

### SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Jaroslav Baran

#### Autoreferát dizertačnej práce

Vplyv osovej sily na šmykovú odolnosť betónových nosníkov

Na získanie akademického titulu "philosophiae doctor", v skratke "PhD".

V doktorandskom študijnom programe: D-TKeIS4 teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

V študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

**Miesto a dátum:** V Bratislave, 2025



#### Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladatel':	Ing. Jaroslav Baran
	Katedra betónových konštrukcií a mostov
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava

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

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa.....o....o.....o......h na Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave na adrese Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

#### ABSTRAKT

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou šmykovej odolnosti predpätých nosníkov s dôrazom na vplyv osovej sily. Cieľom práce bolo analyzovať pôsobenie nosníkov s rôznym stupňom vystuženia šmykovou výstužou a rôznym stupňom predpätia prierezu. K dosiahnutiu cieľov bol vedený experimentálny program pozostávajúci z 12 vzoriek. Vypracované boli nelineárne analýzy experimentálnych vzoriek na dvojici MKP modelov doplnené o dvojicu parametrických štúdií. V rámci numerickej časti dizertačnej práce boli overované aktuálne návrhové modely pre predikciu šmykovej odolnosti podľa prvej a druhej generácie Eurokódu 2 a Model Code 2020, pričom ich spoľahlivosť bola porovnávaná s výsledkami experimentov. Výsledky dizertačnej práce poukazujú na priamy vplyv predpätia prierezu na jeho šmykovú odolnosť a na obmedzenia modelových predikcií šmykovej odolnosti najmä pri nízkej úrovni vystuženia šmykovou výstužou.

#### THE INFLUENCE OF AXIAL FORCE ON THE SHEAR RESISTANCE OF CONCRETE BEAMS

#### ABSTRACT

The dissertation thesis addresses the issue of shear resistance in prestressed concrete beams, with an emphasis on the influence of axial force. The aim of the study was to analyse the behaviour of beams with varying ratio of shear reinforcement and different levels of prestressing. To achieve these goals, an experimental program consisting of 12 samples was carried out. Nonlinear analyses of the experimental samples were performed on two finite element models, complemented by two parametric studies. Within the numerical part of the thesis included an assessment of current design models for predicting shear resistance according to the first and second generation of Eurocode 2 and the Model Code 2020. The reliability of these models was compared with the experimental results. The findings of the dissertation demonstrate a direct influence of prestressing on the shear resistance of the cross-section and highlight the limitations of design approaches, especially in cases with low levels of shear reinforcement.

## E S T U

### 1. ÚVOD

Šmykové porušenie betónových prvkov je jednou z najkomplexnejších úloh v oblasti stanovenia odolnosti betónových konštrukcií. Na rozdiel od porušení v ohybe alebo v tlaku, ktoré sú pomerne dobre popísané a predvídateľné, šmykové porušenia sú zložité, často náhle a môžu mať rôzne formy. Dôvodom je prítomnosť viacerých spolupôsobiacich mechanizmov prenosu síl, ktoré sa na šmykovej odolnosti prierezu podieľajú v rôznej miere v závislosti od geometrie, vystuženia, typu zaťaženia a existencie osovej sily.

V súčasnosti platné normy ako Eurokód 2 či Model Code 2020 sa snažia zohľadniť vplyv týchto mechanizmov rôznymi výpočtovými modelmi, avšak žiadny z nich nedokáže úplne pokryť vplyv kombinácie predpätia a šmykového namáhania. Tento nedostatok má priamy dopad na návrh nových a posúdenie existujúcich betónových konštrukcií a mostov.

Motiváciou pre túto prácu bol aj zhoršujúci sa stav cestných mostov na území Slovenskej republiky (Obr. 2.1.1) [1]. So zhoršujúcim sa stavom konštrukcií prichádza aj zvýšený dopyt na posúdenie ich zaťažiteľnosti a rovnako aj požiadavka na presnejšie pochopenie mechanizmov podieľajúcich sa na odolnosti takýchto konštrukcií.



2003-2023 [1]

# EEE STU

Na zaťažiteľnosť mostov okrem ich stavebno-technického stavu vplýva aj legislatíva. Od 60. rokov 20. storočia došlo k niekoľkým zásadným zmenám v koncepcii návrhov, čo sa prejavilo nielen vo zvýšených intenzitách zaťažení, ale rovnako aj v prístupoch stanovenia odolnosti železobetónových konštrukcií ako takých. Tieto zmeny poukazujú na to, že rovnaký nosný prvok môže byť podľa rôznych noriem posúdený ako bezpečný alebo nevyhovujúci. To zdôrazňuje potrebu hlbšieho pochopenia základných mechanizmov.

Práca sa opiera o publikácie popredných výskumných tímov, ktoré dlhé roky podrobne skúmajú mechanizmy šmykovej odolnosti betónových prvkov. Zároveň reflektuje aktuálny vývoj v oblasti predpätých betónových prvkov, ktoré vďaka svojej efektivite dominujú v mostnom staviteľstve. Cieľom práce je preskúmať, do akej miery ovplyvňuje osová sila šmykovú odolnosť betónových prvkov za pomoci nelineárnych analýz, numerických výpočtov a experimentálneho programu s uvážením rôznych úrovní predpätia.

Praktický význam tejto práce spočíva v stanovení spoľahlivostí aktuálnych výpočtových modelov, doplneniu databázy experimentálnych výsledkov o predpäté prvky so súdržnou predpínacou výstužou. Výsledky práce môžu pomôcť optimalizovať návrh nových konštrukcií, ale aj lepšie vyhodnotiť zostatkovú životnosť a únosnosť existujúcich mostov.

Práca je rozdelená do kapitol, ktoré pokrývajú vývoj výpočtových modelov, návrhovú prax na Slovensku, experimentálny výskum, numerickú analýzu a diskusiu výsledkov. Každá z týchto častí má za cieľ postupne budovať komplexný obraz o skúmanej problematike a poskytnúť relevantné závery pre inžiniersku prax.

### 2. VÝPOČTOVÉ MODELY ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI

### **2.1.** *ÚVOD DO VÝPOČTOVÝCH MODELOV*

V úvodnej kapitole dizertačnej práce je predstavený vývoj výpočtových prístupov na stanovovanie šmykovej odolnosti železobetónových nosníkov. Pojednáva o tom, ako výskumníci z celého sveta uvažovali nad prenosom vnútorných síl v priereze, ako objavovali nové komponenty podieľajúce sa na šmykovej odolnosti a ako sa vysporiadali s účinkami predpätia prierezu. V kapitole sa samostatne venujem vývoju prístupov pre šmykovú odolnosť bez šmykovej výstuže na ktorú plynule nadväzuje šmyková odolnosť nosníkov so šmykovou výstužou a plynule prechádza k predstaveniu výpočtových výrazov, ktoré používame aj v aktuálnych prístupoch.

