



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Meno a priezvisko:

Ing. Natália Gregušová

Autoreferát dizertačnej práce

**MAXIMÁLNA ODOLNOSŤ V PRETLAČENÍ LOKÁLNE
PODOPRETÝCH DOSIEK**

na získanie akademického titulu:

philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 30.5.2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Natália Gregušová

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

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 30.5. 2025

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:o:.....h na Katedre betónových konštrukcií
a mostov (Svf, STU v BA), Radlinského 11, 010 05 Bratislava.

.....
Prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Úvod

V súčasnosti sú lokálne podopreté dosky veľmi populárnym nosným systémom, a to najmä kvôli svojim estetickým, funkčným a ekonomickým výhodám. Priame podopretie stropných dosiek stĺpom, sa začalo používať na prelome 19. a 20. storočia, v období kedy sa betónové stavebníctvo začalo aktívne rozvíjať. Dovtedy sa stropné dosky navrhovali vždy s podopretím prostredníctvom nosníkov orientovaných v jednom alebo v dvoch smeroch. Vzhľadom na absenciu nosníkov sa pri lokálne podopretých doskách zaťaženie z dosky prenáša priamo do stĺpa, čo vedie ku koncentrácii značného šmykového napätia na malej styčnej ploche dosky a stĺpa. O odolnosti konštrukcie v tejto oblasti rozhoduje odolnosť dosky v pretlačení. Ak nie je dostatočná, možno ju zvýšiť napríklad zvýšením pevnosti betónu, množstva ohybovej výstuže pri hornom ťahanom povrchu, hrúbky dosky alebo plochy stĺpa. Realizácia týchto riešení býva však často obmedzená. Preto sa za najefektívnejší a v súčasnosti aj za najpoužívanejší spôsob zvyšovania odolnosti dosky v pretlačení považuje ich vystuženie šmykovou výstužou. Návrh šmykovej výstuže do lokálne podopretých dosiek je už dnes bežnou praxou. Medzi najpoužívanejšie typy šmykovej výstuže patria napríklad šmykové tne s rozkovanou hlavou, zvárané rebríčky alebo strmene. Okrem toho, dnes už existujú návrhové modely a normy, ktoré poskytujú postupy pre jej návrh. Zároveň sa však ukazuje, že účinok šmykovej výstuže má svoje limity a od určitej hranice sa už ďalšie zvyšovanie jej množstva neprejavuje aj zvýšením odolnosti dosky v pretlačení. Táto hranica sa označuje ako maximálna odolnosť dosky v pretlačení. V niektorých prípadoch však túto hranicu nemožno dosiahnuť, keďže odolnosť dosky je limitovaná aj ohybovým porušením. V minulosti bola maximálna odolnosť v pretlačení v porovnaní so súčasnými návrhovými predpismi vo všeobecnosti nižšia a stanovovala sa prevažne na empirických poznatkoch. S pokrokom výskumu a experimentálnych štúdií sa limity postupne revidovali a aktualizovali. V blízkej budúcnosti sa predpokladá prijatie druhej generácie Eurokódu 2, ktorej cieľom bolo odstrániť empirické prvky návrhu a nahradiť ich mechanickým prístupom, ktorý lepšie reflektuje fyzikálne a materiálové vlastnosti konštrukcie. Mení sa aj spôsob výpočtu maximálnej odolnosti dosky v pretlačení, kde nový model zohľadňuje viacero parametrov (nie len typ šmykovej výstuže), ktoré majú vplyv na maximálne možné navýšenie odolnosti dosky v pretlačení.

Súčasný stav problematiky

V súčasnej generácii Eurokódu 2 [1] je maximálna odolnosť dosky v pretlačení definovaná ako odolnosť betónovej tlakovej diagonály, pričom je zároveň obmedzená aj súčinom $k_{\max}$ a odolnosti dosky bez šmykovej výstuže $V_{R,c}$. Hodnota súčiniteľa $k_{\max}$ je rovnaká pre všetky typy šmykovej výstuže a má hodnotu 1,5, pričom ide o čisto empiricky stanovenú veličinu. Niektoré krajiny si hodnotu $k_{\max}$ upravili vo svojich národných prílohách (viď. Tabuľka 1.1), a to na základe národných zvyklostí a výsledkov experimentálnych skúmaní. Napríklad slovenská národná príloha stanovuje pre dosky vystužené strmeňmi hodnotu $k_{\max}=1,4$ pri účinnej výške dosky 200mm a $k_{\max}=1,7$ pri 700 mm. Medziľahlé hodnoty sa určujú lineárnou interpoláciou. V prípade dosky vystuženej šmykovými trŕmi sa uvažuje $k_{\max}=1,9$. Veľká Británia uplatňuje konštantnú hodnotu $k_{\max}=2,0$, zatiaľ čo Švédsko používa hodnotu $k_{\max}=1,6$, nezávisle od typu šmykovej výstuže. Ako je možné vidieť v Tabuľke 1.1, rozdiely medzi národnými prílohami sú výrazné.

Aj keď boli všetky hodnoty stanovené na základe experimentálnych údajov, skutočnosť, že jednotlivé krajiny dospeli k tak rozdielnym číselným hodnotám toho istého súčiniteľa, poukazuje nie len na absenciu jednotného návrhového postupu ale zároveň aj na nekonzistentnosť aktuálne používaného výpočtového modelu. Navyše sa stále uplatňuje aj limitovanie odolnosti dosky v pretlačení kapacitou betónovej tlakovej diagonály, ktorá je rozhodujúca práve pri hrubších doskách a menších prierezoch stĺpov

(viď. Obrázok 1.18). Tento výpočet vychádza z analógie nosníka namáhaného šmykom, čo však nie je úplne vhodné vzhľadom na odlišný charakter prenosu zaťaženia v lokálne podopretých doskách.

Tabuľka 1.1 Stanovenie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení podľa EC2, jeho národných príloh a podľa ETA (Podľa referencie [2])

EN1992-1-1(2004) [1]	$\min \left\{ 0,4 v f_c u_0 d \right\}$ $\left\{ 1,5 v_{R,c} u_1 d \right\}$	u_0 je dĺžka obvodu prierezu stĺpa
STN EN 1992-1-1 Slovensko [3]	$\min \left\{ 0,4 v f_c u_0 d \right\}$ $\left\{ k_{\max} \cdot v_{R,c} u_1 d \right\}$ $k_{\max} = 1,4 - 1,7^2$ strmene, ohyby $k_{\max} = 1,9$ šmykové trne	u_1 je základný kontrolný obvod vo vzdialenosti $2d$ od líca stĺpa
Onorm EN 1992-1-1 Rakúsko [4]	$\min \left\{ 0,4 v f_c u_0 d \right\}$ $\left\{ k_{\max} \cdot v_{R,c} u_1 d \right\}$ $k_{\max} = 1,4 - 1,6^2$ strmene, ohyby $k_{\max} = 1,9$ šmykové trne	f_c je valcová pevnosť betónu v tlaku $v_{R,c}$ je odolnosť dosky bez šmykovej výstuže [MPa] d je účinná výška dosky
DIN EN 1992-1-1 Nemecko [5]	$1,4 \cdot v_{Rd,c} u_1 d^{1)}$	v je redukčný súčiniteľ ¹⁾ Platí pre všetky typy šmykovej výstuže
BS EN 1992-1-1 Spojené Kráľovstvo [6]	$\min \left\{ 0,4 v f_{cd} u_0 d \right\}$ $\left\{ 2,0 \cdot v_{R,c} u_1 d^{1)} \right\}$	²⁾ Hodnota závisí od účinnej výšky d
SIS EN 1992-1-1 Švédsko [7]	$\min \left\{ 0,4 v f_{cd} u_0 d \right\}$ $\left\{ 1,6 \cdot v_{R,c} u_1 d^{1)} \right\}$	³⁾ Len pre použité šmykových trňov
ETA-13/0151 [8]	$1,96 \cdot v_{R,c} u_1 d^{3)}$	

Druhá generácia Eurokódu 2 [9] definuje maximálnu odolnosť dosky v pretlačení výhradne ako súčin odolnosti bez šmykovej výstuže a súčiniteľa η_{sys} , ktorý zohľadňuje viaceré parametre šmykovej výstuže. Uvedené sú dva spôsoby výpočtu: pre návrh nových konštrukcií – (1.1) pre dosky vystužené šmykovými trňmi a (1.2) strmenmi. Vzťah (1.3) je určený pre posúdenie existujúcich konštrukcií.

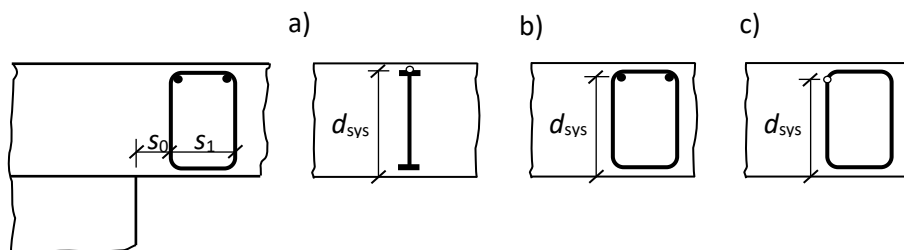
$$\eta_{sys} = 0,70 + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} \geq 1,0 \quad (1.1)$$

$$\eta_{sys} = 0,50 + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} \geq 1,0 \quad (1.2)$$

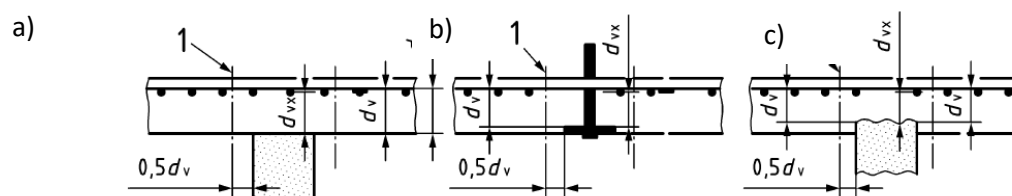
$$\eta_{sys} = 1,15 \frac{d_{sys}}{d_v} + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} - 0,85 \frac{s_0}{d_{sys}} \geq 1,0 \quad (1.3)$$

kde:

- d_v je priemerná účinná šmyková výška dosky (podľa Obrázku 1.2)
 b_0 je dĺžka obvodu stĺpa
 d_{sys} je účinná šmyková výška (podľa Obrázku 1.1)
 s_0 je radiálna vzdialenosť prvého radu šmykovej výstuže od líca stĺpa

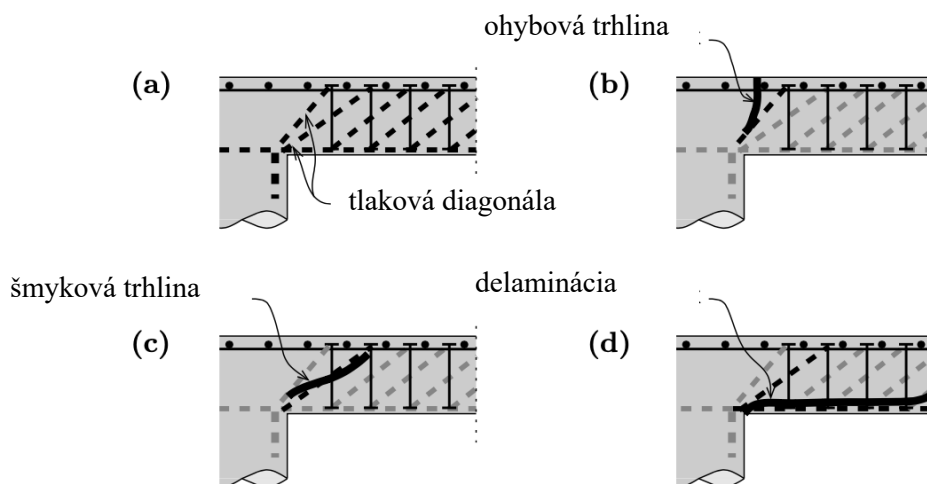


Obrázok 1.1 Stanovenie parametra d_{sys} : a) po hornú hranu hlavy šmykovej výstuže; b) po os pozdĺžnej výstuže vo vnútri šmykovej výstuže; c) začiatok ohybu šmykovej výstuže; (Podľa referencie [9])



Obrázok 1.2 Stanovenie účinnej výšky v šmyku dosky d_v : a) podopretá doska; b) podvesená doska; c) podopretá doska so zapustenou podperou [9]

Druhá generácia prináša menej empirický a zjednotený návrhový model založený na teórii kritickej šmykovej trhliny. Táto teória vychádza z predpokladu, že maximálna odolnosť v pretlačení závisí od odolnosti betónu medzi lícom stĺpa a prvým radom šmykovej výstuže. K porušeniu dochádza rozdrvením betónovej tlakovej diagonály s veľmi strmým sklonom.



Obrázok 1.3 Parametre ovplyvňujúce odolnosť betónovej tlakovej diagonály: a) detail betónovej tlakovej diagonály; b) rozvoj ohybovej trhliny; c) rozvoj šmykovej trhliny; d) rozvoj trhliny od delaminácie [10]

Hlavným predpokladom je, že so zvyšujúcim sa namáhaním lokálne podopretých dosiek narastá aj ich pootočenie, čo vedie k otváraniu ohybových trhlín. Tieto trhliny vznikajú v blízkosti stĺpa a môžu nepriaznivo ovplyvniť schopnosť betónu prenášať zaťaženie v oblasti medzi stĺpom a prvým radom šmykovej výstuže. Z tohto dôvodu možno predpokladať, že parametre ovplyvňujúce pootočenie dosky môžu zároveň ovplyvňovať aj schopnosť betónu prenášať zaťaženie v tejto kritickej oblasti, a tým teda aj maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení. Medzi tieto parametre patrí napríklad vzdialenosť prvého radu šmykovej výstuže od líca stĺpa, účinnosť kotvenia šmykovej výstuže, pomer dĺžky obvodu stĺpa k účinnej výške dosky, stupeň vystuženia ohybovou výstužou ale aj jej medza klzu.

Výskumy, ktoré skúmali maximálnu odolnosť dosiek v pretlačení ako hlavnú tému, možno rozdeliť do dvoch výskumných skupín. Prvú skupinu predstavuje skupina na EPFL v Lausanne pod vedením profesora Muttoniho, kde bol experimentálny program zameraný na túto problematiku pripravený výskumníkom Lipsom [11]. Druhá skupina pôsobí na RWTH v Aachene pod záštitou profesora Heggera, pričom sa opiera najmä o experimentálny program Schmidta [12]. Oba výskumné tímy publikovali samostatné príspevky [50],[14], v ktorých sa zaoberajú výlučne problematikou maximálnej odolnosti dosiek v pretlačení v súvislosti s modelom EC2(2023), a teda aj vplyvom jednotlivých parametrov. Tieto príspevky sú podrobnejšie rozobrané v nasledujúcom texte. Zaujímavé však je, že tieto dva výskumné tímy dospeli k vzájomne protichodným záverom.

