



Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Ľudmila Kormošová

Autoreferát dizertačnej práce

ODOLNOSŤ PROTI PRETLAČENIU LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK
STENOVÝMI STĹPMI A OSLABENÝCH OTVORMI

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: V Bratislave, máj 2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov

Predkladateľ: **Ing. Ľudmila Kormošová**
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD.**
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Martin Moravčík, PhD.**
Katedra stavebných konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1, 01026 Žilina

doc. Ing. Pavlína Matečková, Ph.D.
Katedra konštrukcií
Fakulta stavebná, Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

doc. Ing. Viktor Borzovič, PhD.
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 25.08.2022 o 11:30 h
na Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU v Bratislave,
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, v miestnosti A417

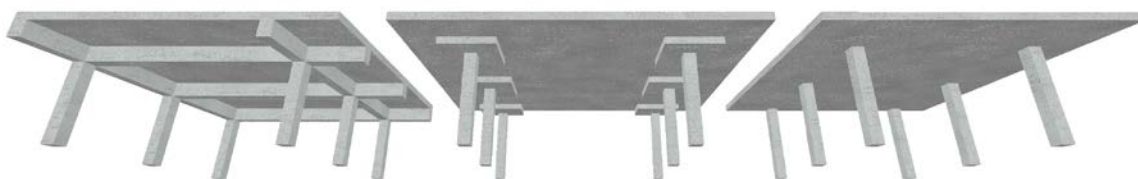
.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty

OBSAH

1	Úvod a súčasný stav poznania	4
2	Pretlačenie	4
3	Modely na stanovenie šmykovej odolnosti lokálne podopretých dosiek.....	5
3.1	Výpočtové modely	5
3.1.1	Eurokód 2 (EC2)	5
3.1.2	ACI 318-19.....	6
3.1.3	Šmyková odolnosť.....	6
3.1.4	Model Code 2010 (MC2010).....	7
3.1.5	Eurokód 2 (prEC2)	9
4	Experimentálny výskum u nás a v zahraničí.....	10
5	Ciele dizertačnej práce	11
6	Metodika dizertačnej práce	11
7	Experimentálny výskum	12
7.1	Návrh experimentálnych vzoriek	12
7.2	Skúšobná zostava	14
7.3	Priebeh experimentu	15
8	Analýza experimentálne získaných výsledkov.....	15
8.1	Vyhodnotenie zvislej deformácie	15
8.1.1	Porovnanie zvislej deformácie jednotlivých vzoriek.....	16
8.2	Rozvoj trhlín	17
8.3	Vyhodnotenie šmykovej odolnosti.....	18
8.3.1	Spôľahlivosť modelov na stanovenie šmykovej odolnosti proti pretlačeniu.....	19
9	Nelineárna numerická analýza	25
9.1	Porovnanie výsledkov nelineárnej analýzy s výsledkami experimentov	25
9.1.1	Porovnanie zvislých deformácií.....	26
9.1.2	Vyhodnotenie spôsobu porušenia a rozvoja trhlín	27
9.1.3	Porovnanie šmykovej odolnosti.....	27
10	Záver.....	29
	Odporúčania pre prax	30
	Odporúčanie pre ďalší výskum.....	30
	Bibliografia.....	31
	Publikačná činnosť autora.....	32
	AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	32
	AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	33
	BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	34

1 ÚVOD A SÚČASNÝ STAV POZNANIA

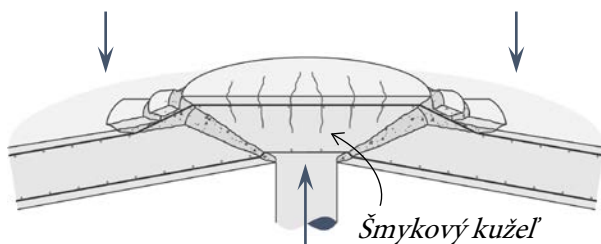
Architektonické požiadavky, zjednodušenie výstavby a menšia prácnosť podnietila vznik konštrukcií, ktorých horizontálnu nosnú konštrukciu tvoria lokálne podopreté stropné dosky. Zaťaženie sa v nich priamo prenáša na stĺpy bez prítomnosti iných líniových horizontálnych nosných prvkov. Neprítomnosť prievlakov má však za následok zníženie tuhosti konštrukcie, zväčšenie zvislej deformácie a najmä veľké namáhania v blízkosti stĺpov. Práve styk stĺpa so stropnou doskou je kritickou oblasťou, kde dochádza k výraznej koncentrácii šmykového napätia. Pri návrhu hrúbky lokálne podopretej stropnej dosky býva zvyčajne rozhodujúce šmykové posúdenie.



Obr. 1.1 - a) stropná konštrukcia s prievlakmi v oboch smeroch, b) stropná konštrukcia s doskovým zosilnením, c) lokálne podopretá stropná doska

2 PRETLAČENIE

Prenos zaťaženia z dosky do podpery sa uskutočňuje priestorovo usporiadanými šmykovými napätiami a ich koncentrácia môže viesť k zlyhaniu konštrukcie, nazývanému pretlačenie. Pretlačenie je zapríčinené vznikom koncentrovaných šmykových napätí, ktoré spôsobujú vzniku hlavných ťahových a tlakových napätí. Ak sú hlavné ťahové napätia väčšie, ako pevnosť betónu v ťahu, vznikajú šikmé trhliny, ktorých postupné roztváranie môže viesť až k porušeniu konštrukcie nazývanému pretlačenie. [13] Pretlačenie je lokálny typ porušenia konštrukcie, ktorému nepredchádzajú žiadne výrazné signály tzv. krehké zlyhanie, ktoré môže viesť až k reťazovému zrúteniu celej konštrukcie alebo jej časti. Zlyhanie stropnej dosky pretlačením je charakteristické vznikom šmykového kužeľa (Obr. 2.2) nad podperou. Veľkosť šmykového napätia, ktoré je príčinou zlyhania dosky, zvyšuje aj prítomnosť otvorov v doske, geometria podpery a vplyv nevyrovnaných momentov. Otvory v doske zmenšujú oblasť dosky, ktorá odoláva zlyhaniu. Geometria podpery môže viesť ku koncentrácii napätí na koncoch podpery. Nevyrovnané momenty, ktorých príčinou môže byť samotná geometria dosky, geometria podpery, poloha zaťaženia, alebo prítomnosť otvorov v doske, zvyšujú šmykové napätie.



Obr. 2.1 - Porušenie dosky pretlačením - vznik šmykového kužeľa. [5]

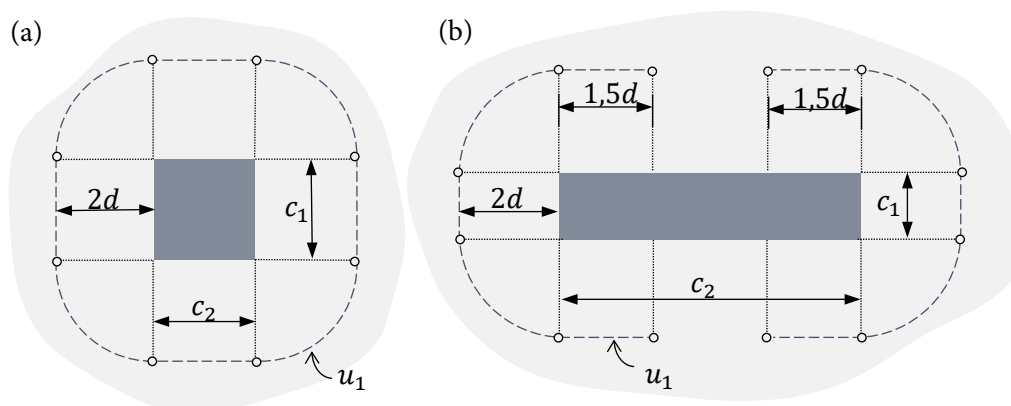
3 MODEL NA STANOVENIE ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK

Na stanovenie odolnosti dosky proti pretlačeniu je nutné podrobne poznať celý proces šmykového zlyhania dosky a zohľadniť všetky faktory, ktoré vplývajú na jej odolnosť. Modely na pretlačenie sa snažia o čo najlepšie vystihnúť mechanizmu porušenia a jeho teoretické, fyzikálne odvodenie a experimentálne overenie a mali by spĺňať požiadavky bezpečnosti, hospodárnosti a zároveň by mala byť zabezpečená ich jednoduchá použiteľnosť v praxi.

3.1 Výpočtové modely

3.1.1 Eurokód 2 (EC2)

Základný kontrolný obvod u_1 v EC2 [9] sa uvažuje vo vzdialenosti $a_i = 2d$ od líca stĺpa, kde d je účinná výška dosky. Tvar kontrolného obvodu závisí od samotného tvaru stĺpa. Na Obr. 2.1 sú zobrazené tvary základného kontrolného obvodu u_1 pre rôzne tvary podpery, kde sa podľa nemeckej národnej prílohy (DIN EN 1992 – 1-1 /NA) odporúča pre podpery s dĺžkou hrany prierezu $c_{max} > 3d$ uvažovať dĺžku základného kontrolného obvodu na vzdialenosť max. $1,5d$ od rohu podpery.



Obr. 3.1 - Základný kontrolný obvod podľa EC2,
(a) pre vnútorný štvorcový stĺp, (b) pre vnútorný obdĺžnikový stĺp

3.1.1.1 Šmyková odolnosť v pretlačení bez šmykovej výstuže

Šmyková odolnosť sa posudzuje vo vzdialenosti $a_i = 2d$ od líca stĺpa a stanovuje sa podľa empirického vzťahu nasledovne:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \cdot (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \geq v_{min} \quad 3.1$$

de je $v_{Rd,c}$ šmyková odolnosť bez šmykovej výstuže [MPa],

$C_{Rd,c}$ empirický súčiniteľ $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_C$ [MPa],

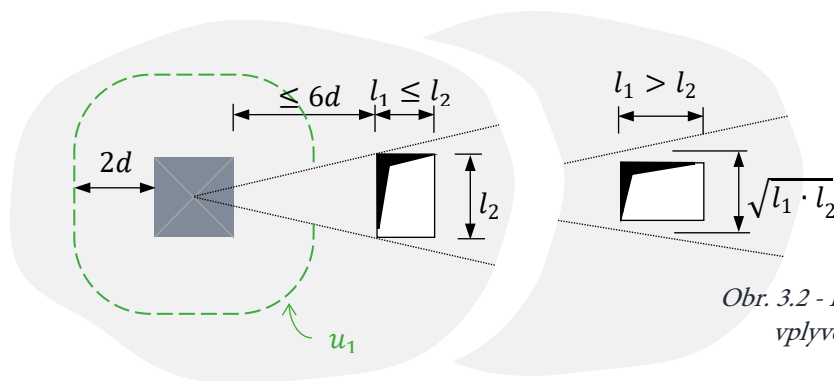
γ_C parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre betón [-],

f_{ck} charakteristická pevnosť betónu v tlaku [MPa]

- d účinná výška, priemer účinných výšok v smeroch d_x a d_y ; [mm],
 k je súčiniteľ vplyvu výšky (size effect) [-],
 ρ_1 stupeň vystuženia [-],

3.1.1.2 Vplyv otvorov

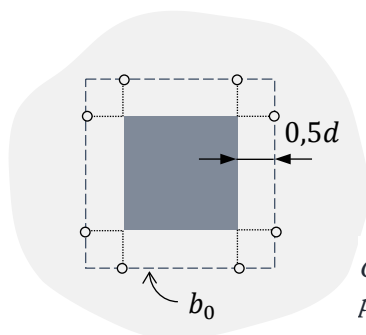
Ak sa otvor nachádza od zaťažovanej oblasti vo vzdialenosti väčšej ako $6d$ jeho vplyv sa môže zanedbať. V opačnom prípade sa prítomnosť otvoru zohľadní skrátením všetkých kontrolných obvodov o hodnotu Δu_i podľa obrázku nižšie.



Obr. 3.2 - Redukcia kontrolného obvodu vplyvom otvorov podľa EC2. [9]

3.1.2 ACI 318-19

Overenie šmykovej odolnosti bez šmykovej výstuže sa podľa amerického výpočtového modelu ACI 318-19 overuje v základnom kontrolnom obvode b_0 vo vzdialenosti $d/2$ od líca stĺpa. Na obrázku Obr. 3.3 je znázornený základný kontrolný obvod.



Obr. 3.3 - Základný kontrolný obvod podľa ACI 318-19. [1]

3.1.3 Šmyková odolnosť

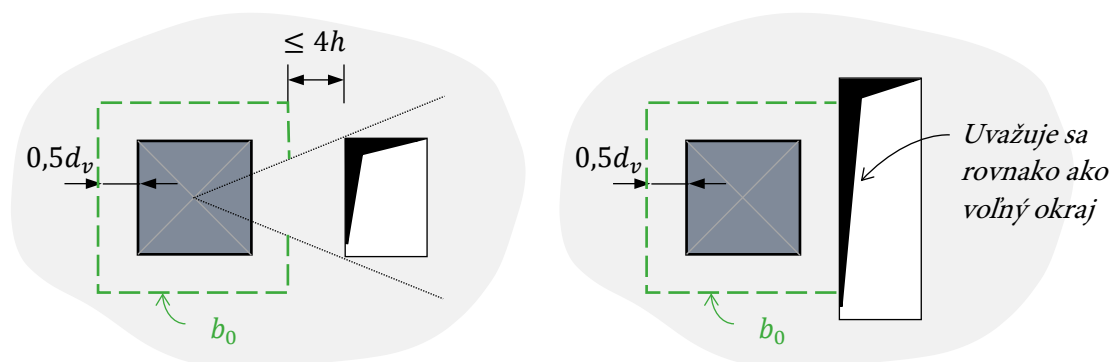
Nominálna šmyková pevnosť v_c sa má uvažovať, ako minimálna z hodnôt vypočítaných podľa vzťahov 3.2, 3.3, 3.4.

$$v_c = \min \begin{cases} 0,33 \cdot \lambda_s \lambda \sqrt{f_c'} & 3.2 \\ 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \lambda_s \lambda \sqrt{f_c'} & 3.3 \\ 0,083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0}\right) \cdot \lambda_s \lambda \sqrt{f_c'} & 3.4 \end{cases}$$

- kde v_c šmyková pevnosť bez šmykovej výstuže [MPa],
 λ_s súčiniteľ vplyvu size-effectu,
 λ súčiniteľ zohľadňujúci vlastnosti betónu vzhľadom na použité kamenivo
 f_c' pevnosť betónu v tlaku ($\sqrt{f_c'} \leq 8,3 \text{ MPa} \rightarrow f_c' \leq 69 \text{ MPa}$) [MPa],
 b_0 dĺžka základného kontrolného obvodu vo vzdialenosti $d/2$ od podpery [m],
 d účinná výška dosky [m],
 β_c súčiniteľ vyjadrujúci pomer dlhšej strany prierezu stĺpa ku kratšej strane stĺpa [-],
 α_s koeficient závislý od polohy stĺpa [-],

3.1.3.1 Vplyv otvorov

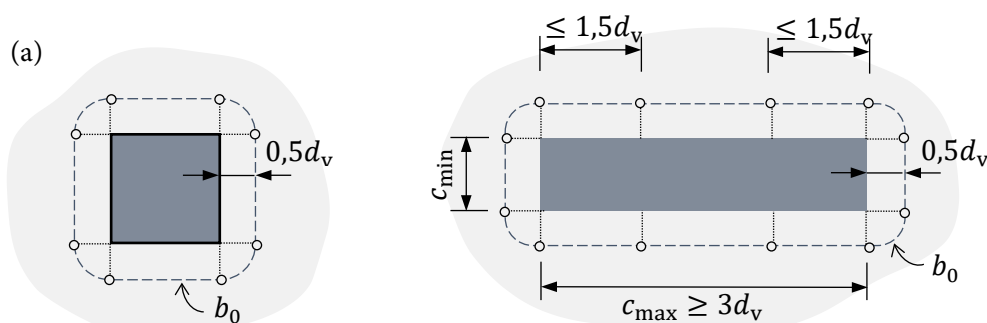
Podobne, ako pri EC2 sa aj ACI 318-19 [1] vplyv otvorov zohľadní skrátením základného kontrolného obvodu. Možné spôsoby redukcie kontrolného obvodu sú znázornené na Obr. 3.4. S vplyvom otvorov sa pri výpočte musí uvažovať, ak sa otvor nachádzal v blízkosti $\leq 4h$ od líca stĺpa.



