



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

PROTLAČENÍ DESKOVÝCH KONSTRUKCÍ

PUNCHING SHEAR OF FLAT SLABS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Lyčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., dr. h. c.

BRNO 2019

ABSTRAKT

Užití lokálně podepřených desek ve výstavbě je v nynější době rozšířeno v mnoha zemích díky svým ekonomickým a funkčním výhodám. Přes svůj jednoduchý vzhled, je chování lokálně podepřených desek v ohybu a smyku značně komplexní. Problematika protlačení tudíž patří z hlediska návrhu betonových konstrukcí k těm nejsložitějším.

Za poslední desetiletí došlo ke kolapsu několika budov z důvodu selhání v protlačení, což mělo za následek ztráty lidských životů a značné škody. Tato neštěstí odhalila mezery ve stávajících (nebo tehdy platných) normách a postupech návrhu.

V rámci teoretického zpracování disertační práce byl rozpracován model protlačení pomocí příhradové analogie. K ověření a optimalizaci teoretických vztahů rozpracované metody byla provedena vlastní experimentální studie protlačení na deskách ve zmenšeném měřítku. Rozpracovaná metoda využívá pro případy desky nevyztužené smykovou výztuží výpočet dle normy EC2 a oblast předpokládaného porušení lokálně podepřené desky nahrazuje soustavou vzpěr a táhel.

ABSTRACT

The use of flat slabs in constructions due to its many functional and economic advantages is wide-spread. Behavior of flat slabs in shear and flexure is a fairly complex problem. Therefore, the punching shear failure belongs to one of the most critical aspects in the design of concrete buildings.

Over the last decades several buildings have collapsed due to the failure of the punching shear strength, resulting in loss of lives and financial damages. These disasters revealed gaps in the current (or former) design codes and recommendations.

As a part of theoretical framework of the dissertation a method for predicting the punching shear strength of flat slabs was developed. Several experiments on scaled down slabs were conducted in order to verify the proposed method and for optimization of its parameters. Proposed method in development predicts the punching shear for slabs without shear reinforcement according to the EC2 and replaces the area of the shear crack with a system of struts and ties.

KLÍČOVÁ SLOVA

protlačení, smykové vyztužení, lokálně podepřené desky, smyk

KEYWORDS

punching shear, shear reinforcement, flat slabs, shear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Lukáš Lyčka. *Protlačení deskových konstrukcí*. Brno, 2018. 178 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2019

Ing. Lukáš Lyčka

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl poděkovat mému školiteli, prof. RNDr. Ing. Petru Štěpánkovi, CSc., za odborné vedení mého studia a cenné rady při sestavování disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. a ústavu stavebního zkušebnictví za pomoc při uskutečňování experimentů.

Prezentované výsledky experimentálních studií byly získány za finanční podpory fakultních projektů FAST-J-16-3386 a FAST-J-17-4581.

OBSAH

ABSTRAKT	2
KLÍČOVÁ SLOVA	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
1 ÚVOD	13
1.1 Cíle práce	14
1.2 Struktura textu práce.....	15
2 EXISTUJÍCÍ METODY STANOVENÍ ÚNOSNOSTI V PROTLAČENÍ.....	17
2.1 Úvod k přehledu metod předpovědi únosnosti	17
2.1.1 Metody v aktuálních normách a doporučeních.....	17
2.1.2 Metody založené na příhradové analogii.....	17
2.2 Eurocode 2 (EC2 2004).....	18
2.2.1 Únosnost bez smykové výztuže	18
2.2.2 Únosnost se smykovou výztuží.....	19
2.2.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory.....	20
2.2.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast.....	20
2.3 ACI 318-11	21
2.3.1 Únosnost bez smykové výztuže	21
2.3.2 Únosnost se smykovou výztuží.....	21
2.3.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory.....	22
2.3.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast.....	22
2.4 Model Code 2010 (MC 2010).....	24
2.4.1 Únosnost bez smykové výztuže	24
2.4.2 Únosnost se smykovou výztuží.....	25
2.4.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory.....	26
2.4.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast.....	27

2.5	SIA 262:2013.....	28
2.5.1	Únosnost bez smykové výztuže.....	28
2.5.2	Únosnost se smykovou výztuží.....	29
2.5.3	Únosnost v těsné blízkosti podpory.....	29
2.5.4	Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast.....	30
2.6	Menétrey – analytický model	31
2.6.1	Příspěvek únosnosti betonu.....	32
2.6.1	Příspěvek ohybové (podélné) výztuže desky	33
2.6.2	Příspěvek smykového vyztužení.....	33
2.7	Rizk, Marzouk a Tiller.....	34
2.7.1	Únosnost bez smykové výztuže.....	34
2.7.2	Únosnost se smykovou výztuží.....	36
3	EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM.....	37
3.1	Ohybová výztuž.....	38
3.2	Smyková výztuž	39
3.3	Postup při betonáži	41
3.4	Stanovení materiálových charakteristik betonu.....	43
3.5	Nastavení a průběh zkoušky.....	45
3.6	Umístění měřících přístrojů.....	46
3.6.1	Deformace desky	46
3.6.2	Tlaková napětí v betonu	47
3.6.3	Napětí v ohybové výztuži	48
4	VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU	49
4.1	Výsledky únosnosti pro všechny desky	49
4.2	Naměřené deformace všech desek.....	50
4.3	Naměřené výsledky desky A4	51
4.3.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	51
4.3.2	Průběh napětí ve výztuži	52
4.4	Naměřené výsledky desky A6	53

4.4.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	53
4.4.2	Průběh napětí ve výztuži.....	54
4.5	Naměřené výsledky desky B4.....	55
4.5.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	55
4.5.2	Průběh napětí ve výztuži.....	56
4.6	Naměřené výsledky desky B6.....	57
4.6.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	57
4.6.2	Průběh napětí ve výztuži.....	58
4.7	Naměřené výsledky desky C4.....	59
4.7.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	59
4.7.2	Průběh napětí ve výztuži.....	60
4.8	Naměřené výsledky desky C6.....	61
4.8.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	61
4.8.2	Průběh napětí ve výztuži.....	62
4.9	Fotografie desek po uskutečnění experimentu.....	63
5	VÝPOČET METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ.....	65
5.1	Materiálový model betonu.....	66
5.1.1	Změkčení betonu v tahu (<i>Tension softening</i>).....	67
5.1.2	Chování betonu v tlaku (<i>Compressive behavior</i>).....	68
5.1.3	Účinek příčných trhlin (<i>Lateral Crack effect</i>).....	68
5.2	Vstupní hodnoty materiálů výpočetního modelu.....	69
5.3	Srovnání výsledků desky A4.....	70
5.3.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	70
5.3.2	Maximální průhyby při porušení desky.....	70
5.3.3	Průběh napětí v ocelové výztuži.....	71
5.3.4	Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky.....	71
5.4	Srovnání výsledků desky A6.....	72
5.4.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	72
5.4.2	Maximální průhyby při porušení desky.....	72

5.4.3	Průběh napětí v ocelové výztuži.....	73
5.4.4	Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky	73
5.5	Srovnání výsledků desky B4.....	74
5.5.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	74
5.5.2	Maximální průhyby při porušení desky	74
5.5.3	Průběh napětí v ocelové výztuži.....	75
5.5.4	Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky	75
5.6	Srovnání výsledků desky B6.....	76
5.6.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	76
5.6.2	Maximální průhyby při porušení desky	76
5.6.3	Průběh napětí v ocelové výztuži.....	77
5.6.4	Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky	77
5.7	Srovnání výsledků desky C4.....	78
5.7.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	78
5.7.2	Maximální průhyby při porušení desky	78
5.7.3	Průběh přetvoření ocelové výztuže	79
5.7.4	Průběh přetvoření tlačného v betonu na povrchu desky	79
5.8	Srovnání výsledků desky C6.....	80
5.8.1	Porovnání průběhu zatěžování během testování.....	80
5.8.2	Maximální průhyby při porušení desky	80
5.8.3	Průběh přetvoření ocelové výztuže	81
5.8.4	Průběh přetvoření tlačného v betonu na povrchu desky	81
5.9	Srovnání hodnot výpočtu.....	82
6	NAVRŽENÁ METODA PRO VÝPOČET PROTLAČENÍ.....	83
6.1	Úvod k navržené metodě	83
6.2	Popis navržené metody	84
6.3	Úhel smykové trhliny.....	86
6.4	Napětí betonu na mezi únosnosti.....	86
6.5	Výška tlačné oblasti	87

6.6	Únosnost styčnicku.....	88
6.7	Únosnost vzpěr.....	91
6.8	Únosnost táhla.....	93
6.9	Souhrnný popis	95
7	SROVNÁNÍ METOD NA VÝSLEDČÍCH EXPERIMENTŮ.....	97
7.1	Posouzení dle kategorií bezpečnosti.....	102
7.2	Srovnání metod dle množství vstupních parametrů.....	103
7.3	Srovnání metod dle závislosti na jednom z parametrů.....	104
7.3.1	Efektivní tloušťka desky.....	104
7.3.2	Tvar a rozměry sloupové podpory.....	105
7.3.3	Stupeň vyztužení ohybovou výztuží.....	106
7.3.4	Stupeň vyztužení smykovou výztuží.....	107
7.3.5	Pevnost betonu v tlaku.....	108
7.4	Srovnání metod dle způsobu porušení.....	109
7.4.1	Závislost přesnosti předpovědi na způsobu porušení.....	109
7.4.2	Úspěšnost předpovědi způsobu porušení srovnávaných metod.....	111
7.5	Vliv součinitele maximální únosnosti.....	114
7.5.1	Srovnání vlivu součinitele maximální únosnosti dle rovnice (7.2).....	115
7.5.2	Srovnání vlivu součinitele maximální únosnosti dle rovnice (7.3).....	116
7.5.3	Srovnání Eurokódu a navržené metody bez součinitele maximální únosnosti 117	
7.5.4	Srovnání s experimenty s porušením uvnitř smykového vyztužení.....	118
8	ZÁVĚR.....	121
8.1	Závěry uskutečněné experimentální studie.....	121
8.2	Závěry k navržené metody a jejímu srovnání se stávajícími způsoby výpočtu předpovědi únosnosti v protlačení.....	121
8.3	Doporučení pro další výzkum.....	122
	LITERATURA.....	123
	SEZNAM UŽITÝCH ZKRATEK.....	129

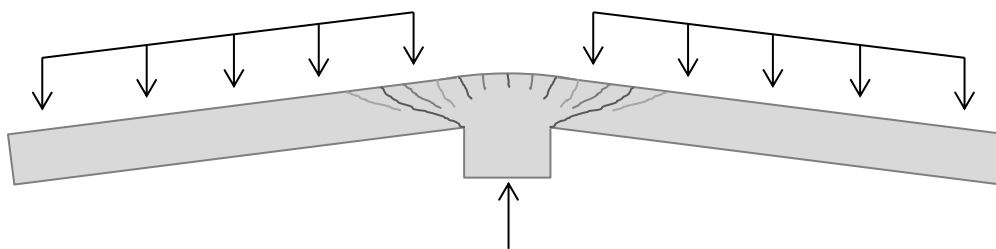
SEZNAM OBRÁZKŮ	133
SEZNAM TABULEK.....	137
PŘÍLOHA A VÝKRESY DESEK A4 A A6.....	139
PŘÍLOHA B VÝKRESY DESEK B4 A B6	143
PŘÍLOHA C VÝKRESY DESEK C4 A C6.....	147
PŘÍLOHA D	151

1 ÚVOD

Železobetonové desky podepřené pouze sloupy se poprvé začaly používat na konci prvního desetiletí dvacátého století [1]. Užití sloupové podpory byly na koncích rozšířeny a jednalo se o tzv. hřibové desky. Desky bez rozšíření na koncích sloupů se začaly používat v průběhu padesátých let a staly se běžnou konstrukcí určenou pro výškové budovy, kanceláře a parkovací prostory. V této době také začalo rozsáhlé experimentální testování chování desek v protlačení [2].

Užití lokálně podepřených desek ve výstavbě je v nynější době rozšířeno v mnoha zemích díky ekonomickým a funkčním výhodám. Přes jednoduchý vzhled, je chování lokálně podepřených desek v ohybu a smyku značně komplexní. Problematika protlačení tudíž patří z hlediska návrhu betonových konstrukcí k těm nejsložitějším [3].

Protlačení rozumíme smykové porušení uvnitř zóny diskontinuit (D-oblasti [4]). Okolo sloupu se vytvoří šikmá trhlinka, která má za následek oddělení kuželové oblasti a selhání desky. Schematicky je tento stav znázorněn na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Protlačení deskových konstrukcí

Za poslední desetiletí došlo ke kolapsu několika budov z důvodu selhání v protlačení, což mělo za následek ztráty na lidských životech a značné škody. Tato neštěstí odhalila mezery ve stávajících (nebo tehdy platných) normách a postupech návrhu. Většina normových předpovědí je založena na výpočtu kritických obvodů, kde protlačení bez smykové výztuže je definováno jako funkce pevnosti betonu v tlaku [2].

Stávající normy a doporučení poskytují poměrně přesné předpovědi únosnosti v protlačení na deskových konstrukcích bez smykové výztuže. V případě desek se smykovou výztuží je však rozptyl přesností předpovědí značně větší a ty mohou vést k nebezpečnému nadhodnocení únosnosti. Správné stanovení únosnosti desky je zvláště důležité v případě navrhování dodatečného vyztužení již existujících konstrukcí novou smykovou výztuží.

Obecně lze metody výpočtu protlačení rozdělit do tří kategorií:

- **Empirické metody**

Za empirické metody je možné považovat většinu platných norem a doporučení pro předpověď únosnosti. Znění těchto metod je založeno převážně na základě pozorování a výsledků uskutečněných experimentů.

- **Analytické metody**

Jsou odvozeny z řady stávajících fyzikálních a mechanických přístupů. Je mezi ně možné řadit metody založené na příhradové analogii (strut-and-tie) nebo také postup výpočtu uvedeném v Model Code 2010, v literatuře označovaném jako fyzikální popřípadě mechanický model.

- **Modely založené na metodě konečných prvků**

Tyto modely představují možnost individuálního řešení předpovědi únosnosti pro atypické případy. Jejich výsledky výrazně závisí na způsobu modelování materiálu betonu a účinků trhlin.

1.1 Cíle práce

Mezi hlavní cíle této disertační práce patří:

- Rozšíření stávající databáze uskutečněných experimentů na protlačení deskových konstrukcí se smykovou výztuží o další výsledky.
- Provedení experimentů na deskách ve zmenšeném měřítku, které by mělo ověřit proveditelnost experimentálního testování a použitelnost takto malých vzorků pro účely ověřování metod předpovědi únosnosti a ke kontrole užitých velikostních faktorů.
- Sestavení numerických modelů provedených testovaných vzorků pomocí nelineární metody konečných prvků k ověření naměřených hodnot získaných z experimentů.
- Hlavním cílem práce je navržení metody výpočtu předpovědi únosnosti v protlačení desek se smykovou výztuží, založené na metodě strut-and-tie. Pro určení rozměrů této náhradní příhradoviny bude metoda využívat iterační postup. Tato metoda by měla úspěšně předpovídat maximální únosnost desek a lépe reprezentovat skutečné chování problematiky. Snahou je dosáhnout menších rozptylů předpovědi a bezpečnějších odhadů únosnosti.

- Sestavení databáze dostupných experimentů z odborné literatury za posledních několik desetiletí. Je kladen důraz převážně na ty experimenty, u kterých došlo k porušení v oblasti vyztužené smykovou výztuží.
- Provedení komplexní analýzy vybraných způsobů výpočtu z norem a doporučení na základě vytvořené databáze experimentů a následné srovnání s navrženou metodou.

1.2 Struktura textu práce

Tuto disertační práci je možné tematicky rozdělit na dvě části: na část experimentální, zahrnující vlastní provedené experimenty, a část teoretickou, týkající se navržené metody výpočtu.

Kapitola 2 obsahuje krátký přehled nejvýznamnějších norem a doporučení týkajících se protlačení desek se smykovou výztuží. Dále se zde nachází popis výpočtu dvou metod předpovědi únosnosti založených na příhradové analogii.

Kapitola 3 se zabývá uskutečněným experimentálním programem na zmenšených vzorcích šesti desek se smykovou výztuží a obsahuje popis výroby a samotného testování desek. Naměřené výsledky z této studie jsou podrobně znázorněny v kapitole 4.

Ověření naměřených výsledků výpočtem metodou konečných prvků je obsaženo v kapitole 5, která popisuje modely desek spočtené v softwaru Midas FEA. Dále je zde provedeno srovnání hodnot získaných softwarem se skutečnými výsledky měření pro každou z testovaných desek.

Kapitola 6 obsahuje hlavní teoretickou část disertační práce: popis navržené metody předpovědi únosnosti. Navržená metoda je založena na modelu příhradové analogie a slouží k výpočtu protlačení desek se smykovou výztuží.

Kapitola 1 obsahuje srovnání účinnosti navržené metody se třemi dalšími metodami výpočtu: Eurokódem, americkou normou ACI a doporučením uvedeném v Model Code 2010. Porovnání metod je provedeno za pomoci 127 uskutečněných experimentů, jejichž výsledky byly publikovány v odborné literatuře za posledních několik desetiletí.

Přílohy na konci práce obsahují výkresovou dokumentaci vyrobených experimentálních vzorků a tabulky obsahující databázi parametrů experimentů z literatury včetně hlavních vypočtených hodnot pomocí navržené metody.

2 EXISTUJÍCÍ METODY STANOVENÍ ÚNOSNOSTI V PROTLAČENÍ

2.1 Úvod k přehledu metod předpovědi únosnosti

Veškeré vztahy a metody výpočtu uvedené v této kapitole se budou vztahovat k lokálně podepřeným deskám podrobeným symetrickému zatížení. Ve všech případech se jedná o desky, které jsou podepřeny kruhovými nebo čtvercovými sloupy.

Metody obsažené v tomto přehledu jsou rozděleny do dvou kategorií. Na metody obsažené v aktuálních normách a doporučeních a poté na analytické metody publikované v odborné literatuře.

2.1.1 Metody v aktuálních normách a doporučeních

Tato kapitola obsahuje krátký přehled hlavních metod výpočtu obsažených ve světových normách a doporučeních.

Jmenovitě se jedná o metody:

- **Eurokód** EN 1992-1-1 (kapitola 2.2)
- **Americká norma** ACI 318-14 (kapitola 2.3)
- **Model Code** 2010 (kapitola 2.4)
- **Švýcarská norma** SIA 262:2013 (kapitola 2.5)

2.1.2 Metody založené na příhradové analogii

Během uplynulých desetiletí byla vytvořena řada modelů založených na příhradové analogii. Za zmínku stojí metoda, kterou představil Menétrey [14]. Ta uvažuje, že selhání protlačení odpovídá selhání betonového táhla připojeného ke sloupu. Popis výpočtu dle Menétreyho je vysvětlen v kapitole 2.6. Dále pak metoda Tillera [19], která využívá lahvové vzpěry a byla později vylepšena Marzoukem, Rizkem a Tillerem [20]. Tato metoda je podrobně popsána v kapitole 0.

Navzdory relativní přesnosti, kterou tyto modely vykazují, dochází u nich v určitých případech k velmi značnému nadhodnocení únosnosti desek v protlačení (v některých případech se jedná až o 45 % [20]).

2.2 Eurocode 2 (EC2 2004)

2.2.1 Únosnost bez smykové výztuže

Evropská norma [1] pro protlačení desek je založena na empirických vztazích pro výpočet smyku na nosnících. Tato norma je z velké části založena na doporučeních uvedených v Model Code 1990 (MC90). Dle Eurokódu závisí velikost maximální únosnosti proti protlačení kromě samotné pevnosti betonu f_c , efektivní výšce desky d a rozměrech sloupu, také na stupni vyztužení podélnou výztuží desky ρ . Celková únosnost desky, bez zahrnutí vlivu smykové výztuže, je dána výpočtním vztahem

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot k \cdot (100\rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot d \cdot u_1, \quad (2.1)$$

kde je součinitel k stanoven jako

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d [mm]}} \leq 2,0. \quad (2.2)$$

Stupeň vyztužení ohybovou výztuží ρ může nabývat maximální hodnoty 2% a je možné jej pro ortogonální rozmístění výztuže spočítat ze vztahu

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02, \quad (2.3)$$

kde ρ_x a ρ_y jsou stupně vyztužení v jednotlivých směrech desky určené z rovnice

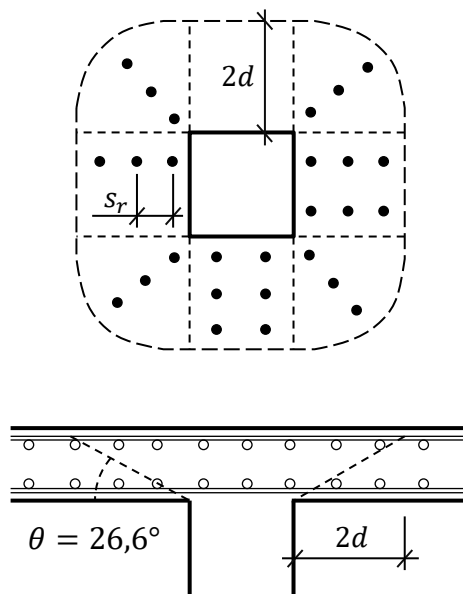
$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{b_x \cdot d}, \quad \text{respektive} \quad \rho_y = \frac{A_y}{b_y \cdot d}, \quad (2.4)$$

kde pro čtvercové a kruhové sloupy platí, že hodnota b_x je rovna hodnotě b_y , a které je možné zapsat rovnicí

$$b_x = b_y = c + 6d, \quad (2.5)$$

kde hodnota c je délka strany sloupu, popřípadě jeho poloměr a hodnota d je efektivní tloušťka desky.

Základní kontrolní obvod u_1 je definován vzdáleností $2d$ od líce sloupu pro každý jeho bod (dojde k zakulacení rohů pro obdélníkové a čtvercové sloupy). Vzdálenost $2d$ odpovídá konstantnímu předpokládanému úhlu smykové trhliny $\theta = 26,6^\circ$. Zobrazení základního kontrolního obvodu pro čtvercový sloup je možné vidět na obr. 2.1.

Obr. 2.1: Rozměry kontrolního obvodu u_1

2.2.2 Únosnost se smykovou výztuží

V případě smykově vyztužených desek lze únosnost stanovit jako součet 75 % únosnosti desky bez smykové výztuže a příspěvku únosnosti od smykové výztuže. Tato redukce zohledňuje vliv aktivace smykové výztuže a také poukazuje na redukci únosnosti desky díky vertikálnímu pohybu betonového kužele po dosažení meze kluzu smykové výztuže [5].

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef}, \quad (2.6)$$

kde d je efektivní tloušťka desky,
 s_r je radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže,
 A_{sw} je celková plocha výztuží v jednom obvodu smykové výztuže,
 $f_{yw,ef}$ je efektivní napětí ve smykové výztuži.

Efektivní napětí ve smykové výztuži se stanoví jako

$$f_{yw,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{yw}, \quad (2.7)$$

kde hodnota f_{yw} je mez kluzu oceli smykové výztuže.

2.2.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory

Rovnice pro výpočet únosnosti v blízkosti sloupu je v metodě uvedené v EC2 podobná jako u výpočtu únosnosti tlakové diagonály na nosníku. Je tedy definována následujícím vzorcem.

$$V_{R,max} = 0,24 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot f_c \cdot u_0 \cdot d, \quad (2.8)$$

kde f_c je válcová pevnost betonu v tlaku,

d je efektivní tloušťka desky,

u_0 je obvod podpory (sloupu).

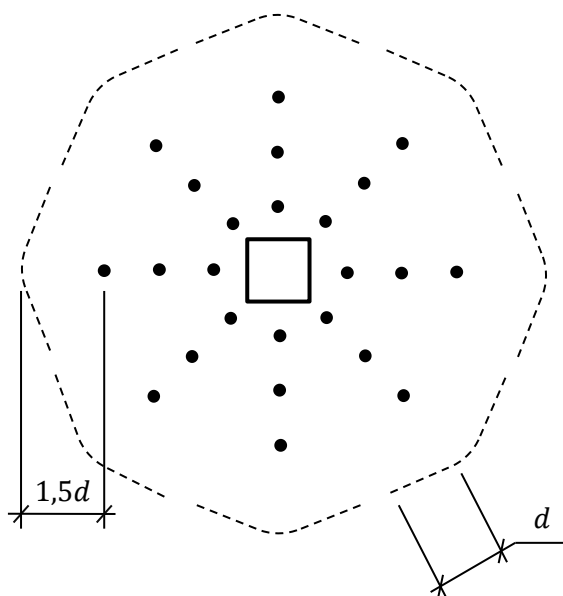
2.2.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast

Rovnice pro výpočet maximální únosnosti mimo oblast vyztuženou smykovou výztuží vychází z rovnice (2.1) pro únosnost bez smykové výztuže.

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot k \cdot (100\rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot d \cdot u_{out}, \quad (2.9)$$

kde u_{out} je kontrolní obvod ve vzdálenosti $1,5d$ za posledním prutem smykové výztuže.

Vnější kontrolní obvod u_{out} je znázorněn na obr. 2.2 níže.



Obr. 2.2: Kontrolní obvod u_{out} pro výpočet protlačení dle EC2

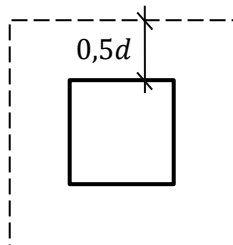
2.3 ACI 318-11

2.3.1 Únosnost bez smykové výztuže

Oproti Eurokódu neuvažuje americká norma [6] při své předpovědi únosnosti s vlivem podélné výztuže. Únosnost v protlačení je tedy dána pouze válcovou pevností betonu f_c a efektivní tloušťkou desky d a stanovena je ze vzorce

$$V_{R,c} = \frac{1}{3} \cdot u_1 \cdot d \cdot \sqrt{f_c}. \quad (2.10)$$

Tato metoda počítá s konstantním úhlem smykové trhliny $\theta = 45^\circ$. Kontrolní obvod u_1 je tedy definován vzdáleností $0,5d$ od líce podpory (sloupu). Americká norma umožňuje použití tvaru kontrolních obvodů čtvercového půdorysu i obvodů se zakulacením rohů, zakulacených obdobně jako v případě Eurokódu. Při praktickém použití normy je však výhodné užívat kontrolní obvod, který vede k co největší únosnosti v protlačení [5]. Zakulacení rohů je tedy pro případy srovnání přesností metod se skutečnými experimenty v této práci zanedbáváno. I přes použití čtvercových obvodů, jež vedou k vyšším předpokládaným únosnostem v protlačení, bude v této práci prokázáno, že metodu výpočtu dle ACI 318-11 je možné považovat za nejkonzervativnější.



Obr. 2.3: Kontrolní obvod u_1 pro ACI 318-11

2.3.2 Únosnost se smykovou výztuží

Maximální povolená síla v protlačení je stanovena jako součet části únosnosti samotného betonu a příspěvku smykové výztuže. Započtené množství únosnosti betonu závisí na typu použité smykové výztuže. V případě použití třmínků jako výztuže proti protlačení jde o 50%. Pro smykové trny s hlavicemi je únosnost samotného betonu redukována na 75%.

Pro případ smykové výztuže tvořené třmínky tudíž platí vztah

$$V_{R,cs} = \frac{1}{6} \cdot u_1 \cdot d \cdot \sqrt{f_c} + \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw}. \quad (2.11)$$

Pro případ vyztužení smykovými trny s hlavicemi platí

$$V_{R,cs} = \frac{1}{4} \cdot u_1 \cdot d \cdot \sqrt{f_c} + \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw}, \quad (2.12)$$

kde u_1 je kontrolní obvod dle obr. 2.3,
 d je efektivní tloušťka desky,
 f_c je válcová pevnost betonu,
 s_r je radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže,
 A_{sw} je celková plocha výztuží v jednom obvodu smykové výztuže,
 f_{yw} je pevnost oceli na mezi kluzu.

2.3.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory

Únosnost desky v protlačení v těsné blízkosti sloupu (podpory) je v ACI 318 stanovena násobkem únosnosti bez smykové výztuže. Pro případy smykového vyztužení tvořeného třmínky má násobek únosnosti velikost 1,5 a je tedy možné ke stanovení únosnosti v okolí sloupu použít následující rovnici.

$$V_{R,max} = \frac{1}{2} \cdot u_1 \cdot d \cdot \sqrt{f_c}, \quad (2.13)$$

kde kontrolní obvod u_1 je shodný s kontrolním obvodem pro výpočet únosnosti bez smykové výztuže podle obr. 2.3.

Pro případ vyztužení desky trny s hlavicemi je možné použít násobek únosnosti desky bez smykové výztuže o velikosti 2,0. Avšak podmínkou jeho použití je, že radiální vzdálenosti jednotlivých smykových trnů nepřesáhnou délku $0,5d$.

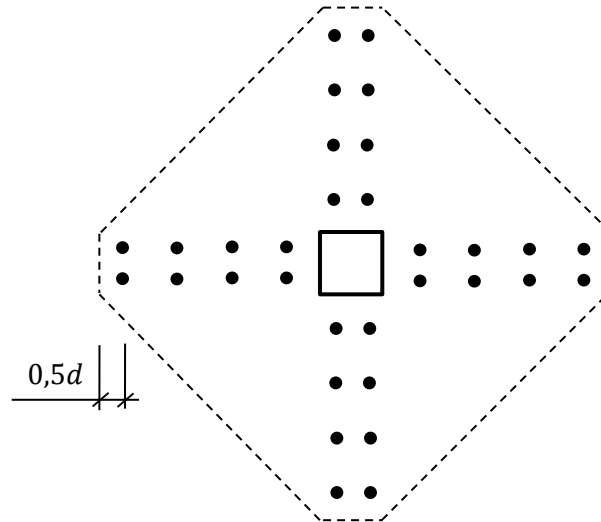
$$V_{R,max} = \frac{2}{3} \cdot u_1 \cdot d \cdot \sqrt{f_c}. \quad (2.14)$$

2.3.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast

Vzorec pro výpočet únosnosti je obdobný jako v případě výpočtu únosnosti bez smykové výztuže. Kontrolní obvod pro tento typ porušení je dán vzdáleností $0,5d$ od posledního obvodu smykové výztuže. Samotná únosnost mimo smykově vyztuženou oblast je poté brána jako 50% únosnosti bez smykové výztuže a je stanovena vztahem

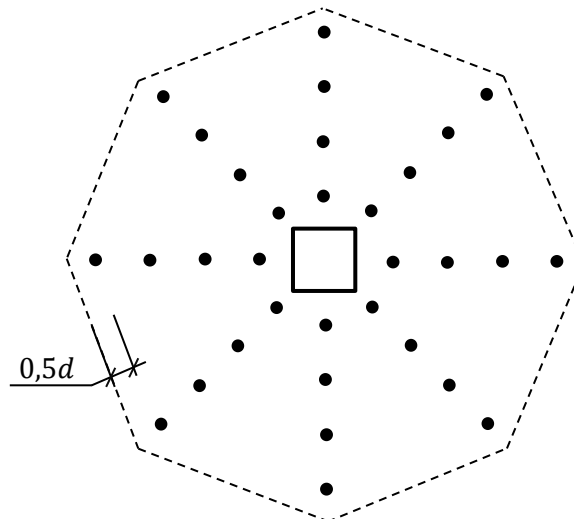
$$V_{R,out} = \frac{1}{6} \cdot u_{out} \cdot d \cdot \sqrt{f_c}. \quad (2.15)$$

Norma ACI 318-11 definuje poslední kontrolní obvod u_{out} na desce s ortogonálně rozmístěnou smykovou výztuží. Tvar a rozměry takového kontrolního obvodu je možné vidět na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Obvod u_{out} pro ortogonální umístění výztuže v metodě ACI 318-11

Pro případy radiálního smykového vyztužení byl kontrolní obvod pro stanovení únosnosti mimo smykově vyztuženou oblast počítán dle následujícího obrázku:



Obr. 2.5: Obvod u_{out} pro radiální umístění výztuže v metodě ACI 318-11

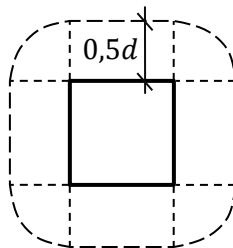
2.4 Model Code 2010 (MC 2010)

2.4.1 Únosnost bez smykové výztuže

Oproti předchozím analytickým metodám se v případě Model Code 2010 [7] jedná o fyzikální model vycházející z teorie kritické smykové trhliny (CSCT – Critical Shear Crack Theory). V případě této teorie je předpokládáno, že únosnost proti protlačení závisí na pootočení desky, které je ovlivněno tuhostí desky v ohybu. Základní vztah pro výpočet únosnosti bez zahrnutí vlivu příčné výztuže je

$$V_{R,c} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d, \quad (2.16)$$

kde f_c je válcová pevnost betonu desky,
 k_{ψ} je součinitel pootočení desky,
 d je efektivní tloušťka desky,
 u_1 je první kontrolní obvod vzdálený od podpory o $0,5d$ dle obr. 2.6.



Obr. 2.6: Kontrolní obvod u_1 dle MC 2010

Součinitel k_{ψ} závisí na otočení desky ψ , efektivní výšce desky d a také na součiniteli frakce kameniva k_{dg} . Součinitel k_{ψ} je dán rovnicí (2.17).

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot \psi \cdot d \cdot k_{dg}} \leq 0,6, \quad (2.17)$$

kde se součinitel frakce kameniva určí ze vztahu

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g [mm]} \geq 0,75. \quad (2.18)$$

V rovnici (2.18) je d_g maximální velikost použité frakce kameniva v milimetrech. Pro vysoce pevnostní a lehké betony by měla být frakce kameniva uvažována za 0 z důvodu možného rozlomení jednotlivých částí kameniva.

MC 2010 uvažuje se čtyřmi úrovněmi aproximace/přesnosti (Levels of Approximation – zkráceně LoA). Jednotlivé úrovně se liší ve výpočtu předpokládané zbytkové únosnosti desky v ohybu ve výpočtu pootočení desky. Úroveň LoA I slouží k rychlému odhadu při dimenzování a neobsahuje poměr momentů m_s (moment vyvolaný zatížením desky) a m_R (únosnost desky v ohybu). Výsledky výpočtu pomocí druhé a třetí úrovně LoA vycházejí velmi podobné a jsou vhodné pro návrh většiny běžných konstrukcí. Pro výpočet dle LoA IV je již nutné použít nelineární analýzu k určení pootočení desky a je tudíž vhodná pouze ve speciálních případech. K účelu srovnání jednotlivých metod bude v této práci použita druhá úroveň LoA II. Pro druhou úroveň lze pootočení desky spočítat dle vztahu

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.19)$$

kde r_s je vzdálenost od středu podpory po místo nulového momentu (point of contra-flexure). Pro aproximační úroveň II lze r_s uvažovat jako $0,22 \cdot l$, kde l je rozpětí desky v daném směru.

E_s je modul pružnosti podélné výztuže desky,

f_y je mez kluzu podélné výztuže,

m_s je průměrný moment v podpoře způsobený zatížením. Pro vnitřní sloupy se symetrickým zatížením může být tento moment uvažován z rovnice

$$m_s = \frac{1}{8} \cdot V_s, \quad (2.20)$$

kde V_s je smyková síla působící na desku.

m_R je únosnost desky v ohybu. Lze ji stanovit jako

$$m_R = \rho \cdot d^2 \cdot f_y \cdot \left(1 - \rho \frac{f_y}{2 \cdot f_c} \right). \quad (2.21)$$

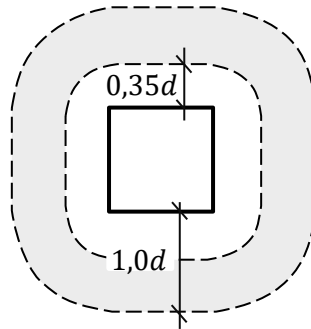
2.4.2 Únosnost se smykovou výztuží

Únosnost desky se smykovou výztuží je v metodě dle MC 2010 definována součtem síly, kterou přenesou beton bez smykové výztuže a příspěvku započítané smykové výztuže.

$$V_{R,CS} = V_{R,C} + \sum A_{sw} \cdot \sigma_{sw}, \quad (2.22)$$

kde σ_{sw} je napětí ve smykové výztuži spočtené dle (2.23) a $\sum A_{sw}$ je suma započítaných ploch prutů smykové výztuže nacházejících se v oblasti ohraničené kontrolními obvody

vzdálenými $0,35d$ respektive $1,0d$ od líce podpory. Oblast započítatelné výztuže je zobrazena na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Oblast započítané smykové výztuže v metodě Model Code 2010

Napětí ve smykové výztuži je stanoveno vztahem (2.23)

$$\sigma_{sw} = \frac{E_{sw} \cdot \psi}{6} \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{yw}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{yw}, \quad (2.23)$$

kde E_{sw} je modul pružnosti smykové výztuže,
 ψ je pootočení desky určené z rovnice (2.19),
 f_{bd} je návrhová hodnota mezního napětí v soudržnosti (někdy je v literatuře uváděno jako $2f_{ct}$),
 f_{yw} je mez kluzu smykové výztuže,
 ϕ_w je průměr jednoho prutu smykové výztuže.

2.4.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory

Maximální síla v protlačení se v metodě MC 2010 stanoví

$$V_{R,max} = k_{sys} \cdot k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot d \cdot u_0 \leq \sqrt{f_c} \cdot d \cdot u_0, \quad (2.24)$$

kde k_{sys} je součinitel zohledňující způsob vyztužení. Pro výztuž z třmínků je k_{sys} rovno hodnotě 2,4, pro oboustranné trny s hlavicemi je $k_{sys} = 2,8$,
 k_{ψ} je součinitel pootočení dle rovnice (2.17),
 f_c je válcová pevnost betonu v tlaku,
 d je efektivní tloušťka desky,
 u_0 je obvod sloupové podpory.

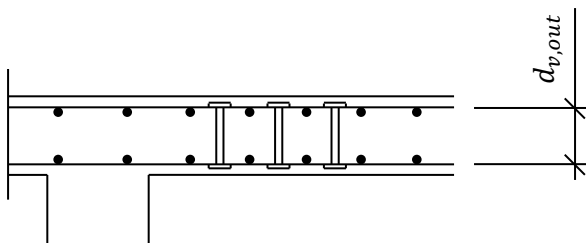
2.4.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast

Výpočet únosnosti v protlačení mimo vyztuženou oblast se provádí obdobně jako v případě bez smykové výztuže. Kromě rozdílného kontrolního obvodu se ve vzorci objevuje také jiná efektivní výška $d_{v,out}$ namísto d . Samotný vzorec tedy vypadá následovně.