# E S T U

### 2.2. KOMPONENTY PRENOSU ŠMYKOVÝCH SÍL

V nosníkoch so šmykovou výstužou alebo bez šmykovej výstuže musí vždy platiť rovnováha vnútorných a vonkajších síl. Všeobecné komponenty prenosu šmykových síl vyskytujúce sa v priereze počas šmykového namáhania sú zobrazené na Obr. 2.2.1. Kvantifikácia jednotlivých komponentov je stále predmetom diskusie a skúmania. Jednotlivé zložky sú nasledovné:

- V<sub>cc</sub> klenbový efekt alebo pôsobenie tlakovej vzpery pri stenových alebo predpätých nosníkoch,
- *V*<sub>sy</sub> ťahové sily v šmykovej výstuži
- *V*<sub>cs</sub> šmykové napätia v neporušenej tlakovej zóne,
- *V*<sub>CPZ</sub> ťahové napätia v zóne vzniku trhlín,
- *V*<sub>ai</sub> šmykové napätia prenášané zaklinením zŕn kameniva a trením povrchov v trhline,

*V*<sub>dw</sub> - dowel efekt - hmoždinkový efekt pozdĺžnej výstuže.



Obr. 2.2.1 Komponenty prenosu šmykových síl [2]

Priame pôsobenie vzpery  $V_{cc}$  sa zvyčajne prejavuje pri stenových alebo predpätých nosníkoch. Prvok, kde nedochádza k spolupôsobeniu betonárskej výstuže a betónového prierezu nemožno podľa teórie Euler-Bernoulli považovať za nosník, pretože dochádza k výraznému poklzu výstuže. Takýto prvok funguje ako jednoduchá vzpera, kde neexistuje žiadne šmykové namáhanie ale iba osové sily. Za šmykovú silu v tomto prípade možno považovať vertikálnu zložku vzpery, ale nie v zmysle teórie mechaniky nosníka. Priame pôsobenie vzpery však môže výrazne prispievať k redukcii šmykovej sily, ktorej prierez nosníka musí odolávať. V prípade šikmých trhlín, dodatočné šmykové sily v nosníku sú prenášané pomocou šmykovej výstuže, čo predstavuje príspevok  $V_{sy}$ . Prvé dva komponenty podieľajúce na prenose šmykových síl boli všeobecne známe, ale ako sa nakoniec ukázalo, na pochopenie zlyhania nosníkov bez šmykovej výstuže bolo nutné hľadať ďalšie

komponenty. Od začiatku sa predpokladalo, že tlaková zóna bude mať významný vplyv pri prenose šmykových síl. V dôsledku ohybových deformácii prierezu sa časti na oboch stranách diagonálnej trhliny musia otáčať voči sebe navzájom, a tým aktivizujú hmoždinkový efekt  $V_{dw}$  v pozdĺžnej výstuži [3]. Tento základný mechanizmus Obr. 2.2.2 predstavil Mörsch [4] už začiatkom 20. storočia.



Obr. 2.2.2 Pôsobenie tlakovej zóny a hmoždinkového efektu v dôsledku šikmej trhliny [4]

Neskôr, Kani [5] navrhol, že sa betónové zuby Obr. 2.2.3 nemôžu voľne otáčať, a existuje dodatočný odpor zaklinenia kameniva na rozhraniach trhlín.



*Obr. 2.2.3 Tvar trhlín a komponenty podieľajúce sa na šmykovej odolnosti podľa Kaniho [5]* 

Zavedenie komponentu  $V_{CPZ}$  z reziduálnych ťahových napätí na vrchole trhliny bolo založené na lomovej mechanike pre kvázi krehké materiály [6], ktorej model je uvedený na Obr. 2.2.4. Na základe toho, bolo možné určiť dĺžku, na ktorej by bol betón schopný prenášať ťahové napätia po vzniku šmykovej trhliny. V prípade šikmých trhlín majú tieto sily za následok vznik ďalšieho z komponentov, a to dodatočné vertikálne pôsobenie ťahového napätia v zóne vzniku trhlín  $V_{CPZ}$ . Zatiaľ čo je toto pôsobenie výrazné pri nižších prvkoch, pri výšších prvkoch toto pôsobenie stráca svoj vplyv vzhľadom na väčšiu šírku trhlín. Toto zníženie príspevku v zóne vzniku trhliny môže byť prisúdené size efektu – vplyvu rozmerov, ktorému sa vo svojej dizertačnej práci venoval Zink [7].



Obr. 2.2.4 Model šmykovej odolnosti na základe lomovej mechaniky [6]

Všeobecným komponentom podieľajúcim sa na prenose šmykového namáhania v priereze je možné ľahko porozumieť. Problematické je ale stanovenie miery prerozdelenia vnútorných síl na jednotlivé komponenty, pričom sa tento problém ešte viac komplikuje s meniacim sa pomerom prerozdelenia v závislosti od úrovne zaťaženia. Všeobecne však platí, že mechanický model, ktorý by mal správne zohľadniť prerozdelenie šmykových síl na jednotlivé komponenty, bude vyžadovať iteračný proces. Iteračný proces vystihne vzájomnú závislosť vonkajších síl, prierezových síl a deformácií prierezu. V praxi by však iteračné výpočty zaberali príliš veľa času a preto je nevyhnuté hľadať čo najpresnejší návrhový model, ktorý aj bez potreby iterácií, zohľadňuje správanie predpätých alebo železobetónových nosníkov so šmykovou výstužou alebo bez nej.

## 3. AKTUÁLNY STAV PROBLEMATIKY ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI PREDPÄTÝCH NOSNÍKOV

### 3.1. VÝSKUM PREDPÄTÝCH PRVKOV

Významný výskum v problematike šmykovej odolnosti predpätých prvkov sa vedie v Nemecku na Univerzite v Aachene pod vedením profesora Heggera. Kde v dlhšom časovom horizonte skúmajú správanie predpätých nosníkov [8] [9] [10]. Ďalší rozsiahly výskum na Európskom kontinente viedli Lorenzo Franceschini a Beatrice Belletti na Talianskej univerzite v Parme. Problematike sa tiež venuje Jarrod Zaborac a Jongkwon Choi na Univerzite v Austine v USA, kde realizovali výskum v spolupráci s Hongik Univerzity

v Soule v Južnej Kórei. Venovali sa experimentálnemu výskumu, ale tiež disponujú rozsiahlou databázou rôznych typov predpätých nosníkov. Vďaka rozsiahlej databáze vyvíjajú AASHTO ( American Association of Highway and Transportation Officials) metódu s názvom LRFDD (Load factor Resistance Design) pre presnejšie stanovenie šmykovej kapacity predpätých prvkov pomocou neurónových sietí [11]. Porovnanie aktuálnych prístupov pre stanovenie šmykovej odolnosti predpätých nosníkov spracoval v publikácii [12] Hong-Gun Park, Soonpil Kang, Kyoung-Kyu Choi. V parametrickej štúdii spracovali americkú normu ACI 318-08, európsku normu Eurocode 2, model podľa Sozen, Bažant and Cao a tiež Wolf-a and Frosch-a.

