

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Peter Havlíček

Autoreferát dizertačnej práce

Analýza šmykovej odolnosti vrubových kĺbov

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe:

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

5.1.5 Inžinierske konštrukcie a dopravné stavby

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: Bratislava, August 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná na
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových
konštrukcií a mostov

Predkladateľ:

Ing. Peter Havlíček

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Július Šoltész, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Ľudovít Naď, CSc.

Dôchodca
Externý konzultant pre D4R7 construction s.r.o

Ing. Ľuboš Rojko, PhD.

GEOCONSULT, spol. s r.o.
Tomášikova 10/E
821 03 Bratislava
Slovenská republika

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 o h.
na Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského
11 v miestnosti

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

1. OBSAH

1.	Obsah	1
2.	Úvod a súčasný stav problematiky	2
3.	Nemecký model podľa Fritza Leonhardta	3
4.	Ciele dizertačnej práce.....	7
5.	Experimentálny výskum	7
5.1.	Experimentálne vzorky	7
6.	Experimentálna zostava	9
6.1.	Popis experimentu	10
7.	Experimentálne výsledky	12
7.1.	Deformácie od vertikálnej (šmykovej) sily	12
7.2.	Pootočenia	13
7.3.	Trhliny	13
8.	Analýza odolnosti vzoriek	15
8.1.	Šmyková odolnosť podľa vybraných modelov	15
9.	Numerická analýza	18
9.1.	Nelineárna numerická analýza (Atena)	18
9.2.	Tvorba 3D modelu	18
9.3.	Vstupné parametre modelu.....	19
9.4.	Trhliny	19
10.	Závery, vedecký prínos a odporúčania pre prax	21
11.	Použitá literatúra (Výber z literatúry).....	22
12.	Publikované práce autora.....	23

2. ÚVOD A SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

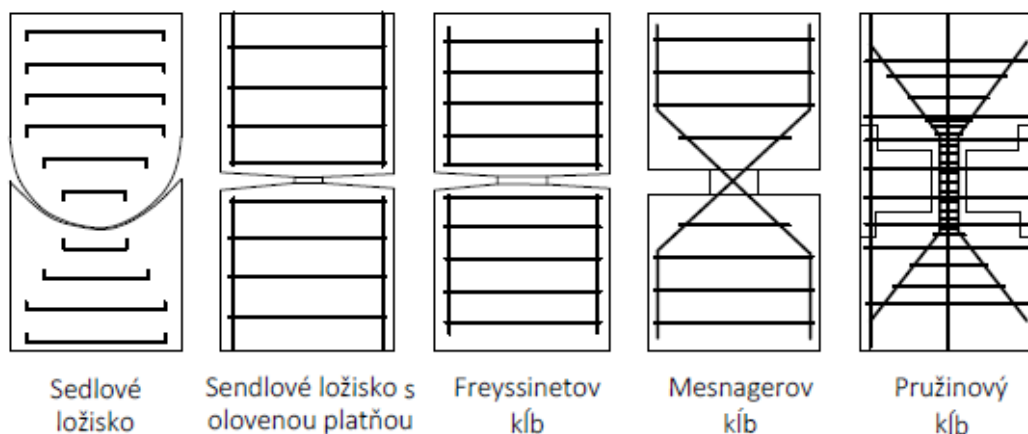
Betónové kĺby sú schopné prenášať extrémne vysoké zaťaženia a pootočenia, pričom vyžadujú len minimálne nároky na údržbu. Ich použitie je rozšírené hlavne v mostnom staviteľstve ale rovnako našli uplatnenie aj pri prefabrikácii tunelových segmentov alebo dokonca v špeciálnych prípadoch predpätých nádrží . Pri správnom návrhu a realizácii spĺňajú aj najvyššie nároky na trvanlivosť a odolnosť konštrukcie.

Šmyková odolnosť je silne diskutovanou problematikou, hlavne pre bežné konštrukcie ako sú dosky a nosníky čo odpovedá aj množstvo experimentálnych programov a predpisov pre dimenzovanie týchto konštrukcií. Naproti tomu atypickým konštrukciám ako sú vrubové kĺby je venovaná oveľa menšia pozornosť čo sa odzrkadľuje aj v tom, že sa pre ich návrh používajú viac ako 60 ročné návrhové modeli. Zároveň väčšina týchto modelov nevenuje dostatočnú pozornosť šmykovej odolnosti napriek tomu, že šmykové porušenie sa radí medzi krehké porušenia, čo znamená, že toto porušenie nie je vopred signalizované napríklad nadmernými deformáciami.

Na šmykovej odolnosti železobetónových prvkov sa podieľa viacero mechanizmov, pričom o veľkosti podielu jednotlivých mechanizmov na celkovej šmykovej odolnosti stále nepanuje konsenzus. Výsledkom je aj množstvo návrhových postov s veľkým rozptylom výsledkov odolnosti. Jedným z cieľov tejto dizertačnej práce je nájdenie vhodného výpočtového postupu, ktorý je aplikovateľný aj pre navrhovanie vrubových kĺbov.

Tieto fakty robia zo šmykovej odolnosti vrubových kĺbov zaujímavý problém nie len na akademickej pôde, ale aj pre projekčnú prax, nakoľko spresnením modelov a postupov by sa vniesla istota do návrhu tejto dôležitej súčasti nosnej konštrukcie.

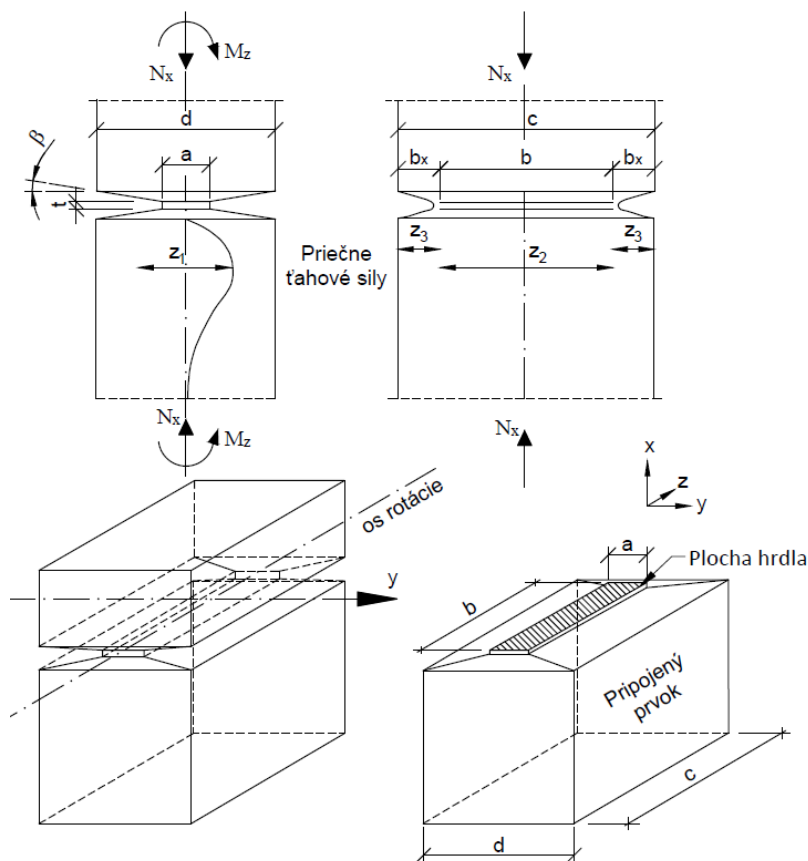
Jedným z najsofistikovanejších kompletných modelov pre návrh vrubových kĺbov je práve Leonhardtov model. Tento návrhový postup je rovnako základom pre modely používané napríklad v Anglicku, Holandsku alebo Švédsku.



Obr. 2.1: Typy vrubových kĺbov

3. NEMECKÝ MODEL PODĽA FRITZA LEONHARDTA

Nemecký model vyvinutý v 1960, ktorého autorom je Fritz Leonhardt je založený aj na experimentálnych meraniach, na rozdiel od francúzskeho modelu. Konceptne je založený na dovolených napätiach v hrdle kĺbu. Leonhardt nebol schopný vytvoriť skutočný matematicko-fyzikálny model a preto použil na doplnenie aj empirické vzťahy. Jeho návrh bol neskôr modifikovaný do podoby aktuálneho eurokódu kde sa používa ním vytvorené názvoslovie, (Obr. 3.1), [1].

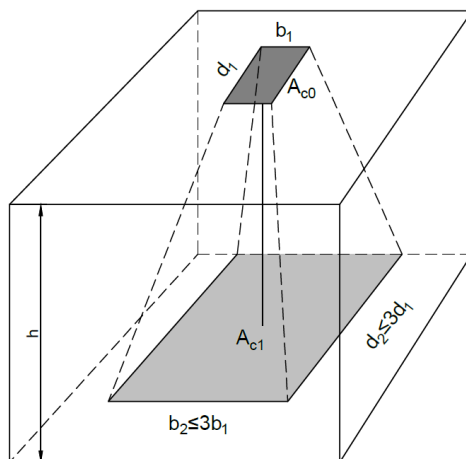


Obr. 3.1: Návrhová schéma použitá pre návrh Freyssinetových kĺbov podľa Leonhardta, [1].

Model je definovaný pre rovinný systém a zaťaženia, ktoré zodpovedá medznému stavu únosnosti. Kĺb zaťažený silou N_d a rotáciou α_d . Preťaženie betónu v hrdle je teoreticky možné ale ešte nebolo zistené pri žiadnom experimente. Porušenie vždy nastáva v pripojených blokoch kvôli veľkému priečnemu ťahu a plastickej deformácii výstuže v týchto blokoch [1]. Jedná sa predovšetkým o horizontálne výstužné strmene a koše na oboch stranách hrdla kĺbu. Na opísanie prenos zaťaženia cez hrdlo do pripojených blokov je možné použiť vzťah pre lokálne zaťažené oblasti z EN 1992-1 [2]. Pri takýchto podmienkach dovoľuje použiť vyššie uvedená norma vyššiu pevnosť betónu.

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \leq 3.0 f_{cd} A_{c0} \quad (3.1)$$

Z tohto vzťahu tiež vyplýva, že veľkosť plochy A_{c1} je limitovaná na maximálne 3 násobok plochy lokálne zaťaženej oblasti A_{c0} .



Obr. 3.2: Návrhový roznos pre lokálne zaťaženie oblasti, podľa [2].

