průhyb vazníku bez otvoru je 34,3 mm. Srovnatelnou a nižší hodnotu průhybu vazníku bez otvoru splňují otvory vyztužené podle EC2. Díky vyztužení oblasti kolem velkého otvoru podle návrhového přístupu EC2 v blízkosti středu vazníku se sníží původní průhyb 34,3 mm na 31,8 – 32 mm.



Obr. 10.27 Grafické znázornění průhybu vazníku s otvorem

## Šířka trhliny:

U každého typu návrhového přístupu byla navržena diagonální výztuž  $4 \times 2\emptyset 12$  mm. Šířka trhliny byla spočtena v blízkosti navržené betonářské výztuže. Při pohledu na Obr. 10.28 je patrné, že návrhové přístupy podle EC2 pro oba typy namáhání nemění velikost šířky trhliny s přibývajícím výškou otvoru. Velikost šířky trhliny se nepatrně zvyšuje při postupném navýšení výšky otvoru pro všechny typy vyztužení pro oba způsoby namáhání. Při srovnání návrhového přístupu EC2 lze zjistit, že větší velikost šířky trhliny vzniká u smykového namáhání o 0,02 mm. Naopak u ACI 318 lze vyzorovat vyšší šířku trhliny u ohybového namáhání až o 0,03 mm.



Obr. 10.28 Grafické znázornění velikosti šířky trhliny u otvoru

## Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru v MSÚ:

Se zvyšující se výškou otvoru dochází ke zvyšování napětí u obou návrhových přístupů působící ve smyku. Nárůst napětí je ovlivněn skutečností, že při postupném navýšování výšky otvoru se horní hrana otvoru přibližuje k dolní hraně příruby. Tedy, při výšce otvoru 400 mm stoupne pro oba návrhové přístupy napětí až na hodnotu 95 % únosnosti betonu oproti původní výšce otvoru 360 mm, kdy využití betonu bylo okolo 70 %.

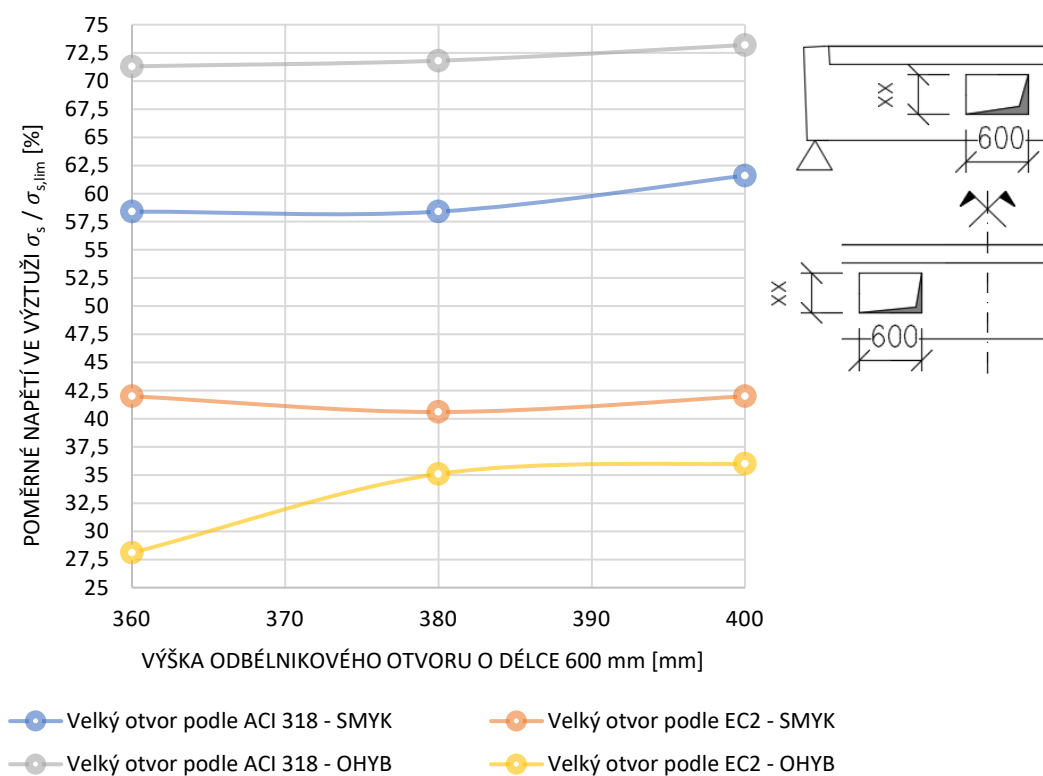
Při analyzování otvoru u středu vazníku lze konstatovat, že hodnota využití betonu pro oba návrhové přístupy se nepatrně mění se zvyšující se výškou otvoru. Využití betonu v oblasti kolem otvoru u středu vazníku není více jak 25 %.

### Omezení napětí v betonu a v betonářské výztuži (MSP):

Jedná se o kontrolu dovoleného napětí v betonu a v betonářské výztuže podle normy ČSN EN 1992-1-1 podkapitola 7.2. Do softwaru StatiCa IDEA byly vloženy koeficienty, které lze dohledat v národní příloze.

Při zpracování dat a vyhodnocení v grafu se zjistilo, že výrazné hodnoty omezeného napětí vznikají při umístění otvoru u podpory. Pro kvazi-stálou kombinaci zatížení má napětí v betonu tendenci růst s přibývajícím výškou. Rozptyl zaznamenaných dat o využití betonu je 40–60 %. Pro charakteristickou kombinaci zatížení narůstá omezené napětí v betonu z hodnoty 50 % využití (otvor výšky 360 mm) na hodnotu 80 % (otvor 400 mm). Důvodem vyšší koncentrace napětí oblasti otvoru je narušení toku vnitřních sil u podpory. V oblasti ohybu nedochází k výrazné koncentraci smykového napětí.

Z Obr. 10.29 je patrné, že vyztužení v oblasti kolem otvoru podle EC2 není tolik využito s porovnáním s ACI 318.



Obr. 10.29 Grafické znázornění posudku omezeného napětí ve výztuži v oblasti otvoru

#### 10.2.6.2 Změna délky velkého otvoru

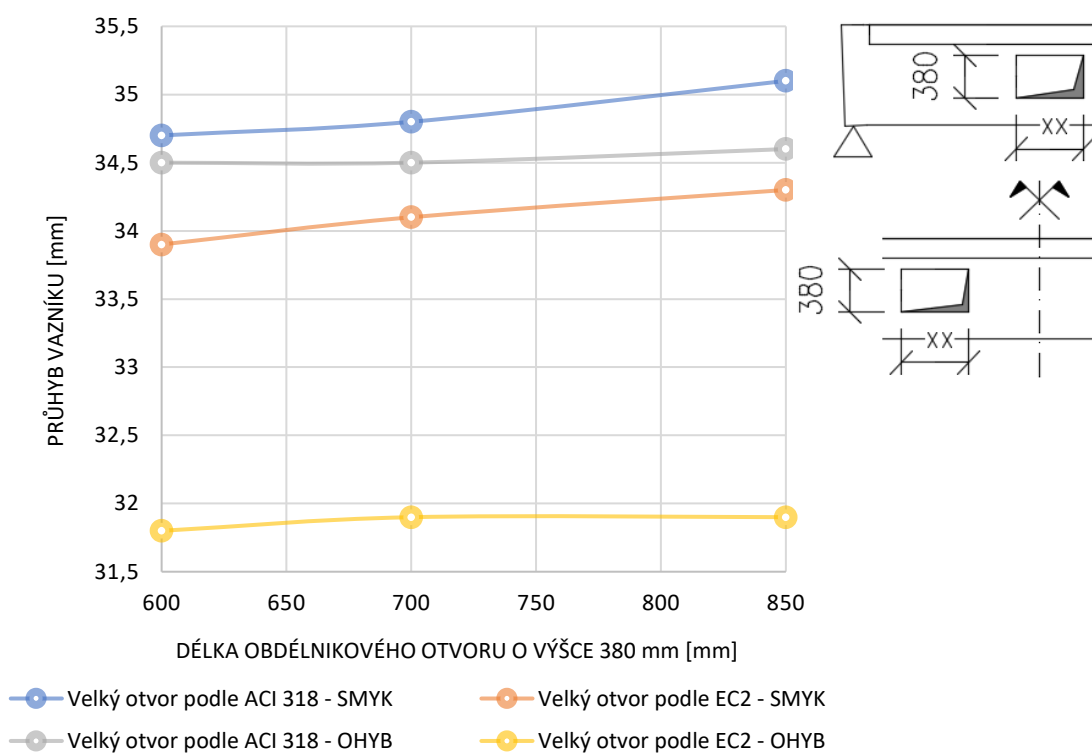
Cílem této kapitoly je objasnit chování nosníku s velkým otvorem umístěným v blízkosti podpory a středu rozpětí vazníku při uvážení různé délky otvoru. Výpočet se prováděl tak, že se opakoval výpočet vazníku s otvorem, u kterého se měnila velikost délky otvoru. Velikost délky velkého otvoru byla vyšetřována v hodnotách 600 mm, 700 mm a 850 mm. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy v softwaru EXCEL z objemu vypočtených dat ze softwaru StatiCa IDEA.

### Spotřeba výztuže:

Spotřeba výztuže se nepatrně zvyšuje při navýšení délky otvoru pro jednotlivé návrhové přístupy. Pokud se navrhne vyztužení v oblasti kolem velkého otvoru pomocí návrhové přístupu EC2, je nutné rozlišit polohu otvoru. V místě podpory vychází až o 20 kg nižší spotřeba výztuže než při umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí vazníku. Vyztužením vazníku s otvorem pomocí přístupu ACI 318 lze ušetřit 60 kg výztuže oproti vyztužením otvoru pomocí EC2.

### Průhyb:

Průhyb vazníku bez otvoru je 34,3 mm. Srovnatelnou a nižší hodnotu průhybu vazníku bez otvoru splňují otvory vyztužené podle EC2. Díky vyztužení oblasti kolem velkého otvoru podle návrhového přístupu EC2 v oblasti blízkosti středu vazníku se sníží původní průhyb 34,3 mm na 31,8 – 32 mm obdobně jako při změně výšky otvoru.



Obr. 10.30 Grafické znázornění průhybu vazníku s otvorem

### Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru v MSÚ:

Se zvyšující se délkou otvoru dochází k lineárnímu navýšování napětí u obou návrhových přístupů působících u podpory. Hodnota využití únosnosti betonu je okolo 70 % využití u délky velkého otvoru 600 mm. Při délce otvoru 850 mm stoupne pro oba návrhové přístupy napětí v oblasti kolem otvoru až na hodnotu blízkou se 100 % využití únosnosti betonu.

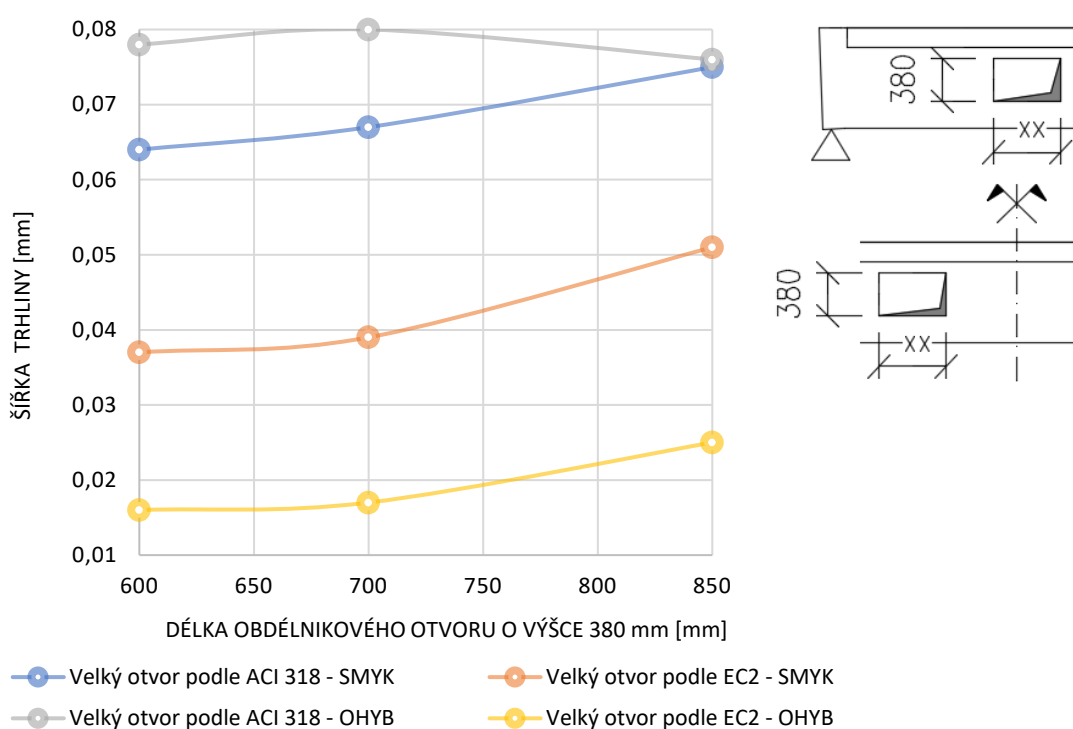
Při analyzování otvoru u středu vazníku lze konstatovat, že hodnota využití betonu pro oba návrhové přístupy se nepatrně navýší s rostoucí délkou otvoru. Využití betonu v oblasti

kolem otvoru u středu vazníku dosahuje při délce otvoru 850 mm hodnoty pod 40 % využití betonu v únosnosti.

### Šířka trhliny:

U každého typu návrhového přístupu byla navržena diagonální výztuž 4x2Ø12 mm. Šířka trhliny byla spočtena v blízkosti navržené betonářské výztuže. Z Obr. 10.31 je patrné, že velikost šířky trhliny pro namáhání ve smyku a v ohybu má odlišný popis funkční křivky.

Při porovnání křivek šířky trhliny dle EC2 je patrné, že mají podobný funkční předpis. Pouze definované jinými okrajovými podmínkami při namáhání. Okrajová počáteční podmínka pro smykovou křivku šířky trhliny je 0,037 mm a pro ohybovou křivku šířky trhliny je 0,016 mm.



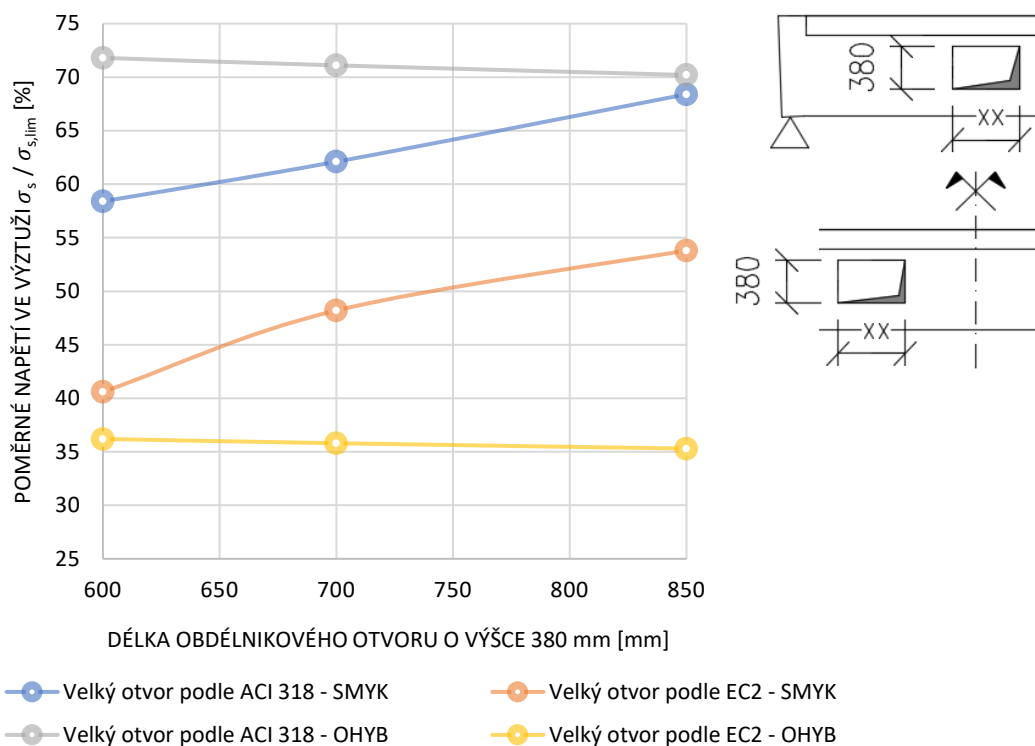
Obr. 10.31 Grafické znázornění velikosti šířky trhliny u otvoru

### Omezení napětí v betonu a v betonářské výztuži (MSP):

Jedná se o kontrolu dovoleného napětí v betonu a v betonářské výztuže podle normy ČSN EN 1992-1-1 podkapitola 7.2. Do softwaru StatiCa IDEA byly vloženy koeficienty, které lze dohledat v národní příloze.