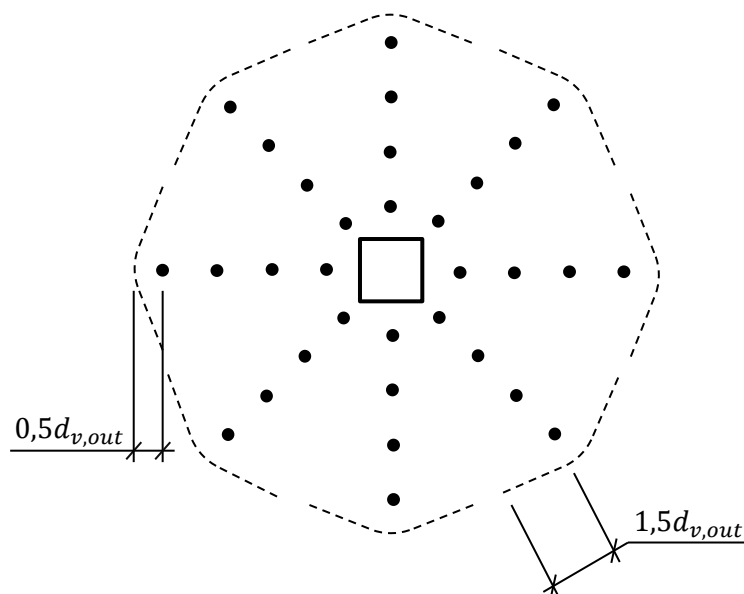
$$V_{R,out} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot d_{v,out} \cdot u_{out}, \quad (2.25)$$

kde $d_{v,out}$ je vzdálenost mezi horní ohybovou výztuží a spodním koncem smykové výztuže. Velikost efektivní výšky výztuže $d_{v,out}$ je zobrazena na obr. 2.8.

u_{out} je poslední kontrolní obvod dle obr. 2.9.



Obr. 2.8: Efektivní výška smykové výztuže $d_{v,out}$ pro MC 2010



Obr. 2.9: Kontrolní obvod u_{out} výpočtu mimo smykem vyztuženou oblast dle MC 2010

2.5 SIA 262:2013

2.5.1 Únosnost bez smykové výztuže

Stejně jako Model Code 2010 i švýcarská norma [8] je založena na metodě kritické smykové trhliny CSCT. Rovnice pro výpočet únosnosti v protlačení bez smykové výztuže je tedy velmi podobná.

$$V_{R,c} = k_r \cdot \tau_c \cdot u_1 \cdot d, \quad (2.26)$$

kde d je efektivní tloušťka desky,
 k_r je součinitel zohledňující pootočení desky, spočtený z rovnice (2.30),
 u_1 je kontrolní obvod ve vzdálenosti $0,5d$ od líce podpory,
 τ_c je smyková únosnost betonu, která může být spočtena z rovnice

$$\tau_c = 0,3 \cdot \sqrt{f_c}. \quad (2.27)$$

Součinitel k_r je v metodě dán vztahem

$$k_r = \frac{1}{0,45 + 0,18 \cdot \psi \cdot d \cdot k_{dg}} \leq 2, \quad (2.28)$$

kde ψ je pootočení desky stanovené dle rovnice (2.30),
 d je efektivní tloušťka desky,
 k_{dg} je součinitel vlivu velikosti frakce kameniva betonu.

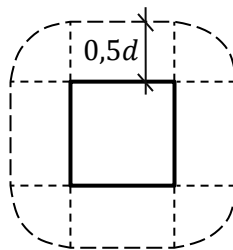
Součinitel k_{dg} se určí dle rovnice (2.31).

$$k_{gd} = \min\left(\frac{48}{16 + d_g [mm]}; 1\right), \quad (2.29)$$

kde d_g je maximální velikost frakce kameniva betonu dosažená v milimetrech.

Shodně jako v případě MC 2010 obsahuje švýcarská norma různé úrovně aproximace pootočení. K účelu srovnání jednotlivých metod bude v této práci opět použita druhá úroveň LoA II. Pootočení ψ se tedy pro druhou úroveň aproximace se stanoví jako

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{V_s}{8 \cdot m_R}\right)^{1,5}. \quad (2.30)$$

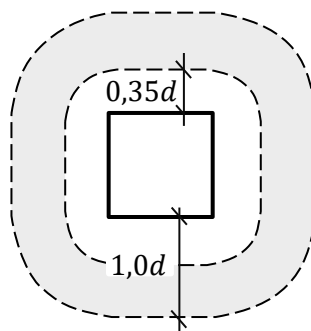
Obr. 2.10: Kontrolní obvod u_1 dle SIA 262:2013

2.5.2 Únosnost se smykovou výztuží

Únosnost desky se smykovou výztuží je totožná s metodou MC 2010 a je tudíž definována součtem síly, kterou přenese beton bez smykové výztuže a příspěvku započítané smykové výztuže.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + \sum A_{sw} \cdot \sigma_{sw}, \quad (2.31)$$

kde $\sum A_{sw}$ je suma ploch průřezů smykové výztuže nacházejících se v oblasti ohraničené kontrolními obvody vzdálenými $0,35d$ respektive $1,0d$ od líce podpory. Oblast započitatelné výztuže je zobrazena na obrázku 2.8.



Obr. 2.11: Oblast započítané smykové výztuže v metodě Model Code 2010

2.5.3 Únosnost v těsné blízkosti podpory

$$V_{R,max} = 2k_r \cdot \tau_c \cdot d \cdot u_0 \leq 3,5\tau_c \cdot d \cdot u_0, \quad (2.32)$$

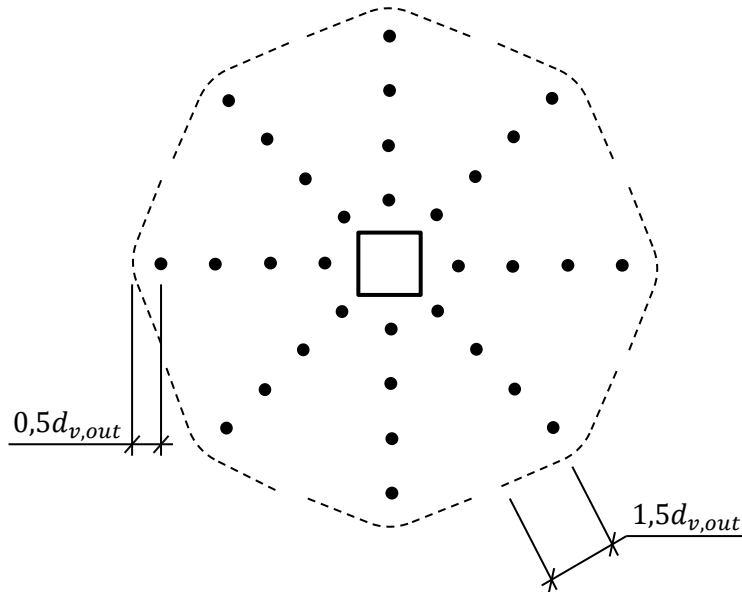
kde k_{sys} je součinitel zohledňující způsob vyztužení. Pro výztuž z třmínků je k_{sys} rovno 2,4, pro oboustranné trny s hlavicemi $k_{sys} = 2,8$. Hodnota u_0 je velikost obvodu sloupové podpory a d je efektivní tloušťka desky.

2.5.4 Únosnost mimo smykově vyztuženou oblast

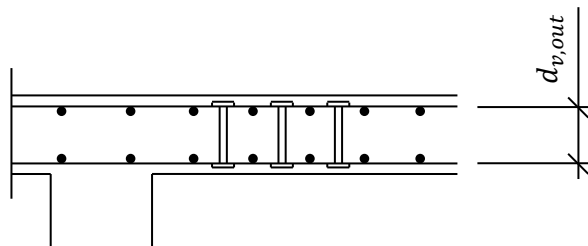
$$V_{R,out} = k_r \cdot \tau_c \cdot d_{v,out} \cdot u_{out}, \quad (2.33)$$

kde $d_{v,out}$ je vzdálenost mezi horní ohybovou výztuží a spodním koncem smykové výztuže. Velikost efektivní výšky výztuže $d_{v,out}$ je zobrazena na obr. 2.13.

u_{out} je poslední kontrolní obvod dle obr. 2.12.



Obr. 2.12: Kontrolní obvod mimo smykově vyztuženou oblast dle SIA 262:2013



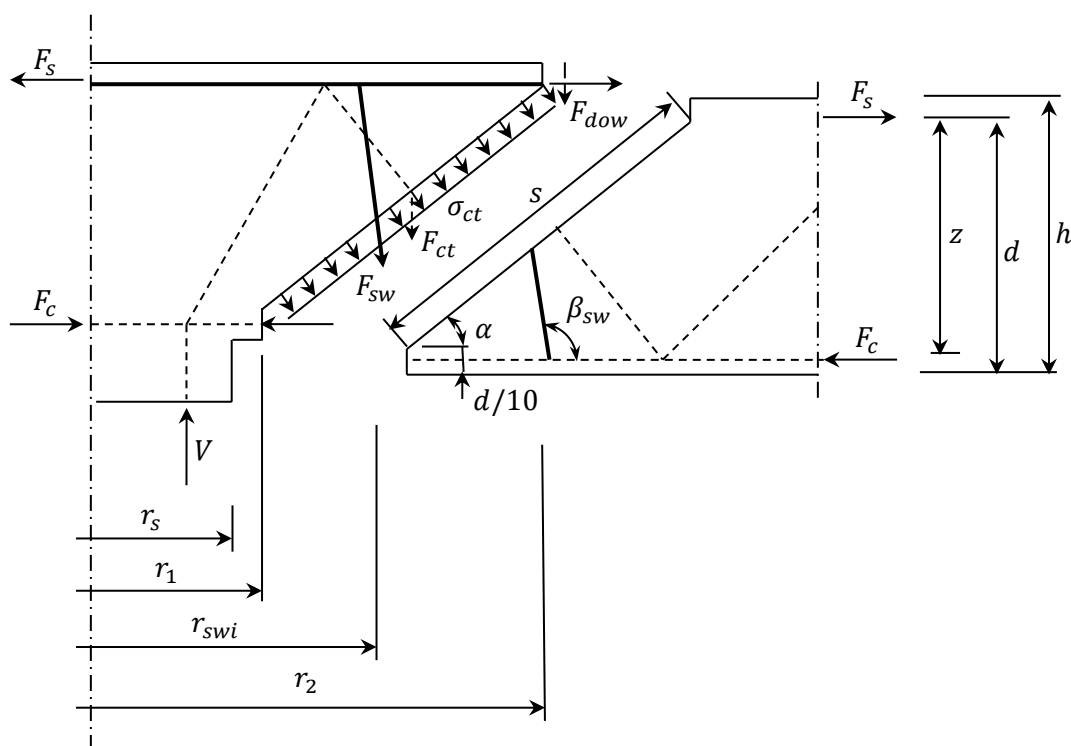
Obr. 2.13: Efektivní výška smykové výztuže $d_{v,out}$ pro SIA 262:2013

2.6 Menétrey – analytický model

Tento analytický model vychází z metody strut-and-tie a předpokladu rotačně symetrického chování. Menétrey uvažoval s tím, že k porušení desky v protlačení dojde v táhle které je nejbližší podpory [14, 15]. Únosnost táhla je v této metodě pokládána za ekvivalentní únosnosti desky v protlačení. Výpočet se skládá ze součtu dílčích únosností prvků, protínajících předpokládanou rovinu smykové trhliny. Konečná únosnost desky v protlačení je zapsána rovnicí

$$V_R = V_{ct} + V_{dow} + V_{sw}, \quad (2.34)$$

kde V_{ct} je příspěvek tahové únosnosti betonu, V_{dow} příspěvek způsobený působením podélné výztuže pomocí tzv. hmoždinkového efektu a V_{sw} je příspěvkem smykové výztuže, ať se již jedná o smykové hlavice, třmínky nebo ohyby. Model původně uvažuje i s příspěvkem od předepnuté výztuže, avšak pro účely této práce není s předepjatou výztuží desk nijak uvažováno a proto bude ve všech následujících rovnicích a obrázcích příspěvek předepnutí odstraněn. Schéma znázorňující předpokládanou smykovou trhlinu desky a geometrii dílčích částí modelu je možné vidět na obr. 2.14.



Obr. 2.14: Schéma příhradového modelu od Menétreyho [3].

2.6.1 Příspěvek únosnosti betonu

Pro zjednodušení je v okolí smykové trhliny uvažováno s konstantním rozložením tahových napětí. Analytický výraz pro výpočet příspěvku tahové únosnosti betonu V_{ct} je tedy dán vztahem

$$V_{ct} = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s \cdot (f_{ct})^{\frac{2}{3}} \cdot \xi \cdot \eta \cdot \mu. \quad (2.35)$$

Tvar smykové trhliny je možné vystihnout komolým kuzelem umístěným mezi dvěma poloměry r_1 a r_2 . Hodnota s je poté délka trhliny vymezená těmito dvěma poloměry. Předpokládá se, že poloměr r_1 odpovídá 1/10 efektivní tloušťky desky (analogie ohybového chování). Lze jej tudíž získat z výrazu

$$r_1 = r_s + \frac{1}{10} \cdot \frac{d}{\tan \alpha}, \quad (2.36)$$

kde úhel α je úhlem předpokládané smykové trhliny a poloměr r_s je poloměrem podpory (sloupu).

Poloměr r_2 dosahuje konců ohybové výztuže v předpokládané trhlíně a určí se jako

$$r_2 = r_s + \frac{d}{\tan \alpha}. \quad (2.37)$$

Plocha mezi poloměry r_1 a r_2 je: $\pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s$, kde s je nakloněná délka trhliny ze vzorce

$$s = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + (0,9d)^2}. \quad (2.38)$$

Součinitel ξ zohledňuje vliv stupně vyztužení ohybovou výztuží ρ na tahová napětí a byl stanoven pomocí numerických simulací [16]. Je možné jej zapsat následujícím výrazem.

$$\xi = \begin{cases} -0,1\rho^2 + 0,46\rho + 0,35 & \text{pro } 0 < \rho < 2\% \\ 0,87 & \text{pro } \rho \geq 2\% \end{cases} \quad (2.39)$$

Veličiny μ a η v rovnici (2.35) jsou velikostními součiniteli desky. Oba součinitele byly zjištěny numericky a jsou v rovnici použity současně. Součinitel μ je zapsán rovnicí

$$\mu = 1,6 \left(1 + \frac{d}{d_g} \right)^{-0,5}, \quad (2.40)$$

kde d je efektivní tloušťka desky a hodnota d_g odpovídá velikosti maximální frakci kameniva betonu desky.

Součinitel η , definován rovnicí (2.41), závisí na tloušťce desky h a poloměru podpory r_s .

$$\eta = \begin{cases} 0,1 \cdot \left(\frac{r_s}{h}\right)^2 - 0,5 \cdot \left(\frac{r_s}{h}\right) + 1,25 & \text{pro } 0 < \frac{r_s}{h} < 2,5 \\ 0,625 & \text{pro } \rho \geq 2,5 \end{cases} \quad (2.41)$$

2.6.1 Příspěvek ohybové (podélné) výztuže desky

Příspěvek od podélné výztuže (tzv. dowel-effect) je dán sumou průměrů ϕ_s výztuží procházející předpokládanou plochou smykového porušení. Dowel-effect je přenos smykových sil ohybovou výztuží procházející smykovou trhlinou. Regan a Braestrup [17] zjistili, že až 34% celkové únosnosti desky s ortogonální ohybovou výztuží v protlačení může být přisouzeno tomuto efektu. Příspěvek smykové únosnosti V_{dow} je tedy v Menétreyho modelu definován jako

$$V_{dow} = \frac{1}{2} \cdot \sum \phi_s^2 \cdot \sqrt{f_c \cdot f_y \cdot (1 - \zeta^2)} \cdot \sin \alpha, \quad (2.42)$$

kde f_c je válcová pevnost betonu,
 f_y je mez kluzu oceli podélné výztuže,
 α je úhel mezi podélnou výztuží a předpokládanou smykovou trhlinou,
 ζ je součinitel daný vztahem

$$\zeta = \frac{\sigma_s}{f_y}, \quad (2.43)$$

kde tahové napětí σ_s se spočítá z podílu předpokládané maximální únosnosti desky V_R a sumy ploch prutů podélné výztuže, které procházejí plochou smykové trhliny. K výpočtu příspěvku od podélné výztuže je tedy potřeba iteračního postupu. σ_s se stanoví ze vztahu

$$\sigma_s = \frac{V_R}{\tan \alpha \cdot \sum A_s}. \quad (2.44)$$

2.6.2 Příspěvek smykového vyztužení

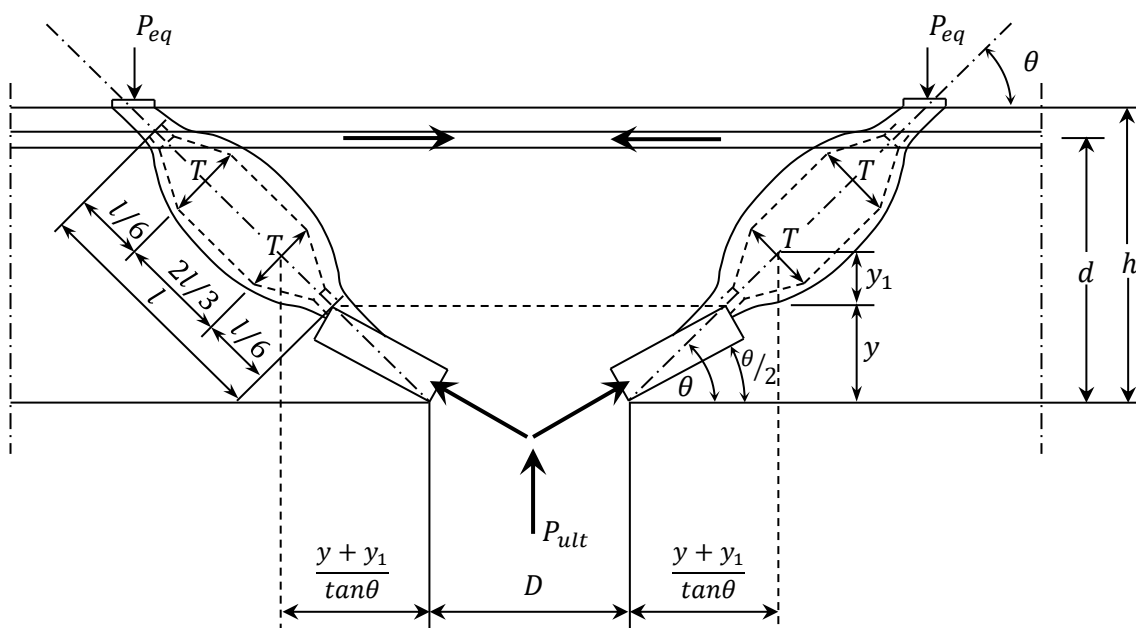
Příspěvek smykové výztuže, za předpokladu, že kotvení je dostatečné, je dán vztahem

$$V_{sw} = \sum A_s \cdot f_{sw} \cdot \sin(\beta_{sw}), \quad (2.45)$$

kde A_s je plocha prutu smykové výztuže, f_{sw} je napětí ve smykové výztuži a β_{sw} je úhel mezi osou prutů smykové výztuže a rovinou desky dle obr. 2.14.

2.7 Rizk, Marzouk a Tiller

Stejně jako Menétrého model i model Rizka, Marzouka a Tillera vychází z příhradové analogie [18]. Model vychází z příhradového modelu, který byl navržen Tillerem [19] a později modelem rozšířeným Marzoukem a týmem [20]. Oproti dříve zmíněnému Menétrého však tento model předpokládá, že k porušení při protlačení dojde ve fiktivní betonové vzpěře v blízkosti podpory. Vůči jiným výpočetním metodám je model Rizka, Marzouka a Tillera vhodný k výpočtu protlačení pro tlusté desky, kde zohledňuje vliv jejich velikosti. Schéma příhradového modelu pro výpočet únosnosti desek bez smykové výztuže je možné vidět na obr. 2.15.



Obr. 2.15: Schéma strut-and-tie modelu Rizka, Marzouka a Tillera [18]

2.7.1 Únosnost bez smykové výztuže

Navržená rovnice pro výpočet maximální únosnosti v protlačení je

$$V_{Rc} = P_{ult} = \pi \left(D + \frac{2y}{\tan\theta} \right) \cdot \frac{y \cdot 0,5 \cdot \sin\theta}{\sin\theta} \cdot f_c \cdot \left(\frac{l_{ch}}{d} \right)^{0,33} \cdot \frac{\sin\theta}{2} \quad (2.46)$$

- kde
- D průměr kruhového sloupu. Ekvivalentně pro čtvercový sloup (na základě shodného obvodu) platí $D = 4 \cdot C/\pi$, kde C je délka strany sloupu,
 - y je výška tlačené zóny dle obrázku 2.14,
 - f_c je válcová pevnost betonu v tlaku,
 - θ je předpokládaný úhel smykové trhliny,
 - l_{ch} je tzv. charakteristická délka reprezentující velikostní efekt desky.

Velikostní faktor desky je zohledněn pomocí tzv. charakteristické délky reprezentující oblast trhlin. Tato délka zohledňuje parametry lomové mechaniky: modul pružnosti E_c , lomovou energii G_f , a pevnost betonu v tahu f_{ct} , kde platí vztah

$$l_{ch} = \frac{E_c \cdot G_f}{f_{ct}^2}. \quad (2.47)$$

Pro účely vyšetřování chování desek, použili autoři ve své studii zjednodušený empirický vzorec, který navrhl Zhou, Barr a Lydon [21]

$$l_{ch} = -3,84f_c + 580 \text{ [mm]}. \quad (2.48)$$

Důležitým předpokladem ke stanovení přesné předpovědi únosnosti je určení tloušťky tlačené oblasti. Výška této tlačené oblasti je dána pozicí neutrálové osy. Na základě zjednodušené metody navržené Theodorakopoulosem a Swamym [22], je možné výšku tlačené oblasti pro obvykle vyztužené desky v elasto-plastické fázi spočítat pomocí harmonického průměru

$$y = \frac{2 \cdot y_s \cdot y_f}{y_s + y_f}, \quad (2.49)$$

kde y_s je tloušťka tlačené oblasti ve smyku,
 y_f je tloušťka tlačené oblasti v ohybu.

Kde hodnota y_s může být uvažováno dle rovnice

$$y_s = 0,25d. \quad (2.50)$$

Výška kritické tlačené ohybové oblasti vychází z obecných postupů pro ohyb při užití betonu normální hustoty. Pro zjednodušení může být výška y_f spočítána následující rovnicí.

$$y_f = \frac{0,8 \cdot \rho \cdot f_y}{k_1 \cdot f_c}, \quad (2.51)$$

kde k_1 je součinitel ekvivalentní krychelné pevnosti betonu dle britské normy BS 8110-97,
 ρ stupeň vyztužení desky podélnou výztuží,
 f_c je válcová pevnost betonu.

Součinitel k_1 se určí jako

$$k_1 = 0,67 \frac{\varepsilon_{cu} - A \cdot \frac{\varepsilon_0}{3}}{\varepsilon_{cu}}, \quad (2.52)$$

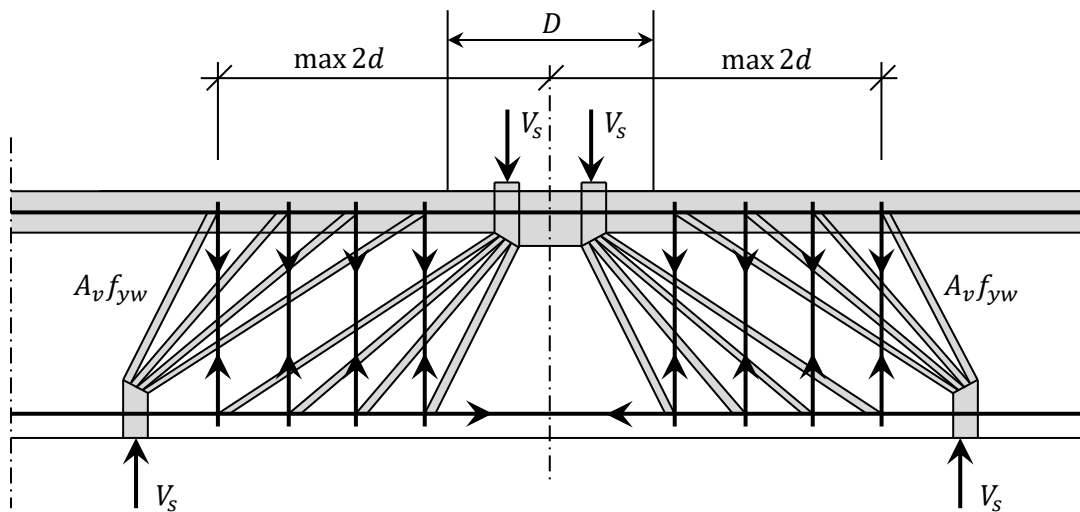
kde ε_{cu} je maximální poměrné přetvoření betonu,
 A je součinitel hustoty betonu. Pro beton normální hustoty platí: $A = 1$,
 ε_{c0} je poměrné přetvoření betonu dle rovnice

$$\varepsilon_0 = \frac{\sqrt{f_c}}{3680}. \quad (2.53)$$

2.7.2 Únosnost se smykovou výztuží

Únosnost se smykovou výztuží je dána součtem přírůstku od únosnosti smykové výztuže a únosnosti v protlačení bez smykové výztuže vynásobené redukčním faktorem 0,75, tudíž

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot P_{ult} + V_s. \quad (2.54)$$



Obr. 2.16: Schéma výpočtu smykové výztuže modelu Rizka, Marzouka a Tillera [18]

Únosnost přírůstku smykového vyztužení desky V_s se poté určí jako

$$V_s = A_v \cdot f_{yw,ef}, \quad (2.55)$$

kde A_v je součet ploch prutů smykové výztuže v kontrolním obvodu ve vzdálenosti $2d$ od podpory (sloupu),
 $f_{yw,ef}$ je efektivní napětí ve smykové výztuži dle EC2 z rovnice (2.7).

3 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Provedený experimentální program sloužil jako základ k ověření navržené metody protlačení a dále k rozšíření databáze uskutečněných experimentů na protlačení o desky se smykovou výztuží o mezilehlé hodnoty parametrů. Celkem bylo vyrobeno 6 vzorků betonových desek. Všechny desky byly vytvořeny ve zmenšeném měřítku 1:3 oproti nejčastěji používaným deskám používaných u tohoto typu experimentu, které mají rozměry často blízké velikosti 3,0 x 3,0 metru. Zvolené půdorysné rozměry každého ze vzorků tedy jsou 1,0 x 1,0 metru s výškou desky 100 mm.

K ověření proveditelnosti a také použitelnosti výsledků ze vzorků desek, které nejsou při experimentech na protlačení běžně používány v tak malém měřítku, byla nejprve vytvořena jedna deska s označením B6. Tato deska byla otestována o tři měsíce dříve a tudíž má jiné materiálové vlastnosti betonu.

Shodnými parametry pro zbylé desky jsou jejich rozměry a materiálové charakteristiky – složení betonové směsi a pevnost použité výztuže. Navzájem se liší pouze množstvím a rozmístěním smykové výztuže a rozměry předpokládané sloupové podpory přenášející zatížení na povrch desky. Hlavní parametry jednotlivých desek jsou zobrazeny v tab. 3.1. Značení desek se skládá z písmene a čísla. Písmeno (A, B, nebo C) označuje rozmístění použité smykové výztuže (dle obr. 3.3). Číslo za písmenem (4 nebo 6) poté označuje tloušťku prutů smykové výztuže v milimetrech.

Tab. 3.1: Parametry testovaných desek

Vzorek	c [mm]	h [mm]	d [mm]	f_c [MPa]	E_c [GPa]	f_y [MPa]	ρ [%]	f_{yw} [MPa]
A4	130	100	70	25,6	22,4	500	1,63	500
A6	130	100	70	25,6	22,4	500	1,63	500
B4	75	100	70	25,6	22,4	500	1,36	500
B6	75	100	70	50,3	30,5	500	1,36	500
C4	130	100	70	25,6	22,4	500	1,63	500
C6	130	100	70	25,6	22,4	500	1,63	500

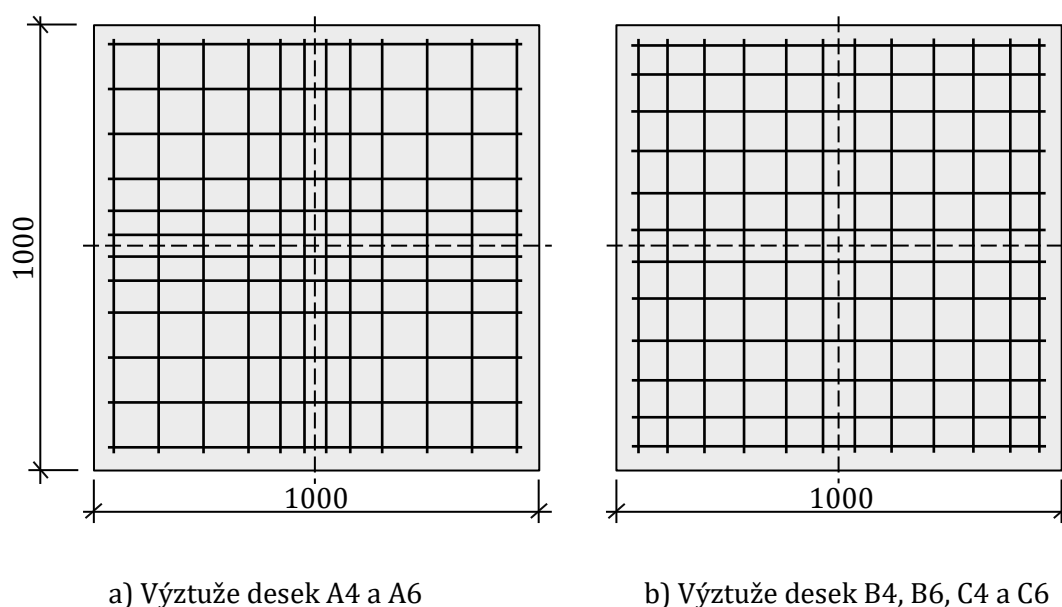
Podélnou výztuž v tažené oblasti u každé z desek tvoří pruty o průměru 10 mm s velikostí krycí vrstvy betonu 20 mm, což odpovídá efektivní tloušťce desky $d = 70$ mm. Předpokládaná velikost sloupové podpory (hodnota c), která přenáší zatížení na desku,

má čtvercový průřez o straně 75 mm pro desky B, respektive 130 mm pro desky A a C. Výztuž desek byla navržena tak, aby u všech desek došlo k porušení protlačení ve smykem vyztužené oblasti. Tento návrh byl proveden pomocí výpočtu uvedeného v Eurokódu. Při návrhu bylo také dbáno na to, aby byly dodrženy konstrukční zásady uvedené v normě. Podrobné výkresy všech desek experimentální studie jsou součástí přílohy A.

3.1 Ohybová výztuž

Ohybová výztuž desek je tvořena ortogonálně umístěnými ocelovými pruty. Ty jsou vyrobeny z betonářské oceli B500B a mají průměr 10 mm. Do desek jsou osazeny s krytím 20 mm. Výztuž pro desky typu A se skládá z 12 prutů v každém směru, což odpovídá stupni vyztužení 1,63%. Oproti deskám B a C jsou pruty umístěny ve středových oblastech hustěji, z důvodu rozdílného rozmístění smykové výztuže (obr. 3.1a).

Desky B a C také obsahují 12 prutů výztuže o shodném průměru, avšak kvůli menším rozměrům sloupů (podpory) je u desek B jejich stupeň vyztužení pouze 1,36 %. Desky C poté mají stupeň vyztužení shodný s deskami A, a to 1,63 %.

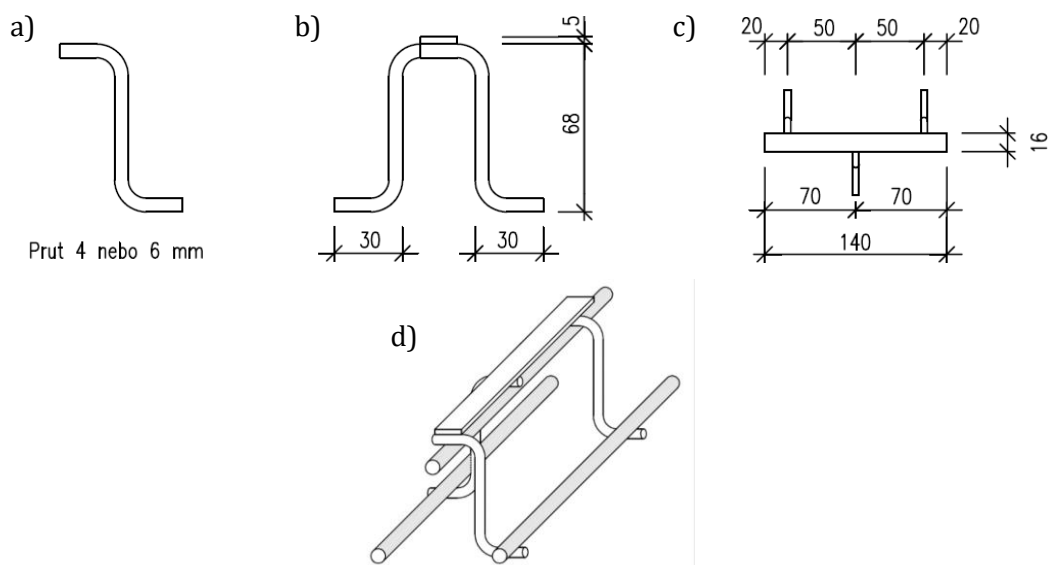


Obr. 3.1: Rozmístění ohybové výztuže vyrobených desek

Konstrukční výztuž umístěná u druhého povrchu desky se skládala z kari sítě s pruty o průměru 6 mm a oky sítě o velikost 100 mm. Kari sítě u desek A a C mají 9 prutů v každém směru, desky B poté prutů 10. Důvodem je opět rozdílné rozmístění smykové výztuže.

3.2 Smyková výztuž

Každá deska je opatřena smykovou výztuží z ocelových prutů umístěných ve třech obvodech okolo uvažované sloupové podpory. Smykové vyztužení je vytvořeno z prutů o průměru 4 a 6 mm, které mají na obou stranách zahnuté konce a jsou po trojicích přivařeny k tenké ocelové liště (obr. 3.2). Ocel, ze které je smyková výztuž tvořena je má shodné materiálové charakteristiky, jako ocel podélné výztuže.



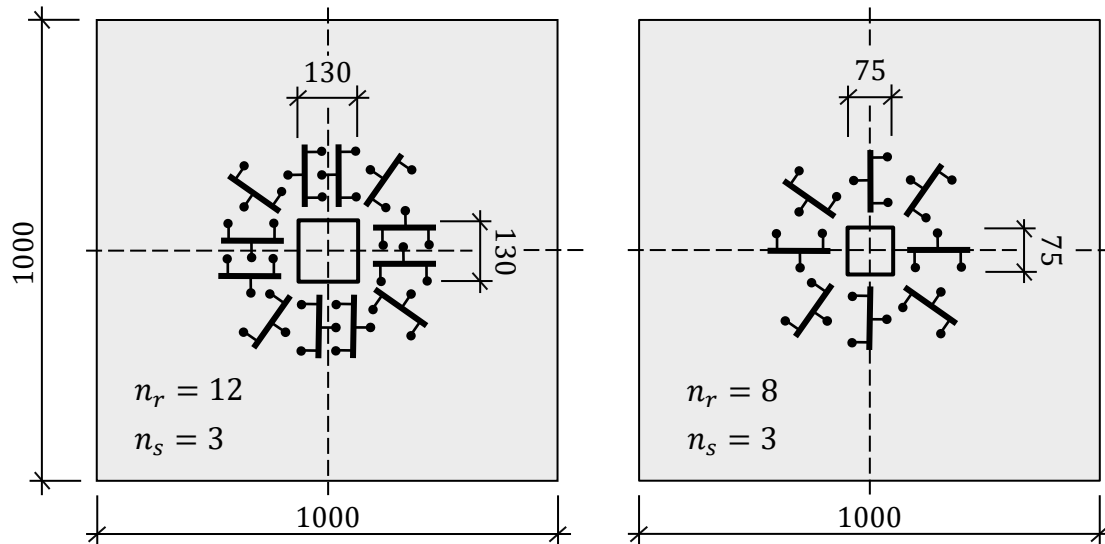
Obr. 3.2: Dimenze a schéma použitého smykového vyztužení desky: a) tvar jednoho prutu výztuže, b) boční pohled, c) půdorys, d) způsob ukotvení k podélné výztuži

Do armatury desky jsou kusy trojic uloženy tak, aby zahnuté konce obepínaly ohybovou výztuž. Lišta, ke které jsou jednotlivé háky přivařeny, se v desce nachází na straně s kari sítí. Tento způsob vyztužení je náhradou za smykové trny, které se pro tak tenké desky nevyrábějí. Výše popsaný způsob smykového vyztužení byl použit i na experimentech na zmenšených deskách univerzitou v Zagrebu [23].