Pri aplikácii tejto podmienky do v oboch smeroch je zabezpečené dostatočné obmedzenie priečných pretvorení. Pri betónových kĺboch túto podmienku dosiahneme zúžením rozmeru hrdla kolmo k osi otáčania. Šírka hrdla a by mala byť menšia ako 70% dĺžky hrdla b a zároveň menšia ako $1/3$ šírky pripojeného bloku pričom najmenšia dovolená šírka hrdla je 5 cm, vzťah (3.2) a (3.3). Na základe Leonhardtových odporúčaní pre geometriu hrdla a pri zanedbaní zúženia prednej strany môžeme potom vypočítať únosnosť lineárneho betónového kĺbu podľa vzťahu (3.4).

$$b \geq 0.7a \geq 5\text{cm} \quad (3.2)$$

$$a \leq 0.3d \quad (3.3)$$

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{3} \quad (3.4)$$

Za predpokladu, že čím väčšie je zúženie hrdla tým je väčšia pevnosť v tlaku betónu, môžeme minimálnu plochu hrdla vypočítať podľa vzťahu (3.5) (Leonhardt 1968, citované z [3]).

$$A_{G,min} = \frac{N_{d,max}}{\sqrt{3} f_{cd} \left[1 + \lambda \left(1 - \alpha_d \frac{E_{cm}}{12800 \sqrt{3} f_{cd}} \right) \right]} \quad (3.5)$$

$$\lambda = 1,2 - 4 \frac{a}{b} \leq 0,8 \quad (3.6)$$

Na opis vlastností kĺbu pri jeho rotácii vyvinul Leonhardt jednoduchý mechanický model. Model vychádzal z experimentov pri ktorých meral pretvorenia na napätia v hrdle kĺbu. Ich výsledkom je mechanický model na Obr. 3.3, [1]. Ten uvažuje s lineárnym priebehom tlakových napätí s predpokladom, že k prenosu ťahových napätí nedochádza z dôvodu trhlin v hrdle na limitnej dĺžke r . Zároveň je limitovaná efektívna výška hrdla na hodnotu $s = a$. Na základe vyššie uvedených predpokladov a za predpokladu použitia jednotiek ($\%$, MN , m , MN/m^2) je vzťah na výpočet maximálneho pootočenia kĺbu rovný (3.7).

$$\alpha_{Rd} = \frac{12800 N_d}{a b E_{cm}} \quad (3.7)$$

Pri výpočte celkového pootočenia je nutné uvažovať len s 50% hodnotou pootočenia od stálych zaťažení kvôli pozitívnemu vplyvu dotvarovania. Pre návrhové pootočenie vrubového kĺbu potom platí vzťah (3.8).

$$\alpha_d = 0.5\alpha_g + \alpha_Q \quad (3.8)$$

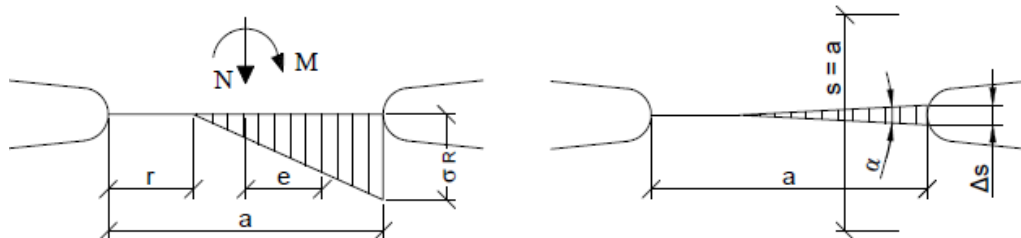
Kde α_g je pootočením od stálych zaťažení a α_Q je pootočením od premenných zaťažení a iných krátkodobých účinkov na konštrukciu. Z rovnice (3.9) je potom možné vypočítať návrhovú osoú silu N_d ako súčet návrhových osoých síl od stáleho a úžitkového zaťaženia:

$$N_d = N_{G,d} + N_{Q,d} \quad (3.9)$$

Maximálna prierezová plocha hrdla kĺbu je možné vypočítať na základe limitného pootočením, pri ktorom je ešte kĺb schopný rotácie. Vzťah pre výpočet limitnej plochy (3.11) je možné dostať priamou úpravou vzťahu (3.10). Pri výpočte je nutné použiť α_d a N_d patriace rovnakému zaťažovaciemu stavu, (Mönnig a Netzel 1969, citované z [1]).

$$\alpha_d \leq \alpha_{Rd} = \frac{12800 N_d}{a b E_{cm}} \quad (3.10)$$

$$a \cdot b \leq A_{G,max} = \frac{12800 \cdot N_d}{\alpha_d E_{cm}} \quad (3.11)$$



Obr. 3.3: Mechanický model pre ohyb vrubového kĺbu, [1].

Charakteristický „momentové pootočením“ (moment-rotation) hrdla kĺbu Ψ môže byť vyjadrené osobitne pre hrdlo kĺbu bez trhliny a s trhlinou, výraz (3.12) (3.13).

$$m = \begin{cases} m_I & 0 \leq m \leq \frac{1}{6} & 0 \leq \Psi \cdot \alpha \leq 9\text{‰} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$m = \begin{cases} m_{II} & \frac{1}{6} \leq m \leq \frac{1}{3} & 9\text{‰} \leq \Psi \cdot \alpha \leq 36\text{‰} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$m_I(\Psi \alpha) = \frac{\Psi \cdot \alpha}{54} \quad (3.14)$$

$$m_{II}(\Psi \alpha) = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{\Psi \cdot \alpha}} \quad (3.15)$$

$$\Psi = \frac{9 \cdot E_{cm} A_G}{20000 \cdot N_d} \quad (3.16)$$

Táto charakteristika bola vyvinutá Leonhardtom pre lepšie vyjadrenie správania sa kĺbu pri ohybe. Parameter Ψ vyjadruje ohybový moment potrebný na dosiahnutie požadovaného pootočením kĺbu. Toto teoretické riešenie bolo vyvinuté na základe dát z viacerých experimentov. Na potvrdenie svojich predpokladov pre správanie sa kĺbu pri ohybe použil Leonhard pomer podľa, ktorého je možné určiť ohybový moment, ktorý je potrebný na dosiahnutie požadovaného natočením.

Leonhard sa nevenoval výskumu šmykovej odolnosti betónových kĺbov ale pri tvorbe modelu čerpal z výskumu ktoré vykonal G.D.Base. [5] [6] [7]. Na základe jeho experimentov sa pri pomere šmykovej sily ku osovej 1,0 neobjavili žiadne známky poškodením. Leonhardt preto odporučil limitovať šmykovú silu na hodnotu $Q_{y,d} \leq 0,25 N_d$. Pre pomery väčšie ako $Q_{y,d} \geq 0,125 N_d$, by mal byť kĺb kotvený. Pre návrh výstuže na priečny ťah Leonhard odporúča

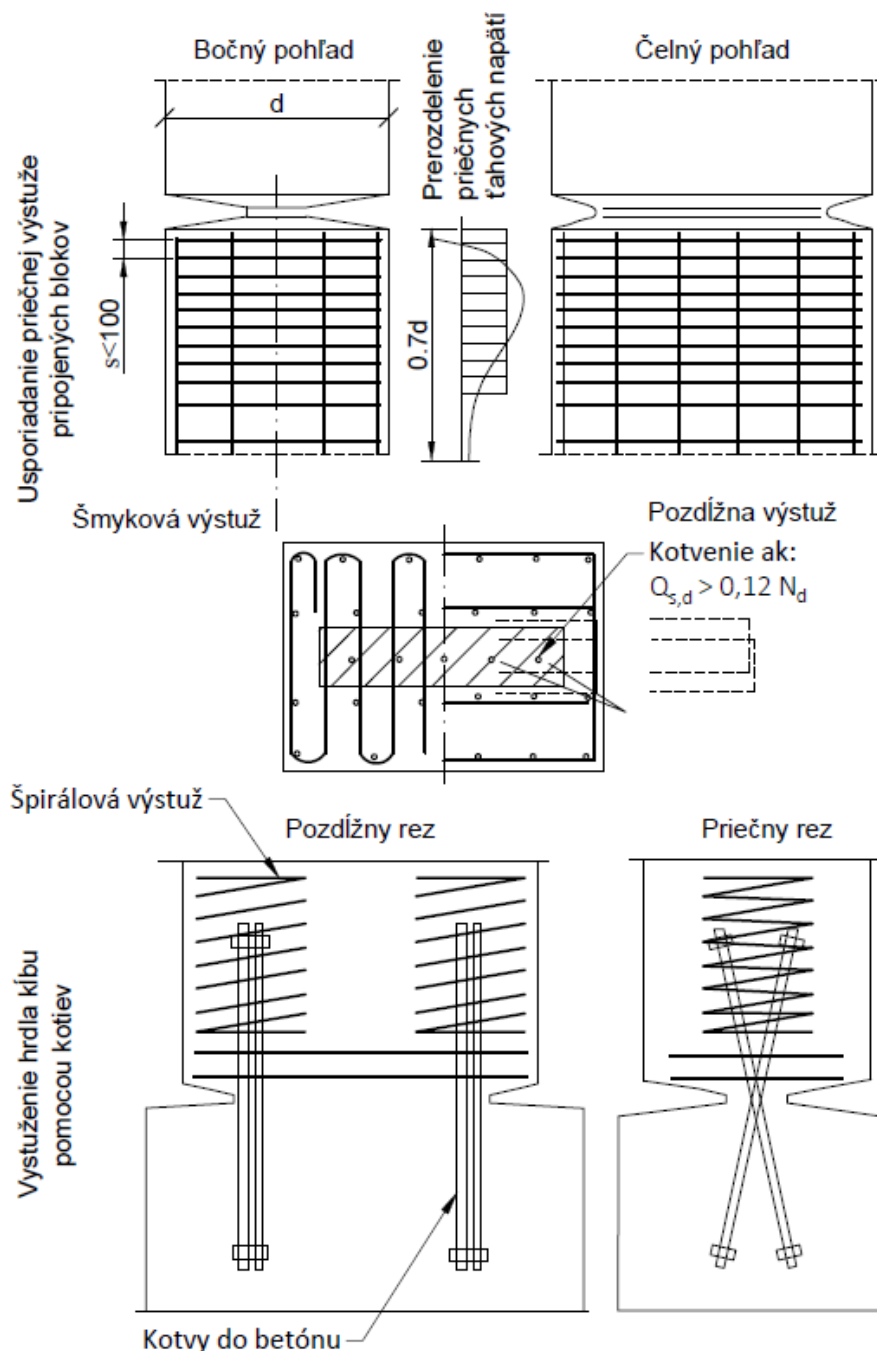
pripustiť len nízke návrhové napätia vo výstuži aby sa zabránilo tomuto typu porušeniu. $Z_{1,d}$, $Z_{2,d}$ a $Z_{3,d}$ sú prípustné ťahové sily vo výstuži pre jednotlivé smery podľa (Obr. 3.1).

$$Z_{1,d} = 0,3 N_{d,max} \quad (3.17)$$

$$Z_{2,d} = 0,3 \left(1 - \frac{b}{c}\right) N_{d,max} \quad (3.18)$$

$$Z_{3,d} = 0,03 \frac{a}{b} N_{d,max} \quad (3.19)$$

Leonhard odporúča maximálne napätie vo výstuži na priečny ťah $\sigma_s = 180 \text{ N/mm}^2$ pre medzný stav použiteľnosti a 250 N/mm^2 pre medzné stavy únosnosti pri použití parciálneho súčiniteľa 1,4. Táto podmienka má zabezpečiť dodatočnú tuhosť pripojených blokov [8].



Obr. 3.4: Odporúčaná spôsob vystuženia vrubového kĺbu podľa, [8].

4. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe rešerše dostupnej a relevantnej literatúry boli v teoretickej časti tejto práce zhrnuté súčasne poznatky a prax v navrhovaní a posudzovaní vrubových kĺbov ako aj šmykovej odolnosti klzných betónových rozhraní.

Všetky dnes používané modeli pre návrh vrubových kĺbov sú založené čisto na empirických predpokladoch a nie sú plne kompatibilné s princípmi dnešných európskych noriem. Jedným z hlavných nedostatkov týchto predpisov je aj chýbajúce posúdenie šmykovej odolnosti založené na fyzikálne a matematicky overených predpokladoch. Riešením tohto problému by mohla byť implementácia návrhových odporúčaní pre posúdenie šmykovej odolnosti v trhline na rozhraní betón-betón prezentovaných v Model Code 2010 [20].

Ciele dizertačnej práce:

1. Navrhnuť a vykonať experimentálnu analýzu vzoriek vrubových kĺbov, ktorá bude zameraná na stanovenie ich šmykovej odolnosti.
2. Analýza správania vzoriek vrubových kĺbov zaťažených kombinovaným zaťažením normálovou a šmykovou silou.
3. Porovnanie nameranej šmykovej odolnosti vzoriek s modelmi a vzťahmi pre návrh vrubových kĺbov a vybraných návrhových postupov podľa STN EN 1992-1, 1993-1 a Model Code 2010.
4. V prípade nesúladu vypočítaných a nameraných odolností navrhnuť prípadnú úpravu výpočtových vzťahov.
5. Numerická verifikácia nameraných odolností experimentálnych vzoriek pomocou nelineárnej analýzy MKP.

5. EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM

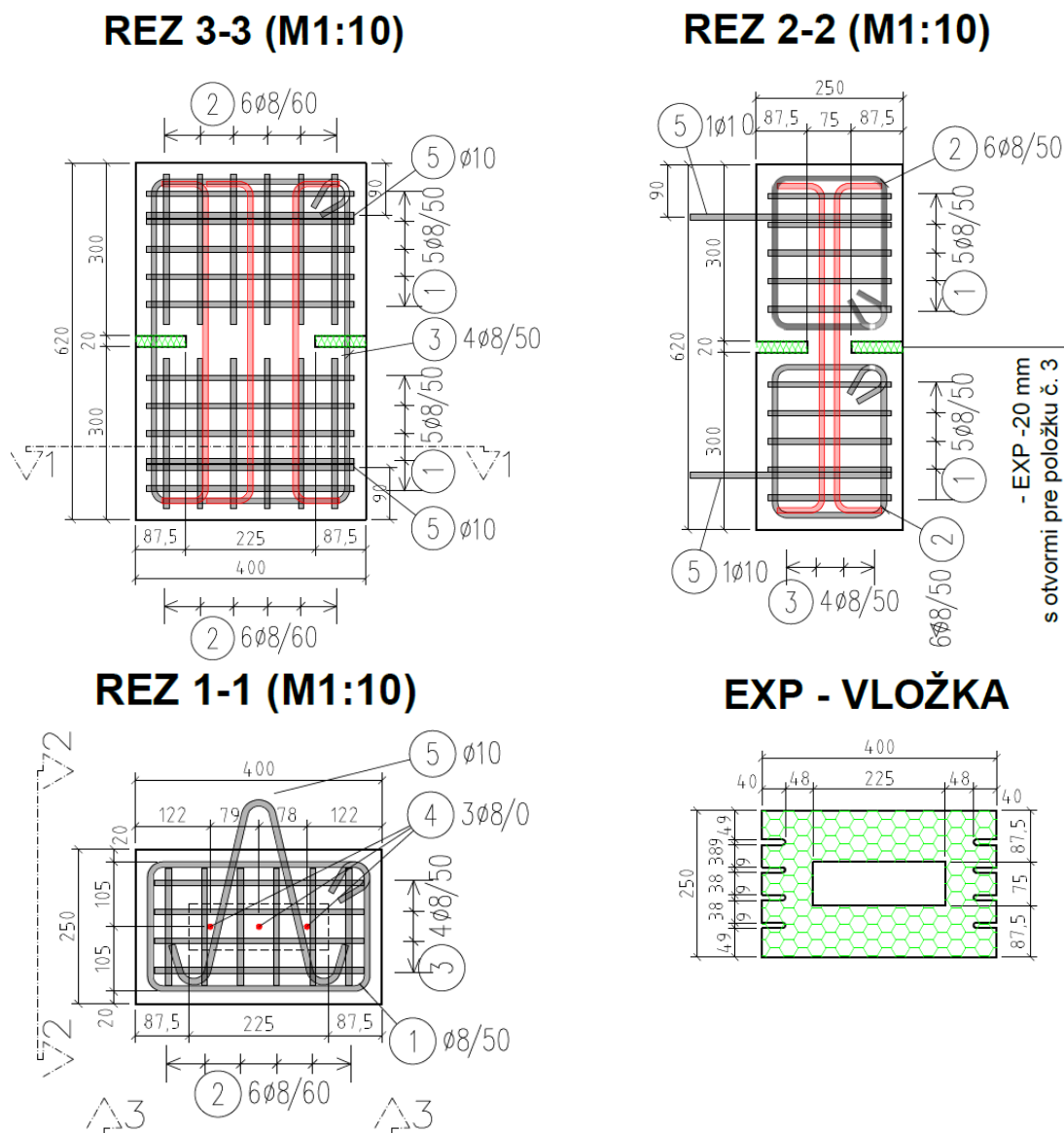
Cieľom experimentálneho programu boli zaťažovacie a deštrukčné skúšky výseku bezprievlakovej stropnej dosky, ktorá je primárne navrhnutá tak, aby zlyhala pri pretlačení na rozdrvenie tlakovej diagonály. Tomu zodpovedali rozmery skúšaných vzoriek a ich vystuženie. Spolu boli odskúšané dve série dosiek, pričom v každej sérii bola jedna doska navrhnutá bez šmykovej výstuže a jedna doska bola so šmykovou výstužou. Súčasťou experimentálneho programu boli tiež samostatné materiálové skúšky betónu a betonárskej výstuže.

Experimentálny výskum bol realizovaný v Centrálnych laboratóriách Stavebnej fakulty STU v Bratislave, rovnako aj niektoré materiálové skúšky. Časť materiálových skúšok bola realizovaná v laboratóriách Univerzitého vedeckého parku Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

5.1. Experimentálne vzorky

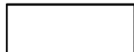
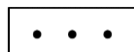
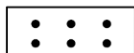
Experimentálne vzorky mali tvar betónového hranola so zúžením v mieste hrdla kĺbu. Hranol mal výšku 620 mm s prierezom 400 x 250 mm. V polovici výšky bol prierez symetricky redukovaný na prierez s rozmermi 225 x 75 mm. Tvar a spôsob vystuženia vzorky je na Obr. 5.1. a bol pre všetkých typy rovnaký. Nábehy a skosenia kĺbu neboli realizované pre zjednodušenie výroby. Napriek tomu, že tieto skosenia sú pri skutočných konštrukciách odporúčané ich výroba nebola nutná, keďže ich hlavnou funkciou je zvyšovanie rotačnej kapacity, čo pri skúšaní šmykovej odolnosti nie je potrebné. Pri experimente boli použité 3 typy vzoriek, pričom každý typ sa líšil stupňom vystuženia a umiestnením výstuže v hrdle. Typ-0

nebol vystužený. Typ-3 bol vystužený 3 prútmi $\phi 8$ v ťažisku prierezu hrdla a Typ-6 mal v hrdle 6 prútov $\phi 8$ v dvoch radoch, (kompletná výkresová dokumentácia skúšobných vzoriek – Príloha č.1). Jednotlivé typy vystuženia hrdla skúšobných vzoriek sú v Tabuľka 5.1. Výstuž pripojených blokov bola tvorená výstužným košom a bola navrhnutá, tak aby nedošlo k porušeniu vzorky na priečny ťah. Krytie tejto výstuže bolo 34 mm Cez polystyrénovú vložku boli pred betonážou umiestnené pomocné prúty $\phi 6$. Ich úlohou bolo zabrániť porušeniu vzorky pri jej prevoze a manipulácii a po osadení vzorky do zostavy boli v mieste hrdla prerezané. Jednalo sa o poistné prúty ktoré mali zabrániť porušeniu vzorky pri jej prevoze a manipulácii. Po osadení vzorky do zostavy sa tieto prúty prerezali.



Obr. 5.1: Tvar a spôsob vystuženia vzorky TYP-2

Tabuľka 5.1: Jednotlivé typy vystuženia hrdla skúšobných vzoriek

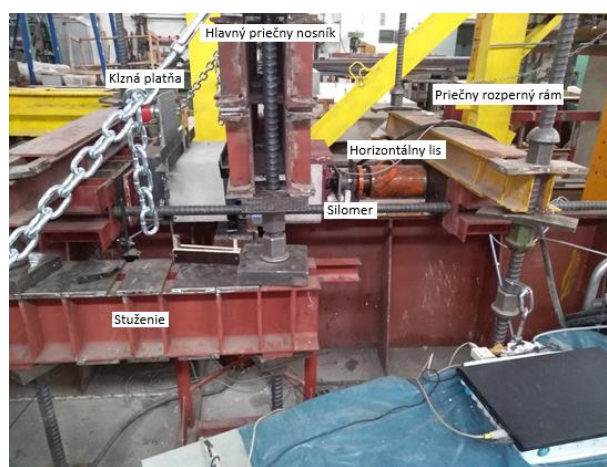
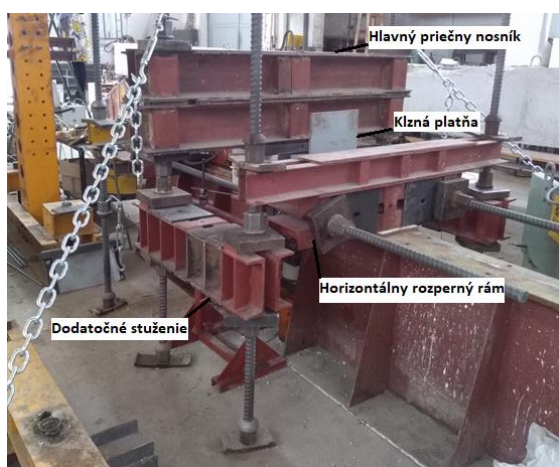
	Typ vzorky	Počet ks	f_c (MPa)	Vystuženie hrdla	Stupeň vyst. hrdla ρ (%)	d_{max} (mm)	Rozmiestnenie výstuže v hrdle
1.Séria	TYP-0A	1	31,88	0 $\phi 8$	0,0	8	
	TYP-3A	1		3 $\phi 8$	0,89	8	
	TYP-6A	1		6 $\phi 8$	1,79	8	
2.Séria	TYP-0B	3	33,46	0 $\phi 8$	0,0	16	
	TYP-3B	3		3 $\phi 8$	0,89	16	
	TYP-6B	3		6 $\phi 8$	1,79	16	



Obr. 5.2 Výstužný kôš pripojených blokov a príprava betonáže vzoriek 2. série

6. EXPERIMENTÁLNA ZOSTAVA

Skúšky experimentálnych vzoriek boli realizované v Centrálnych laboratóriách STU. Návrh zostavy bol ovplyvnený hlavne rozmiestnením kotevných otvorov v podlahe laboratória a dostupným vybavením a materiálom.

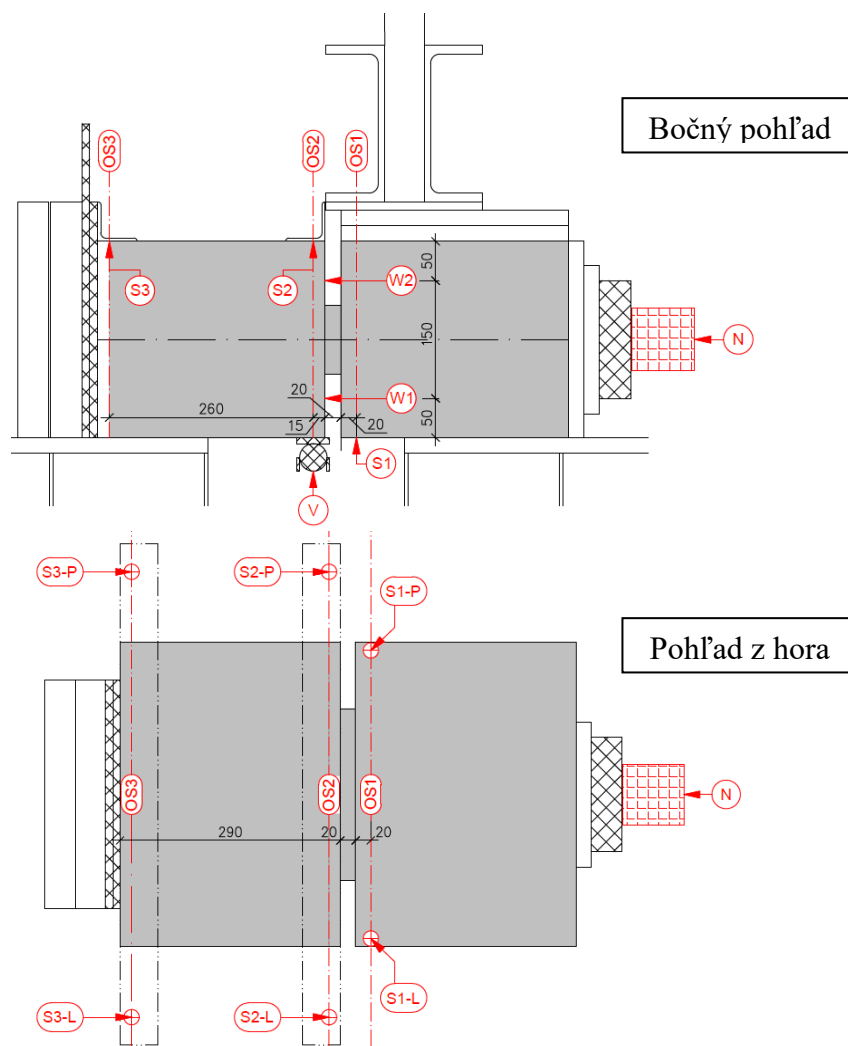


kompenzáciu pootočení vzorky pri jej zaťažovaní. Umiestnenie silomeru je možné vidieť na (Obr. 6.2).