### 4. AKTUÁLNE VÝPOČTOVÉ MODELY

Nasledujúca kapitola sa venuje vybraným výpočtovým modelom, ktoré sú najčastejšie používané pre stanovenie šmykovej odolnosti. V kapitole sa uvádzajú modely pre prvky bez šmykovej výstuže ale aj so šmykovou výstužou.

### 4.1. EUROKÓD 2 (2004) - EC2 (2004)

Aktuálne platná norma na území Slovenska STN EN 1992-1-1 pre navrhovanie betónových konštrukcií. Rozdeľuje posúdenie šmykovej odolnosti na prvky nevyžadujúce návrh šmykovej výstuže a prvky vyžadujúce návrh šmykovej výstuže.

### 4.2. EUROKÓD 2 (2023) - EC2 (2023)

Nedávno bol dokončený vývoj novej druhej generácie Eurokódu 2, ktorý prináša významné zmeny v posudzovaní šmykovej odolnosti prierezov.

#### 4.3. MODEL CODE 2020

Je návrhový postup vydávaný Európskou komisiou pre betón *fib* venujúcou sa vývoju a výskumu betónových konštrukcií. Vývoj návrhových prístupov Model Code je úzko spojený s vývojom európskych technických noriem EC. Preto tieto prístupy majú mnoho spoločných znakov aj v návrhu šmykovej odolnosti. Avšak, za hlavnú odlišnosť medzi nimi pokladám prístup Model Code k návrhu šmykovej odolnosti v úrovniach aproximácie výpočtu. Model Code ponúka 3 úrovne aproximácie na základe potrebnej presnosti výpočtu, zo zvyšujúcou

sa úrovňou aproximácie je možne dosiahnuť presnejšie výsledky. Je to však, sprevádzané zložitejšími výpočtami a početnejšími potrebnými vstupmi.

Prvá úroveň aproximácia je odvodená zo všeobecnej aproximácie druhej úrovne a nemala by sa používať na porovnávanie s výsledkami experimentálnych skúšok na kontrolu presnosti modelu, pokiaľ experimenty neboli navrhnuté tak, aby súčasne došlo k zlyhaniu v ohybe aj šmyku.

## 5. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavné ciele dizertačnej práce sú:

- výskum vplyvu rôznych úrovní osovej sily na šmykovú odolnosť predpätých prvkov,
- výskum spoľahlivosti existujúcich, aktuálnych návrhových postupov pre stanovenie šmykovej odolnosti prvkov,
- rozšírenie databázy experimentálnych výsledkov získaných experimentálnou činnosťou,
- parametrická štúdia vplyvu osovej sily na šmykovú odolnosť predpätých betónových prvkov vypracovaná pomocou nelineárneho MKP modelu kalibrovaného podľa experimentu.

## 6. METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

### 6.1. TEORETICKÁ ANALÝZA

Teoretická analýza sa zaoberala rešeršou aktuálnych publikácii v danej téme. Skúmala pokroky a výskum jednotlivých výskumných tímov vo svete zaoberajúcich sa podobnou problematikou. Sústredila sa hlavne na rôzne formy experimentov ale aj vývoj modelov pre predikciu šmykovej odolnosti, z ktorých bolo možné čerpať poznatky do ďalšieho postupu experimentálneho výskumu.

Z pohľadu problematiky posudzovania existujúcich cestných mostných konštrukcií sa teoretická analýza zamerala aj na historický vývoj návrhových postupov a zaťažovacích modelov cestných mostov používaných na území Slovenska. Vplyv osovej sily na šmykovú ale aj ohybovú odolnosť predpätých konštrukcií je v súčasnosti veľmi aktuálna téma najmä z pohľadu posudzovania existujúcich betónových mostov, ktoré sú mnohé na konci svojej návrhovej životnosti.

### 6.2. NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerickú analýzu možno rozdeliť na dve časti. Prvá časť sa venuje stanoveniu šmykovej odolnosti na základe aktuálnych návrhových modelov uvádzaných v kapitole 4 a následne stanoveniu ich spoľahlivosti v porovnaní s experimentálnymi výsledkami. Druhá časť numerickej analýzy sa venuje tvorbe nelineárnych MKP modelov experimentálne skúšaných nosníkov. Cieľom je vytvorenie nelineárneho MKP modelu, ktorý bude vykazovať konzistentnosť vo výsledkoch v porovnaní s experimentom a bude možné ho následne využiť pri parametrickej štúdii vplyvu rôznych premenných. Skúmanými parametrami sú stupeň vystuženia šmykovou výstužou a úroveň predpätia prvku.

### 6.3. EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

V rámci experimentálneho programu bolo navrhnuté experimentálne skúšanie šestice vopred predpätých železobetónových nosníkov, na ktorých bolo vykonaných 12 zaťažovacích skúšok do porušenia šmykom. Experimentálne skúšanie bolo zamerané na skúmanie vplyvu rôzneho stupňa vystuženia šmykovou výstužou a rôznej úrovne predpätia prvku na jeho šmykovú odolnosť. Do experimentálneho programu je nutné zahrnúť, okrem samotného skúšania šmykovej odolnosti predpätých nosníkov, aj samotnú výrobu týchto nosníkov, výrobu betónových vzoriek pre materiálové skúšky, laboratórne skúšky mechanických vlastností použitých betónov, betonárskej výstuže a predpínacích lán ale aj návrh a prípravu skúšobnej zostavy v laboratóriu a nakoniec vyhodnocovanie a práca z dátami získanými experimentálnymi meraniami. Experimentálny program možno považovať za kľúčovú časť dizertačnej práce.

### 7. EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

Experimentálny program dizertačnej práce bol navrhnutý s cieľom skúmania vplyvu osovej sily tak, aby obsahoval dostatočný počet vzoriek, na ktorých bolo možné vykonať potrebný počet skúšok šmykovej odolnosti. Obsahoval spolu šesticu vopred predpätých nosníkov. Priečny rez nosníkov je tvaru I a tvorí ho forma typizovaného vopred predpätého nosníka pre cestné mosty DPS VP I/10 12 m. Typizovaný nosník výšky 600 mm sa používa pre maximálne výrobné dĺžky 12 m. Pre účely experimentálneho programu zameraného na šmykové namáhanie bola dĺžka upravená na 7,2 m. Statická schéma počas experimentu bola

navrhnutá tak, aby bolo možné na každom nosníku vykonať dvojicu skúšok. Pred samotnou výrobou vzoriek boli vykonané predbežné výpočty šmykovej a ohybovej odolnosti vzoriek. Na základe výsledkov predbežných výpočtov odolnosti bolo upravené typizované vystuženie pozdĺžnou výstužou, aby bolo dosiahnuté žiadané šmykové zlyhanie pred ohybovým pre všetky vzorky.