Tab. 3.2: Parametry smykové výztuže

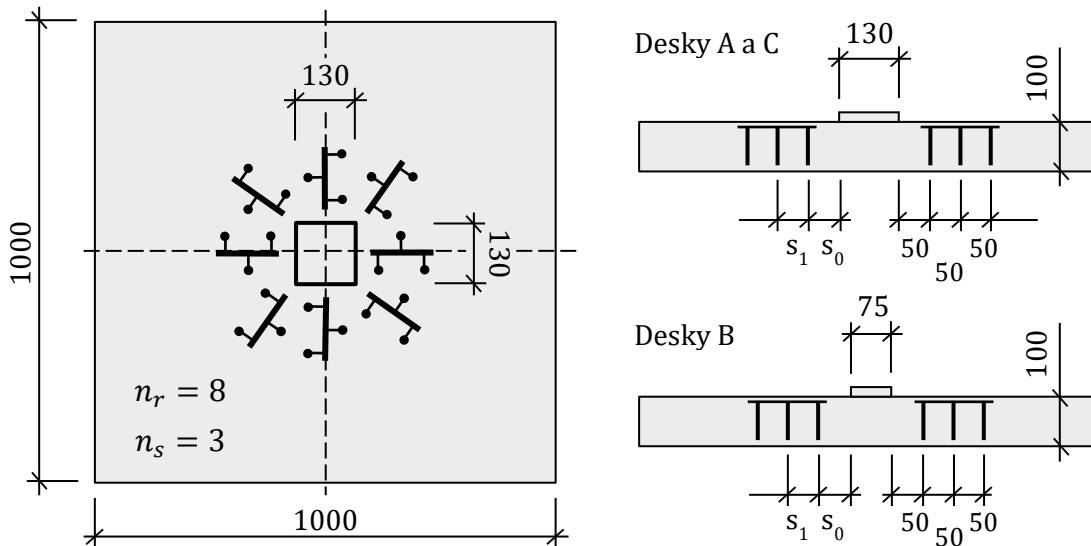
Vzorek	ϕ_w [mm]	A_{sw} [MPa]	n_r [-]	n_s [-]	s_0 [mm]	s_1 [mm]	ρ_w [%]
A4	4	150,8	12	3	50	50	0,27
A6	6	150,8	12	3	50	50	0,61
B4	4	100,5	8	3	50	50	0,26
B6	6	100,5	8	3	50	50	0,58
C4	4	100,5	8	3	50	50	0,18
C6	6	100,5	8	3	50	50	0,41

Tab. 3.2 obsahuje hlavní parametry smykové výztuže jednotlivých desek. Hodnota ϕ_w je průměr prutu smykové výztuže, A_{sw} je plocha všech prutů smykové výztuže, n_r a n_s značí počet prutů v jednom obvodu smykového vyztužení respektive počet obvodů. Vzdálenosti s_0 a s_1 jsou zaznačeny na obr. 3.3d. ρ_w je stupeň vyztužení smykovou výztuží spočtený dle rovnice (7.1). Rozmístění výztuže pro jednotlivé desky je možné vidět na obr. 3.3.



a) Smyková výztuž desek A

b) Smyková výztuž desek B



c) Smyková výztuž desek C

d) Výztuže desek B4, B6, C4 a C6

Obr. 3.3: Dimenze a schéma použitého smykového vyztužení desky

Desky A4 a A6 obsahují 12 trojic smykové výztuže a desky B4, B6, C4 a C6 8 kusů trojic smykové výztuže. Z důvodu proveditelnosti bylo nutné desku armovat a betonovat v obrácené poloze, aby bylo možné zajistit obepnutí všech háků smykové výztuže.

3.3 Postup při betonáži

Použitý beton měl vzhledem ke zmenšenému měřítku desek maximální frakci kameniva 8 mm. Jeho složení je možné vidět v tab. 3.3. Základní mechanické parametry betonu byly zjištěny experimentálně. K určení pevnosti v tlaku posloužily krychle o rozměru 15 cm a k určení modulu pružnosti trámce 10/10/30 cm.

Tab. 3.3: Složení použité betonové směsi desek

Cement [kg/m ³]	Kamenivo [kg/m ³]	Voda [l/m ³]	Plastifikátor [kg/m ³]
165	3,7	165	3,7

Deska B6 byla vyrobena v červnu roku 2016 a testována 40 dnů po betonáži. Ostatní desky byly vytvořeny v září téhož roku a ozkoušeny byly po 74 dnech od betonáže. Betonáž a příprava betonu probíhala v Kuřimi v areálu firmy Prefa Brno a.s.



a) Rozmístění smykové výztuže



b) Vložení kari sítě a osazení konců



c) Provlékání hlavní ohybové výztuže

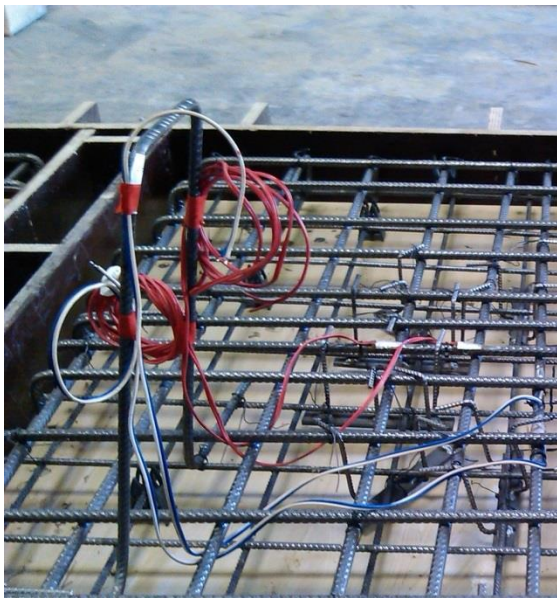


b) Dokončená armatura před betonáží

Obr. 3.4: Postup vázání armatury desek

Postup výroby armatury desek je zobrazen na obr. 3.4. Po ošetření bednění odbedňovacím přípravkem byly do středu desky přibližně rozmístěny jednotlivé kusy smykového vyztužení (obr. 3.4a). Přes smykovou výztuž byla umístěna kari síť s osazenými distančními prvky. Smyková výztuž byla poté přivázána ke kari síti ve své finální poloze. Konce kari sítě byly opatřeny na každé straně třemi kusy pomocné výztuže tvaru U (obr. 3.4b), které držely hlavní ohybovou výztuž v požadované poloze.

Hlavní ohybová výztuž desky byla do armatury vkládána tak, aby ji obepínaly všechny háky smykové výztuže (obr. 3.4c). Kvůli minimálním tolerancím u takto malých desek bylo zajištění obepnutí výztuže značně komplikované. Výztuž musela být vázána mimo bednění desky a až po kompletním svázání výztuže mohla být do bednění opět uložena (obr. 3.4d). Pro praktické použití je tento typ smykové výztuže nepoužitelný a slouží pouze jako náhrada smykových trnů pro experimenty provedené ve zmenšeném měřítku.



a) Manipulační úchyt desek



b) Ošetřování betonu po betonáži

Obr. 3.5: Postup betonáže desek

Po dokončení armatury desek byly kabely tenzometrů přivázány k manipulačním úchytům, aby nedošlo k jejich poškození během betonáže (obr. 3.5a). Beton byl pro všechny desky namíchán v jedné záměsi (kromě desky B6 betonované o několik měsíců dříve). Ke ztuhnutí betonu byl použit ponorný vibrátor. Současně s betonáží desek byly betonovány zkušební krychle a trámce. Po dokončení byly všechny vzorky překryty igelitovou fólií a ponechány ve výrobní hale po dobu alespoň 4 týdnů před jejich odbedněním (obr. 3.5b).

3.4 Stanovení materiálových charakteristik betonu

Hodnoty pevnosti v tlaku betonu pro všechny desky byly zjištěny experimentálně. Ke stanovení pevnosti bylo použito celkem 5 krychlí. Naměřené parametry jednotlivých krychlí, kromě těch z betonáže desky B6, jsou zaznamenány v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Parametry testovaných krychlí pro desky A4, A6, B4, C4 a C6 a zjištěná krychelná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cube}$

Krychle číslo	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F [kN]	D [kg/m ³]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]
L-1	150,5	149,2	150,6	7367,3	836,6	2179	37,2
L-2	150,6	149,9	150,6	7408,8	881,9	2180	39,1
L-3	150,5	149,2	150,6	7342,2	825,8	2172	36,8
L-4	150,6	151,2	150,3	7377,9	840,4	2155	36,9
L-5	150,6	148,7	150,6	7494,3	892,8	2223	39,9
Průměrná hodnota:							30,8
Směrodatná odchylka:							1,41

Hodnoty modulu pružnosti pro všechny desky, kromě desky B6 byly určeny ze čtyř hranolů. Naměřené parametry každého hranolu jsou zaznamenány v tab. 3.5. Rozdíl mezi skutečnou a očekávanou pevností vyhovuje normě ČSN ISO 1920-10.

Tab. 3.5: Parametry testovaných hranolů pro desky A4, A6, B4, C4 a C6 a zjištěný modul pružnosti betonu E_c

Hranol číslo	a [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	F [kN]	D [kg/m ³]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	E_c [GPa]
L-1	98,9	100,1	399,8	8647,9	252,8	2186	25,5	-
L-2	100,5	100,1	399,3	8629,8	273,1	2150	27,2	22,5
L-3	100,4	100,3	399,0	8630,3	225,1	2148	22,4	21,3
L-4	102,3	99,9	400,0	8857,0	302,0	2166	29,5	23,4
Průměrná hodnota:							26,2	22,4
Směrodatná odchylka:							3,02	1,08

Ke stanovení pevnosti betonu v tlaku u desky B6 bylo použito celkem 5 krychlí. Naměřené parametry jednotlivých krychlí jsou zaznamenány v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Parametry testovaných krychlí pro desku B6 a zjištěná krychelná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cube}$

Krychle číslo	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F [kN]	D [kg/m ³]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]
L-1	151,5	150,4	150,5	8000,2	1343,4	2332	58,9
L-2	150,0	150,6	150,4	7962,3	1369,1	2343	60,6
L-3	149,8	150,4	150,3	7968,9	1361,8	2352	60,4
L-4	148,1	150,5	150,4	7748,0	1393,9	2313	62,6
Průměrná hodnota:							60,6
Směrodatná odchylka:							1,49

Hodnota modulu pružnosti pro desku B6 byla určena opět ze čtyř zkušebních hranolů. Naměřené parametry každého z hranolů jsou zaznamenány v tab. 3.7. Rozdíl mezi skutečnou a očekávanou pevností vyhovuje normě ČSN ISO 1920-10.

Tab. 3.7: Parametry testovaných hranolů pro desku B6 a zjištěný modul pružnosti betonu E_c

Hranol číslo	a [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	F [kN]	D [kg/m ³]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	E_c [GPa]
L-1	101,2	100,2	400,0	9315,8	606,9	2297	59,9	-
L-2	101,6	99,9	400,3	9437,7	599,0	2324	59,0	31,3
L-3	99,7	99,9	399,8	9266,9	609,2	2328	61,2	30,0
L-4	101,1	100,0	399,3	9328,5	593,5	2312	58,7	30,0
Průměrná hodnota:							59,7	30,5
Směrodatná odchylka:							1,09	0,75

Pro převedení naměřených krychelných pevností betonu na hodnoty válcové, které jsou používány při srovnávacích výpočtech, byl použit vzorec

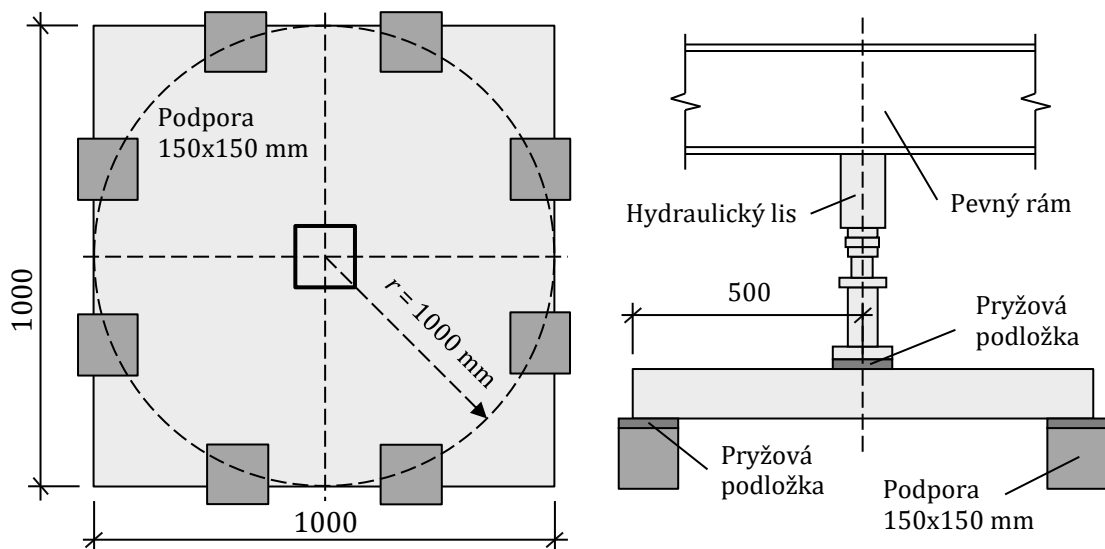
$$f_c = 0,83 \cdot f_{c,cube} \quad (3.1)$$

3.5 Nastavení a průběh zkoušky

Samotné testování protlačení na vzorcích desek probíhalo v hale ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT. Měřen byl průhyb desky, napětí v ohybové výztuži v tažené oblasti, napětí při povrchu tlačného betonu a zatěžovací síla, působící na desku. Tyto parametry byly měřeny nepřetržitě po celou dobu testování desky v intervalech o velikosti 0,2 vteřiny až do jejího selhání.

Zatěžování desky probíhalo v obrácené poloze, než v jaké by se deska nacházela v konstrukci, tj. s hlavní ohybovou výztuží u spodního povrchu desky. Deska byla zatěžována pomocí hydraulického lisu o kapacitě 50 tun. Lis byl připevněn k pevnému ocelovému rámu zakotvenému do podlahy budovy.

Zatěžování probíhalo po krocích o velikosti přibližně 20 kN přes 4 cm tlustou ocelovou desku o velikosti předpokládané sloupové podpory. Stykové plocha s betonovou deskou byla opatřena pryžovou podložkou. Pro účely testování desek A a C byla použita ocel o velikosti 130 x 130 mm a pro desky B velikosti 75 x 75 mm.



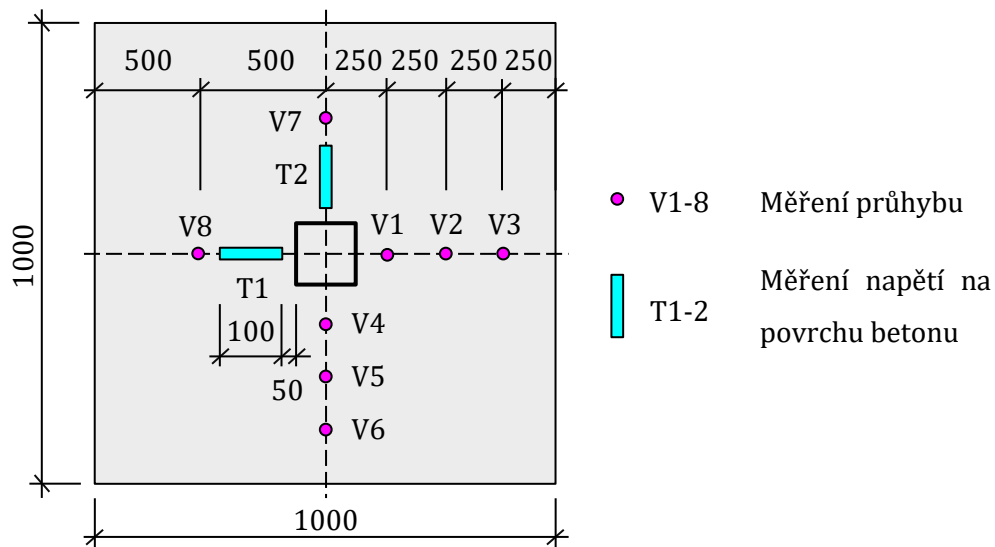
Obr. 3.6: Schéma uložení desky ve zkušebním rámu během zatěžovací zkoušky

Podpory byly tvořeny osmi kusy betonových krychlí. Mezi povrchem podpor a zkoušenou deskou byly opět umístěny pryžové podložky. Samotné krychle byly umístěny rovnoměrně po obvodu desky s poloměrem od středu 500 mm. Schéma rozmístění jednotlivých prvků je možné vidět na obr. 3.6.

3.6 Umístění měřících přístrojů

3.6.1 Deformace desky

Průhyb desky byl měřen na jejím horním povrchu. Měření probíhalo v osmi bodech na hlavních osách desky, se čtyřmi snímači na každé ose. Tři snímače byly rovnoměrně rozmístěny na jedné straně osy s jedním snímačem na straně protilehlé, sloužící pro kontrolu symetrie deformací během zatěžování. Rozmístění všech snímačů je možné vidět na obr. 3.7.

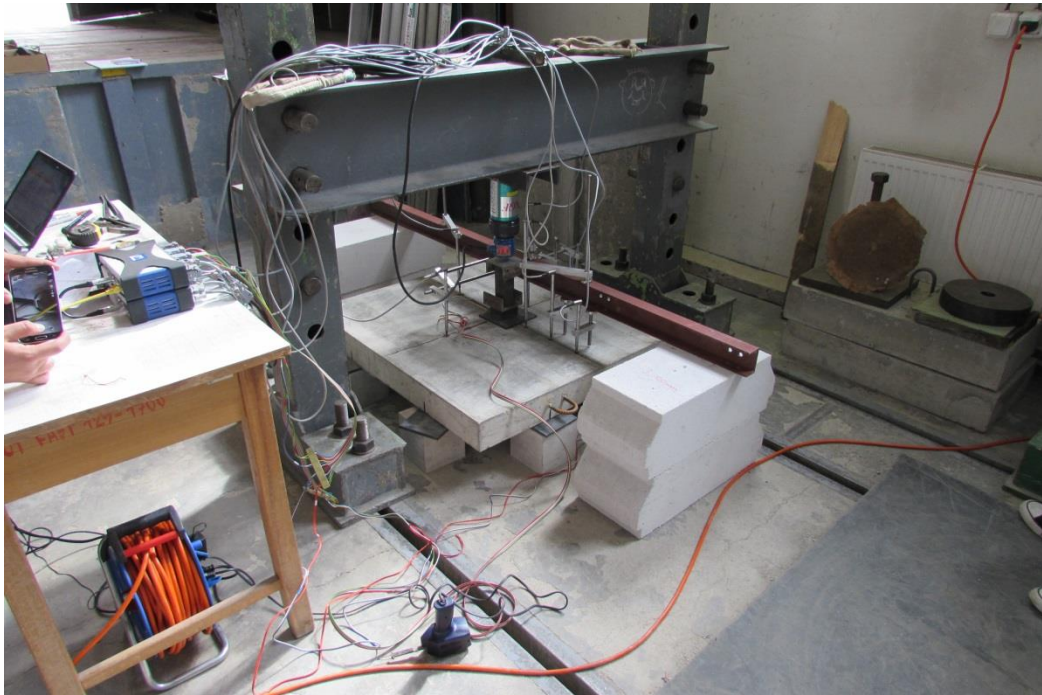


Obr. 3.7: Rozmístění snímačů na horním povrchu testovaných desek



Obr. 3.8: Umístění vertikálních snímačů k ocelovému nosníku

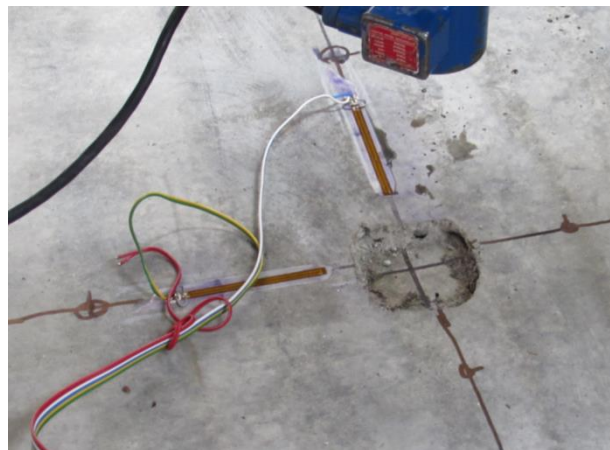
Snímače vertikálních deformací byly osazeny pomocí magnetů na pomocný ocelový nosník. Rozmístění všech přístrojů lze vidět na fotografiích na obr. 3.8 a obr. 3.9.



Obr. 3.9: Pohled na zkušební rám při přípravě ke zkoušce desky B6

3.6.2 Tlaková napětí v betonu

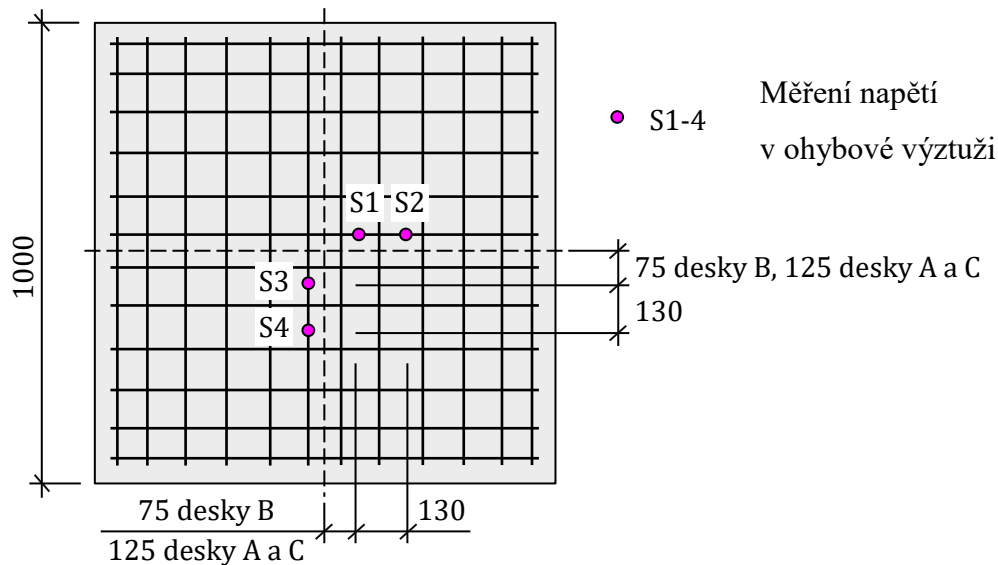
Kromě průhybu byla na horním povrchu také měřena tlaková napětí v betonu. Tenzometry ke snímání tlakových napětí byly umístěny na každou desku po dvou kusech, s jedním kusem na obou hlavních osách vzdálenosti 50 mm od přepokládané sloupové podpory. Poloha tenzometrů je zaznamenána na obr. 3.7. Použité tenzometry měly délku 100 mm a byly přilepeny na vyčištěný povrch betonu před samotným testováním desek.



Obr. 3.10: Rozmístění snímačů na horním povrchu testovaných desek

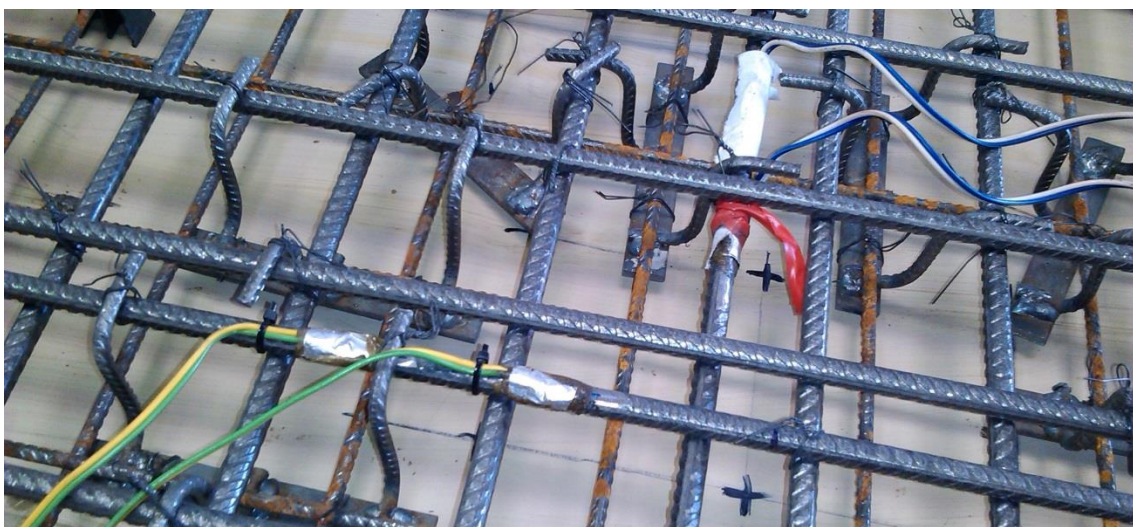
3.6.3 Napětí v ohybové výztuži

K měření napětí na hlavní ohybové výztuži obsahovala každá deska 4 kusy tenzometrů. Tenzometry byly umístěny na dvojici navzájem kolmých výztuží nacházejících se nejbližše středu. Příklad polohy tenzometrů na výztuži je znázorněn na obr. 3.11. Před nalepením tenzometrů byla výztuž v místech jejich aplikace zbrušena do hladkého povrchu. Po nalepení byly k tenzometrům připájeny kabely a tenzometr překryt ochrannou vrstvou.



Obr. 3.11: Poloha tenzometrů hlavní ohybové výztuže desek

Tenzometry byly umístěny ve vzdálenosti 75 mm od středu desky pro desky B4 a B6, respektive ve vzdálenosti 125 mm pro ostatní desky.



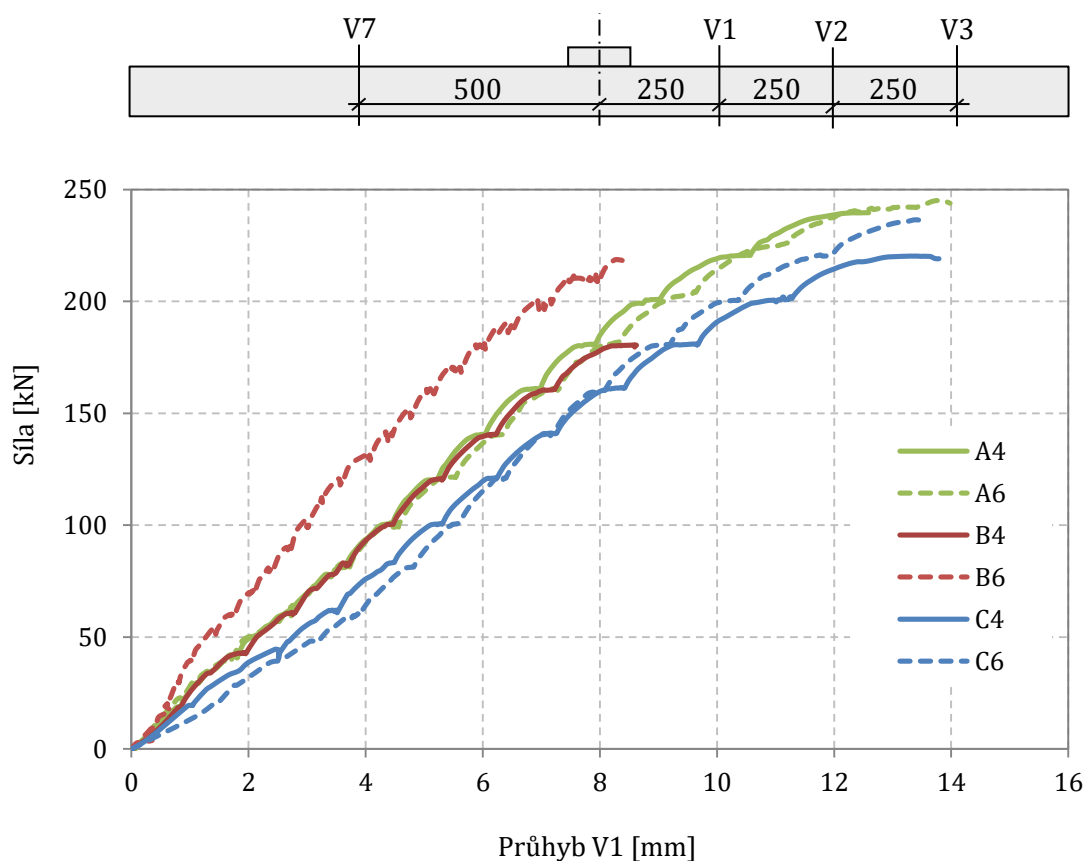
Obr. 3.12: Umístění tenzometry na hlavní ohybové výztuži

4 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU

4.1 Výsledky únosnosti pro všechny desky

Všech šest desek bylo zatěžováno až do porušení. Selhání v každém případě nastalo z důvodu protlačení desky ve smykm vyztužené oblasti vymezené kuželovou plochou porušeného betonu.

Průběh zatížení desek vzhledem k průhybům u snímačů v bodě V1 (umístěných dle obr. 3.7) je znázorněn na obr. 4.1. Desky s větším stupněm vyztužení smykovou či ohybovou výztuží vždy úspěšně dosáhly vyšší únosnosti V_u , než desky méně vyztužené. Z grafu je možné zřetelně pozorovat vliv značně vyšší únosnosti betonu v tlaku desky B6 na průběh její deformace během zatěžování.



Obr. 4.1: Závislost průhybu na zatížení v bodu V1

Desky obsahující smykovou výztuž o průměru 6 mm dosáhly ve všech případech vyšší únosnosti než desky průměrem smykové výztuže 4 mm. U desek typu A (nejvíce vyztužených), je však tento přírůstek únosnosti minimální.

4.2 Naměřené deformace všech desek

Některé z nejdůležitějších výsledků měření průhybů desek, včetně vypočteného pootočení, jsou zaznamenány v tab. 4.1. Údaje o deformaci jednotlivých desek byly zjištěny ze snímačů umístěných dle obr. 3.7.

Tab. 4.1: Naměřené maximální posuny desek a jejich pootočení při porušení

Vzorek	c [mm]	f_c [MPa]	ρ [%]	V_u [kN]	<i>Posun</i> <i>V1</i> [mm]	<i>Posun</i> <i>V2</i> [mm]	<i>Posun</i> <i>V4</i> [mm]	<i>Posun</i> <i>V5</i> [mm]	<i>Pootočení</i> φ [rad]
A4	130	30,8	1,63	240,3	12,7	9,0	12,8	9,0	0,030
A6	130	30,8	1,63	245,2	13,9	10,0	13,7	9,4	0,032
B4	75	30,8	1,36	186,4	8,8	6,5	8,9	6,3	0,020
B6	75	60,6	1,36	218,0	8,3	7,2	8,8	6,6	0,013
C4	130	30,8	1,63	220,2	13,4	9,3	13,6	10,1	0,030
C6	130	30,8	1,63	236,8	13,4	10,2	12,7	8,9	0,028

Pootočení desek je spočítáno z měření v dvojicích bodů V1 a V2, a V4 a V5. Konečná hodnota pootočení desky φ je poté dána aritmetickým průměrem z výsledků těchto měřených dvojic.

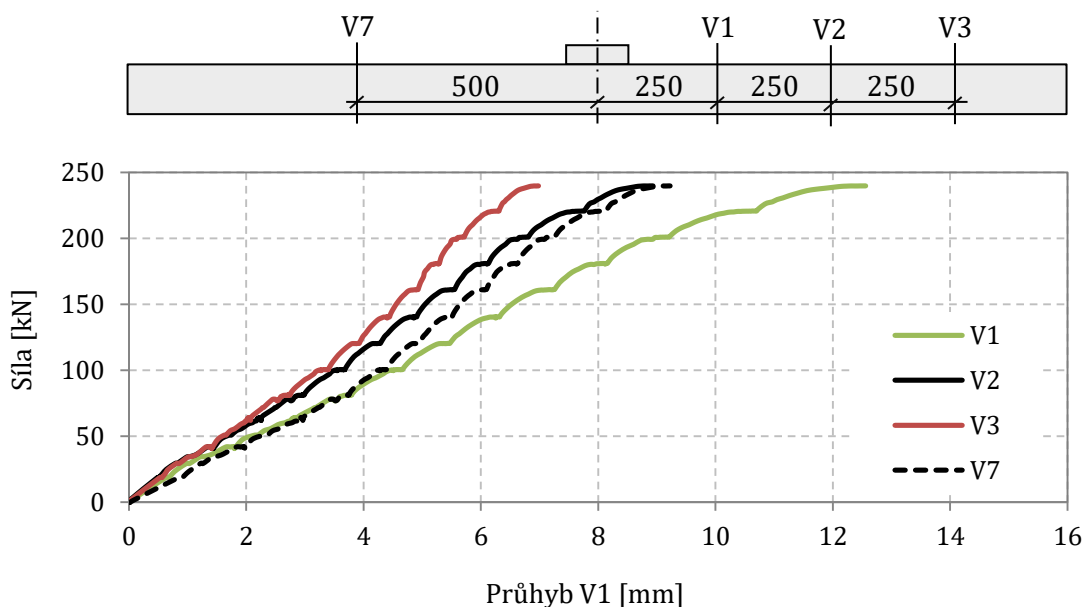
Ze získaných hodnot vyplývá, že desky typu A a C dosáhly velmi podobných hodnot průhybů i pootočení. Hlavním důvodem rozdílu oproti deskám B je o téměř 50% větší průměr sloupové podpory, jejíž rozměry mají zásadní vliv na maximální únosnost desek. Nízké naměřené pootočení desky B6 je poté způsobeno dvojnásobnou pevností betonu oproti ostatním deskám.

V následujícím textu jsou popsány detailní naměřené výsledky pro jednotlivé otestované vzorky desek.

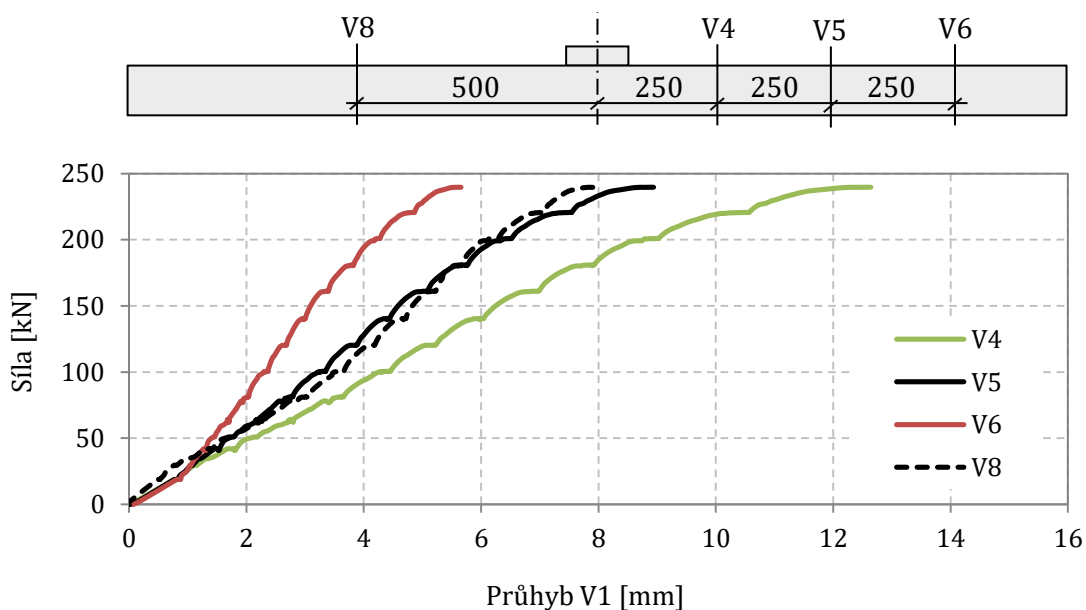
4.3 Naměřené výsledky desky A4

4.3.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky A4 byla 240,3 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V4, a to o hodnotě 12,7 mm. Z výsledků vyplývá, že se desku podařilo úspěšně zatěžovat symetricky.



Obr. 4.2: Naměřené průhyby desky A4 při zatěžovací zkoušce ve směru X

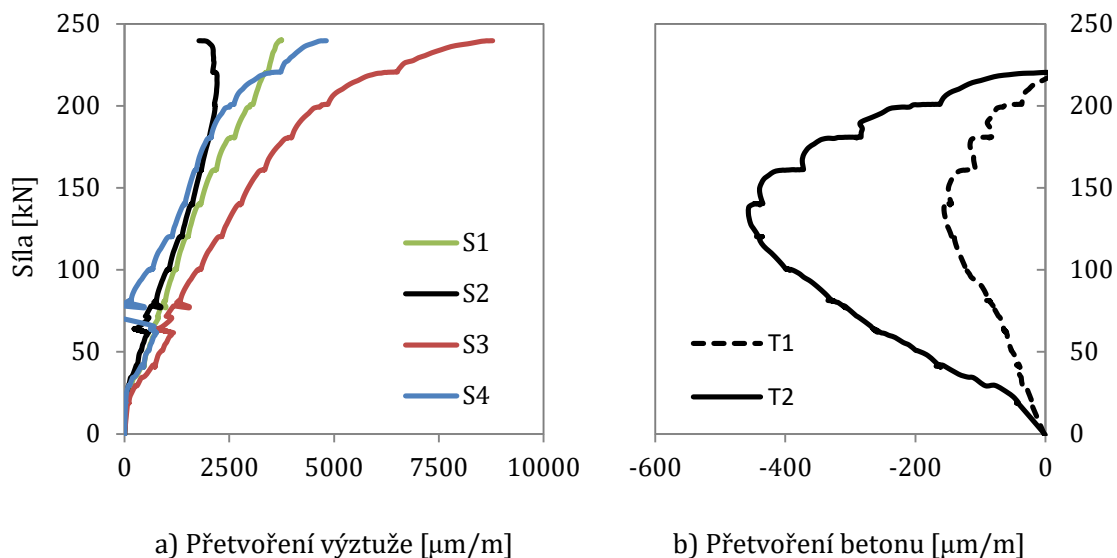


Obr. 4.3: Naměřené průhyby desky A4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.3.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.4a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru Y se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.



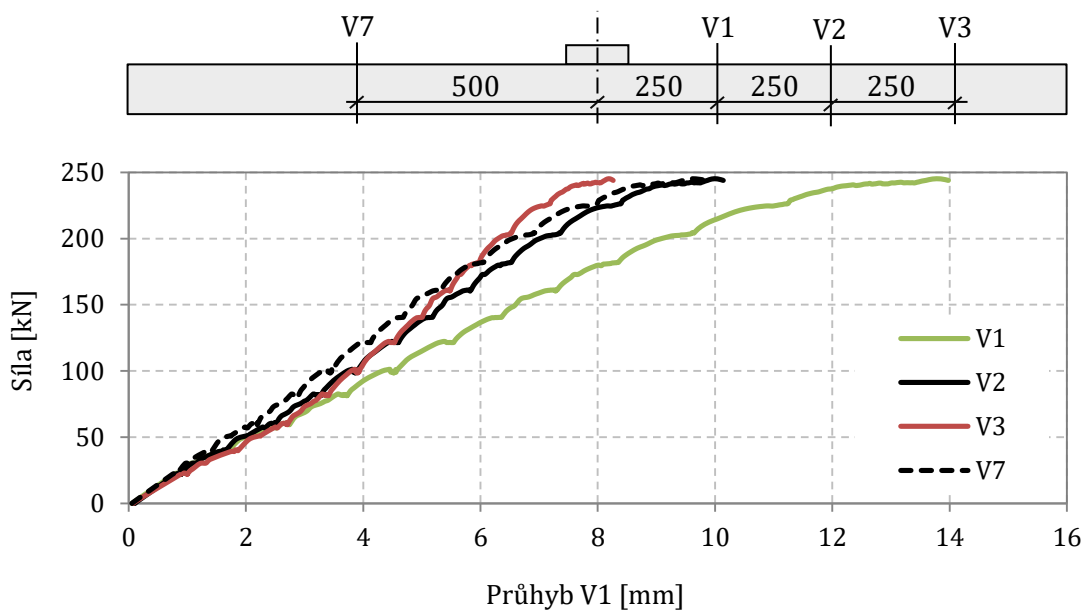
Obr. 4.4: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce A4

Na obr. 4.4b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T2 při zatěžovací síle o velikosti 135 kN.