Obr. 3.4 - Redukcia kontrolného obvodu vplyvom otvorov podľa ACI 318-19. [1]

3.1.4 Model Code 2010 (MC2010)

Model Code 2010 [10] patrí medzi mechanické (fyzikálne) modely. Založený je na teórii kritickej šmykovej trhliny CSCT, ktorú v roku 1991 publikoval A. Muttoni a J. Schwartz [18].



Obr. 3.5 - Základný kontrolný obvod podľa MC2010. [1]

V MC2010 [10] je stanovený základný kontrolný obvod b_1 vo vzdialenosti $0,5d_v$ od líca podpory, kde d_v je účinná výška dosky v šmyku. Dĺžka základného kontrolného obvodu je limitovaná hodnotou $1,5d_v$ od rohov podpory, alebo zaťažovacej plochy (Obr. 3.5 (b)).

3.1.4.1 Šmyková odolnosť

Výpočet šmykovej odolnosti dosky bez šmykovej výstuže $V_{Rd,c}$ vychádza z kritéria porušenia a závisí od pootočenia stropnej dosky ψ . Šmyková odolnosť sa vypočíta podľa nasledujúceho vzťahu:

$$V_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v \quad 3.5$$

- kde je: $V_{Rd,c}$ šmyková odolnosť dosky bez šmykovej výstuže [MN],
 f_{ck} charakteristická pevnosť betónu v tlaku [MPa],
 γ_c parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre betón [-],
 b_0 dĺžka kontrolného obvodu, ktorá odoláva voči šmykovému namáhaniu [m],
 d_v účinná výška dosky v šmyku [m],
 k_{ψ} súčiniteľ závislý od deformácie (pootočenia) stropnej dosky [-],

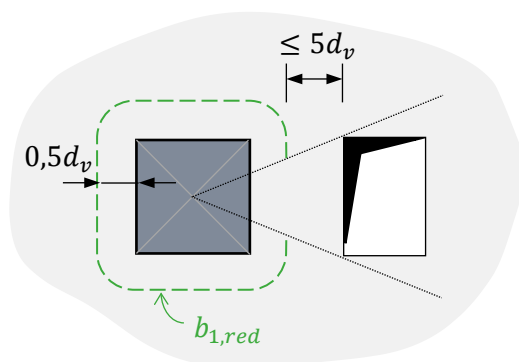
$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9k_{dg}\psi d} \leq 0,6 \quad 3.6$$

- kde je: d účinná výška dosky pri ohybe [mm]
 k_{dg} súčiniteľ zohľadňujúci zaklinenie zŕn kameniva v betóne [-],
 ψ pootočenie dosky [-],

3.1.4.2 Vplyv otvorov

Prítomnosť otvorov a ich vplyv na šmykovú odolnosť sa podľa MC2010 zohľadní skrátením základného kontrolného obvodu v prípade, ak sa tieto otvory nachádzajú vo vzdialenosti $\leq 5d_v$ od základného kontrolného obvodu. Skrátený kontrolný obvod $b_{1,red}$ sa vypočíta odčítaním časti

základného kontrolného obvodu, ktorú vymedzujú spojnice ťažiska výstuže a okrajov otvoru podľa Obr. 3.6.



Obr. 3.6 - Redukcia základného kontrolného obvodu vplyvom otvorov MC2010. [1]

3.1.5 Eurokód 2 (prEC2)

Základné princípy pripravovanej druhej generácie Eurokódu 2 [20] podobne, ako pri MC2010, vychádzajú z CSCT. Základný kontrolný obvod $b_{0,5}$ sa nachádza rovnako, ako v prípade MC2010 vo vzdialenosti $0,5d_v$ od líca stĺpa (Obr. 3.5) a mal by byť skonštruovaný tak, aby sa minimalizovala jeho dĺžka. Pri výpočte šmykovej odolnosti dosky sa používa tiež obvod b_0 na úrovni líca stĺpa a jeho dĺžku reprezentuje minimalizovaný obvod stĺpa. Koncentrácia šmykových napätí v rohoch veľkej zaťažovacej oblasti sa zohľadní redukciou základného kontrolného obvodu tak, aby rozmer podpory neprekročil 3-násobok účinnej výšky dosky ($\leq 3d_v$). Stĺpy, ktorých rozmer je viac ako $6d_v$ sa môžu považovať za konce stien, resp. rohy stien.

3.1.5.1 Šmyková odolnosť

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_V} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{1/3} \leq \frac{0,6}{\gamma_V} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad 3.7$$

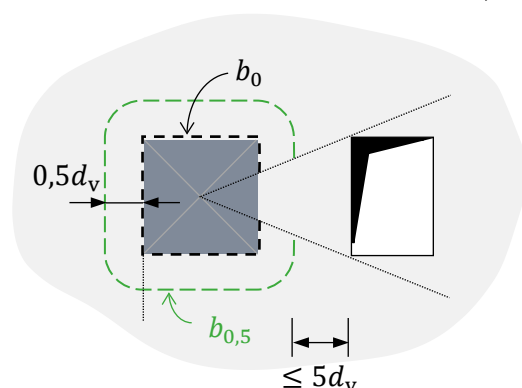
- kde je: $\tau_{Rd,c}$ šmyková odolnosť lokálne stropnej dosky bez šmykovej výstuže [MPa]
 γ_V parciálny súčiniteľ šmykovej odolnosti a šmykovej odolnosti pri pretlačení bez šmykovej výstuže [-],
 ρ_l stupeň vystuženia vzťahujúci sa k súdržnej ťahovej výstuži v smere x (ρ_{lx}), resp. y (ρ_{ly}). [-]
 f_{ck} charakteristická pevnosť betónu v tlaku [MPa],
 d_{dg} parameter veľkosti popisujúci drsnosť kritickej šmykovej trhliny, závislej od triedy betónu a vlastností kameniva [mm]
 d_v účinná výška v šmyku, priemer účinných výšok v šmyku v dvoch na seba kolmých smeroch d_{vx} a d_{vy} ; [m],
 k_{pb} súčiniteľ zohľadňujúci vplyv zvýšenia šmykového gradientu [-],

$$1 \leq k_{pb} = 3,6 \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5 \quad 3.8$$

kde je: b_0 dĺžka kontrolného obvodu na líci podpery, rovnobežný s $b_{0,5}$,

3.1.5.2 Vplyv otvorov

Pripravovaný výpočtový postup prEC2 zohľadňuje vplyv otvorov na odolnosť v pretlačení lokálne podopretých dosiek, ak sa daný otvor nachádza vo vzdialenosti $\leq 5d_v$ od základného kontrolného obvodu. Ako bolo priblížené v predchádzajúcich kapitolách, vplyv otvorov sa zohľadní skrátením základného kontrolného obvodu $b_{0,5}$ podľa Obr. 3.7.



Obr. 3.7 – Redukcia kontrolného obvodu pri zohľadnení otvorov podľa prEC2. [20]

4 EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM U NÁS A V ZAHRANIČÍ

Kapitola je venovaná experimentálnemu výskumu na pretlačenie lokálne podopretých dosiek s otvormi. Prvé experimenty z danej problematiky vykonal Moe [17] (1961) a Hognestad, Elstner & Hanson [14] (1964). Regan [21] v roku 1974 navrhol skrátenie kontrolného obvodu tzv. paralelnou projekciou na rozdiel od dodnes používanej metódy radiálnych priamok vychádzajúcich z ťažiska prierezu stĺpa. Otvory v blízkosti stĺpa so štvorcovým a obdĺžnikovým prierezom skúmali Gomes a Silva (2003) [11] a sériu 20 fragmentov dosiek s otvorom odskúšali Teng et al. [24] (2004). Nedávne experimentálne výskumy vykonal El-Shafiey et al. [23] (2011), Borges et al. [7] (2013), Souza et al. [22] (2013), Anil et al. [3] (2014) a tiež Oliveira et al. [19] (2014). Borges odskúšala 13 lokálne podopretých dosiek s hrúbkou 200 mm, El-Shafiey 7 dosiek s hrúbkou 150 mm pričom v doskách sa nachádzali štvorcové otvory rôznych rozmerov. Oliveira sa na 7 vzorkách venoval okrem vplyvu otvorov súčasne aj nesymetrickému zaťaženiu. Ha et al. (2015) [12] a Liberati et al. [16] (2018) skúmali vplyv malých kruhových otvorov v blízkosti stĺpa. Osem vzoriek so symetrickým usporiadaním otvorov v okolí stĺpa odskúšal Augustín et al. [4] (2018). Práca sa zameriava na vplyv otvorov so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od okraja stĺpa. Riešenej problematike vplyvu otvorov pri obdĺžnikovej podpere sa v posledných dvoch rokoch venovali aj Aguiar et al. (2021) [2] a Santos et al. (2022) [15]. Práca Aguiar et al. [2] sa zameriava na kazetové lokálne podopreté dosky, pričom otvory sa nachádzajú na kratšej strane obdĺžnikového stĺpa. V rámci experimentálneho programu

v príspevku Santos et al. [15] sa odskúšalo 8 dosiek bez šmykovej výstuže s pôdorysným tvarom 2400 x 2400 mm s výškou 150 mm s obdĺžnikovým stĺpom s rozmermi stĺpa 200 x 500 mm.

5 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Témou práce je vyšetrovanie pôsobenia lokálne podopretých dosiek oslabených otvormi v blízkosti výrazne obdĺžnikových stĺpov a opisuje spôsoby zohľadnenia otvorov v jednotlivých výpočtových postupoch. Otvory výrazne ovplyvňujú šmykovú odolnosť lokálne podopretých dosiek, preto je dôležité podrobne preskúmať ich vplyv a stanoviť spoľahlivý a vhodný spôsob, ako ich zohľadniť pri výpočte. Výskumov, ktoré sa zaoberajú prítomnosťou otvorov v bezprievlakových doskách je v porovnaní s doskami bez otvorov stále pomerne málo a zameriavajú sa hlavne na stropné dosky podopreté na stĺpoch štvorcového prierezu. Vyšetrenie vplyvu otvorov pri stĺpoch s výrazne obdĺžnikovým prierezom a optimalizácia výpočtových postupov je preto veľmi aktuálna téma.

Hlavné ciele dizertačnej práce môžeme zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Výskum vplyvu otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže podopretých stenovým stĺpom.
- Skúmanie vplyvu polohy otvorov po obvode stenovej podpory na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek.
- Overenie spoľahlivosti návrhových modelov na predikciu šmykovej odolnosti lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže oslabených otvormi.
- Spresnenie modelov na zohľadnenie vplyvu otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek stenovým stĺpom.
- Vytvorenie databázy výsledkov experimentov uskutočnených na lokálne podopretých doskách oslabených otvormi v blízkosti stĺpov.

6 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Metodiku práce môžeme rozdeliť na dva spôsoby:

- **Teoretická časť** zahŕňa štúdium literatúry zaoberajúcej sa pretlačením lokálne podopretých dosiek, mechanizmu vzniku pretlačenia, faktormi ovplyvňujúcimi šmykovú odolnosť, teoretickými modelmi pre pretlačenie a normovými postupmi na stanovenie odolnosti lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže so zameraním na vplyv otvorov v blízkosti podpory. Úloha teoretickej časti spočíva aj v štúdiu experimentálnych programov zameraných na problematiku pretlačenia lokálne podopretých dosiek s vplyvom otvorov, ktoré sa stali základom návrhu vlastného experimentálneho programu. Opísaná rešerš slúži na vytvorenie databázy výsledkov experimentov uskutočnených na lokálne podopretých doskách oslabených otvormi v blízkosti stĺpov.

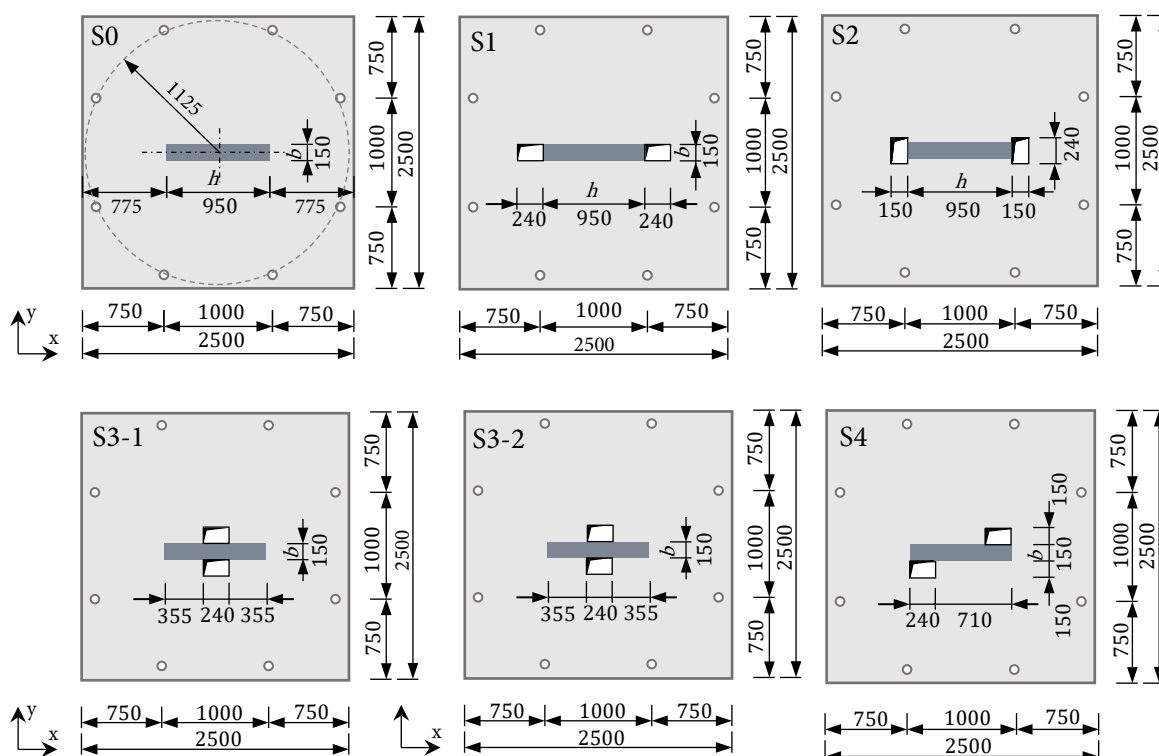
V rámci teoretickej časti sa vykoná numerická analýza, ktorá spočíva v kalibrácii výpočtového modelu na základe vykonaného experimentu a následnej nelineárnej analýzy, ktorá by mala umožniť výskum širšej škály možných variantov vplyvu umiestnenia otvorov v stropnej doske v blízkosti stĺpa.