Príspevok autorov Fraile, Simões, Ruiz a Muttoni [13], skúma použiteľnosť tohto nového mechanického modelu pre stanovenie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení. Hlavným cieľom príspevku bolo identifikovať parametre, ktoré majú vplyv na tvar kritickej šmykovej trhliny a teda aj na maximálnu odolnosť dosky v pretlačení. Poukazuje tiež na výrazné podhodnocovanie maximálnej miery zvýšenia odolnosti dosky šmykovou výstužou súčasnými návrhovými postupmi a to pre dosky vystužené šmykovými tŕmi [15] ale aj strmeňmi [16]. Jedným z kľúčových záverov bolo, že maximálna odolnosť dosky v pretlačení závisí od schopnosti betónu prenášať šmykové sily medzi lícom stĺpa a prvým radom šmykovej výstuže. A preto sú poloha šmykovej výstuže a jej účinnosť kotvenia významnými parametrami, ktoré kontrolujú tvar kritickej šmykovej trhliny a teda aj maximálnu odolnosť dosky v pretlačení [13]. Ďalšie parametre, ktoré sú v tomto kontexte dôležité sú pomer obvodu stĺpa k účinnej výške dosky b_0/d_v , množstvo ohybovej výstuže a jej medza klzu. Pri malých stĺpoch a nepriaznivej geometrii výstuže môže dôjsť k tomu, že šmyková výstuž je aktivovaná len minimálne, prípadne vôbec. V takýchto prípadoch môže byť reálna odolnosť porovnateľná s doskami bez výstuže, hoci návrh založený na konštantnom súčiniteli by predpokladal jej výrazný prínos. Rovnako bolo preukázané, že vyšší stupeň ohybovej výstuže a použitie ocele s vyššou pevnosťou zlepšujú prenos šmykových napätí v dôsledku menších pootočení a teda aj menších širok trhlín. Ak sa však návrh kalibruje iba na experimentoch s veľmi vystuženými doskami, hrozí, že pre bežné prípady bude maximálna odolnosť v pretlačení výrazne nadhodnotená. Tieto skutočnosti zdôrazňujú potrebu mechanicky podložených výpočtových modelov (akým je CSCT) [13]. Súčasťou príspevku sú tiež praktické odporúčania na revíziu EC2(2023), kde sa navrhuje súčiniteľ η_{sys} vypočítat podľa vzťahu (1.4). Výpočet sa líši od vzťahu uvedenom v EC2(2023) (1.3), pričom referencia [13] uvažuje o 15% menší vplyv pomeru d_{sys}/d_v a naopak o 15% vyšší vplyv pomeru s_0/d_{sys} .

$$\eta_{sys} = \frac{d_{sys}}{d_v} + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} - \frac{s_0}{d_{sys}} \geq 1,0 \quad (1.4)$$

Schmidt spolu s Kalusom a Heggerom (2021) v príspevku [14] analyzovali databázu 29 vzoriek (17 stropných a 12 základové dosiek) s cieľom posúdiť vhodnosť návrhového vzťahu (1.3) pre výpočet maximálnej odolnosti dosky v pretlačení podľa EC2(2023). Rovnako ako mnohé predchádzajúce štúdie, aj tento príspevok zdôrazňuje potrebu jednotného návrhového modelu pre stanovenie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení. Tiež skúma vplyv rôznych parametrov na maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti

dosky v pretlačení ale už na základe experimentálne získaných hodnôt η_{sys} . Pozorujú parametre ako sú d , a_0/d , u_0/d a $(s_0+s_1)/d$ (pričom a_0 predstavuje vzdialenosť osi podpory od miesta nulových ohybových momentov a s_1 radiálnu vzdialenosť medzi prvým a druhým radom šmykovej výstuže). Záver práce však protirečí predchádzajúcemu príspevku – autori konštatujú, že uvedené parametre majú len obmedzený vplyv na maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti, a preto pri bežnom návrhu odporúčajú uvažovať s konštantnou hodnotou súčiniteľa η_{sys} , a to $\eta_{sys}=1,40$ pre strmene a $\eta_{sys}=1,75$ pre šmykové tŕne. Hoci vzťah (1.3) poskytuje presné výsledky, pre praktické návrhové použitie ho označujú ako nepraktický vzhľadom na vysokú citlivosť na parameter d_{sys} . Napríklad pri doske vystuženej strmeňmi, spôsobí zmenšenie d_{sys} o 20 mm pokles η_{sys} z 1,78 na 1,64. Preto navrhujú používať túto presnú rovnicu len pri podrobnejších analýzach. Autori poukazujú na skutočnosť, že úroveň maximálnej odolnosti dosky v pretlačení $V_{R,max}$ je silne ovplyvnená výpočtom referenčnej pevnosti $V_{R,c}$ a jej vzťahom k experimentálne zistenej únosnosti. Práca zároveň zdôrazňuje potrebu jednotného postupu pre definovanie súčiniteľa η_{sys} , ktorý sa v návrhových predpisoch v súčasnosti stanovuje rozdielne – buď ako stredná hodnota, alebo ako 5 % fraktíl pomeru $V_{R,max} / V_{R,c}$. Výsledky článku podporujú zavedenie konzervatívnych dolných hraníc pre η_{sys} .

Ako je uvedené v predchádzajúcom odseku, názory viacerých odborníkov sa na danú problematiku aj v súčasnosti rozchádzajú, a preto je presnosť a použiteľnosť návrhového modelu, uvedeného v EC2(2023) naďalej predmetom diskusie. Otázkou teda zostáva, či maximálne možné navýšenie odolnosti dosky v pretlačení šmykovou výstužou, závisí výlučne len od jej typu (resp. účinnosti kotvenia) alebo existujú aj ďalšie parametre, ktoré ju ovplyvňujú v takej miere, že je ich zahrnutie do výpočtu nevyhnutné pre spoľahlivú predikciu maximálnej odolnosti dosky v pretlačení. Podľa EC2(2023) je takýmto parametrom pomer obvodu stĺpa k účinnej výške dosky v šmyku b_0/d_v . Navyše, väčšina doterajších výskumov zameraných na maximálnu odolnosť dosky v pretlačení bola realizovaná väčšinou pre pomer $b_0/d_v = 5$ a niektoré aj pre $b_0/d_v = 3$. Vzhľadom na to, že je tento pomer rozhodujúcim pri výpočte η_{sys} (viď. 1.1 a 1.2) pre návrh nových konštrukcií, je vhodné overiť presnosť výpočtového modelu η_{sys} aj pre dosky s inými hodnotami týchto pomerov. Z tohto dôvodu bol navrhnutý experimentálny program, ktorý doplnil experimentálne dáta aj o iné hodnoty pomeru b_0/d_v . Konkrétne boli zvolené hodnoty $b_0/d_v = 4$ a $b_0/d_v = 7$.

Ciele

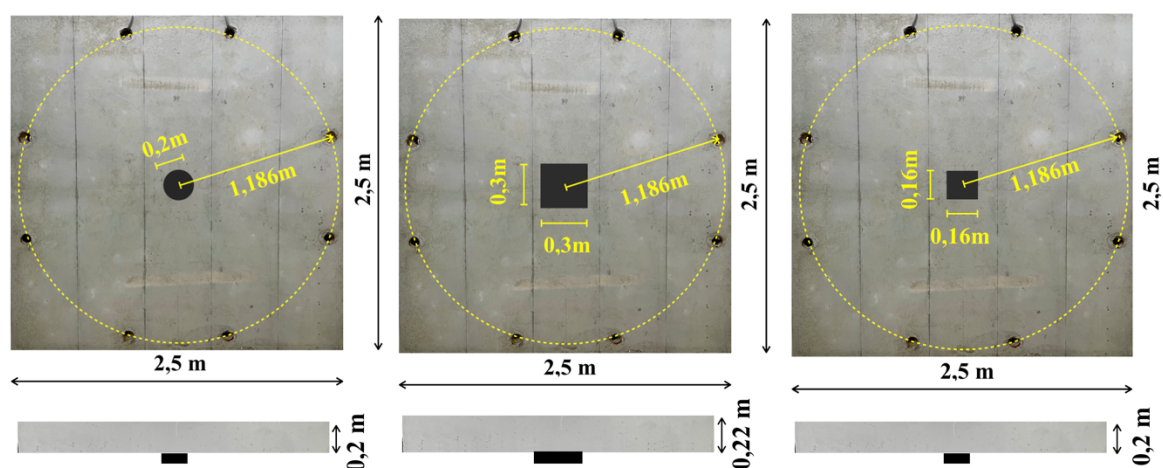
Hlavným cieľom dizertačnej práce je poskytnúť komplexný a jednotný pohľad na maximálnu odolnosť lokálne podopretých dosiek v pretlačení a analyzovať kľúčové faktory, ktoré ju ovplyvňujú. Tento hlavný cieľ je ďalej rozdelený na nasledujúce čiastkové oblasti:

1. Identifikovať medzery v dostupných experimentálnych údajoch a navrhnúť ich doplnenie tak, aby bolo možné spoľahlivo overiť výpočtové modely pre výpočet $k_{max}(\eta_{sys})$ aj pre širšiu škálu pomerov b_0/d_v .
2. Vyhodnotenie vplyvu pomeru b_0/d_v , účinnej výšky d a šmykovej štíhlosti r_s/d na maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti v pretlačení.
3. Posúdenie presnosti a spoľahlivosti súčasne používaných návrhových prístupov, ako aj návrhového modelu pre stanovenie maximálnej odolnosti dosiek v pretlačení, uvedeného v druhej generácii Eurokódu 2.
4. Kalibrácia modelu prostredníctvom výsledkov experimentov, ktorý umožní presnú a spoľahlivú predikciu $k_{max}(\eta_{sys})$.

Experimentálny program

Experimentálny výskum bol navrhnutý, tak aby doplnil databázu už realizovaných experimentálnych skúšok. Jedným z kľúčových parametrov pri výpočte η_{sys} je podľa vzťahu (1.1) a (1.2) pomer obvodu prierezu stĺpa k účinnej výške dosky b_0/d_v , a preto bol tento pomer rozhodujúcim aj pri plánovaní experimentu. Experimentálny program pozostával z ôsmich vzoriek, rozdelených do troch sérií S1-S3, podľa pomeru b_0/d_v . Skúšobné dosky boli navrhnuté tak aby zlyhali na úrovni maximálnej odolnosti dosky v pretlačení $V_{R,max}$ a bolo tak možné jednoznačne definovať maximálnu mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení šmykovou výstužou. Pri návrhu experimentálneho programu sa vychádzalo z už realizovaných experimentov v Centrálnom laboratóriu STU (Majtánová [17], Augustín [18], Bolešová [20]) ale aj zo zahraničných výskumov (Lips [19], Schmidt [12]).

Skúšobné dosky mali štvorcový pôdorys s rozmermi 2,5 x 2,5 m. Tento rozmer, rovnako ako aj poloha otvorov pre oceľové tyče (podpery), bol určený podmienkami laboratória. Vzďialenosť podpíer od osi stĺpa $r_s = 1,186$ m, predstavovala polohu nulových ohybových momentov. Pri uvažovaní $r_s = 0,22L$ táto vzdialenosť zodpovedá doske s efektívnym rozpätím 5,4m. Hlavným premenným parametrom skúšok bol pomer obvodu stĺpa k účinnej výške dosky b_0/d_v . V prvej sérii skúšobných vzoriek mali dosky hrúbku 200 mm a boli podpreté kruhovým stĺpom s priemerom 200 mm, čo zodpovedalo pomeru $b_0/d_v = 4$. Dosky v sérii S3 sa z tohto hľadiska od S1 odlišovali len usporiadaním šmykovej výstuže. Pre druhú sériu bol pomer b_0/d_v stanovený na 7, čomu zodpovedala hrúbka dosiek 220 mm a štvorcový stĺp s hranou 300 mm. Stĺpová podpera bola v experimentoch nahradená oceľovou platňou, ktorá bola dodatočne pripevnená k spodnému povrchu dosky. Šmyková štíhlosť r_s/d dosahovala hodnotu 7,65 pre dosky v sériách S1 a S3, zatiaľ čo pre sériu S2 bola 6,77. Každá zo série S1 a S2 obsahovala tri dosky: dosku bez šmykovej výstuže, dosku vystuženú strmeňmi a dosku vystuženú šmykovými tržmi s rozkovanou hlavou od spoločnosti Peikko, ďalej označovanú ako PSB výstuž. Dosky v sérii S3 boli navrhnuté ako dopĺňujúce k sérii S1, preto séria S3 neobsahovala referenčnú dosku bez šmykovej výstuže.



Obrázok 1.4 Geometria skúšobných vzoriek: vľavo Séria S2+S3.1; v strede séria S2; vpravo S3.2

Ohybová výstuž bola jednotná pre všetky skúšobné vzorky. Výstuž pri hornom povrchu dosky ($\phi 20$ /125 mm) sa navrhla tak, aby nedošlo k ohybovému zlyhaniu a zároveň aby nebol prekročený maximálny stupeň vystuženia. Výstuž pri spodnom povrchu ($\phi 10$ /200 mm) bola navrhnutá tak aby spĺňala požiadavku minimálnej plochy vystuženia.

Tabuľka 1.2 Parametre skúšobných vzoriek; (*priemer kruhovej podpery)

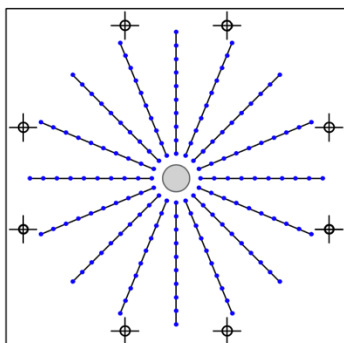
		h_d [mm]	a_c [mm]	d [mm]	b_0/d_v [-]	r_s/d [-]	f_c [MPa]	ρ [%]	f_y [MPa]	Typ ŠV
Séria S1	S1.0									-
	S1.1	200	200*	155	4,05	7,65	26,07	1,62	618,9	PSB
	S1.2									Strmene
Séria S2	S2.0									-
	S2.1	220	300	175	6,85	6,77	18,55	1,44	685,4	PSB
	S2.2									Strmene
Séria S3	S3.1		200*		4,05					PSB
	S3.2	200	160	155	4,12	7,65	15,38	1,62	582,0	Strmene

Vzorky S1.1, S2.1 a S3.1 boli vystužené šmykovými tŕmi s priemerom 12 mm, pričom v každom obvode bolo umiestnených 16 kusov (viď. Obrázok 1.5). Výstuž vo forme strmeňov (vzorky S1.2, S2.2 a S3.2) bola zvolená s cieľom. Šmyková výstuž bola navrhnutá tak, aby celková odolnosť dosky v pretlačení výrazne prevyšovala nielen ohybovú odolnosť, ale aj maximálnu odolnosť dosky v pretlačení. Základné parametre dosiek vystužených šmykovou výstužou sú spracované v Tabuľke 1.3, pričom doplnujúce vysvetlenie poskytuje Obrázok 1.5.