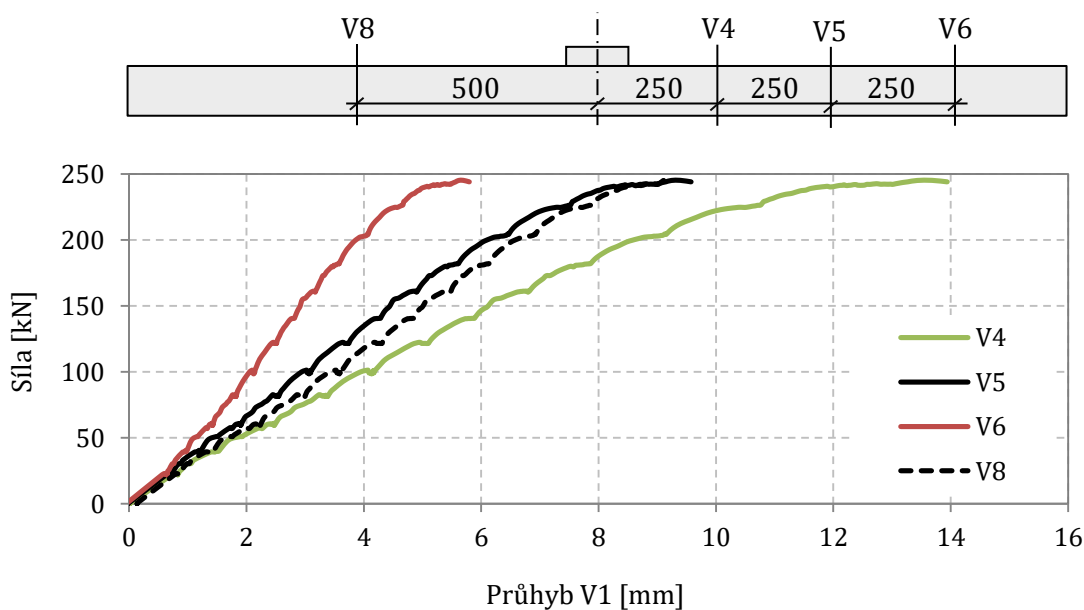
4.4 Naměřené výsledky desky A6

4.4.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky A6 byla 245,2 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V4, a to o hodnotě 13,7 mm. Z výsledků vyplývá, že kromě místa V3 se podařilo desku zatěžovat symetricky poměrně úspěšně.



Obr. 4.5: Naměřené průhyby desky A6 při zatěžovací zkoušce ve směru X

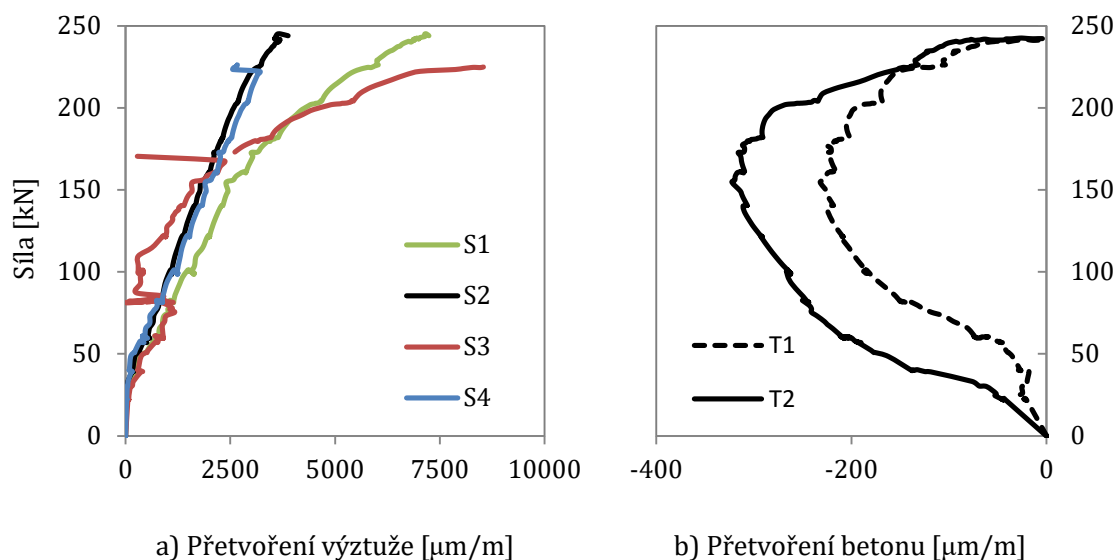


Obr. 4.6: Naměřené průhyby desky A6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.4.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.7a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru Y se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.



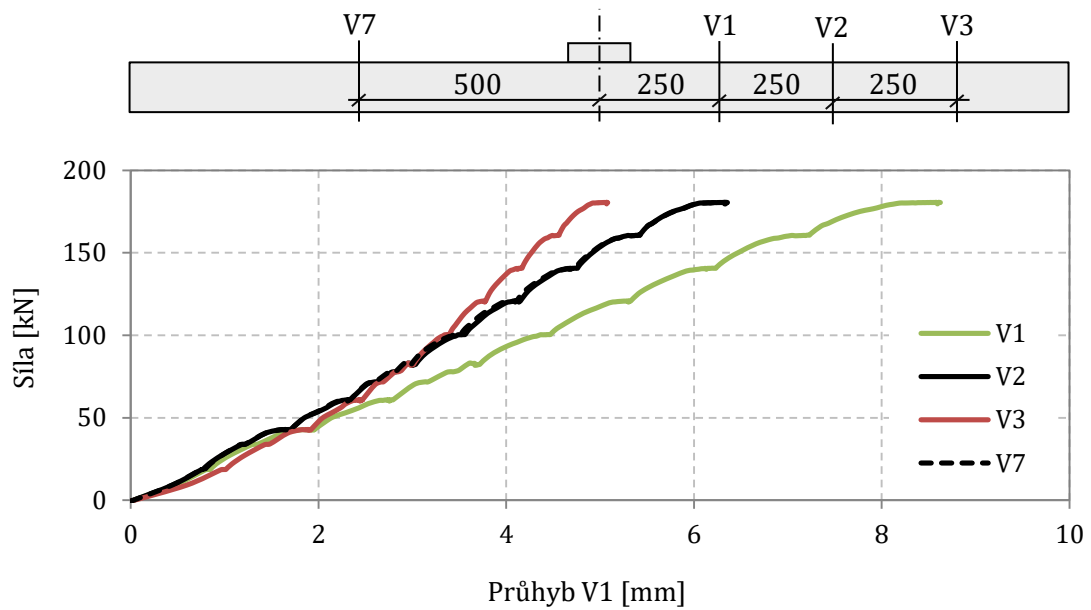
Obr. 4.7: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce A6

Na obr. 4.7b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T2 při zatěžovací síle o velikosti 155 kN.

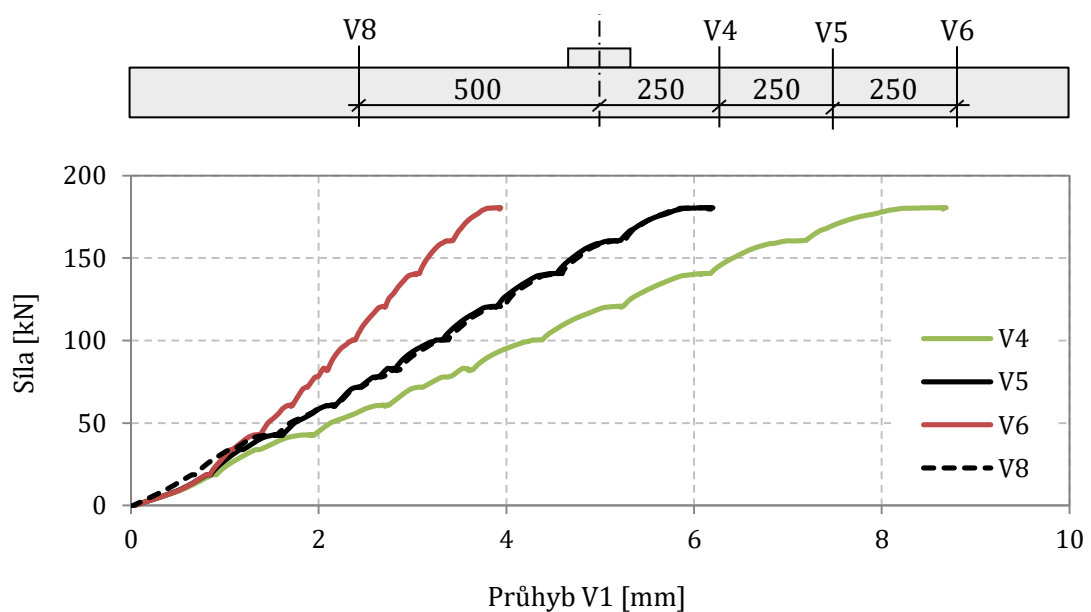
4.5 Naměřené výsledky desky B4

4.5.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky B4 byla 186,4 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V4, a to o hodnotě 8,9 mm. Z výsledků vyplývá, že se desku B4 podařilo zatěžovat symetricky poměrně úspěšně.



Obr. 4.8: Naměřené průhyby desky B4 při zatěžovací zkoušce ve směru X

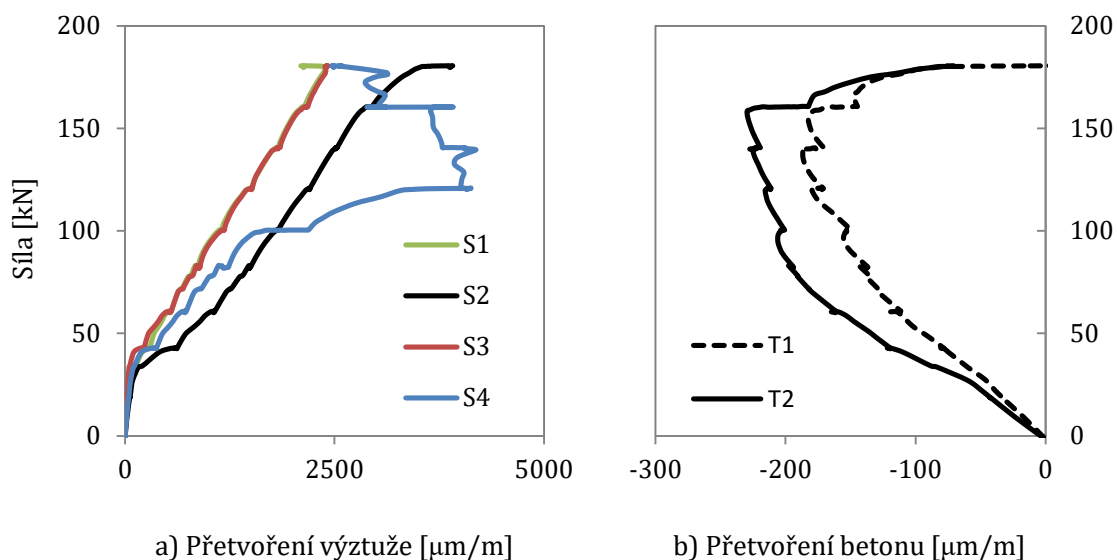


Obr. 4.9: Naměřené průhyby desky B4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.5.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.10a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru Y se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.



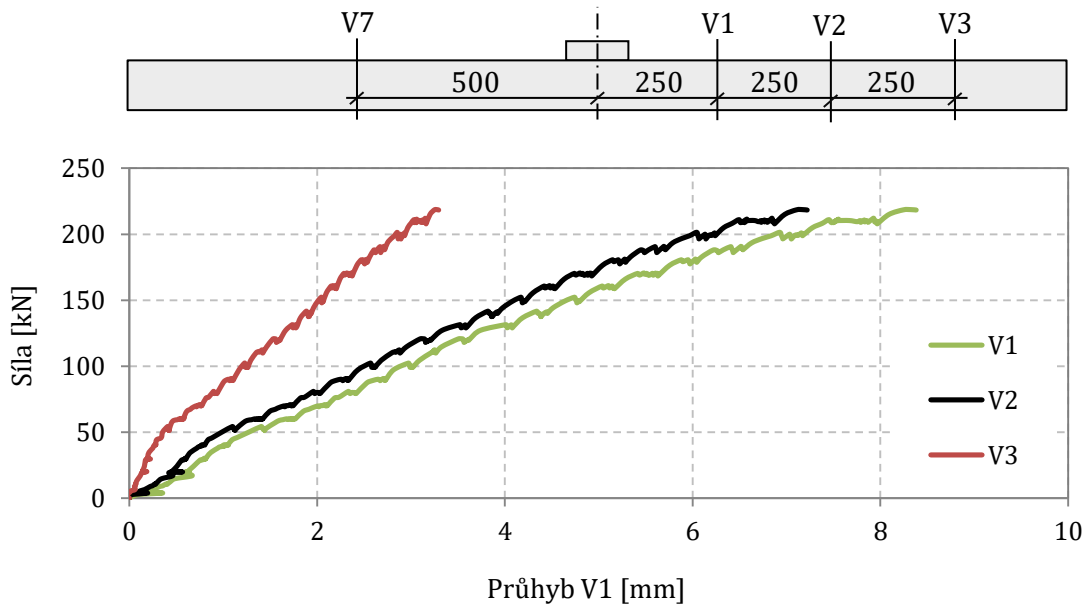
Obr. 4.10: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce B4

Na obr. 4.10b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T2 při zatěžovací síle o velikosti 158 kN.

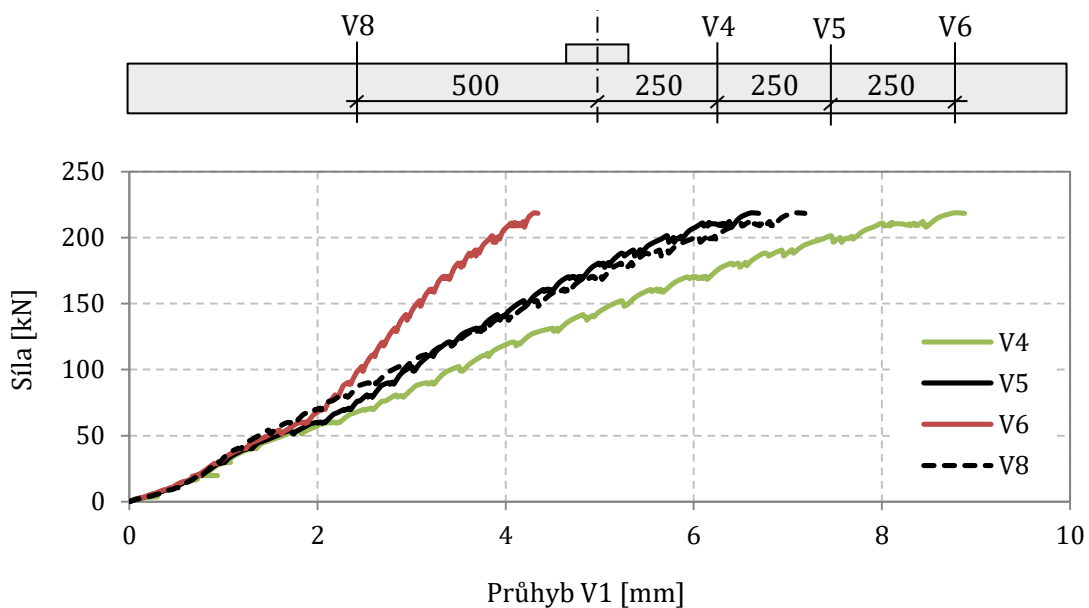
4.6 Naměřené výsledky desky B6

4.6.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky B6 byla 218,0 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V4, a to o hodnotě 8,8 mm. Snímač posunu umístěný v bodě V7 během zatěžovací zkoušky neměřil.



Obr. 4.11: Naměřené průhyby desky B6 při zatěžovací zkoušce ve směru X

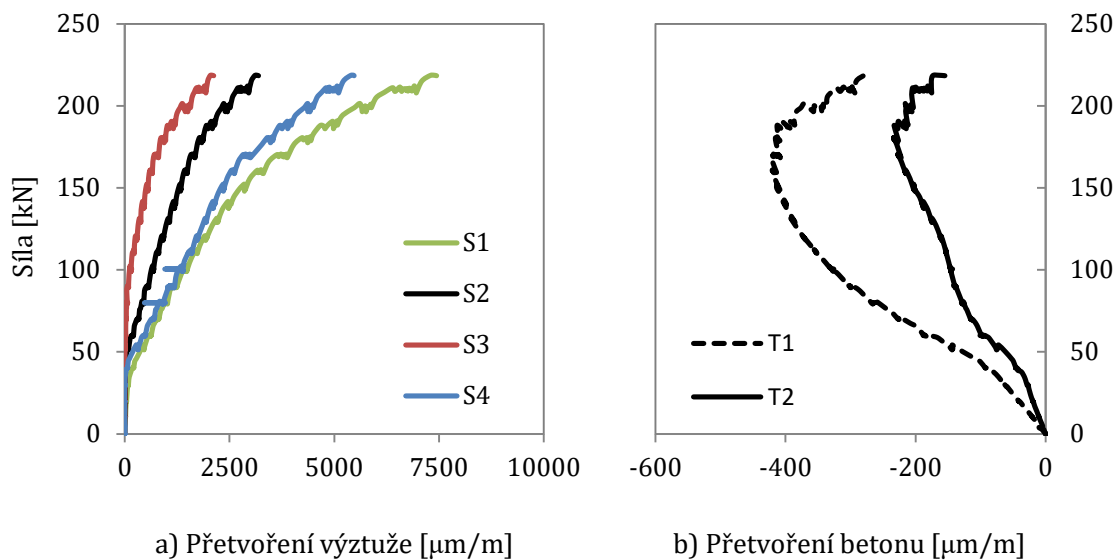


Obr. 4.12: Naměřené průhyby desky B6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.6.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.13a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru X se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.



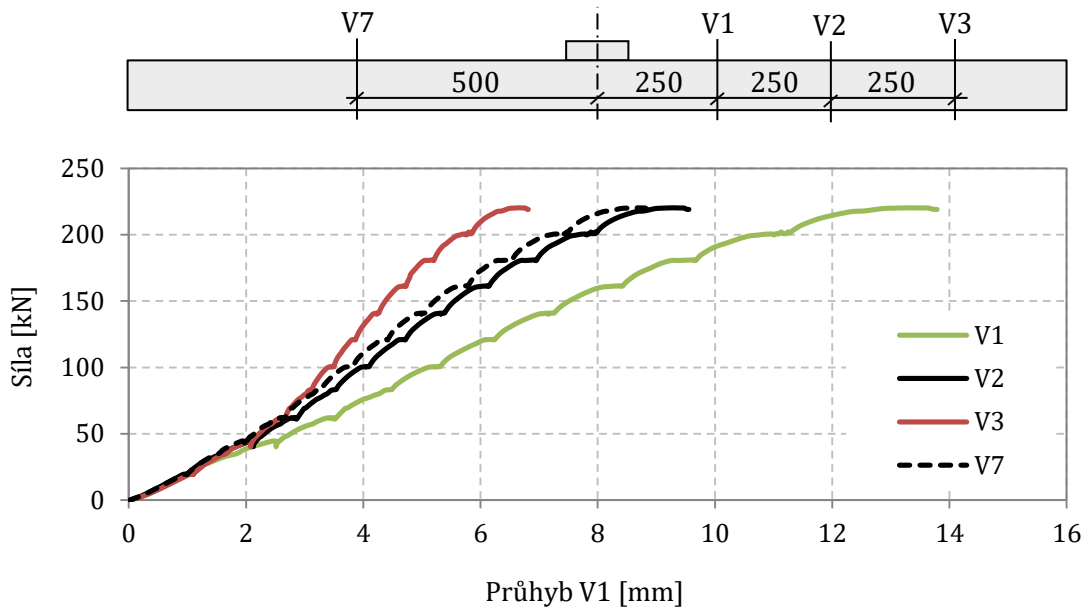
Obr. 4.13: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce B6

Na obr. 4.13b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T1 při zatěžovací síle o velikosti 160 kN.

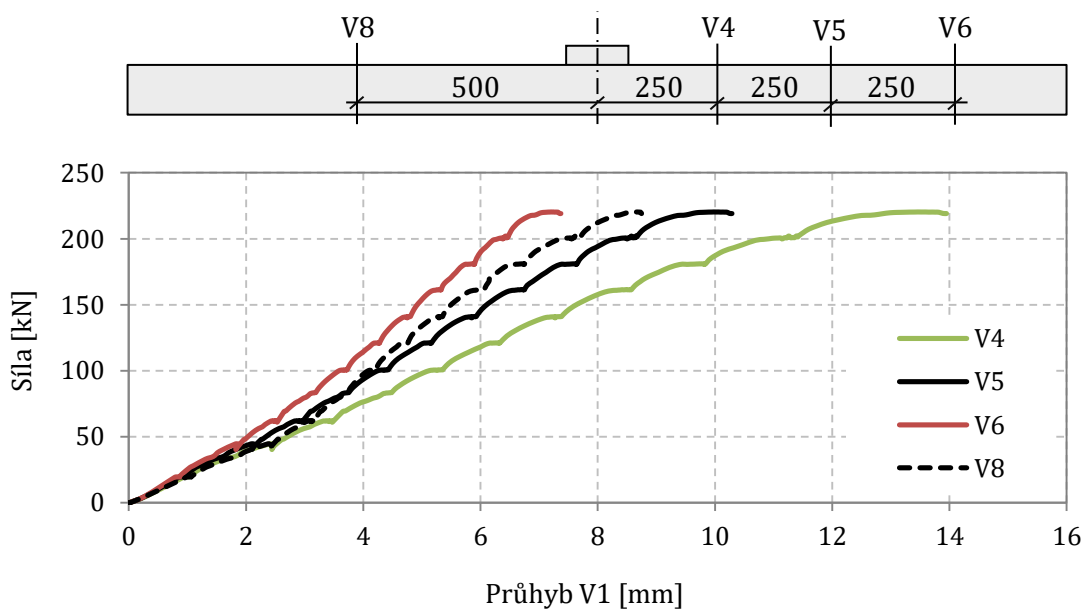
4.7 Naměřené výsledky desky C4

4.7.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky C4 byla 220,2 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V4, a to o hodnotě 13,5 mm. Z výsledků vyplývá, že se desku C4 podařilo úspěšně zatěžovat symetricky.



Obr. 4.14: Naměřené průhyby desky C4 při zatěžovací zkoušce ve směru X

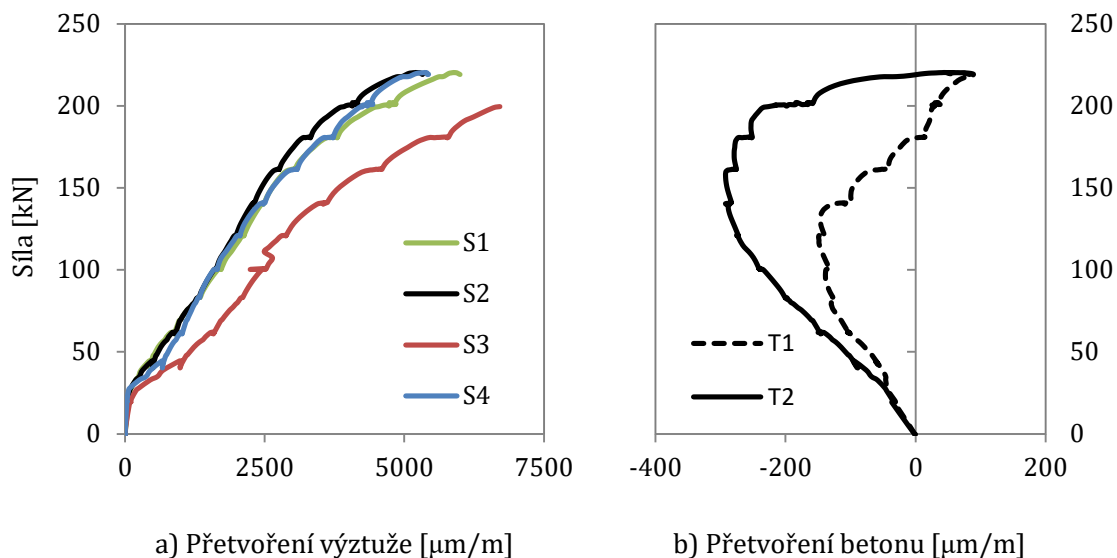


Obr. 4.15: Naměřené průhyby desky C4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.7.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.16a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru Y se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.



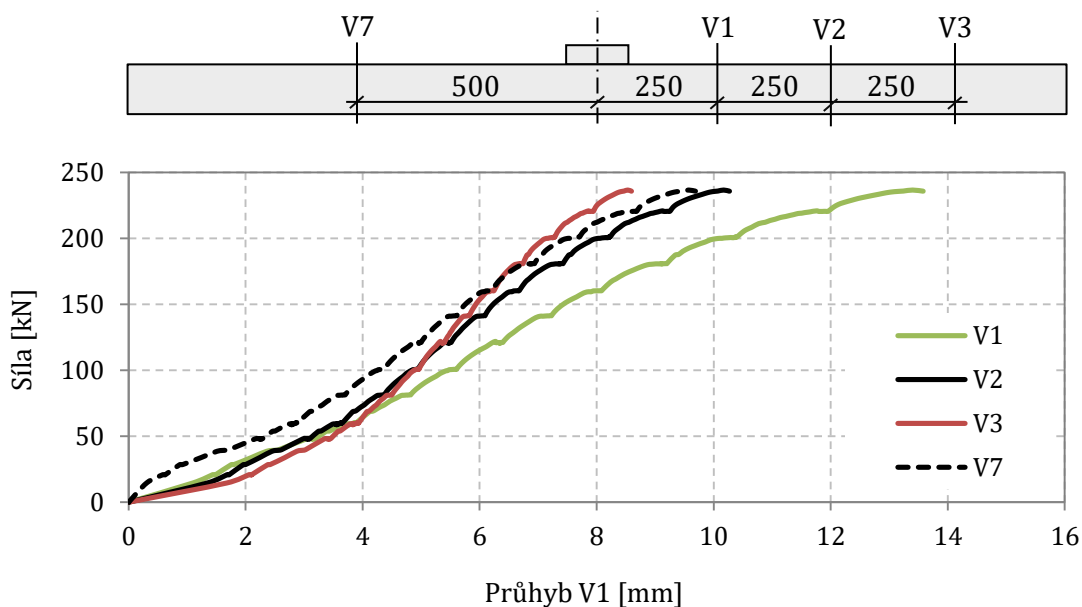
Obr. 4.16: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce C4

Na obr. 4.16b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T2 při zatěžovací síle o velikosti 157 kN.

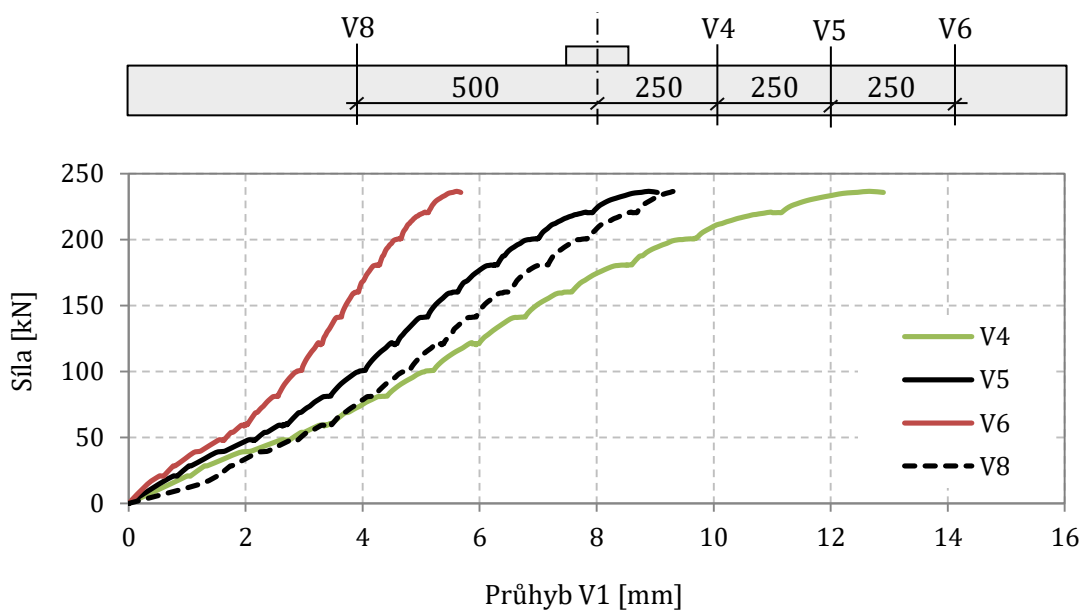
4.8 Naměřené výsledky desky C6

4.8.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

Maximální naměřená hodnota síly před porušením desky C6 byla 236,8 kN. Umístění jednotlivých snímačů průhybu, použitých v grafech níže, je znázorněno na obr. 3.11. Maximální průhyb byl naměřen v bodě V1, a to o hodnotě 13,4 mm. Desku C6 se podařilo ze všech testovaných vzorků zatěžovat symetricky nejméně.



Obr. 4.17: Naměřené průhyby desky C6 při zatěžovací zkoušce ve směru X



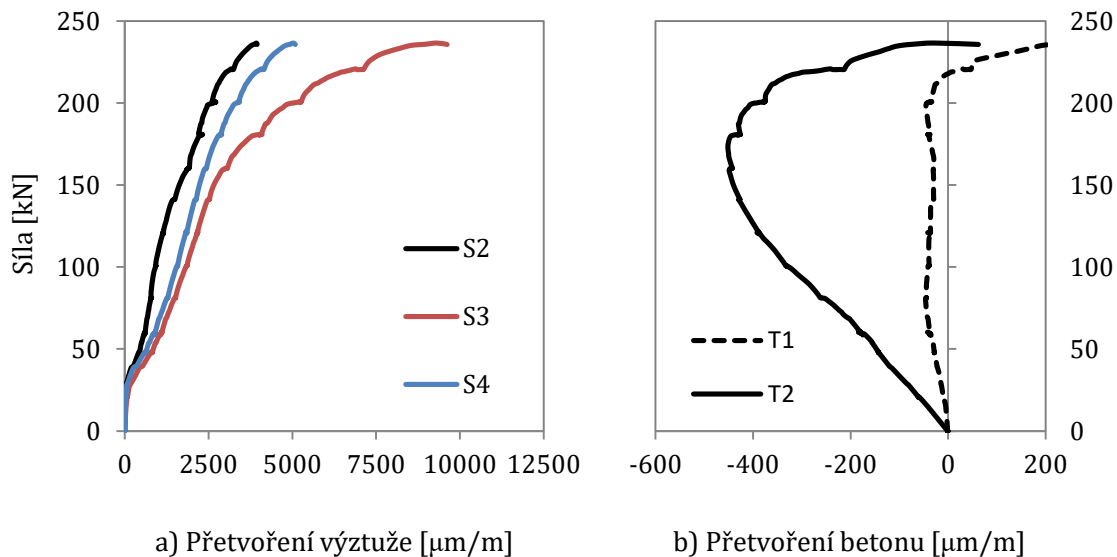
Obr. 4.18: Naměřené průhyby desky C6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y

4.8.2 Průběh napětí ve výztuži

Na obr. 4.19a jsou znázorněna přetvoření hlavní ohybové výztuže. Umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži jsou zobrazena na obr. 3.11. Tenzometry S1 a S2 jsou umístěny na shodném prutu výztuže v ose X, kde se tenzometr S1 nachází blíže středu desky. Kolmo, se stejnými rozestupy, se na prutu v ose Y nachází tenzometry S3 a S4, s tenzometrem S3 blíže středu.

Velikost napětí ve výztuži je ovlivněna polohou výztuže v desce. Jelikož jsou výztuže umístěny ortogonálně, výztuže ve směru Y se nachází o 10 mm blíže povrchu desky, než pruty v druhém směru. To má za následek vyšší napětí u výztuží s větší efektivní tloušťkou desky a tudíž vyšší poměrné přetvoření výztuže.

Během výroby desky C6 došlo k porušení tenzometru S1 a ten žádná data nenaměřil.



Obr. 4.19: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce C6

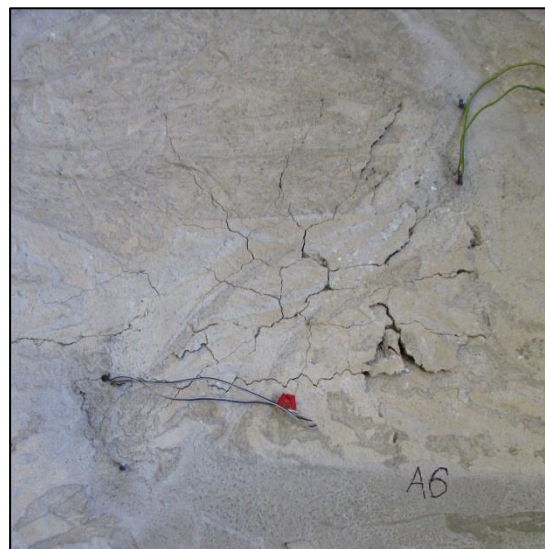
Na obr. 4.19b je zobrazen průběh napětí v betonu měřeného na povrchu desky. Tenzometry byly umístěny v blízkosti sloupové podpory dle schématu na obr. 3.11. Maximální přetvoření betonu bylo naměřeno tenzometrem T2 při zatěžovací síle o velikosti 159 kN.

4.9 Fotografie desek po uskutečnění experimentu

Následující obrázky (obr. 4.20, obr. 4.21 a obr. 4.22) znázorňují vzorky desek a rozvoj jejich trhlin po proběhlém zatěžování. Fotografie na levé části obrázku ukazují horní povrch desky (její tlačnou stranu), fotografie na pravé části poté spodní povrch desky (taženou stranu); orientace dle provedené zkoušky.



a) Horní strana desky



b) Spodní strana desky

Obr. 4.20: Porušení desky A6

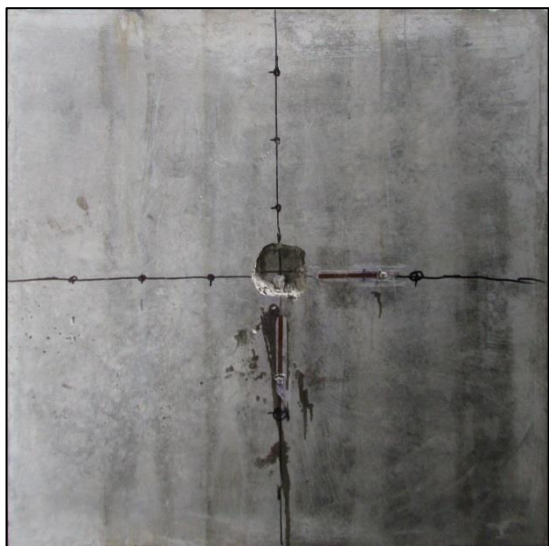


a) Horní strana desky

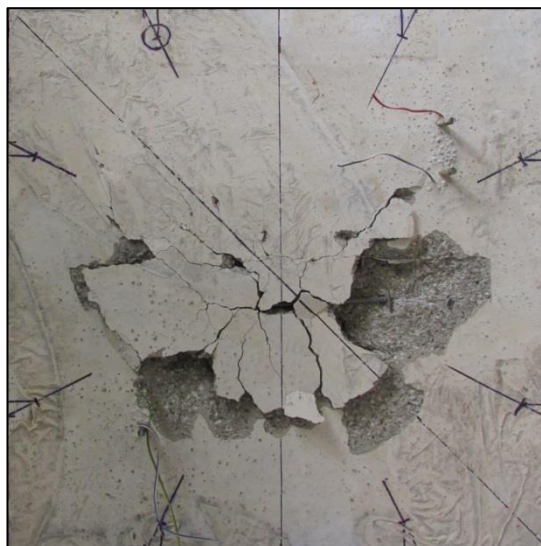


b) Spodní strana desky

Obr. 4.21: Porušení desky B4



a) Horní strana desky



b) Spodní strana desky

Obr. 4.22: Porušení desky B6

Fotografie čelních stran zbylých desek byly při přenosu z fotoaparátu poškozeny a nezachovaly se.

5 VÝPOČET METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

K ověření uskutečněných experimentů byl proveden kontrolní výpočet pomocí metody konečných prvků. Přesnost výpočtů závisí značně na nastavení materiálových charakteristik a vstupních parametrů z lomové mechaniky. Výpočet byl uskutečněn v programu Midas FEA, který umožňuje modelování nelineárního chování železobetonové konstrukce.

Deska byla modelována jako trojrozměrná úloha. Z důvodu zachování přesných rozměrů desky a jejích podpor, byla síť konečných prvků tvořena ze čtyřstěnů. V případě čtyřstěnů dokáže software vygenerovat síť i pro velmi komplexní tvary konstrukcí, oproti síti tvořené z kvádrů, kterou dokáže Midas FEA využít jen ve značně omezené míře.

Pro snížení časové náročnosti na provedení výpočtu byly desky modelovány s jednoosou symetrií. Ohybová výztuž byla v deskách modelována symetricky v obou směrech a jednotlivé pruty tedy mají stejnou efektivní výšku. Počet konečných prvků se u všech desek pohyboval okolo 27 000 s 15 000 stupni volnosti. Výpočetní model byl nastaven stejně jako reálný průběh zatěžovací zkoušky.