Při zpracování dat a vyhodnocení v grafu se zjistilo, že výrazné hodnoty omezeného napětí vznikají při umístění otvoru v blízkosti podpory. Pro kvazi-stálou kombinaci zatížení má napětí v betonu tendenci růst s přibývajícím délkou otvoru. Při délce otvoru 600 mm je zaznamenána hodnota využití betonu okolo 40 % a u délky otvoru 850 mm je využití betonu okolo 65 %. Pro charakteristickou kombinaci zatížení narůstá omezené napětí v betonu z hodnoty 50 % využití (otvor délky 600 mm) na hodnotu 85 % využití (otvor délky 850 mm).

Křivky napětí v betonářské výztuži při ohybovém namáhání nepatrně klesají (Obr. 10.32). Dochází k menšímu využití navržené výztuže v oblasti kolem otvoru při převládajícím ohybovém namáhání. Naopak průběh křivek napětí v betonářské výztuži při smykovém namáhání strmě vstoupá. Využití betonářské výztuže s přibývajícím délkou velkého otvoru vzrůstá.



Obr. 10.32 Grafické znázornění posudku omezeného napětí ve výztuži v oblasti otvoru

Během analyzování vyztužení oblasti kolem otvoru podle ACI 318 se zjistilo, že pro správnou funkci chování je vhodné se zaměřit na přídavné svislé vyztužení zleva a zprava kolem otvoru. Návrhový přístup vycházející z ACI 318 neřeší oblast vyztužení zleva a zprava okolo otvoru. Pouze je zaměřena na přerozdělení vnitřních sil do pásů a následné jejich vyztužení. Při zvětšení délky otvoru na 850 mm došlo k extrémnímu využití betonářské výztuže v MSP na hodnotu 103,7 %. Při překročení kritické hodnoty, tedy využití o více jak 100 %, dochází k nepřijatelným trhlinám a deformacím [14]. Je vhodné v blízkosti otvoru zleva a zprava umístit přídavné vyztužení, které je navrženo v rámci zjednodušené metody DAFStB 459.

### 10.2.7 Závěry ze studie vazníku s otvorem

V této kapitole budou prezentovány důležité poznatky plynoucí z provedené studie vazníku s malým a velkým otvorem. Budou shrnuty poznatky o omezení metod a doporučení, které vycházejí pouze ze samotné studie.

Metoda příhradové analogie vycházející z DIN 1045-1 je ve styčnicích a tlačených vzpěrách omezena koeficienty a vztahy, které jsou popsány v EC2. Při srovnání ručního výpočtu podle vztahů z EC2 a výsledků ze softwaru StatiCa IDEA lze konstatovat, že ruční výpočet pro velký i malý otvor je konzervativnější oproti softwarovému chování vazníku s otvorem. Tento

poznatek platí v případě posouzení vazníku s otvorem na MSÚ. Metoda příhradové analogie neumí posoudit D-oblasti na MSP.

V rámci studie bylo zjištěno, že pro geometrii a polohu malého otvoru po výšce průřezu je podstatné, jakému převládajícímu namáhání bude oblast kolem otvoru vystavena. Je důležité vymezit prostor v řezu pro umístění malého a velkého otvoru. V rámci studie bylo zjištěno, že je výhodné šířku spodního táhla rozšířit o koeficient 1,61 pro řešení malého otvoru podle EC2. Tímto způsobem je zajištěno, že lze pozitivně ovlivnit napětí ve styčnicích a v betonové vzpěře. Rozšíření spodního pásu je doporučeno provádět pro různé polohy otvoru v řezu, které jsou vystavené ohybovému namáhání. Je to právě v důsledku navýšení napětí/síly v horním a dolním pásu od účinků sekundárních sil. U smykového namáhání není potřeba rozšiřovat spodní pás v rámci prvotního návrhu. Při umístění otvoru v blízkosti příruby dochází u převládajícího smykového namáhání k výraznému zvýšení napětí v dolním pásu a betonové vzpěře. Efektivním řešením pro pokles napětí v dolním pásu a v betonové vzpěře je přidání výztuže do spodního táhla. Povolené napětí u betonové vzpěry je určeno vztahem v EC2. EC2 tento vztah doporučuje, ale nepřikazuje. Software StatiCa IDEA umí stanovit přesnější hodnotu únosnosti betonu v MSÚ.

Vyztužení D-oblasti velkého otvoru navržený pomocí zjednodušeného modelu náhradní příhradoviny DAfStB 459 řeší nedostatky, které jsou opomenuty u návrhového přístupu vycházejícího z ACI 318. Vyztužení velkého otvoru podle EC2 dochází k navýšení spotřeby výztuže v řádu desítek kilogramů oproti vyztužení podle přístupu vycházejícího z ACI 318. Výsledky studie ukazují, že vliv větší spotřeby výztuže u návrhového přístupu dle EC2 snižuje hodnoty průhybu, šířky trhliny, napětí v betonu a v betonářské výztuži než vyztužení podle ACI 318. Při analýze polohy otvoru v blízkosti podpory bylo zjištěno, že umístění velkého otvoru v blízkosti příruby vede k velkým koncentracím napětí v místech rozích otvorů. Je to právě z důvodu narušení toku vnitřních sil. Při odsazení velkého otvoru od příruby o 5 mm vede k výraznému poklesu napětí betonu v okolí otvoru.

Při vyztužení oblasti kolem velkého a malého otvoru podle EC2 v blízkosti podpory je podstatné dodržet geometrii modelu náhradní příhradoviny. U malého otvoru rozhoduje poloha otvoru v řezu. Při umístění otvoru v blízkosti příruby dochází ke snížení úhlu sklonu tlačené diagonály. Nižší úhel sklonu tlačené diagonály rozšiřuje vzdálenost mezi svislými táhly. Geometrie zjednodušeného modelu náhradní příhradoviny DAfStB 459 pro řešení velkého otvoru podle EC2 rozšiřuje oblast vyztužení směrem nalevo a napravo od otvoru. D-oblast zleva a zprava od otvoru není řešena návrhovým přístupem vycházejícího z ACI 318. Z provedené studie bylo zjištěno, že nevyztužení oblasti kolem otvoru zleva a zprava vede k vyššímu napětí v betonářské výztuži. Při dosažení limitní hodnoty napětí v betonářské výztuži dochází k nežádoucím trhlinám a deformacím vazníku s otvorem.

Na základě výsledků z provedené studie lze dospět k závěru, že vyztužení pro malý a velký otvor pomocí metody příhradové analogie má za následek snížení napětí kolem otvoru. Pokles napětí v oblasti otvoru snižuje velikost šířky trhliny a napětí v betonu a v betonářské výztuži. S ohledem na rozvoj trhlin u vazníku s malým otvorem v místě dominantního smykového namáhání při uplatnění vyztužení navržené metodou příhradové analogie lze doporučit umístit konstrukční třmínek na opačné straně otvoru, než je navrženo svislé táhlo.



Poloha a geometrie otvoru mají značný vliv na chování vazníku s otvorem. Otvor umístěný v blízkosti podpory způsobí vyšší průhyb vazníku s otvorem než otvor umístěný v blízkosti středu rozpětí. Je to právě díky skutečnosti, že otvor u podpory způsobí pokles tuhosti a tím dochází ke značnému natočení vazníku s otvorem. Při studii bylo zjištěno, že vyztužení D-oblasti kolem otvoru dle metody příhradové analogie pro smykové a ohybové namáhání sníží nepatrně původní průhyb vazníku bez otvoru.

Délka velkého otvoru je omezena kritériem limitní délky. Při překročení limitní délky je potřeba provést analýzu ztráty stability tlačného pásu. EC2 a ACI 318 zjednodušeně řeší ztrátu stability navýšením vnitřních sil nebo redukcí interakčního diagramu. EC2 stanoví velikost limitní délky pouze s ohledem na velikost normálové síly. ACI 318 stanoví limitní délku podle velikosti ohybových momentů na koncích tlačného pásu. Velikost ohybového momentu na obou koncích pásu závisí na velikosti posouvající síly. Z tohoto důvodu je potřeba věnovat zvýšenou pozornost při návrhu velkého otvoru podle ACI 318 v blízkosti podpory.

## 11 Závěr

Železobetonové nosníky s otvory se využívají v okamžiku, kdy je vyžadováno vést rozvody technologického zařízení budov v blízkosti stropní konstrukce z důvodu úspory prostoru. Vedením instalací v úrovni stropní konstrukce lze docílit značné finanční a materiálové úspory. Pro konstrukční návrh nosníků, konkrétně oblasti kolem otvoru, se v současné době využívají zejména sofistikované programy, které umí podrobně analyzovat navrhovaný prvek. Nicméně se jedná o velmi specifické programy, které nemusí mít každý inženýr ihned k dispozici. Důležité je proto znát i ruční výpočetní přístupy k návrhu vyztužení oblasti kolem otvoru, jejich omezení, přesnost výsledků a úskalí při uplatnění.

V teoretické části diplomové práce jsou shrnuty základní informace ke konstrukčnímu návrhu nosníků s otvorem a návrhovým přístupům vycházejících z DIN 1045-1 a ACI 318. Prezentované poznatky byly převzaty z odborných publikací a vědeckých článků. Tím, že se jedná o velmi specifickou oblast betonových konstrukcí, bylo možné dohledat pouze omezené množství výpočetních přístupů. Dostupná literatura navíc uvádí strohé informace týkajících se omezení, doporučení a platnosti návrhových přístupů pro ruční návrh otvoru v nosníku.

Na teoretickou část diplomové práce navazuje podrobná studie nosníku s otvorem. Studie se zabývala konstrukčním návrhem a chováním nosníku s otvorem. Byla zkoumána odezva železobetonového nosníku, u kterého se měnila poloha a velikost otvoru. Poloha otvoru se měnila jak po výšce průřezu, tak i po délce nosníku, kdy byl otvor umístěn v blízkosti podpory s dominantním smykovým namáháním a v blízkosti středu rozpětí nosníku s dominantním ohybovým namáháním. Cílem studie bylo objasnit chování nosníků, při uvážení různé polohy a velikosti otvoru, a zároveň zhodnotit vybrané výpočetní přístupy.

V rámci provedené studie bylo zjištěno, že pro geometrii a polohu malého otvoru po výšce průřezu je podstatné, jakému převládajícímu namáhání bude oblast kolem malého otvoru vystavena. Pokud se bude otvor nacházet v blízkosti podpory s výrazným smykovým namáháním, je žádoucí umístit otvor blíže ke spodní ohybové výztuži a vyhnout se poloze otvoru v blízkosti příruby průřezu. Důvodem je respektování napjatosti a sklonu tlačené diagonály. Při umístění otvoru v blízkosti středu rozpětí nosníku, kde převládá ohybové namáhání, je nutné uvažovat s přidavnými silami, které vznikají v důsledku zabudování otvoru do nosníku. Tyto sekundární síly způsobí navýšení síly/napětí v horním a dolním pásu, a proto je výhodné při návrhu otvoru navýšit velikost šířky táhla pro umístění přidavné výztuže. Při studii se dospělo k závěru, že velikost šířky táhla stanovená standardním způsobem pro B-oblasti je nutné vynásobit koeficientem 1,61. Tuto hodnotu nelze brát jako obecnou pro každý návrh nosníku s otvorem. Bylo by potřeba provést detailnější analýzu a vyhodnotit velikost koeficientu na základě širšího pole výsledků.

Při umístění otvoru v oblasti převládajícího smyku bylo zjištěno, že dochází k náhlé změně napjatosti v rozích otvoru při odsazení velkého otvoru od dolní hrany příruby. Pokud je velký otvor umístěn na dolní hraně příruby, dochází k poměrně nežádoucí napjatosti kolem otvoru. Při odsazení velkého otvoru o 5 mm od dolní hrany příruby dochází ke snížení

napjatosti kolem otvoru. Tato problematika není dále zkoumána. Bylo by potřeba provést detailnější analýzu, která byla nad rámec diplomové práce.

Při navrhování velkého otvoru pomocí přístupu vycházejícího z ACI 318 byla zjištěna skutečnost, že přístup neřeší návrh D-oblastí přilehlých k otvoru. Ignorováním těchto oblastí v konstrukčním návrhu má za následek vyšší využití odsazené svislé výztuže. Je proto důležité věnovat zvýšenou pozornost napětí v betonářské výztuži. Pokud by došlo k překročení kritéria pro omezení napětí podle ČSN EN 1992-1-1, hrozí vysoké riziko vzniku nežádoucích trhlin a deformací v oblasti svislé výztuže.

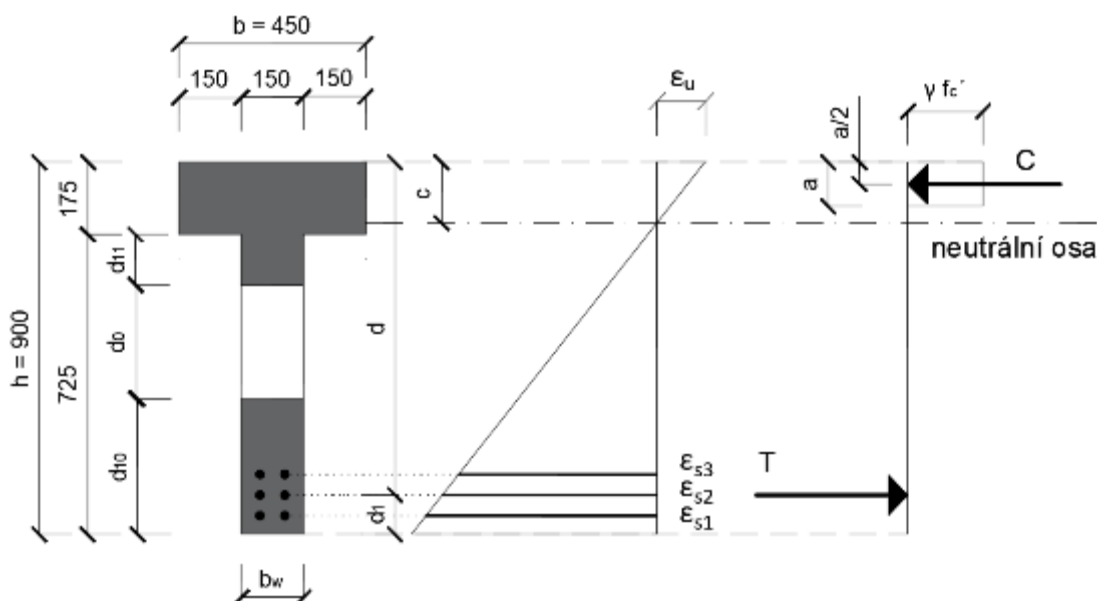
Obecně návrh oblasti kolem velkého a malého otvoru dle metody příhradové analogie zvyšuje spotřebu betonářské výztuže než přístup vycházející z ACI 318. Na základě zjištěných výsledků efektivity vyztužení lze dospět k závěru, že při uplatnění vyztužení pro malý i velký otvor stanovené metodou příhradové analogie dochází ke snížení napjatosti oblasti kolem otvoru a spolehlivějšímu návrhu z hlediska MSÚ a MSP. S ohledem na rozvoj trhlin u nosníku s malým otvorem v místě s dominantním smykovým namáháním při uplatnění vyztužení navržené metodou příhradové analogie lze doporučit umístit konstrukční třmínek na opačné straně otvoru, než je navrženo svislé táhlo.