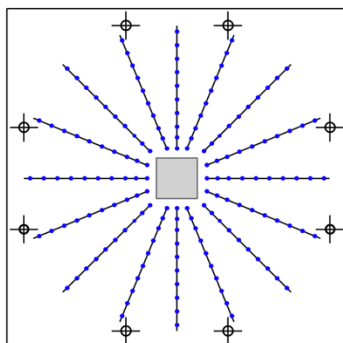
Tabuľka 1.3 Geometrické a materiálové vlastnosti experimentálnych vzoriek so ŠV

		TYP	ϕ_{sw} [mm]	s_0 [mm]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	d_{sys} [mm]	ρ_{sw} [%]	f_{yw} [MPa]
Séria S1	S1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	S1.1	PSB	12	80	100	100	175	1,25	550
	S1.2	Strmene	10	67	90	90	145	0,97	500
Séria S2	S2.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2.1	PSB	12	70	80	100	195	0,94	550
	S2.2	Strmene	10	70	90	90	165	0,97	500
Séria S3	S3.1	PSB	12	60	80	100	175	1,6	550
	S3.2	Strmene	10	60	80	90	145	1,4	500

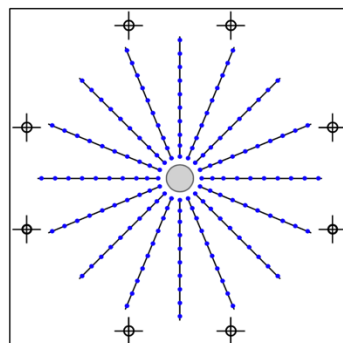
S1.1



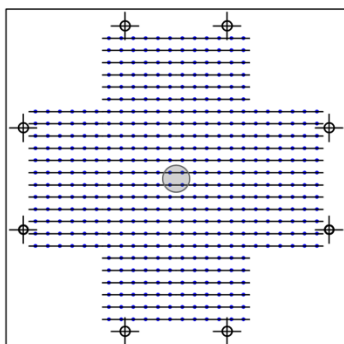
S2.1



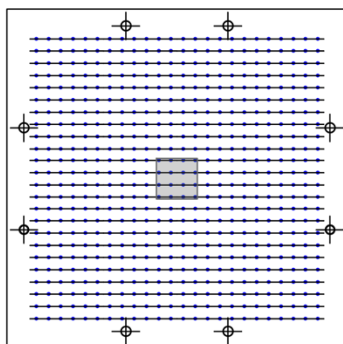
S3.1



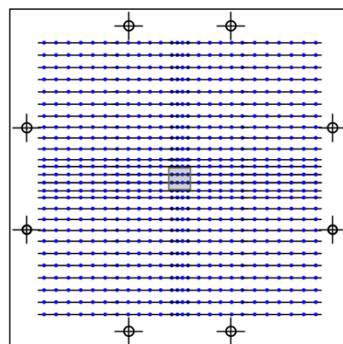
S1.2



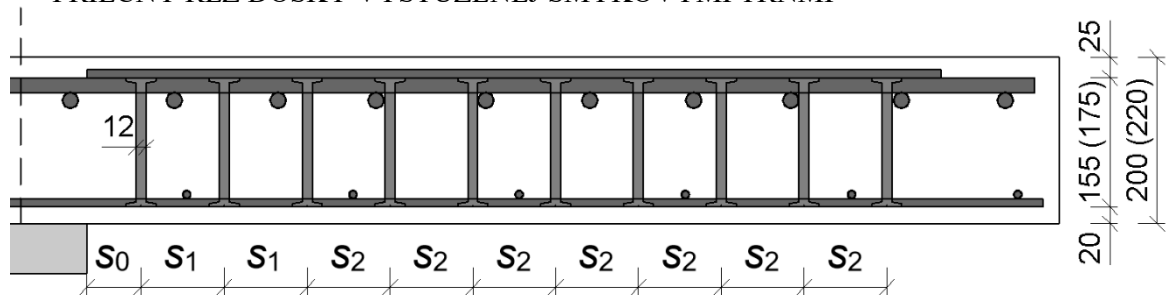
S2.2



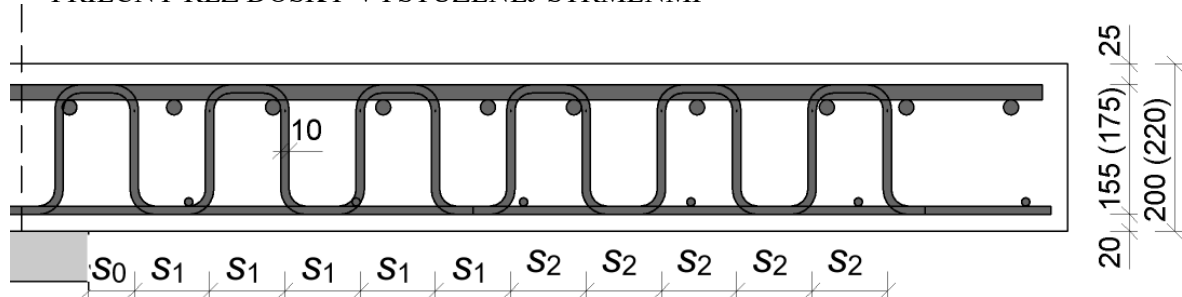
S3.2



PRIEČNY REZ DOSKY VYSTUŽENEJ ŠMYKOVÝMI TRŇMI



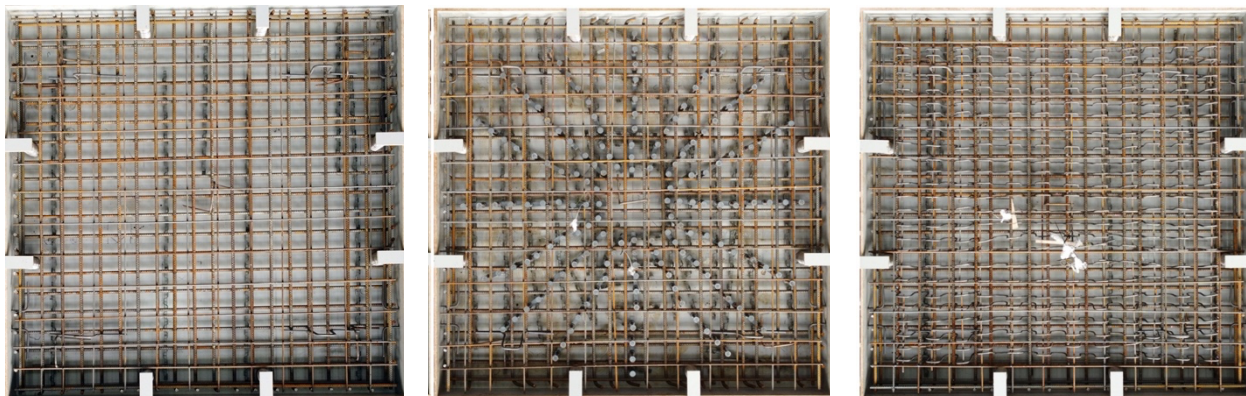
PRIEČNY REZ DOSKY VYSTUŽENEJ STRMEŇMI



Obrázok 1.5 Schematické zobrazenie skúšobných vzoriek so šmykovou výstužou: v pôdoryse (hore) a v reze (dole)

Výroba vzoriek

Výroba vzoriek prebiehala vo výrobnom závode spoločnosti STRABAG s.r.o., v Seredi. Prvá séria bola vyrobená v auguste 2023, druhá vo februári 2024 a tretia následne v marci 2024. Proces výroby jednej série prebiehal v troch fázach počas troch dní.



Obrázok 1.6 Pohľad do pripraveného debnenia pred betonážou, séria S2

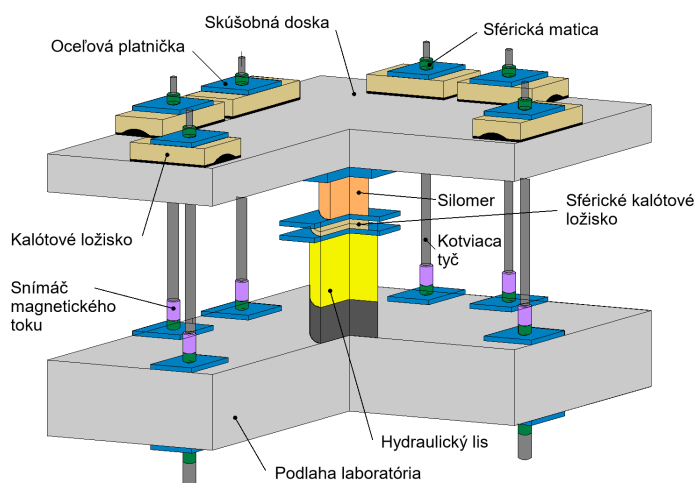
Prvý deň bol venovaný prípravným prácam, konkrétne montáži debnenia a ukladaniu výstuže. Druhý deň prebiehala betonáž vzoriek, pričom bol kladený dôraz na zabezpečenie homogénnych vlastností betónu v celej sérii. Aby sa predišlo variabilite v mechanických vlastnostiach betónu, všetky dosky v rámci jednej série boli zhotovené z jednej betónovej zmesi, pripravenej v rovnakých podmienkach. Betónová zmes bola do foriem ukladaná rovnomerne. Proces bol doplnený kontrolovaným vibrovaním pomocou ponorného vibrátora, čo zabezpečilo dôkladné zhutnenie betónu a elimináciu vzduchových dutín. Z rovnakej betónovej zmesi a v rovnakom čase boli vyhotovené aj skúšobné telesá – kocky, hranoly a valce, pričom ich zhutnenie bolo realizované vibračným stolíkom. Na tretí deň prebiehalo oddebnenie malých skúšobných telies a následné čistenie foriem.



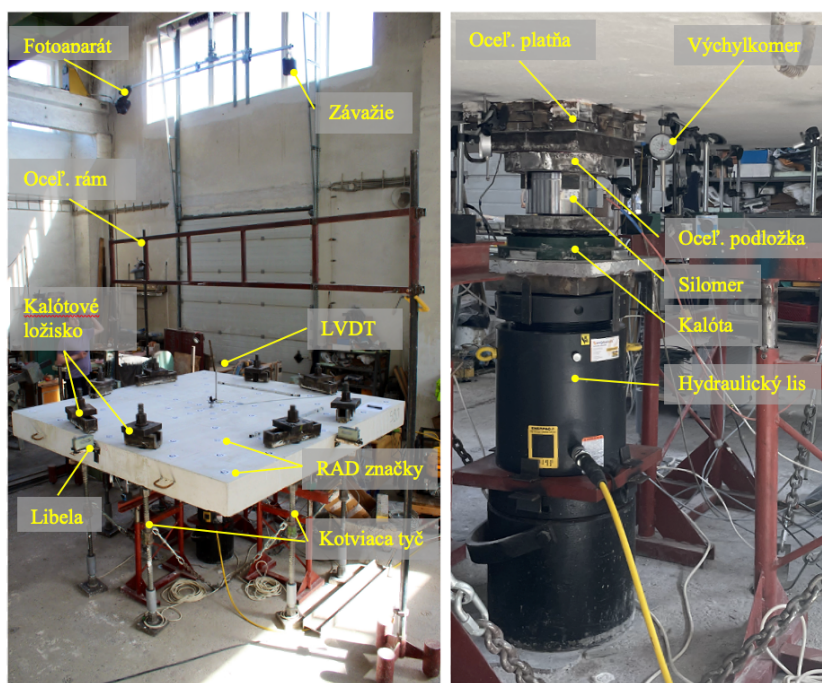
Obrázok 1.7 Proces betonáže skúšobných vzoriek

Skúšobná zostava a meracie zariadenia

Návrh experimentálnej zostavy vychádzal z už zrealizovaných experimentov popísaných vyššie. Skúšobná vzorka bola ukotvená do podlahy laboratória prostredníctvom ôsmich závitových tyčí (priemer 36 mm), ktoré boli pre zvýšenie stability navyše uchytené reťazami v dvoch navzájom kolmých smeroch [18]. Kotvenie tyčí v doske pri hornom povrchu sa realizovalo prostredníctvom matice, ocelevej platničky, a kalótového ložiska, ktoré zabezpečilo kĺbové podopretie dosky a teda podmienku nulových ohybových momentov. Pre zabezpečenie stability zostavy bol spodný povrch dosky počas prvého zaťažovacieho kroku podopretý oceľovými podložkami a maticami. Tieto prvky boli následne uvoľnené pri úrovni zaťaženia mierne presahujúcej vlastnú tiaž dosky. Zaťaženie bolo aplikované pomocou hydraulického lisu Enerpac s maximálnou kapacitou 3000 kN v smere zdola nahor. Veľkosť aplikovanej sily bola zaznamenávaná silomerom Hottinger (HBM) s maximálnou kapacitou 2000 kN a presnosťou merania 1 %.



Obrázok 1.8 Experimentálna zostava - schéma



Obrázok 1.9 Experimentálna zostava a meracie zariadenia

Deformácia dosky bola sledovaná viacerými metódami. Primárne bola počas celej skúšky realizovaná viacsúmmková konvergentná fotogrametria, ktorá umožnila zaznamenávať priestorové deformácie v troch smeroch (x,y,z) na základe prilepených automaticky detegovaných RAD značiek. V rámci jedného zaťažovacieho kroku bolo vyhotovených vždy 20 snímok. Na meranie vertikálnych deformácií boli použité LVDT snímače (Linear Variable Differential Transformer) s presnosťou 0,01 mm. Jeden z týchto snímačov bol umiestnený na hornom povrchu v strede dosky a ďalšie sa použili ako kontrolné meracie zariadenie na spodnom povrchu dosky. Zvislá deformácia pri spodnom povrchu dosky sa odčítavala mechanicky pomocou výchylkomerov. Okrem toho bolo sledované aj pootočené dosky, ktoré bolo monitorované prostredníctvom libiel, upevnených na okrajoch dosky, vždy v jej strednici. Pomerné pretvorenia boli merané pomocou tenzometrov pripevnených v blízkosti podpory k spodnému povrchu dosky a v prípade niektorých skúšobných vzoriek aj na šmykovej výstuži.



Obrázok 1.10 Tenzometrické snímače na betónovom povrchu a šmykovej výstuži

Vyhodnotenie

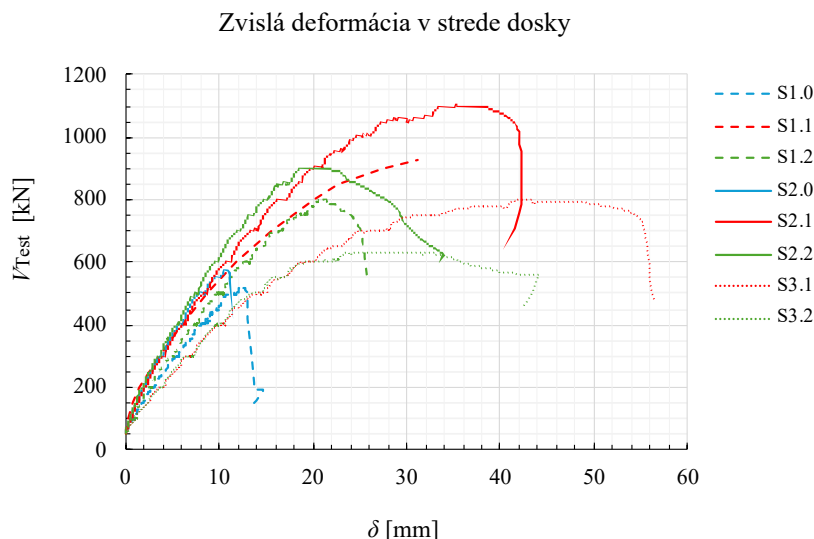
Výsledky experimentov potvrdzujú už známy poznatok, že použitím šmykovej výstuže možno výrazne zvýšiť nie len odolnosť dosky v pretlačení, ale aj jej deformačnú a kapacitu v pootočení, čím sa zmierňuje krehký charakter porušenia lokálne podporených dosiek. Namerané odolnosti jednotlivých vzoriek sú spracované v Tabuľke 1.4.

Tabuľka 1.4 Maximálna odolnosť vzoriek ; PSB- Šmykové tŕne; ST- Strmene

		a_c [mm]	d [mm]	f_c [MPa]	Typ ŠV	$V_{R,Test}$ [kN]	$V_{R,Test}/V_{R0,Test}$ [-]
Séria S1	S1.0	200*	155	26,07	-	521,4	-
	S1.1				PSB	961,7	1,84
	S1.2				ST	799,8	1,53
Séria S2	S2.0	300	175	18,55	-	575,9	-
	S2.1				PSB	1100,3	1,91
	S2.2				ST	900,6	1,56
Séria S3	S3.1	200*	155	15,38	PSB	798,8	1,83**
	S3.2	160			ST	630,7	1,44**

**Odolnosť bez šmykovej výstuže sa určila ako: $V_{R,0,test} S1.0 \sqrt[3]{f_{c,S3}} / \sqrt[3]{f_{c,S1}}$

Použitie šmykových trťov viedlo k výraznému zvýšeniu odolnosti v pretlačení v porovnaní s referenčnými doskami bez šmykovej výstuže. Namerané hodnoty ukázali nárast odolnosti v pretlačení v rozsahu od 1,83-násobku do 1,91-násobku. V prípade dosiek vystužených strmeňmi došlo k navýšeniu odolnosti v rozsahu od 1,44- až po 1,56-násobok referenčnej hodnoty.