Deska byla umístěna na shodné podpory, tvořené betonovými krychlemi o délce hrany 150 mm a zatížení bylo v modelu vnášeno přes čtvercovou roznášecí plochu o stranách 75 mm respektive 130 mm. Z důvodů lepší stability výpočtu bylo provedeno deformační zatěžování modelu. Zatížení bylo rozděleno na 100 kroků, každý s maximálním počtem 300 iterací. Bod pro měření hodnoty konečné síly na mezi únosnosti se nacházela uprostřed roznášecí desky zatížení. Iterace byly prováděny dle Newton-Rhapsonovy metody.

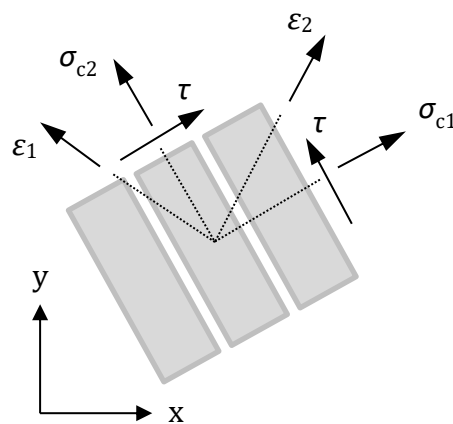
Sledované parametry (průhyb, napětí v podélné výztuži, napětí na povrchu desky) při výpočtu metodou konečných prvků byly shodné jako v experimentální studii. Měřena byla síla vyvozená deformací skrze sloupovou podporu, posun desky v bodech dle obr. 3.7, napětí v ohybové výztuži a napětí v betonu v blízkosti sloupu.

Výše zmíněné parametry byly srovnávány přímo s výsledky naměřených hodnot experimentů a jejich průběh je uveden v kapitolách 5.3 až 5.9.

5.1 Materiálový model betonu

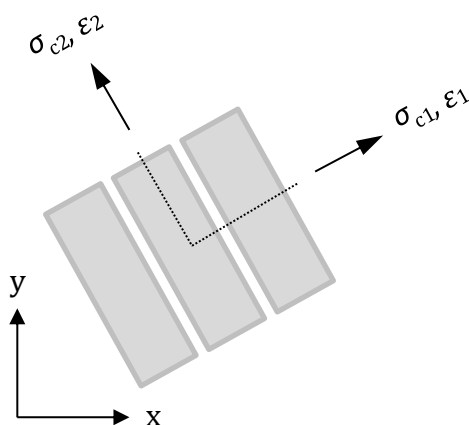
Materiálový model pro výpočet chování betonu s vlivem trhlin se v programu Midas FEA nazývá *Total Strain Crack*. Tento model využívá při simulování rozetřených trhlin v betonu dva druhy modelů: model fixovaných (pevných) trhlin a model rotovaných trhlin [9]. Pro oba modely platí, že trhlinka vznikne, když je v betonu překročena tahová pevnost.

V modelu fixovaných (pevných) trhlin je směr vzniklé trhliny v betonu kolmý na směr hlavního tahového napětí v době vzniku trhliny a během dalšího zatěžování se její směr již nemění. Model fixovaných trhlin je znázorněn na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Model fixovaných trhlin [9]

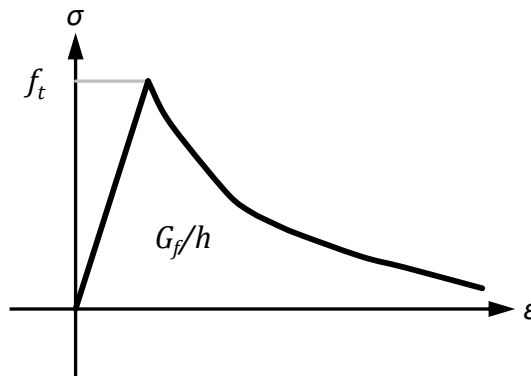
V modelu rotovaných trhlin se směr trhlin mění (trhlinka rotuje) v závislosti na změnách směru hlavního tahového napětí. V tomto případě nedojde ke vzniku smykového přetvoření v rovině trhliny, a tudíž jsou definována pouze dvě normálová napětí. Schéma modelu rotovaných trhlin je možné vidět na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Model rotovaných trhlin [9]

5.1.1 Změkčení betonu v tahu (*Tension softening*)

V modelu je zahrnut vliv změkčení betonu v tahu dle vztahu navrhnutým dle Hordijka, Cornelissena a Reinhardta [10,11].



Obr. 5.3: Tahové změkčení betonu dle modelu Hordijka

Na obrázku obr. 5.3 je možné vidět, že změkčení betonu v tahu je získáno na základě tří parametrů: f_{ct} , h a G_f .

Kde f_{ct} je pevnost betonu v tahu,
 h je šířka pásu koncentrovaných trhlin (*crack band width*),
 G_f je lomová energie v tahu (*tensile fracture energy*).

Hodnota velikosti tahové únosnosti betonu nebyla při testování desek experimentálně zjišťována. Pro účely numerické simulace byla tedy její hodnota vyčíslena ze vztahů uvedených v eurokódu EN 1991-1-1 [4]. Hodnota pevnosti betonu v tahu f_{ct} pro betony s válcovou pevností v tlaku f_c menší než 50 MPa je rovna

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_c^{\frac{2}{3}}. \quad (5.1)$$

Pro beton s válcovou pevností v tlaku f_c větší než 50 MPa, což je případ desky B6, platí výpočetní vztah

$$f_{ct} = 2,12 \cdot \ln[1 + 0,1f_c]. \quad (5.2)$$

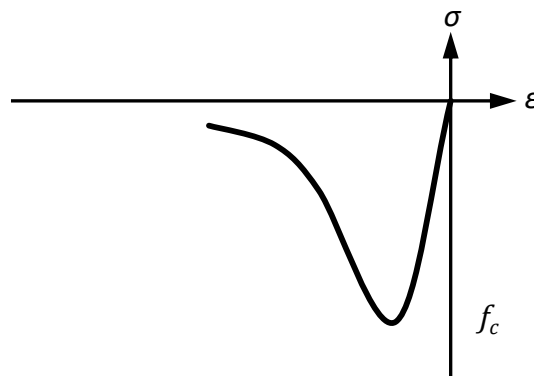
Šířka pásu koncentrovaných trhlin h dle doporučení uvedeného v manuálu softwaru [9] odpovídá hustotě sítě konečných prvků. V případě této analýzy je tedy uvažováno s hodnotou h o velikosti 25 mm.

Lomová energie G_f je poté rovna

$$G_f = 0,000025 \cdot f_{ct} \quad (5.3)$$

5.1.2 Chování betonu v tlaku (*Compressive behavior*)

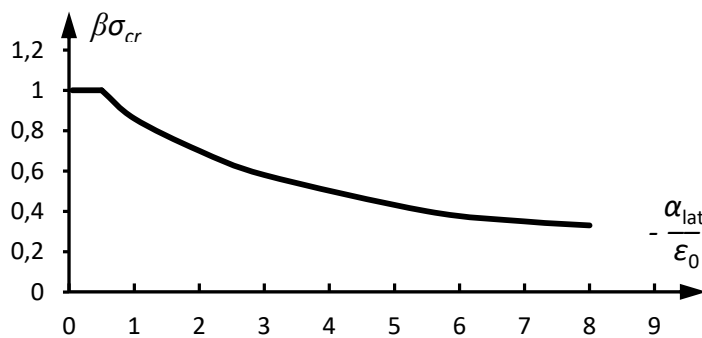
Pro chování betonu v tlaku je v programu použit model, který navrhl Thorenfeldt [12]. Tlakové chování betonu v modelu *Total Strain crack* je obecně nelineární funkce mezi napětím a přetvořením v daném směru. Jediným potřebným parametrem k zadání funkce v softwaru Midas FEA je hodnota f_c válcové pevnosti betonu v tlaku. Tvar funkce je možné vidět na obr. 5.4.



Obr. 5.4: Model chování betonu v tlaku dle Thorenfeldta

5.1.3 Účinek příčných trhlin (*Lateral Crack effect*)

V potrhaném betonu způsobují velká tahová přetvoření kolmá k hlavním tlakovým napětím redukcí jeho tlakové pevnosti [9]. Vztah, kterým je tento jev v softwaru popisován, vytvořili Vecchio a Collins [13].



Obr. 5.5: Redukce tlakové pevnosti účinkem příčných trhlin dle Vecchia a Collinse

5.2 Vstupní hodnoty materiálů výpočetního modelu

Veškeré parametry nutné pro zadání materiálových charakteristik modelu do programu Midas FEA jsou uvedeny v následujících tabulkách. Tab. 5.1 obsahuje hodnoty pro výpočet desek A4, A6, desky B4 a desek C4 a C6, které byly betonovány ve stejný čas, a tudíž mají shodné vlastnosti betonu.

Tab. 5.1: Parametry materiálových charakteristik modelu konečných prvků

Materiál	Parametr	Označ.	Hodnota	Jednotka
Beton	Modul pružnosti	E_c	22 500	MPa
	Válcová pevnost	f_c	25,6	MPa
	Pevnost v tahu	f_{ct}	2,61	MPa
	Poissonovo číslo	μ	0,2	-
	Lomová energie	G_f	131	N/m
	Šířka pásu trhlin	h	25	mm
	Typ modelu		Total strain crack	
Změkčení betonu		Hordijk		
Tlaková funkce		Thorenfeldt		
Vliv laterálních trhlin		Vecchio a Collins		
Model trhlin		Fixovaný		
Ocel	Modul pružnosti	E_s	200 000	MPa
	Mez kluzu	f_c	500	MPa
	Typ modelu		Von Mises	

Rozdílné parametry betonu testované desky B6 jsou uvedeny v tab. 5.2.

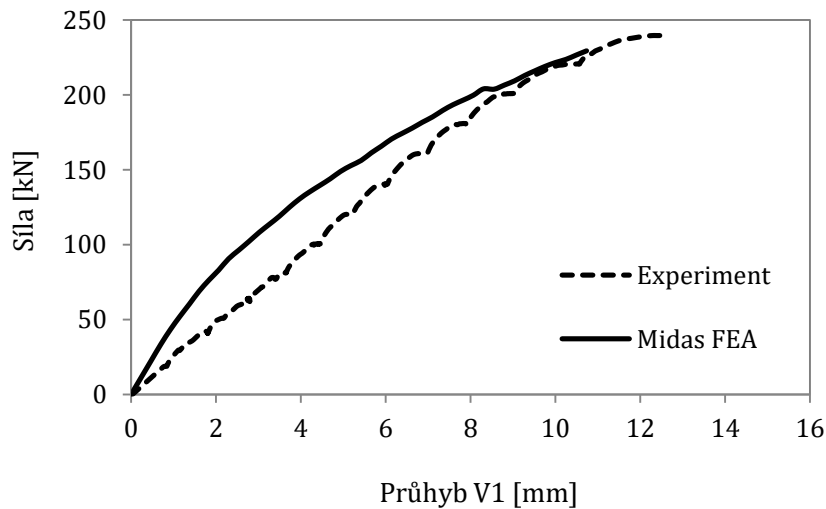
Tab. 5.2: Parametry materiálových charakteristik modelu konečných prvků

Materiál	Parametr	Označ.	Hodnota	Jednotka
Beton	Modul pružnosti	E_c	30 500	MPa
	Válcová pevnost	f_c	50,3	MPa
	Pevnost v tahu	f_{ct}	3,91	MPa
	Poissonovo číslo	μ	0,2	-
	Lomová energie	G_f	147	N/m
	Šířka pásu trhlin	h	25	mm

5.3 Srovnání výsledků desky A4

5.3.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

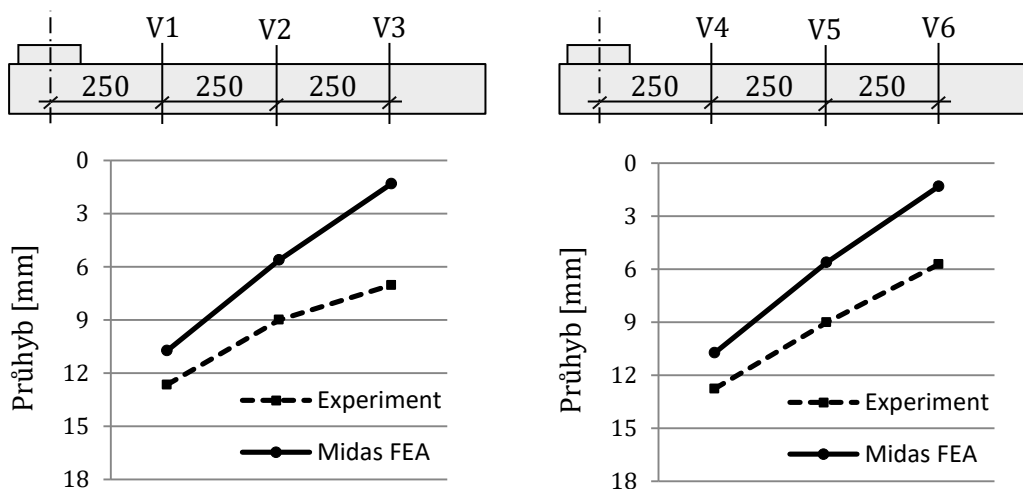
Srovnání průběhu zatěžování uskutečněných experimentů a numerické analýzy programem Midas FEA je provedeno dle průhybu v bodě V1 umístěném dle obr. 3.7. Maximální dosažená síla na hranici porušení desky A4 byla v softwaru 229,4 kN.



Obr. 5.6: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky A4

5.3.2 Maximální průhyby při porušení desky

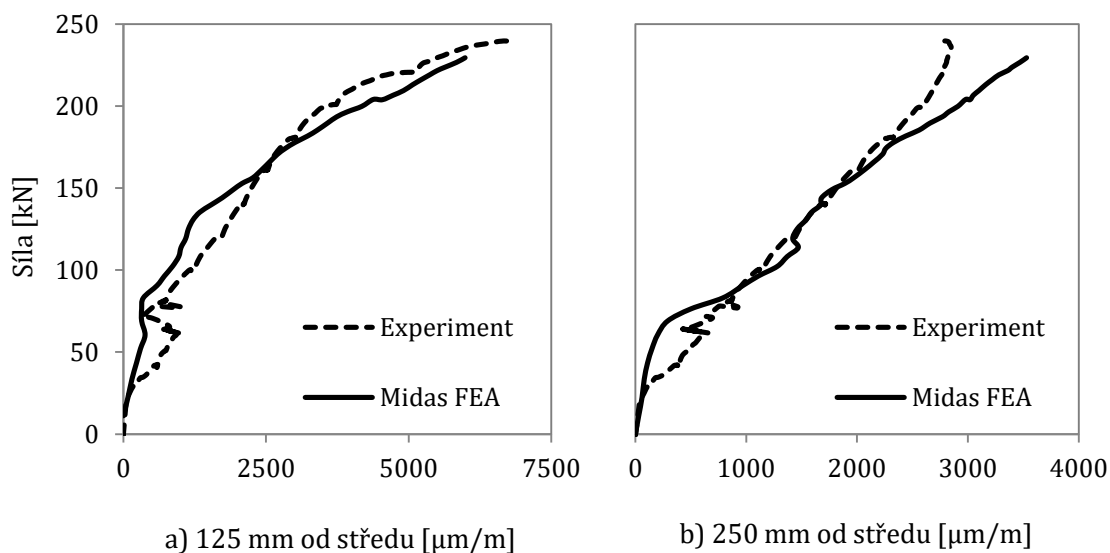
Hlavní rozdíl ve velikosti průhybu je možné přisoudit použitím pryžových podložek v experimentu mezi podporami a samotnou deskou, jejichž vliv byl v modelu zanedbán. Rozdíly v pootočení mezi body V1 a V2 respektive V4 a V5 jsou však značně menší.



Obr. 5.7: Maximální průhyby desky A4: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.3.3 Průběh napětí v ocelové výztuži

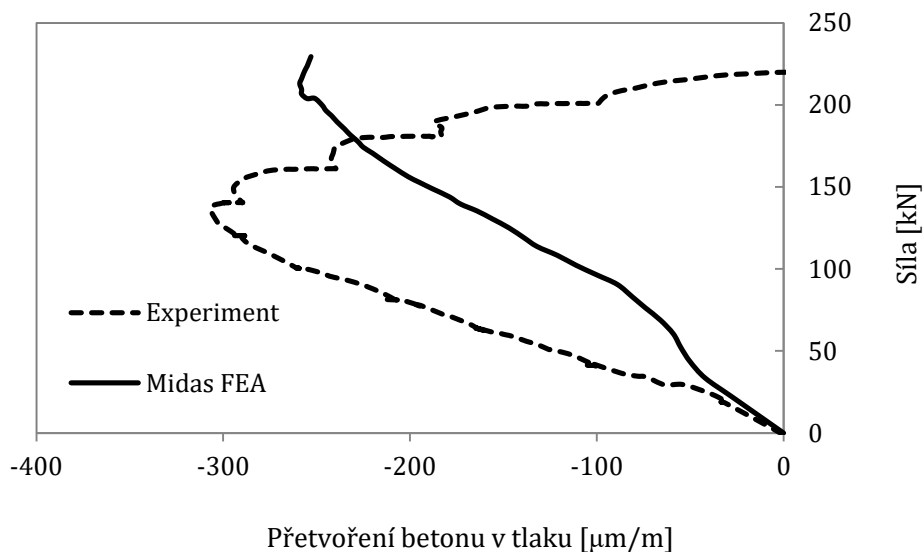
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístěných jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.8: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.3.4 Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěnými dle obr. 3.7.

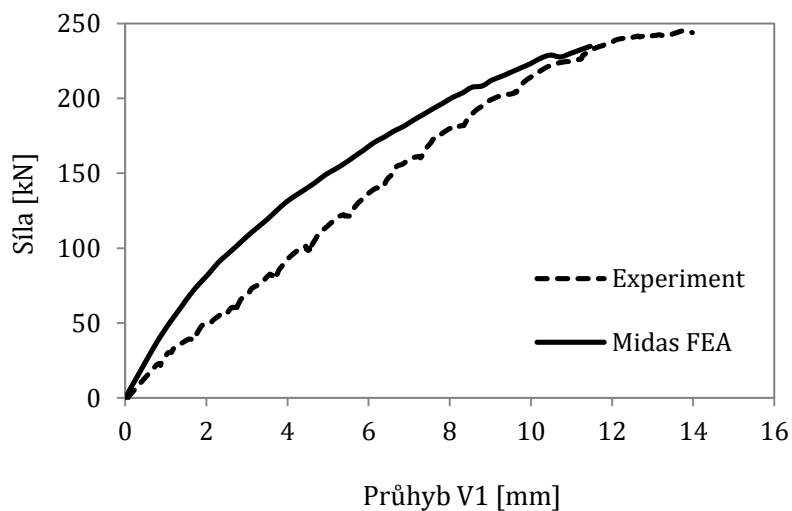


Obr. 5.9: Přetvoření betonu na horním povrchu desky A4

5.4 Srovnání výsledků desky A6

5.4.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

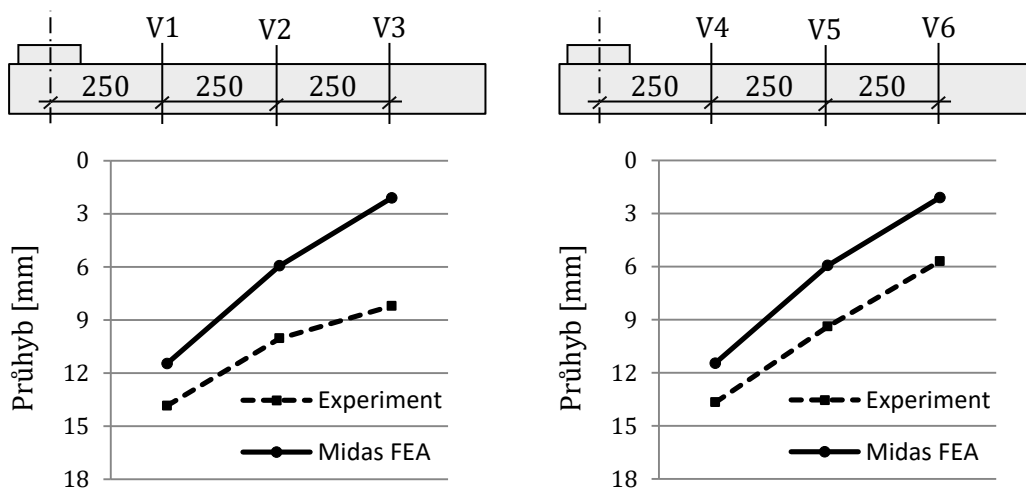
Průběh zatěžovací zkoušky pro desku A6 je velmi podobný desce A4. Maximální dosažená síla na hranici porušení desky byla v numerické studii 234,9 kN. Přírůstek v únosnosti použitím smykové výztuže o průměru 6 mm, oproti průměru 4 mm použitým v desce A4, činí přibližně 5 kN jak v provedeném experimentu, tak ve výsledcích ze softwaru.



Obr. 5.10: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky A6

5.4.2 Maximální průhyby při porušení desky

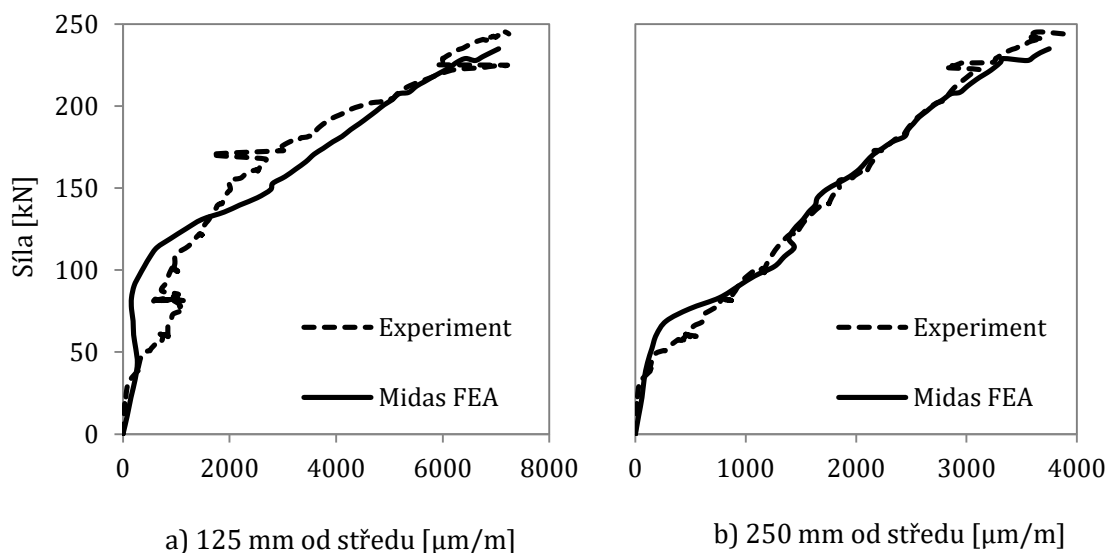
Oproti desce A4 byl v případě experimentu i numerické analýzy průhyb desky A6 větší přibližně o 1 mm. Naměřený maximální průhyb desky A6 byl u softwaru 11,5 mm.



Obr. 5.11: Maximální průhyby desky A6: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.4.3 Průběh napětí v ocelové výztuži

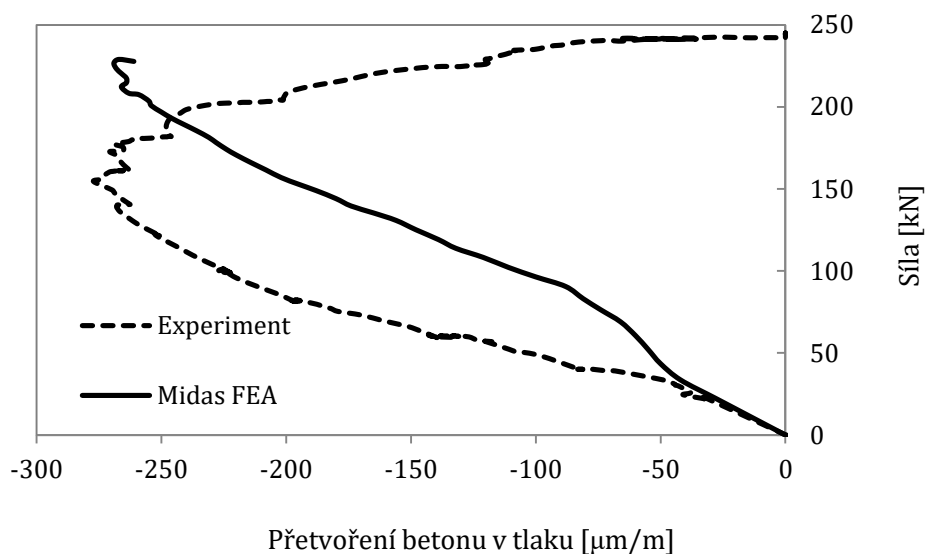
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístěných jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.12: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.4.4 Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěných dle obr. 3.7.

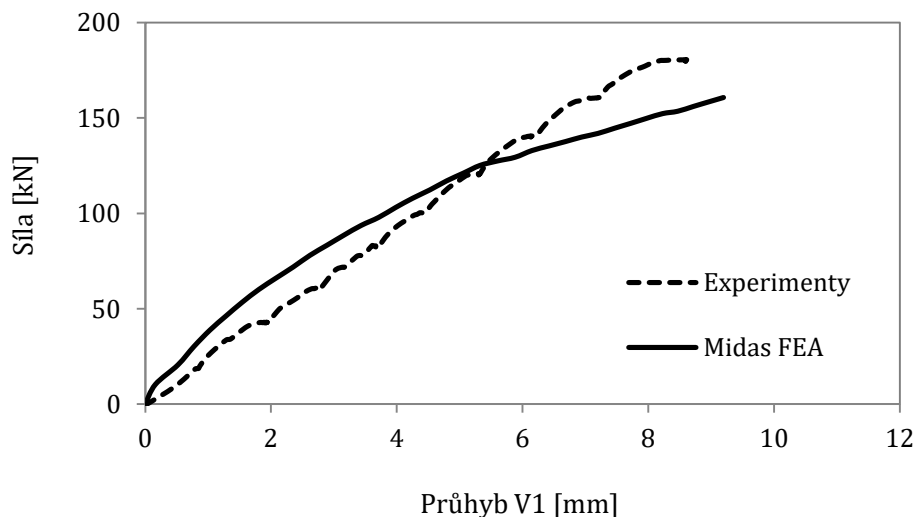


Obr. 5.13: Přetvoření betonu na horním povrchu desky A6

5.5 Srovnání výsledků desky B4

5.5.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

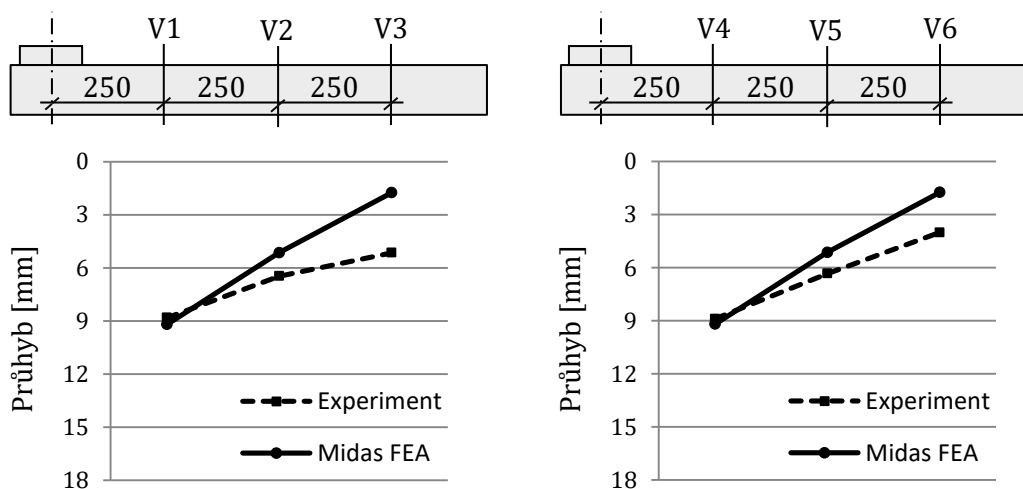
Na průběhu zatěžování desky B4 je možné vidět menší vliv pryžových podložek, který je ovlivněn menší celkovou únosností desky. Maximální dosažená síla na hranici porušení desky byla v numerické analýze 160,7 kN.



Obr. 5.14: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky B4

5.5.2 Maximální průhyby při porušení desky

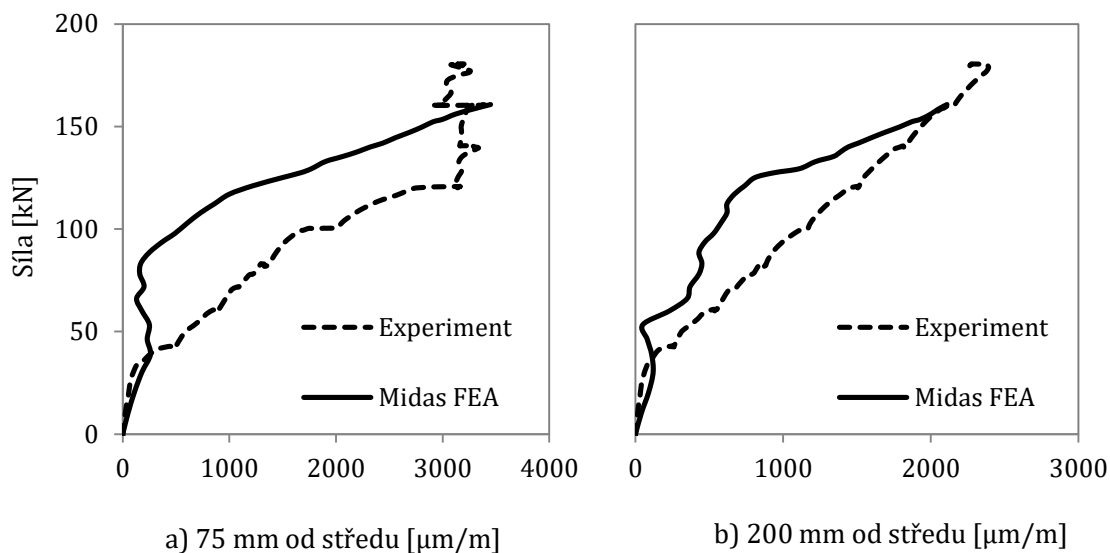
Při porušení desky vykazuje výpočet v programu Midas FEA větší hodnotu pootočení než v případě experimentu. Maximální průhyby v bodě jsou v obou případech velmi podobné. Maximální naměřená hodnota v softwaru byla 9,2 mm.



Obr. 5.15: Maximální průhyby desky B4: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.5.3 Průběh napětí v ocelové výztuži

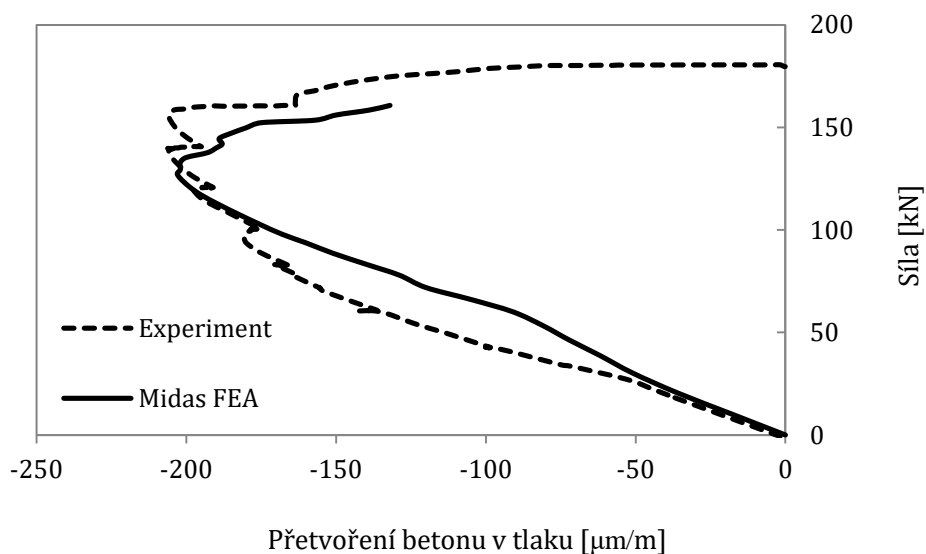
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístěných jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.16: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.5.4 Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěných dle obr. 3.7.

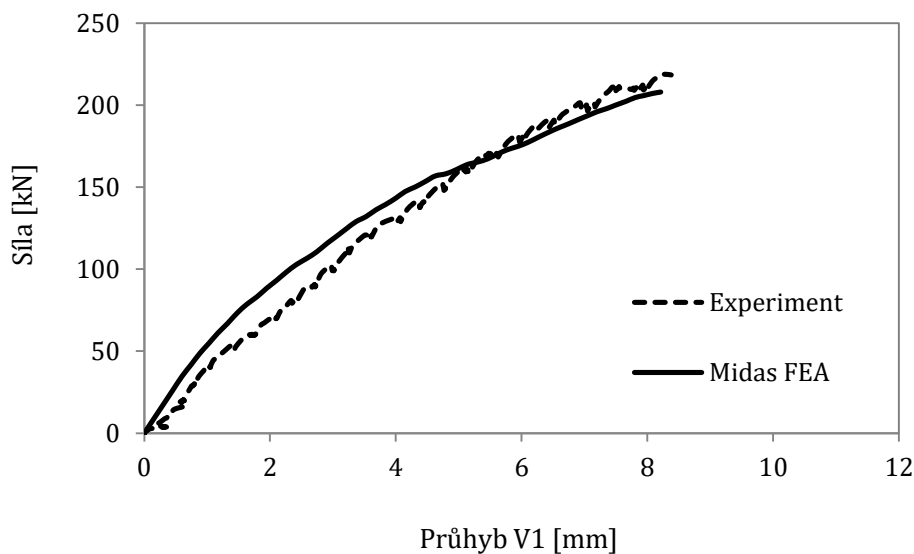


Obr. 5.17: Přetvoření betonu na horním povrchu desky B4

5.6 Srovnání výsledků desky B6

5.6.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

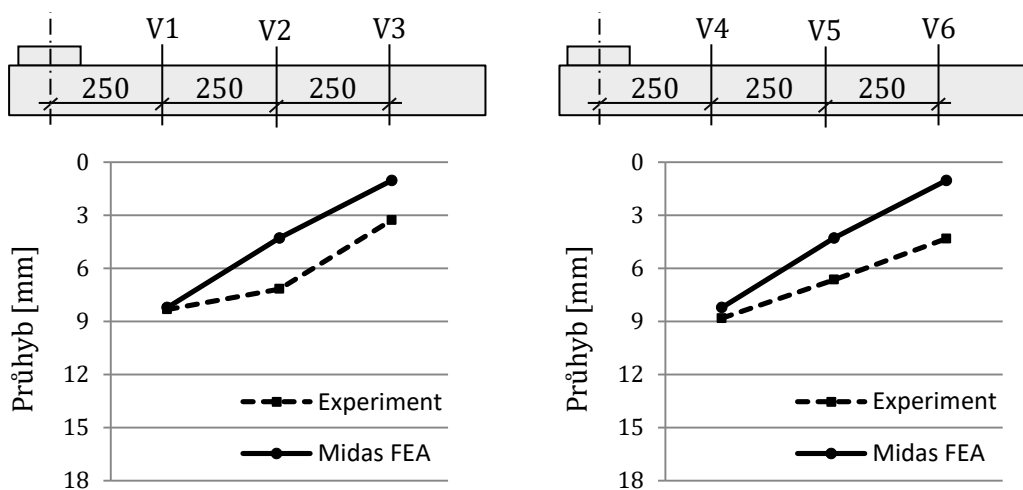
Deska B6 byla tvořena betonem o téměř dvojnásobné pevnosti ve srovnání s deskou B4. Maximální síla v bodě selhání desky byla v numerické analýze 207,9 kN. Vypočtený průběh zatěžování reprezentuje uskutečněný experiment ze všech testovaných desek nejlépe.



Obr. 5.18: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky B6

5.6.2 Maximální průhyby při porušení desky

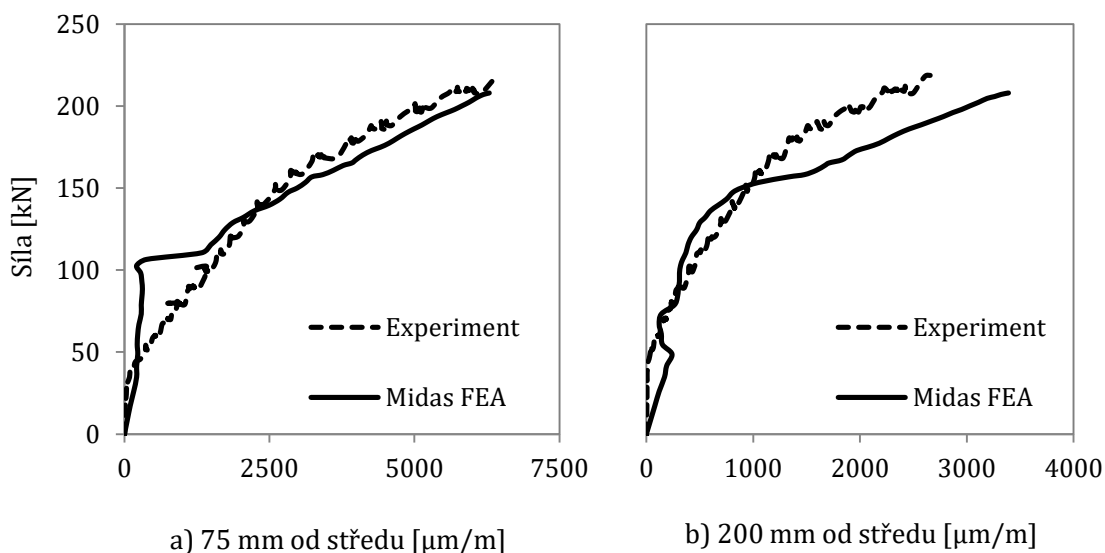
Díky vyšší pevnosti betonu a většímu modulu pružnosti jsou maximální dosažené průhyby v době porušení desky menší, než v případě desky B4.