- **Experimentálna časť** práce zahŕňa návrh, výrobu a vykonanie experimentu série šiestich bezprievlakových dosiek podopretých obdĺžnikovým stĺpom a oslabených otvormi umiestnenými na líci tohto stĺpa. V rámci série vzoriek sa skúmal vplyv polohy otvorov voči kratšej a dlhšej strane obdĺžnikovej podpory. Následne sa overila spoľahlivosť a hospodárnosť návrhu pri zohľadnení otvorov vo výpočtových modeloch.

7 EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM

7.1 Návrh experimentálnych vzoriek

Analyzované vzorky predstavujú izolované fragmenty lokálne podopretých dosiek, ktorých výroba prebiehala v závode Strabag, s. r. o. v Seredi. Spolu so vzorkami dosiek boli vyhotovené betónové kocky, valce a hranoly na určenie materiálových vlastností použitého betónu. Experiment bol vykonaný v Centrálnych laboratóriách SvF STU. Experimentálny program obsahuje sériu 6-tich vzoriek, pričom vzorka S0 je referenčná vzorka bez otvorov a ďalších päť vzoriek (S1, S2, S3-1, S3-2, S4) obsahuje dvojicu symetricky umiestnených otvorov s rozmermi 240 x 150 mm (Obr. 6.1, Tab. 7.1). Pôdorysný tvar vzoriek má rozmery 2,5 x 2,5 m. Dosky sú podopreté obdĺžnikovým stĺpom,



Obr. 7.1 – Geometria skúšobných vzoriek

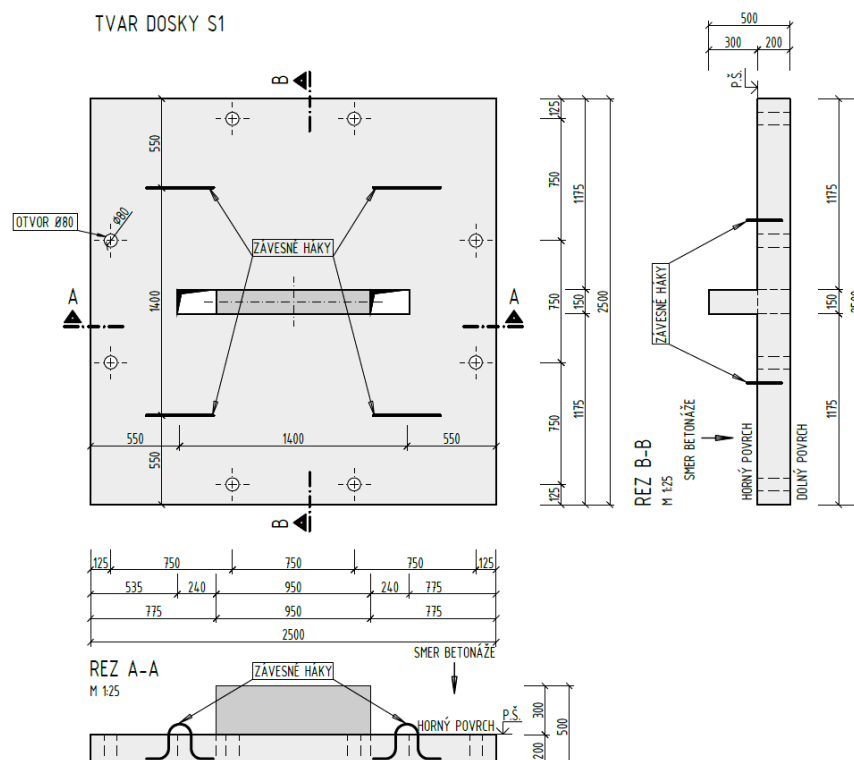
ktorého dlhšia hrana sa rovná 6-násobku účinnej výšky dosky ($c_{\max} \approx 6d$). Hrúbka dosky 200 mm bola navrhnutá tak, aby sa približovala k reálnej hrúbke lokálne podopretých stropných dosiek.

Otvory sú umiestnené na líci podpory, pričom sa mení ich poloha, ktorá je navrhnutá symetricky tak, aby sa minimalizovali účinky nevyrovnaných ohybových momentov. Pri návrhu sa uvažovalo s betónom STN 206: C25/30 – XC1 – Cl 0,4 – Dmax 16 – S3 pre dosky a betón STN 206: C45/55 – XC1 – Cl 0,4 – Dmax 16 – S3 pre stĺpy. Pevnostná trieda C25/30 sa vybrala na základe toho, že sa jedná o najnižšiu bežnú pevnostnú triedu používanú pri výrobe lokálne podopretých dosiek.

Tab. 7.1 – Parametre experimentálnych vzoriek

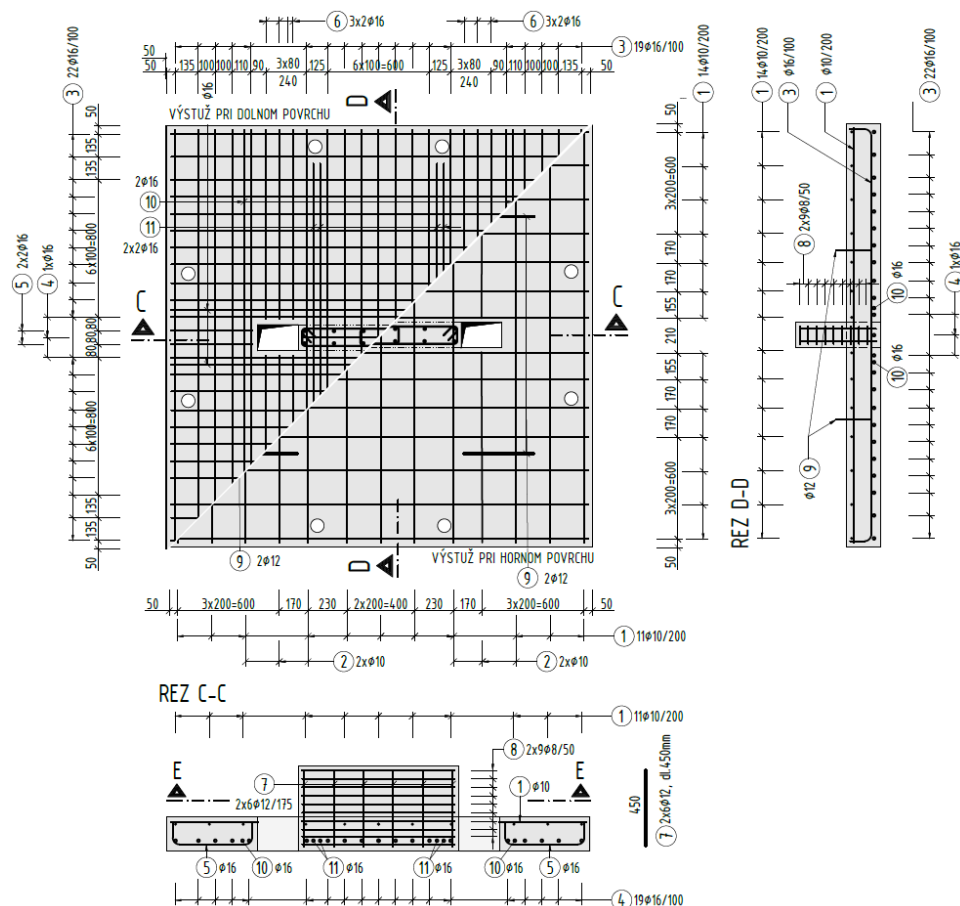
Vzorka	Otvor	Poloha otvoru	Podpera [mm]	h [mm]	d [mm]	ρ [%]
S0	-	-	950 x 150	200	164	1,28
S1	2	na líci kratšej strany stĺpa	950 x 150	200	164	1,23
S2	2	na líci kratšej strany stĺpa	950 x 150	200	164	1,23
S3-1	2	na líci dlhšej strany stĺpa	950 x 150	200	164	1,25
S3-2	2	na líci dlhšej strany stĺpa	950 x 150	200	164	1,25
S4	2	na líci dlhšej strany stĺpa	950 x 150	200	164	1,22

Stupeň vystuženia ohybovou výstužou vo všetkých vzorkách je navrhnutý približne na ~1.25% , pričom bol dosiahnutý použitím výstuže priemeru $\phi 16/100$ pri hornom povrchu s krytím výstuže 20 mm. Výstuž bola navrhnutá tak, aby sa neprekročila ohybová odolnosť vzoriek a aby vzorky zlyhali šmykovým porušením. Ak bola z dôvodu prítomnosti otvorov výstuž prerušená,



Obr. 7.2 - Schéma tvaru vzorky S1 (označenie horný a dolný povrch vzorky v schéme vychádza z polohy vzorky počas výroby)

umiestnila sa dodatočná výstuž vedľa otvoru tak, aby vzorky mali približne rovnaký stupeň vystuženia. Pri spodnom povrchu je uvažovaná výstuž $\phi 10/200$. Výrobná schéma výkresu tvaru a výstuže vzorky S01 je zobrazená na Obr. 6.2 a Obr. 6.3. V schéme je horný a dolný povrch vzorky určený z polohy vzorky počas vyhotovenia. Vzorky sa betónujú v obrátenej polohe (stĺpik smeruje nahor) z dôvodu jednoduchšej prípravy debnenia a tiež jednoduchšieho zhutnenia.



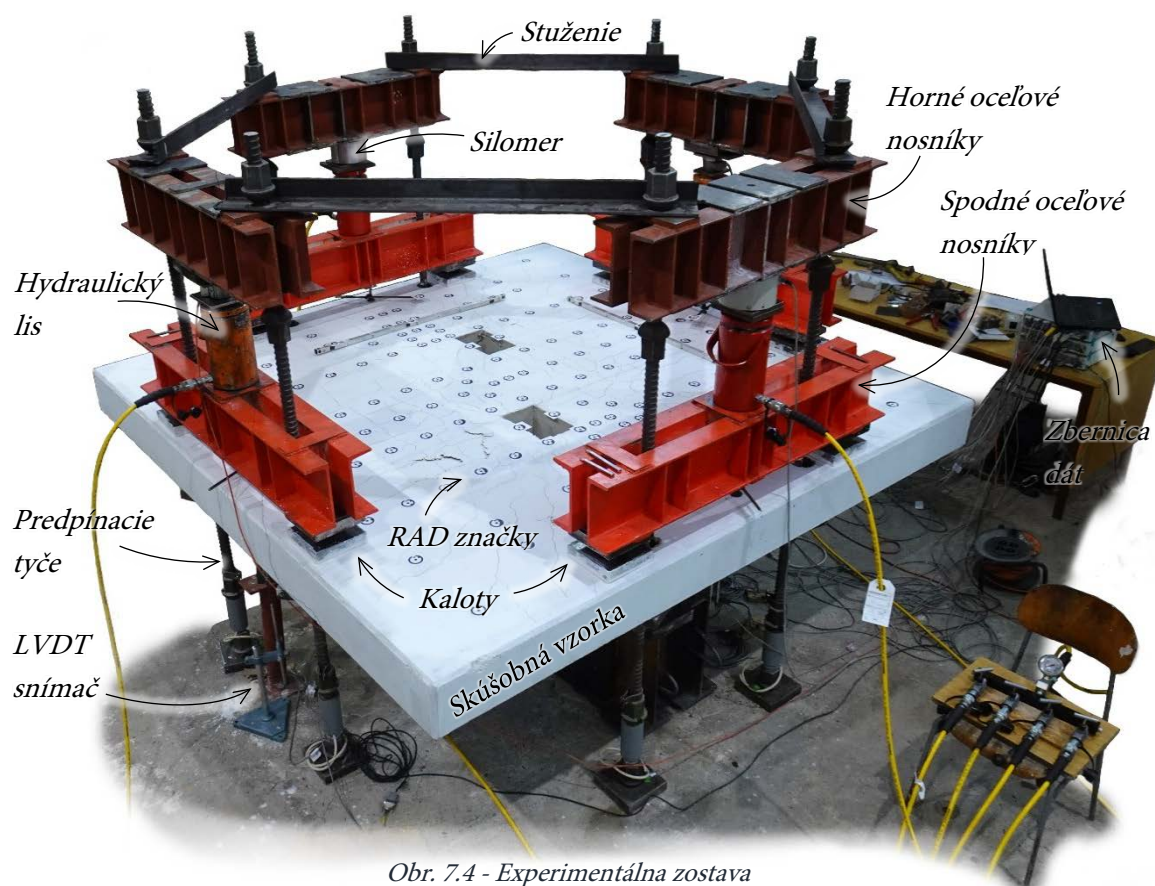
Obr. 7.3 - Schéma výstuže vzorky S1 (označení horný a dolný povrch vzorky v schéme vychádza z polohy vzorky počas výroby)

7.2 Skúšobná zostava

Príprava experimentu, ako aj samotný experiment sa realizoval v Centrálnych laboratóriách STU v Bratislave. Skúšobná zostava bola navrhnutá tak, aby sa zaťaženie rovnomerne vnašalo do dosky v 8 bodoch. Zaťažovanie prebiehalo zhora na dol pomocou 4 hydraulických lisov. Každý z lisov bol umiestnený spolu so silomerom medzi dve dvojice oceľových nosníkov. Po vyvinutí sily sa silomer zaprel do hornej dvojice nosníkov a spodnej dvojice nosníkov, ktorá reakciu preniesla pomocou oceľových kalot, slúžiacich ako kĺbová podpera, priamo do dosky. Samotná doska pri tom bola podpretá fragmentom obdĺžnikového stĺpa, ktorý bol uložený cez maltové lôžko na dvojicu oceľových nosníkov. Opísanú zostavu je možné vidieť na Obr. 6.4.