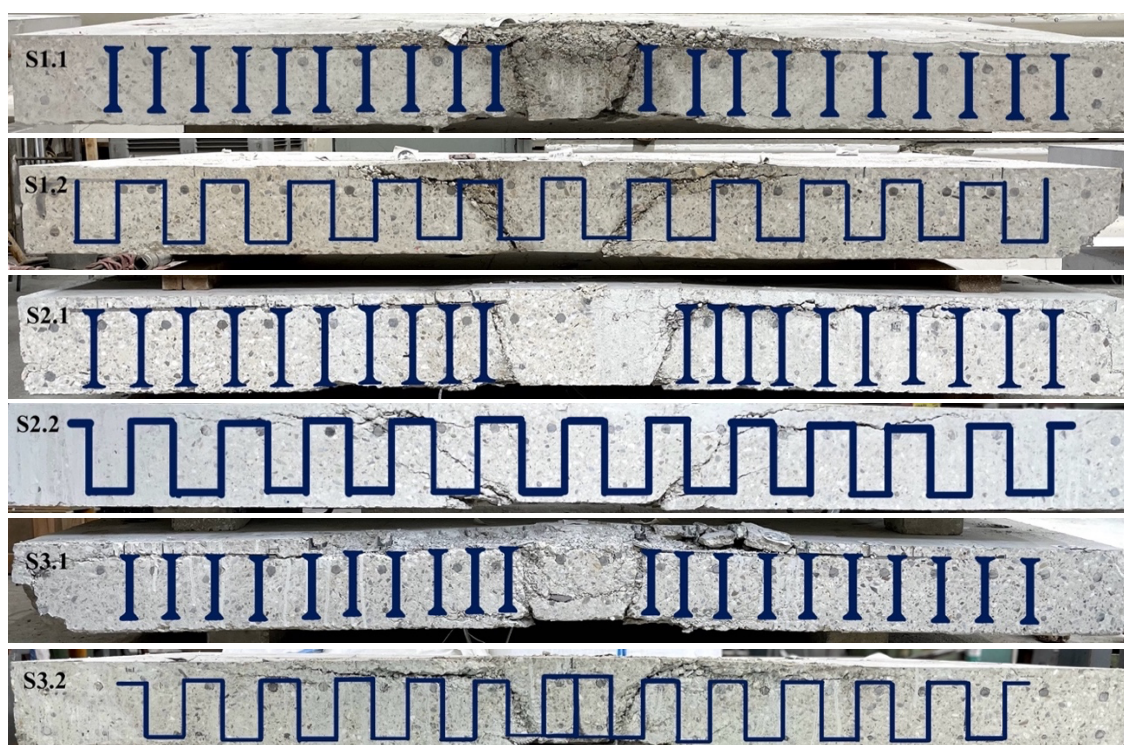
Obrázok 1.11 Maximálna zvislá deformácia v závislosti od zaťaženia – všetky dosky

Spôsoby porušenia skúšobných vzoriek

Všetky dosky vystužené šmykovou výstužou zlyhali pri dosiahnutí svojej maximálnej odolnosti v pretlačení, pričom vo všetkých prípadoch bol pozorovaný typický tvar porušenia pre pretlačenie v podobe šmykového kužeľa. Pri doskách bez šmykovej výstuže bol sklon šikmých trhlín v porovnaní s vystuženými doskami výrazne menší – pohyboval sa v rozmedzí približne 22° až 40° . Pri vzorkách vystužených šmykovými trťami ukončenými dvomi hlavami bolo možné pozorovať drvenie betónovej tlakovej diagonály, ktorá sa vytvorila medzi prvým radom šmykovej výstuže a lícom stĺpa. Táto diagonála mala výrazne strmý sklon v rozsahu 64° až 84° . Pri doskách vystužených strmeňmi bol sklon šikmej trhliny o niečo miernejší, v rozmedzí približne 44° až 61° . Z toho vyplýva, že charakter porušenia pri použití strmeňov sa odlišoval od porušenia dosiek vystužených šmykovými trťami. Porušenie nenastalo rozdrvením betónovej tlakovej diagonály medzi lícom stĺpa a prvým radom šmykovej výstuže ale ani pretrhnutím šmykovej výstuže, keďže napätia v šmykovej výstuži boli výrazne pod medzou klzu šmykovej výstuže. Tento rozdiel v správaní možno pravdepodobne pripísať nedostatočne účinnému kotveniu strmeňovej šmykovej výstuže. Výstuž v určitom momente prestávať prenášať šmykovú silu nie z dôvodu prekročenia svojej odolnosti, ale v dôsledku straty kotviacej funkcie. Porušenie sa následne prejavilo drvením betónu v bezprostrednej blízkosti stĺpa a porušením v oblasti medzi prvým a druhým radom šmykovej výstuže (dosky S1.2 a S2.2). Pri doskách vystužených strmeňmi S1.2 a S2.2 trhlinka prebieha od líca stĺpa po horné kotvenie, avšak nie po prvý rad šmykovej výstuže, ako je to typické pri doskách vystužených šmykovými trťami, ale až po horné kotvenie druhého radu šmykovej výstuže. Ako možno vidieť pri vzorke S3.2 (Obrázok 1.13), rozdrvenie betónovej tlakovej diagonály môže nastať aj v prípade výstuže s obmedzenou účinnosťou kotvenia (ako sú napríklad strmene) – a to vtedy, ak je schopnosť betónu medzi prvým radom šmykovej výstuže a lícom stĺpa prenášať napätie výrazne nižšia, napríklad v dôsledku veľmi nízkej pevnosti betónu.



Obrázok 1.12 Porušené skúšobné vzorky



Obrázok 1.13 Porušené skúšobné vzorky s naznačenou polohou šmykovej výstuže

Maximálna odolnosť dosky v pretlačení – analýza a diskusia

Vplyv parametrov pozorovaných parametrov

Pre spoľahlivé posúdenie vplyvu jednotlivých parametrov na maximálne možné zvýšenie odolnosti dosky v pretlačení je kľúčové pracovať s dostatočne rozsiahlym súborom experimentálnych údajov. Z tohto dôvodu boli výsledky vlastného experimentu doplnené o dáta z databázy už zrealizovaných experimentov, vid' Tabuľka 1.5. Táto databáza bola striktne filtrovaná tak, aby zahŕňala výlučne dosky, ktoré zlyhali na úrovni maximálnej odolnosti dosky v pretlačení $V_{R,max}$ a zároveň, aby ku každej doske so šmykovou výstužou existovala aj zodpovedajúca referenčná doska bez šmykovej výstuže. Táto požiadavka umožnila jednoznačne stanoviť reálnu maximálnu mieru zvýšenia odolnosti v pretlačení. Na Obrázku 1.14 je znázornená závislosť skutočnej miery zvýšenia odolnosti v pretlačení $k_{max,skut}$, ktorá je definovaná ako pomer $V_{R,max,test}/V_{R,c,test}$, od jednotlivých parametrov. V prípadoch, kde sa pevnosť betónu medzi doskou so šmykovou výstužou a jej referenčnou doskou líšia, bola odolnosť referenčnej dosky $V_{R,c,test}$ normalizovaná na pevnosť betónu dosky vystuženej šmykovou výstužou (spôsobom aký je uvedený v Tabuľke 1.4).

Tabuľka 1.5: Databáza experimentov uvažovaná pri analýze

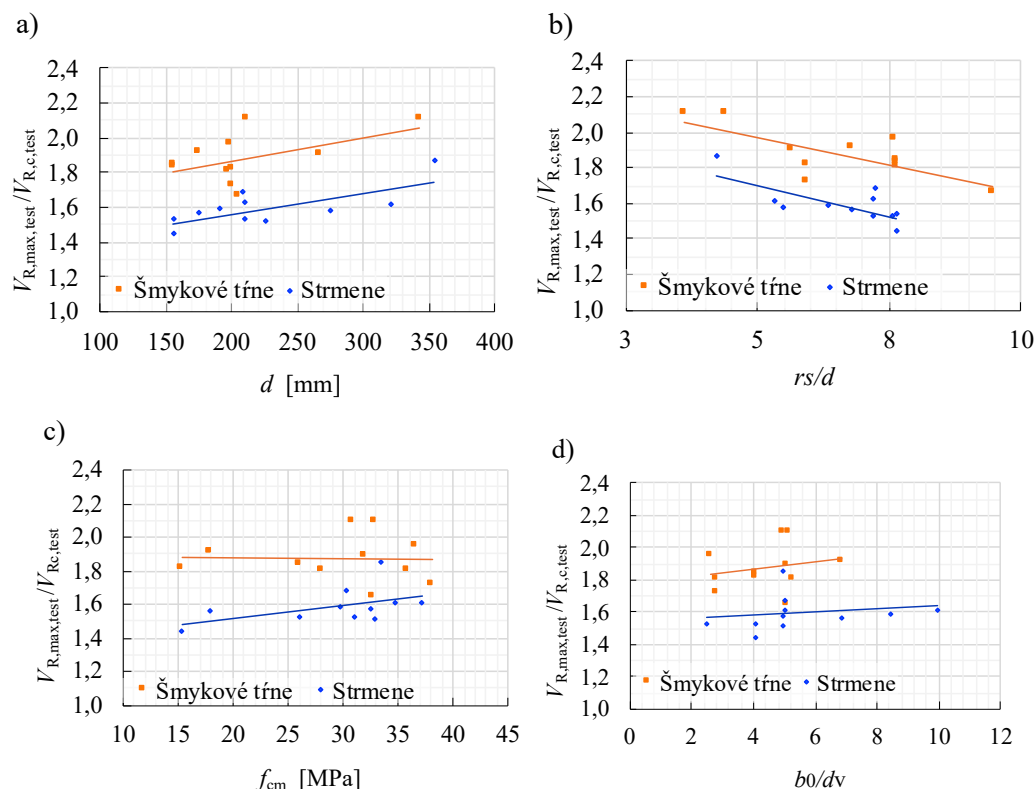
Autor	Typ ŠV	n_{test}	d [mm]	r_s/d	f_c [MPa]	b_0/d	s_0 [mm]	ρ [%]	ρ_{sw} [%] ¹
Lips [19]	ŠT	4	197 - 343	3,7 - 7,3	33,8 - 38,5	2,6 - 5,3	80 - 130	≈1,57	0,82 - 1,01
Einpaal [21]	ŠT	2	197 - 211	3,6 - 9,5	30,9 - 37,8	5,0	80	≈1,50	0,914
Majtánová [17]	ŠT	2	200	5,92	28,1 - 41,0	2,83	70	1,57	0,90 - 0,95
Gregušová	ŠT	3	155 - 175	6,8 - 7,7	15,4 - 26,6	4,05 - 6,85	70 - 80	1,43 - 1,62	0,93 - 1,60
Gregušová	ST	3	155 - 175	6,8 - 7,7	15,4 - 26,6	4,05 - 6,85	60 - 70	1,43 - 1,62	0,97 - 1,40
Beutel [22]	ST	1	190	6,3	29,8	8,40	100	0,81	0,42
Lips [11]	ST	5	208 - 354	4,2 - 7,2	30,4 - 37,1	2,5 - 10	80 - 130	≈1,52	0,79
Schmidt [12]	ST	2	224 - 320	5,3 - 7,5	32,9 - 34,8	5,0	110 - 160	1,40	0,40

¹ stupeň vystuženia šmykovými trnmi sa určil podľa: $\rho_{sw} = A_{sw}/(s_r b_{0,5})$ kde $b_{0,5}$ je dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti $0,5d$ od líca podpory a $s_r = \max(s_0 + 0,5s_1; s_1)$, vid' Obrázok 5.3. V prípade strmeňov podľa: $\rho_{sw} = A_{st}/(s_r s_t)$

ŠT- šmykové trne; ST-strmene

Závislosť medzi sledovanými parametrami a hodnotou $k_{max,skut}$ (Obrázok 1.14d) ukazuje, že so zvyšujúcim sa pomerom b_0/d_v dochádza k veľmi miernemu nárastu tejto hodnoty. Rovnako aj vplyv pevnosti betónu v tlaku sa prejavuje ako málo výrazný (Obrázok 1.14c). Výraznejší vplyv však vykazuje účinná výška prierezu d a šmyková štíhlosť dosky r_s/d . So stúpajúcou účinnou výškou d rastie aj maximálne dosiahnuteľné zvýšenie odolnosti $k_{max,skut}$, pričom tento trend je výrazný pre oba typy šmykovej výstuže – strmeňovú aj šmykové trne (Obrázok 1.14a). Táto skutočnosť súvisí najmä s tým, že so zvyšujúcou sa hrúbkou dosky sa zväčšuje aj výška šmykovej výstuže, čo umožňuje efektívnejší prenos síl prostredníctvom súdržnosti (teda lepšie kotvenie súdržnosťou), a tým sa zvyšuje aj celková účinnosť kotvenia šmykovej

výstuže. Opačný trend bol pozorovaný pri zvyšovaní šmykovej štihlosti, kde dochádza k výraznému poklesu hodnoty $k_{\max, \text{skut}}$ (Obrázok 1.14b). V oboch prípadoch majú trendové krivky pre oba typy výstuže podobný sklon, čo potvrdzuje konzistentnosť sledovaného správania.



Obrázok 1.14 Vplyv parametrov na maximálne možné navýšenie odolnosti dosky v pretlačení na základe experimentálnych meraní: a) účinná výška d ; šmyková štihlosť r_s/d ; c) pevnosť betónu f_{cm} ; d) pomer obvodu stĺpa k účinnej výške b_0/d_v

Spôľahlivosť návrhových prístupov

Rovnako ako pri analýze vplyvu jednotlivých parametrov na maximálnu odolnosť dosky v pretlačení, aj posúdenie spoľahlivosti existujúcich návrhových modelov bolo pre zvýšenie presnosti realizované na základe rozšírenej databázy experimentálnych výsledkov popísanej v predchádzajúcej kapitole. Na účely hodnotenia spoľahlivosti jednotlivých návrhových modelov bol použitý pomer $V_{R,\max,\text{test}}/V_{R,\max,\text{calc}}$, kde $V_{R,\max,\text{test}}$ predstavuje maximálnu odolnosť dosiek získanú z experimentálnych skúšok. Hodnota $V_{R,\max,\text{calc}}$ bola určená podľa (1.5), kde $V_{R,c,\text{test}}$ je experimentálne stanovená odolnosť dosky v pretlačení bez šmykovej výstuže a $k_{\max}$ alebo η_{sys} predstavuje súčiniteľ pre maximálne možné zvýšenie odolnosti v pretlačení definovaný v jednotlivých návrhových postupoch. Ak je pomer väčší ako jedna, výpočtový model poskytuje konzervatívne a bezpečné hodnoty odolnosti. Naopak, pomer menší ako jedna môže naznačovať potenciálne nadhodnotenie odolnosti.

$$V_{R,\max,\text{calc}} = k_{\max} \cdot V_{R,c,\text{test}} \quad (1.5)$$

V Tabuľkách 1.6 a 1.7 je uvedený prehľad porovnávaných návrhových modelov na výpočet parametrov $k_{\max}$, η_{sys} .