Obr. 5.19: Maximální průhyby desky B6: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.6.3 Průběh napětí v ocelové výztuži

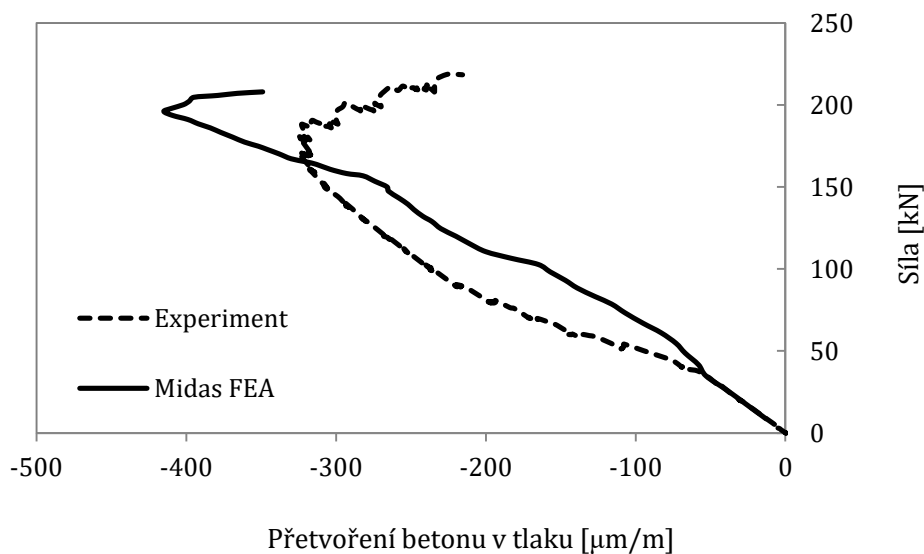
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístění jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.20: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.6.4 Průběh tlakových napětí v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěných dle obr. 3.7.

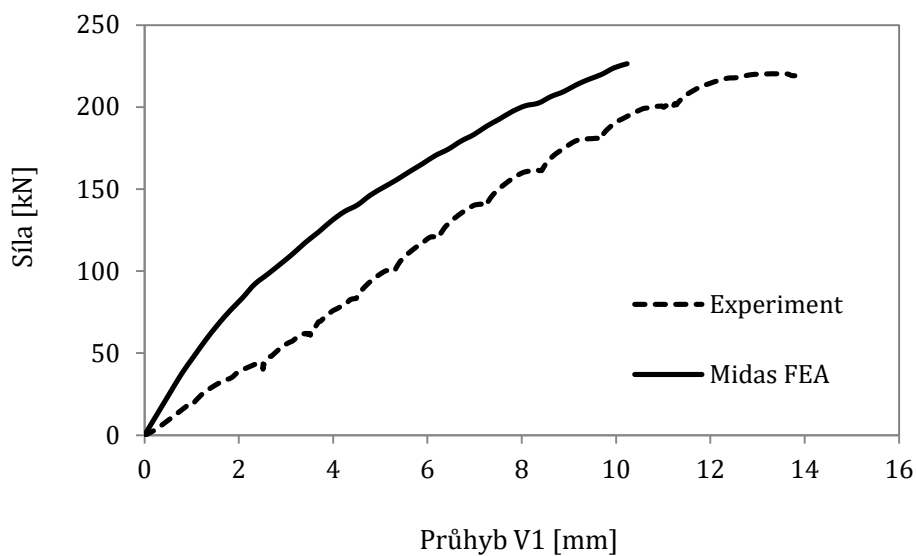


Obr. 5.21: Přetvoření betonu na horním povrchu desky B6

5.7 Srovnání výsledků desky C4

5.7.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

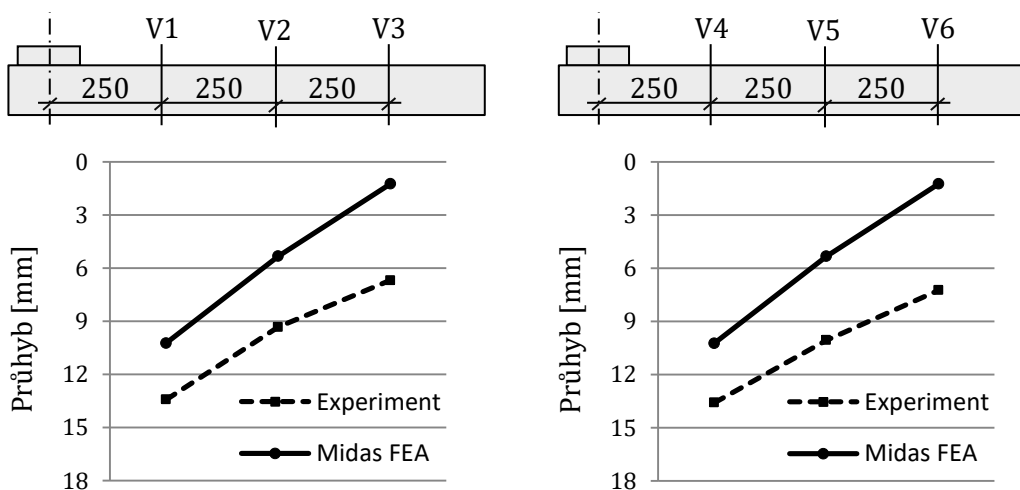
Deska C4 byla jedinou deskou u které byla hodnota vypočtené maximální únosnosti v protlačení větší, než hodnota zjištěná experimentálně. Softwarem stanovená maximální hodnota dosažené síly byla 226,4 kN.



Obr. 5.22: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky C4

5.7.2 Maximální průhyby při porušení desky

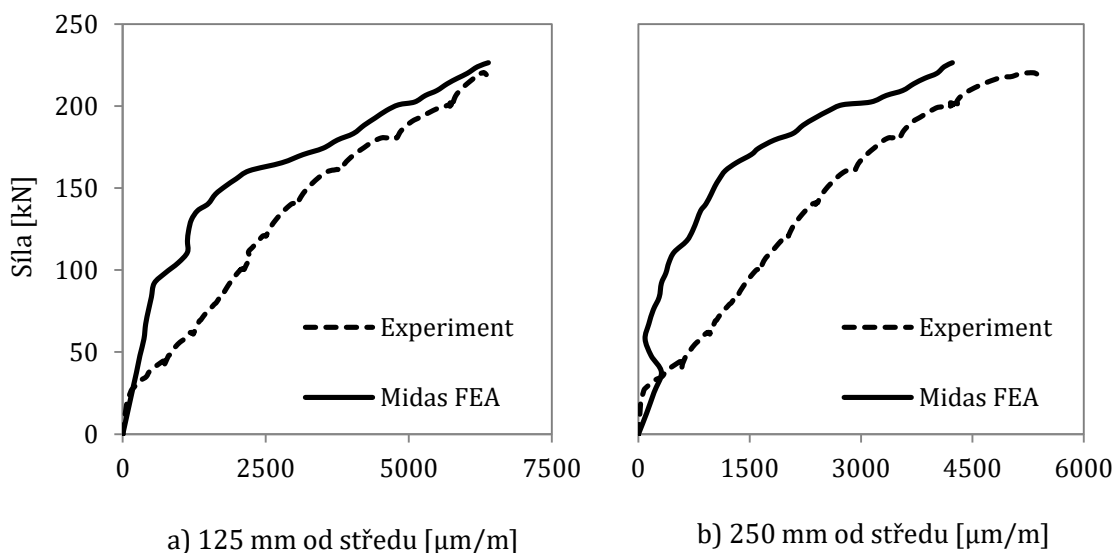
Dosažené průhyby desky C4 jsou podobné průhybům u desek typu A. Maximální vypočtený průhyb desky v bodě V1, respektive V4, byl 10,2 mm.



Obr. 5.23: Maximální průhyby desky C4: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.7.3 Průběh přetvoření ocelové výztuže

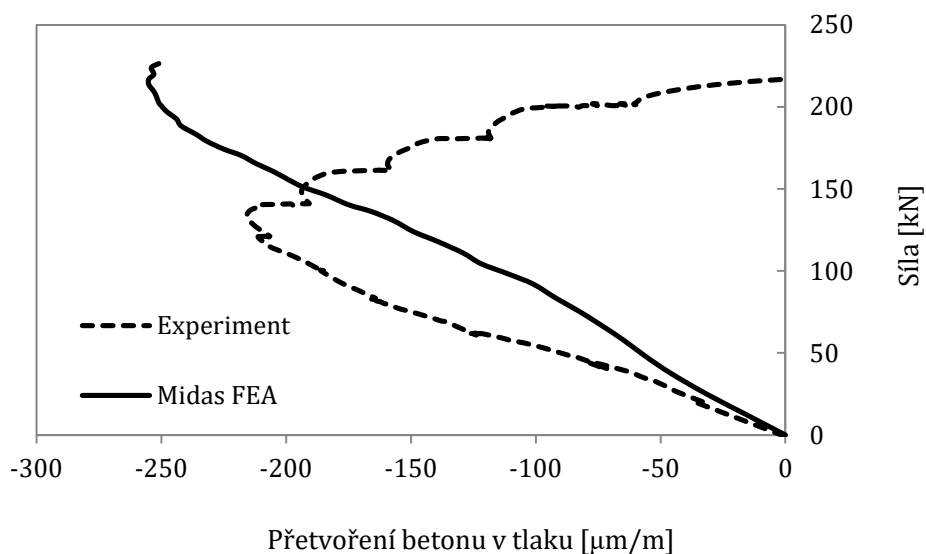
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístěných jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.24: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.7.4 Průběh přetvoření tlaceného v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěných dle obr. 3.7.

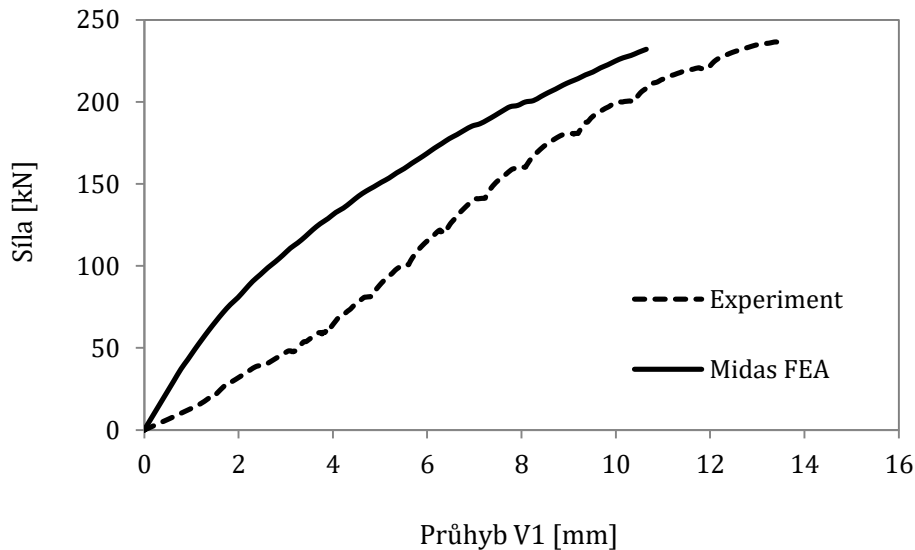


Obr. 5.25: Přetvoření betonu na horním povrchu desky C4

5.8 Srovnání výsledků desky C6

5.8.1 Porovnání průběhu zatěžování během testování

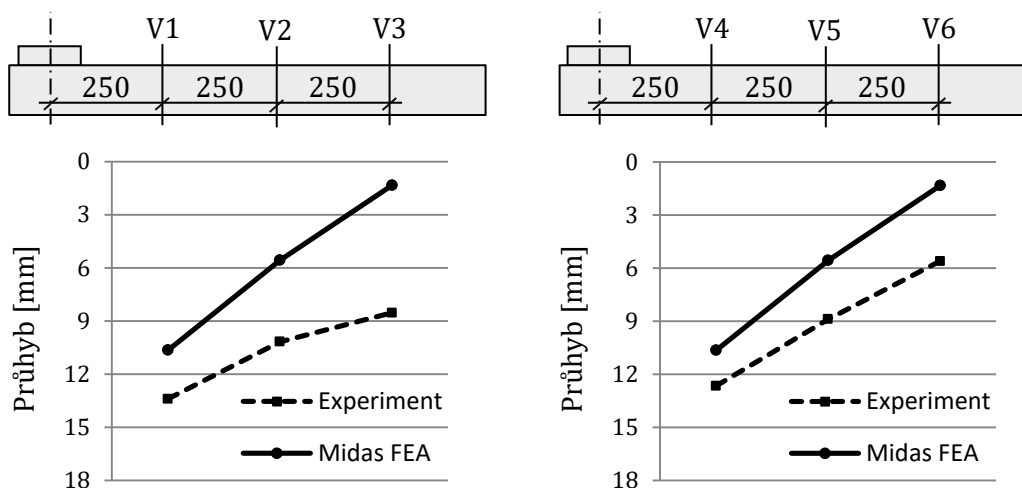
Maximální dosažená síla na hranici porušení desky C6 byla v softwaru 232,1 kN.



Obr. 5.26: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky C6

5.8.2 Maximální průhyby při porušení desky

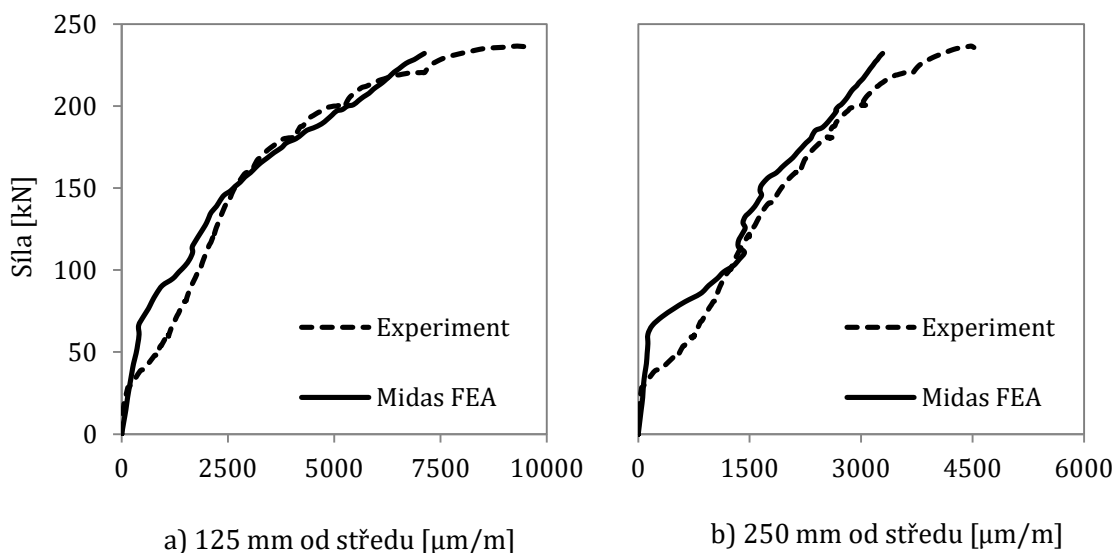
Oproti desce C4 byl naměřený maximální průhyb desky mírně větší a dosahoval hodnoty 10,6 mm pro bod V1, respektive bod V4.



Obr. 5.27: Maximální průhyby desky C6: a) ve směru X, b) ve směru Y

5.8.3 Průběh přetvoření ocelové výztuže

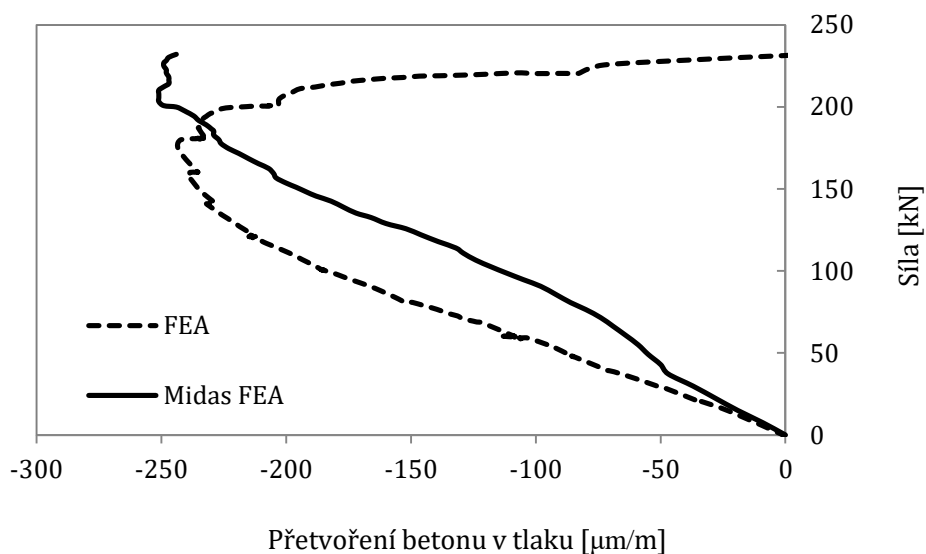
Naměřené výsledky přetvoření z metody konečných prvků jsou srovnávány s průměrem hodnot dvojic tenzometrů S1 a S3 umístěných blíže podpory, respektive S2 a S4 umístěných dále od podpory. Poloha umístěných jednotlivých tenzometrů na výztuži je zaznačena na obr. 3.11.



Obr. 5.28: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech

5.8.4 Průběh přetvoření tlaceného v betonu na povrchu desky

Přetvoření v betonu na povrchu desky v blízkosti místa zatěžování bylo srovnáváno s průměrem hodnot tenzometrů T1 a T2 umístěných dle obr. 3.7.



Obr. 5.29: Přetvoření betonu na horním povrchu desky C6

5.9 Srovnání hodnot výpočtu

V následujících tabulkách je možné vidět srovnání hlavních vypočtených hodnot v programu Midas FEA s hodnotami naměřenými v experimentální studii. Síla na mezi únosnosti v protlačení je porovnávána pomocí poměru test/model, kde se hodnoty poměru větší než 1,0 řadí na stranu bezpečnou a podhodnocují tedy skutečnou únosnost desky a hodnoty nižší než 1,0 únosnost nadhodnocují.

Tab. 5.3: Maximální dosažená síla v čase porušení desky

Metoda	Hodnota	A4	A6	B4	B6	C4	C6
Experiment	[kN]	240,3	245,2	186,4	218,0	220,2	236,8
Midas FEA	[kN]	229,4	234,9	160,7	207,9	226,4	232,1
Test/Model	[-]	1,05	1,04	1,16	1,05	0,97	1,02

Průhyb zjištěný softwarem je srovnáván s průměrnou hodnotou ze snímačů v bodech V1, respektive bodech V4, umístěných podle obr. 3.7. Hodnoty pootočení desek jsou poté spočteny z průměrů hodnot ve dvojicích bodů V1 a V2, respektive V4 a V5.

Tab. 5.4: Maximální průhyb v čase porušení desky

Metoda	Hodnota	A4	A6	B4	B6	C4	C6
Experiment	[kN]	12,7	13,7	8,9	8,6	13,5	13,0
Midas FEA	[kN]	10,7	11,5	9,2	8,2	10,2	10,6
Absolutní rozdíl	[mm]	2,0	2,3	0,3	0,4	3,3	2,4
Relativní rozdíl	[%]	18,7	19,1	3,3	4,9	32,4	22,6

Tab. 5.5: Pootočení v čase porušení desky

Metoda	Hodnota	A4	A6	B4	B6	C4	C6
Experiment	[rad]	0,030	0,032	0,020	0,013	0,030	0,028
Midas FEA	[rad]	0,041	0,044	0,033	0,031	0,039	0,041
Absolutní rozdíl	[mm]	0,011	0,012	0,013	0,018	0,009	0,013
Relativní rozdíl	[%]	26,8	27,3	39,4	58,1	23,1	31,7

6 NAVRŽENÁ METODA PRO VÝPOČET PROTLAČENÍ

6.1 Úvod k navržené metodě

Stávající metody předpovědi únosnosti lokálně podepřených desek v protlačení dosahují značných rozptylů přesnosti. Toto tvrzení je platné zejména pro desky opatřené smykovou výztuží. Přestože je možné pomocí těchto norem a doporučení posoudit chování během protlačení desek bez smykové výztuže poměrně uspokojivě, v případě smykově vyztužených desek jsou odchylky od skutečného stavu u jednotlivých metod závažnější.

Vztah pro stanovení únosnosti v protlačení uvnitř smykem vyztužené oblasti značený $V_{R,CS}$ je pro metody zmíněné v kapitole 2 velmi podobný. Na rovnicích níže je ho možné vidět pro Americkou normu ACI-318, Eurokód EC2 a Model Code 2010.

$$\text{ACI-318: } V_{R,CS} = 0,5 \cdot V_{R,C} + V_{R,S}, \quad (6.1)$$

$$\text{EC2: } V_{R,CS} = 0,75 \cdot V_{R,C} + V_{R,S}, \quad (6.2)$$

$$\text{MC 2010: } V_{R,CS} = V_{R,C} + V_{R,S}. \quad (6.3)$$

Tyto vztahy je tudíž možné zapsat obecným vzorcem, kde X představuje násobek smykové únosnosti desky bez smykové výztuže

$$V_{R,CS} = X \cdot V_{R,C} + V_{R,S}. \quad (6.4)$$

Platí, že únosnost se započtenou smykovou výztuží je dána součtem hodnoty únosnosti desky bez zahrnutí smykové výztuže $V_{R,C}$ a únosností samotné smykové výztuže $V_{R,S}$ zasahující do předpokládané roviny porušení desky. Z této rovnice je možné vidět, že tento vztah samotný nemá žádný horní limit a navyšováním množství smykové výztuže se zvyšuje předpokládaná únosnost desky v protlačení.

Bezpečnost předpovědi v případě Eurokódu zvyšuje omezující součinitel k_{max} (metoda MC 2010 obsahuje obdobný součinitel značený k_{sys}), který byl obsažen v dodatku normy EC2 z roku 2014 [24]. Jeho vliv je znázorněn v rovnici (6.5), která ve své podobě představuje svrchní limit pro únosnost desek se smykovou výztuží.

$$V_{R,CS} \leq k_{max} \cdot V_{R,C}. \quad (6.5)$$

Velikost součinitele k_{max} se stanovuje empiricky a závisí převážně na typu použité smykové výztuže a efektivní tloušťce desky d [25]. Velikost k_{max} se obvykle nachází v rozmezí mezi hodnotami 1,4 až 2,0 [26]. Velikost součinitele k_{max} se liší v jednotlivých národních dodatcích Eurokódu a jeho doporučená hodnota může záviset na typu použité smykové výztuže nebo v případě českého dodatku na efektivní tloušťce desky.

Druhým limitujícím faktorem předpovídané únosnosti v protlačení všech zmíněných metod (pokud vyloučíme možnost porušení mimo smykem vyztuženou oblast $V_{R,out}$) je hodnota maximální síly v protlačení $V_{R,max}$. Tato hodnota je kontrolována v těsné blízkosti okolo sloupu (kontrolní obvod u_0) a představuje drcení betonové vzpěry v tlaku [27]. Kontrola napětí v blízkosti podpory však není součástí výpočtu v Model kódu 2010 a maximální únosnost v protlačení je u něj omezena pouze pomocí součinitele k_{sys} .

Přidáním smykové výztuže do desky je významně ovlivněno její chování při zatěžování. Desky opatřené smykovou výztuží dosahují vyšších hodnot úhlu trhliny oproti deskám bez ní, což je možné vidět na výsledcích experimentálních studií [5].

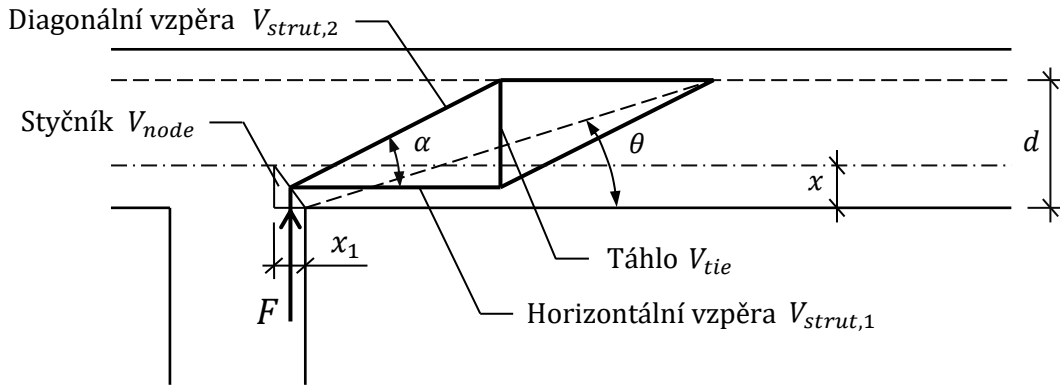
V této práci navržená metoda je založena na principu, že užitím shodného výpočtu pevnosti betonové vzpěry pro případy desek se smykovou výztuží i bez ní dochází k většímu zjednodušení skutečného chování konstrukce, což má za následek vyšší rozptyly předpovědí únosnosti. Dále je metoda blíže zaměřena na užití velikostních faktorů, které se také významně podílí na předpokládané únosnosti desek.

6.2 Popis navržené metody

Navržený výpočet předpovědi únosnosti v protlačení pro smykem vyztužené desky je úpravou stávajícího výpočtu dle Eurokódu. Zde je pomocí zásad příhradové analogie nahrazena oblast předpokládaného porušení lokálně podepřené desky jednoduchou soustavou vzpěr a táhel. Geometrie této náhradní příhradoviny je počítána iterativním postupem.

Výpočet únosnosti v oblasti se smykovou výztuží $V_{R,cs}$ je nahrazen posouzením dvou vzpěr v blízkosti podpory a jednoho táhla, reprezentujícího rozptýlenou smykovou výztuž s příspěvkem únosnosti betonu. Drcení betonu v bezprostřední blízkosti podpory $V_{R,max}$ je v navržené metodě limitováno únosností styčnicku sloupu.

Základní prutové schéma této náhradní příhradoviny je možné vidět na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Schématické znázornění příhradového modelu navržené metody

- Zde θ je předpokládaný úhel smykové trhliny dle odstavce 6.3,
 α je úhel mezi horizontální a diagonální betonovou vzpěrou,
 x je výška tlačené oblasti dle (6.11),
 x_1 je tloušťka styčnicku dle (6.20),
 d je efektivní tloušťka desky.

Metoda byla navržena pro lokálně podepřené desky se smykovou výztuží podrobené symetrickému zatížení se čtvercovými případně kruhovými sloupovými podporami. Její účinnost byla ověřována na různých typech smykového vyztužení tvořeného z ocelových prutů kolmých na rovinu desky.

Postup výpočtu se skládá z posouzení únosnosti dílčích elementů. Jedná se o betonové styčnický, betonové vzpěry, ocelové táhlo a stav porušení mimo smykem vyztuženou oblast. Celková únosnost desky v protlačení V_u je poté stanovena jako nejmenší hodnota únosnosti všech dílčích elementů příhradového modelu

$$V_u = \min \begin{cases} V_{node,1} \\ V_{node,2} \\ V_{strut,1} \\ V_{strut,2} \\ V_{tie} \\ V_{out} \end{cases}, \quad (6.6)$$

- kde $V_{strut,1}$ a $V_{strut,2}$ jsou únosnosti vzpěr (diagonální and horizontální),
 $V_{node,1}$ a $V_{node,2}$ jsou únosnosti styčnicku ve dvou směrech,
 V_{tie} je únosnost táhla reprezentujícího smykovou výztuž,
 V_{out} je únosnost protlačení mimo smykově vyztuženou oblast.

6.3 Úhel smykové trhliny

V navržené metodě není úhel smykové trhliny považován za konstantní. Předpokládaný úhel je proměnný a závisí na tloušťce desky. Velikost úhlu vychází převážně z pozorování Marzouka, Rizka a Tillera [18].

Ti navrhli, že úhel smykové trhliny je závislý na tloušťce protlačované desky. Pro desky tenčí než 250 mm uvažují s úhlem smykové trhliny v rozmezí 25° - 35° a pro desky do 500 mm má smyková trhlina úhel 35° až 45° mm. V navržené metodě výpočtu protlačení je hodnota úhlu získána přibližnou lineární interpolací mezi těmito hodnotami s přidaným účinkem velikostního faktoru, založeném na úpravě velikostního součinitele Eurokódu [4], rozšířeném o závislost poměru tloušťky desky a šířky sloupu.

Úhel smykové trhliny θ (ve stupních) je tedy možné vyjádřit následující rovnicí.

$$\theta = 25 + \left(\frac{d [\text{mm}] - 100}{15} \right) \cdot \left(\frac{d}{c} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (6.7)$$

kde d je efektivní výška protlačované desky,
 c je velikost podpory (šířka sloupu).

Přičemž pro výsledný úhel platí podmínka, že

$$25^\circ \leq \theta \leq 45^\circ. \quad (6.8)$$

Úhel smykové trhliny představuje v navržené metodě významný velikostní faktor, jelikož jeho velikost má zásadní vliv na tvar a rozměry náhradní příhrady.

6.4 Napětí betonu na mezi únosnosti

Výpočet maximálního povoleného napětí betonu v tlaku $\sigma_{R,max}$ je převzat z doporučení Eurokódu [4] pro analogii vzpěry a táhla a je ho možné stanovit jako

$$\sigma_{R,max} = \nu \cdot f_c, \quad (6.9)$$

kde f_c je charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku. Součinitel ν je poté možné určit ze vztahu

$$\nu = 1 - \frac{f_c [\text{MPa}]}{250}. \quad (6.10)$$

6.5 Výška tlačené oblasti

Výška tlačené oblasti určuje velikost horizontální betonové vzpěry. Poloha neutrální osy x je v navrženém modelu počítána pomocí formulace, kterou představil Shehata [28,29]. Ve svém výpočtovém modelu navrhl zjednodušenou rovnici pro obyčejné desky v pružně-plastické fázi. Tento výraz je založen na předpokladu, že k porušení v protlačení dojde dříve, než se beton začne chovat plně plasticky. Polohu neutrální osy je poté možno spočítat jako

$$x = 0,8 \cdot \sqrt{n \cdot \rho_e} \sqrt{\frac{35}{f_c}} d, \quad (6.11)$$

kde ρ_e je stupeň vyztužení vztažený k základní hodnotě meze kluzu oceli 500 MPa,
 d je efektivní tloušťka desky,
 f_c je charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku,

$$\rho_e = \rho \left(\frac{f_s}{500} \right) \leq 0,02, \quad (6.12)$$

ρ je stupeň vyztužení ohybovou výztuží,
 f_s je mez kluzu podélné ocelové výztuže v MPa.

Hodnota n v rovnici (6.11) je podle [28,29] pak dána poměrem mezi moduly pružnosti ohybové výztuže E_s a modulu pružnosti betonu E_c

$$n = \frac{E_s}{E_c}. \quad (6.13)$$

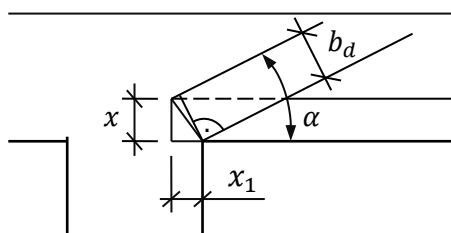
Pro případy stanovení neznámého modulu pružnosti betonu ve srovnání na experimentech z literatury, provedeném v kapitole 1, byl použit následující vztah z doporučení Eurokódu.

$$E_c = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}, \quad (6.14)$$

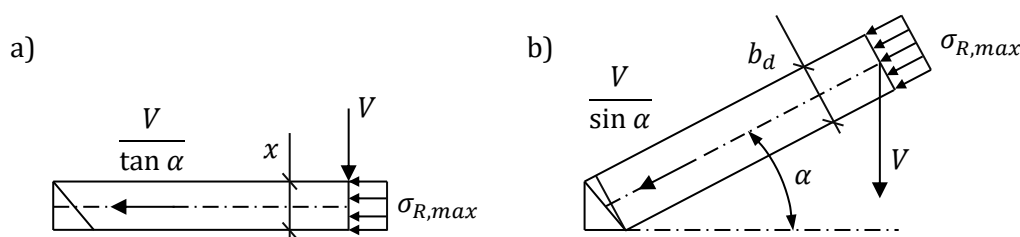
kde hodnota f_{cm} je velikost střední válcové pevnosti betonu v tlaku (respektive hodnota zjištěna experimentální zkouškou).

6.6 Únosnost styčnicku

Rozměry styčnicku jsou definovány velikostí vzpěr, které ho protínají. Porušení styčnicku v modelu představuje stav selhání vlivem drcení betonu v bezprostřední blízkosti sloupové podpory. Obr. 6.2 zobrazuje tvar tlačeneho styčnicku (styčnickové zóny) v místě podpory. Hodnota x_1 je šířka styčnicku, hodnota x je výška tlačené oblasti desky, b_d je tloušťka diagonální vzpěry a α je velikost úhlu diagonály vzpěry k rovině desky.



Obr. 6.2: Detail styčnicku v oblasti sloupové podpory desky



Obr. 6.3: Odvození únosnosti styčnicku: a) horizontální, b) diagonální

Únosnost styčnicku je nutné ověřit ve dvou směrech – horizontálním a vertikálním. Horizontální únosnost styčnicku $V_{node,1}$ se stanoví následujícím výrazem.

$$V_{node,1} = \sigma_{R,max} \cdot k \cdot x \cdot u \cdot \tan \alpha, \quad (6.15)$$

- kde $\sigma_{R,max}$ je napětí betonu na mezi únosnosti v tlaku dle rovnice (6.9),
 k je velikostní faktor pro smyk, závislý na tloušťce desky,
 x je výška uvažované horizontální vzpěry (dle výšky tlačené oblasti),
 u je obvod sloupu (oblasti podpory),
 α je úhel diagonální betonové vzpěry dle rovnice (6.18).

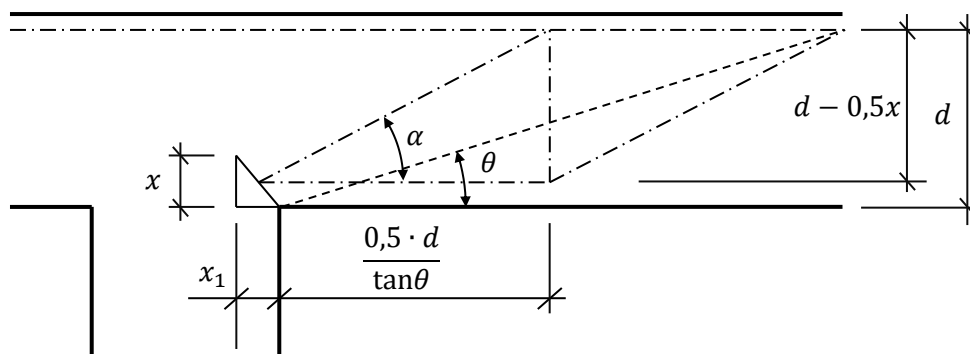
Velikostní faktor k má blízký tvar křivky jako vztah uvedený v Eurocode EC2 a zohledňuje snížení únosnosti s rostoucí tloušťkou desky, způsobené rozdílným rozvojem trhlin.

$$k = 0,5 \left[1 + \left(\frac{200}{d[mm]} \right)^{0,5} \right] \geq 0,5. \quad (6.16)$$

Obdobný tvar má rovnice pro stanovení únosnosti styčnicku v příčném směru.

$$V_{node,2} = \sigma_{R,max} \cdot k \cdot b_d \cdot u \cdot \sin \alpha. \quad (6.17)$$

K výpočtu únosnosti styčnicku podpory je také nutné určit úhel diagonální vzpěry α . Tento úhel je přímo definován geometrií příhradového modelu a lze jej zapsat následujícím složeným výrazem.



Obr. 6.4: Odvození úhly diagonální vzpěry

$$\alpha = \arctg \left(\frac{d - 0,5x}{\frac{0,5d}{\tan \theta} + 0,5x_1} \right), \quad (6.18)$$

kde θ je předpokládaný úhel smykové trhliny dle rovnice (6.7),

x je výška horizontální vzpěry,

x_1 je šířka styčnicku v blízkosti sloupové podpory (6.20).

Tloušťka styčnicku x_1 vychází ze vztahu pro jeho maximální únosnost

$$V_{node,max} = \sigma_{Rd,max} \cdot k \cdot x_1 \cdot u. \quad (6.19)$$

Po úpravě tedy dostaneme rovnici:

$$x_1 = \frac{V_{node,max}}{\sigma_{Rd,max} \cdot u \cdot k}, \quad (6.20)$$

kde u je obvod sloupové podpory,

k je velikostní faktor spočtený pomocí výrazu (6.16).

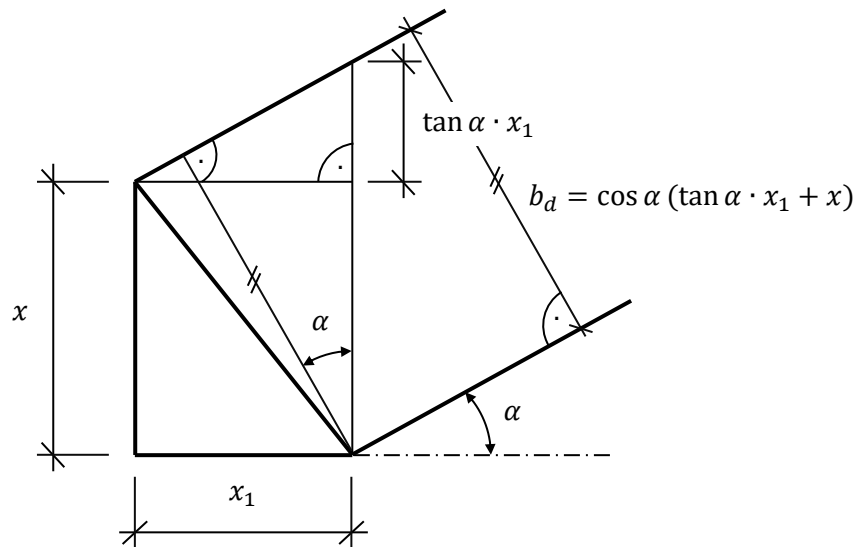
V rovnici (6.20) navíc figuruje hodnota $V_{node,max}$. Tato proměnná je maximální dosažitelná únosnost styčnicku v protlačení a je na počátku výpočtu neznámá. Aby bylo možné získat

šířku styčnicku x_1 , je tedy nutné použít iterační postup. Iterační podmínkou je rovnováha napětí ve styčnicku. Maximální únosnost v protlačení styčnicku $V_{node,max}$ je iterována tak dlouho, dokud si hodnoty $V_{node,1}$ a $V_{node,2}$, uvedené v rovnici (6.15), respektive (6.17), nejsou rovny. Po úspěšné iteraci tedy bude platit následující rovnost

$$V_{node,max} = V_{node,1} = V_{node,2}. \quad (6.21)$$

Alternativně je možné pro hrubý odhad únosnosti v protlačení uvažovat, že hodnota x_1 je rovna 70% výšky polohy neutrální osy ($x_1 = 0,7x$). Je však nutné poznamenat, že tímto zjednodušením může dojít k nadhodnocení únosnosti desky v protlačení, což může vést k výsledku předpovědi na stranu nebezpečnou. Aplikováním tohoto zjednodušení na více než 100 výsledků experimentu nastala předpověď na stranu nebezpečnou ve dvou případech. Hodnoty šířky styčnicku x_1 v experimentech z literatury se pohybují v rozmezí 0,63 až 1,29 násobku výšky horizontální vzpěry x . Naměřená střední hodnota je $0,86x$.