c - Zvislá deformácia vzorky - bola meraná v mieste pôsobenia vertikálnej sily (OS2) a na voľnom konci (OS3). Na meranie boli použité dva páry snímačov LVDT. Tie boli zavesené na dvojici oceľových L profilov, ktoré boli prilepené na hornú hranu vzorky. Snímače boli prichytené magneticky na dvojici oceľových stojanov. Stojany neboli so zostavou prepojené. Dáta zo všetkých použitých LVDT snímačov boli zaznamenávané kontinuálne priamo do počítača.

d - Zvislá deformácia zostavy bola meraná aj v mieste nezaťažovaného konca, (OS1). Rovnako boli použité LVDT snímače. Jednalo sa o kontrolné meranie deformácií nezaťažovaného konca vzorky.

e - Vzájomné stlačenie hrdla bolo merané pomocou dvojice analógových deformometrov vždy na spodnom a hornom okraji hrdla kĺbu. Merania boli odčítavané manuálne vo vopred určených zaťažovacích krokoch. Snímače boli na pevno prilepené na drevenú podložku, ktorá sa počas prípravy vzorky prilepila na bočnú hranu nezaťažovaného konca vzorky. Tento spôsob umožnil jednoduché a rýchle prichytenie meradiel vždy v rovnakej polohe. Rozvoj šmykovej trhliny nebolo možné zmerať z dôvodu malých rozmerov hrdla kĺbu.

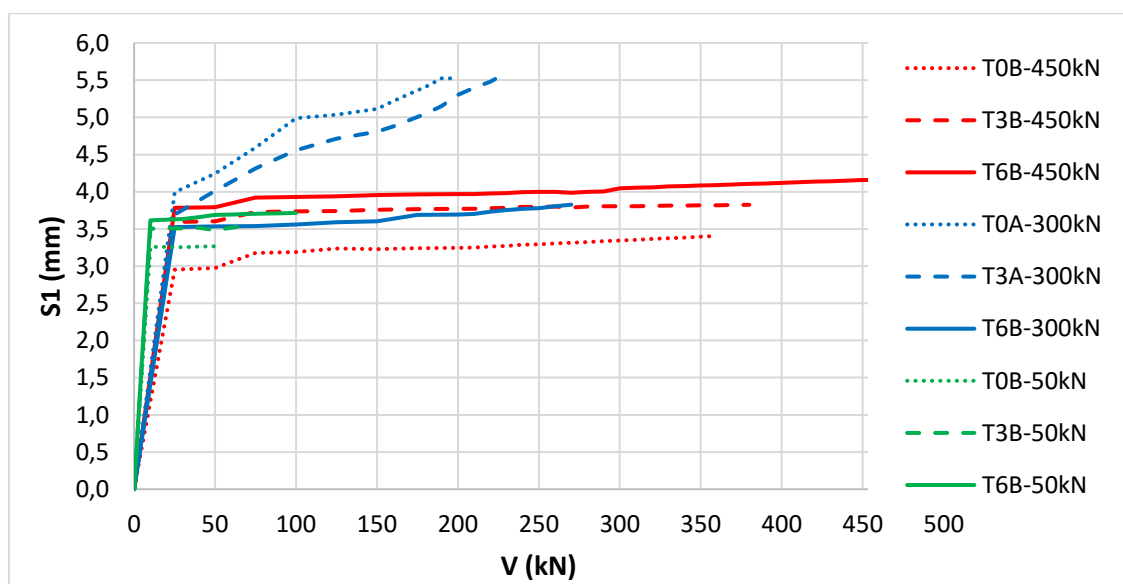


Obr. 6.2: schéma osadenia meracích zariadení

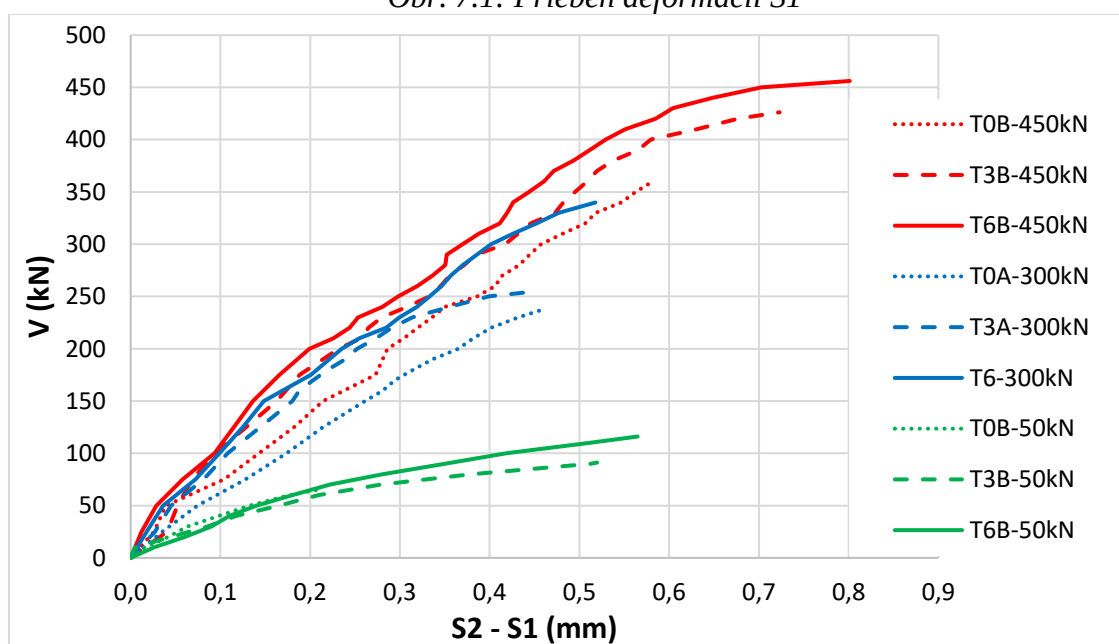
7. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

7.1. Deformácie od vertikálnej (šmykovej) sily

Vzorka bola skúšaná v horizontálnej polohe, takže zvislé deformácie zodpovedajú deformáciám, ktoré by boli vyvolané šmykovou silou v hrdle kĺbu. Deformácie boli v troch meracích osiach na oboch stranách vzorky, pozri Obr. 6.2. Meracia os OS1 prechádzala 2 cm od krajnej hrany hrdla na pasívnej strane vzorky. V tejto osi sa sledovala prípadná deformácia zostavy a posun pasívneho konca vzorky. Meracia os OS2 bola umiestnená v osi pôsobenia priečnej sily vo vzdialenosti 2 cm od hrany hrdla kĺbu na aktívnej strane. Posledná meracia os OS3 sa nachádza vo vzdialenosti 260 mm od osi OS2 smerom k voľnému okraju vzorky na aktívnej strane. V každej meracej osi boli umiestnené dva LVDT snímače, jeden na pravej a jeden na ľavej strane.



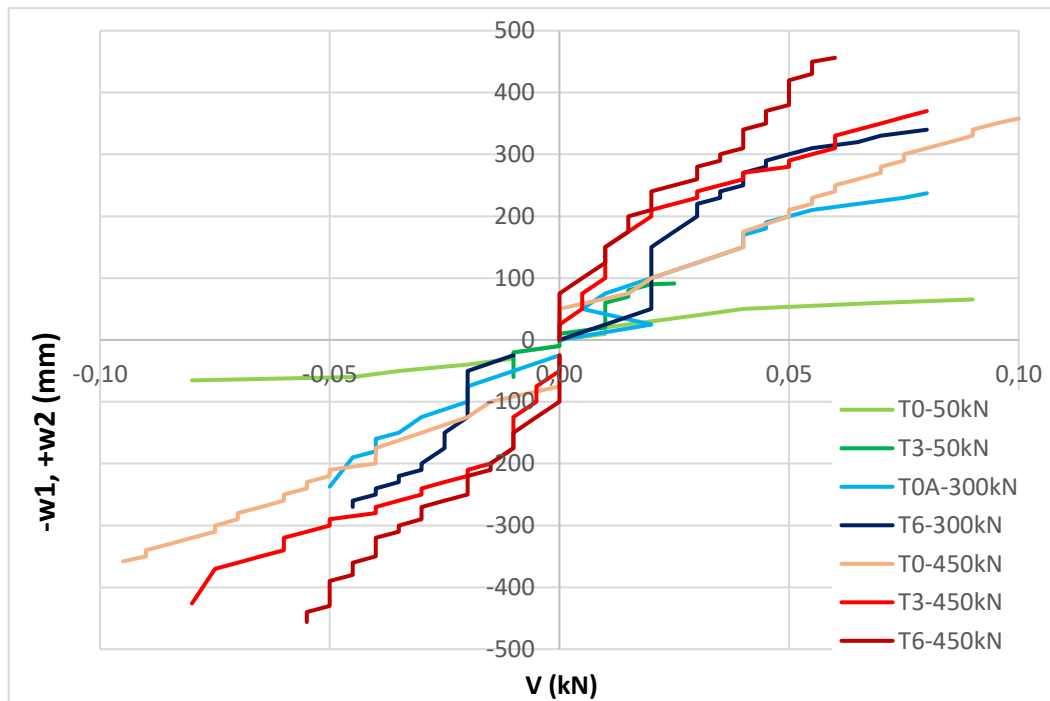
Obr. 7.1: Pribeh deformácií S_1



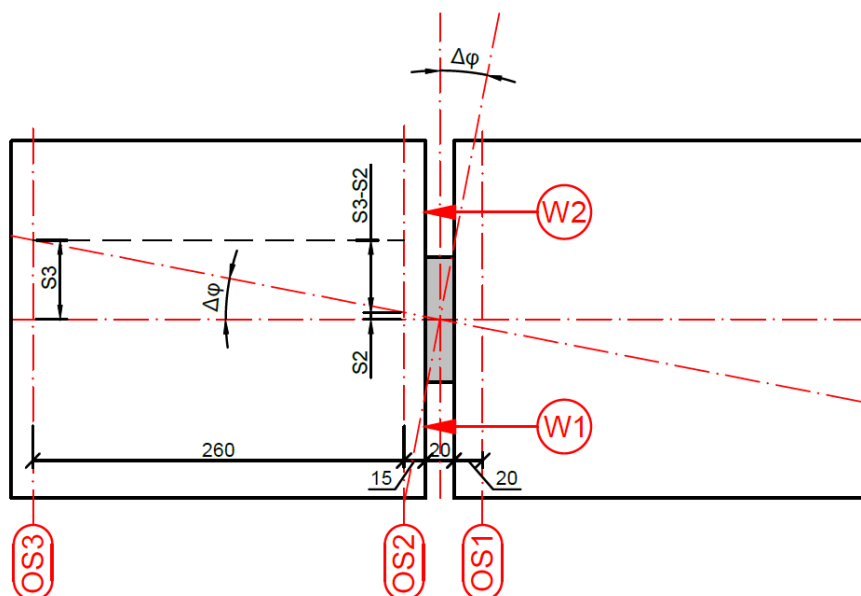
Obr. 7.2: Hodnoty deformácií v osi zaťaženia S_2 (mm) od postupného zaťažovania

7.2. Potočenia

Potočenia aktívnej časti neboli merané priamo libelami, ale boli dopočítané z nameraných deformácií. Dôvodom pre toto rozhodnutie bol fakt, že na zostave nebol dostatok miesta pre umiestnenie libely a následné odčítavanie hodnôt by bolo problematické. Potočenia sa určili na základe rozdielu deformácií S3 a S2, pričom na kontrolu boli z bočnej strany vzorky osadené analógové merače deformácie W1 a W2. Schéma pre výpočet potočenia je na Obr. 7.4.