Tabuľka 1.6 Posudzované aktuálne platné výpočtové modely (model A-E)

MODEL		$k_{\max}, \eta_{\text{sys}}, V_{R,\max}$
A	EC2(2004)	$k_{\max} = 1,50$
B	EC2 (2024) – iba OTD	$0,5 v f_c u_0 d$
A1	STN EN1992-1-1/NA	$k_{\max} = 1,4 - 1,6$; strmene, ohyby $k_{\max} = 1,9$; šmykové trne
C	ETA-13/0151 (iba pre šmyk. trne)	$k_{\max} = 1,96$ ak $b_0/d \geq 4,0$ $k_{\max} = 1,96 (0,1b_0/d + 0,6)$ ak $b_0/d < 4,0$
D	ETA-13/0151+úprava Peikko	$k_{\max} = k_{\max}(\text{podľa ETA})$ ak $r_s/d < 6,6$ $k_{\max} = k_{\max}(\text{podľa ETA}) \cdot (5d/r_s)$ ak $r_s/d \geq 6,6$
E	ACI 318-19	$k_{\max} = 2,0$; šmykové trne $k_{\max} = 1,50$; strmene, ohyby

Tabuľka 1.7: Posudzované výpočtové modely (model F-H) uvedené v druhej generácii Eurokódu 2 a v štúdiách zahraničných autorov

MODEL		$k_{\max}, \eta_{\text{sys}}, V_{R,\max}$
F	EC2(2023) -návrh nových konštrukcií	$\eta_{\text{sys}} = 0,70 + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} \geq 1,0$; šmykové trne $\eta_{\text{sys}} = 0,50 + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} \geq 1,0$; strmene, ohyby
G	EC2(2023) -posúdenie exist. konštrukcií	$\eta_{\text{sys}} = 1,15 \frac{d_{\text{sys}}}{d_v} + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} - 0,85 \frac{s_0}{d_{\text{sys}}} \geq 1,0$
G1	Frailie et. al (2021) -modif. podrobnejší vzťah	$\eta_{\text{sys}} = 1,0 \frac{d_{\text{sys}}}{d_v} + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v} \right)^{\frac{1}{4}} - 1,0 \frac{s_0}{d_{\text{sys}}} \geq 1,0$
H	Schmidt et al. (2021)	$k_{\max} = \eta_{\text{sys}} = 1,75$; šmykové trne $k_{\max} = \eta_{\text{sys}} = 1,40$; strmene, ohyby

Väčšina týchto modelov (Okrem B) definujú $V_{R,\max}$ ako $k_{\max}$, (resp. η_{sys}) násobok odolnosti bez šmykovej výstuže. Výnimku predstavuje model B, pri ktorom sa hodnota $V_{R,\max,\text{calc}}$, určuje ako odolnosť betónovej tlakovej diagonály (OTD). Porovnanie zahŕňa výpočtové modely, ktoré sú súčasťou aktuálne platných návrhových postupov (Tabuľka 1.6) – konkrétne Eurokód 2 (modely A a B), jeho kombináciu s národnou prílohou STN (modely A1 a B), ako aj technickú špecifikáciu ETA (model C), ktorá sa často používa pri návrhu šmykových tŕňov s rozkovanou hlavou, a na ktorú sa odvoláva väčšina výrobcov tohto typu výstuže. Porovnávaná bola aj jeho modifikácia podľa spoločnosti Peikko (model D). Ďalej bol

zahrnutý aj prístup podľa americkej normy ACI 318-19 (model E). V prípade modelov vychádzajúcich z Eurokódu 2 boli osobitne posúdené jednotlivé limity (viď. Tabuľka 1.1), ako aj ich kombinácie, aby sa mohla samostatne vyhodnotiť spoľahlivosť výpočtu súčiniteľa $k_{\max}$. Zároveň boli analyzované aj modely pre výpočet súčiniteľa η_{sys} , ktoré sú uvedené v druhej generácii Eurokódu 2 (Tabuľka 1.7), ako aj ich úpravy prezentované v zahraničných odborných štúdiách.

Výsledky analýzy výpočtových modelov sú zhrnuté v Tabuľkách 1.8 a 1.9. V prvej fáze bola analýza vykonaná nad celou dostupnou databázou, ktorá obsahovala 22 dosiek, z toho 11 vystužených šmykovými tŕmi s rozkovanou hlavou a 11 dosiek vystužených strmeňmi (viď. Tabuľka 1.5). V druhej fáze bola databáza posudzovaná ako dve samostatné časti, v ktorých boli vzorky rozdelené podľa typu šmykovej výstuže. Štatistické vyhodnotenie bolo realizované na základe výpočtu pomeru $V_{R,\max,\text{test}}/V_{R,\max,\text{calc}}$ pre každý skúšaný prvok. Z týchto pomerov bola následne určená stredná hodnota pomeru θ_m , 5% fraktíl, štandardná odchýlka (STDEV) a na základe hodnoty STDEV bol následne vypočítaný koeficient variácie V_0 . Výsledná hodnota $\theta_{0,05}$ predstavuje dolnú hranicu, ktorú by mala dosiahnuť aspoň 95% výsledkov, a je preto kľúčová z pohľadu bezpečnosti návrhového modelu.

Tabuľka 1.8 Vyhodnotenie štatistickej analýzy spoľahlivosti súčasných návrhových modelov z Tabuľky 1.6; ŠT- šmykové tŕne; ST- Strmene

		A	B	A+B	A1	A1+B	C	D	E
ŠT+ST	θ_m	1,156	1,064	1,261	1,051	1,214			1,000
	STDEV	0,123	0,339	0,204	0,089	0,219			0,092
	V_0	0,107	0,319	0,162	0,085	0,180			0,092
	$\theta_{0,05}$	0,939	0,467	0,901	0,894	0,829			0,838
ŠT	θ_m	1,251	1,244	1,385	0,987	1,258	0,993	1,090	0,938
	STDEV	0,089	0,296	0,193	0,070	0,283	0,084	0,080	0,067
	V_0	0,071	0,238	0,140	0,071	0,225	0,084	0,073	0,071
	$\theta_{0,05}$	1,083	0,685	1,019	0,855	0,722	0,835	0,939	0,812
ST	θ_m	1,062	0,885	1,137	1,114	1,170			1,062
	STDEV	0,069	0,280	0,124	0,054	0,106			0,069
	V_0	0,065	0,317	0,109	0,049	0,091			0,065
	$\theta_{0,05}$	0,932	0,355	0,902	1,012	0,969			0,932
		EC2	EC2	EC2	STN	STN	ETA	ETA+ Peikko	ACI
	$k_{\max}$		OTD	$k_{\max}+\text{OTD}$	$k_{\max}$	$k_{\max}+\text{OTD}$			

Na základe štatistického vyhodnotenia celej databázy experimentálnych skúšok (t.j. dosiek vystužených šmykovými tŕmi a strmeňmi) možno ako najpresnejší a najkonzistentnejší model označiť model H, ktorý dosiahol najnižší koeficient variácie 0,074. Veľmi dobré výsledky však poskytoval aj model F, s koeficientom variácie 0,081. Naopak ako najmenej presný sa ukázal model B, založený na odolnosti tlakovej diagonály. Dobrá zhoda s experimentálnymi výsledkami bola dosiahnutá aj modelom A1 (STN) a však v prípade s kombináciou modelu B (OTD) sa jeho presnosť výrazne znížila. Tento efekt možno pozorovať aj na Obrázkoch (1.16d a 1.16e).

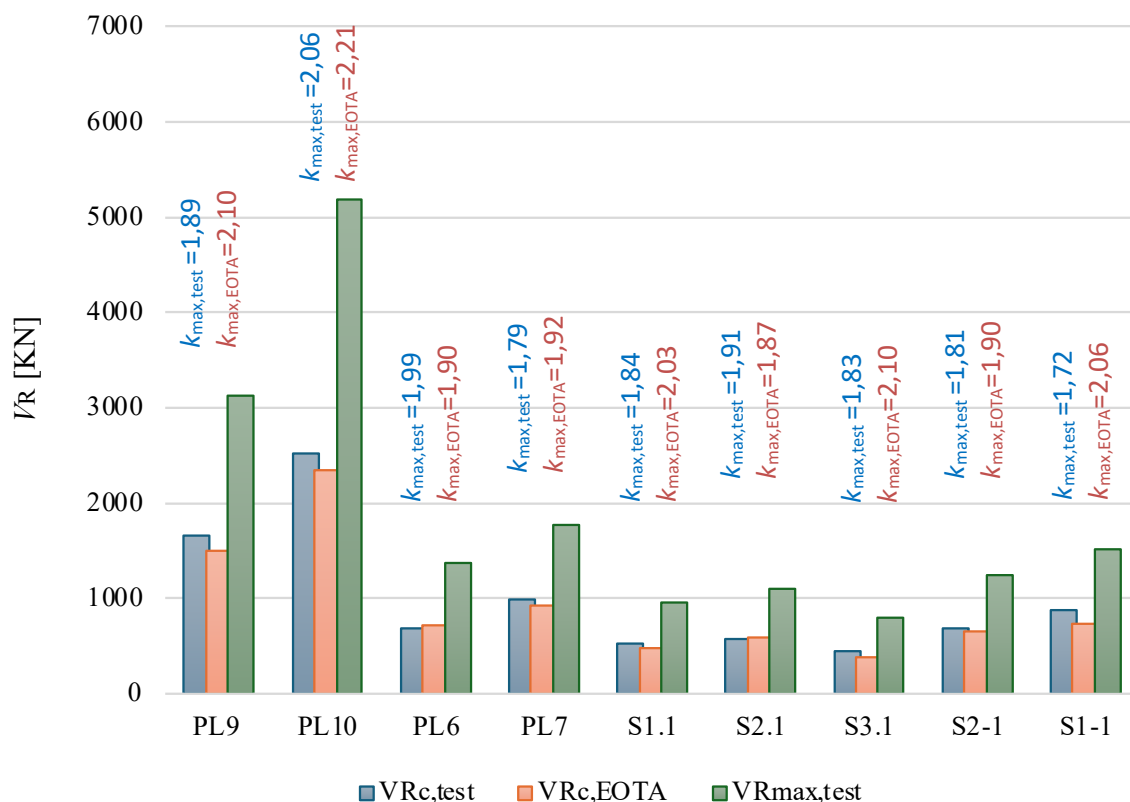
Tabuľka 1.9 Vyhodnotenie štatistickej analýzy spoľahlivosti návrhových modelov v druhej generácii Eurokódu 2 z Tabuľky 1.7; ŠT - šmykové tŕne; ST- Strmene

		F	G	G1	H
ŠT+ST	θ_m	1,133	0,985	1,124	1,105
	STDEV	0,092	0,081	0,100	0,082
	V_0	0,081	0,082	0,089	0,074
	$\theta_{0,05}$	0,972	0,844	0,949	0,961
ŠT	θ_m	1,169	0,992	1,123	1,072
	STDEV	0,086	0,077	0,088	0,076
	V_0	0,073	0,077	0,079	0,071
	$\theta_{0,05}$	1,007	0,847	0,956	0,928
ST	θ_m	1,098	0,979	1,126	1,138
	STDEV	0,084	0,084	0,110	0,074
	V_0	0,076	0,085	0,098	0,065
	$\theta_{0,05}$	0,940	0,821	0,919	0,998
		2.g.EC2 nové	2.g.EC2 exist.	Fraile	Schmidt

Rozdelenie databázy podľa typu šmykovej výstuže bolo realizované s cieľom spresniť výsledky štatistického vyhodnotenia. V skupine dosiek vystuženými šmykovými tŕňmi dosiahli najlepšie výsledky modely D (Peikko), F (2.g.EC2 nové) a H (Schmidt). Podobný koeficient variácie možno pozorovať aj v modeli E (ACI), v tomto prípade však bola 5% fraktilová hodnota pomerne nízka $\theta_{0,05}=0,812$, čo môže rovnako ako v modeli C (ETA) znamenať potenciálne podhodnotenie v najnepriaznivejších prípadoch. Ak by bolo rozhodujúcim kritériom 5% fraktilové vyhodnotenie, ako najvhodnejší sa javí model D, ktorý však umožňuje iba návrh šmykových tŕňov. V prípade samostatného vyhodnotenia skupiny dosiek vystužených strmeňmi, najvyššiu presnosť poskytol model A1 (STN), s nízkym koeficientom variácie 0,049. Na základe vyhodnotenia všetkých troch skupín, možno model H (Schmidt) označiť za celkovo najvhodnejší, a to najmä vďaka optimálnemu pomeru medzi presnosťou, spoľahlivosťou a jednoduchosťou použitia. Avšak, ak by bolo kritériom aj znížiť mieru empirickosti výpočtu, ako perspektívnejší sa javí model F (2.g.EC2 nové), ktorý do výpočtu zavádza aj geometrické parametre.

Napokon otvorenou otázkou zostáva otázka, či má byť návrh založený na strednej hodnote η_{sys} (resp. k_{max}), alebo na jeho konzervatívnejšom 5% fraktile, keďže tento výber má zásadný vplyv na úroveň bezpečnosti návrhu. Napríklad model C (ETA) vykazuje veľmi priaznivú strednú hodnotu pomeru $\theta_m=0,993$, avšak súčasne aj výrazne nízky 5% fraktile, konkrétne 0,835. Tento rozdiel je spôsobený relatívne vysokou hodnotou súčiniteľa $k_{max}=1,96$, ktorá bola stanovená ako 5% fraktile z celej množiny analyzovaných hodnôt k_{max} . Dôležité ale je, že inštitúcia EAD (EOTA) sa vzťahuje na skúšanie výlučne dosiek vystužených šmykovou výstužou, vo forme šmykových tŕňov, pričom referenčná $V_{R,c}$ sa určuje numerickým spôsobom, pričom pevnosť betónu v tlaku sa vypočíta ako $f_{ck}=f_{cm}-4$ MPa, kde f_{cm} predstavuje strednú hodnotu valcovej pevnosti získanej z experimentu. Ako je možné pozorovať na Obrázku 1.15, uvedený prístup vedie k umelému navýšeniu hodnoty k_{max} . Zo všetkých deviatich skúmaných dosiek sa hodnota $k_{max} \geq 1,96$ podarila dosiahnuť iba v dvoch prípadoch. Navyše ak sa k tomu pridá aj zanedbanie vplyvu štíhlosti, môže tento model nadhodnocovať maximálnu odolnosť dosky v pretlačení, a to najmä pre

štíhle lokálne podopreté dosky. Jeho úprava podľa Peikko (model D), zvýšila jeho bezpečnosť aj presnosť (viď. Tabuľka 1.8).



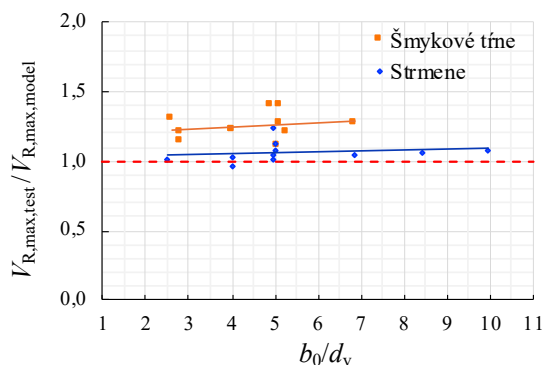
Obrázok 1.15 Porovnanie $k_{max} = 1,96$ podľa EAD (EOTA) a skutočnou hodnotou $k_{max,skut}$

Z uvedeného vyplýva, že pre spoľahlivé definovanie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení nie je rozhodujúce len to, ktoré parametre vplyvajú na veľkosť k_{max} ale rovnako aj použitá výpočtová metodika, ktorá zásadným spôsobom ovplyvňuje interpretáciu výsledkov. Rozdielne prístupy k určovaniu $V_{R,c}$ vedú k odlišným hodnotám k_{max} , aj keď vychádzajú z tých istých experimentálnych dát.