7.3 Priebeh experimentu

Každá vzorka sa zaťažovala samostatne. Zaťažovalo sa postupne po krokoch, pričom najprv sa vzorky zaťažili v prvom kroku na 20 kN a v druhom na 50 kN. Následne sa postupovalo po zaťažovacích krokoch o veľkosti 100 kN, 50kN a 25kN pričom bolo možné pozorovať rozvoj najprv radiálnych a následne tangenciálnych trhlín. Šírka trhlín sa v rámci experimentálneho programu nevyhodnocovala. Po každom zaťažovacom kroku sa odčítali hodnoty meracích zariadení a zaznamenali sa snímky potrebné na vyhodnotenie premiestnení pomocou fotogrametrie. Veľkosť výslednej odolnosti sa získa pripočítaním vlastnej tieže dosky a tiaže skúšobnej zostavy. Všetky skúšané fragmenty lokálne podopretých dosiek zlyhali na pretlačenie.



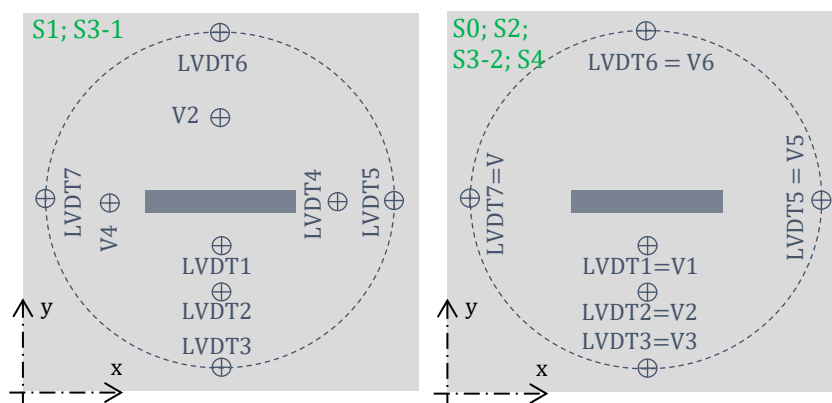
Obr. 7.4 - Experimentálna zostava

8 ANALÝZA EXPERIMENTÁLNE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV

8.1 Vyhodnotenie zvislej deformácie

Merania deformácie pri spodnom povrchu sa vykonávali pomocou indukčných snímačov dráhy - LVDT snímačov. Počet použitých LVDT snímačov pre jednu vzorku bol 7 ks. LVDT snímače boli napojené na zbernicu dát a zaznamenávali údaje kontinuálne počas celého priebehu experimentu s frekvenciou 5 Hz. Hodnoty na výchylkomeroch sa odčítavali po každom zaťažovacom kroku, preto maximálne priehyby namerané výchylkomermi boli odčítané pri poslednom zaťažovacom krku pred zlyhaním. Orientačná schéma LVDT snímačov a výchylkomerov je uvedená

na Obr. 7.1. rovnako sa po každom zaťažovacom kroku zhotovili snímky potrebné na vyhodnotenie merania fotogrametriou. Porovnanie meraní pomocou LVDT snímačov a výchylkomerov vykazuje veľmi dobrú zhodu.

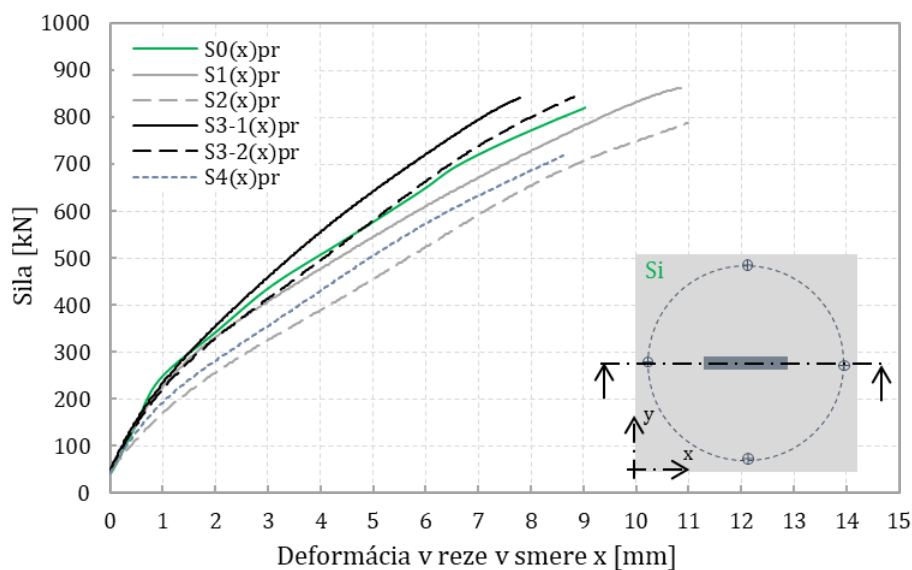


Obr. 8.1 - Schéma orientačného umiestnenia LVDT snímačov a výchylkomerov pre prvú sériu vzoriek (hore) a druhú sériu vzoriek (dole)

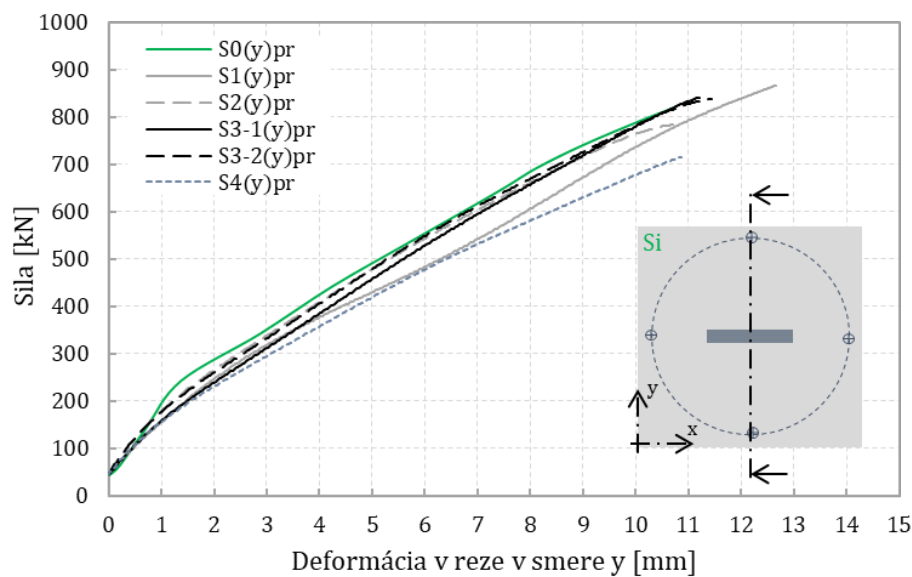
8.1.1 Porovnanie zvislej deformácie jednotlivých vzoriek

Zvislé deformácie jednotlivých experimentálnych vzoriek boli pre ich vzájomné porovnanie vyhodnotené ako priemerné hodnoty dvoch protiahlych snímačov v danom smere v mieste maximálnej deformácie.

Z grafov zobrazených na Obr. 8.2 a Obr. 8.3 je vidieť veľmi podobné priebehy deformačnej krivky pre jednotlivé vzorky, pričom rozdiely v deformácii odpovedajú danej polohe otvorov voči podpere. Otvory umiestnené v smere väčšej tuhosti stĺpa (vzorky S1 a S2) majú za následok zníženie tuhosti dosky v smere x oproti referenčnej vzorke. V smere menšej tuhosti podpery sa deformácie dosiek výrazne nelíšia a priebeh krivky deformácie od zaťaženia je podobný pre všetky vzorky. Vznik trhlín a následné zníženie tuhosti je možné najvýraznejšie vidieť pri referenčnej doske S0, ktorá je v grafoch (Obr. 8.2 a Obr. 8.3) vyznačená zelenou farbou.



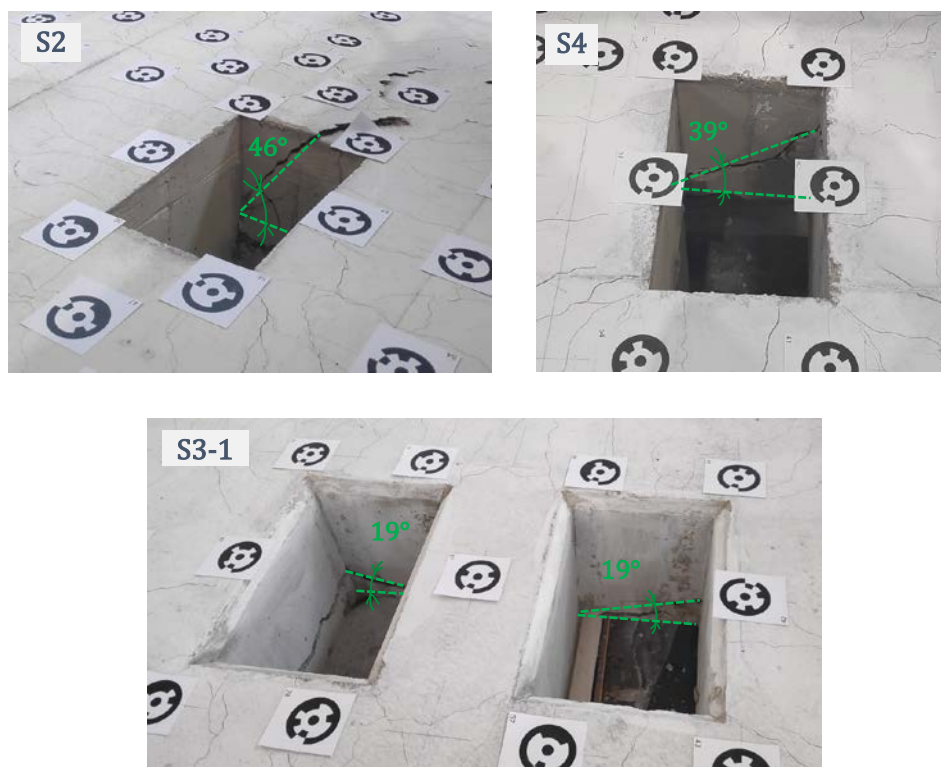
Obr. 8.2 - Porovnanie maximálnej zvislej deformácie experimentálnych vzoriek v reze v smere x



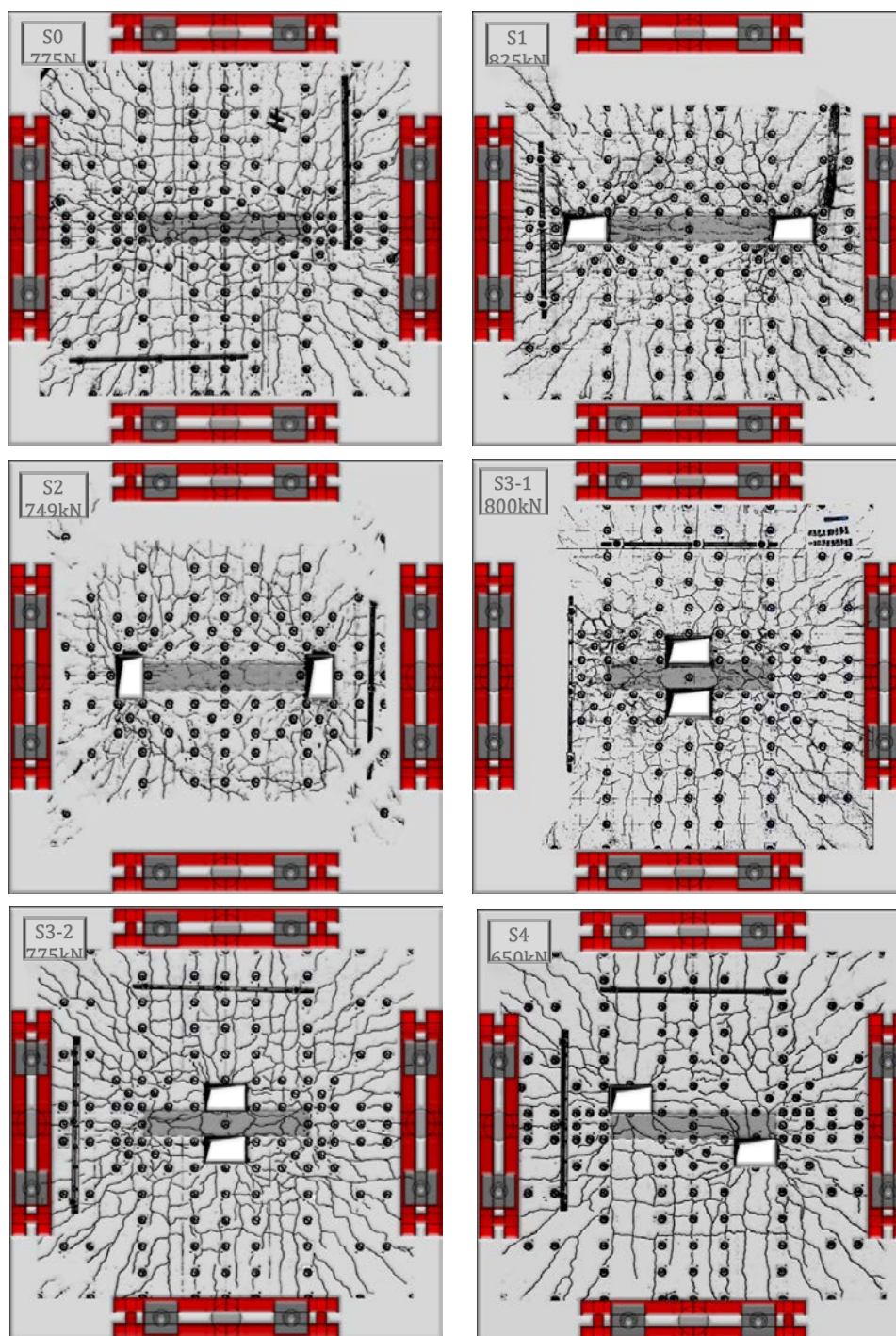
Obr. 8.3 - Porovnanie maximálnej zvislej deformácie experimentálnych vzoriek v reze v smere y

8.2 Rozvoj trhlín

Počas skúšania sa pozoroval aj vznik a rozvoj trhlín na skúšobných vzorkách. Ako prvé vznikali radiálne trhliny pri hodnote 200 kN (S2, S3-1, S3-2, S4), 250 kN (S1) a 300 kN (S0) a so zvyšujúcim zaťažením sa ďalej rozvíjali a pribúdali tangenciálne trhliny. Na Obr. 8.5 je vykreslený rozvoj trhlín pre jednotlivé vzorky pre posledný zaťažovací krok pred porušením vzorky.