Při návrhu vyztužení nosníku v oblasti velkého otvoru pomocí metody příhradové analogie je důležité respektovat model náhradní příhradoviny a dopředu si rozvrhnout velikost šířky obou pásů, které vznikají v důsledku zabudování otvoru v nosníku. Oba pásy je potřeba vyztužit a zároveň dodržet konstrukční zásady.

U velkých otvorů může dojít ke ztrátě stability tlačeného pásu, proto je výhodné volit délku velkého otvoru s ohledem na velikost limitní délky podle EC2 nebo ACI 318.

## Příloha A – Nosník s malým otvorem podle ACI 318

Výpočet nosníku s malým otvorem vycházející podle přístupu ACI 318.



Obr. A.1 Schéma pro stanovení ohybové únosnosti

### Geometrie průřezu:

$$b := 450 \text{ mm} \quad h := 900 \text{ mm} \quad b_w := 150 \text{ mm}$$

$$A_c := 725 \text{ mm} \cdot b_w + 175 \text{ mm} \cdot b = (1.875 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

$$d_{11} := 215 \text{ mm}$$

$$d_o := 150 \text{ mm} \leq 0.4 \cdot h = 360 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o malý otvor.}$$

$$d_{10} := 725 \text{ mm} - d_{11} - d_o = 360 \text{ mm}$$

$$d_o = 150 \text{ mm} \leq \max(d_{10}, d_{11} + 175 \text{ mm}) = 390 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o malý otvor.}$$

### Krytí výztuže dle EC2:

$$c_c := 20 \text{ mm} \quad \dots \text{ ke třmínku}$$

### Materiály:

Beton C50/60:

$$f_c' := 50 \text{ MPa} \quad \gamma := 0.85 \quad \epsilon_u := 0.003 \quad \gamma_{zb} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\beta_1 := 0.85 - \frac{0.05 \cdot \left( \frac{f_c'}{\text{MPa}} - 28 \right)}{7} = 0.693 \quad 28 < f_c' < 55 \text{ [MPa]}$$

Betonářská výztuž B500B:

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\text{Ohyb: } f_y := 500 \text{ MPa} \\ d_b := 22 \text{ mm}$$

$$\text{Diagonální výztuž: } f_{yd} := 500 \text{ MPa} \\ d_{bd} := 12 \text{ mm}$$

$$\text{Smyk: } f_{yv} := 500 \text{ MPa} \\ d_{bw} := 10 \text{ mm}$$

Zatížení a vytvoření kombinace pro návrhové vnější zatížení dle ACI 318:

$$g := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D := \gamma_{zB} \cdot A_c \cdot g + 3.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 7.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16.088 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ stálé zatížení}$$

$$S := 9.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ sníh}$$

$$W := 1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ vítr (tlak)}$$

$$U := 1.2 \cdot D + 1.6 \cdot S + 0.8 \cdot W = 35.529 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad f_d := U = 35.529 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Vnitřní síly:

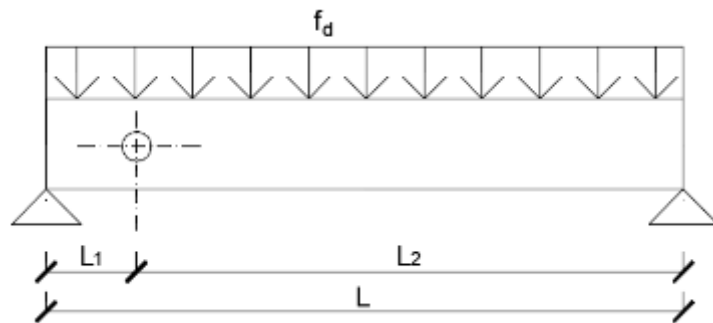
$$L_1 := 1526 \text{ mm}$$

$$L := 11750 \text{ mm}$$

$$L_2 := L - L_1 = 10224 \text{ mm}$$

$$V_{Ed} := \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L = 208.733 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = 613.153 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Obr. A.2 Schéma otvoru a zatížení

$$V_u := \frac{V_{Ed}}{L \cdot 0.5} \cdot \left( \frac{L}{2} - L_1 \right) = 154.516 \text{ kN} \quad M_u := \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L \cdot L_1 - \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L_1^2 = 277.159 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Posouzení na ohyb (celý nosník):

$s_1 := 30 \text{ mm}$  ... svislá světla vzdálenost mezi pruty

$s_2 := 46 \text{ mm}$  ... vodorovná světla vzdálenost mezi pruty

$$\text{Návrh: } 3 \times 2 \phi 22 \quad A_s := 6 \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} = (2.281 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$a := \frac{A_s \cdot f_y}{\gamma \cdot f_c' \cdot b} = 59.629 \text{ mm}$$

$$c := \frac{a}{\beta_1} = 86.062 \text{ mm} \leq 75 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, neutrální osa v přírubě.}$$

$$d_1 := c + d_{bw} + d_b + s_1 + \frac{d_b}{2} = 93 \text{ mm}$$

$$d := h - d_1 = 807 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{ty} := \frac{f_y}{E_s} + 0.003 = 0.0055 \leq \varepsilon_t := 0.003 \cdot \left( \frac{d-c}{c} \right) = 0.025 \rightarrow \phi := 0.9$$

$$\phi M_n := \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 797.671 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{\phi M_n} = 0.769 \quad \dots \text{ využití ohybové výztuže je } \frac{M_{Ed}}{\phi M_n} \cdot 100 = 76.868 \% \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

**Posouzení na smyk (celý nosník):**

$\phi := 0.75$  ... smyk

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left(\frac{d}{\text{m}}\right) \cdot \text{kN} = 106.994 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 208.733 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 534.97 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$A_v := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

$$V_s := V_{Ed} - \phi V_c = 101.739 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 135.652 \text{ kN}$$

$$d_v := d - \frac{a}{2} = 777.186 \text{ mm}$$

$$s := \frac{A_v \cdot f_{yv}}{\phi V_s} \cdot d_v = 449.976 \text{ mm} \quad \dots \text{ maximální požadovaná rozteč třmínek}$$

**Návrh: Třmínek dvojstřížný  $\phi 10$  á 300/400 mm (podle EC2)**

**Návrh diagonální výztuže:**

$$\alpha := 45^\circ$$
$$A_{d,req} := \frac{V_u}{\phi \cdot f_{yd} \cdot \sin(\alpha)} = 582.715 \text{ mm}^2 \leq A_{d,prov} := 2 \cdot 4 \cdot \frac{d_{bd}^2 \cdot \pi}{4} = 904.779 \text{ mm}^2$$

**Návrh: 2x4  $\phi 12$**

**Posouzení na smyk - nosníkové porušení:**

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left(\frac{d - d_o}{\text{m}}\right) \cdot \text{kN} = 87.107 \text{ kN}$$

$$V_u = 154.516 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 435.534 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$A_v := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

$$V_s := V_u - \phi V_c = 67.409 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 89.879 \text{ kN}$$

$$n := \frac{\phi V_s}{A_v \cdot f_{yv}} = 1.144 \quad \dots \text{ polovina na levou stranu a polovina na pravou stranu otvoru}$$

$$n := 2 \quad s := 0 \text{ mm} \quad \text{Návrh: Třmínek dvojstřížný 2x  $\phi 10$ }$$

**Posouzení na smyk - rámové porušení:**

$$A_t := d_{11} \cdot b_w + 175 \text{ mm} \cdot b = (1.11 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

$$A_b := b_w \cdot d_{10} = (5.4 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

**Podélná výztuž:**

$$f_y = 500 \text{ MPa} \quad d_{bt} := 10 \text{ mm} \quad d_{bb} := 10 \text{ mm}$$

Horní pás:

$$V_{ut} := V_u \cdot \frac{A_t}{A_t + A_b} = 103.947 \text{ kN}$$

$$N_{ut} := \frac{-M_u}{d - \frac{a}{2}} = -356.618 \text{ kN}$$

Dolní pás:

$$V_{ub} := V_u \cdot \frac{A_b}{A_t + A_b} = 50.569 \text{ kN}$$

$$N_{ub} := \frac{M_u}{d - \frac{a}{2}} = 356.618 \text{ kN}$$

Horní pás:

$$d_{ut} := 175 \text{ mm} + d_{11} - c_c - d_{bw} - \frac{d_{bt}}{2} = 355 \text{ mm}$$

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left( \frac{2}{m} \right) \cdot d_{ut} \cdot \text{kN} = 47.067 \text{ kN}$$

$$V_{ut} = 103.947 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 235.334 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$V_s := V_{ut} - \phi V_c = 56.88 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 75.84 \text{ kN}$$

$$A_{ut} := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

$$s := \frac{\phi \cdot A_{ut} \cdot f_{yv} \cdot d_{ut}}{\phi V_s} = 275.728 \text{ mm}$$

**Návrh: Třmínek dvojtřížný  $\phi 10$**

horní řada v přírubě: 4x12 mm  $d_s := 12 \text{ mm}$

dolní řada v přírubě: 2x12 mm dolní řada ve stojině: 2x10 mm

$\phi := 0.65$  ... konzervativní volba

$$A_{st} := \frac{d_{bt}^2 \cdot \pi}{4} = 78.54 \text{ mm}^2$$

$$A_{12} := \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4} = 113.097 \text{ mm}^2$$

Tento bod musí odpovídat maximálnímu povolenému zatížení s minimální excentricitou 20 %:

$$\phi P_n := -\phi \cdot 0.8 \cdot \left( \gamma \cdot (175 \text{ mm} \cdot b + d_{11} \cdot b_w) \cdot f_c' + f_y \cdot (A_{12} \cdot 4 + A_{12} \cdot 2 + A_{st} \cdot 2) \right) = -2.67 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

$$|N_{ut}| = 356.618 \text{ kN} \leq |\phi P_n| = (2.67 \cdot 10^3) \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

Dolní pás:

$\phi := 0.75$  ... smyk

$$d_{ub} := d_{10} - d_1 = 267 \text{ mm}$$

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left( \frac{d_{ub}}{m} \right) \cdot \text{kN} = 35.4 \text{ kN}$$

$$V_{ut} = 103.947 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 176.998 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$V_s := V_{ut} - \phi V_c = 68.547 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 91.396 \text{ kN}$$

$$A_{ub} := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

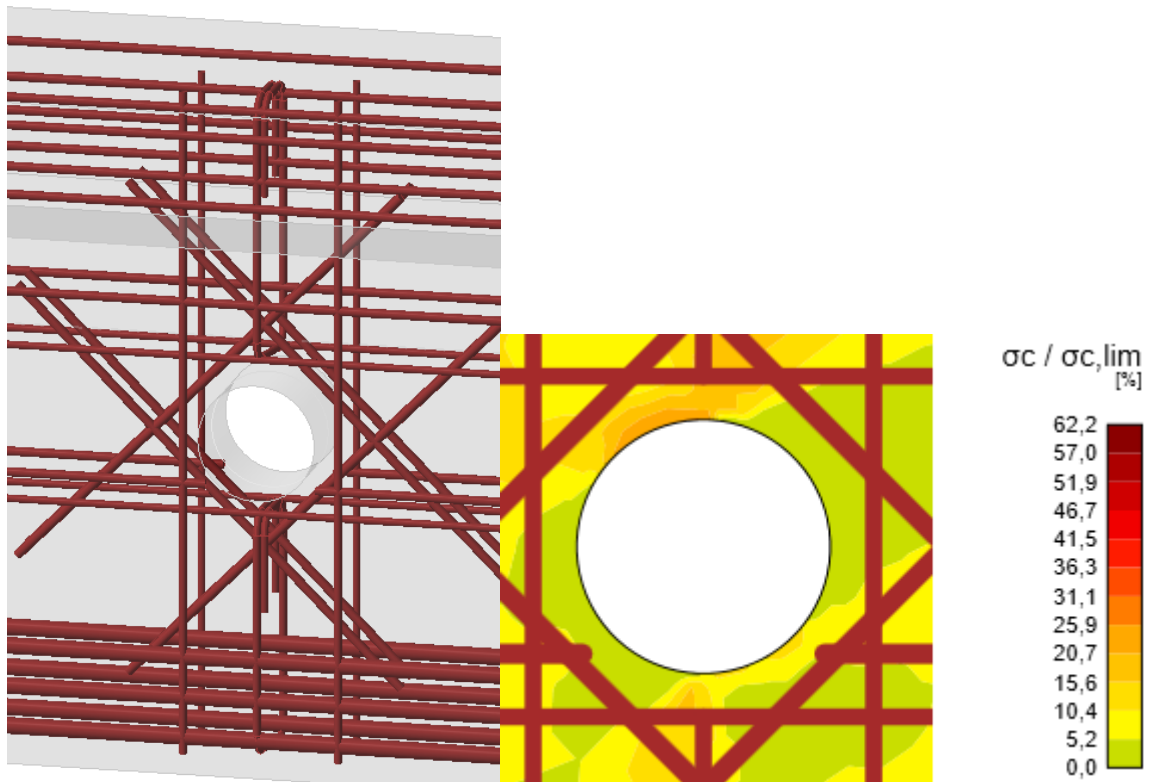
$$s := \frac{\phi \cdot A_{ut} \cdot f_{yv} \cdot d_{ub}}{\phi V_s} = 172.081 \text{ mm}$$

**Návrh: Třmínek dvojitřizný  $\phi 10$**

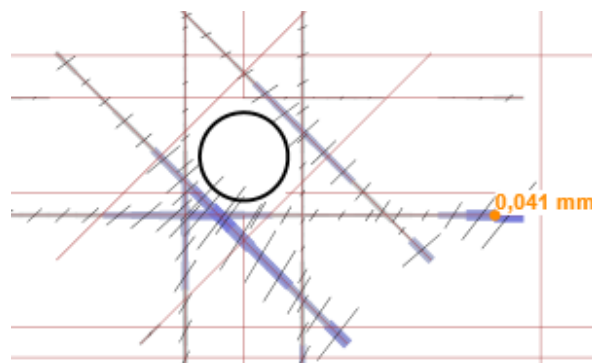
Navržená tahová výztuž 6x22 mm  $A_s := 6 \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} = (2.281 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Přídavná 2x10 mm  $A_{sb} := \frac{d_{bb}^2 \cdot \pi}{4} = 78.54 \text{ mm}^2$

$N_{ub} = 356.618 \text{ kN} \leq P := f_y \cdot A_s + f_y \cdot 2 \cdot A_{sb} = (1.219 \cdot 10^3) \text{ kN} \dots \text{ Vyhovuje.}$



Obr. A.3 Schéma výztuže oblasti kolem otvoru vlevo a využití pevnosti betonu vpravo

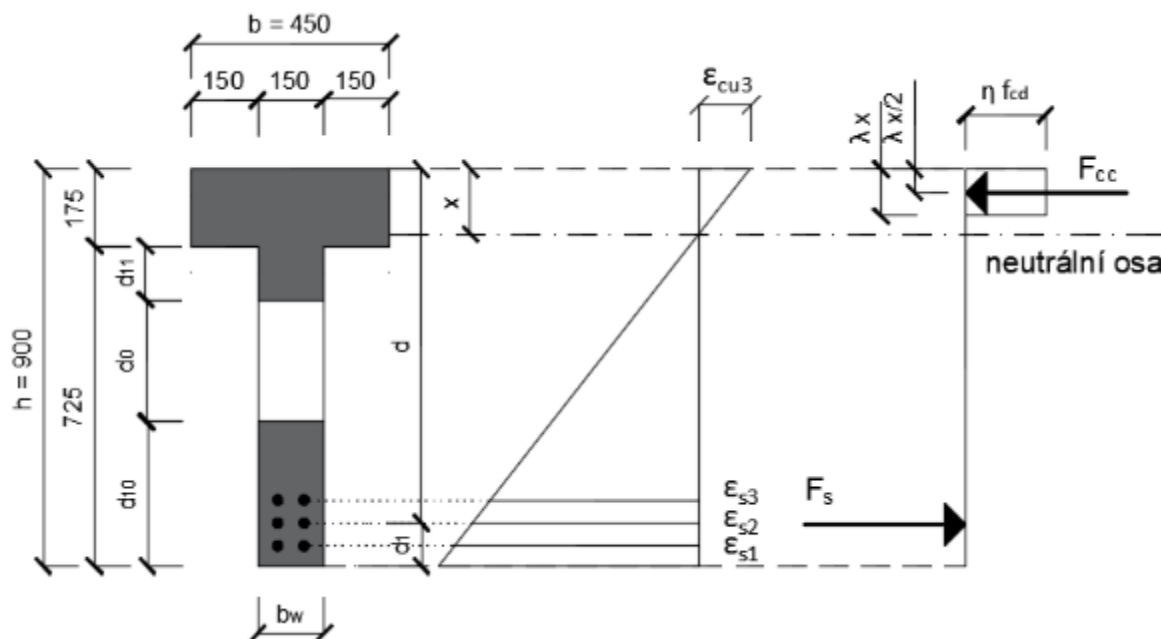


Obr. A.4 Velikost šířky trhliny v oblasti otvoru



## Příloha B – Nosník s malým otvorem podle EC2

Výpočet nosníku s malým otvorem podle přístupu EC2.