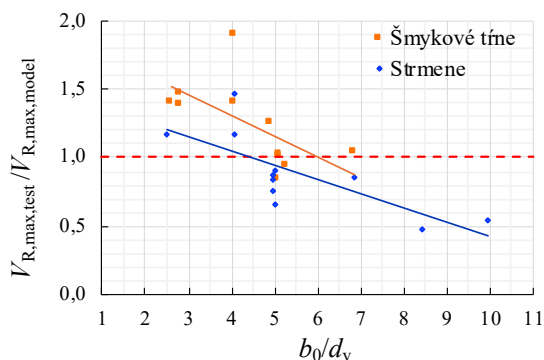
Spôľahlivosť porovnávaných modelov pre rôzne pomery b_0/d_v

Podľa druhej generácie Eurokódu 2 predstavuje pomer b_0/d_v , hneď po type šmykovej výstuže (resp. účinnosti jej kotvenia), jeden z najvýznamnejších parametrov ovplyvňujúcich mieru maximálneho možného zvýšenia odolnosti v pretlačení pomocou šmykovej výstuže. Z tohto dôvodu, bola analyzovaná spoľahlivosť a presnosť jednotlivých návrhových prístupov popísaných v predchádzajúcej kapitole, prostredníctvom hodnotenia pomeru $V_{R,max,test}/V_{R,max,calc}$ pre rôzne b_0/d_v . Vývoj tohto pomeru v závislosti od parametra b_0/d_v pre jednotlivé posudzované návrhové modely je znázornený na Obrázkoch 1.16 a 1.17.

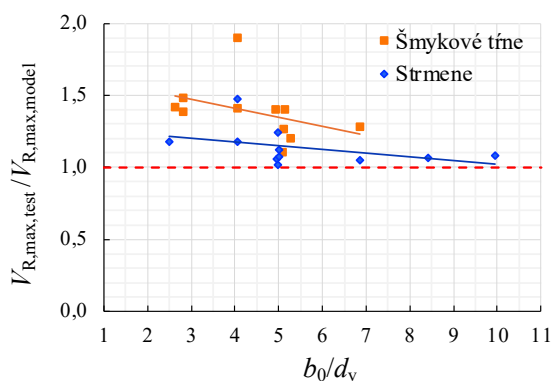
a) MODEL "A" - EC2 (2004) $k_{\max}, V_{R,c}$



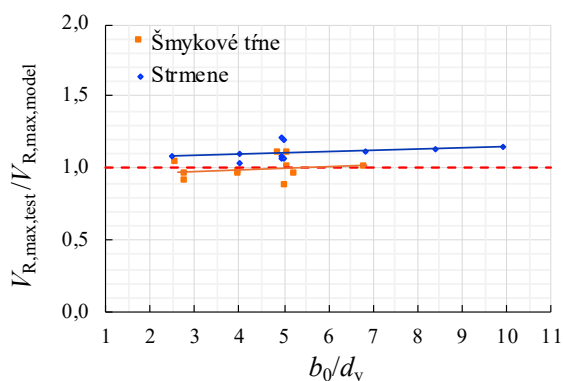
b) MODEL "B" - EC2 (2004) - OTD



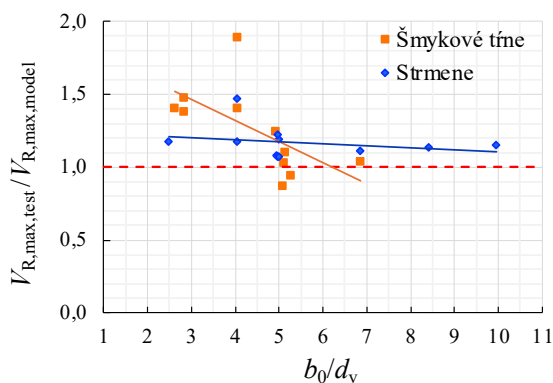
c) MODEL "A+B" - EC2 (2004)



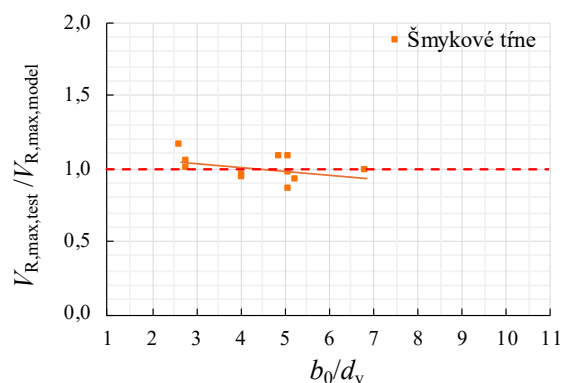
d) MODEL "A1" - EC2 + STN $k_{\max}, V_{R,c}$



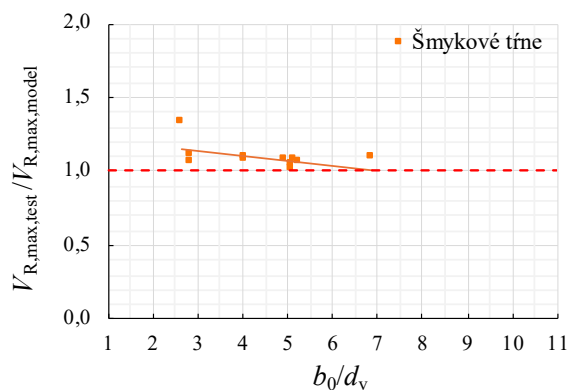
e) MODEL "A1+B" - EC2 (2004)+STN



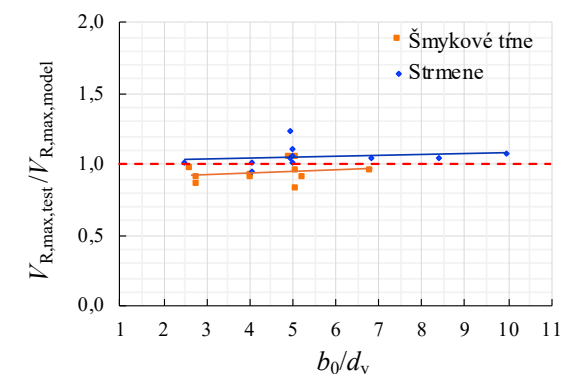
f) MODEL "C" - ETA



g) MODEL "D" - ETA + Peikko

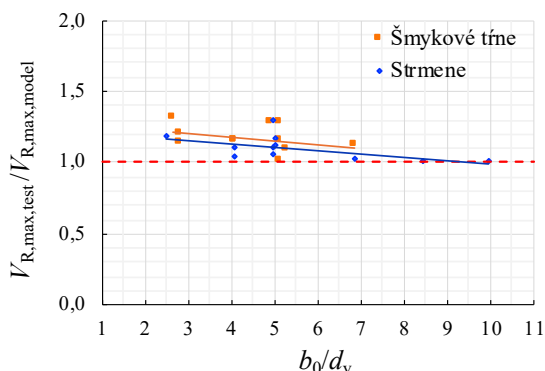


h) MODEL "E" - ACI

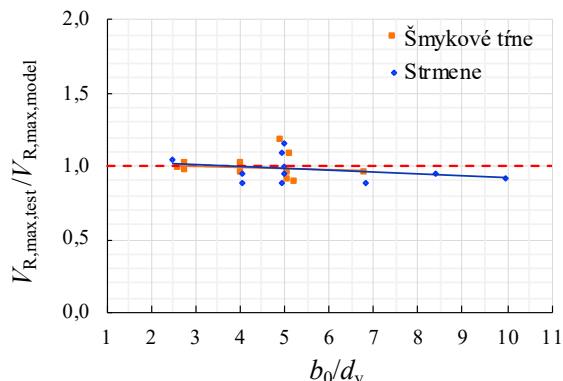


Obrázok 1.16 Vyhodnotenie spoľahlivosti výpočtu $k_{\max}$, η_{sys} – Model A -E

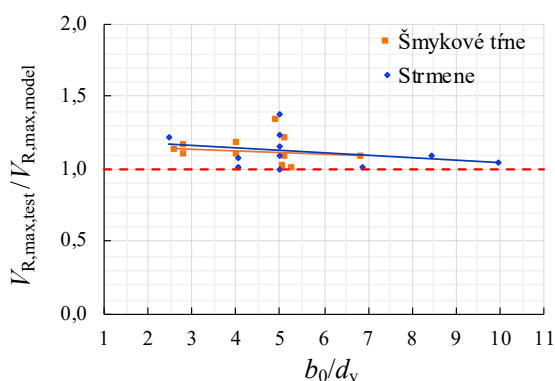
a) MODEL "F" - EC2 (2023) - nové



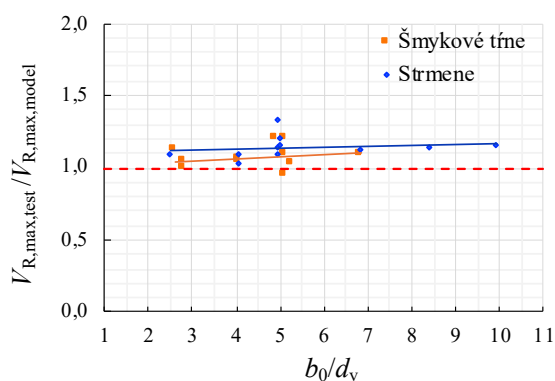
b) MODEL "G" - EC2 (2023) - exist.



c) MODEL "G1" - Fraile et al.



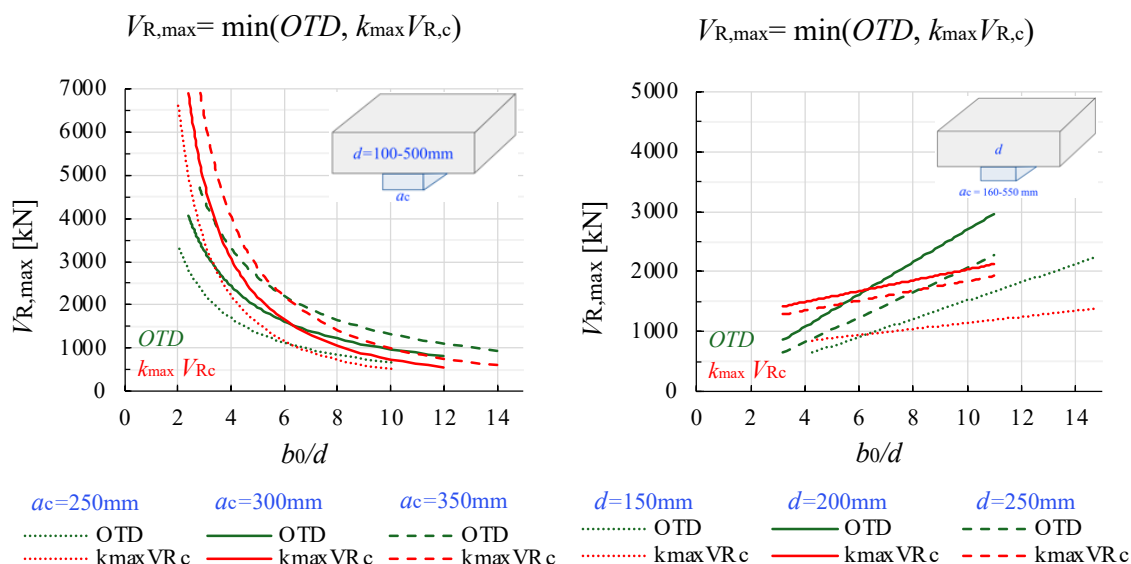
d) MODEL "H" - Schmidt et. al



Obrázok 1.17 Vyhodnotenie spoľahlivosti výpočtu $k_{\max}$, η_{sys} – Model F-H

Model A1 (STN) preukázal relatívne vysokú presnosť, avšak len v prípade, že sa neuplatňuje kombinácia s modelom B (OTD). Ako je zrejme z Obrázku 6.16e, zohľadnenie tohto modelu výrazne znižuje presnosť dosiahnutých výsledkov. Podobný trend možno pozorovať aj pri modeli A (EC2), hoci v tomto prípade sú predikcie $k_{\max}$ výrazne konzervatívne. Na druhej strane, v prípade modelu A1 (STN) vedie zohľadnenie odolnosti tlakovej diagonály k zvýšeniu bezpečnosti výpočtu pre dosky vystužené šmykovými tŕmi, najmä pri nižších hodnotách pomeru b_0/d_v . Súčasne platný Eurokód 2, ktorý definuje $V_{R,\max}$ ako kombináciu dvoch podmienok, teda modely A+B a A1+B poskytuje bezpečný návrh, avšak najmä pre nižšie hodnoty b_0/d_v je výrazne konzervatívny. Najmä pri použití šmykových tŕňov dochádza k podhodnocovaniu maximálnej odolnosti dosky v pretlačení pri nízkych pomeroch b_0/d_v , pričom príčinou nie je nízka hodnota $k_{\max}$, ale obmedzenie vyplývajúce z limitu odolnosti betónovej tlakovej diagonály (OTD). Analytická štúdia totiž ukázala, že aj keď súčasný Eurokód 2 uvažuje $k_{\max}$ ako konštantu, ktorá je závislá iba od typu šmykovej výstuže, vzhľadom na kombináciu týchto dvoch podmienok je $V_{R,\max}$ nepriamo závislá aj od pomeru b_0/d_v . Pri nižších hodnotách tohto pomeru, teda pri hrubších doskách a menších prierezoch stĺpov, je rozhodujúcou podmienkou odolnosť betónovej tlakovej diagonály (OTD). Naopak, pri vyšších hodnotách pomeru sa stáva rozhodujúcim zasa $k_{\max}$ násobok $V_{R,c}$. Tento prechod medzi rozhodujúcimi podmienkami je viditeľný na Obrázku 1.18. Presný pomer b_0/d_v , pri ktorom k tejto zmene dochádza závisí od pevnosti betónu v tlaku. Pre valcovú pevnosť $f_{cm}=25\text{MPa}$ bol hraničný pomer identifikovaný v intervale približne od 6 do 8.

Na základe uvedených zistení možno konštatovať, že ak sa maximálna odolnosť v pretlačení stanovuje vo forme $V_{R,\max} = \eta_{\text{sys}} \cdot V_{R,c}$ a zároveň súčiniteľ η_{sys} explicitne zohľadňuje pomer b_0/d_v (samozrejme aj účinnosť kotvenia šmykovej výstuže) je možné vynechať kontrolu rozdrvenia betónovej tlakovej diagonály, keďže jej dodatočné uvažovanie nemá zásadný význam pre spoľahlivý návrh.



Obrázok 1.18 Maximálna odolnosť dosky v pretlačení podľa EC2 -vplyv účinnej výšky d a obvodu stĺpa b_0 na rozhodujúcu podmienku pri konštantnej pevnosti betónu v tlaku 25 MPa

Modely s čisto konštantnou hodnotou k_{max} , konkrétne E (ACI) a H (Schmidt), vykazujú mierne stúpajúci charakter trendovej krivky. V prípade modelu E (ACI), kde je k_{max} pre šmykové trne stanovený na hodnotu 2, sa trendová spojnice nachádza pod hodnotou 1, čo môže predstavovať potenciálne nebezpečný návrh. Model H (Schmidt) vykazuje takmer vodorovnú trendovú spojnicu, a teda poskytuje vysokú presnosť a tiež spoľahlivosť. Trendové krivky modelov, ktoré priamo zohľadňujú b_0/d_v vo výpočte súčiniteľa η_{sys} – konkrétne modely C (ETA), D (ETA+Peikko), F (2.g.EC2nové), G (2.g.EC2 exist.), a G1 (Fraile) vykazujú mierne klesajúci trend. Spomedzi nich najlepšie zodpovedá experimentálnym výsledkom model G, založený na podrobnejšej formulácii z návrhu EC2(2023). Jeho modifikácia podľa Fraile et al. (Model G1) by však mohla zvýšiť mieru bezpečnosti. Na druhej strane, aj zjednodušený model F a model H s konštantným k_{max} , η_{sys} vykazujú dostatočne presné a konzistentné výsledky, pričom rozdiel medzi nimi je minimálny. Z tohto dôvodu možno konštatovať, že uplatnenie zložitejších vzťahov, ako sú model G a G1, nie je z hľadiska praktického využitia veľmi prínosné. Naopak, model F a H dosahu rovnako vysokú presnosť. Ako je možné vidieť na Obrázku 1.16g, zohľadnenie šmykovej štíhlosti v modeli C (ETA), spoločnosťou Peikko (model D), zvýšila jeho mieru bezpečnosti.