Experimentálny program mal dve etapy. V prvej etape bola vyrobená a odskúšaná dvojica nosníkov s aplikovaním najvyššej úrovne (100 %) predpätia. Jeden nosník mal stupeň vystuženia šmykovou výstužou  $\rho_{sw} = 0,477$  % a druhý nosník mal stupeň vystuženia šmykovou výstužou  $\rho_{sw} = 0,105$  %, čo predstavovalo hodnotu blízku minimálnemu stupňu vystuženia šmykovou výstužou. Spolu bola v prvej etape vykonaná štvorica experimentálnych skúšok. Keďže sa jednalo o vzorky s najvyššou odolnosťou, táto etapa nám slúžila aj na overenie predpokladaného zlyhania vzoriek a tiež na funkčnosť navrhnutej experimentálnej zostavy. Druhá etapa experimentálneho programu obsahovala štvoricu nosníkov, kde na dvoch nosníkoch bolo aplikované predpätie 50 % a na ďalších dvoch 5 % predpätie. Každá dvojica nosníkov s rovnakou úrovňou predpätia obsahovala nosník so stupňom vystuženia šmykovou výstužou  $\rho_{sw} = 0,105$  % a  $\rho_{sw} = 0,477$  %. Všetky experimentálne skúšky skončili šmykovým zlyhaním vzorky.

### 7.1. EXPERIMENTÁLNE NOSNÍKY

Pri výrobe nosníkov sa podarilo nadviazať spoluprácu so spoločnosťou Doprastav. Bol zvolený tvar foriem pre vopred predpäté mostné nosníky vyrábané na dlhých dráhach, ktorými spoločnosť disponovala.

#### 7.1.1. Geometria

Tvar nosníka je znázornený na Obr. 7.1.1.



*Obr. 7.1.1 Priečny rez (vľavo) a 3D pohľad na navrhnutý predpätý nosník (vpravo) VP – DPS 600* 

#### 7.1.2. Vystuženie

Vystuženie vzorky tvorila betonárska výstuž vo forme pozdĺžnej výstuže a strmeňov a predpínacia výstuž vo forme predpínacích súdržných 7-drôtových lán. Stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou  $\rho_1$  bol 3,13 %, vrátane predpínacej výstuže, podľa vzťahu (7.1.1):

$$\rho_{\rm l} = \frac{A_{pdolna} + A_{sdolna}}{b_w \cdot d} = 3,13 \%$$
(7.1.1)

Schéma vystuženia je uvedená na Obr. 7.1.2. Podrobné výkresy výstuže sú uvedené v prílohe č.3.



Obr. 7.1.2 Schéma vystuženia experimentálnej vzorky: priečny rez, pohľad, 3D model

#### 7.1.3. Statická schéma

Statická schéma uvedená na Obr. 7.1.3 pre experimentálne skúšky bola navrhnutá tak, aby bolo možné nosníky podrobiť dvojici experimentálnych skúšok na šmykovú odolnosť. Prvá skúška bola vykonana na jednom konci nosníka a následne bola vykonaná druhá skúška na opačnom konci nosníka po modifikácii podpier a polohy pôsobiaceho zaťaženia.



Obr. 7.1.3 Statická schéma pri prvej a druhej zaťažovacej skúške nosníka

#### 7.1.4. Označenie vzoriek

Pre opis nosníkov v ďalších častiach práce bolo navrhnuté označovanie vzoriek v závislosti od stupňa vystuženia šmykovou výstužou, úrovne vneseného predpätia, ale aj poriadia skúšania odolnosti na nosníku, keďže na každom nosníku bola prevedená dvojica experimentálnych skúšok. Podrobné značenie vzoriek je uvedené v tabuľke Tab. 7.1.1 Tabuľka, vysvetlenie značenia vzoriek je uvedené na nasledujúcej schéme:





# EEE STU

		Označ	enie vzoriek			
Označenie	Etapa exp. programu	Stupeň vystuženia ρ <sub>sw</sub>	Priemer strmeňa a rozteč	Poradie skúšania	Úroveň predpätia	Predpínacie napätie
			[mm]		[%]	[MPa]
N 1.1. 100 %	1	0,477 %	Φ8/125	1	100 %	1300 MPa
N 1.2. 100 %	1	0,477 %	$\Phi 8/125$	2	100 %	1300 MPa
N 2.1. 100 %	1	0,105 %	Φ6/300	1	100 %	1300 MPa
N 2.2. 100%	1	0,105 %	$\Phi 6/300$	2	100 %	1300 MPa
N 1.1. 50 %	2	0,477 %	Φ8/125	1	50 %	750 MPa
N 1.2. 50 %	2	0,477 %	$\Phi 8/125$	2	50 %	750 MPa
N 2.1. 50 %	2	0,105 %	$\Phi 6/300$	1	50 %	750 MPa
N 2.2. 50%	2	0,105 %	$\Phi 6/300$	2	50 %	750 MPa
N 1.1. 5 %	2	0,477 %	Φ8/125	1	5 %	75 MPa
N 1.2. 5 %	2	0,477 %	$\Phi 8/125$	2	5 %	75 MPa
N 2.1. 5 %	2	0,105 %	$\Phi 6/300$	1	5 %	75 MPa
N 2.2. 5 %	2	0,105 %	$\Phi 6/300$	2	5 %	75 MPa

Tab. 7.1.1 Tabuľka označenia experimentálnych vzoriek

### 7.2. SKÚŠOBNÁ ZOSTAVA

#### 7.2.1. Opis

Hlavnou časťou experimentálnej zostavy bol oceľový rám, do ktorého sa uložila experimentálna vzorka predpätého nosníka a podoprela na oceľové podpery. Oceľový rám bol tvorený štvoricou stĺpov štvoruholníkového prierezu. Pri podlahe boli k stĺpom priskrutkované oceľové U-profily, ktoré boli kotvené k masívnej železobetónovej podlahe pomocou troch kotevných tyčí. V hornej časti boli k stĺpom priskrutkované nosníky obdĺžnikového prierezu. Na nosníky bol zavesený priečny roznášací nosník, ktorý zabezpečil rovnomerný roznos sily z lisu do oceľových nosníkov. Na roznášací nosník bol prikotvený adaptér pre hydraulický lis a silomer. Silomer bol umiestnený medzi hydraulickým lisom a roznášacím nosníkom. Medzi výsuvnú hlavu hydraulického lisu a železobetónový nosník bola na nosník osadená zaoblená oceľová platňa. Na zaoblenú platňu bola uložená rovná oceľová štvorcová platňa. Takéto uloženie umožnilo pootočenie nosníka v mieste vnášania sily do nosníka. Samotný predpätý nosník bol uložený na dvojici podpier, ktoré boli tvorené oceľovými zváranými profilmi potrebnej výšky. Podpery sú pomenované ako podpera P1 a podpera P2. Podpera P1 bola bližšie k pôsobiacej sile

a podpera P2 bola vzdialenejšia podpera od pôsobiacej sily. Na podpere P1 bola osadená oceľová štvorcová platňa, na oceľovú platňu bol osadený silomer. Na silomer bola osadená dvojica platní, ktoré mali medzi sebou vysokopevnostnú oceľovú tyč, ktorá slúžila ako kĺbová podpera umožňujúca posun v smere pozdĺžnej osi nosníka. Podpera P2 bola riešená identicky ako podpera P1, nebol v nej však umiestnený silomer. Tvar skúšobnej zostavy a stručný opis je uvedený na Obr. 7.2.1. Podrobný výkres skúšobnej zostavy je uvedený v prílohe 3.