Obr. 8.4 – Približný sklon kritickej šmykovej trhliny pre vzorky S2, S3-1, S3-2 a S4



Obr. 8.5 - Rozvoj trhlín v poslednom zaťažovacom kroku pred zlyhaním konštrukcie

8.3 Vyhodnotenie šmykovej odolnosti

Na vyhodnotenie boli použité experimentálne namerané odolnosti proti pretlačeniu získané z výsledkov experimentálnych skúšok V_{exp} a vypočítané odolnosti proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže podľa návrhových modelov V_{model} na základe vzťahov uvedených v kapitole 3.1. Všetky vyhodnotené šmykové odolnosti dosiek podľa jednotlivých

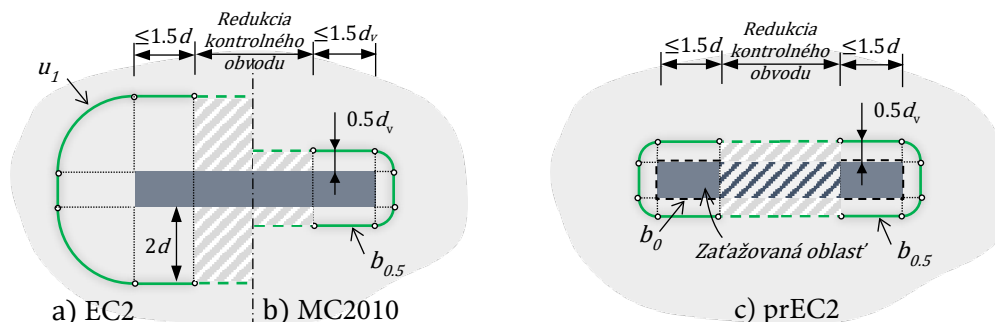
návrhových modelov (EC2, ACI318-19, MC2010, prEC2) boli vypočítané so skutočnou pevnosťou betónu v tlaku získanou z materiálových skúšok a s uvažovaním hodnôt parciálnych súčiniteľov $\gamma_c = 1,0$ a $\gamma_v = 1,0$. Stupeň vystuženia sa počítal z reálneho množstva výstuže v jednotlivých vzorkách s tým, že sa neuvažovalo s výstužou, ktorá bola prerušená v mieste otvoru. Pri výpočtovom postupe MC2010 sa uvažovalo s výpočtom pootočenja ψ na základe tretieho stupňa aproximácie. Vzorky sa zaťažovali symetricky, čo dovoľovalo veľkosť návrhového ohybového momentu m_{Ed} určiť ako $V_{Ed}/8$. Experimentálne namerané šmykové odolnosti experimentálnych vzoriek, ako aj zvyšné charakteristiky uvažované ako vstupné údaje do výpočtov sú uvedené v Tab. 8.1. Všetky skúšané fragmenty lokálne podopretých dosiek zlyhali na pretlačenie.

Tab. 8.1 - Výsledky experimentálnych skúšok

Označenie	Otvor	Poloha otvoru	Podpera	h	d	ρ_0	f_c	V_{exp}
			[m]	[m]	[m]	[%]	[MPa]	[kN]
S0	-	-	950 x 150	0.200	0.164	1.28	29.83	820.49
S1	2	líce kratšej strany stĺpa	950 x 150	0.200	0.164	1.23	30.36	868.03
S2	2	líce kratšej strany stĺpa	950 x 150	0.200	0.164	1.23	28.91	792.36
S3-1	2	líce dlhšej strany stĺpa	950 x 150	0.200	0.164	1.25	30.36	843.48
S3-2	2	líce dlhšej strany stĺpa	950 x 150	0.200	0.164	1.25	29.83	845.57
S4	2	líce dlhšej strany stĺpa	950 x 150	0.200	0.164	1.22	28.91	720.19

8.3.1 Spôľahlivosť modelov na stanovenie šmykovej odolnosti proti pretlačeniu

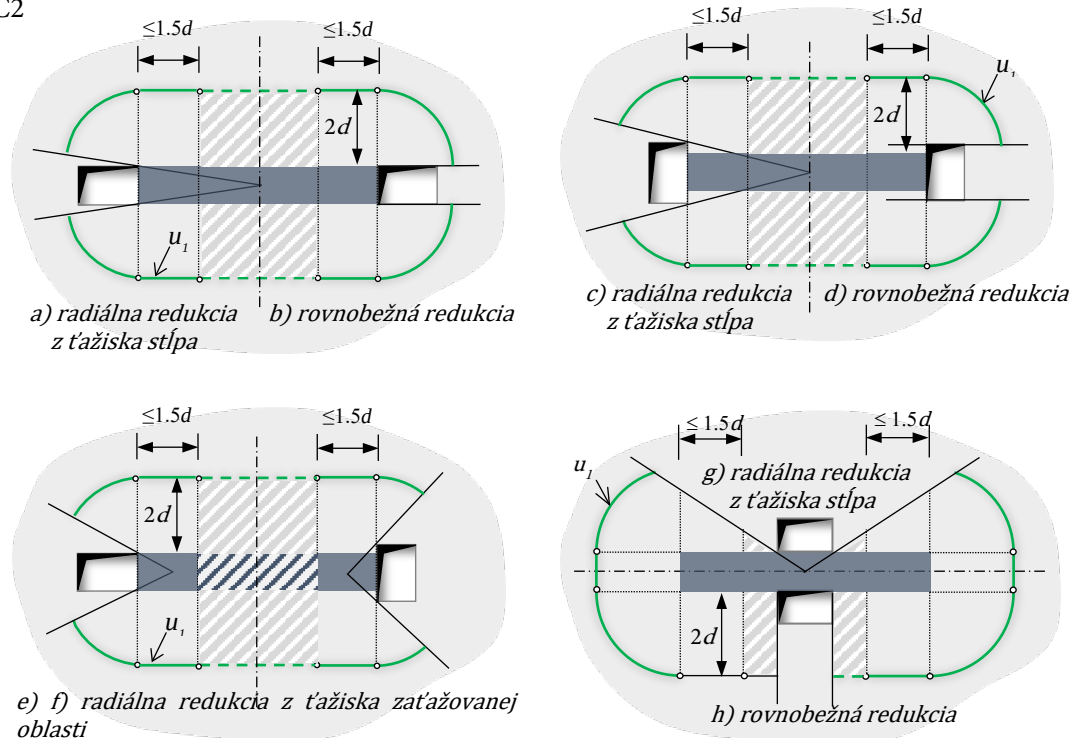
Za základný ukazovateľ spoľahlivosti bol zvolený pomer V_{exp}/V_{model} . Model na predikciu šmykovej odolnosti proti pretlačeniu môžeme považovať za bezpečný, ak pomer V_{exp}/V_{model} bude mať hodnotu $\geq 1,0$. Pre vyhodnotenie vplyvu výrazne obdĺžnikového prierezu sa pri výpočte uvažovalo raz s plným kontrolným obvodom (dĺžka je v obrázkoch reprezentovaná zelenou krivkou, plná +čiarkovaná čiara) a raz s redukciou dĺžky základného kontrolného obvodu z dôvodu tvaru podpery (redukcia $1,5d$ od rohu podpery), ak túto redukciu daný výpočtový postup zohľadňuje (dĺžka je v obrázkoch reprezentovaná len plnou zelenou krivkou a týka sa to modelov EC2, MC2010 a prEC2). Redukcia základného kontrolného obvodu pre jednotlivé výpočtové postupy pre referenčnú vzorku bez otvorov S0 je zobrazená na Obr. 8.6.



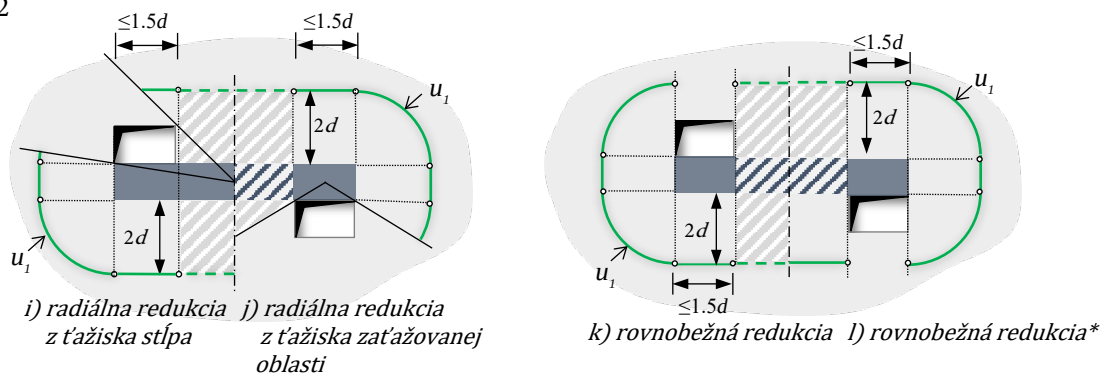
Obr. 8.6 - Redukcia základného kontrolného obvodu podľa jednotlivých výpočtových postupov pre vzorku S0

V tejto práci sa vyhodnotil vplyv otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu redukciou dĺžky základného kontrolného obvodu 3 rôznymi spôsobmi a zároveň sa raz uvažovalo aj s redukciou dĺžky kontrolného obvodu v dôsledku stenovej podpory a raz nie. Uvažovanú dĺžku kontrolného obvodu na Obr. 8.7, Obr. 8.8, a Obr. 8.9 reprezentuje, podobne ako pri vzorke S0 (Obr. 8.6), zelená krivka (plná zelená čiara + čiarkovaná zelená čiara). Ak sa dĺžka kontrolného obvodu redukovala z dôvodu tvaru stĺpa, tak sa uvažuje len s časťou kontrolného obvodu vyznačenou plnou zelenou krivkou. Prvým spôsobom redukcia dĺžky kontrolného obvodu z dôvodu vplyvu otvorov je redukcia o časť, ktorú ohraničujú radiálne lúče vychádzajúce z ťažiska podpory (radiálna redukcia z ťažiska stĺpa). Tento princíp vychádza z modelov EC2, MC2010 a ACI318-19 a bol aplikovaný aj pre model prEC2 (prípady a), c), i), g) na obrázkoch Obr. 8.7, Obr. 8.8, Obr. 8.9). V druhom spôsobe redukcie nevychádzajú radiálne lúče z ťažiska stĺpa, ale z ťažiska zaťažovacej oblasti siahajúcej $1,5d$ od rohu stĺpa (prípady e), f), j) na obrázkoch Obr. 8.7, Obr. 8.8, Obr. 8.9). Tretí typ je metóda rovnobežných priamok (skrátene rovnobežná redukcia), kde sa redukuje dĺžka kontrolného obvodu len o časť, ktorú vymedzuje otvor svojimi rozmermi (prípady b), d), h), k) v obrázkoch Obr. 8.7, Obr. 8.8, Obr. 8.9). Pre vzorku S4 sa pri redukcii dĺžky kontrolného obvodu metódou rovnobežných priamok uvažoval aj modifikovaný spôsob označený „*“, kde sa predpokladalo, že ak sa otvor nachádza na rohu výrazne obdĺžnikového stĺpa, tak na šmykovej odolnosti dosky sa podieľa výraznejšie časť dosky tesne vedľa otvoru vid. prípad l) na obrázkoch Obr. 8.7, Obr. 8.8, Obr. 8.9 s ktorou by sa pri redukcii z dôvodu tvaru podpory inak neuvažovalo. Spomenuté spôsoby redukcie pre všetky analyzované vzorky sú zobrazené na Obr. 8.7 pre EC2, Obr. 8.8 pre MC2010 a ACI318-19 a Obr. 8.9 pre prEC2.