Obr. 7.3: Priebeh deformácií hrdla klbu w1 a w2 od zaťaženia



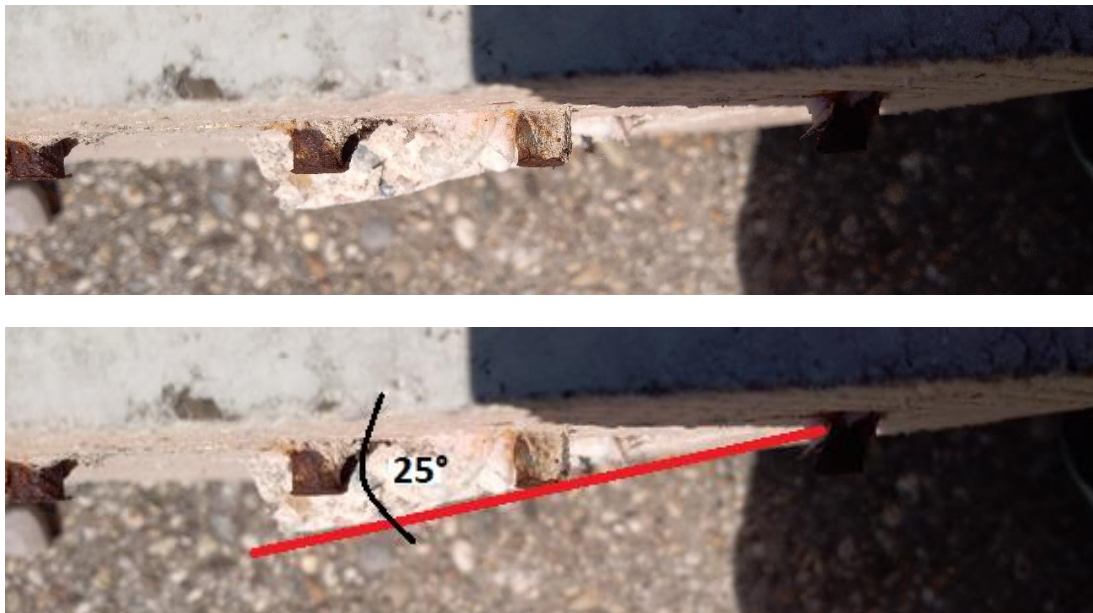
Obr. 7.4: Schéma výpočtu potočenia

7.3. Trhliny

Trhliny nebolo možné počas skúšky merať ani sledovať ich vznik, preto boli preskúmané až po porušení vzorky. Z tohto dôvodu nie je možné určiť zmenu ich šírky, ale je možné určiť

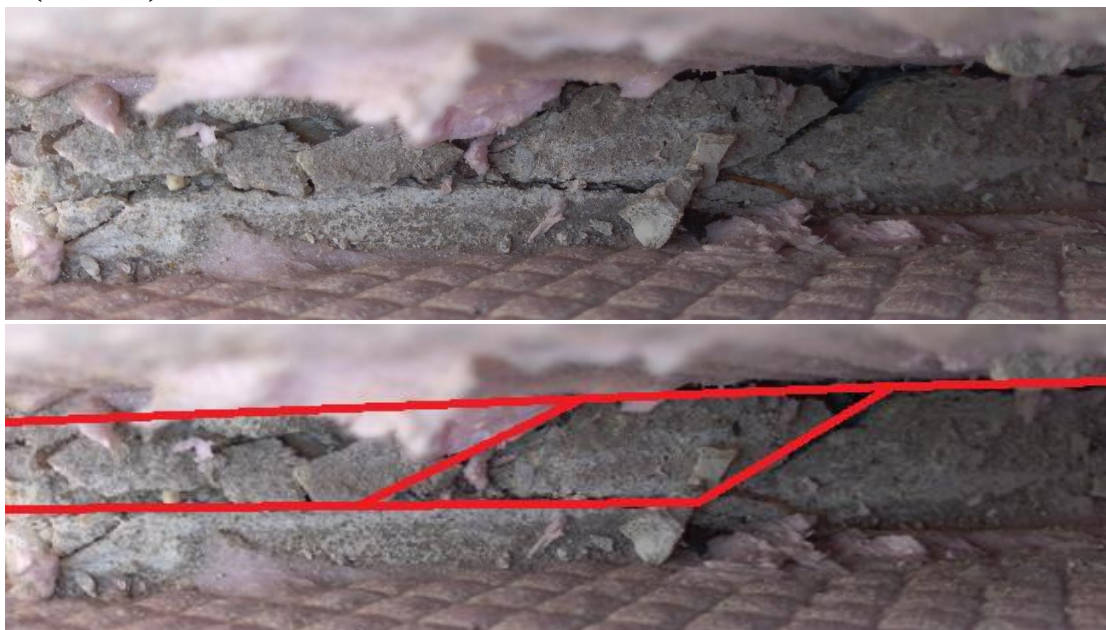
ich tvar a sklon. Na nasledujúcich obrázkoch sú fotografie hrdla kĺbu vybraných porušených vzoriek. Tu je možné vidieť dva typy vzniknutých trhlín. Na pripojených blokoch a trhliny neobjavili.

Prvým typom porušenia bol vznik šmykovej trhliny vedenej pod uhlom 75° . Táto trhlina vznikla pri všetkých vzorkách bez vystuženého hrdla. Jej tvar a sklon bol nezávislý od veľkosti osovej sily N . Trhlina začína na aktívnej strane spodnej hrany hrdla kĺbu a končí na pasívnej strane hornej hrany hrdla, (Obr. 7.5).



Obr. 7.5: Vzorka T0-450, šmyková trhlina

Druhý typ porušenia sa objavil u vzoriek s vystuženým hrdlom. Trhliny boli vedené pod uhlom väčším ako 75° . Ich začiatok je rovnako ako v predošlom prípade na aktívnej strane spodnej hrany hrdla, ale pokračujú kolmo hore. Pri vzorke T6-300 a T6-450 prechádza táto trhlina približne v polovici hrdla pod uhlom 40° - 45° na pasívnu stranu a pokračuje opäť kolmo nahor, (Obr. 7.6).



Obr. 7.6: Vzorka T6-300, šmyková trhlina

8. ANALÝZA ODOLNOSTI VZORIEK

Analýza odolnosti vzoriek bude prezentovaná viacerými spôsobmi. Namerané odolnosti všetkých troch typov vzoriek budú porovnané s teoretickými odolnosťami podľa jednotlivých modelov prezentovaných v kapitole 2.4. Porovnanie odolností bude rozdelené na tri časti. Ako prvé budú porovnané existujúce predpisy pre návrh vrubových kĺbov. Následne bude preskúmaná aplikovateľnosť vzťahov pre posúdenie šmykovej odolnosti prútových prvkov podľa STN EN 1992-1 [14] a Mole Code 2010 [20]. V poslednom rade bude overená platnosť rozšírenej teórie šmykového trenia a návrhových vzťahov podľa Mole Code 2010 [20] pre posúdenie šmykovej odolnosti vrubových kĺbov.

Tabuľka 8.1: Charakteristiky a odolnosti skúšobných vzoriek

Typ vzorky	Valcová pev. bet. f_{cm} (MPa)	Vystuženie hrdla kĺbu/stupeň vystuženia ρ (%)	N.max (kN)	Normálové napätie v hrdle $f_{c,N}$ (MPa)	V (kN)
T-0B-50	33,46	0,00%	52,56	3,1	65,41
T-3B-50		3 ϕ 8 (0,86%)	55,95	3,3	91,17
T-6B-50		6 ϕ 8 (1,65%)	54,39	3,2	116,05
T-0A-300	31,875	0,00%	308,72	18,3	237,16
T-3A-300	31,875	3 ϕ 8 (0,86%)	293,72	17,5	254,52
T-6B-300	33,46	6 ϕ 8 (1,65%)	307,14	18,2	339,88
T-0B-450		0,00%	451,89	26,8	358,10
T-3B-450		3 ϕ 8 (0,86%)	463,33	27,4	426,18
T-6B-450		6 ϕ 8 (1,65%)	454,48	26,932	456,14

8.1. Šmyková odolnosť podľa vybraných modelov

Prvým problémom je, že všetky existujúce modely sú založené hlavne na empirických parametroch a nie vždy majú jasný fyzikálny základ. Sú zamerané prevažne na stanovenie limitných pootočení a ohybovej odolnosti, pričom šmykovej odolnosti sa venujú len okrajovo. Prvou veľkou skupinou sú predpisy založené na Leonhardtovom modeli, kde patrí samozrejme nemecký model, britský predpis BE 5/75 [11], holandský a švédsky model. Model M. Herzoga v kapitola 2.1.6 a francúzsky model sa ako jediné odlišujú od tejto skupiny. Rakúsky model pre návrh kĺbov pre SLS sa zatiaľ šmykovou odolnosťou nezaobrá. Treba však dodať, že všetky spomínané modely neurčujú túto odolnosť ako odolnosť konštrukcie alebo materiálu, ale len ako maximálne dovolené šmykové namáhanie, pričom táto hodnota je častokrát závislá len od hodnoty osovej sily bez ohľadu na geometriu alebo použitý materiál. Výpočet šmykovej odolnosti podľa jednotlivých modelov je spracovaný v Tabuľka 6.5.

Rozsah a oblasť použitia rozšírenej teórie šmykového trenia, (ďalej len ESF), presne zodpovedá charakteru namáhania, ktorému je vystavený vrubový kĺb. Na overenie tohto predpokladu boli experimentálne získané hodnoty odolnosti porovnané s teoretickou odolnosťou vypočítanou podľa vzťahov v kapitole 2.11. Výpočet odolnosti šmykového rozhrania podľa týchto vzťahov je rozdielny pre vystužené a nevystužené prvky, respektíve ak porušenie má duktilný (ESF-D) alebo krehký charakter (ESF-B).