Obr. B.1 Schéma pro stanovení ohybové únosnosti

### Geometrie průřezu:

$$b := 450 \text{ mm} \quad h := 900 \text{ mm} \quad b_w := 150 \text{ mm} \quad d_{12} := 175 \text{ mm}$$

$$d_{11} := 215 \text{ mm} \quad d_0 := 150 \text{ mm} \leq 0.4 \cdot h = 360 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o malý otvor.}$$

$$d_{10} := h - d_{12} - d_{11} - d_0 = 360 \text{ mm} \quad d_{13} := d_{10} + d_0 + d_{11} = 725 \text{ mm}$$

$$A_c := d_{13} \cdot b_w + d_{12} \cdot b = (1.875 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

$$d_0 = 150 \text{ mm} \leq \max(d_{10}, d_{11} + d_{12}) = 390 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o malý otvor.}$$

### Krytí výztuže dle EC2:

$$c_{nom} := 20 \text{ mm} \quad \dots \text{ ke třmínku}$$

### Materiály:

Beton C50/60:

$$f_{ck} := 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk0.05} := 2.9 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 4.1 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$\varepsilon_{cu3} := 0.0035$$

$$D_{max} := 16 \text{ mm}$$

$$\lambda := 0.8$$

$$\eta := 1$$

$$\gamma_{zB} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 33.333 \text{ MPa} \quad f_{ctd} := \frac{f_{ctk0.05}}{\gamma_c} = 1.933 \text{ MPa}$$

Betonářská výztuž B500B:

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

$$f_{ywk} := 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s := 1.15$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

$$\phi_{sw} := 10 \text{ mm} \quad \phi_s := 22 \text{ mm}$$

Zatížení a vytvoření kombinace pro návrhové vnější zatížení dle EC:

$$f_{g;s} := \gamma_{zB} \cdot A_c \cdot 10 \frac{m}{s^2} + 3.9 \frac{kN}{m} + 7.5 \frac{kN}{m} = 16.088 \frac{kN}{m} \quad \dots \text{ stálé zatížení}$$

$$f_{q;s} := 9.6 \frac{kN}{m} \quad \dots \text{ sníh}$$

$$f_{q;w} := 1.08 \frac{kN}{m} \quad \dots \text{ vítr (tlak)}$$

$$f_d := f_{g;s} \cdot 1.35 + f_{q;s} \cdot 1.5 + f_{q;w} \cdot 1.5 = 37.738 \frac{kN}{m}$$

Vnitřní síly:

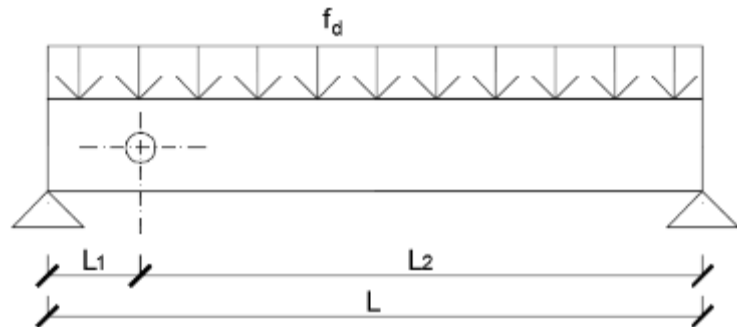
$$L := 11750 \text{ mm}$$

$$L_1 := 1526 \text{ mm}$$

$$L_2 := L - L_1 = 10224 \text{ mm}$$

$$V_{Ed} := \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L = 221.711 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = 651.277 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Obr. B.2 Schéma otvoru a zatížení

$$V_{Ed;1} := \frac{V_{Ed}}{L \cdot 0.5} \cdot \left( \frac{L}{2} - L_1 - \frac{d_o}{2} \right) = 161.293 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová posouvající síla před lícem otvoru}$$

$$V_{Ed;2} := \frac{V_{Ed}}{L \cdot 0.5} \cdot \left( \frac{L}{2} - L_1 + \frac{d_o}{2} \right) = 166.953 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová posouvající síla za lícem otvoru}$$

Posouzení na ohyb (plný průřez):

$s_1 := 30 \text{ mm}$  ... svislá světlá vzdálenost mezi pruty

$s_2 := 46 \text{ mm}$  ... vodorovná světlá vzdálenost mezi pruty

$$\min(s_1, s_2) = 30 \text{ mm} \geq \max(20 \text{ mm}, 1.2 \cdot \phi_s, D_{max} + 5 \text{ mm}) = 26.4 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$d_1 := c_{nom} + \phi_{sw} + \phi_s + s_1 + \frac{\phi_s}{2} = 93 \text{ mm}$$

$$d := h - d_1 = 807 \text{ mm}$$

$$A_{s;1} := \pi \cdot \frac{\phi_s^2}{4} = 380.133 \text{ mm}^2$$

$$A_{s;min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_w \cdot d, 0.0013 \cdot b_w \cdot d\right) = 258.079 \text{ mm}^2$$

$$A_{s;min} = 258.079 \text{ mm}^2 \leq A_{s;prov} := 6 \cdot A_{s;1} = (2.281 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \leq 0.04 \cdot A_c = (7.5 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

... Vyhovuje.

Návrh:  $3 \times 2 \phi 22$

$$x := \frac{A_{s;prov} \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 82.638 \text{ mm} \leq 175 \text{ mm} \quad \dots \text{ tlačenná oblast se nachází v přírubě}$$

$$z := d - \frac{\lambda \cdot x}{2} = 773.945 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z = 767.483 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{|M_{Ed}|}{M_{Rd}} = 0.849 \quad \dots \text{ využití ohybové výztuže je } \frac{|M_{Ed}|}{M_{Rd}} \cdot 100 = 84.859 \% \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$\zeta := \frac{x}{d} = 0.102 \leq 0.45 \quad \dots \text{ vyhovuje kritérium poměrné výšky tlačené oblasti}$$

$$\varepsilon_{s;1} := \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot \left( h - c_{nom} - \phi_{sw} - \frac{\phi_s}{2} - x \right) = 0.033 \geq \varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0.002174$$

$$\varepsilon_{s;2} := \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot \left( h - c_{nom} - \phi_{sw} - \phi_s - s_1 - \frac{\phi_s}{2} - x \right) = 0.03 \geq \varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0.002174$$

$$\varepsilon_{s;3} := \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot \left( h - c_{nom} - \phi_{sw} - \phi_s - s_1 - \phi_s - s_1 - \frac{\phi_s}{2} - x \right) = 0.028 \geq \varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0.002174$$

... Všechny vrstvy jsou za mezí kluzu.

#### Posouzení na smyk (plný průřez):

Ověření únosnosti tlačené diagonály:

$$\theta := 40^\circ \quad \dots \text{ úhel sklonu tlačených diagonál}$$

$$v := 0.6 \cdot \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.48$$

$$V_{Rd,max} := v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot(\theta)}{1 + \cot(\theta)^2} = 914.624 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 221.711 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

... Nedojde k drcení betonu v oblasti tlačené diagonály.

Návrh smykové výztuže - návrhové třmínky:

$$A_{sw} := 2 \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{sw}^2}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

$$b_t := 230 \text{ mm} \quad \dots \text{ šířka uložení vazníku na}$$

$$d_t := d + \frac{b_t}{2} = 922 \text{ mm}$$

$$V_{Ed1} := \frac{V_{Ed}}{L \cdot 0.5} \cdot (0.5 \cdot L - d_t) = 186.917 \text{ kN}$$

$$s \leq \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{V_{Ed1}} \cdot z \cdot \cot(\theta) = 337.008 \text{ mm}$$

$$\min(0.75 \cdot d, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad s := 300 \text{ mm}$$

Návrh: Třmínek dvojstržný  $\phi 10$  á 300 mm

$$V_{Rd,s} := \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s} \cdot z \cdot \cot(\theta) = 209.975 \text{ kN} \geq V_{Ed1} = 186.917 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

Osová vzdálenost větví třmíneků:

$$s_t := b_w - 2 \cdot c_{nom} - \phi_{sw} = 100 \text{ mm} \leq \min(0.75 \cdot d, 600 \text{ mm}) = 600 \text{ mm}$$

Kontrola stupně vyztužení:

$$\rho_{sw,min} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{f_{yk}} = 0.0011 \leq \rho_{sw} := \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s} = 0.0035 \leq \rho_{sw,max} := \frac{0.5 \cdot v \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} = 0.0184$$

... Vyhovuje.

Návrh smykové výztuže - konstrukční třmínky:

$$s_{kčni} := 400 \text{ mm} \leq \min(0.75 \cdot d, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm}$$

$$V_{Rd;kčni} := \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{s_{kčni}} \cdot z \cdot \cot(\theta) = 157.481 \text{ kN}$$

**Návrh: Třmínek dvojtřížný  $\phi 10$  á 400 mm**

Kontrola stupně vyztužení:

$$\rho_{sw,min} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{f_{yk}} = 0.0011 \leq \rho_{sw} := \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_{kčni}} = 0.0026 \leq \rho_{sw,max} := \frac{0.5 \cdot v \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} = 0.0184$$

... Vyhovuje.

$$\Delta l := z \cdot \cot(\theta) = 922.352 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost, na kterou lze použít konstrukční třmínky}$$

$$L_{kčni} := \frac{L \cdot 0.5}{V_{Ed}} \cdot V_{Rd;kčni} + \Delta l = 5095.351 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost od středu vazníku, po kterou lze umístit konstrukční třmínky}$$

**Posouzení STM v oblasti kolem otvoru:**

$$h_h := d_{12} + d_{11} = 390 \text{ mm}$$

$$h_d := d_{10} = 360 \text{ mm}$$

$$r := \frac{d_0}{2} = 75 \text{ mm}$$

$$A_{sv,req} := \frac{V_{Ed,1}}{f_{ywd}} = 370.973 \text{ mm}^2$$

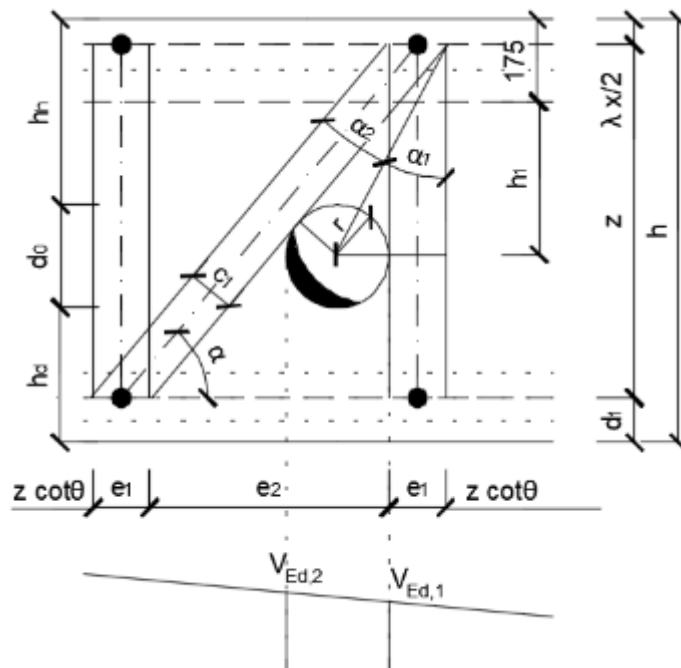
**Návrh: Třmínek dvojtřížný  
5x  $\phi 10$**

$$n := 5 \quad \dots \text{ počet třmíneků v táhle}$$

$$\phi_{sw} := 10 \text{ mm} \quad \dots \text{ průměr třmínku}$$

$$A_{sw} := \frac{\phi_{sw}^2 \cdot \pi}{4} = 78.54 \text{ mm}^2$$

$$A_{sv,prov} := 2 \cdot n \cdot A_{sw} = 785.398 \text{ mm}^2$$



Obr. B.3 Schéma STM kolem otvoru

$$A_{sv;req} = 370.973 \text{ mm}^2 \leq A_{sv;prov} = 785.398 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$s_{l;min} \geq \max(20 \text{ mm}, 1.2 \cdot \phi_{sw}, D_{max} + 5 \text{ mm}) = 21 \text{ mm} \rightarrow s_{l;min} := 60 \text{ mm}$$

$$e_1 := 2 \cdot c_{nom} + n \cdot \phi_{sw} + (n-1) \cdot s_{l;min} = 330 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 := \text{atan}\left(\frac{e_1 + r}{h_h - 0.4 \cdot x + r}\right) = 43.156^\circ$$

$$\alpha_2 := \text{asin}\left(\frac{r}{\sqrt{(e_1 + r)^2 + (h_h - 0.4 \cdot x + r)^2}}\right) = 7.277^\circ$$

$$21,8^\circ \leq \alpha := 90^\circ - (\alpha_1 + \alpha_2) = 39.567^\circ \leq 45^\circ \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$c_1 := e_1 \cdot \sin(\alpha) = 210.204 \text{ mm}$$

$$v' := 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} = 0.8$$

$$\sigma_{c1} := \frac{V_{Ed;1}}{b_w \cdot c_1 \cdot \sin(\alpha)} = 8.031 \text{ MPa} \leq \sigma_{Rd;max} := 0.6 \cdot v' \cdot f_{cd} = 16 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

Nyní se ověří hodnoty tahové síly v dolním táhle a tlakové síly v horním pásu. Tedy, zda sekundární síly způsobené vlivem zabudování otvoru do nosníku nezapříčiní, že navržená ohybová výztuž nevyhoví. Pro horní tlačný pás se rovněž ověří, zda sekundární síly nepůsobí navýšení tlakové síly v horním pásu tak, že bude větší než původní síla v betonu použitá v posouzení na ohyb (Fcc).

$$z_{t,h} := \frac{\frac{(d_{12})^2 \cdot b}{2} + d_{13} \cdot b_w \cdot \left(d_{12} + \frac{d_{13}}{2}\right)}{d_{12} \cdot b + d_{13} \cdot b_w} = 348.5 \text{ mm}$$

$$z_{t,d} := h - z_{t,h} = 551.5 \text{ mm}$$

$$z_1 := z_{t,d} - d_1 = 458.5 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost od těžiště tažené výztuže po střed průřezu}$$

$$z_2 := z_{t,h} - \frac{\lambda \cdot x}{2} = 315.445 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost od těžiště tlačeného betonu po střed průřezu}$$

$$e_2 := \frac{z}{\tan(\alpha)} - e_1 = 606.634 \text{ mm} \quad \dots \text{ půdorysná délka vzpěry}$$

$$M_{Ed;2} := V_{Ed} \cdot \left(L_1 + r - \frac{e_2}{2}\right) - f_d \cdot \frac{\left(L_1 + r - \frac{e_2}{2}\right)^2}{2} = 255.936 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \dots \text{ ohybový moment ve středu půdorysné délky vzpěry}$$

$$N_{Ed;2} := 0 \text{ kN} \quad \dots \text{ normálová síla působící ve středu půdorysné délky vzpěry (nosník není namáhaný normálovou silou, proto 0 kN)}$$

$$F_t := \frac{M_{Ed;2} + N_{Ed;2} \cdot z_1}{z} + \frac{|V_{Ed;2}|}{\tan(\alpha)} + N_{Ed;2} = 532.739 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} := \frac{F_t}{f_{yd}} = (1.225 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \leq A_{s,prov} = (2.281 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení dolního táhla.}$$

$$F_c := -\frac{M_{Ed;2} + N_{Ed;2} \cdot z}{z} - \frac{|V_{Ed;2}|}{\tan(\alpha)} + N_{Ed;2} = -532.739 \text{ kN}$$

$$F_{Rd;c} := -\lambda \cdot x \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd} = -991.651 \text{ kN}$$

$$|F_c| = 532.739 \text{ kN} \leq |F_{Rd;c}| = 991.651 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení horního pásu.}$$