EC2

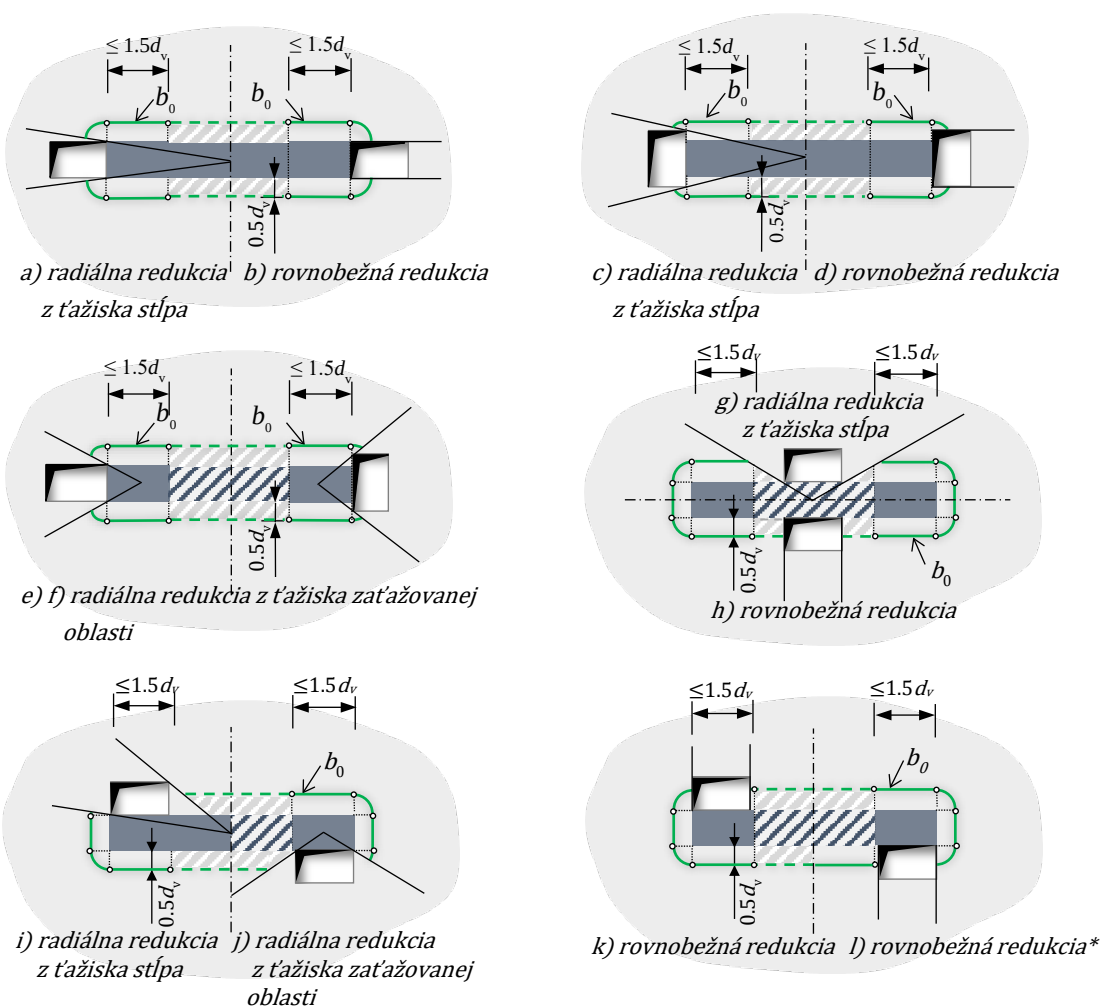


EC2



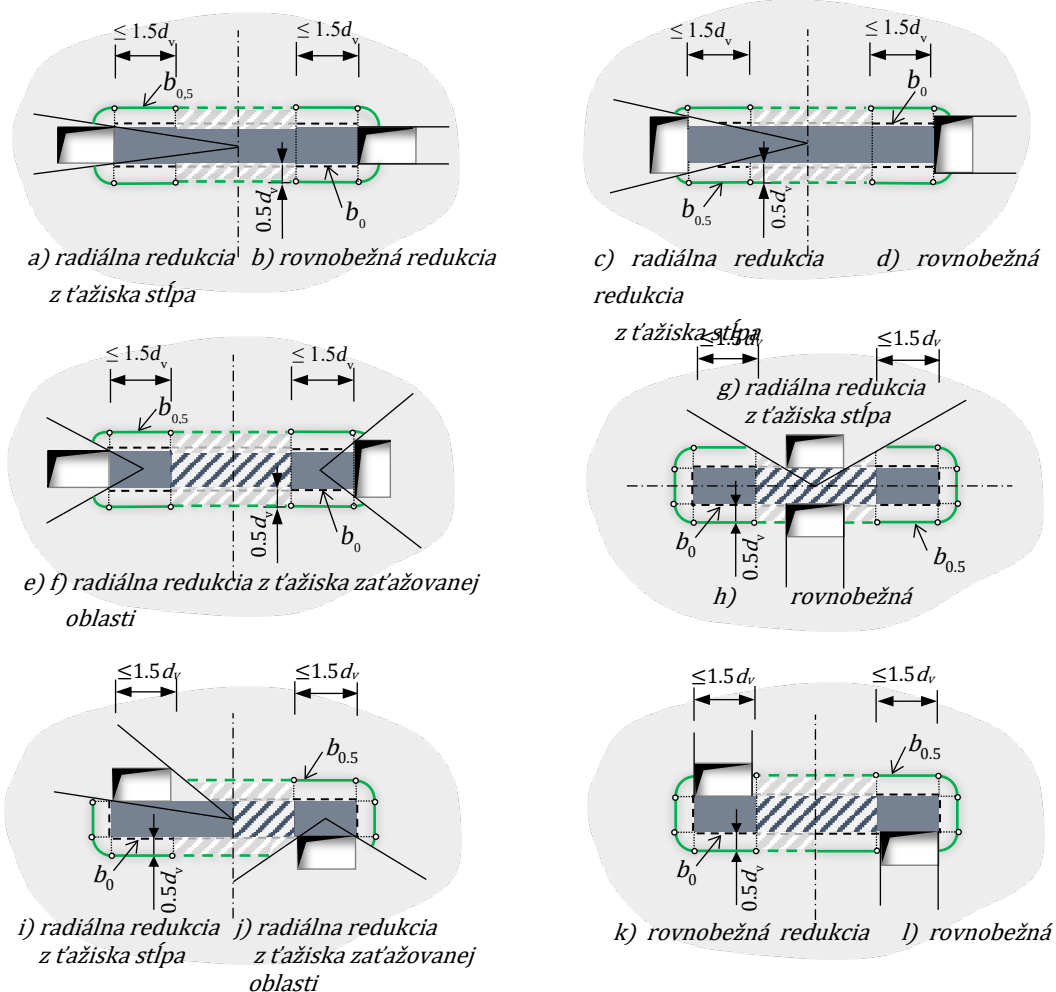
Obr. 8.7 – Uvažovaná redukcia základného kontrolného obvodu pre výpočet šmykovej odolnosti podľa EC2 pre vzorky S1, S2, S3-1, S3-2, S4

MC2010, ACI 318-19



Obr. 8.8 - Uvažovaná redukcia základného kontrolného obvodu pre výpočet šmykovej odolnosti podľa MC2010, ACI 318-19 pre vzorky S1, S2, S3-1, S3-2, S4

prEC2



Obr. 8.9 - Uvažovaná redukcia základného kontrolného obvodu pre výpočet šmykovej odolnosti podľa prEC2 pre vzorky S1, S2, S3-1, S3-2, S4

Tab. 8.2 - Legenda pre grafy pomeru V_{exp}/V_{model} v Tab. 8.4

LEGENDA:	
<i>pl</i>	plný kontrolný obvod (S_0)
(a) <i>pl</i>	plný kontrolný obvod + radiálna redukcia z ťažiska stĺpa
(b) <i>pl</i>	plný kontrolný obvod + radiálna redukcia z ťažiska zaťažovanej oblasti
(c) <i>pl</i>	plný kontrolný obvod + rovnobežná redukcia
<i>red</i>	redukovaný kontrolný obvod (S_0)
(a) <i>red</i>	redukovaný kontrolný obvod + radiálna redukcia z ťažiska stĺpa
(b) <i>red</i>	redukovaný kontrolný obvod + radiálna redukcia z ťažiska zaťažovanej oblasti
(c) <i>red</i>	redukovaný kontrolný obvod + rovnobežná redukcia
(c) <i>red*</i>	redukovaný kontrolný obvod + rovnobežná redukcia*

V Tab. 8.3 je pre každý spomenutý výpočtový postup vyznačená redukcia, ktorá bola vyhodnotená ako bezpečná a konzistentná pre rôzne polohy otvorov na líci výrazne obdĺžnikovej podpery. Z výsledkov vyplýva, že pre všetky riešené výpočtové postupy bola dosiahnutá najlepšia zhoda s experimentom práve použitím metódy rovnobežných priamok na redukciiu dĺžky základného kontrolného obvodu bez uváženia redukcie v dôsledku tvaru podpery. Avšak, v niektorých výpočtových postupoch (EC2 a prEC2) je šmyková odolnosť pri tomto type redukcie mierne na strane nebezpečnej, čo potvrdzuje fakt, že doska sa nepodíela rovnakou mierou na prenose šmykových napätí po celej dĺžke základného kontrolného obvodu.

Tab. 8.3 - Vyhodnotenie spoľahlivosti výpočtových postupov

Ozn.	EC2					
	S0	S1	S2	S3-1	S3-2	S4
(a) pl	0.97	1.17	1.18	2.32	2.33	1.15
(b) pl	0.97	1.36	1.45			1.78
(c) pl	0.97	1.11	1.08	1.12	1.13	0.98
(a) red	1.23	1.55	1.60	2.32	2.33	1.61
(b) red	1.23	1.89	2.15			1.78
(c) red	1.23	1.45	1.43	1.27	1.28	1.30
(c) red*						1.12

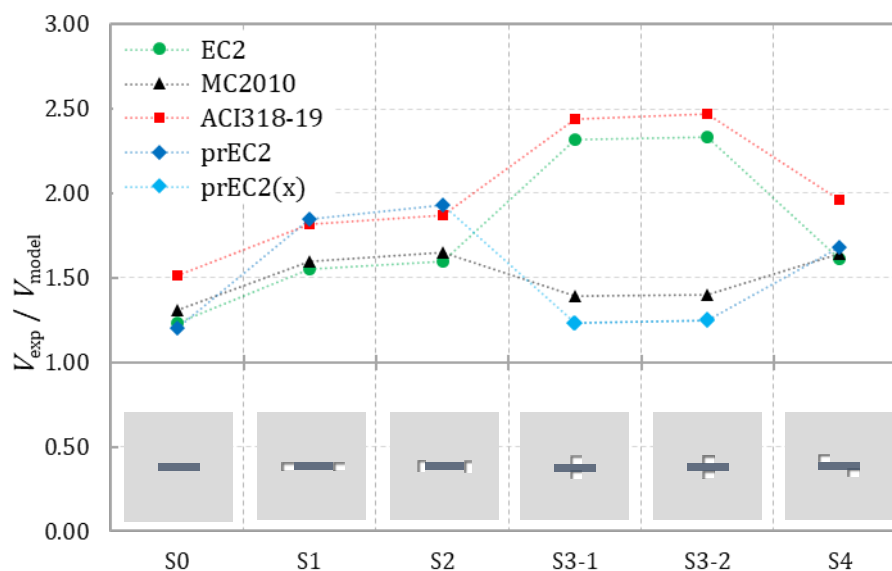
Ozn.	MC2010					
	S0	S1	S2	S3-1	S3-2	S4
(a) pl	1.03	1.19	1.17	1.39	1.40	1.16
(b) pl	1.03	1.23	1.21			1.17
(c) pl	1.03	1.17	1.14	1.18	1.19	1.04
(a) red	1.31	1.60	1.65	1.39	1.40	1.64
(b) red	1.31	1.70	1.77			1.58
(c) red	1.31	1.56	1.59	1.36	1.36	1.44
(c) red*						1.19

Ozn.	ACI318-19					
	S0	S1	S2	S3-1	S3-2	S4
(a) pl	1.02	1.23	1.27	1.65	1.67	1.33
(b) pl						
(c) pl	1.02	1.21	1.22	1.27	1.28	1.11
(a) red	1.51	1.82	1.87	2.44	2.47	1.96
(b) red						
(c) red	1.51	1.78	1.81	1.87	1.89	1.63
(c) red*						

Ozn.	prEC2					
	S0	S1	S2	S3-1	S3-2	S4
(a) pl	0.98	1.18	0.79			1.13
(b) pl	0.98	1.42	1.43			2.55
(c) pl	0.98	1.10	1.35	1.11	1.12	0.97
(a) red	1.20	1.50	1.05	1.39	1.40	1.88
(b) red	1.20	1.85	1.93			1.68
(c) red	1.20	1.40	1.75	1.23	1.25	1.26
(c) red*						1.09

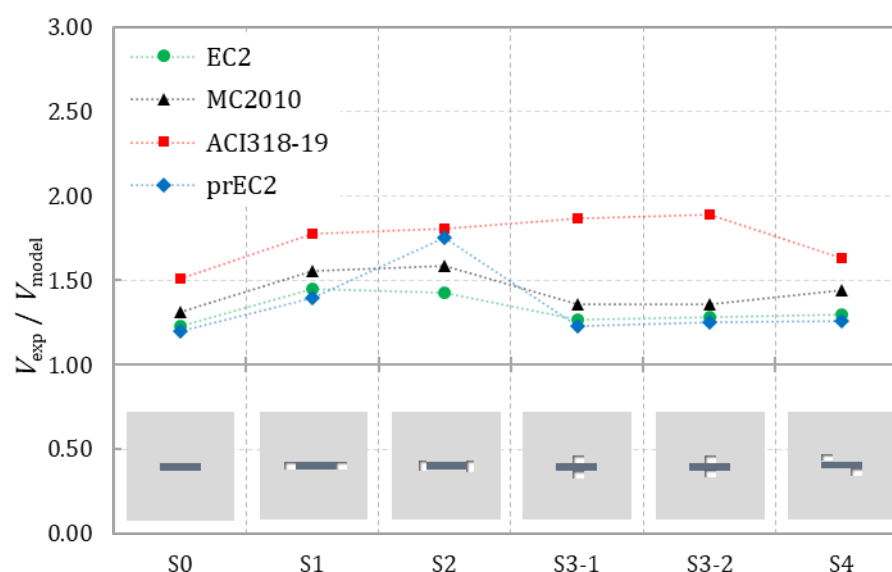
Na Obr. 8.11 je zobrazené porovnanie výpočtových postupov pri dodržaní odporúčaných redukcii kontrolného obvodu pre jednotlivé vzorky. Z porovnaní vyplýva, že jedine výpočtový postup MC2010 výrazne nepodhodnocuje šmykovú odolnosť vzoriek S3-1 a S3-2. Dôvodom je poloha kontrolného obvodu vo vzdialenosti 0,5d, kedy pri danej polohe otvorov redukcia dĺžky kontrolného obvodu z dôvodu prítomnosti otvorov vymedzuje časť kontrolného obvodu, ktorý už je zredukovaný z dôvodu tvaru podpery.

Na grafe na Obr. 8.10 je znázornené porovnanie výpočtových postupov, ak sa redukuje dĺžka kontrolného obvodu z dôvodu tvaru stĺpa a zároveň sa vplyv prítomnosti otvorov zohľadní redukciou metódou rovnobežných priamok. Najvhodnejšie z hľadiska bezpečnosti, konzistencie výsledkov ako aj z ekonomického hľadiska použiť pri výpočte šmykovej odolnosti proti pretlačeniu dĺžku základného kontrolného obvodu redukovanú na vzdialenosť $\leq 1,5d$ od rohu podpery a prítomnosť otvorov zohľadniť metódou rovnobežných priamok.



(x) – pri zohľadnení všetkých podmienok prEC2 pre dosky s otvormi by pre vzorky S3-1 a S3-2 nebolo možné vypočítať šmykovú odolnosť kvôli pomeru $b_0/b_{0,5}$, nakoľko sa otvory nachádzajú v časti dosky, kde sa redukuje dĺžka kontrolného obvodu, výsledná odolnosť je uvedená bez vplyvu otvorov

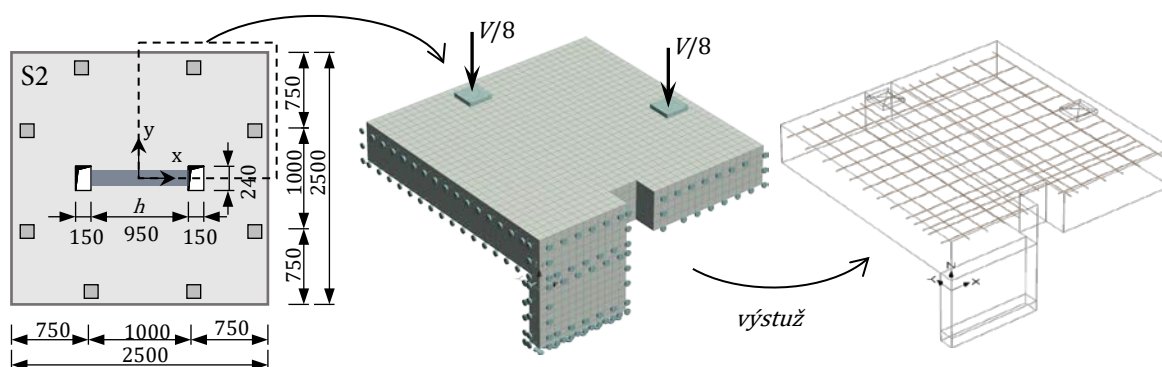
Obr. 8.10 - Porovnanie výpočtových postupov pri redukcii kontrolného obvodu v dôsledku tvaru podpery a so zohľadnením vplyvu otvorov metódou rovnobežných priamok



Obr. 8.11 – Porovnanie výpočtových postupov pri dodržaní odporúčaných redukcii kontrolného obvodu pre jednotlivé vzorky

9 NELINEÁRNA NUMERICKÁ ANALÝZA

Na numerickú analýzu bol použitý program ATENA, ktorý pracuje na princípe metódy končených prvkov. Kalibrácia výpočtového modelu sa vykonala na základe získaných experimentálnych výsledkov. Aby sa dosiahlo, čo najpresnejší priebeh deformácií a napätí, bolo potrebné použiť priestorové (3D) konečné prvky, čo spomínaný program umožňuje. Nakoľko je výpočet časovo a hardwarovo náročný, tak pri modelovaní sa využila symetria a všetky vzorky okrem S4 sa modelovali ako fragment 1/4 dosky (Obr. 9.1). Vzorka S4 bola modelovaná ako celá doska. Použitie vhodného materiálového modelu pre betón má veľký vplyv na presnosť dosiahnutých výsledkov. Pri nelineárnej analýze (NLA) sa pre betón použil lomovo-plastický model CC3DNonLinCementitious2, kde je ťahaná oblasť definovaná lomovou mechanikou a tlačaná oblasť plasticitou [8]. Výpočtový model sa kalibroval na základe výsledkov experimentálnej skúšky referenčnej vzorky S0.