Kalibrácia presnejšieho návrhového modelu

Zohľadnenie účinnej výšky d – model F1

Model F (vzťahy (1.1) a (1.2)), možno zapísať vo forme (1.6), kde súčiniteľ $k_{sr} = 0,7$ pre šmykové trne a 0,5 pre strmene. Exponent k_0 má hodnotu 0,25.

$$\eta_{sys} = k_{sr} + 0,63 \cdot \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{k_0} \geq 1,0 \quad (1.6)$$

Ako je možné vidieť na Obrázku 1.14a, miera maximálneho zvýšenia odolnosti v pretlačení pridaním šmykovej výstuže stúpa s narastajúcou účinnou výškou dosky d . Na zohľadnenie tohto vplyvu pri

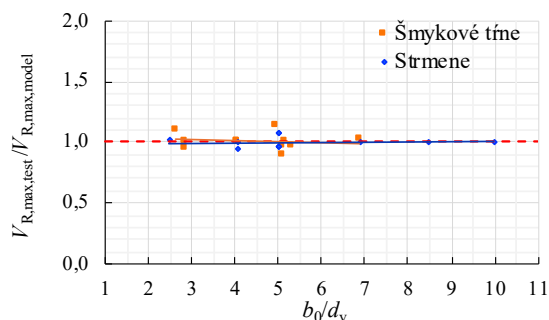
výpočte η_{sys} , bol zavedený súčiniteľ k_{sr} , ktorý predstavuje funkciu účinnej výšky dosky d . Hodnota k_{sr} sa stanoví samostatne pre strmeňovú výstuž a samostatne pre šmykové trne. Minimálna hodnota k_{sr} je určená pre dosky s $d \leq 200 \text{ mm}$, zatiaľ čo maximálna hodnota pre $d > 700 \text{ mm}$. Medziľahlé hodnoty sa určia pomocou lineárnej interpolácie. Z Obrázku 1.17a je zrejmé, že presnosť vzťahov (1.1 a 1.2) pre menšie pomery b_0/d_v klesá, čo je dôsledkom nastavenia exponentu k_0 v rovnici (1.6). Znížením hodnoty k_0 je možné tento nepriaznivý trend eliminovať a dosiahnuť takmer vodorovný priebeh trendovej krivky a zvýšiť tak presnosť modelu. Ako ukazuje Obrázok 1.20, najlepšia zhoda s experimentami bola dosiahnutá pri $k_0 = 0,1$.

Kalibrácia minimálnych a maximálnych hodnôt súčiniteľa k_{sr} a k_0 sa realizovala s cieľom minimalizovať koeficient variácie V_θ ako pre strednú hodnotu tak aj pre 5 % fraktíl. Uvažované hodnoty týchto súčiniteľov sú uvedené v Tabuľke 1.10. Kalibrácia viedla k výraznému zlepšeniu presnosti modelu, pričom koeficient variácie klesol z pôvodnej hodnoty 0,081 na 0,052 a 0,059. Pri samostatnom hodnotení jednotlivých typov výstuže sa dosiahol zníženie V_θ z 0,073 na 0,060 pre šmykové trne a z 0,076 na 0,044 pre strmeňovú výstuž (viď. Tabuľka 1.11).

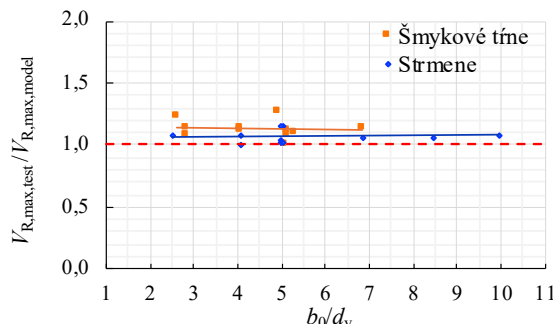
Tabuľka 1.10 Hodnoty koeficientov $k_0, k_{\text{sr},\text{min}}$ a $k_{\text{sr},\text{max}}$, vstupujúcich do vzťahu (6.4.1)

	F		$F_{\text{modif},m}$		$F_{\text{modif},0,05}$	
	Š. trň	Strmeň	Š. trň	Strmeň	Š. trň	Strmeň
k_0	0,25		0,10		0,10	
$k_{\text{sr},\text{min}} (d \leq 200 \text{ mm})$	0,70	0,50	1,10	0,80	0,90	0,70
$k_{\text{sr},\text{max}} (d \geq 700 \text{ mm})$	0,70	0,50	1,90	1,35	1,70	1,25

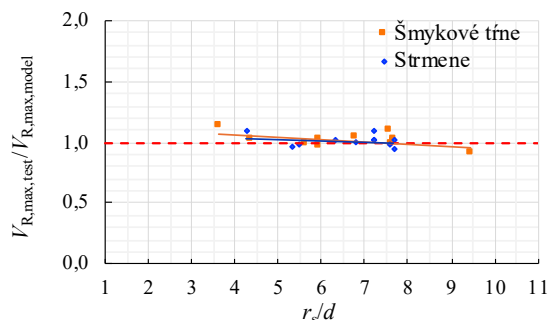
a) prEC2 (2023) úprava (F1)_mean



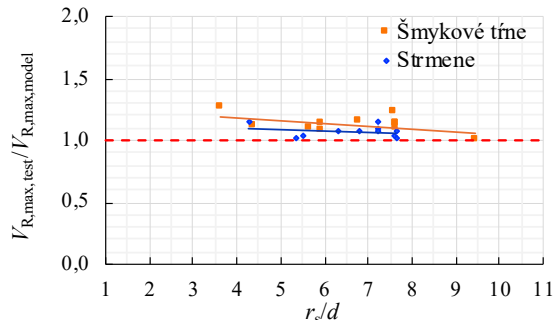
b) prEC2 (2023) úprava (F1), 5% fractile



c) prEC2 (2023) úprava (F1)_mean



d) prEC2 (2023) úprava (F1), 5% fractile



Obrázok 1.20 Vyhodnotenie spoľahlivosti výpočtu k_{max} , η_{sys} – Model F1

Na Obrázkoch 1.20a a 1.20b možno pozorovať zvýšenú presnosť upraveného modelu F1 pri rôznych pomeroch b_0/d_v . Zároveň však môžeme pozorovať mierne klesajúcu spoľahlivosť pri vyšších

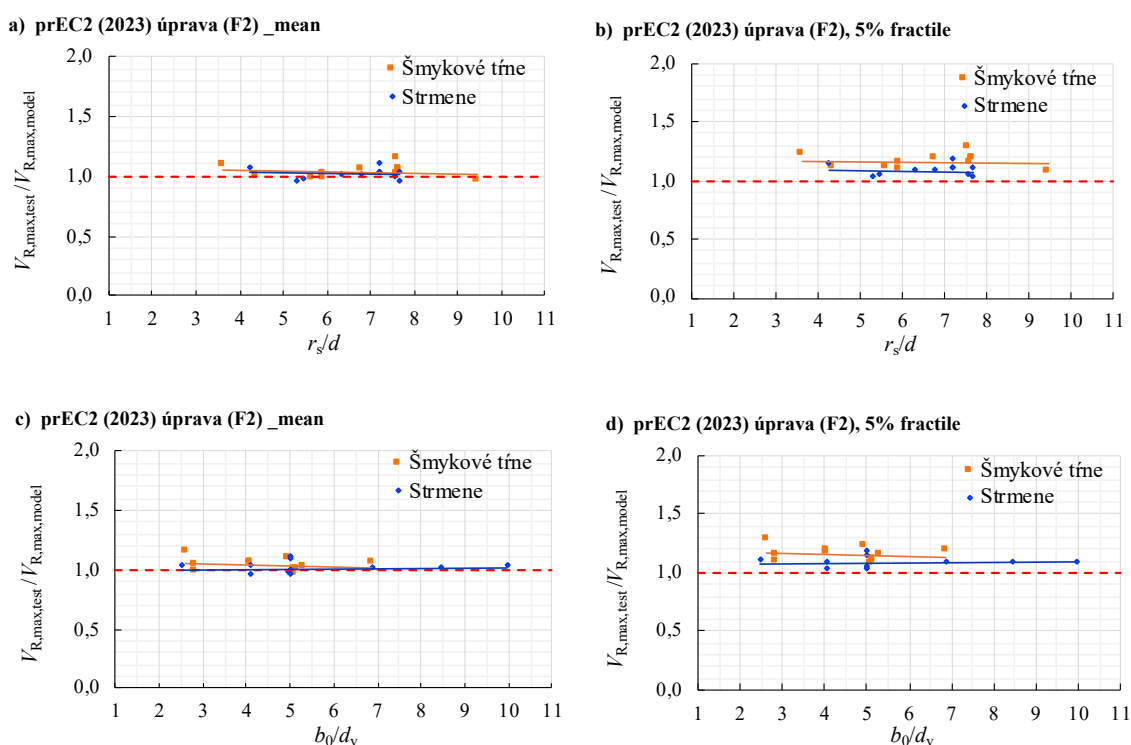
hodnotách šmykovej štíhlosti (Obrázok 1.20c a 1.20d). Z tohto dôvodu bol model ďalej rozšírený o zohľadnenie aj tohto vplyvu.

Zohľadnenie šmykovej štíhlosti r_s/d – model F2

Na základe Obrázku 1.14b možno identifikovať šmykovú štíhlosť ako ďalší významný parameter ovplyvňujúci maximálnu mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení. Podľa zistení vedie jej zanedbanie k poklesu spoľahlivosti návrhových modelov $k_{\max}$, η_{sys} a to predovšetkým pri štíhlych doskách. Z uvedeného dôvodu je v tejto kapitole predstavený návrhový model F2 (1.7), ktorý predstavuje rozšírenie modelu F1 (1.6) prezentovaného v predchádzajúcej časti. Klesajúca tendencia krivky pri zvyšujúcej sa hodnote šmykovej štíhlosti je vo vzťahu (1.7) ovplyvnená koeficientom k_1 , pričom jeho hodnoty sú: 1/20 pre strmene a 1/10 pre šmykové tnie.

$$\eta_{\text{sys}} = k_{\text{sr}} + 0,63 \cdot \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{k_0} \cdot \left(\frac{5d}{r_s}\right)^{k_1} \geq 1,0 \quad (1.7)$$

Spoľahlivosť návrhového modelu F2 (1.7) je znázornená na Obrázku 1.21. Z prezentovaných výsledkov vyplýva, že uvedený model poskytuje presnú predikciu súčiniteľa η_{sys} , v širokom rozsahu hodnôt šmykovej štíhlosti (Obrázky 1.21a a 1.21b), ako aj pri rôznych pomeroch b_0/d_v (Obrázky 1.21c a 1.21d). Úpravou uvedeného vzťahu sa podarilo dosiahnuť takmer vodorovný priebeh trendovej spojnice a ešte nižší koeficient variácie. V prípade vyhodnotenia všetkých údajov spoločne: 0,046 pre strednú hodnotu a 0,056 pre 5% fraktíl (viď. Tabuľka 1.11). Táto úprava sa prejavila výraznejšie pri doskách vystužených šmykovými tržmi, kedy sa koeficient variácie znížil z 0,060 na 0,050, pri strmeňovej výstuži sa znížil iba minimálne.



Obrázok 1.21 Vyhodnotenie spoľahlivosti výpočtu $k_{\max}$, η_{sys} – Model F2

Tabuľka 1.11 Štatistické vyhodnotenie spoľahlivosti modifikovaného modelu $F1$ (1.6) a (1.7) pre strednú hodnotu $F1(2)_{\text{modif,m}}$ a 5% fraktíl $F1(2)_{\text{modif,0,05}}$

		F	$F1_{\text{modif,m}}$	$F1_{\text{modif,0,05}}$	$F2_{\text{modif,m}}$	$F2_{\text{modif,0,05}}$
Šmyk. tŕne + Strmene	θ_m	1,133	1,007	1,102	1,026	1,123
	STDEV	0,092	0,053	0,065	0,047	0,063
	V_0	0,081	0,052	0,059	0,046	0,056
	$\theta_{0,05}$	0,979	0,919	0,994	0,946	1,017
Šmyk. tŕne	θ_m	1,169	1,008	1,130	1,032	1,157
	STDEV	0,086	0,060	0,068	0,051	0,060
	V_0	0,073	0,060	0,060	0,050	0,051
	$\theta_{0,05}$	1,021	0,905	1,013	0,944	1,055
Strmene	θ_m	1,098	1,006	1,074	1,019	1,088
	STDEV	0,084	0,044	0,047	0,042	0,046
	V_0	0,076	0,044	0,044	0,041	0,042
	$\theta_{0,05}$	0,954	0,931	0,994	0,947	1,010

Otázkou pri stanovovaní vhodného návrhového modelu η_{sys} ale stále zostáva to, či by sa mala použiť stredná hodnota alebo 5 % fraktíl, preto je uvedený návrhový model pre oba spôsoby stanovovania. Použitie strednej hodnoty môže viesť k hospodárnejšiemu návrhu, avšak len v prípade, že je návrhový proces doplnený spoľahlivou analýzou a zodpovedajúcimi súčiniteľmi spoľahlivosti. Naopak, aplikácia 5 % fraktílu vedie ku konzervatívnejšiemu prístupu, ktorý lepšie postihuje neistoty spojené s premenlivou geometriou, výrobou a montážou výstuže. Vzhľadom na definovanie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení ako súčin $\eta_{\text{sys}} \cdot V_{\text{R,c}}$, treba zdôrazniť, že výsledná spoľahlivosť nezávisí len od samotného súčiniteľa η_{sys} , ale aj od spoľahlivosti a presnosti výpočtu $V_{\text{R,c}}$. Ak sa pri stanovovaní odolnosti bez šmykovej výstuže už uplatnil 5 % fraktíl, resp. návrhová hodnota $V_{\text{R,d,c}}$, použitie ďalšieho konzervatívneho súčiniteľa na strane výstuže by mohlo viesť k nadmerne konzervatívne návrhu.