Nakonec tloušťku diagonální vzpěry b_d je možné určit z geometrie styčnickové oblasti znázorněné na obr. 6.5.



Obr. 6.5: Odvození tloušťky diagonální vzpěry

Po odvození vyjde rovnice pro výpočet tloušťky diagonální vzpěry

$$b_d = x \cdot \cos \alpha + x_1 \cdot \sin \alpha, \quad (6.22)$$

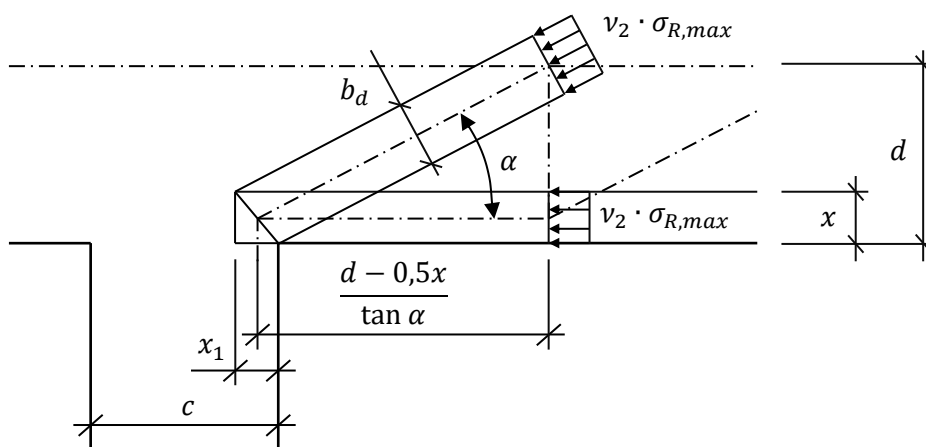
kde α je úhel diagonální vzpěr z rovnice (6.18),
 x je výška horizontální vzpěry,
 x_1 je šířka styčnicku dle vztahu (6.20).

6.7 Únosnost vzpěr

Kromě únosnosti tlačeního styčnicku je nutné ověřit únosnost samotných betonových vzpěr. Únosnost těchto vzpěr je počítána v jejich střednici. Pevnost tlačných betonových vzpěr je redukována v tlakových oblastech s příčným tahem a trhlinami dle následujícího výrazu z doporučení pro modely příhradové analogie [4].

$$0,6 \cdot \sigma_{R,max} = v_2 \cdot \left[1 - \frac{f_c [\text{MPa}]}{250} \right] \cdot f_c, \quad (6.23)$$

kde platí, že hodnota v_2 je pro vzpěry přenášející tlakové napětí přes trhliny s normální šířkou rovna 0,6.



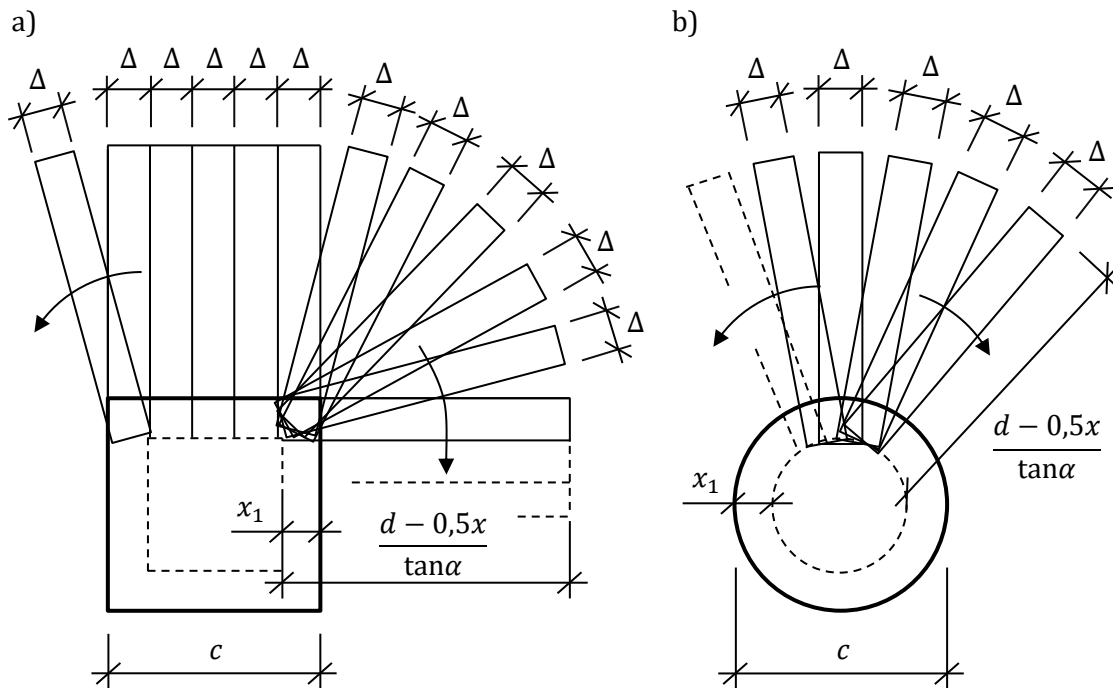
Obr. 6.6: Schéma odvození únosnosti vzpěr

Posouzení vzpěr vychází z předpokladu rotačně symetrického chování příhradového modelu desky. Plocha vzpěr je v tomto odvození nahrazena nekonečným množstvím pruhů o šířce Δ . Tyto pruhy jsou rotovány okolo obvodu sloupové podpory u . Na obr. 6.7 je možné vidět schéma tohoto odvození se zaznačeným rozdělením vzpěr na jednotlivé pruhy pro čtvercový i kruhový sloup.

Zjednodušeně lze obvod vzpěr stanovit jako sumu šířky pruhů Δ z rovnice

$$\sum \Delta = \frac{\pi(d - 0,5x)}{\tan \alpha} + u, \quad (6.24)$$

- kde d je efektivní tloušťka desky,
 x je výška neutrální osy dle rovnice (6.11),
 α je úhel diagonální vzpěry podle vztahu uvedeném v (6.18),
 u je obvod sloupu.



Obr. 6.7: Obvod vzpěry: a) čtvercového sloupu, b) kruhového sloupu

Rovnice (6.25) představuje výpočet únosnosti v protlačení pro horizontální vzpěru po dosazení výše uvedeného redukčního součinitele pevnosti betonu.

$$V_{strut,1} = \left[\frac{\pi(d - 0,5x)}{\tan \alpha} + u \right] \cdot 0,6 \cdot \sigma_{R,max} \cdot k \cdot x \cdot \tan \alpha. \quad (6.25)$$

Únosnost diagonální vzpěry je následně dána vztahem

$$V_{strut,2} = \left[\frac{\pi(d - 0,5x)}{\tan \alpha} + u \right] \cdot 0,6 \cdot \sigma_{R,max} \cdot k \cdot b_d \cdot \sin \alpha, \quad (6.26)$$

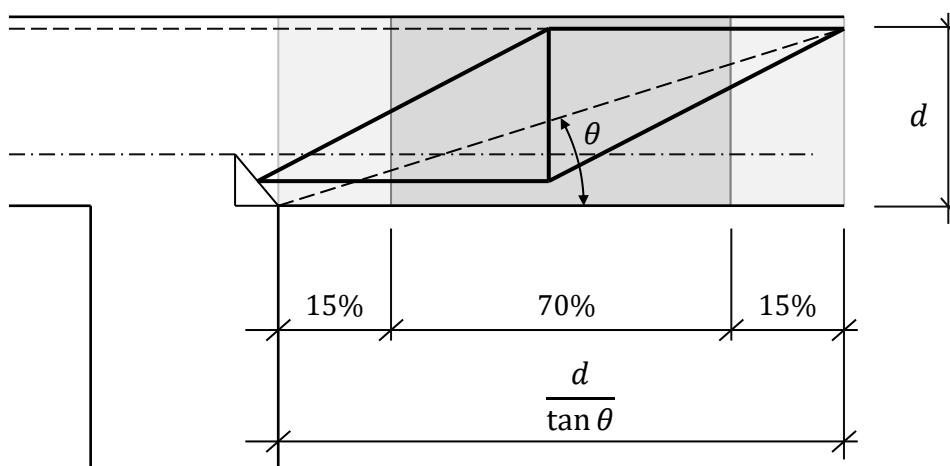
- kde d je efektivní tloušťka desky,
 u je obvod sloupu/podpory,
 x je výška neutrální osy dle rovnice (6.11),
 $\sigma_{R,max}$ je napětí betonu na mezi únosnosti v tlaku dle rovnice (6.9),
 k je velikostní faktor získaný z rovnice (6.16),
 α je úhel diagonální vzpěry podle vztahu uvedeném v (6.18),
 b_d je šířka diagonální vzpěry dle (6.22).

6.8 Únosnost táhla

V navrženém modelu je smykové vyztužení desky reprezentováno jedním vertikálním táhlem. Táhlo je umístěno v polovině předpokládané smykové plochy porušení v protlačení. Únosnost tohoto táhla může být určena z únosnosti smykové výztuže V_{sw} , která protíná předpokládanou plochu porušení betonu navýšenou o únosnost samotné desky bez smykové výztuže, reprezentující příspěvek pevnosti betonu v tahu, tedy

$$V_{tie} = V_{sw} + V_c. \quad (6.27)$$

Únosnost smykového vyztužení desky V_{sw} je dána množstvím prutů protínajících tmavě vyšrafovanou oblast znázorněnou na obr. 6.8. Zmenšená oblast představuje zohlednění zakotvení smykové výztuže a vylučuje ty pruty, které by nebyly využity během zatěžování desky.



Obr. 6.8: Oblast započítané výztuže navržené metody

Celková únosnost příspěvku smykové výztuže se poté stanoví z rovnice (6.28). Tento vztah je platný pro smykovou výztuž, která je tvořena kolnými smykovými trny nebo třmínky s dostatečně velkou kotevní oblastí.

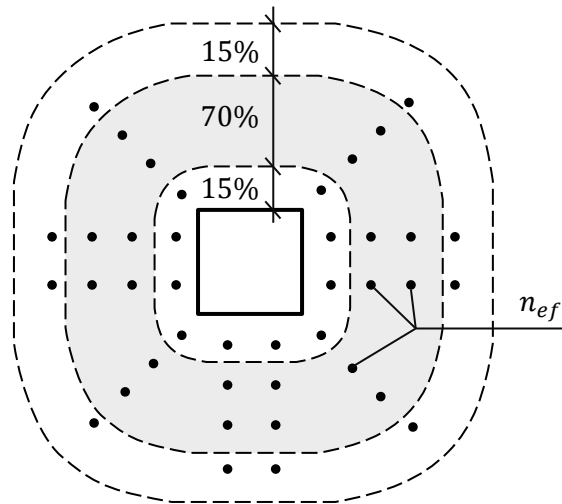
$$V_{sw} = A_{sw,1} \cdot \sum n_{ef} \cdot f_{yw,ef}, \quad (6.28)$$

kde $A_{sw,1}$ je plocha průřezu jednoho kusu smykové výztuže,

$\sum n_{ef}$ je počet započítaných kusů smykové výztuže.

$f_{yw,ef}$ je hodnota meze kluzu smykového vyztužení.

Schéma počtu započítané smykové výztuže Σn_{ef} , tvořené z kolmých prutů, se nachází na obr. 6.9.



Obr. 6.9: Schéma množství započítané výztuže Σn_{ef}

Efektivní mez kluzu smykové výztuže je pak identická s výpočtem stanoveným v Eurokódu a je jí tudíž možné určit následovně.

$$f_{yw,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{yw}, \quad (6.29)$$

kde f_{yw} je mez kluzu smykové výztuže v MPa a d je efektivní tloušťka desky.

Výpočet příspěvku betonu V_c na únosnost táhla je určen z Eurokódu pro výpočet únosnosti v protlačení bez smykové výztuže. Kde kontrolní obvod ve vzdálenosti $2d$ je nahrazen obvodem určeným úhlem předpokládané trhliny.

$$V_c = 0,18 \cdot \left(u + 2\pi \cdot \frac{d}{\tan \theta} \right) \cdot d \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d [mm]}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}}, \quad (6.30)$$

- kde
- u je obvod podpory/sloupu,
 - d je efektivní tloušťka desky (pod odmocninou dosazena v milimetrech),
 - θ je předpokládaný úhel smykové trhliny spočtený z rovnice (6.7),
 - ρ je stupeň vyztužení ohybovou výztuží desky,
 - f_c je válcová pevnost betonu v tlaku.

6.9 Souhrnný popis

V následující tabulce jsou pro přehlednost zobrazeny nejdůležitější vzorce pro výpočet dílčích únosností všech prvků příhradového modelu.

Tab. 6.1: Souhrnný seznam vzorců navržené metody

Prvek	Základní vzorec
Styčnick	$V_{node,1} = \sigma_{R,max} \cdot k \cdot x \cdot u \cdot \tan \alpha$
	$V_{node,2} = \sigma_{R,max} \cdot k \cdot b_d \cdot u \cdot \sin \alpha$
Vzpěry	$V_{strut,1} = \left[\frac{\pi(d - 0,5x)}{\tan \alpha} + u \right] \cdot 0,6 \cdot \sigma_{R,max} \cdot k \cdot x \cdot \tan \alpha$
	$V_{strut,2} = \left[\frac{\pi(d - 0,5x)}{\tan \alpha} + u \right] \cdot 0,6 \cdot \sigma_{R,max} \cdot k \cdot b_d \cdot \sin \alpha$
Táhlo	$V_{tie} = V_{sw} + V_c$
	$V_{sw} = A_{sw,1} \cdot \sum n_{ef} \cdot f_{yw,ef}$
Mimo smykem vyztuženou oblast (dle EC2)	$V_{out} = 0,18 \cdot u_{out} \cdot d \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}}$
Celková únosnost	$V_u = \min \{ V_{node,1}; V_{strut,2}; V_{node,1}; V_{strut,2}; V_{tie}; V_{out} \}$

Veškeré vztahy jsou uvedeny v podobě vhodné pro výpočet výsledků experimentálních studií na symetrických deskách a jejich následné srovnání s normovými způsoby předpovědi únosnosti. Převedení vzorců do návrhové podoby lze provést obdobně jako v případě Eurokódu a to vynásobením dílčích únosností příhradového modelu příslušným součinitelem spolehlivosti.

7 SROVNÁNÍ METOD NA VÝSLEDKÍCH EXPERIMENTŮ

K ověření účinnosti navržené metody byly použity některé uskutečněné experimenty nalezené v odborné literatuře. Celkem bylo nashromážděno 127 výsledků týkajících se protlačení deskových konstrukcí. Tyto experimenty byly uskutečněny různými výzkumníky a byly publikovány za posledních několik desetiletí.

Všechny testované vzorky byly podrobeny symetrickému protlačení a obsahovaly smykovou výztuž. Smykové výztuže v uskutečněných experimentech mají různou podobu, ale do srovnání byly zařazeny pouze ty, kde hlavní větev smykové výztuže svírá s rovinou desky úhel 90°. Jedná se především o smykové trny, třmínky nebo různé typy kontinuálního vyztužení.

Přehled jednotlivých experimentů zařazených do databáze pro účely srovnání je uveden v tab. 7.1.

Tato databáze experimentů obsahuje výsledky se sloupy jak čtvercového, tak i kruhového průřezu. Kruhovou podporu má 30 vzorků, čtvercovou poté 97. Účinná výška desky d se u daných vzorků pohybuje v rozmezí 70 mm až 354 mm. Tlaková pevnost betonu má rozsah 19 až 62 MPa a stupeň vyztužení ohybovou výztuží se nachází mezi hodnotami 0,34 % a 2,0 %. Ze srovnání byly vyloučeny ty experimenty, u kterých došlo při testování k porušení ohybem.

Navržená metoda byla srovnávána s několika hlavními normovými metodami a doporučeními: Eurokódem EC2, americkou normou ACI 318 a metodou uvedenou v Model Code 2010. Srovnání jsou v kapitolách 7.1 až 7.4 provedena bez použití součinitele maximální únosnosti k_{max} . Vliv tohoto součinitele na předpovědi Eurokódu a jeho srovnání s navrženou metodou jsou podrobně popsány v kapitole 7.5.

Srovnání výsledků jednotlivých metod předpovědí únosnosti je provedeno převážně pomocí tzv. poměru test/teorie V_{test}/V_u . Zde V_{test} je hodnota únosnosti v protlačení z experimentu a V_u je hodnota dosažená výpočtem dle příslušné metody. Výsledky poměru větší než 1 jsou na straně bezpečné (podhodnocují skutečnou únosnost desek), hodnoty poměru menší než 1 jsou na straně nebezpečné.

V tab. 7.2 jsou pro jednotlivé sady experimentů zobrazeny průměrné hodnoty poměru V_{test}/V_u (značeno AVG) spolu s jejich variačním koeficientem (značeno CoV).

Tab. 7.1: Seznam experimentů pro srovnání se základními parametry desek (* obsahují kruhové sloupce)

Vzorek	ks [-]	d [mm]	c [mm]	f_c [MPa]	ρ [%]	ρ_w [%]
Andrade [30]	8	154-164	200	30-43	1,2-1,31	0,4-1,1
Beutel, Hegger [31, 32]	14	190-250	200-400*	24-44	0,8-1,76	0,22-0,91
Birkle [33]	9	124-260	250-350	29-38	1,1-1,53	0,21-0,68
Etter [34]	2	294	400*	33-35	1,26	0,17
Ferreira [35]	11	140-143	270-450*	47-50	1,46-2	0,42-0,8
Gomes, Regan [36]	10	153-159	200	34-40	1,27-1,31	0,15-0,6
Chana [37, 38]	7	200-210	300-400	29-34	0,79-0,86	0,15-0,61
Hegger, Häusler [39]	1	160	290	30	1,96	0,6
Ladner [40]	2	240	300*	27-34	1,4	0,53
Marti, Pralong [41]	1	152	300*	35	1,32	0,35
Marzouk, Jiang [42]	2	120	250	23-41	1,1	1,47
Regan [43]	5	150-160	240-300*	26-62	1,45-1,76	0,34-0,77
Regan, Samadian [44]	4	160	200	33-45	1,26-1,64	0,34-0,5
Rizk, Marzouk, et. [45]	1	218	400	79	1,42	0,34
Seible, Ghali, Dilger [46]	7	121	305	34	1,17	0,26-0,57
Thai Xan Dam [47, 48]	4	216	305	31-37	0,87-1,25	0,34
Tolf [49]	8	97-198	125-250*	19-24	0,34-0,84	0,24-0,54
Trautwein [50, 51]	5	154-164	200	35-43	1,26	1,12-2,8
Bartolac, Damjanović, Duvnjak [23]	3	96	130	43-45	1,5	0,69
Lips, Muttoni, Fernandez- Ruiz [52, 53, 54]	11	198-354	130-440	30-37	1,5-1,59	0,23-0,85
Mueller, Muttoni, Thurlimann [55]	1	154	300*	33	1,31	0,69
Vollumn, Abdel-Fattah, Eder, Elghazouli [56]	5	174	270	23-27	0,64-1,28	0,18-0,37

Tab. 7.2: Hodnoty předpovědi únosnosti v protlačení pro jednotlivé sady experimentů

Vzorek	V_{test}/V_u							
	Navržená		Eurokód		ACI 318		MC 2010	
	AVG	CoV	AVG	CoV	AVG	CoV	AVG	CoV
Andrade [30]	1,10	10,7	0,98	11,3	1,15	10,7	1,01	10,5
Beutel, Hegger [31, 32]	1,27	13,9	1,37	22,7	1,44	19,2	1,35	11,9
Birkle [33]	1,17	5,61	1,11	10,7	1,37	19,2	1,21	3,75
Etter [34]	1,40	4,76	1,34	22,1	1,87	22,1	1,38	6,52
Ferreira [35]	1,22	5,24	1,20	14,6	1,46	24,5	1,34	12,2
Gomes, Regan [36]	1,30	8,18	1,26	7,28	1,87	14,6	1,41	9,18
Chana [37, 38]	1,10	4,76	1,34	22,1	1,87	27,1	1,38	6,52
Hegger, Häusler [39]	1,17	-	0,83	-	1,54	-	1,16	-
Ladner [40]	1,31	2,21	1,04	4,81	1,65	2,74	1,09	2,30
Marti, Pralong [41]	1,02	-	1,03	-	1,65	-	1,09	-
Marzouk, Jiang [42]	1,15	1,74	1,15	1,74	1,27	4,34	1,18	1,28
Regan [43]	1,23	9,16	1,04	8,32	1,46	9,06	1,25	11,7
Regan, Samadian [44]	1,21	12,0	1,06	2,85	1,43	2,48	1,13	6,44
Rizk, Marzouk, et. [45]	1,28	-	1,09	-	1,22	-	1,34	-
Seible, Ghali, Dilger [46]	1,10	9,45	1,08	10,5	1,48	4,00	1,26	4,73
Thai Xan Dam [47, 48]	1,04	2,74	0,97	9,74	0,94	6,66	0,94	8,02
Tolf [49]	1,17	11,1	1,11	13,8	1,69	27,4	1,05	16,7
Trautwein [50, 51]	1,22	6,19	1,04	9,49	1,25	7,46	1,04	11,6
Bartolac, Damjanović, Duvnjak [23]	0,97	4,49	0,92	3,97	0,94	6,66	0,94	8,02
Lips, Muttoni, Fernandez- Ruiz [52, 53, 54]	1,18	9,91	1,19	21,2	1,26	11,2	1,32	12,0
Mueller, Muttoni, Thurlimann [55]	1,34	-	0,86	-	1,33	-	1,25	-
Vollumn, Abdel-Fattah, Eder, Elghazouli [56]	1,24	3,82	1,24	3,82	1,20	12,3	1,30	5,85

Souhrn celkových dosažených výsledků srovnání jednotlivých metod pro všech 127 experimentů zařazených do databáze je poté zaznamenán do tab. 7.3.

Tab. 7.3: Vyhodnocení srovnání metod předpovědi únosnosti v protlačení

Veličina	Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
Průměrná hodnota V_{test}/V_u	1,18	1,16	1,41	1,22
Minimální hodnota V_{test}/V_u	0,93	0,73	0,85	0,77
Maximální hodnota V_{test}/V_u	1,58	1,98	2,37	1,71
5% kvantil	0,99	0,87	1,00	0,88
95% kvantil	1,42	1,62	2,13	1,71
Variační koeficient	11,9 %	18,3 %	22,4 %	15,9 %

Všechny metody, s výjimkou ACI 318, dosáhly podobné průměrné hodnoty poměru test/teorie a navzájem se neliší o více než 10 %. Metodu výpočtu dle ACI 318 je možné s průměrnou V_{test}/V_u hodnotou 1,41 považovat za nejkonzervativnější. Tomu odpovídá i mnohem vyšší maximální dosažená hodnota poměru V_{test}/V_u a jeho 95% kvantilu, jež je v případě americké normy rovna 2,37, respektive 2,13 pro 95% kvantil, s vysokým variačním koeficientem o hodnotě 22,4%.

Naproti tomu nejnižšího průměrného výsledku poměru test/teorie dosáhl Eurokód s hodnotou 1,16. Tato hodnota je však dosažena na úkor bezpečnosti předpovědi únosnosti. Eurokód dosáhl absolutně nejnebezpečnější předpovědi o hodnotě 0,73 a má taktéž nejnižší 5 % kvantil 0,87. Přesto dosáhl také druhé nejvyšší hodnoty předpovědi o velikosti poměru test/teorie 1,98.

Výpočet pomocí MC 2010 předpovídá únosnost v protlačení oproti Eurokódu s vyšší bezpečností při dosažení mírně nižšího variačního koeficientu o hodnotě 15,9 %. Počet nadhodnocených výsledků výpočtu únosnosti je poté vůči Eurokódu téměř poloviční, se 17 výsledky na stranu nebezpečnou.

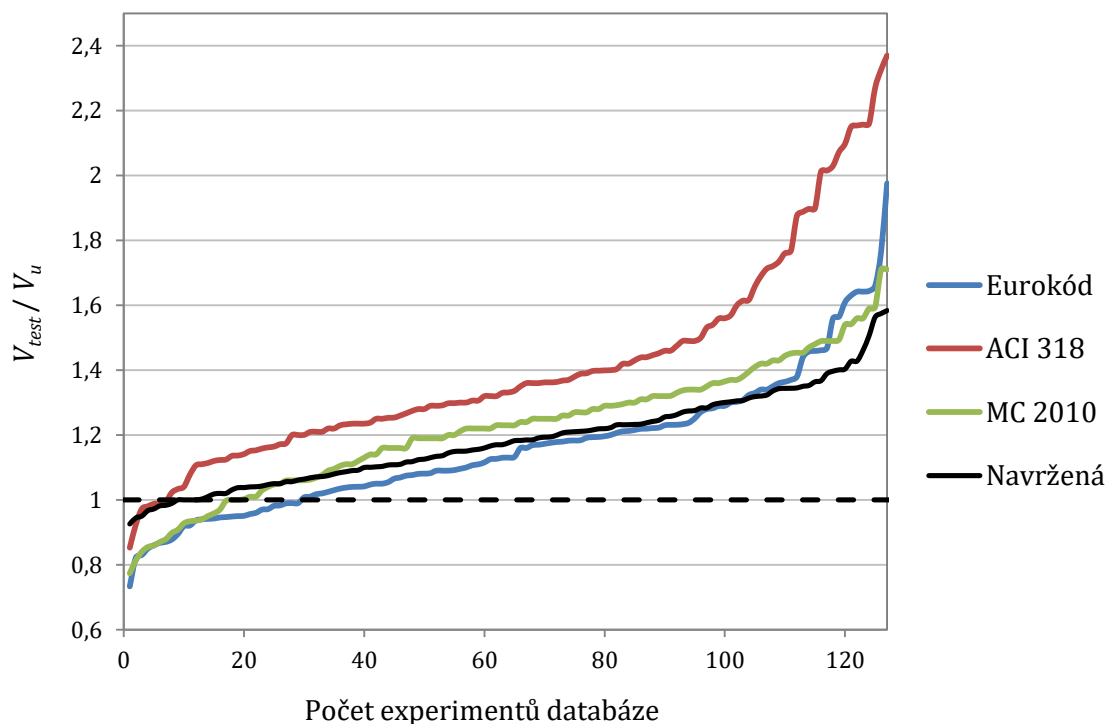
Navržená metoda dosáhla nejnižších hodnot variačního koeficientu 11,9 % za zachování podobné střední hodnoty 1,18 poměru V_{test}/V_u jako v případě Eurokódu, bez nebezpečného nadhodnocování únosnosti desek.

Tab. 7.4: Srovnání bezpečnosti předpovědi únosnosti v protlačení

Veličina	Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
Experimentů celkem	127	127	127	127
Počet na stranu nebezpečnou	8	29	7	17
Podíl na stranu nebezpečnou	6,30 %	22,9 %	5,51 %	13,4 %
Průměrná hodnota na stranu bezp.	1,21	1,24	1,44	1,27
Variační koeficient na stranu bezp.	10,8%	15,3%	21,2 %	12,4%

Srovnání je možné přehledně vidět na obrázku 6.2, kde jsou výsledky výpočtů z jednotlivých metod seřazeny vzestupně podle jejich přesnosti V_{test}/V_u , od výsledků nejvíce na stranu nebezpečnou, po podhodnocené předpovědi únosnosti.

Ideální metoda by byla reprezentována konstantní linií o hodnotě 1,0. Z obrázku je možné vidět, že průběh křivky u navržené metody je nejvíce vodorovný a hodnoty poměru test/teorie se pohybují s nejmenším rozptylem předpovědí.



Obr. 7.1: Srovnání metod podle efektivní tloušťky desky

7.1 Posouzení dle kategorií bezpečnosti

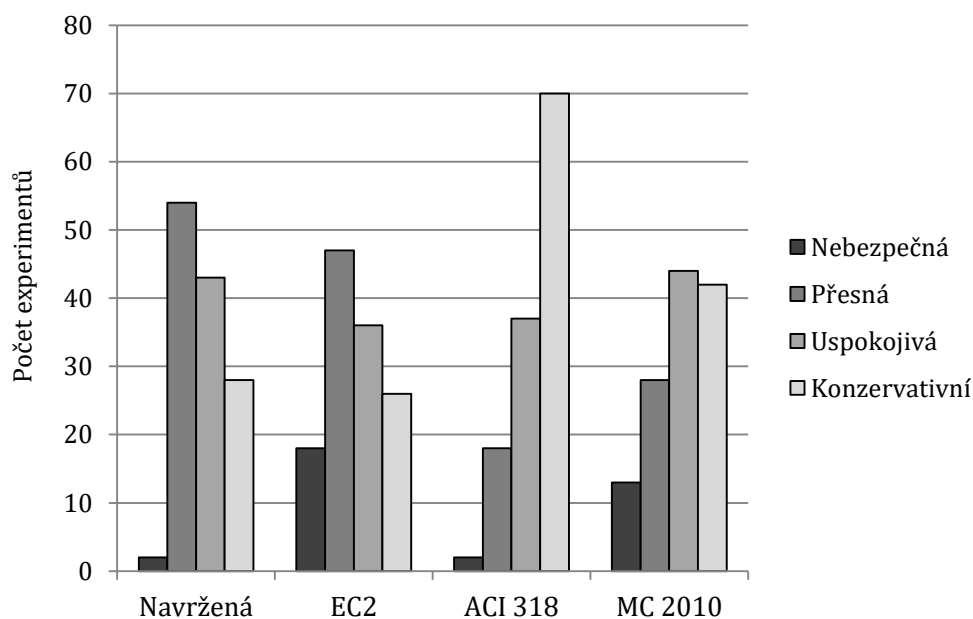
K ověření schopnosti metod úspěšně a bezpečně předpovídat únosnost v protlačení navrhli autoři Oliviera, Filho, Ferreira a Melo ve svém článku [57], rozřídění jednotlivých výsledků poměrů test/teorie do kategorií dle následujících kritérií.

Hodnoty poměru menší než 0,95 se řadí jako nebezpečné. Když se výsledky přesnosti V_{test}/V_u nachází v rozmezí 0,95 a 1,15 jsou považovány za přesné. Hodnoty v intervalu 1,15 až 1,3 jsou uspokojivé. Všechny výsledky poměru test/teorie vyšší než 1,3 jsou poté uvažovány jako konzervativní. Množství dosažených výsledků dle jednotlivých kategorií je zaznamenáno v tab. 7.5 níže.

Tab. 7.5: Počet dosažených výsledků dle jednotlivých kategorií bezpečnosti

Označení	Kritérium	Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
Nebezpečné	$V_{test}/V_u < 0,95$	2	18	2	13
Přesné	$0,95 \leq V_{test}/V_u \leq 1,15$	54	47	18	28
Uspokojivé	$1,15 < V_{test}/V_u \leq 1,3$	43	36	37	44
Konzervativní	$V_{test}/V_u > 1,3$	28	26	70	42

Graficky je dosažený počet dle jednotlivých kategorií znázorněn na obr. 7.2.



Obr. 7.2: Znázornění rozdělení výsledků srovnání do kategorií bezpečnosti

7.2 Srovnání metod dle množství vstupních parametrů

V Tab. 7.6 je zobrazeno srovnání metod dle některých z potřebných vstupních parametrů, nutných k určení předpovědi únosnosti v protlačení.

Tab. 7.6: Srovnání metod dle množství jejich vstupních parametrů

Parametr	Označ.	Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
Pevnost betonu v tlaku	f_c	ano	ano	ano	ano
Efektivní tloušťka desky	d	ano	ano	ano	ano
Stupeň vyztužení	ρ	ano	ano	-	ano
Modul pružnosti betonu	E_c	ano	-	-	-
Modul pružnosti oceli	E_s	ano	-	-	ano
Pevnost betonu v tahu	f_{ct}	-	-	-	ano
Frakce kameniva	d_g	-	-	-	ano
Výška příčné výztuže	d_v	-	-	-	ano
Rozpětí desky	l	-	-	-	ano

Navržená metoda využívá při své předpovědi chování lokálně podepřených desek o dva parametry více (modul pružnosti betonu a oceli) než Eurokód. Významně se oproti zbylým metodám liší norma ACI 318, která ve výpočtech nijak nezohledňuje množství ohybové výztuže.

Z tabulky je možné vidět, že metoda dle MC 2010 vyžaduje ve výpočtu více parametrů, než zbylé metody. Více vstupních parametrů umožňuje lépe vystihnout skutečný stav desky, ale zároveň v případě srovnávání s uskutečněnými experimenty z literatury vnáší do výpočtu více hodnot, které nemusí být vždy známé. Například pevnost v tahu betonu nebyla nijak experimentálně ověřována ve většině provedených studií obsažených v databázi, a proto musela být stanovena empirickým přepočtem z tlakové pevnosti. Naopak maximální velikost použité frakce kameniva je známa ve všech případech.

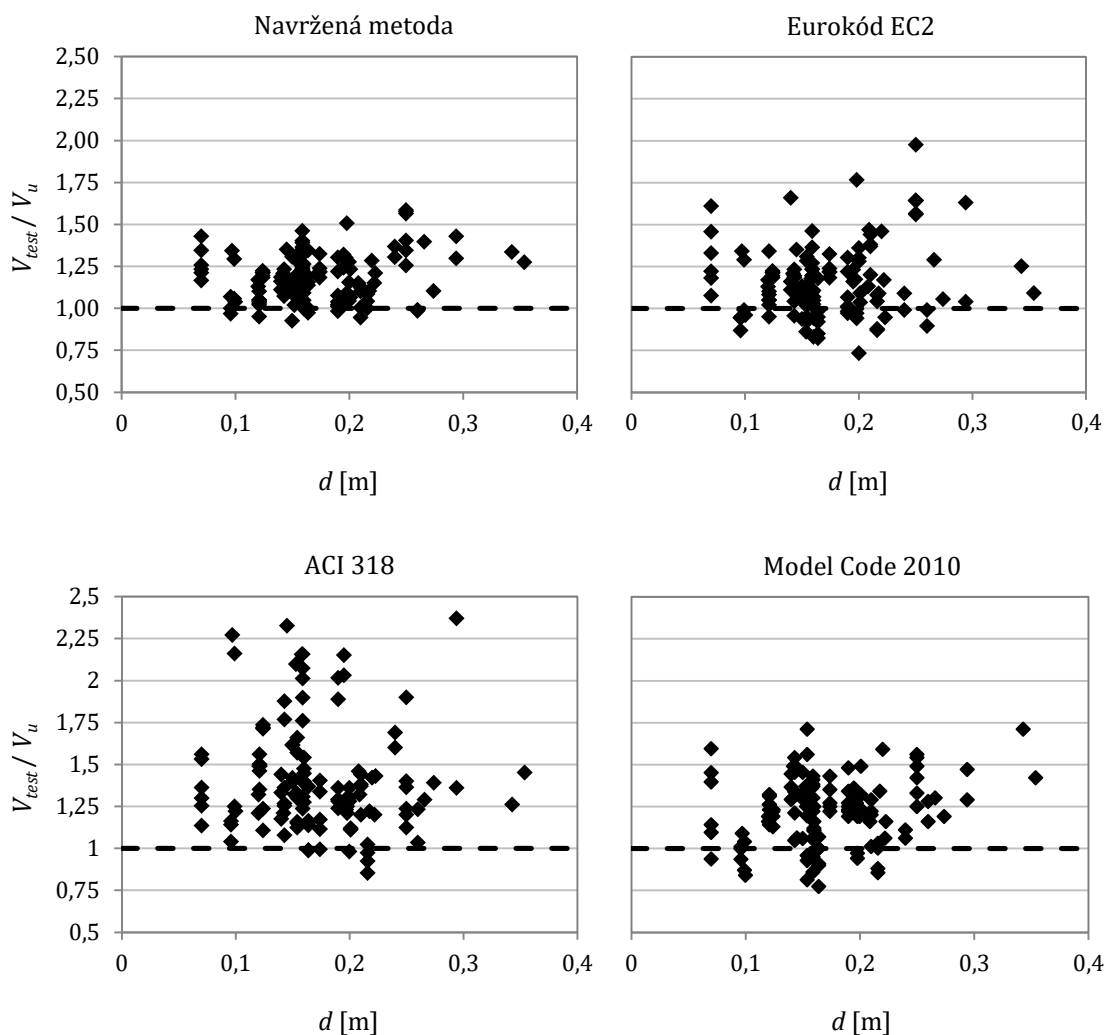
Metoda uvedená v MC 2010 a navržená metoda se také liší při výpočtu započítané smykové výztuže, kde je počítáno se skutečnými kusy smykové výztuže protínající předpokládanou plochu porušeného betonu a nikoliv s tzv. rozptýlenou výztuží.

7.3 Srovnání metod dle závislosti na jednom z parametrů

V této kapitole je graficky znázorněn vliv poměrů výsledků experimentálně zjištěné únosnosti a předpovídané únosnosti spočtené podle jednotlivých metod (V_{test}/V_u) v závislosti na různých vstupních parametrech, které mají vliv na každou z metod. Jedná se o efektivní tloušťku desky, tvar sloupové podpory a rozměry sloupu, pevnost betonu v tlaku a stupeň ohybového a smykového vyztužení.

7.3.1 Efektivní tloušťka desky

Obr. 7.3 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na efektivní tloušťku desky d . Efektivní tloušťka je jedním z nejdůležitějších parametrů a rozhoduje o velikosti kontrolních obvodů empirických resp. semiempirických metod.