Obr. 7.2.1 3D schéma skúšobnej zostavy

### 7.3. VÝSLEDKY MERANÍ

V nasledujúcej kapitole sú uvedené vyhodnotenia nameraných veličín počas experimentálneho skúšania nosníkov. Merané boli priehyby nosníka v strede efektívneho rozpätia a pod aplikovanou silou, pomerné pretvorenia prierezu nosníka v oblasti pôsobiacej sily a pretvorenie betónového prierezu v strede dĺžky nosníka, napätia v predpínacích lanách v čase vnášania predpätia ale aj počas zaťažovania a tiež rozvoj šmykových trhlín počas zaťažovania vzorky.

### 7.3.1. Šmykové trhliny

V nasledujúcej kapitole je uvedený rozvoj šmykových trhlín Obr. 7.3.1 na vzorkách počas experimentálneho skúšania. Uvedený je zaťažovací krok, kedy vznikla šmyková trhlina,

zaťažovací krok počas zaťažovania a posledný zachytený zaťažovací krok pred zlyhaním nosníka.

Vzorka N1.1 5% - 400kN, 700kN, 1000kN





Obr. 7.3.1 Rozvoj šmykových trhlín na vzorkách počas zaťažovania – pokračuje na ďalšej strane



Vzorka N2.1 5% - 350kN, 500kN, 650kN



Vzorka N2.2 5% - 300kN, 450kN, 600kN



Vzorka N2.1 50% - 550kN, 650kN, 700kN



Vzorka N2.2 50% - 550kN, 650kN, 750kN



Vzorka N2.1 100% - 600kN, 650kN, 750kN



Vzorka N2.2 100% - 650kN, 750kN, 850kN



Obr. 7.3.1 Rozvoj šmykových trhlín na vzorkách počas zaťažovania

Spracovanie a vyhodnotenie fotografií získaných počas experimentálneho skúšania bolo vypracované v softvéry GOM Correlation pomocou metódy DIC (digital image correlation).

#### 7.3.2. Vyhodnotenie experimentálnych skúšok

Experimentálny program pozostával z 12 experimentálnych vzoriek a pri všetkých skúškach došlo k šmykovému zlyhaniu vzoriek. Počas zaťažovania vzoriek sa sledoval aj rozvoj trhlín na prvku. Experimentálny program rovnako preukázal vplyv predpätia prierezu na jeho šmykovú odolnosť. Pokles šmykovej odolnosti prierezu pri vzorkách s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vzorky N1  $\rho_{sw} = 0,477$ ) bol pri hladine predpätia 50 % na úrovni 4 % a pri hladine predpätia 5 % na úrovni 11 % oproti šmykovej odolnosti nosníka s hladinou predpätia 100 %. Pokles šmykovej odolnosti vzoriek s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vzorky N2  $\rho_{sw} = 0,104$ ) bol pri hladine predpätia 50 % na úrovni 6 % a pri hladine predpätia 5 % až na úrovni 20 % oproti šmykovej odolnosti nosníka s hladinou predpätia 100 %. Vplyv osovej sily na šmykovú odolnosť je výraznejší pre prvky s nižším stupňom vystuženia. Podrobné úbytky šmykovej odolnosti vzoriek sú uvedené v nasledujúce tabuľke (Tab. 7.3.1).

	Porovnanie odolnosti vzoriek						
Označenie	Sila v Lise F	Priemerná sila	Odolnosť	Označenie	Sila v Lise F	Priemerná sila	Odolnosť
	[kN]	[kN]	[%]		[kN]	[kN]	[%]
N1.1 100%	765,5	7 <b>96</b> ,55	100%	N2.1 100%	494,8	530,9	100%
N1.2 100%	827,6		100%	N2.2 100%	567		
N1.1 50%	757,1	760.95	0.69/	N2.1 50%	495,3	501	0.497
N1.2 50%	764,6	/00,85	90%	N2.2 50%	506,7	501	94%
N1.1 5%	726,3	700.1	000/	N2.1 5%	440,7	426,5	000/
N1.2 5%	691,9	709,1	89%	N2.2 5%	412,3		80%

Tab. 7.3.1 Porovnanie odolnosti experimentálnych vzoriek

V tabuľkách (Tab. 7.3.2) (Tab. 7.3.3) sú uvedené všeobecné informácie o vzorke a namerané hodnoty počas experimentálneho skúšania. Na grafoch (Obr. 7.3.2), (Obr. 7.3.3) sú znázornené priebehy deformácii vzorky vplyvom aplikovanej sily a šmykové odolnosti vzoriek. Priebeh deformácie vzorky je upravený o vplyv sadnutia podpier.



	Vyhodnotenie odolnosti vzoriek N1							
Etapa	Označenie	Predpätie	Šmyková výstuž ρw=0,477	Pevnosť betónu v tlaku fcm	Sila v lise F	Sila v lise F priemer	Sila v podpere R	Priemer. sila v podpere Vtest
		[%]		[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E1	N1.1 100% N1.2 100%	100% 100%	φ8/125mm φ8/125mm	53,1	1200,3 1302,5	1251,4	765,50 827,60	796,6
E2	N1.1 50% N1.2 50%	50% 50%	φ8/125mm φ8/125mm	12.6	1115,7 1152,6	1134,2	757,10 764,60	760,9
E2	N1.1 5% N1.2 5%	5% 5%	φ8/125mm φ8/125mm	43,0	1086,4 1050,9	1068,7	726,30 691,90	709,1



*Obr. 7.3.2 Priebeh deformácie vplyvom aplikovanej sily F (hore) a maximálna dosiahnutá sila v podpere V (dole) na jednotlivých vzorkách N1.* 



	Vyhodnotenie odolnosti vzoriek N2							
Etapa	Označenie	Predpätie	Šmyková výstuž ρw=0,104	Pevnosť betónu v tlaku f cm	Sila v lise F	Sila v lise F priemer	Sila v podpere <i>R</i>	Priemer. sila v podpere Vtest
		[%]		[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E1	N2.1 100% N2.2 100%	100% 100%	6/300 6/300	53,1	761,9 856,9	809,4	494,80 567,00	530,9
E2	N2.1 50% N2.2 50%	50% 50%	6/300 6/300	12.6	749,4 776,4	762,9	495,30 506,70	501,0
E2	N2.1 5% N2.2 5%	5% 5%	6/300 6/300	45,0	675,3 623,8	649,6	440,70 412,30	426,5



*Obr. 7.3.3 Priebeh deformácie vplyvom aplikovanej sily F (hore) a maximálna dosiahnutá sila v podpere V (dole) na jednotlivých vzorkách N2.* 