**Styčnick C-C-T:**

$$|F_c| = 532.739 \text{ kN} \leq 0.85 \cdot x \cdot b \cdot v' \cdot f_{cd} = 842.903 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení horního pásu.}$$

$$\frac{V_{Ed;1}}{e_1 \cdot b_w} = 3.258 \text{ MPa} \leq 0.85 \cdot v' \cdot f_{cd} = 22.667 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení táhla.}$$

$$\sigma_{c1} = 8.031 \text{ MPa} \leq 0.85 \cdot v' \cdot f_{cd} = 22.667 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení vzpěry.}$$

**Styčnick C-T-T:**

$$\sigma_{c1} = 8.031 \text{ MPa} \leq 0.75 \cdot v' \cdot f_{cd} = 20 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení vzpěry.}$$

$$\frac{F_t}{b_w \cdot 2 \cdot d_1} = 19.095 \text{ MPa} \leq 0.75 \cdot v' \cdot f_{cd} = 20 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení dolního pásu.}$$

$$\frac{V_{Ed;1}}{e_1 \cdot b_w} = 3.258 \text{ MPa} \leq 0.75 \cdot v' \cdot f_{cd} = 20 \text{ MPa} \quad \dots \text{ Vyhovuje posouzení táhla.}$$

**Návrh výztuže zachycující příčné tahy ve vzpěře (1/4 délky vzpěry z každé strany):**

$$A_{sh,req} := \frac{0.25 \cdot \sigma_{c1} \cdot \cos(\alpha) \cdot b_w \cdot c_1}{f_{yd}} = 112.239 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ vodorovná výztuž}$$

$$A_{sv,req} := \frac{0.25 \cdot \sigma_{c1} \cdot \sin(\alpha) \cdot b_w \cdot c_1}{f_{yd}} = 92.743 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ svislá výztuž}$$

$$\phi_t := 10 \text{ mm} \quad \dots \text{ průměr příčné výztuže}$$

$$A_{st} := 2 \cdot \frac{\pi \cdot \phi_t^2}{4} = 157.08 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ z každé strany jeden prut}$$

$$A_{sh,req} = 112.239 \text{ mm}^2 \leq A_{st,prov} := A_{st} = 157.08 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje návrh vodorovné výztuže.}$$

$$0.002 \cdot b_w \cdot z = 232.183 \text{ mm}^2 \leq 2 \cdot A_{st,prov} = 314.159 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje návrh vodorovné výztuže. (min. plocha výztuže D-oblasti)}$$

$$A_{sv,req} = 92.743 \text{ mm}^2 \leq A_{st,prov} := A_{st} = 157.08 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje návrh svislé výztuže.}$$

$$0.001 \cdot b_w \cdot \frac{z}{\tan(\alpha)} = 140.495 \text{ mm}^2 \leq 2 \cdot A_{st,prov} = 314.159 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje návrh svislé výztuže. (min. plocha výztuže D-oblasti)}$$

Tedy, umístění 2x10 mm ve 1/4 délky vzpěry v horní části vzpěry, 2x10 mm ve 1/4 délky vzpěry v dolní části vzpěry.

Ukotvení vodorovné výztuže na kotevní délku (šikmá výztuž ve formě třmínku):

$$\eta_1 := 0.7 \quad \eta_2 := 1$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 3.045 \text{ MPa}$$

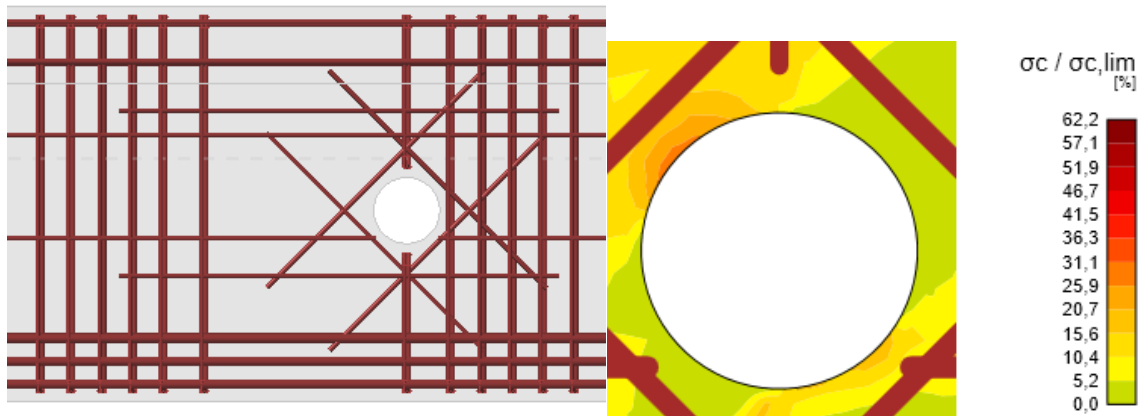
$$\sigma_{sd} := \frac{A_{sh,req}}{A_{st,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 310.667 \text{ MPa}$$

$$l_{b,req} := \frac{\phi_t}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = 255.063 \text{ mm}$$

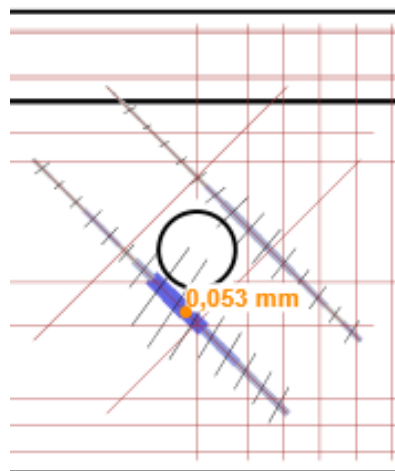
$$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad \alpha_4 := 0.7 \quad \alpha_5 := 1 \quad \dots \text{ konzervativní volba hodnot součinitelů}$$

$$l_{bd} := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req} = 178.544 \text{ mm}$$

$$l_{bd,min} := \max(0.3 \cdot l_{b,req}, 10 \cdot \phi_t, 100 \text{ mm}) = 100 \text{ mm} \leq l_{bd} := 250 \text{ mm} \quad \dots \text{ kotevní délka}$$



Obr. B.4 Schéma vyztužení oblasti kolem otvoru vlevo a využití pevnosti betonu vpravo



Obr. B.5 Velikost šířky trhliny v oblasti otvoru

## NÁVRH KOTEVNÍ A STYKOVACÍ DÉLKY:

$$f_{ctk0.05} := 2.9 \text{ MPa} \quad \phi := 22 \text{ mm} \quad A_{s,prov} := (2.281 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$\gamma_C := 1.5 \quad \theta := 40^\circ \quad \alpha := 90^\circ \quad V_{Ed} := 221.711 \text{ kN}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk0.05}}{\gamma_C} = 1.933 \text{ MPa}$$

$$z := 773.945 \text{ mm}$$

$$a_1 := \frac{z}{2} \cdot (\cot(\theta) - \cot(\alpha)) = 461.176 \text{ mm}$$

$$\Delta F_{td} := |V_{Ed}| \cdot \frac{a_1}{z} = 132.112 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} := \Delta F_{td} = 132.112 \text{ kN}$$

### Kotevní délka:

$$\eta_1 := 1 \quad \eta_2 := 1$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 4.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} := \frac{F_{Ed}}{A_{s,prov}} = 57.919 \text{ MPa}$$

$$l_{b,req} := \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = 73.23 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad \alpha_4 := 0.7 \quad \alpha_5 := 1 \quad \dots \text{ konzervativní volba}$$

$$l_{bd} := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req} = 51.261 \text{ mm}$$

$$l_{bd,min} := \max(0.3 \cdot l_{b,req}, 10 \cdot \phi, 100 \text{ mm}) = 220 \text{ mm} \leq l_{bd} := 220 \text{ mm} \dots \text{ kotevní délka}$$

### Stykování výztuže přesahem:

$$\alpha_6 := 1.5 \dots \text{ konzervativní volba}$$

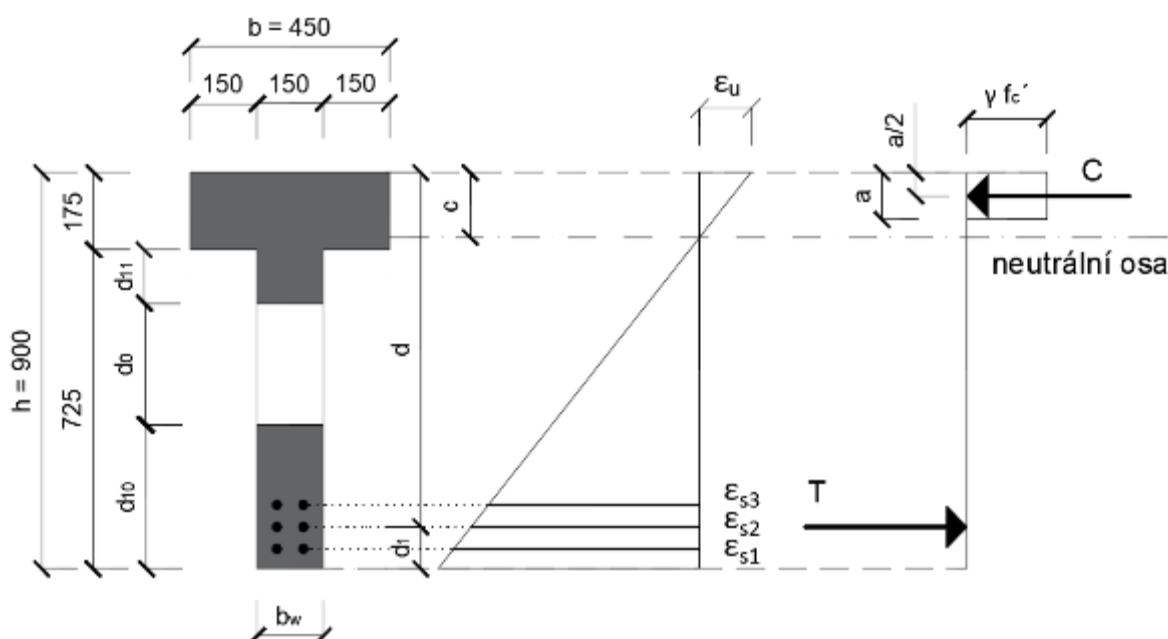
$$l_{0,min} := \max(0.3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}, 15 \cdot \phi, 200 \text{ mm}) = 330 \text{ mm}$$

$$l_0 := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req} = 109.846 \text{ mm}$$



## Příloha C – Nosník s velkým otvorem podle ACI 318

Výpočet nosníku s velkým otvorem vycházející podle přístupu ACI 318.



Obr. C.1 Schéma pro stanovení ohybové únosnosti

### Geometrie průřezu:

$$b := 450 \text{ mm} \quad h := 900 \text{ mm} \quad b_w := 150 \text{ mm}$$

$$A_c := 725 \text{ mm} \cdot b_w + 175 \text{ mm} \cdot b = (1.875 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

$$d_{11} := 45 \text{ mm}$$

$$d_o := 380 \text{ mm} \geq 0.4 \cdot h = 360 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o velký otvor.}$$

$$d_{10} := 725 \text{ mm} - d_{11} - d_o = 300 \text{ mm}$$

### Krytí výztuže dle EC2:

$$c_c := 20 \text{ mm} \quad \dots \text{ ke třmínku}$$

### Materiály:

Beton C50/60:

$$f_c' := 50 \text{ MPa} \quad \gamma := 0.85 \quad \epsilon_u := 0.003 \quad E_c := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \text{ MPa}}} \text{ MPa} = 33.234 \text{ GPa}$$

$$\theta_1 := 0.85 - \frac{0.05 \cdot \left( \frac{f_c'}{\text{MPa}} - 28 \right)}{7} = 0.693 \quad 28 < f_c' < 55 \text{ [MPa]} \quad \gamma_{zb} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Betonářská výztuž B500B:

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\text{Ohyb: } f_y := 500 \text{ MPa} \\ d_b := 22 \text{ mm}$$

$$\text{Diagonální výztuž: } f_{ywd} := 500 \text{ MPa} \\ d_{bd} := 12 \text{ mm}$$

$$\text{Smyk: } f_{yv} := 500 \text{ MPa} \\ d_{bw} := 10 \text{ mm}$$

Zatížení a vytvoření kombinace pro návrhové vnější zatížení dle ACI 318:

$$g := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D := \gamma_{zB} \cdot A_c \cdot g + 3.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 7.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16.088 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ stálé zatížení}$$

$$S := 9.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ sníh}$$

$$W := 1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ vítr (tlak)}$$

$$U := 1.2 \cdot D + 1.6 \cdot S + 0.8 \cdot W = 35.529 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad f_d := U = 35.529 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Vnitřní síly:

$$l_o := 600 \text{ mm} \geq \max(d_{10}, d_{11} + 175 \text{ mm}) = 300 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o velký otvor.}$$

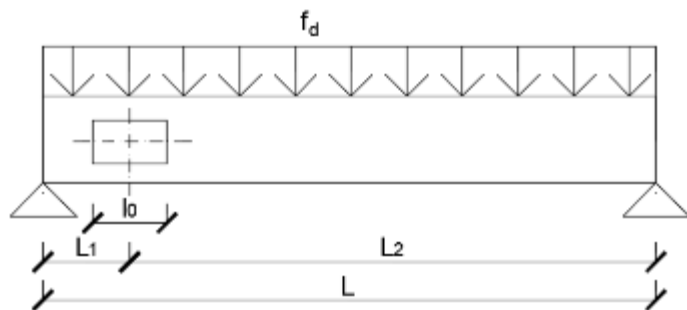
$$L_1 := \left( 1451 \text{ mm} + \frac{l_o}{2} \right) = 1751 \text{ mm}$$

$$L := 11750 \text{ mm}$$

$$L_2 := L - L_1 = 9999 \text{ mm}$$

$$V_{Ed} := \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L = 208.733 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = 613.153 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Obr. C.2 Schéma otvoru a zatížení

$$V_m := \frac{V_{Ed}}{0.5 \cdot L} \cdot (0.5 \cdot L - L_1) = 146.522 \text{ kN} \quad M_m := V_{Ed} \cdot L_1 - \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L_1^2 = 311.025 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení vnitřních sil na dolním a horním pásu:

$$z_t := \frac{b \cdot 175 \text{ mm} \cdot \frac{175 \text{ mm}}{2} + b_w \cdot d_{11} \cdot (175 \text{ mm} + d_{11} \cdot 0.5)}{b \cdot 175 \text{ mm} + b_w \cdot d_{11}} = 96.184 \text{ mm}$$

$$I_{gt1} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot (175 \text{ mm})^3 + b \cdot 175 \text{ mm} \cdot \left( z_t - \frac{175 \text{ mm}}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot d_{11}^3$$

$$I_{gt} := I_{gt1} + b_w \cdot d_{11} \cdot \left( \frac{d_{11}}{2} + 175 \text{ mm} - z_t \right)^2 = (2.773 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$I_{gb} := \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot d_{10}^3 = (3.375 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$V_t := V_m \cdot \left( \frac{I_{gt}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) = 66.093 \text{ kN} \quad V_b := V_m \cdot \left( \frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) = 80.429 \text{ kN}$$

$$z := d - \frac{a}{2} = 777.186 \text{ mm} \quad N_t := -\frac{M_m}{z} = -400.194 \text{ kN} \quad N_b := -N_t = 400.194 \text{ kN}$$

Stanovení ohybového momentu pro horní pás:

$$M_1 := \frac{-f_d \cdot l_0^2}{8} - \frac{V_t \cdot l_0}{2} = -21.427 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_2 := \frac{-f_d \cdot l_0^2}{8} + \frac{V_t \cdot l_0}{2} = 18.229 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení ohybového momentu pro dolní pás:

$$M_3 := -\frac{V_b \cdot l_0}{2} = -24.129 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_4 := \frac{V_b \cdot l_0}{2} = 24.129 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Kritérium štíhlosti tlačného pásu (horní pás):**

$$r := \sqrt{\frac{I_{gt}}{b \cdot 175 \text{ mm} + b_w \cdot d_{11}}} = 56.954 \text{ mm} \quad K := 1$$

$$\frac{K \cdot l_0}{r} = 10.535 < 34 - 12 \cdot \frac{M_3}{M_1} = 20.487 \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

**Návrh výztuže na omezení šířky trhliny:**

Diagonální výztuž:

$$\eta := 2 \quad \phi := 0.75$$

$$\alpha := 45^\circ$$

$$A_{d,req} := \frac{0.75 \cdot \eta \cdot V_m}{\phi \cdot f_{ywd} \cdot \sin(\alpha)} = 828.851 \text{ mm}^2 \leq A_{d,prov} := 2 \cdot 4 \cdot \frac{d_{bd}^2 \cdot \pi}{4} = 904.779 \text{ mm}^2$$

**Návrh: 2x4  $\phi$  12**

... Vyhovuje.