Prisúdenie celého zaťaženia výstuži ako je tomu v prípade použitia vzťahu na výpočet plastickej odolnosti ocele podľa STN EN 1993-1 je vysoko neefektívne, keďže betón je

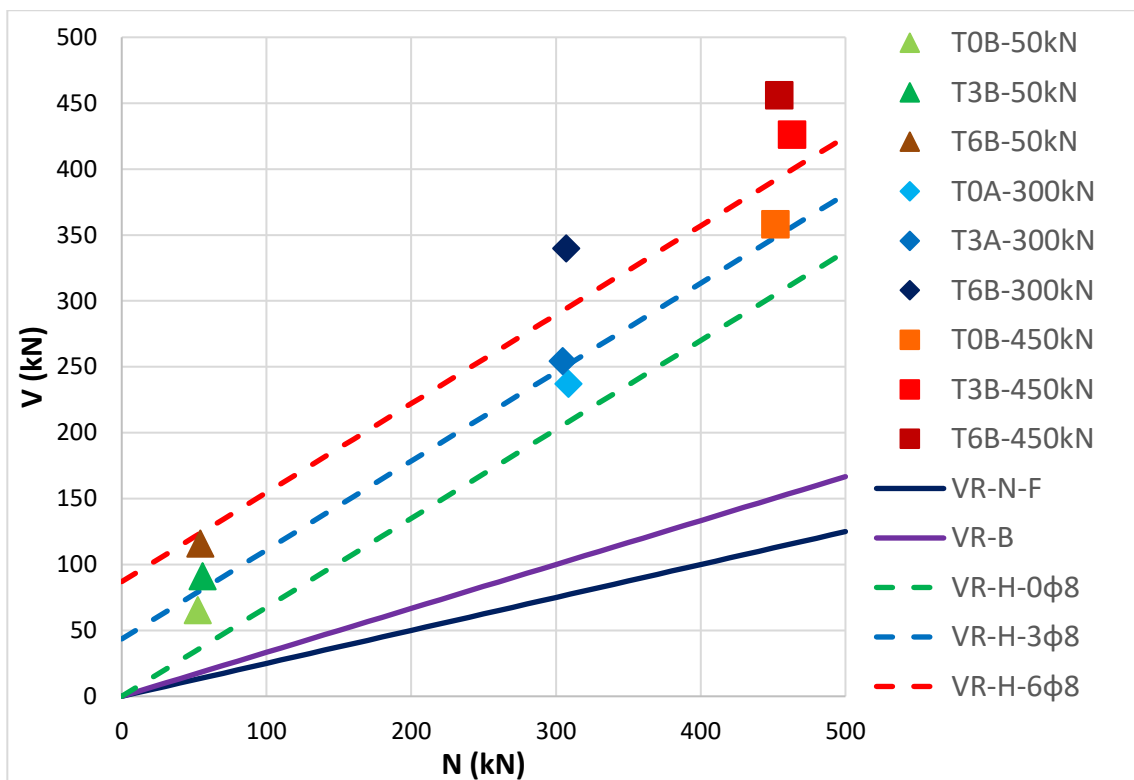
zodpovedný za 60-80 % celkovej šmykovej odolnosti. Táto odolnosť ocele je dosiahnutá až pri vysokých poklzoch v trhline (2-5mm), kedy dochádza k porušeniu betónového rozhrania. Účinok trecej sily je aj v tom prípade stále prítomný, aj keď dôjde k poklesu súčiniteľa trenia z dôvodu prítomnosti veľkého množstva voľných častíc v rozhraní.

Tabuľka 8.2: Šmyková odolnosť podľa existujúcich modelov

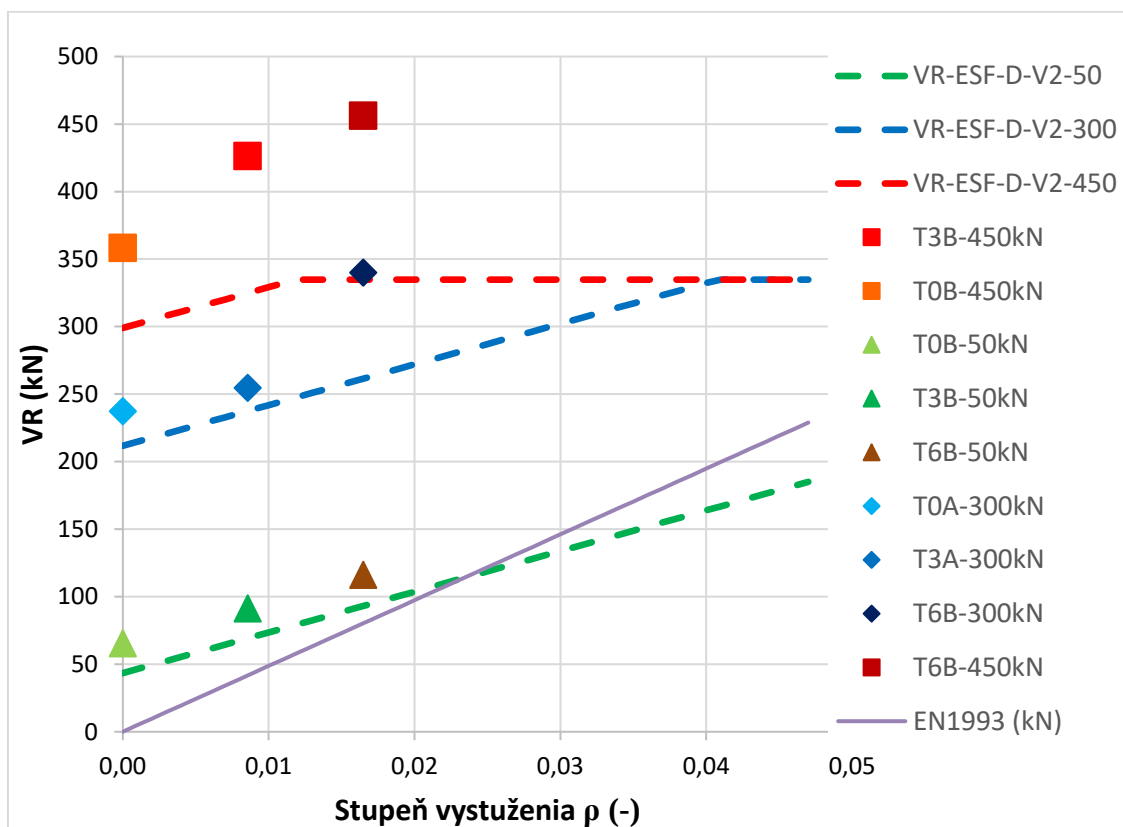
Výpočtový postup	Označenie	Vystuženie	Šmyková odolnosť
Nemecký model – F. Leonhard Holandský model – NEN 6723:1995 Švédsky model -BVVVT Bro '08	$V_{R,N}$	ak: $V \geq 0,125N$	$V_R = 0,25N$
Britský model – BE 5/75	$V_{R,B}$	NIE	$V_R = 1/3 N$
Francúzsky model - BAEL 91 modifiées 99	$V_{R,F}$	NIE	$V_R = 0,25N$
Model podľa M. Herzoga	$V_{R,H}$	NEUPRAVUJE	$V_R = \left(\frac{3}{4} - a\right) N + \frac{f_y A_s}{\sqrt{3}}$
ESF - krehké	ESF-B-V2	$\tau_{Rd} = c_a \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$	
ESF - duktilné	ESF-D-V2	$\tau_{Ru} = \tau_{R,zaklinenie} + \mu \cdot (\sigma_n + \kappa_1 \cdot \rho \cdot f_y) + \kappa_2 \cdot \rho \cdot \sqrt{f_{c,cube} \cdot f_y}$ $\leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$	
EN 1993-1	EN 1993-1	$V_{Pl,Rd} = \frac{A_s (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$	

Tabuľka 8.3: Porovnanie experimentálnej a teoretickej odolnosti vzoriek

Typ. vzorky	$V_{R.test}$ / $V_{R,N}$	$V_{R.test}$ / $V_{R,B}$	$V_{R.test}$ / $V_{R,F}$	$V_{R.test}/V_{R,H}$	$\frac{V_{R.test}}{V_{R-ESF-B-V2}}$	$\frac{V_{R.test}}{V_{R-ESF-D-V2}}$	$\frac{V_{R.test}}{EN\ 1993-1}$
T-0B-50	4,98	3,73	4,98	1,84	1,16	1,49	-
T-3B-50	6,52	4,89	6,52	1,12	-	1,27	2,10
T-6B-50	8,54	6,40	8,54	0,94	-	1,23	1,33
T-0A-300	3,07	2,30	3,07	1,14	1,01	1,06	-
T-3A-300	3,47	2,60	3,47	1,05	-	1,03	5,85
T-6B-300	4,43	3,32	4,43	1,15	-	1,25	3,91
T-0B-450	3,17	2,38	3,17	1,17	1,07	1,11	-
T-3B-450	3,68	2,76	3,68	1,20	-	1,21	9,80
T-6B-450	4,01	3,01	4,01	1,16	-	1,30	5,24



Obr. 8.1: Porovnanie teoretickej šmykovej odolnosti existujúcich modelov s experimentálnymi odolnosťami



Obr. 8.2: Porovnanie teoretickej šmykovej odolnosti podľa MC2010-ESF s experimentálnymi hodnotami

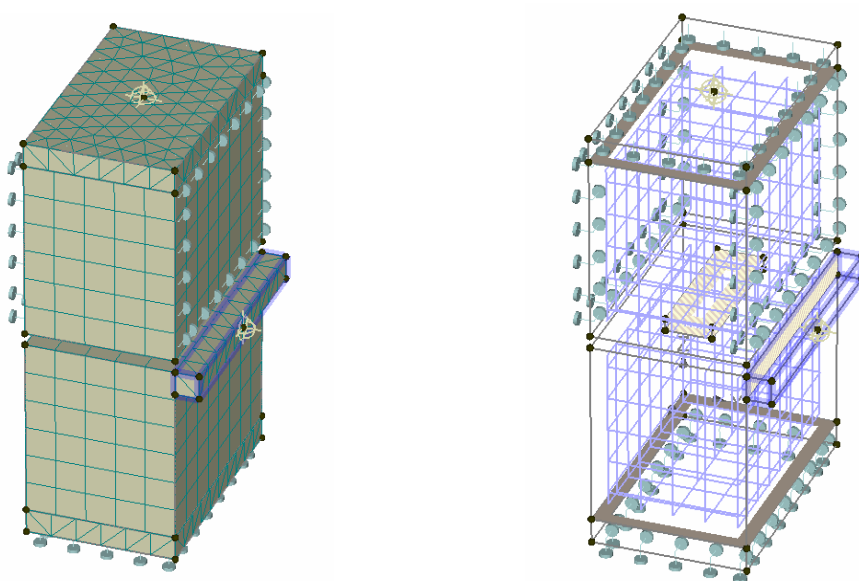
9. NUMERICKÁ ANALÝZA

9.1. Nelineárna numerická analýza (Atena)

Pre nelineárnu numerickú analýzu bol vybraný konečno-prvkový program Atena – Atena 3D v.5.6.1.17830, ktorý umožňuje použiť materiálové modely prispôbené na analýzu železobetónových konštrukcií. Pomocou programu Atena 3D je možné jednoduché vytvorenie 3D modelu betónového prvku vrátane výstuže.

9.2. Tvorba 3D modelu

Súbor programov Atena ponúka niekoľko modelov na vytvorenie numerického 3D modelu. Pre potreby danej analýzy bol zvolený modul Atena Engineering, kde bola podľa skutočných rozmerov vymodelovaná celá vzorka vrátane pomocných ocelových platní. Pre betónové prvky boli zvolené konečné prvky typu „Brick“ a pre pomocné ocelové platne boli použité tetrahedrálne konečné prvky. Veľkosť konečných prvkov bola vhodne zvolená a z optimalizovaná počas analýzy. Okrajové podmienky boli zvolené tak, aby čo najpresnejšie simulovali ukotvenie vzorky do zostavy. Tuhosť zostavy nebola v rámci okrajových podmienok zohľadnená, lebo ju nebolo možné spoľahlivo určiť. V mieste ukotvenia vzorky boli namodelované ocelové platne hrúbky 40 mm, vytvorené z izotropického, elastického materiálu (CC3DElastIsotropic), s umelo navýšeným modulom pružnosti 2100 GPa. Na simulovanie vzájomného pôsobenia platne a betónového povrchu vzorky boli použité kontaktné elementy – GAP tak aby bol umožnený prenos len tlakového zaťaženia. Betonárska výstuž bola zadaná v podobe 1D prvku s bilineárnym pracovným diagramom a úplnou súdržnosťou. Na vzorke bolo sledované vnášané zaťaženie a deformácia kĺbu v priečnom smere pomocou vhodne umiestnených monitorovacích bodov. Zaťaženie bolo vnášané cez ocelové pomocné platne v podobe kontrolovanej deformácii. Program Atena používa kumulatívny spôsob zaťažovania. V prvých krokoch bola vnášaná normálová sila rýchlosťou 10kN/1krok, až kým nebola dosiahnutá požadovaná hodnota. Následne bola vnášaná priečna deformácia rýchlosťou 0,01mm/1krok v prvých 20 krokoch a následne 0,02mm/1krok v posledných 40 krokoch. Ako riešič bol použitý štandardný Newton-Raphson.