Obr. 9.1 - Ukážka modelu z programu Atena pre fragment 1/4 dosky pre vzorku S2

9.1 Porovnanie výsledkov nelineárnej analýzy s výsledkami experimentov

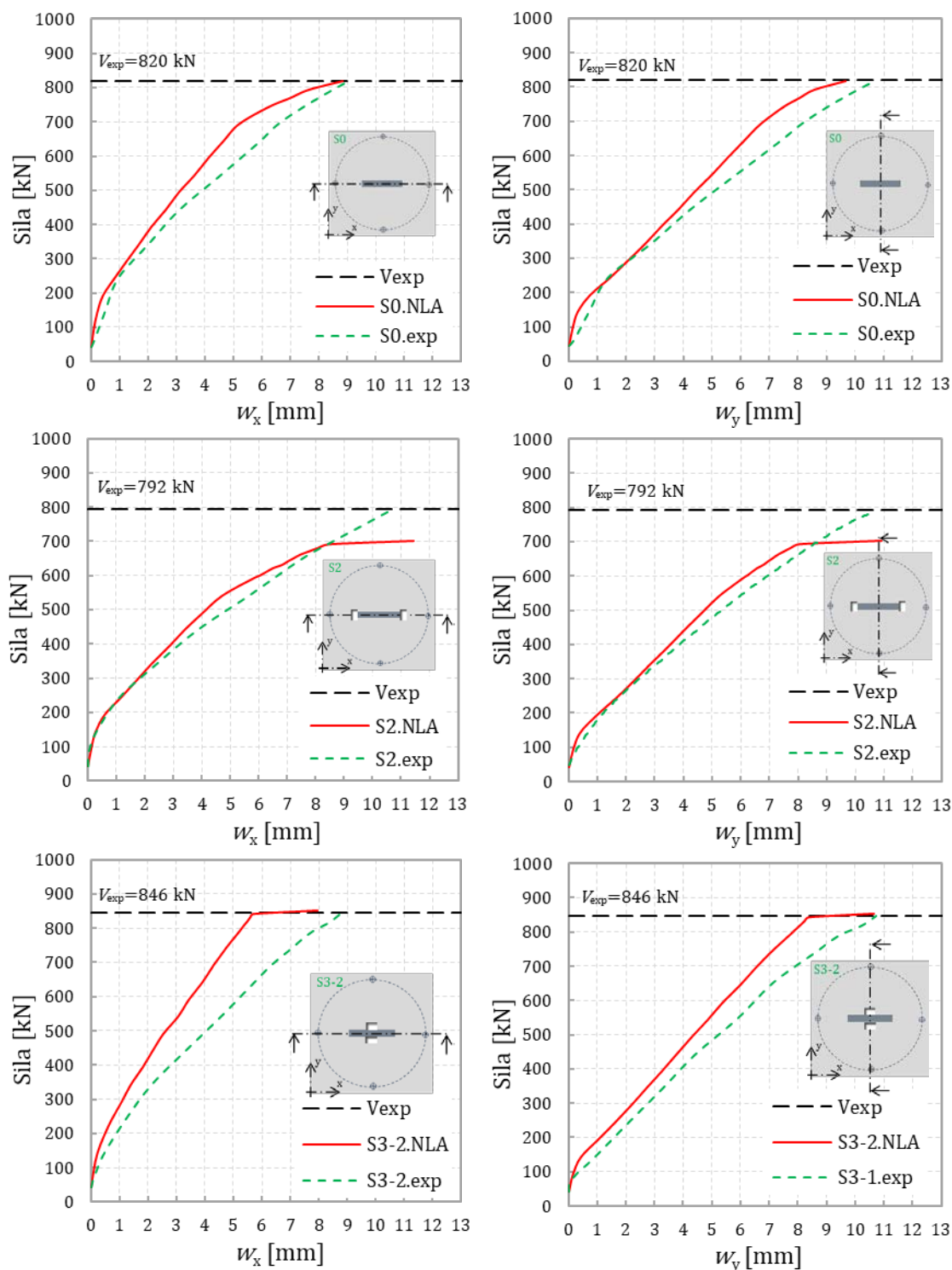
Vstupné parametre použité pre nelineárnu analýzu v programe Atena pre jednotlivé skúšobné vzorky je uvedená v Tab. 9.1.

Tab. 9.1 - Vstupné parametre pre nelineárnu analýzu v programe Atena

	S0	S1	S2	S3-1	S3-2	S4	
f_c (exp)	29.83	30.36	28.91	30.36	29.83	28.91	[MPa]
f_t (EC2,MC2010)	-2.89	-2.92	-2.83	-2.92	-2.89	-2.83	[MPa]
E (Atena)	32.32	32.55	31.92	32.55	32.32	31.92	[GPa]
G_f (Atena)	64.31	65.07	62.99	65.07	64.31	62.99	[N/m]
$r_{c,lim}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	[-]
S_F	20	20	20	20	20	20	[-]
w_{dc}	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	[m]
β	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	[-]
k_{fix}	1	1	1	1	1	1	[-]

9.1.1 Porovnanie zvislých deformácií

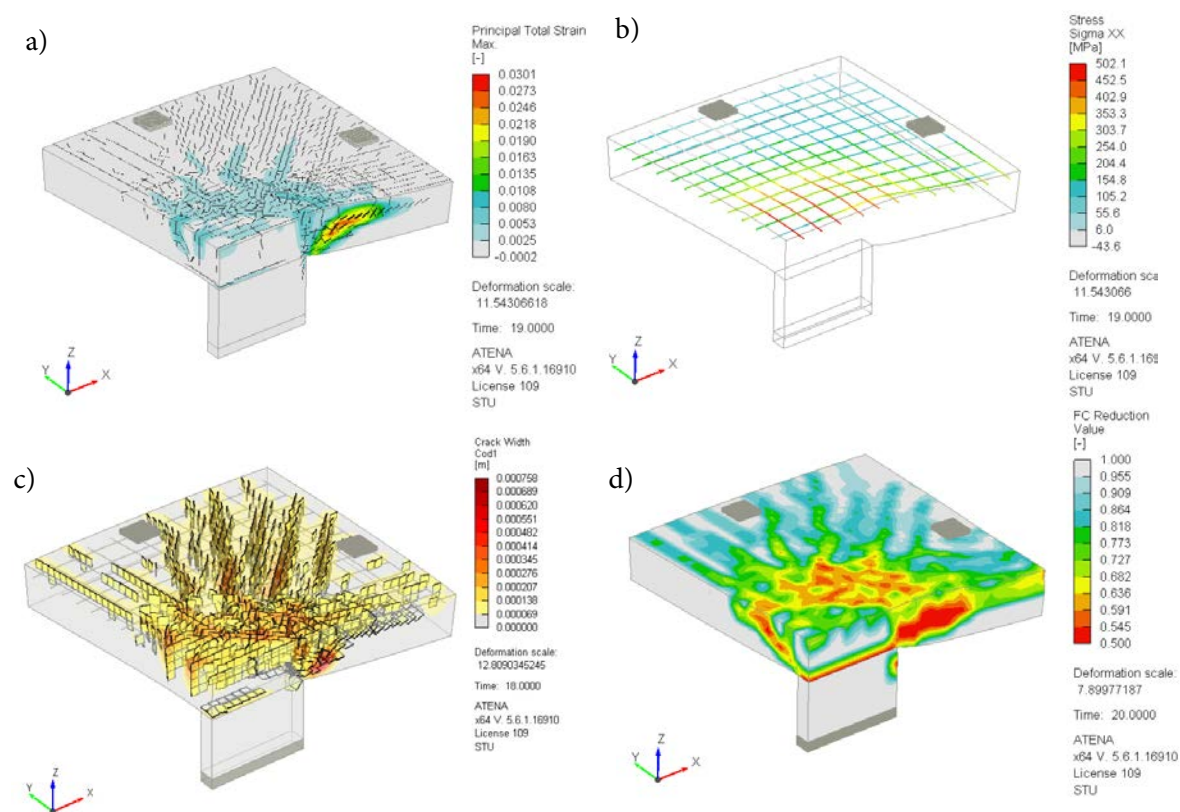
Na grafoch na Obr. 9.2 je vidieť závislosť deformácie od zaťaženia pre vybrané vzorky. Zo sklonu krivky vyplýva, že referenčná vzorka a vzorky, kde sa otvory nachádzajú na lici kratšej strany stĺpa majú lepšiu zhodu v tuhosti, ako vzorky s otvormi na lici dlhšej strany stĺpa. Na druhú stranu, výsledky šmykových odolností získaných z nelineárnej analýzy majú veľmi dobrú zhodu s výsledkami experimentov.



Obr. 9.2 - Porovnanie zvislej deformácie vzoriek S3-2 s NLA v smere x (vľavo) a smere y (vpravo)

9.1.2 Vyhodnotenie spôsobu porušenia a rozvoja trhlín

Odozva konštrukcie na postupné zaťažovanie v programe ATENA sa pozorovala základe maximálnych celkových pomerných pretvorení (Obr. 9.3a)), napätí vo výstuži pri zlyhaní konštrukcie (Obr. 9.3b)), rozvoja trhlín a vzniku kritickej šmykovej trhliny (Obr. 9.3c)) a s tým spojená potreba redukcia pevnosti betónu v tlaku po vzniku trhlín na minimálnu hodnotu zadanú súčiniteľom $r_{c,lim}$ (Obr. 9.3d)).



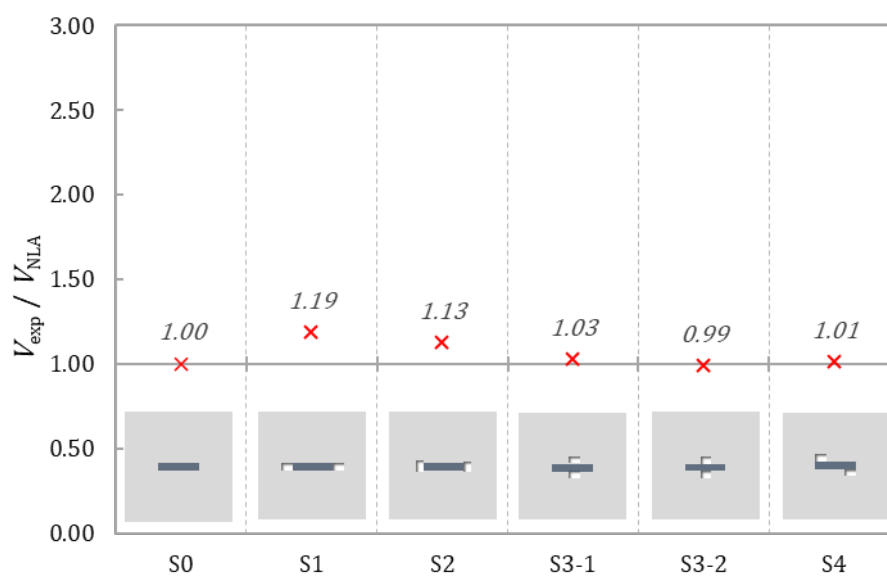
Obr. 9.3 - Výsledky z NLA pre vzorku S0: a) hlavné pomerné pretvorenia, b) napätie vo výstuži pri zlyhaní konštrukcie, c) rozvoj a šírka trhlín, d) redukcia pevnosti betónu v tlaku po vzniku trhlín

9.1.3 Porovnanie šmykovej odolnosti

Porovnanie experimentálne získanej šmykovej odolnosti s NLA sa vyhodnotil pomerom V_{exp}/V_{NLA} a výsledky sú uvedené v Tab. 9.2. Najväčšiu odchýlku vykazujú vzorky, v ktorých boli otvory umiestnené na kratšej strane stĺpa (S1 a S2). Výsledky z NLA pre vzorky S1 a S2 potvrdzujú predpoklad z výpočtových postupov, kde sa predpokladá, že práve prítomnosť otvorov na kratšej hrane podpery výrazne znižuje šmykovú odolnosť lokálne podopretých dosiek stenovým stĺpom. Táto skutočnosť sa experimentom nepotvrdila. Z výsledkov šmykovej odolnosti z NLA vyhodnotenej pomerom V_{exp}/V_{NLA} (Obr. 9.4) môžeme konštatovať dobrú zhodu s experimentom, kde priemerná odchýlka $V_{exp}/V_{NLA} = 1,06$.

Tab. 9.2 - Porovnanie šmykovej odolnosti V_{exp}/V_{NLA}

Ozn.	V_{exp}	V_{NLA}	V_{exp}/V_{NLA}
S0	820	818	1.00
S1	868	732	1.19
S2	792	702	1.13
S3-1	843	822	1.03
S3-2	846	852	0.99
S4	720	712	1.01

Obr. 9.4 - Porovnanie šmykovej odolnosti V_{exp}/V_{NLA}

10 ZÁVER

Dizertačná práca je zameraná na problematiku pretlačenia lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže oslabených otvormi v blízkosti stĺpa a na spôsoby predikcie šmykovej odolnosti proti pretlačeniu pomocou súčasne používaných výpočtových postupov. Doteraz bolo vykonaných viacero experimentov zameraných na výskum vplyvu otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek. Väčšina z týchto experimentov sa zameriavala na vplyv otvorov na pretlačenie pri podopretí kruhovým a štvorcovým stĺpom. Rovnako aj výpočtové modely vychádzajú z vyšetrovania otvoru v blízkosti štvorcových príp. kruhových stĺpov. Kde vplyv otvorov na šmykovú odolnosť sa vo výpočtových postupoch započítava pomocou radiálnej redukcie dĺžky kontrolného obvodu. Preto je výskum vplyvu otvorov pri výrazne obdĺžnikových stĺpoch, overenie spoľahlivosti a ich zohľadnenie v normových postupoch veľmi aktuálna téma.