Svislá výztuž kolem otvoru:  $d_{bs} := 10 \text{ mm}$

$$A_{v,req} := \frac{0.25 \cdot \eta \cdot V_m}{\phi \cdot f_{ywd}} = 195.362 \text{ mm}^2 \leq A_{d,prov} := 2 \cdot 2 \cdot \frac{d_{bs}^2 \cdot \pi}{4} = 314.159 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

**Návrh: 2x2  $\phi$  10**

**Návrh smykové výztuže horního pásu:**

$$\phi := 0.75 \quad \dots \text{ smyk}$$

$$d_{bt} := 12 \text{ mm} \quad \dots \text{ průměr ohybové výztuže}$$

$$d_{ut} := 175 \text{ mm} + d_{11} - c_c - d_{bw} - \frac{d_{bt}}{2} = 184 \text{ mm}$$

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left(\frac{d_{ut}}{\text{m}}\right) \cdot \text{kN} = 24.395 \text{ kN}$$

horní řada v přírubě: 4x12 mm  
dolní řada v přírubě: 2x12 mm  
dolní řada ve stojně: 2x12 mm

$$V_t = 66.093 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 121.976 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$V_s := V_t - \phi V_c = 41.698 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 55.597 \text{ kN}$$

$$A_{ut} := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

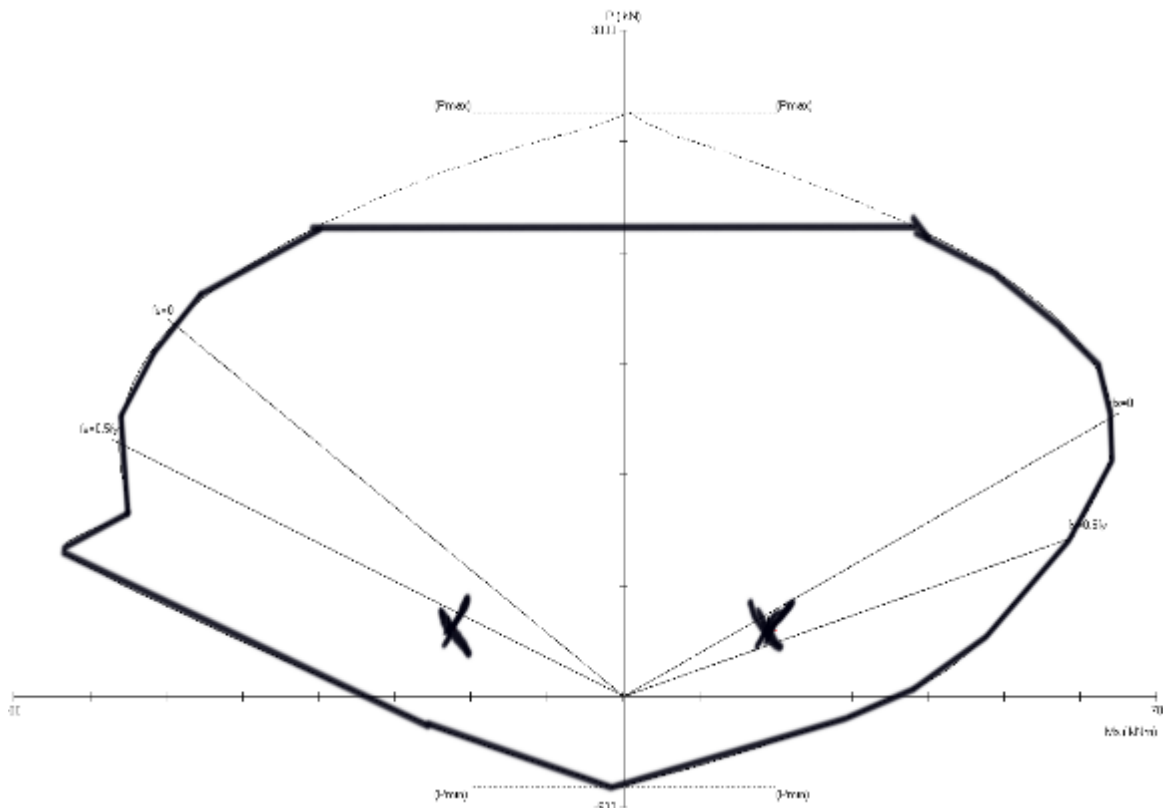
$$s := \frac{\phi \cdot A_{ut} \cdot f_{yv} \cdot d_{ut}}{\phi V_s} = 194.948 \text{ mm}$$

Návrh: Třmínek dvojtřížný  $\phi 10$  á  $140$  mm

$$M_1 = -21.427 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_2 = 18.229 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$N_t = -400.194 \text{ kN}$$



Obr. C.3 Interakční diagram pro průřez horního pásu [spColumn]

Návrh smykové výztuže dolního pásu:

Navržená tahová výztuž  $6 \times 22$  mm

Přídavná  $2 \times 12$  mm

$$d_{ub} := d_{10} - d_1 = 207 \text{ mm}$$

$$\phi V_c := \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{1 \cdot \text{MPa}}} \cdot \frac{b_w}{\text{mm}} \cdot \left(\frac{d_{ub}}{\text{m}}\right) \cdot \text{kN} = 27.445 \text{ kN}$$

$$V_b = 80.429 \text{ kN} \leq 5 \phi V_c = 137.223 \text{ kN} \quad \dots \text{ Vyhovuje.}$$

$$V_s := V_b - \phi V_c = 52.984 \text{ kN}$$

$$\phi V_s := \frac{V_s}{\phi} = 70.646 \text{ kN}$$

$$A_{ub} := 2 \cdot \frac{d_{bw}^2 \cdot \pi}{4} = 157.08 \text{ mm}^2$$

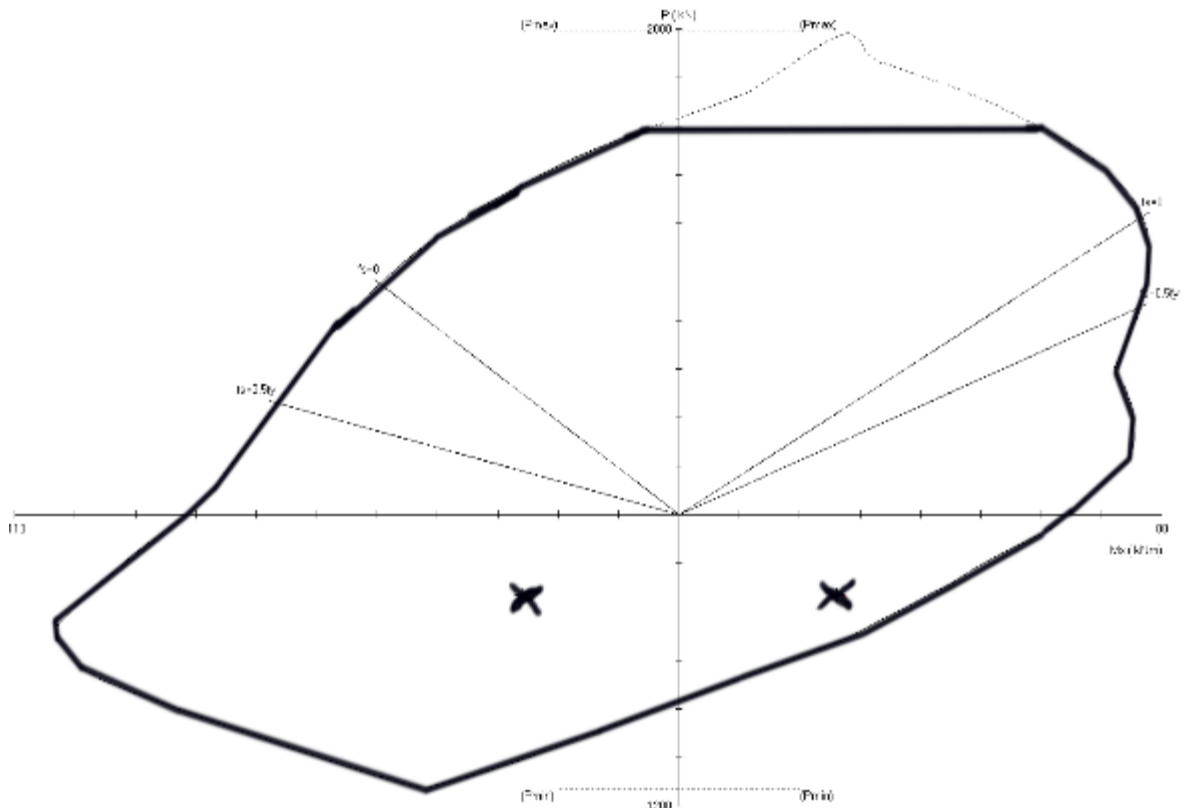
$$s := \frac{\phi \cdot A_{ut} \cdot f_{yv} \cdot d_{ub}}{\phi V_s} = 172.598 \text{ mm}$$

Návrh: Třmínek dvojtřížný  $\phi 10$  á  $140$  mm

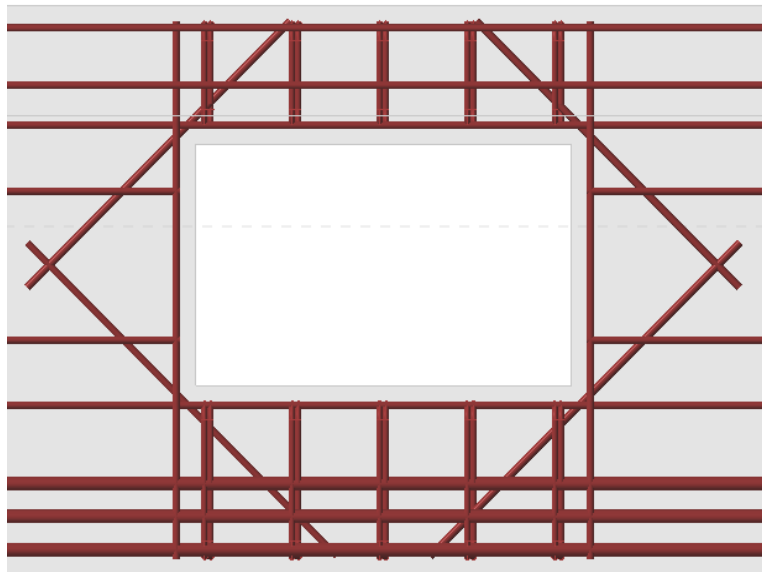
$$M_3 = -24.129 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$N_b = 400.194 \text{ kN}$$

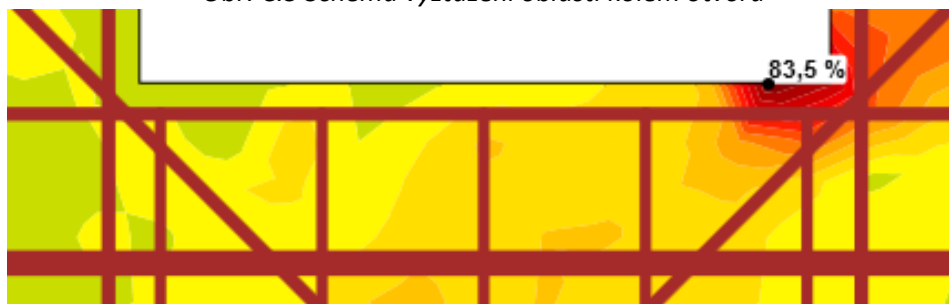
$$M_4 = 24.129 \text{ kN}\cdot\text{m}$$



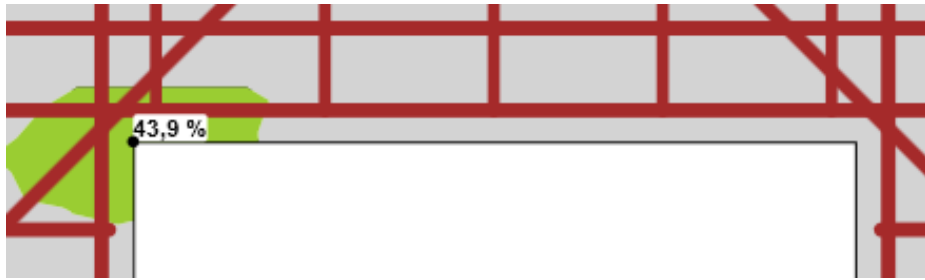
Obr. C.4 Interakční diagram pro průřez dolního pásu [spColumn]



Obr. C.5 Schéma vyztužení oblasti kolem otvoru



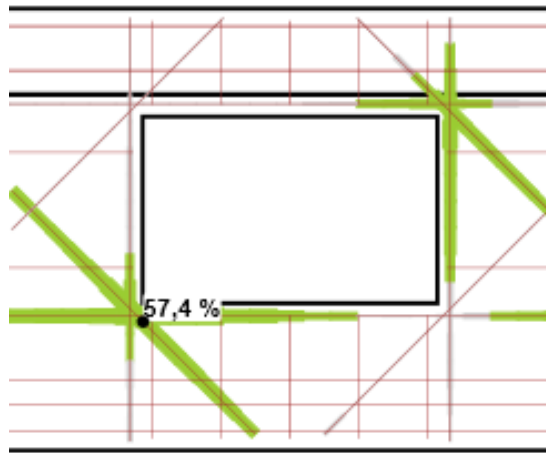
Obr. C.6 Využití pevnosti betonu v oblasti kolem otvoru



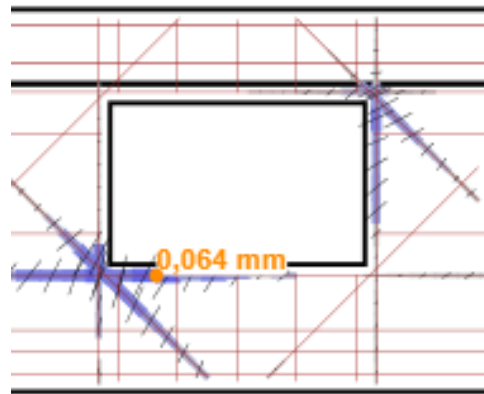
Obr. C.7 Omezení napětí - kvazi (překročení způsobí vznik nelineárního průběhu dotvarování)



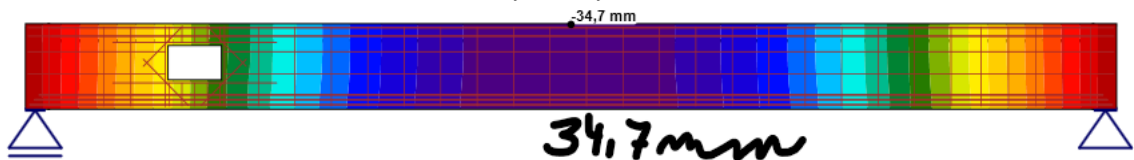
Obr. C.8 Omezení napětí – char (překročení způsobí vznik podélných trhlin)