Obr. 9.1: 3D model vrubového kĺbu v programe Atena 3D

9.3. Vstupné parametre modelu.

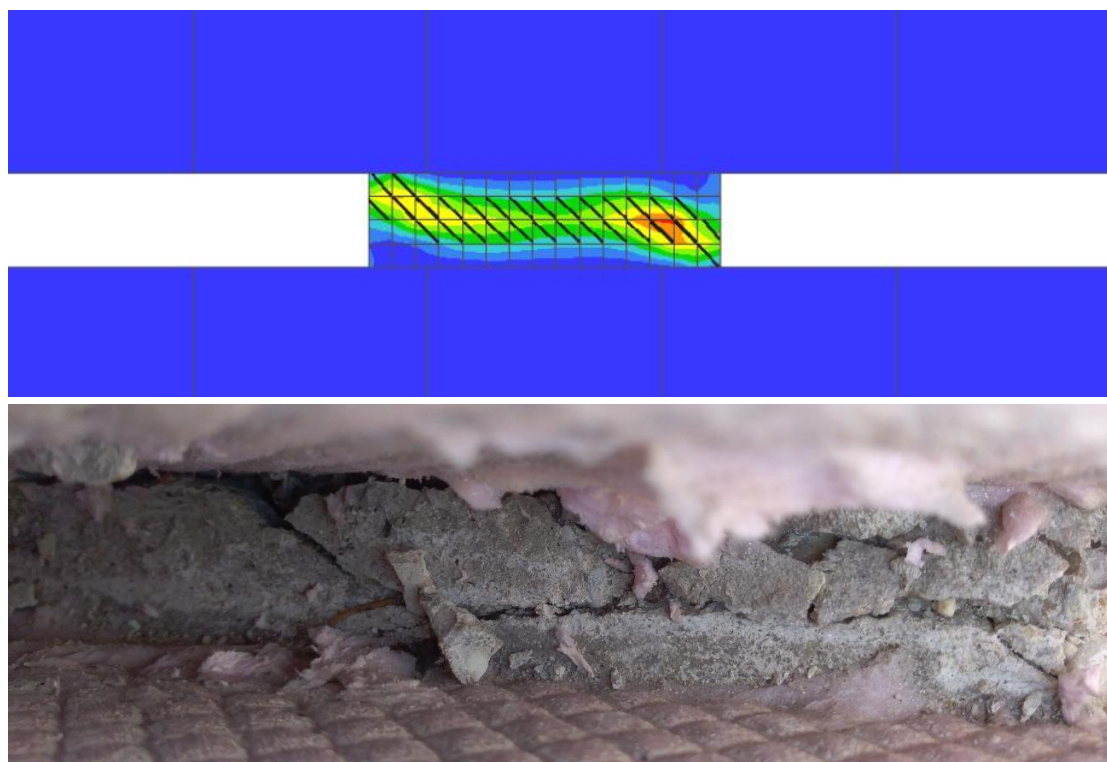
Ako materiálový model pre betón je odporúčaný, lomovo plastický model CC3DNonLinCementitious2. Kde tlačaná oblasť je definovaná plasticitou a ťahaná oblasť lomovou mechanikou. Vlastnosť tohto modelu závisí od nastavenia 14 parametrov. Alternatívou k tomu modelu je materiál CC3DNonLinCementitious3. Tento materiálový model je pokročilejšou verziou materiálu CC3DNonLinCementitious2, ktorý má zvýšenú deformačnú kapacitu betónu pri triaxiálnej napätosti. Vstupné parametre sú podobné, pričom je tu možné zadať pomer medzi tri axiálnou a mono-axiálnou pevnosťou v tlaku λ_t . teoretické pozadie týchto modelov je podrobne popísané v [9].

Tabuľka 9.1: Vybrané vstupné materiálové parametre výpočtu

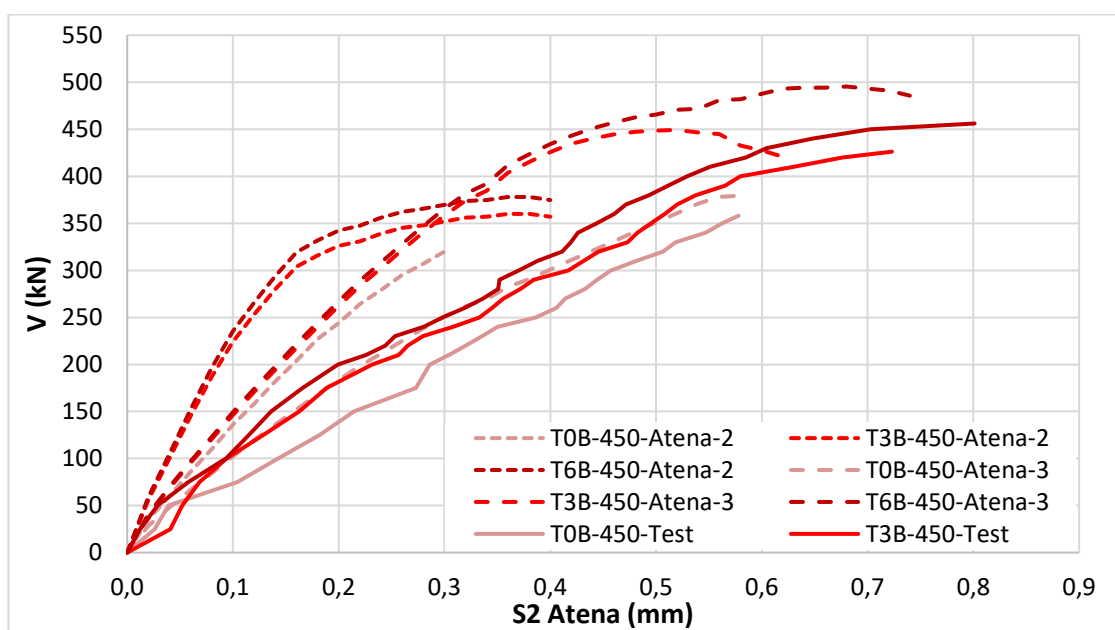
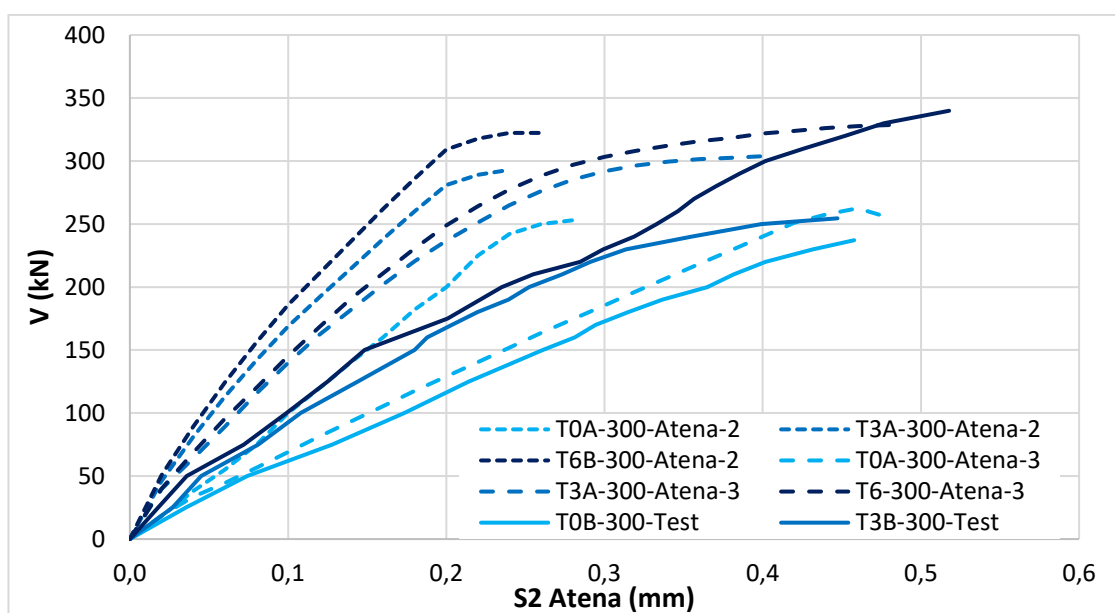
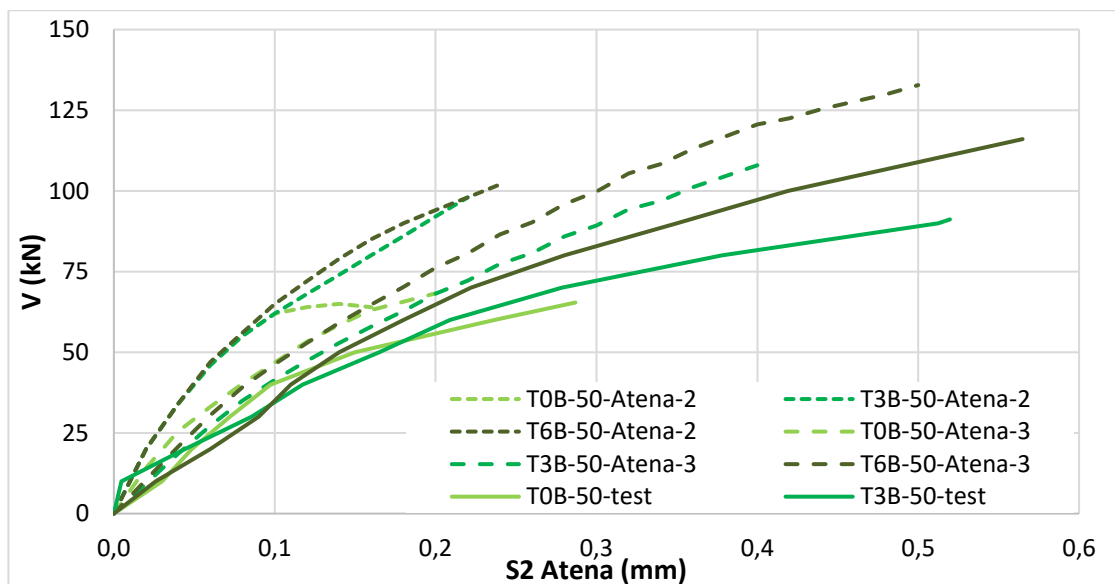
Modul pružnosti	E	32500	35300	MPa
Poissonovo číslo	ν	0,2	0,2	-
Pevnosť v tlaku	f_c	31,875	33,464	MPa
Pevnosť v ťahu	f_t	2,9		MPa
Lomová energia	G_f	147		J/m ²
Maximálna veľkosť zrna kameniva	a_g	8	16	mm
Pomer medzi mono a tri-axiálnou pevnosťou betónu	λ_t	2		-
Rotácia šmykovej trhliny	<i>Fixed</i>	1		-

9.4. Trhliny

Program Atena umožňuje zobrazit' aj priebeh a orientáciu trhlín v konečných prvkoch. Pri výpočte bol použitý koeficient fixácie trhliny rovný 1. Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené trhliny so zobrazením ich orientácie.



Obr. 9.2: Šmyková trhlina: výpočet – experiment



Obr. 9.3: Priebehy nameraných a vypočítaných deformácií

10. ZÁVERY, VEDECKÝ PRÍNOS A ODPORÚČANIA PRE PRAX

Predmetom dizertačnej práce je šmyková odolnosť vrubových kĺbov, konkrétne líniových kĺbov zaťažených normálovým a šmykovým zaťažením.

Napriek tomu, že je dnes vo svete niekoľko predpisov pre návrh vrubových kĺbov je venovaná ich šmykovej odolnosti minimálna pozornosť. Posúdenia šmykovej odolnosti tohto typu konštrukcie nie sú po väčšine založené na overenom fyzikálnom modeli, alebo vychádzajú zo zlých predpokladov správania sa konštrukcie.

V úvode je popísaná história a súčasný stav problematiky. Ďalej sú prezentované existujúce modely pre návrh vrubových kĺbov vrátane vybraných normových vzťahov pre návrh a dimenzovanie prútových prvkov na šmyk. Na opis jednotlivých mechanizmov, ktoré sa podieľajú na prenose šmykového zaťaženia na šmykovom rozhraní betón-betón je použitá rozšírená teória šmykového trenia. Dnes neexistuje žiadny platný výpočtový postup pre stanovenie šmykovej odolnosti vrubových kĺbov, ktorý by bol založený na fungujúcom fyzikálnom modeli. Zároveň žiadny výskum tohto typu aktuálne vo svete neprebíha.