# EEE STU

### 8. PREDIKCIA ODOLNOSTI VZORIEK

### 8.1. ODOLNOSŤ VZORIEK PODĽA VYBRANÝCH VÝPOČTOVÝCH MODELOV

Pomocou dostupných výpočtových modelov uvedených v kapitole 4 boli vypočítané odolnosti skúšaných vzoriek. Parciálne súčinitele spoľahlivosti ys alebo yc boli uvažované s hodnotou 1,0. Ťahová pevnosť strmeňov bola vo výpočtoch uvažovaná s hodnotami medze klzu fy získanými laboratórnymi skúškami betonárskej ocele. V porovnávaní šmykových modelov podľa Eurokódu 2 (2004) boli počítané odolnosti V<sub>R</sub> dvoma prístupmi. Spôsobom a), pre prvky bez šmykovej výstuže a spôsobom b), pre prvky so šmykovou výstužou. Rovnako aj odolnosti podľa Eurokódu 2 (2023) boli počítané odolnosti dvoma spôsobmi a to  $V_{\rm R,c}$  spôsobom c) a spôsobom d) pre  $V_{\rm R,c}$ . Vzor výpočtu odolností podľa jednotlivých prístupov je uvedený v prílohe 1. V Tabuľkách sú jednotlivé odolnosti označené nasledovne:  $V_{\rm R,s}$  je šmyková odolnosť strmeňov,  $V_{\rm R,c}$  je šmyková odolnosť betónového prierezu pokiaľ s ním model uvažuje, V<sub>R</sub> je celková šmyková odolnosť - uvažuje sa pri modely podľa Model Code 2020 ako súčet  $V_{R,s}$  a  $V_{R,c}$ ,  $V_{Rmax}$  je maximálna šmyková odolnosť prvku,  $V_{model}$  je výsledná šmyková odolnosť podľa príslušného modelu, Vtest je priemerná šmyková odolnosť vzorky vypočítaná ako priemer šmykových odolností dvojice experimentálnych výsledkov s pripočítaním reakcie od vlastnej tiaže, V<sub>test</sub>/V<sub>model</sub> je spoľahlivosť príslušného modelu. Výsledky sú pre prehľadnosť farebne roztriedené, kde experimentálne výsledky sú označené sivou farbou, výsledky podľa Model Code 2020 sú označené zelenou farbou, výsledky podľa Eurokódu 2 1. generácie sú označené oranžovou farbou a výsledky podľa Eurokódu 2 2. generácie sú označené modrou farbou. Poloha rozhodujúceho rezu je znázornená na Obr. 8.1.1.



Obr. 8.1.1 Poloha rozhodujúceho rezu pre posúdenie šmykovej odolnosti

# EEE STU

#### 8.1.1. Vyhodnotenie výpočtových modelov

Analýza dostupných výpočtových modelov zobrazuje ucelený pohľad na spoľahlivosť jednotlivých modelov v porovnaní s výsledkami získanými experimentálnym skúšaním pozostávajúceho z 12 experimentálnych vzoriek. Z prezentovaných výsledkov je možné zhodnotiť, že modely vykazujú lepšiu spoľahlivosť pokiaľ sa jedná o prvok s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vzorky N1 s  $\rho_w=0,477$ ) až na model EC2 (2023)d, ale ten je určený predovšetkým pre prvky bez šmykovej výstuže. Pokiaľ je však stupeň vystuženia šmykovou výstužou blízky minimálnemu stupňu vystuženia (vzorky N2 s  $\rho_w=0,104$ ) spoľahlivosť modelov klesá. Spoľahlivosti modelov sú zobrazené na nasledujúcich grafoch, pre jednotlivé vzorky (Obr. 8.1.2) a pre spoľahlivosť naprieč všetkými vzorkami (Obr. 8.1.3).



Obr. 8.1.2 Spoľahlivosť výpočtových modelov pre vzorky N1 a N2 samostatne



#### Obr. 8.1.3 Celková priemerná spoľahlivosť výpočtových modelov naprieč vzorkami

Ako model s najlepšou presnosťou možno označiť prístup podľa Model Code 2020 s II aproximáciou verzia b (MC20 IIb V<sub>R,s</sub>), ktorého presnosť naprieč všetkými vzorkami je 1,53. Druhá aproximácia Model Code 2020 však vyžaduje iteračný proces a citlivé používanie skúseným užívateľom. Prístup podľa Eurokódu 2 (EC2 2004 V<sub>R,s</sub>) dosiahol priemernú spoľahlivosť naprieč všetkými vzorkami 2,24.

Všeobecne však platí, že prístupy stanovujúce šmykovú odolnosť prvkov so šmykovou výstužou mali lepšiu presnosť pri prvkoch s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou v porovnaní s presnosťou pri prvkoch s nižším stupňom vystuženia šmykovou výstužou.

Zaujímavosťou je, že modely stanovujúce šmykovú odolnosť prvkov bez šmykovej výstuže (MC20  $V_{R,c}$ , EC2 2004  $V_{R,c}$ , EC2 2023  $V_{R,c}$ ) poskytujú pri prvkoch s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou presnejšie výsledky v porovnaní s prístupmi pre prvky so šmykovou výstužou (MC20 I  $V_{R,s}$ , EC2 2004  $V_{Rs}$ , EC2 2023  $V_{R,s}$ ), aj keď vzorky N2 boli vystužené stupňom vystuženia šmykovou výstužou výstužené stupňom vystuženia šmykovou výstužou výstužené stupňom vystuženia šmykovou výstužou výstužou

Ako model s najlepšou presnosťou pre vzorky s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou vzorky (N1 s  $\rho_w=0,477$ ) možno uviesť model podľa Model Code 2020 s II. aproximáciou prístup a) (MC20 IIa V<sub>R,s</sub>) so spoľahlivosťou 1,29.

Ako model s najlepšou presnosťou pre vzorky s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vzorky N2 s  $\rho_w=0,104$ ) možno uviesť model podľa Model Code 2020 s II. aproximáciou prístup b) (MC20 IIb V<sub>R,s</sub>) so spoľahlivosťou 1,64.

### 8.2. NELINEÁRNA ANALÝZA MKP MODELU – ATENA

#### 8.2.1. Opis

Súčasťou skúmania vplyvu osovej sily na šmykovú odolnosť nosníkov bola aj tvorba spoľahlivého nelineárneho MKP modelu, ktorý by slúžil na vypracovanie parametrickej štúdie. Pre tvorbu takéhoto modelu bol zvolený software Atena GiD 15.0.3 a analýzy boli spracované v softvéry Atena Studio 5.9.2. Pre nelineárnu analýzu bol použitý modul výpočtový modul Creep, nakoľko modul Static vykazoval vysokú tuhosť modelu v porovnaní s experimentálnymi výsledkami.