Obr. C.9 Omezení napětí – char. (zabránění nepružných přetvoření, nepřijatelných trhlin)



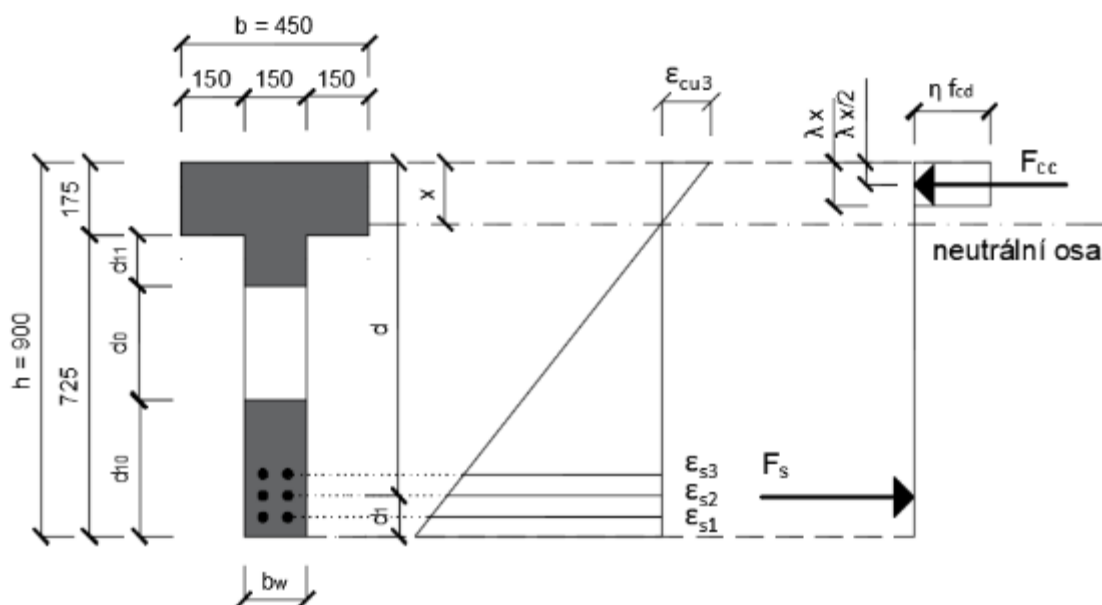
Obr. C.10 Velikost šířky trhliny v oblasti kolem otvoru



Obr. C.11 Velikost průhybu vazníku vlivem zabudování otvoru

## Příloha D – Nosník s velkým otvorem podle EC2

Výpočet nosníku s velkým otvorem pomocí zjednodušené metody DAfStB 459.



Obr. D.1 Schéma pro stanovení ohybové únosnosti

### Geometrie průřezu:

$$b := 450 \text{ mm} \quad h := 900 \text{ mm} \quad b_w := 150 \text{ mm} \quad d_{12} := 175 \text{ mm}$$

$$d_{11} := 45 \text{ mm}$$

$$d_0 := 380 \text{ mm} \geq 0.4 \cdot h = 360 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o velký otvor.}$$

$$d_{10} := h - d_{12} - d_{11} - d_0 = 300 \text{ mm} \quad d_{13} := d_{10} + d_0 + d_{11} = 725 \text{ mm}$$

$$A_c := d_{13} \cdot b_w + d_{12} \cdot b = (1.875 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

### Krytí výztuže dle EC2:

$$c_{nom} := 20 \text{ mm} \quad \dots \text{ ke třmínku}$$

### Materiály:

Beton C50/60:

$$f_{ck} := 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk0.05} := 2.9 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 4.1 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$\varepsilon_{cu3} := 0.0035$$

$$D_{max} := 16 \text{ mm}$$

$$\lambda := 0.8$$

$$\eta := 1$$

$$\gamma_{zB} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 33.333 \text{ MPa} \quad f_{ctd} := \frac{f_{ctk0.05}}{\gamma_c} = 1.933 \text{ MPa}$$

Betonářská výztuž B500B:

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

$$f_{ywk} := 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s := 1.15$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

$$\phi_{sw} := 10 \text{ mm} \quad \phi_s := 22 \text{ mm}$$

Zatížení a vytvoření kombinace pro návrhové vnější zatížení dle EC:

$$f_{g;s} := \gamma_{zB} \cdot A_c \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 3.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 7.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16.088 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ stálé zatížení}$$

$$f_{q;s} := 9.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ sníh}$$

$$f_{q;w} := 1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \dots \text{ vítr (tlak)}$$

$$f_d := f_{g;s} \cdot 1.35 + f_{q;s} \cdot 1.5 + f_{q;w} \cdot 1.5 = 37.738 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Vnitřní síly:

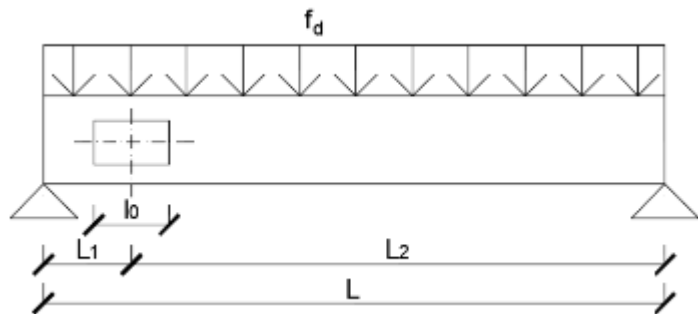
$$l_0 := 600 \text{ mm} \geq \max(d_{10}, d_{11} + d_{12}) = 300 \text{ mm} \quad \dots \text{ Vyhovuje, jedná se o velký otvor.}$$

$$L := 11750 \text{ mm} \quad L_1 := 1751 \text{ mm}$$

$$L_2 := L - L_1 = 9999 \text{ mm}$$

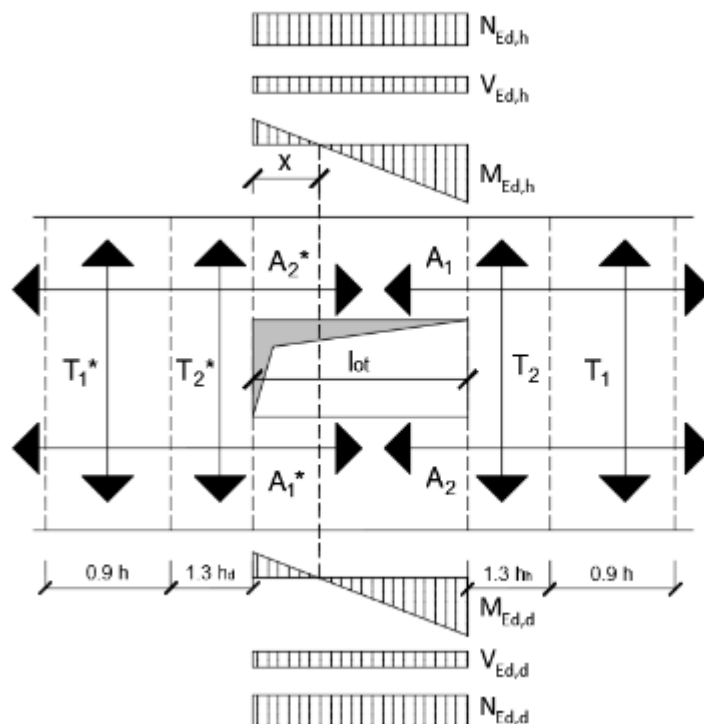
$$V_{Ed} := \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L = 221.711 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = 651.277 \text{ kN}\cdot\text{m}$$



Obr. D.2 Schéma otvoru a zatížení

Posouzení STM v oblasti kolem otvoru - jedná se o STM s kladnou posouvající silou:

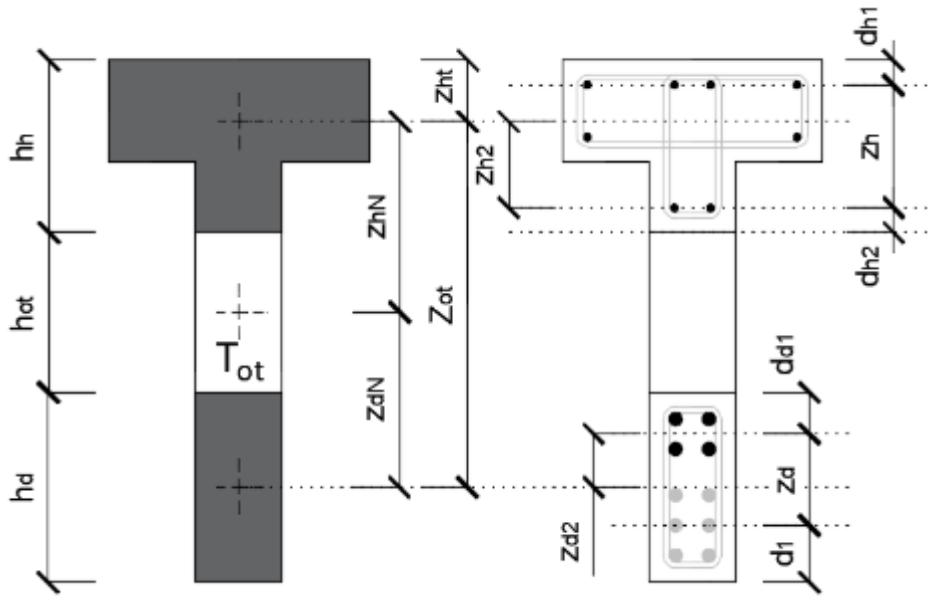


Obr. D.3 Schéma táhel a sekundárních sil na pásech



$l_{ot} := l_o = 600 \text{ mm}$  ... délka otvoru

$h_{ot} := d_o = 380 \text{ mm}$



Obr. D.4 Schéma parametrů vstupujících do výpočtu

**Primární vnitřní síly na líci otvoru:**

$$V_{Ed;líc} := V_{Ed} - f_d \cdot \left( L_1 - \frac{l_{ot}}{2} \right) = 166.953 \text{ kN}$$

$$M_{Ed;líc} := V_{Ed} \cdot \left( L_1 - \frac{l_{ot}}{2} \right) - f_d \cdot \left( L_1 - \frac{l_{ot}}{2} \right)^2 \cdot 0.5 = 281.976 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení sekundárních vnitřních sil:

$$z_{ht} := \frac{b \cdot d_{12} \cdot \frac{d_{12}}{2} + b_w \cdot d_{11} \cdot (d_{12} + d_{11} \cdot 0.5)}{b \cdot d_{12} + b_w \cdot d_{11}} = 96.184 \text{ mm}$$

$$I_{h1} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot (d_{12})^3 + b \cdot d_{12} \cdot \left( z_{ht} - \frac{d_{12}}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot d_{11}^3$$

$$I_h := I_{h1} + b_w \cdot d_{11} \cdot \left( \frac{d_{11}}{2} + d_{12} - z_{ht} \right)^2 = (2.773 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$I_d := \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot d_{10}^3 = (3.375 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$V_{Ed;h} := V_{Ed;líc} \cdot \frac{I_h}{I_h + I_d} = 75.309 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová posouvající síla na horním pásu}$$

$$V_{Ed;d} := V_{Ed;líc} \cdot \frac{I_d}{I_h + I_d} = 91.644 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová posouvající síla na dolním pásu}$$

$$A_h := b \cdot d_{12} + d_{11} \cdot b_w = (8.55 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$A_d := d_{10} \cdot b_w = (4.5 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$z_{ot} := h - z_{ht} - \frac{d_{10}}{2} = 653.816 \text{ mm}$$

$$w := \frac{\frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d}}{z_{ot}^2 \cdot \left( \frac{I_h}{I_d} + \frac{I_h}{A_h} + \frac{I_h}{A_d} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_h} + \frac{I_h^2}{I_d \cdot A_d} \right)} = 0.047$$

$$x := I_{ot} \cdot \left( \frac{1}{2} - \left( \frac{M_{Ed,lic}}{V_{Ed,lic} \cdot I_{ot}} + \frac{1}{2} \right) \cdot w \right) = 207.483 \text{ mm} \quad \dots \text{ poloha nulového momentu na obou pásech}$$

$$M_{Ed,h} := \max(V_{Ed,h} \cdot x, V_{Ed,h} \cdot (I_{ot} - x)) = 29.56 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \dots \text{ návrhový ohybový moment na horním páse}$$

$$M_{Ed,d} := \max(V_{Ed,d} \cdot x, V_{Ed,d} \cdot (I_{ot} - x)) = 35.972 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \dots \text{ návrhový ohybový moment na dolním páse}$$

$$N_{Ed,h} := \frac{-M_{Ed,lic}}{z_{ot}} = -431.278 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová normálová síla v horním páse}$$

$$N_{Ed,d} := \frac{M_{Ed,lic}}{z_{ot}} = 431.278 \text{ kN} \quad \dots \text{ návrhová normálová síla v dolním páse}$$

Vyjádření sil v táhlech a návržení výztuže:

$$z_{dN} := \frac{d_0}{2} + \frac{d_{10}}{2} = 340 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost mezi těžištěm otvoru a dolního páse}$$

$$z_{hN} := z_{ot} - z_{dN} = 313.816 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost mezi těžištěm otvoru a horního páse}$$

$$h_h := d_{12} + d_{11} = 220 \text{ mm}$$

$$h_d := d_{10} = 300 \text{ mm}$$

Předpoklad výztuže pro táhlo A2 4x22 mm  $\phi_d := 22 \text{ mm}$   $s_1 = 30 \text{ mm}$   $n_d := 4$

$$d_{d1} := c_{nom} + \phi_{sw} + \phi_d + \frac{s_1}{2} = 67 \text{ mm}$$

$$z_d := h_d - d_1 - d_{d1} = 140 \text{ mm} \quad \dots \text{ rameno vnitřních sil na dolním páse}$$

$$z_{d2} := \frac{h_d}{2} - d_{d1} = 83 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost mezi těžištěm dolního páse a táhla}$$

Předpoklad výztuže pro táhlo A1 3x14 mm  $\phi_h := 14 \text{ mm}$   $n_h := 3$

Tlaková výztuž: 4x12 mm

$$d_{h1} := c_{nom} + \phi_{sw} + \frac{12 \text{ mm}}{2} = 36 \text{ mm} \quad \dots \text{ od horní hrany průřezu k tlakové výztuži}$$

$$d_{h2} := c_{nom} + \phi_{sw} + \frac{\phi_h}{2} = 37 \text{ mm} \quad \dots \text{ od dolní hrany průřezu k táhlu A1}$$

$$z_h := h_h - d_{h1} - d_{h2} = 147 \text{ mm} \quad \dots \text{ rameno vnitřních sil na horním páse}$$

$$z_{h2} := h_h - d_{h2} - z_{ht} = 86.816 \text{ mm} \quad \dots \text{ vzdálenost mezi těžištěm horního páse a táhla}$$

**Horní táhlo A1, A2\*:**

$\Theta_h := 30^\circ$  ... úhel sklonu tlačných diagonál v horním pásu

$$A_1 := \frac{-M_{Ed;h} - N_{Ed;h} \cdot z_{h2}}{z_h} + \frac{|V_{Ed;h}|}{\tan(\Theta_h)} = 184.056 \text{ kN}$$

$$A_{s;A1;req} := \frac{A_1}{f_{yd}} = 423.328 \text{ mm}^2 \leq A_{s;A1;prov} := n_h \cdot \frac{\pi \cdot \phi_h^2}{4} = 461.814 \text{ mm}^2$$

$$\eta_1 := 0.7 \quad \eta_2 := 1$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 3.045 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} := \frac{A_{s;A1;req}}{A_{s;A1;prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 398.549 \text{ MPa}$$

$$l_{b;req} := \frac{\phi_h}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = 458.102 \text{ mm}$$