Cieľom navrhnutého a zrealizovaného experimentálneho programu bolo overiť platnosť existujúcich modelov pre návrh a posúdenie šmykovej odolnosti vrubových kĺbov. Zároveň bola preskúmaná aplikovateľnosť normových vzťahov pre návrh prútových prvkov pre tento typ konštrukcie, pričom v neposlednom rade bola overená aplikovateľnosť teórie šmykového trenia pri riešení tohto problému. Výsledky skúšok z podobných experimentov aplikovateľných pre tento typ konštrukcie sa nepodarilo nájsť preto sú závery vyvedené len na základe dát získaných z môjho experimentálneho programu.

Vedecký prínos

1. Porovnanie experimentálnych odolností s teoretickými odolnosťami podľa existujúcich modelov pre návrh vrubových kĺbov ukázal, že vypočítaná odolnosť podľa týchto vzťahov výrazne podhodnocuje odolnosť skúšaných vzoriek a to približne 3-4 násobne. Rovnako tieto modely nezohľadňujú žiadnym spôsobom parametre rozhrania ani vystuženie kĺbu, kde tvorí výnimku model M. Herzoga.
2. Overenie aplikovateľnosti normových vzťahov na posudzovanie prútových prvkov podľa STN EN 1992-1-1, STN EN 1993-1 a Model Code 2010 ukázalo, že tieto vzťahy nie sú aplikovateľné pre posudzovanie šmykovej odolnosti z dôvodu podhodnocovania nameranej odolnosti a to 5-10 násobne.
3. Porovnanie experimentálnych výsledkov zo vzťahmi z Model Code 2010 založenými na rozšírenej teórii šmykového trenia (ESF), ukázali dobrú zhodu s nameranými odolnosťami, pričom túto odolnosť podhodnocujú približne 2-násobne. Výpočtové vzťahy založené na tejto teórii umožňujú zohľadniť charakter porušenia, spôsob zaťažovania a viaceré materiálové a geometrické parametre klzného rozhrania.
4. Bola navrhnutá úprava vstupných výpočtových parametrov s ohľadom na tri-axiálnu napätosť v hrdle a charakter porušenia zistený u experimentálnych vzoriek. Navrhovaná úprava spočívala v zvýšení tlakovej pevnosti a úprave sklonov tlakových diagonál. Výsledkom bol nárast výpočtovej odolnosti u normových vzťahov spomenutých v bode 3 a následné priblíženie nameraných a teoretických hodnôt odolností. U výpočtových vzťahov založených na ESF klesol rozdiel medzi teoretickou a experimentálnou odolnosťou približne na 10-30%.
5. Rozšírenie poznatkov a databázy výsledkov v oblasti navrhovania vrubových kĺbov a v oblasti ESF pre porušenie tlačných prierezov pri tri-axiálnej napätosti.

Odporúčanie pre prax

1. Na základe analýzy experimentálnych dát je možné odporučiť používanie návrhových vzťahov založených na ESF pre výpočet šmykovej odolnosti vrubových kĺbov za použitia triaxiálnej pevnosti betónu v kombinácii s návrhovým modelom podľa Leonhardta pre návrh geometrie.
2. Pre vrubové kĺby bez výstuže sa neodporúča uvažovať s príspevkom adhézie k šmykovej odolnosti pokiaľ je v hrdle kĺbu pripustený vznik ohybovej trhliny.
3. Plastickú odolnosť oceľového prierezu podľa STN EN 1993-1 sa odporúča používať len v prípade, že sa pri návrhu uvažuje s ťahovým namáhaním po celom priereze hrdla kĺbu. V prípade, že nie je nutné vylúčenie spolupôsobenia betónu na prenose šmykových síl, odporúča sa navrhovať kĺby s nízkym stupňom vystuženia.

Odporúčania na ďalší výskum

V ďalšom výskume odporúčam pokračovať v rozširovaní databázy výsledkov pre viacej typov geometrií a stupňov vystuženia. Odporúčam odskúšanie vrubových kĺbov pri vyšších hodnotách osových síl s kontrolou pootočenia, šírky šmykovej trhliny a s kontrolou pretvorenia výstuže a betónu v hrdle kĺbu. Druhou možnosťou je ďalší výskum zamerať na únavovú odolnosť vrubových kĺbov pri ohybovom alebo šmykovom namáhaní.

11. POUŽITÁ LITERATÚRA (VÝBER Z LITERATÚRY)

- [1] STN EN 1992-1-1 Navrhovanie betónových konštrukcií. *Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*. Júl 2006
- [2] HARVAN, I. - *Železobetónové nosné sústavy. Navrhovanie podľa európskych noriem*. Bratislava: STU v Bratislave 2010, s 292.
- [3] BIRKLE – *Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout*. Calgary, Alberta, March 2004
- [4] ZSUTTY, T. – *Beam shear strength prediction by analysis of existing data*. ACI Journal V. 65(11): 1968, s 943-951.
- [5] HEGGER, J., SIBURG, C., KUERES, P. – *Proposal for punching shear design of flat slabs and column bases based on Eurocode 2*, RWTH Aachen University, German, Presentation from CEN TC250/SC2/WG1/TG4 meeting in Copenhagen 28.-29.January 2016
- [6] BAZANT, Z.P., CAO, Z. – *Size effect in punching shear failure of slabs*, ACI Structural Journal, Vol. 84, Jan-Feb 1987, pp 44-53
- [7] ETA - 13/0151 European Technical Approval, May 2013
- [8] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib) *Model Code 2010 – Final draft*, Vol. 2, *fédération internationale du béton*, Bulletin 65, Lausanne, Switzerland, April 2012
- [9] MUTTONI, A., Ruiz, F. – *Provisions for shear and punching shear, 8th draft*, Presentation from CEN/TC250/SC2/WG1/TG4 meeting in Amsterdam, 24. March 2017
- [10] HEGGER, J., SIBURG, C., KUERES, P. – *Proposal for punching shear design of flat slabs and column bases based on Eurocode 2*, RWTH Aachen University, German, Presentation from CEN TC250/SC2/WG1/TG4 meeting in Copenhagen 28.-29.January 2016
- [11] LIPS, S., – *Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement*, Thèse, École polytechnique fédérale de lausanne, Suisse 2012.
- [12] EINPAUL, J., BUJNAK, J., RUIZ, F. M., MUTTONI, A. – *Study on Influence of Column Size and Slab Slenderness on Punching Strength*, ACI Structural Journal, Vol. 113, USA, 2006, 135-145 pp.
- [13] SIBURG, C., HEGGER, J. H., – *Punching of flat slabs – comparison of models*, fib Symposium Prague, Czech Republic, 2011, 151-154 pp.

12. PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

- ADF01 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. Navrhovanie vrubových kĺbov podľa EC 2. In *Inžinierske stavby*. Roč. 67, č. 4 (2019), s. 56-58. ISSN 1335-0846.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. Applicability of commercial software for bridge design with consideration of seismic loading effects. In *24th Concrete Days 2017 : International Conference Concrete Days 2017. Litomyšl, Czech Republic, November 22 – 23, 2017*. 1. vyd. Pfaffikon, Switzerland : Trans Tech Publications, 2018, S. 313-318. ISBN 978-3-0357-1284-1. V databáze: SCOPUS:2-s2.0-85043584766;DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.313.
- AFC02 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. Modeling of interaction between the bridge girder and piers with the use of commercial software. In *25th Concrete Days 2018 : International Conference. November 21 and 22, 2018, Prague, Czech Republic*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 128-133. ISSN 1012-0394. V databáze: SCOPUS:2-s2.0.085071122465
- AFC03 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. The effect of bridge deck placement on conceptual design of bridges. In *Proceedings of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures [elektronický zdroj] : Madrid, Spain, September 26-28, 2019*. 1. vyd. Lausanne : Fédération internationale du béton, 2019, online, s. 121-127. ISSN 2617-4820. ISBN 978-2-940643-02-8. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85073165173.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július - BILČÍK, Juraj. Sanácia nádrže bioplynovej stanice v Horovciach. In *Sanácia betónových konštrukcií : zborník príspevkov z 10. seminára. Smolenice, SR, 7. - 8. 12. 2017*. Bratislava : IRIS, 2017, S. 131-136. ISBN 978-80-8200-014-9.
- AFD02 HAVLÍČEK, Peter. Modelovanie interakcie medzi mostovkou a pilierom pri uvažovaní seizmických účinkov v komerčne dostupných MKP softwéroch. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 302-307. ISBN 978-80-227-4751-6.
- AFD03 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. Porovnanie dimenzačných postupov pre návrh vrubových kĺbov. In *Betonárske dni 2018 : zborník príspevkov. Bratislava, SR, 8. - 9. 11. 2018*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, S. 239-244. ISBN 978-80-227-4852-0.
- AFD04 HAVLÍČEK, Peter. Experimentálne stanovenie šmykovej odolnosti vrubového kĺbu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th 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 24th 2018, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 285-290. ISBN 978-80-227-4864-3.

- AFD05 HAVLÍČEK, Peter - PAULÍK, Peter - HRUŠTINEC, Ľuboš - GAŠPÁREK, Jakub. Diagnostika a návrh sanácie Ožďanského tunela. In *Sanácia betónových konštrukcií : zborník príspevkov z 11. seminára. Smolenice, SR, 5. - 6. 12. 2019*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, S. 49-54. ISBN 978-80-227-4973-2.
- AFD06 PAULÍK, Peter - ŠEVČÍK, Patrik - HAVLÍČEK, Peter. Poznatky z diagnostiky viac ako 30 ročných predpätých mostov v Bratislave. In *Sanácia betónových konštrukcií : zborník príspevkov z 10. seminára. Smolenice, SR, 7. - 8. 12. 2017*. Bratislava : IRIS, 2017, S. 41-48. ISBN 978-80-8200-014-9.
- AFD07 PAULÍK, Peter - GAŠPÁREK, Jakub - HAVLÍČEK, Peter. Poznatky z diagnostiky železničných mostov na tratiach Rimavská Sobota - Poltár a Piešťany - Vrbové. In *Sanácia betónových konštrukcií : zborník príspevkov z 11. seminára. Smolenice, SR, 5. - 6. 12. 2019*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, S. 67-73. ISBN 978-80-227-4973-2.
- AFD08 ŠOLTÉSZ, Július - SIVOK, Vladimír - IGNAČÁK, Miroslav - PRITULA, Andrej - SZÖCS, Štefan - KESELI, Ondrej - MATIAŠKOVÁ, Lýdia - HAVLÍČEK, Peter - HRUŠTINEC, Ľuboš. Autobusová stanica v Banskej Bystrici. In *Betón na Slovensku 2014-2018 : zborník prednášok z konferencie SNK fib. Žilina, SR, 17. - 18. máj 2018*. 1. vyd. Bratislava : Slovenský národný komitét fib, 2018, S. 431-438. ISBN 978-80-8200-019-4.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

- BDF01 PAULÍK, Peter - RUBINT, Jakub - ŠEVČÍK, Patrik - HAVLÍČEK, Peter. Poznatky z diagnostiky porúch predpätých mostov z 80-tych rokov v Bratislave. In *Buildustry [elektronický zdroj]*. Roč. 2, č. 1 (2018), CD-ROM, s. 36-38. ISSN 2454-0382.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch

- BEE01 HAVLÍČEK, Peter - ŠOLTÉSZ, Július. Návrh vrubových klbov podľa Leonhardta. In *26. Betonárske dny 2019 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků konference. Hradec Králové, ČR, 20. a 21. listopadu 2019*. 1. vyd. Praha : Česká betonářská společnost ČSSI, 2019, USB klúč, [6] s. ISBN 978-80-907611-2-4.