### 8.2.2. Opis MKP Modelu

Jedná sa o 3D MKP model celého nosníka (Obr. 8.2.1) s diskrétne modelovanou betonárskou výstužou a s diskrétne modelovanou predpínacou výstužou (Obr. 8.2.2). Poloha a tvar výstuže je v súlade s výkresmi výstuže podľa Prílohy č.3. Statická schéma je uvažovaná ako prostý nosník. Podopretie je modelované prostredníctvom oceľových platní rozmerov 400 x 200 x 30 mm s vysokým modulom pružnosti pre zabránenie ich lokálnej deformácii. Okrajová podmienka podpery bližšej k aplikovanému zaťaženiu je modelovaná vo forme líniovej kĺbovej podpery zachytávajúcej zvislý a vodorovný posun. Okrajová podmienka vzdialenejšej podpery je modelovaná vo forme líniovej kĺbovej posuvnej podpery zachytávajúcej len zvislý posun. Zaťaženie je aplikované prostredníctvom oceľovej platne rozmerov 400 x 200 x 30 mm s vysokým modulom pružnosti pre zabránenie jej lokálnej deformácie. Výpočet je rozdelený do troch intervalov, kde v prvom intervale obsahujúcom jeden krok sa aktivujú podpery, vlastná tiaž a predpätie nosníka. V druhom intervale dochádza v 10 krokoch k simulácii zmrašťovania a dotvarovania vzorky počas 30 dní. A v treťom intervale dochádza k zaťažovaniu vzorky deformáciou v zaťažovacích krokoch po 0,2 mm až do zlyhania vzorky.



Obr. 8.2.1 3D tvar MKP modelu použitého pri nelineárnej analýze v softvéri Atena





Obr. 8.2.2 3D tvar vystuženia v MKP Modely – vzorka N1  $\rho_w$ =0,477 (hore) a vzorka N2  $\rho_w$ =0,103(dole)

#### 8.2.3. Výsledky modelu ATENA

V nasledujúcej kapitole sú zhrnuté výsledky predstaveného nelineárneho MKP modelu vypracovaného v softvéry Atena . Na grafe (Obr. 8.2.3) sú zobrazené maximálne sily F aplikované na nosník a príslušné reakcie V v bližšej podpere vyvolané aplikovanou silou. Na grafe (Obr. 8.2.4) je znázornená závislosť aplikovanej sily, respektíve reakcie V v podpere a úrovňou predpätia vzorky. Na dvojici grafov (Obr. 8.2.5) a (Obr. 8.2.6) je znázornený silovo-deformačný diagram, ktorý zobrazuje správanie vzorky počas zaťažovania – plná čiara, v porovnaní s experimentálne nameranými hodnotami – čiarkovaná čiara. V závere kapitoly sú na obrázkoch uvedené módy zlyhania vzoriek N1 100% a N2 100%, ktoré zobrazujú veľkosť aplikovanej sily F, napätie v strmeňoch a tvar šikmej trhliny tesne pred zlyhaním.



Obr. 8.2.3 Maximálna aplikovaná sila F a príslušná reakcia V v podpere na vzorkách – model ATENA

## EEE STU



*Obr.* 8.2.4 Závislosť aplikovanej sila F a príslušnej reakcie V vzhľadom na predpätie vzorky – model ATENA

Z uvedených grafov je možné zhodnotiť, že odolnosť vzorky klesá s klesajúcou úrovňou predpätia vzorky. Je dôležité pripomenúť, že rozdiel medzi vzorkami so 100% a 50% úrovňou predpätia je z časti zapríčinený aj rozdielnymi materiálovými vlastnosť ami betónu, betonárskej výstuže a predpínacej výstuže. Nakoľko sa vzorky so 100% predpätím vyhotovovali v Etape 1 a vzorky s 50% a 5% predpätím sa vyhotovovali v Etape 2.



*Obr.* 8.2.5 Silovo-deformačný diagram vzorky N1 ρ<sub>w</sub>=0,477 s rôznym stupňom predpätia – model ATENA



*Obr.* 8.2.6 Silovo-deformačný diagram vzorky N2 ρ<sub>w</sub>=0,104 s rôznym stupňom predpätia – model ATENA

### 8.3. PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA S POUŽITÍM MKP MODELOV

Parametrické štúdie sa venovali skúmaniu vplyvu úrovne predpätia vzorky na jej šmykovú odolnosť s použitím nelineárneho MKP modelu ATENA a modelu UPV. Skúmané úrovne predpätia v parametrickej štúdii boli 100%, 75%, 50%, 25% a 5% - Presné hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 8.3.1). Materiálové vlastnosti betónovej časti prierezu, betonárskej a predpínacej výstuže použité v modeloch boli uvažované podľa laboratórnych skúšok vykonaných na vzorkách Etapy 2.

Úroveň predpätia	Predpínacie napätie	Počiatočné pretvorenie
[%]	[MPa]	[-]
100%	1300	0,0063
75%	975	0,0047
50%	650	0,0031
25%	325	0,0016
5%	65	0,0003

Tab. 8.3.1 Hodnoty počiatočného pretvorenia zadané v MKP modeloch parametrickej štúdie

#### 8.3.1. Parametrická štúdia Model ATENA

V modely ATENA sa rovnako uvažovalo s redukciou materiálových vlastností betónového prierezu o 20%, Konkrétne redukciou ťahovej pevnosti betónu a modulu pružnosti betónu.

#### **VZORKA N1** ( $\rho_{\rm w} = 0,477$ )

Na nasledujúcich grafoch (Obr. 8.3.1) a (Obr. 8.3.2) sú zobrazené výsledky parametrickej štúdie pre vzorku N1, ktorej úroveň vystuženia šmykovou výstužou bola  $\rho_w = 0,477$ . Maximálna dosiahnutá sila je označená ako  $F_{AT}$  a k nej príslušná reakcia v podpere  $V_{AT}$ . Index <sub>AT</sub> bol zavedený z dôvodu rozlíšenia výsledkov parametrickej štúdie od výsledkov experimentálnych vzoriek.



Obr. 8.3.1 Maximálna dosiahnutá sila  $F_{AT}$  a príslušná reakcia  $V_{AT}$  v podpere (Vľavo) a závislosť dosiahnutej sily  $F_{AT}$  a príslušnej reakcie  $V_{AT}$  vzhľadom na predpätie vzorky (Vpravo) – Vzorka N1



*Obr. 8.3.2 Silovo-deformačný diagram vzorky N1 ρ*w=0,477 *s rôznym stupňom predpätia – Vzorka N1* 

#### **VZORKA N2** ( $\rho_{\rm w} = 0,104$ )

Na nasledujúcich grafoch (Obr. 8.3.1) a (Obr. 8.3.2) sú zobrazené výsledky parametrickej štúdie pre vzorku N1, ktorej úroveň vystuženia šmykovou výstužou bola  $\rho_w = 0,104$ . Maximálna dosiahnutá sila je označená ako  $F_{AT}$  a k nej príslušná reakcia v podpere  $V_{AT}$ . Index <sub>AT</sub> bol zavedený z dôvodu rozlíšenia výsledkov parametrickej štúdie od výsledkov experimentálnych vzoriek.