$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad \alpha_4 := 0.7 \quad \alpha_5 := 1$  ... konzervativní volba hodnot součinitelů

$$l_{bd} := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b;req} = 320.672 \text{ mm}$$

$$l_{bd;min} := \max(0.3 \cdot l_{b;req}, 10 \cdot \phi_h, 100 \text{ mm}) = 140 \text{ mm} \leq l_{bd} := 340 \text{ mm} \text{ ... kotevní délka}$$

$$l_e := 0.6 \cdot (h + \max(h_h, h_d) + l_{bd}) = 924 \text{ mm} \text{ ... kotevní délka od otvoru směrem k podpoře}$$

**Dolní táhlo A2, A1\*:**

$\Theta_d := 45^\circ$  ... úhel sklonu tlačných diagonál v horním pásu

$$A_2 := \frac{M_{Ed;d} + N_{Ed;d} \cdot z_{d2}}{z_d} + \frac{|V_{Ed;d}|}{\tan(\Theta_d)} = 604.273 \text{ kN}$$

$$A_{s;A2;req} := \frac{A_2}{f_{yd}} = (1.39 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \leq A_{s;A2;prov} := n_d \cdot \frac{\pi \cdot \phi_d^2}{4} = (1.521 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$\eta_1 := 0.7 \quad \eta_2 := 1$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 3.045 \text{ MPa} \quad \sigma_{sd} := \frac{A_{s;A2;req}}{A_{s;A2;prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 397.409 \text{ MPa}$$

$$l_{b;req} := \frac{\phi_h}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = 456.792 \text{ mm}$$

$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad \alpha_4 := 0.7 \quad \alpha_5 := 1$  ... konzervativní volba hodnot součinitelů

$$l_{bd} := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b;req} = 319.755 \text{ mm}$$

$$l_{bd;min} := \max(0.3 \cdot l_{b;req}, 10 \cdot \phi_h, 100 \text{ mm}) = 140 \text{ mm} \leq l_{bd} := 340 \text{ mm} \text{ ... kotevní délka}$$

$$l_e := 0.6 \cdot (h + \max(h_h, h_d) + l_{bd}) = 924 \text{ mm} \text{ ... kotevní délka od otvoru směrem k podpoře}$$

### Svislé táhlo T1:

$$T_{1V} := |V_{Ed;lic}| = 166.953 \text{ kN}$$

$$T_{1M} := \frac{1.3 \cdot A_1 \cdot h_d \cdot h_h + 1.6 \cdot A_2 \cdot h_d \cdot (0.8 \cdot h_h + 1.1 \cdot h_{ot})}{0.7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} = 245.859 \text{ kN} \geq 0$$

$N_{Ed} := 0 \text{ kN}$  ... návrhová normálová síla od vnějšího zatížení

$$T_{1N} := N_{Ed} \cdot \frac{z_{dN}}{z_{dN} + z_{hN}} \cdot \frac{z_{hN}}{0.9 \cdot h + 1.3 \cdot h_h} = 0 \text{ N}$$

$$T_1 := T_{1N} + T_{1V} + T_{1M} = 412.813 \text{ kN}$$

Předpoklad výztuže pro táhlo T1 7x10  $\phi_{t1} := 10 \text{ mm}$   $n_{t1} := 7$

$$A_{s;T1;req} := \frac{T_1}{f_{yd}} = 949.469 \text{ mm}^2 \leq A_{s;T1;prov} := 2 \cdot n_{t1} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{t1}^2}{4} = (1.1 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

### Svislé táhlo T2:

$$T_{2V} := |V_{Ed;h}| = 75.309 \text{ kN}$$

$$T_{2M} := \frac{1.3 \cdot A_2 \cdot h_d \cdot h_h + 1.6 \cdot A_1 \cdot h_h \cdot (0.8 \cdot h_d + 1.1 \cdot h_{ot})}{0.7 \cdot h^2 + h_h \cdot h} = 123.499 \text{ kN} \geq 0$$

$$T_{2N} := -N_{Ed} \cdot \frac{z_{dN}}{z_{dN} + z_{hN}} \cdot \frac{z_{hN}}{0.9 \cdot h + 1.3 \cdot h_h} = 0 \text{ N}$$

$$T_2 := T_{2N} + T_{2V} + T_{2M} = 198.808 \text{ kN}$$

Předpoklad výztuže pro táhlo T2 3x10  $\phi_{t2} := 10 \text{ mm}$   $n_{t2} := 3$

$$A_{s;T2;req} := \frac{T_2}{f_{yd}} = 457.259 \text{ mm}^2 \leq A_{s;T2;prov} := 2 \cdot n_{t2} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{t2}^2}{4} = 471.239 \text{ mm}^2$$

Návrhové vnitřní síly pro návrh dolního pásu:      Návrhové vnitřní síly pro návrh horního pásu:

$$N_{Ed;d} = 431.278 \text{ kN}$$

$$N_{Ed;h} = -431.278 \text{ kN}$$

$$V_{Ed;d} = 91.644 \text{ kN}$$

$$V_{Ed;h} = 75.309 \text{ kN}$$

$$M_{Ed;d} = 35.972 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed;h} = 29.56 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

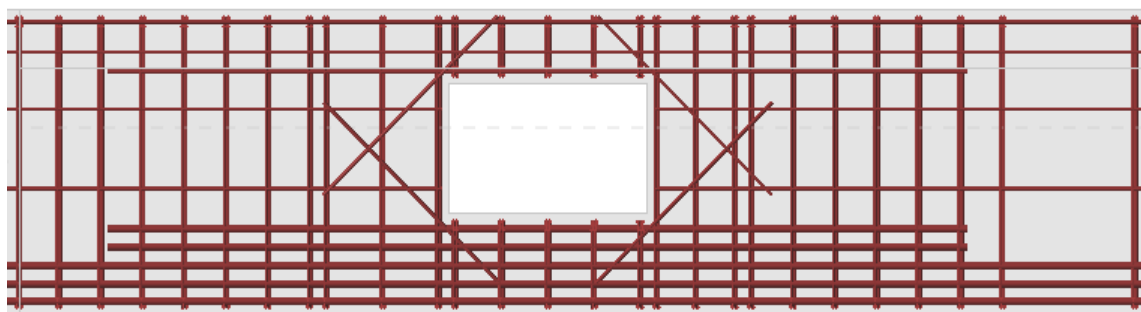
### Návrh: Třmínek dvojitřžný $\phi$ 10 á 140 mm pro horní a spodní pás

$N_{Ed}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$M_{Edy}$ [kNm]	$M_{Rdy}$ [kNm]	$V_{Edz}$ [kN]	$V_{Rdz}$ [kN]	Posouzení
-431,28	-3306,16	29,56 → 30,21	74,99	75,31	122,32	Vyhovuje

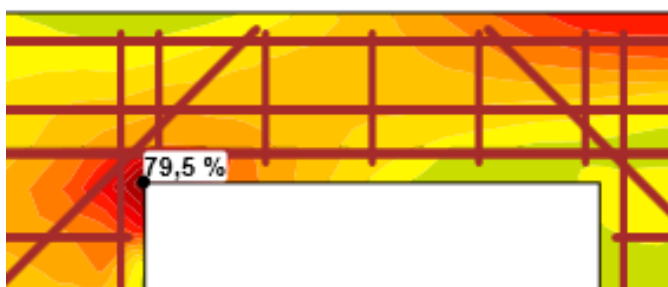
Obr. D.5 Posouzení horního pásu na vnitřní síly v softwaru FIN EC 2021

$N_{Ed}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$M_{Edy}$ [kNm]	$M_{Rdy}$ [kNm]	$V_{Edz}$ [kN]	$V_{Rdz}$ [kN]	Posouzení
431,28	1771,15	35,97 → 36,62	123,08	91,64	113,32	Vyhovuje

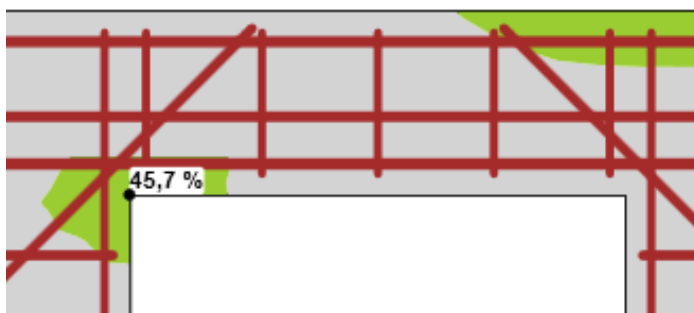
Obr. D.6 Posouzení dolního pásu na vnitřní síly v softwaru FIN EC 2021



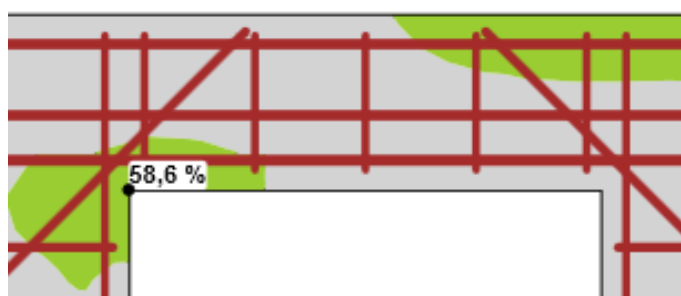
Obr. D.7 Schéma vyztužení oblasti kolem otvoru



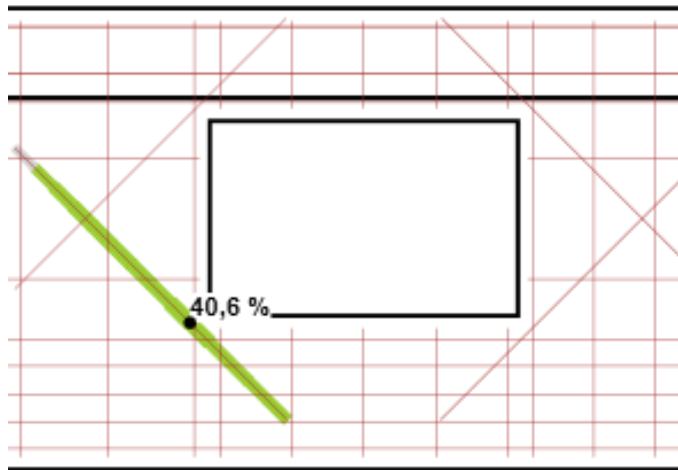
Obr. D.8 Využití pevnosti betonu oblasti kolem otvoru



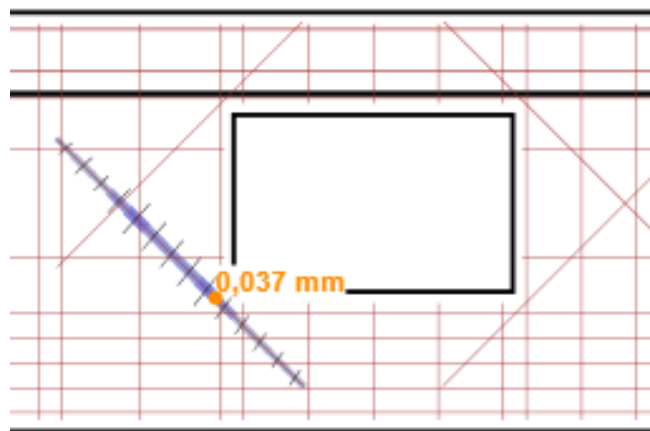
Obr. D.9 Omezení napětí - kvazi (překročení způsobí vznik nelineárního průběhu dotvarování)



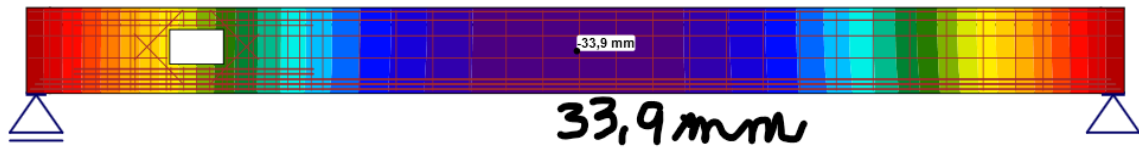
Obr. D.10 Omezení napětí – char. (překročení způsobí vznik podélných trhlin)



Obr. D.11 Omezení napětí – char. (zabránění nepružných přetvoření, nepřijatelných trhlin)



Obr. D.12 Velikost šířky trhliny v oblasti kolem otvoru



Obr. D.13 Velikost průhybu vazníku vlivem zabudování otvoru

## Použitá literatura

- [1] SEMRÁD, Karel a Csaba SZÜCS. *Řešené příklady betonových konstrukcí pomocí příhradové analogie* [online]. In: . ČVUT v Praze, 2013 [cit. 2021-10-5]. Dostupné z: [https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/frvs2009/Prihradova\\_analogie\\_a\\_resene\\_priklady.pdf](https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/frvs2009/Prihradova_analogie_a_resene_priklady.pdf)
- [2] KOHOUTKOVÁ, Alena, Jaroslav PROCHÁZKA a Jiří ŠMEJKAL. *Modelování a vyztužování betonových prvků: lokální modely železobetonových konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978800105340-9.
- [3] ČÍŽEK, Pavel. Výstavní, sportovně kulturní a kongresové centrum Karlovy Vary. *Časopis stavebnictví* [online]. 2008 [cit. 2021-10-7]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-vystavni-sportovne-kulturni-a-kongresove-centrum-karlovy-vary.html>
- [4] EL-DEMERDASH, Waleed E. *Design of Reinforced Concrete Beams With Openings* [online]. 2013, , 1-231 [cit. 2021-10-7]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/293820361\\_Design\\_of\\_Reinforced\\_Concrete\\_Beams\\_With\\_Openings](https://www.researchgate.net/publication/293820361_Design_of_Reinforced_Concrete_Beams_With_Openings)
- [5] ČÍŽEK, Pavel. Atypické prefabrikované haly pro průmysl. *Časopis stavebnictví* [online]. 2010 [cit. 2021-10-8]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-atypicke-prefabrikovane-haly-pro-prumysl.html>
- [6] Spannbeton-Binder. *BFT Bayreuth* [online]. [cit. 2021-10-8]. Dostupné z: <https://www.bft-bayreuth.de/betonbinder.html>
- [7] HANZLOVÁ, Hana a Jiří ŠMEJKAL. *Betonové a zděné konstrukce 1: základy navrhování betonových konstrukcí*. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06508-2.
- [8] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí 1*. 2., upr. vyd. Praha: ČBS Servis, 2005. ISBN 80-903-5020-8.
- [9] MANSUR, Mohammad Abul a Kiang-Hwee TAN. *Concrete beams with openings: Analysis and design*. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-7435-9.
- [10] OSMAN, Bashir H., Erjun WU, Bohai JI a Abdeldime M. S ABDELGADER. *A state of the art review on reinforced concrete beams with openings retrofitted with FRP* [online]. 2016, , 1-17 [cit. 2021-10-07]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40091-016-0128-7>

- [11] AHMED, Ali Najah, Moatasem M. FAYYADH, Sivakumar NAGANATHAN a Mustapha Kamal NASHARUDDIN BIN. Reinforced concrete beams with web openings: A state of the art review. *Materials & Design* [online]. 2012, , 1-13 [cit. 2021-10-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912001598#!>
- [12] MANSUR, Mohammad Abul. Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1998, , 1-10 [cit. 2021-10-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946598000304>
- [13] AMIRI, Soroush, Reza MASOUDNIA a Mohammad AMIN AMERI. *A review of design specifications of opening in the web for simply supported RC beams* [online]. 2011, , 1-9 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/265818244\\_A\\_review\\_of\\_design\\_specifications\\_of\\_opening\\_in\\_web\\_for\\_simply\\_supported\\_RC\\_beams](https://www.researchgate.net/publication/265818244_A_review_of_design_specifications_of_opening_in_web_for_simply_supported_RC_beams)
- [14] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2; Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [15] ČSN EN 1993-6; Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 6: Jeřábové dráhy. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [16] ČSN EN 1991-1-3 ed. 2; Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. 2. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [17] ČSN EN 1991-1-4 ed. 2; Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. 2. Praha: ÚNMZ, 2020.

## Použitý software

- [A] Microsoft office 365
- [B] IDEA StatiCa 20.1
- [C] Autocad 2017
- [D] FIN EC 2021
- [E] Mathcad Prime 6.0.0.0
- [F] SpColumn v6.00