Experimentálny výskum zameraný na vyšetrovanie vplyvu otvorov ležiacich na líci výrazne obdĺžnikového stĺpa, počas ktorého sa odskúšalo 6 fragmentov bezprievlakových dosiek, potvrdil, že radiálna metóda redukcie kontrolného obvodu je spoľahlivá, avšak v niektorých prípadoch veľmi konzervatívna. Návrhový model v pripravovanej druhej generácii Eurocodu 2 (prEC2) je navyše veľmi citlivý na hodnotu pomeru $b_0/b_{0,5}$, čo je pri radiálnej redukcii problematické, nakoľko pri rôznej polohe a tvare otvorov môže nastať situácia, kedy je $b_0 > b_{0,5}$ a daná metóda redukcie sa nedá použiť. Riešením môže byť použitie metódy rovnobežných priamok pri redukcii kontrolného obvodu, ktorá preukázala veľmi dobrú zhodu s experimentmi a zároveň sa táto metóda preukázala ako najkonzistentnejšia pri všetkých riešených výpočtových postupoch.

Pri vplyve výrazne obdĺžnikového stĺpa sa preukázala potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu v dôsledku tvaru stĺpa. V prípade kedy sa otvory nachádzali na líci kratšej strany stĺpa sa nepreukázal tak výrazný pokles šmykovej odolnosti proti pretlačeniu s akým uvažujú výpočtové modely. Rovnakú príp. vyššiu šmykovú odolnosť oproti referenčnej vzorke dosiahla vo svojom experimentálnom programe aj Borges [6], ak sa výstuž prerušená otvormi nahradila dodatočnou výstužou uloženou v blízkosti otvorov. Táto skutočnosť vedie k záveru, že pri absencii časti dosky z dôvodu otvorov na líci kratšej strany stĺpa sa šmykové napätia nekonzcentrujú v tejto oblasti a prerozdelia sa tak, že na výslednej šmykovej odolnosti sa podieľa aj časť dosky, ktorá sa nachádza vo vzdialenosti $> 1,5d$ od rohu stĺpa. Riešený experimentálny program však neobsahoval dostatočný počet vzoriek s danou polohou otvorov na to, aby sa mohol presnejšie vyšetriť tento jav.

Na základe vymenovaných skutočností preto považujem za najvhodnejšie z hľadiska bezpečnosti, konzistencie výsledkov ako aj z ekonomického hľadiska použiť pri výpočte šmykovej odolnosti proti pretlačeniu dĺžku základného kontrolného obvodu redukovanú na vzdialenosť $\leq 1,5d$ od rohu podpory a prítomnosť otvorov na líci podpory zohľadniť metódou rovnobežných priamok pri redukcii dĺžky kontrolného obvodu.

Riešený experimentálny výskum doplnil databázu testov zameraných na vplyv otvorov pri pretlačení a zároveň slúžil na kalibráciu nelineárnych modelov, vďaka ktorým bude možné vyšetriť

rôzne prípady umiestnenia otvorov v lokálne podopretých doskách, čo prispeje k lepšiemu poznaniu a vyhodnoteniu vplyvu otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu. Nelineárna analýza potvrdila veľmi dobrú zhodu s experimentmi, najmä s výslednou šmykovou odolnosťou vyšetrovaných vzoriek. Menšia zhoda bola dosiahnutá pri porovnaní priebehu zvislých deformácií, ak sa v doske nachádzali otvory, výpočtový model podhodnocoval namerané deformácie.

Odporúčania pre prax

- Použitie normou stanovených redukcí pri vyšetrení vplyvu otvorov na líci stenového stĺpa je bezpečné, ale vo väčšine prípadov neekonomické a neposkytuje rovnakú mieru bezpečnosti pre rôzne polohy otvorov.
- Pri predikcii šmykovej odolnosti riešenej problematiky vplyvu otvorov prostredníctvom pripravovaného modelu prEC2 je nutné citlivo pristupovať k redukcii dĺžky kontrolného obvodu, ktorá by viedla k výraznej zmene pomeru $b_0/b_{0,5}$.
- Odporúčam použitie redukcie kontrolného obvodu v dôsledku tvaru podpery na vzdialenosť $\leq 1,5d$ od rohu podpery a prítomnosť otvorov zohľadniť metódou rovnobežných priamok pri redukcii dĺžky kontrolného obvodu stenových stĺpov.
- Odporúčam hlavnú výstuž dosky, ktorá je prerušená z dôvodu prítomnosti otvorov, nahradiť rovnakým množstvom výstuže v tesnej blízkosti otvoru.

Odporúčanie pre ďalší výskum

- Vykonať väčší počet experimentov zameraných na šmykovú odolnosť lokálne podopretých dosiek výrazne obdĺžnikovým stĺpom a zároveň oslabených otvorom a tak rozšíriť databázu experimentálne získaných odolností lokálne podopretých dosiek.
- Zamerať sa na experimentálne a numerické vyšetrenie otvorov rôznej veľkosti a polohy v rôznych vzdialenostiach od stĺpov, ktorých rozmery hrán sú $> 3d$.
- Overiť spoľahlivosť metódy rovnobežných priamok na väčšom množstve vzoriek a modifikácií polohy otvorov.
- Zamerať sa na vyšetrenie nesymetricky umiestnených otvorov v blízkosti stenových stĺpov a okrajov stien a na oslabené dosky otvormi zaťažené rôznou intenzitou zaťaženia, ktoré by viedlo k vyšetreniu vplyvu nevyrovnaných ohybových momentov na odolnosť lokálne podopretých dosiek proti pretlačeniu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI, A.C.I. 318-19 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* [online]. . [s.l.]: American Concrete Institute, 2019. ISBN 9781641950565.
- [2] AGUIAR, A. et al. Punching shear strength of waffle flat slabs with opening adjacent to elongated columns. In *Engineering Structures* [online]. 2021. Vol. 243, s. 112641. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621007914>>.
- [3] ANIL, Ö. - KINA, T. - SALMANI, V. Effect of opening size and location on punching shear behaviour of two-way RC slabs. In *Magazine of Concrete Research*. 2014. .
- [4] AUGUSTÍN, T. et al. Punching Resistance of Flat Slabs with Openings – Experimental Investigation. In *Solid State Phenomena* [online]. 2018. Vol. 272, s. 41–46. Dostupné na internete: <<https://www.scientific.net/SSP.272.41>>.
- [5] BARTOLAC, M. - DAMJANOVIĆ, D. - DUVNJAK, I. Proboj ravnih ploča s posmičnom armaturom i bez takve armature. In *Gradjevinar*. 2015. Vol. 67, no. 8, s. 771–786. .
- [6] BORGES, L.L.J. *Behavior in Punching Shear of Reinforced Concrete Flat Plates with Rectangular Columns and Openings*. [s.l.]: University of Brasília, 2004. .
- [7] BORGES, L.L.J. - MELO, G.S. - GOMES, R.B. Punching Shear of Reinforced Concrete Flat Plates with Openings. In *ACI Structural Journal* [online]. 2013. Vol. 110, no. 4, s. 547–556. Dostupné na internete: <<http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=51685740>>.
- [8] ČERVENKA, V. - JENDELE, L. - ČERVENKA, J. ATENA Program Documentation Part 1 Theory. In *Atena*. 2012. .
- [9] EN1992-1-1 *Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. . [s.l.]: CEN/CENELEC, TC250, 2004. 118 s. ISBN 978-0-580-98289.
- [10] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. (FIB) Model Code 2010 - Final draft, Volume 2. In *fib Bulletin No. 66*. Lausanne, Switzerland: Document Competence Center Siegmund Kästle, Germany, 2012. s. 370. ISBN 978-2-88394-106-9.
- [11] GOMES, R.B. - SILVA, J.A. Punching shear resistance of reinforced concrete flat slab with openings and rectangular columns. In *Proceedings of the 9th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. Bali, Indonesia: Institut Teknologi Bandung, 2003. s. 231–236. .
- [12] HA, T. et al. Effects of openings on the punching shear strength of RC flat-plate slabs without shear reinforcement. In *Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2015. Vol. 24, no. 15, s. 895–911. .
- [13] HARVAN, I. *Železobetónové nosné sústavy. Navrhovanie podľa európskych noriem*. . Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. 163–212 s.
- [14] HOGNESTAD, E. - ELSTNER, R.C. - HANSON, J.A. Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs. In *ACI Journal Proceedings* [online]. 1964. Vol. 61, no. 6, s. 643–656. Dostupné na internete: <<http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=7800>>.
- [15] JÚLIA B. SANTOS GUILHERME S. MELO, AND RONALDO B. GOMES, R.M.S. Punching Resistance of Flat Slabs with Openings Adjacent to the Columns. In *ACI Structural Journal* [online]. 2022. Vol. 119, no. 1. Dostupné na internete: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51734216>>.
- [16] LIBERATI, E.A.P. et al. Failure analysis of punching in reinforced concrete flat slabs with

- openings adjacent to the column. In *Engineering Structures* [online]. 2019. Vol. 182, no. November 2018, s. 331–343. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.073>>.
- [17] MOE, J. Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads. In *Portland Cement Association, Bull. D47*. 1961. .
- [18] MUTTONI, A. - SCHWARTZ, J. [online]. .Zurich, Switzerland, 1991. Dostupné na internete: <<http://infoscience.epfl.ch/record/111612>>.
- [19] OLIVEIRA, D.C. - GOMES, R.B. - MELO, G.S. Punching shear in reinforced concrete flat slabs with hole adjacent to the column and moment transfer. In *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* [online]. 2014. Vol. 7, no. 3, s. 414–467. Dostupné na internete: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952014000300006&lng=en&tlng=en>.
- [20] PR EN1992-1-1 *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings bridges and civil engineering works*. . 2021. 374 s.
- [21] REGAN, P.E. DESIGN FOR PUNCHING SHEAR. In *Structural Engineer*. 1974. Vol. 52, no. 6, s. 197–207. .
- [22] SOUZA, R.M. - MELO, G.S. - GOMES, R.B. Punching in reinforced concrete flat slabs with holes adjacent to the Column. In *fib Symposium TEL-AVIV 2013: Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling and Construction, Proceedings*. 2013. .
- [23] T.F.EL-SHAFIEY - M.HUSSEIN Behaviour of Flat Slabs with openings adjacent to columns. In *4th International Conference on concrete repair dresden,Germany*. 2011. no. January 2012, s. 177–185. .
- [24] TENG, S. et al. Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns. In *ACI Structural Journal* [online]. 2004. Vol. 101, no. 5. Dostupné na internete: <<http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=13390>>.

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 KORMOŠOVÁ, Ľudmila - AUGUSTÍN, Tomáš - HALVONÍK, Jaroslav. Non-linear analysis of slab-column connections with openings. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques - MBMST 2019 [elektronický zdroj] : selected papers of the 13th International Conference. 16–17 May, 2019, Vilnius, Lithuania*. 1. vyd. Vilnius : Vilnius Gediminas Technical University, 2019, USB kľúč, s. 366–372. ISSN 2029-9915. ISBN 978-609-476-197-3. V databáze: DOI: 10.3846/mbmst.2019.095 ; WOS: 000661870600053.
- AFC02 KORMOŠOVÁ, Ľudmila - HALVONÍK, Jaroslav - MAJTÁNOVÁ, Lucia. Safety of the Models for Assessment of Punching Resistance of Flat Slabs with Openings Adjacent to the Columns. In *26th Concrete Days 2019 : selected peer-reviewed full text papers from 26th International Conference Concrete Days. November 20-21, 2019, Hradec Kralove, Czech Republic*. 1. vyd. Baech : Trans Tech Publications, 2020, S. 186–192. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1668-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85090296474 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.309.186.

- AFC03 KORMOŠOVÁ, Ludmila - HALVONÍK, Jaroslav - AUGUSTÍN, Tomáš. Uncertainties in nonlinear modelling of punching. In *Engineering Mechanics 2020 [book of full texts. 26th international conference. November, 24-25, 2020, Brno, Czech Republic]*. 1. vyd. Brno : Brno University of Technology Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics, 2020, online, s. 294-297. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-5896-3. V databáze: DOI: 10.21495/5896-3-294 ; WOS: 000667956100066.
- AFC04 KORMOŠOVÁ, Ludmila - HALVONÍK, Jaroslav. Behavior of the experimental flat slab specimen supported by an elongated column. In *27th Concrete Days 2020 : selected peer-reviewed full text papers from 27th International Conference Concrete Days. December 2nd, 2020, Prague, Czech Republic*. 1. vyd. Baech : Trans Tech Publications, 2021, S. 87-93. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1821-8. V databáze: DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.322.87 ; SCOPUS: 2-s2.0-85122188845.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD02 KORMOŠOVÁ, Ludmila. Vplyv otvorov v blízkosti stĺpa na bezpečnosť modelov eurokódu na predikciu šmykovej odolnosti lokálne podopretých dosiek. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 397-404. ISBN 978-80-227-4972-5.
- AFD03 KORMOŠOVÁ, Ludmila. Neistoty pri nelineárnom modelovaní zlyhania pretlačením v lokálne podopretých doskách bez šmykovej výstuže. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th 2020, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 458-463. ISBN 978-80-227-5052-3.
- AFD04 KORMOŠOVÁ, Ludmila. Experimentálna analýza lokálne podopretej dosky oslabenej dvoma otvormi umiestnenými v strede stenového stĺpa. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 31st Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 13th 2021, Bratislava*,

Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, CD-ROM, s. 440-448. ISBN 978-80-227-5150-6.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEE01 KORMOŠOVÁ, Ľudmila - HALVONÍK, Jaroslav - MAJTÁNOVÁ, Lucia. Bezpečnosť modelov na predikciu šmykovej odolnosti bezprievlakových dosiek s otvormi pri stĺpoch. In *26. Betonárske dny 2019 [elektronický zdroj] : zborník príspevků konference. Hradec Králové, ČR, 20. a 21. listopadu 2019*. 1. vyd. Praha : Česká betonářská společnost ČSSI, 2019, USB klíč, [8] s. ISBN 978-80-907611-2-4.
- BEE02 KORMOŠOVÁ, Ľudmila - HALVONÍK, Jaroslav. Experimentálna analýza dosky s otvormi lokálne podopretej stenovým stĺpom. In *27. Betonárske dny 2020 [elektronický zdroj] : zborník ke konferenci. November 27, 2020*. 1. vyd. Praha : Česká betonářská společnost ČSSI, 2020, USB klíč, s. 211-218. ISBN 978-80-907611-3-1.