Obr. 8.3.3 Maximálna dosiahnutá sila  $F_{AT}$  a príslušná reakcia  $V_{AT}$  v podpere (Vľavo) a závislosť dosiahnutej sily  $F_{AT}$  a príslušnej reakcie  $V_{AT}$  vzhľadom na predpätie vzorky (Vpravo) – Vzorka N2



Obr. 8.3.4 Silovo-deformačný diagram vzorky N2 ρ<sub>w</sub>=0,104 s rôznym stupňom predpätia – Vzorka N2

### 9. ZÁVER

### 9.1. ZHODNOTENIE PRÍNOSOV VÝSKUMU

- Na základe experimentálnych výsledkov je možné konštatovať, že úplná strata predpätia v predpätých prvkoch súčasne vyvoláva aj pokles ich šmykovej odolnosti. Pri prvkoch s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou je pokles šmykovej odolnosti na úrovni 11 % a pri prvkoch s nízkym stupňom šmykovej výstuže je pokles šmykovej odolnosti na úrovni 20 %.
- 2. Na základe numerickej analýzy vybraných predikcií šmykovej odolnosti boli stanovené najpresnejšie modely. Najlepšiu zhodu pre prvky s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou dosahoval model podľa Model Code 2020 II. Aproximácia prístup a) so spoľahlivosťou 1,29. Najlepšiu zhodu pre prvky s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou dosahoval model podľa Model Code 2020 II. Aproximácia prístup b) so spoľahlivosťou 1,64. A celkovo najlepšiu zhodu naprieč všetkými vzorkami vykazuje model podľa Model Code 2020 s druhou aproximáciou verzia b) so spoľahlivosťou 1,53.

Modely stanovujúce šmykovú odolnosť prvkov bez šmykovej výstuže (MC20  $V_{R,c}$ , EC2 2004  $V_{R,c}$ , EC2 2023  $V_{R,c}$ ) poskytujú pri prvkoch s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou (väčším však ako  $\rho_{wmin}$ ) presnejšie výsledky v porovnaní s prístupmi pre prvky so šmykovou výstužou (MC20 I  $V_{R,s}$ , EC2 2004  $V_{R,s}$ , EC2 2023  $V_{R,s}$ ).

- 3. V softvéri Atena bol vytvorený nelineárny MKP model s diskrétnou výstužou, ktorý vykazuje konzistentnosť výsledkov v porovnaní s experimentálnymi výsledkami. Tento model bol použitý pre parametrickú štúdiu šmykovej odolnosti v závislosti od úrovne predpínacej sily. Podľa parametrickej štúdie má osová sila porovnateľný vplyv na šmykovú odolnosť ako preukázalo experimentálne skúšanie.
- 4. Výsledky v nelineárnom modeli UPV s rozptýlenou výstužou preukázali vplyv predpätia len na tuhosť prvku, ale úroveň osovej sily nemá vplyv na šmykovú odolnosť ani pre vyššiu ani pre nižšiu úroveň stupňa vystuženia šmykovou výstužou.
- 5. Výsledky získané experimentálnym programom rozširujú databázu existujúcich experimentálnych výsledkov a poskytujú údaje pre pochopenie pôsobenia

predpätých železobetónových nosníkov s rôznymi stupňami predpätia a rôznymi stupňami vystuženia šmykovou výstužou.

### 9.2. ODPORÚČANIA PRE PRAX

 S príchodom druhej generácie Eurokódu 2 prichádza aj zmena v prístupe výpočtu šmykovej odolnosti betónových prvkov. Úprava prináša hlavne nižšie sklony tlakových diagonál používané pri stanovení šmykovej odolnosti betónových prvkov. Model 2. generácie Eurokódu 2 pre stanovenie šmykovej odolnosti prvkov so šmykovou výstužou (EC2 2023 V<sub>R,s</sub>) dosiahol zhodu s experimentálnymi nosníkmi s vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou so spoľahlivosťou na úrovni 1,3. V prípade prvkov s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou sú výsledky konzervatívne s úrovňou spoľahlivosti 3,18. Priemerná spoľahlivosť modelu pre prvky som šmykovou výstužou naprieč všetkými vzorkami bola 2,24.

### 9.3. ODPORÚČANIE PRE ĎALŠÍ VÝSKUM

- 1. Zamerať sa na výskum šmykovej odolnosti predpätých prvkov s nízkym stupňom vystuženia šmykovou výstužou, ktorý je blízky minimálnemu stupňu vystuženia šmykovou výstužou  $\rho_{w,min.}$
- Rozšírenie experimentálnej kampane o prvky s obdĺžnikovým tvarom priečneho rezu pre skúmanie a odstránenie vplyvu pásnic na šmykovú odolnosť železobetónových a predpätých prvkov.
- 3. Analýza už realizovaných experimentov prostredníctvom MKP modelu Atena pre overenie jeho spoľahlivosti a využitie nelineárneho modelovania pre stanovenie šmykovej odolnosti predpätých prvkov s rôznym tvarom a vystužením, nakoľko experimentálna kampaň je veľmi časovo a finančne náročná obzvlášť pre predpäté prvky.

# E S T U

## 10. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- Slovenská správa ciest, Cestné objekty Tabuľkové prehľady, grafické znázornenia podľa stavebno-technického stavu, Bratislava: Slovenská správa ciest [elektronický zdroj], 2024.
- [2] M. Herbrand, Shear strength models for reinforced and prestressed concrete members, Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2017.
- [3] Taub, J., Neville, A.M., "Resistance to Shear of Reinforced Concrete," ACI Journal Proceedings Vol. 57, pp. 193-220, 1960.
- [4] E. Mörsch, Der Eisenbetonbau Seine Theorie und Anwendung 3. Auflage, Stuttgart: Konrad Wittwer, 1908.
- [5] G. KANI, "The Riddle of Shear Failure and Its Solution," ACI Journal Proceedings Vol. 61, pp. 441-468, 1964.
- [6] P. GUSTAFSSON a A. HILLERBORG, "Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete.," ACI Structural Journal Vol. 85, p. 286–294, 1988.
- [7] M. ZINK, "On the flexural-shear failure of slender members made of normaland high-strength concrete with and without pre-stressing," rev. *PhD thesis*, Leipzig, University of Leipzig, 2000.
- [8] M. Herbrand a J. Hegger, "Experimental Studies on the Shear Capacity of Continuous Prestressed Concrete Beams with External Prestressing," Rotterdam, 2013.
- [9] M. Herbrand, J. Hegger a F. Teworte, "Shear fatigue of prestressed I-beams with shear reinforcement," 2020.
- [10] M. Hillebrand a J. Hegger, "Fatigue Testing of Shear Reinforcement in Prestressed Concrete T-Beams of Bridges," 2020.
- [11] J. Choi, J. Zaborac, Bayrak a O., "Assessment of shear capacity of prestressed concrete members with insufficient web reinforcement using AASHTO LRFD general shear design method," 2021.

[12] H.-G. PARK, S. KANG a K.-K. CHOI, "Analytical model for shear strength of ordinary and prestressed concrete beams,," *Engineering Structures*, zv. Engineering Structures, %1. vyd.Vol. 46, pp. 94-103, 2013.