Záverečné zhrnutie a závery

Na základe vyhodnotenia výsledkov výskumu a vykonaných analýz možno konštatovať nasledovné zhrnutia a závery:

1. Výsledky experimentov potvrdili, že vystuženie lokálne podopretých dosiek šmykovou výstužou výrazne zvyšuje nielen odolnosť dosiek v pretlačení, ale aj ich deformačnú kapacitu, čím sa zmierňuje krehký charakter ich porušenia. Tento efekt bol výraznejší pri použití šmykových trŕňov s rozkovanou hlavou, ktorých použitie viedlo k z výšieniu odolnosti dosky v pretlačení 1,83 až 1,91 násobne v porovnaní s referenčnými doskami bez šmykovej výstuže. V prípade dosiek vystužených strmeňmi bolo zaznamenané zvýšenie odolnosti v rozsahu od 1,44- do 1,56- násobku referenčných hodnôt.
2. Experimentálny program bol primárne navrhnutý na sledovanie vplyvu pomeru b_0/d_v na maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení šmykovou výstužou. Vďaka databáze experimentov (Príloha č.4) však boli identifikované aj ďalšie parametre, ktoré ju ovplyvňujú. Vplyv vzdialenosti prvého radu šmykovej výstuže od líca stĺpa s_0 , vzhľadom na jeho obmedzenie vo

všetkých návrhových predpisoch na $0,3d-0,5d$, nebol analyzovaný. V súvislosti s vplyvom týchto parametrov boli vyvedené nasledujúce závery:

- **Vplyv účinnej výšky dosky d**

So zvyšujúcou sa účinnou výškou dosky rastie aj maximálna možná miera zvýšenia odolnosti v pretlačení použitím šmykovej výstuže. Tento jav súvisí so zvýšením objemu betónu zapojeného do prenosu zaťaženia, ako aj so zlepšenou možnosťou aktivácie šmykovej výstuže. So zvyšujúcou sa hrúbkou dosky sa zväčšuje aj výška šmykovej výstuže, čo umožňuje efektívnejší prenos síl prostredníctvom súdržnosti (teda lepšie kotvenie súdržnosťou), a tým sa zvyšuje aj celková účinnosť kotvenia šmykovej výstuže. Tento vplyv bol pozorovaný na oboch typoch šmykovej výstuže v rovnakej miere.

- **Vplyv šmykovej štíhlosti r_s/d**

So zvyšujúcou sa šmykovou štíhlosťou maximálna možná miera zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení klesá, pričom tento efekt je rovnaký pre dosky vystužené strmeňmi aj šmykovými tržmi. Uvedený jav je možno vysvetliť zvýšeným pootočením štíhlych dosiek, čo vedie k rozsiahlejšiemu výskytu ohybových trhlín v oblasti podpory, a tým aj k zníženej schopnosti betónu prenášať zaťaženie v tejto oblasti.

- **Vplyv pomeru obvodu stĺpa k účinnej výške dosky b_0/d_v**

Pomerom b_0/d_v sa nahrádza vplyv odolnosti tlakovej diagonály na $V_{R,max}$. Čím je tento pomer väčší tým je namáhanie tlakovej diagonály menšie a preto s rastúcou hodnotou pomeru mierne rastie aj maximálne možné zvýšenie odolnosti dosky v pretlačení, aj keď sa ukázalo, že jeho vplyv je menej výrazný v porovnaní s vplyvom predchádzajúcich parametrov.

- **Vplyv pevnosti betónu v tlaku f_c**

V prípade dosiek vystužených šmykovými tržmi nemala pevnosť betónu v tlaku zásadný vplyv na maximálne možné zvýšenie odolnosti dosky v pretlačení. Mierny vplyv bol pozorovaný pri doskách vystužených strmeňmi, čo bolo ale spôsobené zahrnutím dosky S3.2, s výrazne nízkou pevnosťou betónu.

- Okrem samotnej geometrie a typu šmykovej výstuže zohráva zásadnú úlohu aj metodológia, ktorou sa stanovuje η_{sys} (resp. k_{max}). Tento súčiniteľ je výrazne ovplyvnený zvoleným modelom referenčnej odolnosti v pretlačení bez šmykovej výstuže $V_{R,c}$, ako aj tým, či sa pri výpočte uvažujú stredné hodnoty pevnosti betónu alebo konzervatívnejšie 5 % fraktily. Výber medzi týmito prístupmi by preto mal byť v návrhových predpisoch jasne definovaný. V rámci tejto práce sa zároveň odporúča kalibrovať η_{sys} (resp. k_{max}) na základe reálne nameranej odolnosti $V_{R,c}$, získanej z experimentu. V prípade, že experimentálne údaje nie sú dostupné, je vhodné, aby do výpočtu $V_{R,c}$, vstupovala stredná hodnota pevnosti betónu f_{cm} .
- Porušenie lokálne podopretých dosiek na úrovni maximálnej odolnosti v pretlačení nastáva v oblasti medzi lícom stĺpa a prvým radom šmykovej výstuže, a to rozdrvením betónovej tlakovej diagonály. Takéto porušenie však môže vzniknúť iba v prípade, ak je použitá šmyková výstuž s dostatočne efektívnym kotvením, ktoré zabezpečuje plnú aktiváciu šmykovej výstuže. Definovanie maximálnej odolnosti v pretlačení na základe odolnosti betónovej tlakovej diagonály, je napriek tomu nevhodné, pretože bolo prevzaté z analógie nosníkov namáhania šmykom a neposkytuje spoľahlivé predikcie maximálnej odolnosti dosky v pretlačení. Navyše pri určitých typoch šmykovej výstuže, ako sú strmene, nemusí byť táto hranica odolnosti vôbec dosiahnutá (iba v prípade s veľmi malou pevnosťou betónu). Dôvodom je, že strmeňová výstuž v určitom okamihu prestáva efektívne prenášať zaťaženie, ale nie z dôvodu prekročenia jej pevnosti, ale z dôvodu nedostatočného kotvenia. Výstuž už nie je schopná prenášať ďalšie napätie a prenos zaťaženia

následne prechádza výlučne na betón. Porušenie bolo v tomto prípade pozorované v oblasti medzi šmykovou výstužou, pričom trhlinka vznikala medzi lícom stĺpa a druhým radom šmykovej výstuže (resp. v zóne okolo ukončenia horného kotvenia šmykovej výstuže).

5. Prvá generácia Eurokódu 2 poskytuje bezpečný výpočet maximálnej odolnosti dosky v pretlačení, avšak vedie k značne konzervatívnym výsledkom. V prípade pomerov menších ako $b_0/d_v = 4$ poskytuje až o 50 % podhodnotenú predikciu $V_{Rd,max}$. Táto skutočnosť je spôsobená najmä limitovaním odolnosťou betónovej tlakovej diagonály, ktorej použité sa však ukázalo ako nevhodné a tiež fyzikálne neopodstatnené. Napriek tomu nie je možné túto podmienku v súčasnom Eurokóde 2 vynechať, keďže práve kombinácia dvoch podmienok nepriamo zohľadňuje vplyv pomeru b_0/d_v , a tým zabezpečuje bezpečné (aj keď nepresné) predikcie $V_{Rd,max}$ pre menšie pomery b_0/d_v . EC2(2004)+STN poskytuje taktiež konzervatívnu predikciu ale pre väčšie pomery b_0/d_v jeho spoľahlivosť klesá.
6. Druhá generácia Eurokódu 2 nahrádza konštantnú hodnotu súčiniteľa k_{max} parametrom η_{sys} , ktorý v prípade nových konštrukcií závisí najmä od typu použitej šmykovej výstuže a pomeru b_0/d_v . Limitovanie odolnosťou betónovej tlakovej diagonály sa už v tomto modeli neuplatňuje, pričom bezpečnosť pre menšie pomery b_0/d_v je zabezpečená jeho priamym zohľadnením vo výpočte η_{sys} . Tento model poskytuje konzervatívne a bezpečné predikcie η_{sys} . O niečo menej bezpečné predikcie η_{sys} poskytuje spresnený model (1.4) určený na posudzovanie existujúcich konštrukcií. V prípade potreby odhadu strednej hodnoty odolnosti vykazuje tento model vyššiu presnosť. Ak je však požadovaný 5% fraktíl, vhodnejšou alternatívou je jeho úprava podľa Fraile et. al (Model G1), vid'. Tabuľka 1.8. Oba modely sú však veľmi citlivé na vstupné parametre d_{sys} a s_0 (vid'. Obrázok 1.1), ktorých spätné stanovenie môže byť v praxi veľmi náročné, čím sa výrazne komplikuje jeho aplikácia. Okrem toho druhá generácia Eurokódu 2 (aj všetky súčasné návrhové prístupy) obmedzuje polohu šmykové tržnice na interval $0,3d$ až $0,5d$, pričom zmena jeho polohy v tomto rozsahu nemá významný vplyv na výslednú odolnosť. Naopak model nezohľadňuje šmykovú štíhlosť, ktorá sa ukázala ako jeden z parametrov významne ovplyvňujúcich maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení.
7. V dizertačnej práci je navrhnutý presnejší model pre výpočet η_{sys} (vzťah 1.7), ktorý zohľadňuje nie len typ šmykovej výstuže a pomer b_0/d_v , účinnú výšku dosky d , ale aj šmykovú štíhlosť r_s/d . Tento model je zároveň vhodný aj na hodnotenie existujúcich konštrukcií, keďže pracuje s parametrami, ktoré je možné jednoznačne definovať aj pre už realizované stavby. Predstavené sú dve alternatívy výpočtu – pre prípad, keď je štatistický požadovaná hodnota ako 5% fraktíl, ako aj pre prípad stanovenia ako strednej hodnoty.

Odporúčania pre prax

1. Poloha prvého radu šmykovej výstuže (vzdialenosť s_0) je jeden z kľúčových faktorov ovplyvňujúcich maximálnu odolnosť dosky v pretlačení. Použitie hodnôt väčších ale aj menších ako je predpísaný rozsah $0,3d - 0,5d$, môže viesť k poklesu odolnosti, a preto sa odporúča dôsledná kontrola tejto vzdialenosti priamo na stavbe.
2. Návrhový model uvedený v technickom predpise ETA, ktorý stanovuje maximálnu odolnosť v pretlačení ako $V_{R,max} = 1,96V_{R,c}$, sa ukázal ako nadhodnotený (vid'. Obrázok 1.15).

3. Použitie konštantnej hodnoty súčiniteľa η_{sys} sa javí ako bezpečné riešenie, pokiaľ sa uvažujú hodnoty 1,75 pre dosky vystužené šmykovými trŕmi a 1,40 pre dosky so strmeňmi (viď. Tabuľka 1.9 – model H). Tento prístup je však vhodné používať najmä pri predbežných návrhoch a posúdeniach.
4. V prípade, že sa $V_{R,max}$ stanovuje vo forme $V_{R,max} = \eta_{sys} \cdot V_{R,c}$ a zároveň súčiniteľ η_{sys} explicitne zohľadňuje pomer b_0/d_v , je bezpečné vynechať kontrolu rozdrvenia betónovej tlakovej diagonály, keďže jej dodatočné uvažovanie nemá zásadný význam pre spoľahlivý návrh.
5. Pre posudzovanie existujúcich konštrukcií sa neodporúča používať spresnený výpočet η_{sys} (1.3) (viď. bod 6 v záveroch). Naopak, výpočet podľa vzťahu (1.7), prípadne (1.6) sa preukázal ako vhodnejší, a to z hľadiska presnosti výsledkov, ako aj z pohľadu spätnej dostupnosti vstupujúcich parametrov.

Odporúčania pre ďalší výskum

1. V ďalšom výskume by bolo vhodné overiť vplyv analyzovaných parametrov a spoľahlivosť návrhových modelov aj pre iné typy šmykovej výstuže, ktoré sa v súčasnosti bežne používajú, ako napríklad rôzne zvarané rebríčky alebo ich kombinácia so šmykovými trŕmi.
2. Podobná analýza sa odporúča vykonať aj pre základové konštrukcie.
3. Kalibráciu súčiniteľov η_{sys} (k_{max}) je vhodné vykonávať v kombinácii s referenčnými doskami bez šmykovej výstuže. V prípade, že referenčné dosky nie sú k dispozícii, je nevyhnutné aby do výpočtu $V_{R,c}$ vstupovala stredná hodnota pevnosti betónu f_{cm} .
4. Odporúča sa vykonať podrobné štatistické vyhodnotenie spoľahlivosti výslednej hodnoty $V_{R,max}$, s cieľom určiť, ktorý prístup je pri definovaní η_{sys} vhodnejší – či založený na strednej hodnote, alebo na 5% fraktile.
5. Ďalej sa odporúča rozšíriť databázu experimentálnych výsledkov, a to predovšetkým o skúšky s vyššími hodnotami pomeru b_0/d_v a väčšou šmykovou štíhlosťou.
6. Vzhľadom na rastúce využívanie recyklovaných materiálov v stavebníctve sa odporúča analyzovať vplyv recyklovaného kameniva na maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení.

Zoznam použitej literatúry

- [1] CEN. *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [2] PEIKKO GROUP. *Design of Flat Slabs with PSB ETA*. Peikko Group, [2013].
- [3] STN EN 1992-2-2+A1/NA Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií.
Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy. Národná príloha., Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2015.
- [4] ÖNORM B EN 1992-1-1:NA. *Národná príloha k Eurokódu 2 Rakúskej republiky*. Viedeň: Austrian Standards Institute, 2011.
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA. *Národná príloha k Eurokódu 2: Národne stanovené parametre – Navrhovanie betónových konštrukcií – Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*. Berlín: Deutsches Institut für Normung, 2013.
- [6] BS EN 1992-1-1:2004/NA. *UK National Annex to Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. London: British Standards Institution, 2009.
- [7] SIS EN 1992-1-1/NA. *Národná príloha k Eurokódu 2 Švédskeho inštitútu pre normalizáciu*. Štokholm: Swedish Standards Institute, 2011.
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK. *European Technical Approval ETA-13/0151: PEIKKO PSB punching reinforcement*. Berlin: DIBt, 30 May 2013. 25 s.
- [9] CEN/TC 250/SC 2. *prEN 1992-1-1:2021-09. Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules, Rules for Buildings, Bridges and Civil Engineering Structures*. Stable version. Brussels: CEN, 2021. 436 s.
- [10] FERNÁNDEZ RUIZ, M., MUTTONI, A. *Performance and Design of Punching Shear Reinforcing Systems*. In: *Proceedings of the 3rd fib International Congress*, Washington, D.C., USA, 2010, s. 1–12.
- [11] LIPS, S., FERNÁNDEZ RUIZ, M., MUTTONI, A. *Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs*. *ACI Structural Journal*, vol. 109, no. 6, 2012, s. 889–900.
- [12] SCHMIDT, P. *Punching in Shear-reinforced Flat Slabs and Column Bases*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2019. Dizertačná práca.
- [13] HERNÁNDEZ FRAILE, D., SIMÕES, J. T., FERNÁNDEZ RUIZ, M., MUTTONI, A. *A Mechanical Approach for the Maximum Punching Resistance of Shear-Reinforced Slab-Column Connections*. In: *Proceedings of the fib Symposium 2021*, Lisbon, Portugal, 2021.
- [14] SCHMIDT, P., KALUS, M., HEGGER, J. *Critical view on the level of maximum punching strength of flat slabs and column bases using database evaluations*. *Structural Concrete*, vol. 22, no. 6, 2021, s. 3646–3660.
- [15] LIPS, S., MUTTONI, A. *Experimental investigation of reinforced concrete slabs with punching shear reinforcement*. *Structural Concrete*, vol. 13, no. 3, 2012, s. 146–160.

- [16] SCHMIDT, P., KUERES, D., HEGGER, J. *Punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with a varying amount of shear reinforcement*. *Structural Concrete*, vol. 21, no. 1, 2020, s. 235–246.
- [17] MAJTÁNOVÁ, L. *Maximálna odolnosť v pretlačení lokálne podopretých dosiek so šmykovou výstužou*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2023. Dizertačná práca. 167 s.
- [18] AUGUSTÍN, T. *Pretlačenie lokálne podopretých dosiek s otvormi*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2018. Záverečná práca.
- [19] LIPS, S. *Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012. Dizertačná práca.
- [20] BOLEŠOVÁ, M. *Vplyv histórie zaťažovania na účinnosť zosilnenia lokálne podopretej stropnej dosky*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2022. Záverečná práca.
- [21] EINPAUL, J. *Punching Strength of Continuous Flat Slabs*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016. Dizertačná práca.
- [22] BEUTEL, R. *Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002. Dizertačná práca. 267 s. ISBN 3-9807302-6-3.