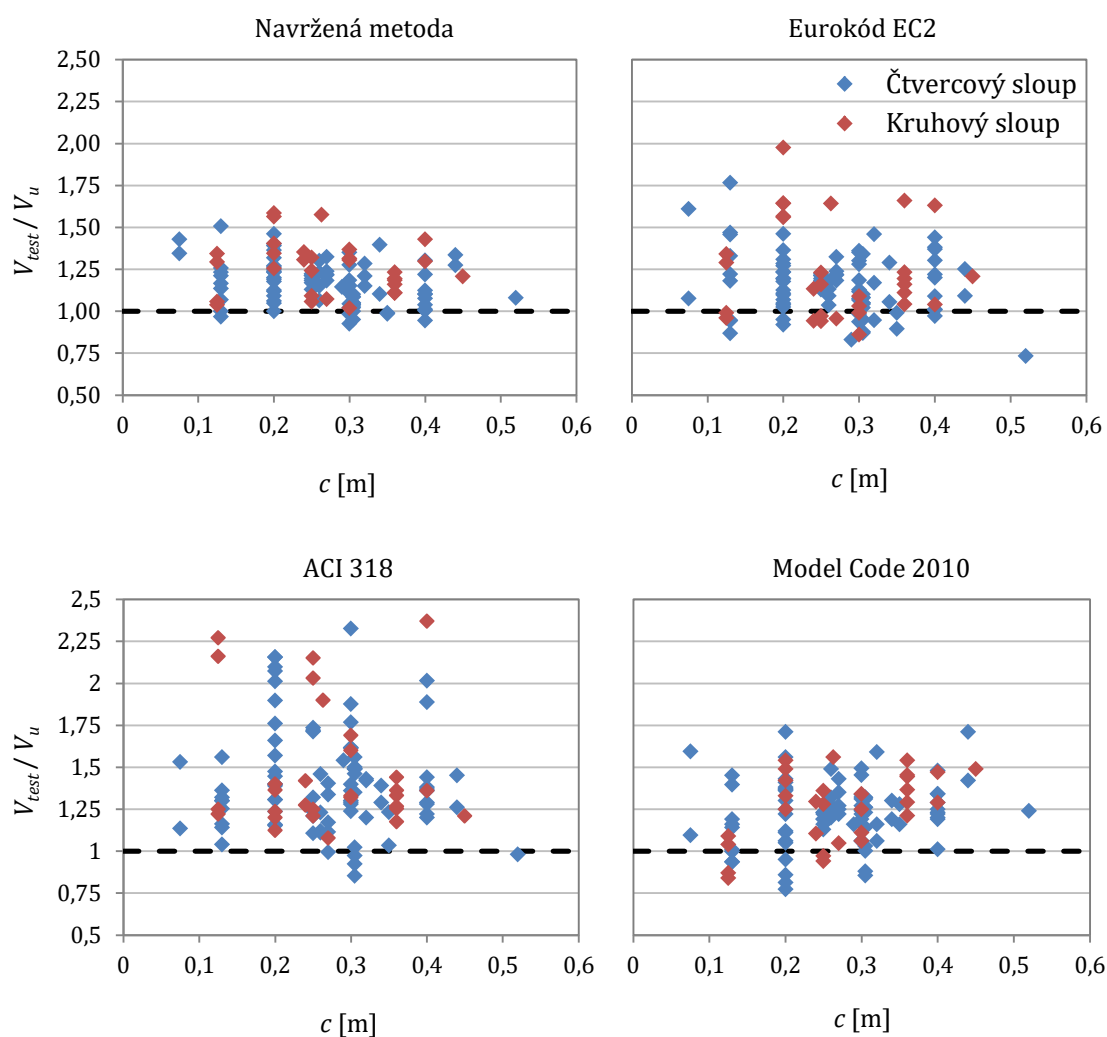


Obr. 7.3: Srovnání metod podle efektivní tloušťky desky

Z obrázku je možné vidět, že metoda MC 2010 mírně podhodnocuje únosnost desky s její rostoucí tloušťkou. Počet experimentů s tlustšími deskami však není dostatečný pro podporu tohoto tvrzení. Podobnou závislost je možné pozorovat i u Eurokódu.

7.3.2 Tvar a rozměry sloupové podpory

Obr. 7.4 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na tvar a šířku c sloupové podpory. V grafech jsou čtvercové sloupy znázorněny modře, kruhové poté červeně.



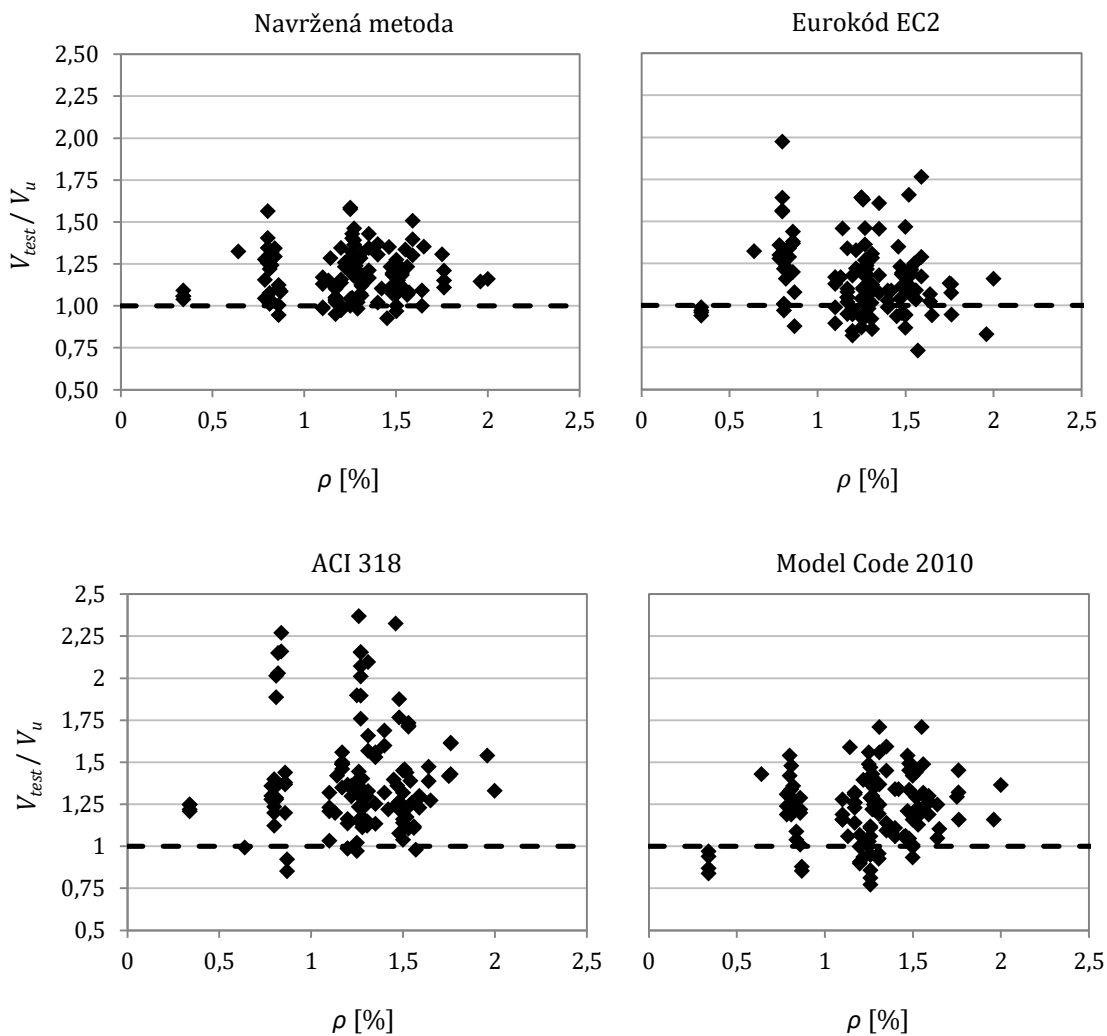
Obr. 7.4: Srovnání metod podle tvaru a rozměrů sloupové podpory

Žádná z metod nevykazuje významný vliv velikosti sloupu na přesnost předpovědi únosnosti v protlačení. Nejvíce testovaných desek obsahovalo sloup o velikosti 200 mm a zde je možné z grafů dobře vidět, že se přesnosti předpovědí u každé z metod pro tuto velikost sloupu výrazně liší.

7.3.3 Stupeň vyztužení ohybovou výztuží

Obr. 7.5 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na stupeň vyztužení ohybovou výztuží ρ . U navržené metody a metody dle ACI 318 nebyl pozorován vliv stupně vyztužení na přesnost předpovědi. Eurokód vykazuje s rostoucím stupněm vyztužení nebezpečnější výsledky výpočtu únosnosti. Naopak u Model Code 2010 jsou hodnoty předpovědí s rostoucím stupněm vyztužení konzervativnější.

Předpověď dle americké normy ACI je také jedinou z uvedených metod, ve které do výpočtu únosnosti desky v protlačení množství ohybové výztuže nevstupuje.



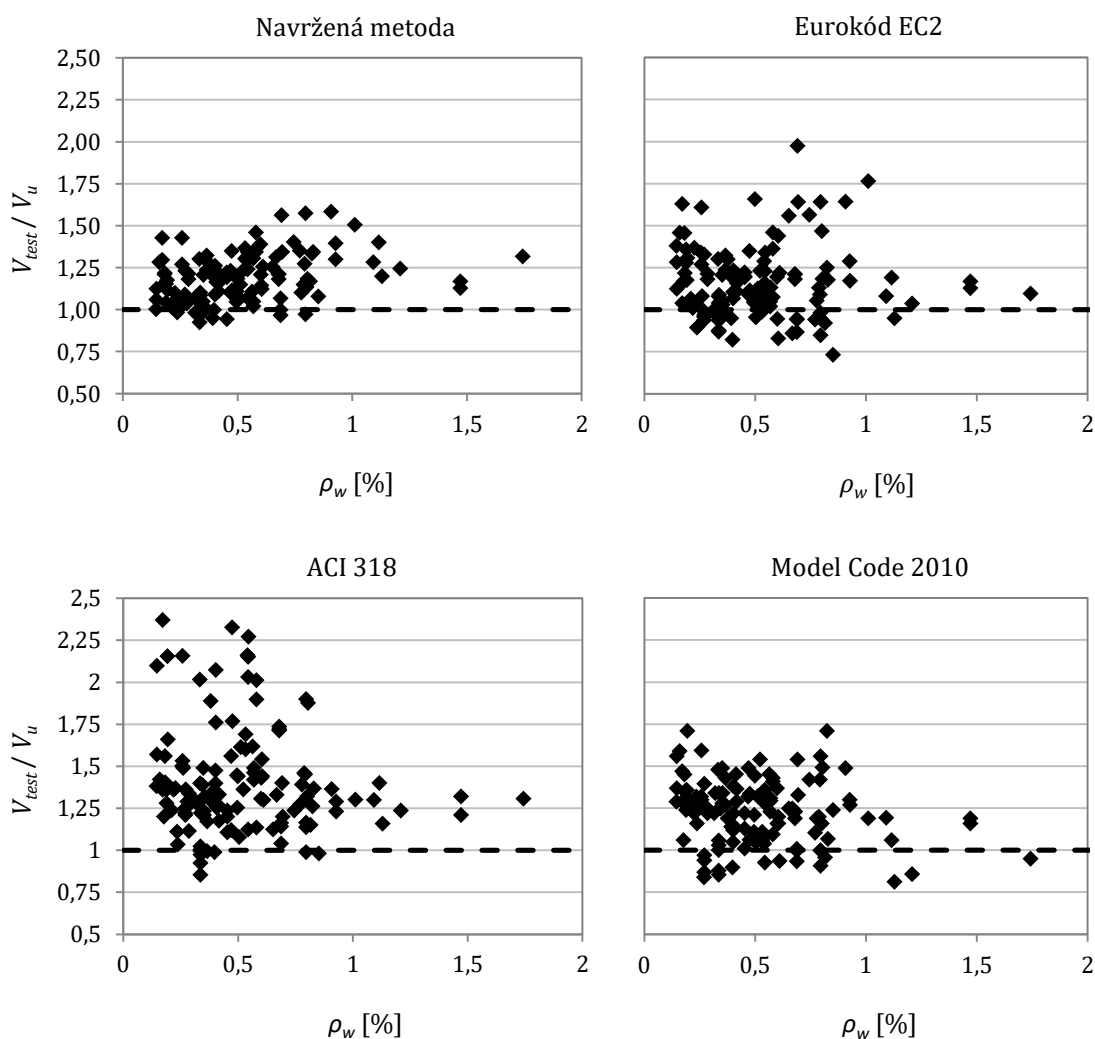
Obr. 7.5: Srovnání metod podle stupně vyztužení ohybovou výztuží

7.3.4 Stupeň vyztužení smykovou výztuží

Obr. 7.6 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na stupeň vyztužení smykovou výztuží ρ_w . Stupeň vyztužení smykovou výztuží představuje množství smykové výztuže rozptýlené v okolí kontrolního obvodu. Obvod je uvažován ve vzdálenosti $0,5d$ líce sloupu a je ho možné určit z výrazu

$$\rho_w = \frac{A_{sw,1} \cdot n_r}{u_{0,5d}(s_0 + 0,5s_1)}. \quad (7.1)$$

Výpočet množství započítané výztuže při předpovědi únosnosti uvnitř smykem vyztužené oblasti je v případě navržené metody a MC 2010 odlišný od ostatních srovnávaných metod. V případě těchto dvou metod není počítáno s tzv. rozptýlenou výztuží uvnitř kontrolního obvodu, ale je určováno množství skutečných prutů protínající předpokládanou plochu porušení desky.

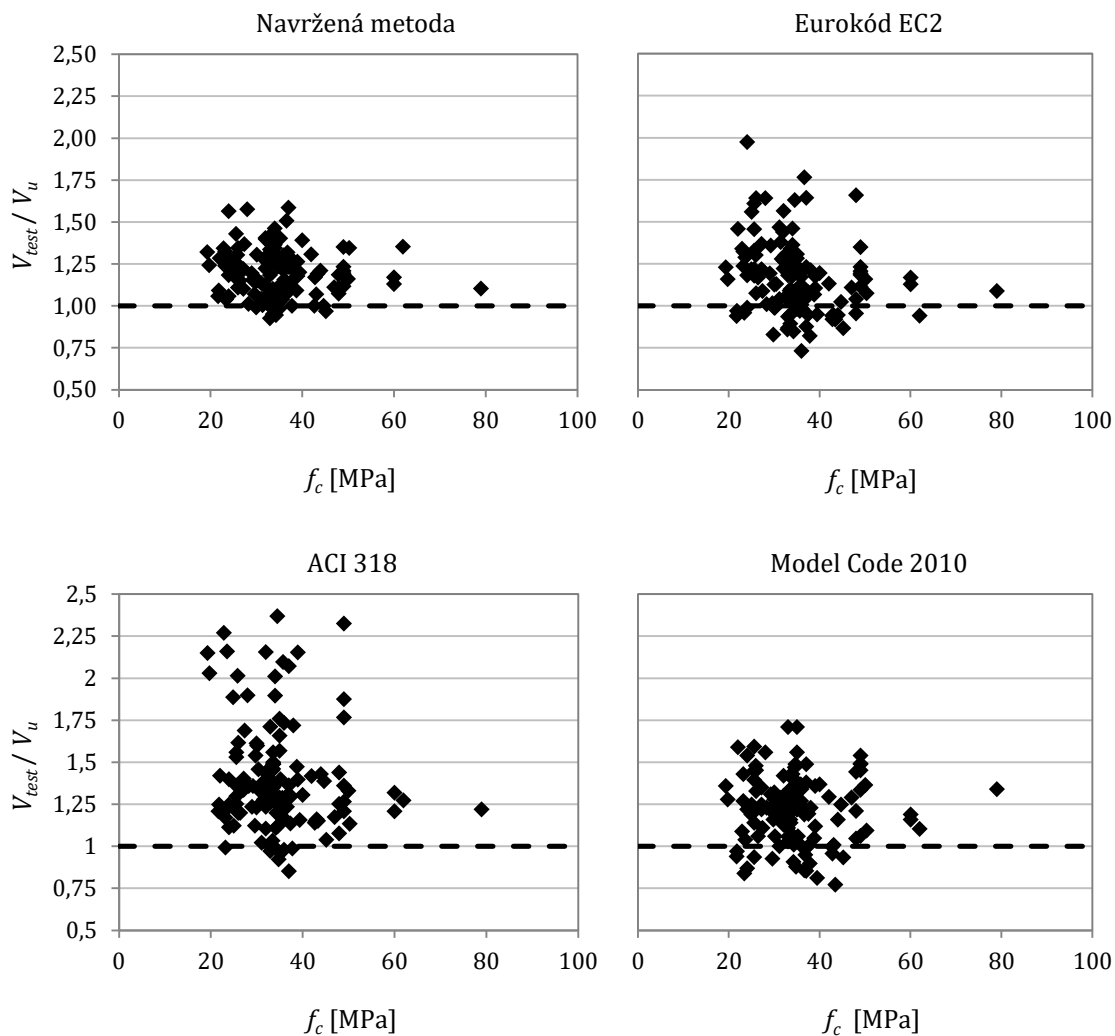


Obr. 7.6: Srovnání metod podle stupně vyztužení smykovou výztuží

Vzhledem k malému množství experimentů se stupněm vyztužení smykovou výztuží větším než 1,0% není jasně zřetelný vliv tohoto parametru na přesnost předpovědi únosnosti desek.

7.3.5 Pevnost betonu v tlaku

Obr. 7.7 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na pevnost betonu v tlaku f_c . Téměř všechny desky v uskutečněných experimentech měly pevnost betonu v tlaku v rozmezí mezi 40 a 50 MPa. V tomto rozmezí není možné pozorovat žádný vliv velikost pevnosti v tlaku na přesnost předpovědi u žádné ze zkoumaných metod výpočtu protlačení.

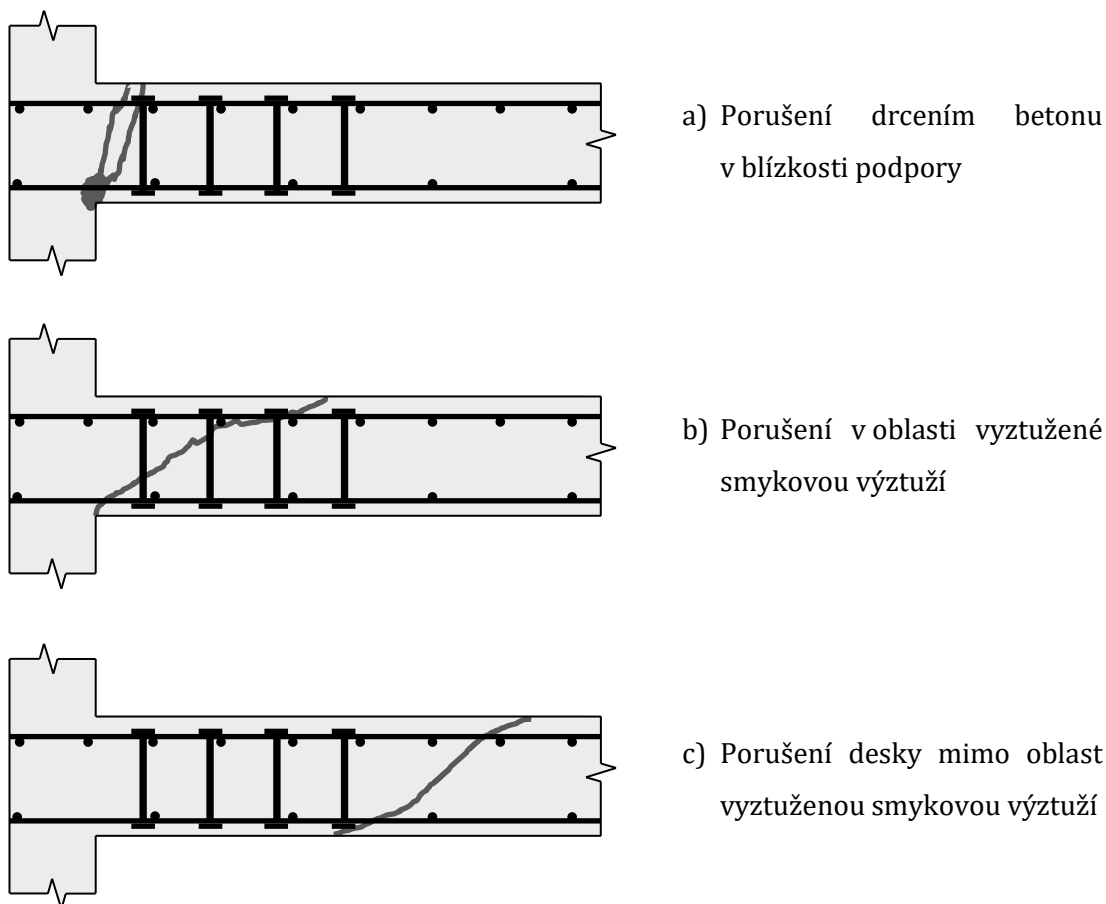


Obr. 7.7: Srovnání metod podle pevnosti betonu v tlaku

7.4 Srovnání metod dle způsobu porušení

7.4.1 Závislost přesnosti předpovědi na způsobu porušení

Porovnávané metody uvažují se třemi hlavními možnými typy způsobu porušení desky v protlačení: tlakové porušení betonu v bezprostřední blízkosti sloupu (podpory), porušení smykovou trhlinou uprostřed smykem vyztužené oblasti a porušení trhlinou mimo smykem vyztuženou oblast. Jednotlivé typy porušení jsou graficky znázorněny níže, na obr. 7.8.



Obr. 7.8: Schéma hlavních způsobů porušení lokálně podepřených desek

V navržené metodě představuje stav selhání drcením betonu v blízkosti podpory selhání styčnicku u sloupu. Porušení ve smykem vyztužené oblasti je poté způsobeno buď selháním betonových vzpěr, nebo táhla, reprezentujícího samotnou smykovou výztuž. Porušení mimo oblast se smykovou výztuží je v navržené metodě totožné s Eurokódem.

V této podkapitole bude provedeno srovnání na všech 127 experimentech a metody budou porovnávány pouze na základě jejich nejkritičtější předpovědi, bez ohledu na skutečné porušení během reálného testování.

Počet předpovědí srovnávaných metod rozdělených dle předpokládaného způsobu porušení desky je zaznamenán do tab. 7.7.

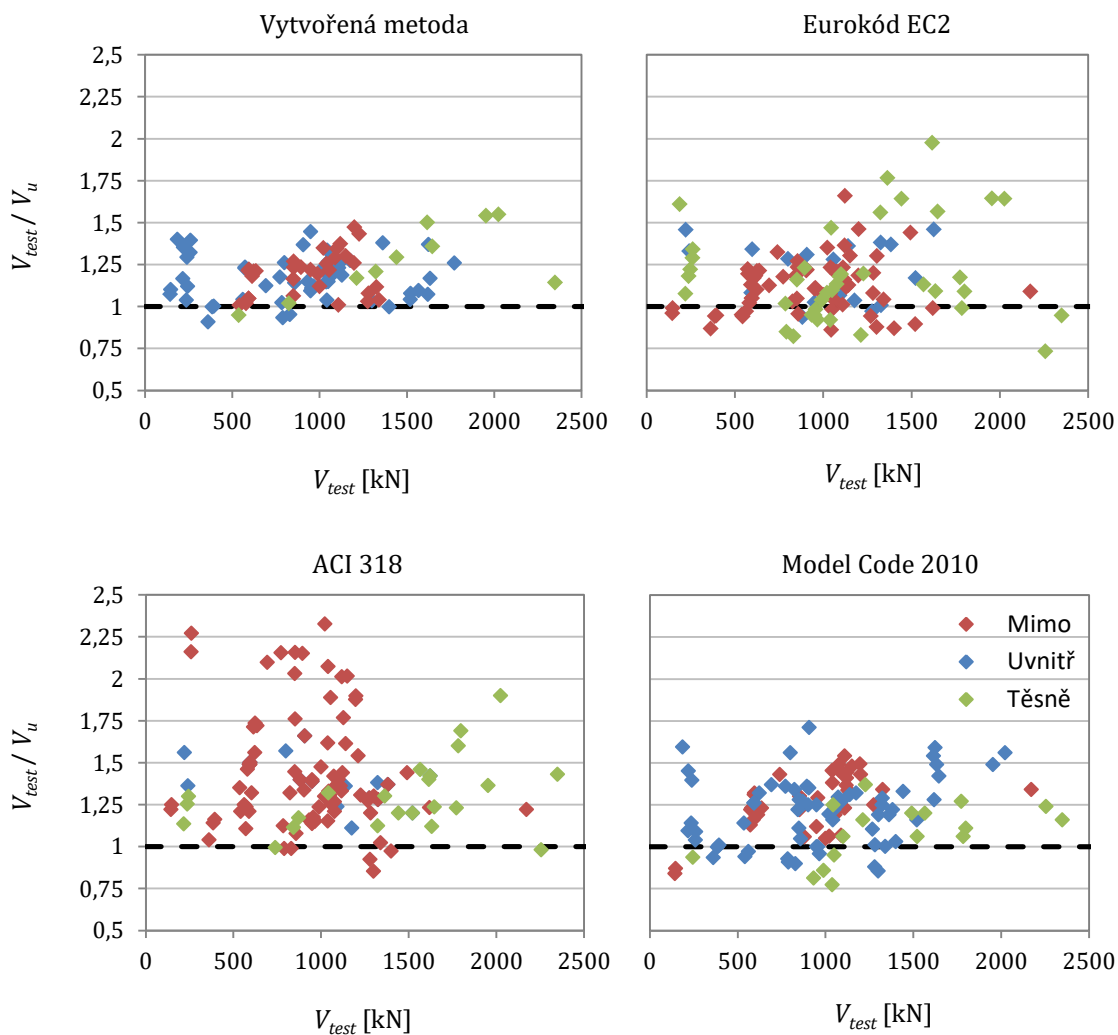
Tab. 7.7: Počet předpovědí srovnávaných metod dle typů porušení desky v protlačení

Způsob porušení	Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
Uvnitř smykem vyztužené oblasti	74	18	11	67
Mimo smykem vyztuženou oblast	47	64	88	40
V těsné blízkosti sloupové podpory	6	45	28	20
Celkem	127	127	127	127

Z výše uvedené tabulky je patrné, že předpovědi způsobu porušení se mezi jednotlivými metodami značně liší. Eurokód a americká norma ACI předpovídají porušení mimo smykem vyztuženou oblast u více než poloviny případů. Naopak Model Code 2010 a navržená metoda předpokládají, že nejvíce desek bude porušeno uvnitř smykem vyztužené oblasti.

Obr. 7.9 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na maximální sílu desky V_{test} dosaženou během experimentu s vyznačenými způsoby předpokládaného porušení desky. Modře jsou značeny předpovědi porušení uvnitř smykem vyztužené oblasti, červeně porušení mimo smykem vyztuženou oblast a zeleně předpovědi porušení drcením betonu v těsné blízkosti sloupu.

Navržená metoda dosahuje mírně konzervativnějších výsledků předpovědi pro předpokládaná porušení desek vně smykem vyztuženou oblast a v těsné blízkosti sloupu. Z obrázku dále vyplývá, že vyšších rozptylů přesnosti dosahuje Eurokód u předpovědí v těsné blízkosti sloupové podpory, respektive norma ACI pro výsledky mimo smykem vyztuženou oblast. Nejkonzervativněji přistupuje MC 2010 k předpovědím mimo smykem vyztuženou oblast.



Obr. 7.9: Srovnání přesnosti metod dle předpokládaného způsobu porušení

7.4.2 Úspěšnost předpovědi způsobu porušení srovnávaných metod

Pro srovnání úspěšnosti předpovědi způsobu porušení bylo z databáze experimentů vybráno 101 výsledků, u kterých byl znám způsob jejich porušení a dal se zařadit do jedné z uvedených kategorií. V tab. 7.8 je zaznačen počet uskutečněných experimentů dle jednotlivých typů porušení.

Tab. 7.8: Rozdělení desek v databázi dle známých způsobů porušení

Vybraných experimentů celkem	S předpokládaným porušením uvnitř smykem vyztužené oblasti	S předpokládaným porušením uvnitř smykem vyztužené oblasti	S předpokládaným porušením v těsné blízkosti sloupové podpory
101	59	32	10

Srovnání metod předpovědi únosnosti v protlačení dle jejich úspěšného odhadu způsobu porušení je znázorněno v tab. 7.9.

Tab. 7.9: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení

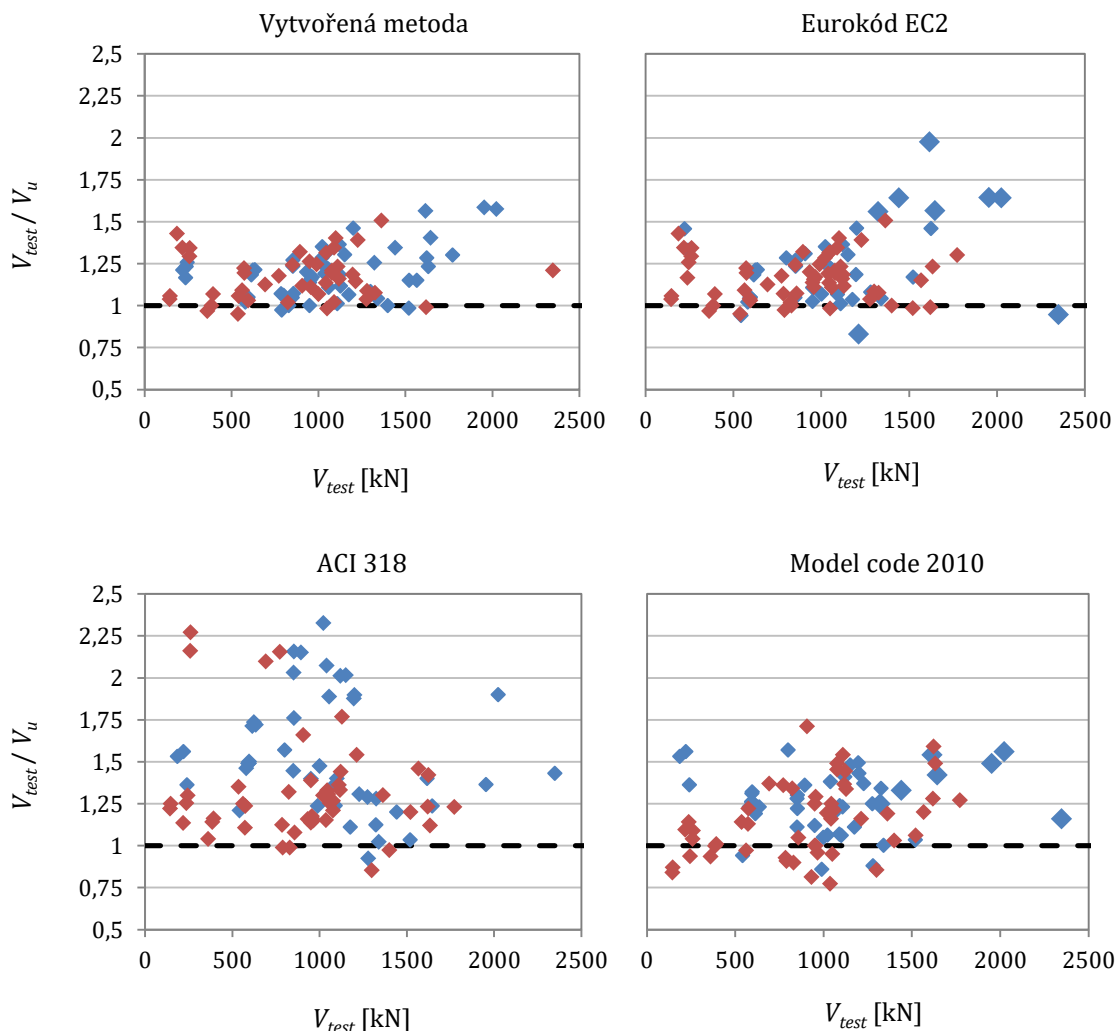
Způsob porušení		Navržená	Eurokód	ACI 318	MC 2010
S předpokládaným porušením uvnitř smykem vyztužené oblasti	Počet	43	9	7	38
	Průměr	1,15	1,24	1,34	1,39
	Variační koef.	11,1 %	14,7 %	15,3 %	10,4 %
S předpokládaným porušením mimo smykem vyztuženou oblast	Počet	19	22	32	21
	Průměr	1,18	1,17	1,61	1,22
	Variační koef.	11,0 %	10,7 %	21,6 %	13,3 %
S předpokládaným porušením v těsné blízkosti sloupové podpory	Počet	6	8	7	2
	Průměr	1,41	1,48	1,38	1,43
	Variační koef.	9,2 %	16,3 %	17,2 %	10,1 %
Úspěšných předpovědí celkem		64	39	46	60
Shoda odhadu způsobu porušení		63,4 %	38,6 %	45,5 %	60,4 %

Nejméně přesně předpověděl skutečný způsob porušení desky Eurokód a to v 39 případech. Mírně lepšího výsledku dosáhla i americká norma ACI se 46 úspěšnými výsledky. Lepších hodnot dosahuje metoda dle MC 2010 s úspěchem předpovědi u 60 % případů. Navržená metoda výpočtu únosnosti dosáhla shody způsobu porušení v téměř dvou třetinách výsledků.

Nízké výsledky přesností jsou v případě Eurokódu a ACI 318 dány především nadhodnocováním únosnosti desky v protlačení ve smykem vyztužené oblasti oproti ostatním způsobům jejího možného selhání.

Z těchto výsledků vyplývá, že pro porušení drcení betonu v okolí podpory je navržená metoda konzervativní. Všechny 6 předpovědi však spadají do jedné sady experimentů (Beutel, Hegger [31, 32]), což není dostatečně rozsáhlý vzorek pro učinění závěru.

Obr. 7.10 znázorňuje vliv přesnosti předpovědi únosnosti jednotlivých metod s ohledem na maximální sílu desky V_{test} dosažené během experimentu s vyznačením úspěšných a neúspěšných předpovědí. Modře jsou v grafech značeny úspěšné předpovědi, červeně neúspěšné.



Obr. 7.10: Srovnání přesnosti metod dle úspěšného předpovězení způsobu porušení

Navržená metoda a výpočet dle normy ACI 318 nevykazují žádný významný vliv úspěšnosti předpovědi způsobu porušení na velikost poměru test/teorie. Eurokód EC2 a Model Code 2010 vykazují mírně konzervativnější hodnoty pro výsledky úspěšných předpovědí způsobu porušení. V případě metody MC 2010 patří téměř všechny předpovědi na stranu nebezpečnou mezi výsledky s neúspěšnou předpovědí typu porušení desky.

7.5 Vliv součinitele maximální únosnosti

V této kapitole bude provedeno srovnání navržené metody s Eurokódem se zahrnutím vlivu součinitele maximální únosnosti o různých hodnotách. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6, omezující součinitel k_{max} určuje, kolikrát je možné navýšit únosnost desky přidáním smykového vyztužení oproti vypočtené únosnosti desky v protlačení bez zahrnutí smykové výztuže.

Velikost součinitele maximální únosnosti se liší mezi jednotlivými evropskými dodatky normy. Dle ČSN EN 1992-1-1 je možné určit omezující součinitel pro smykovou výztuž spolehlivě zakotvenou v úrovni horní i dolní výztuže [58] z rovnice

$$\begin{aligned} k_{max} &= 1,45 & \text{pro } h &= 200 \text{ mm}, \\ k_{max} &= 1,70 & \text{pro } h &\geq 700 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (7.2)$$

kde je možné pro mezilehlé hodnoty tloušťky desky h použít lineární interpolace.

Eurokód zároveň stanovuje, že v případě smykových trnů je možné uvažovat i s vyššími hodnotami součinitele k_{max} , za předpokladu, že se jedná o smykové trny navržené dle evropských technických doporučení [ETA].

Pro účely komplexního srovnání účinku omezujícího součinitele na předpověď únosnosti bude zároveň provedeno porovnání dle níže uvedené rovnice.

$$k_{max} \begin{cases} \text{pro smykové trny } k_{max} = 1,9, \\ \text{pro ostatní výztuž } \begin{cases} k_{max} = 1,45 & \text{pro } h = 200 \text{ mm}, \\ k_{max} = 1,70 & \text{pro } h \geq 700 \text{ mm}. \end{cases} \end{cases} \quad (7.3)$$

V následujících podkapitolách 7.5.1 a 7.5.2 je znázorněno srovnání vlivu součinitele k_{max} pro dva druhy jeho výpočtu. Prvně jsou hodnoty maximální únosnosti v protlačení stanoveny pouze pomocí rovnice (7.2), kde nebyl brán ohled na typ smykové výztuže při stanovování velikosti faktoru k_{max} .

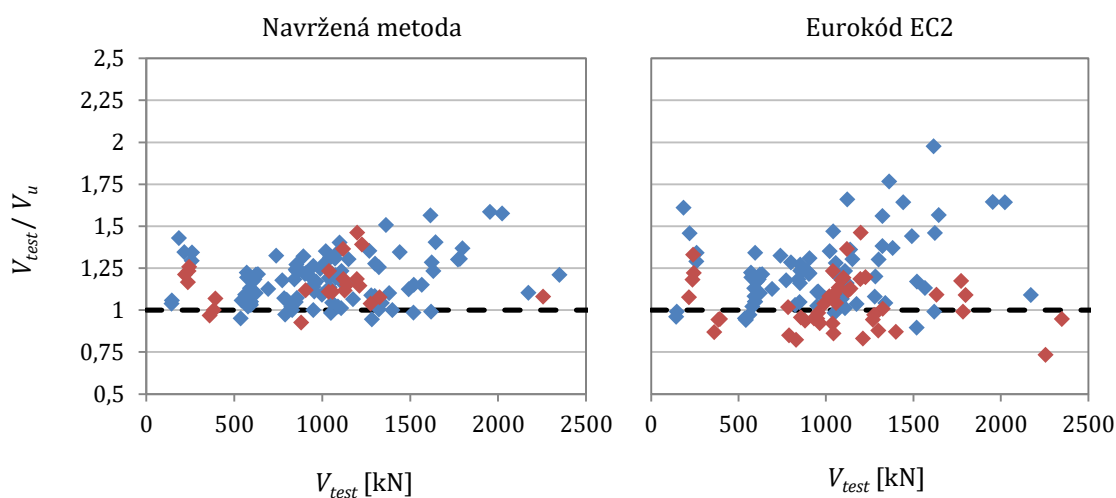
Druhé srovnání je provedeno pomocí rovnice (7.3), kde u experimentů se smykovými trny bude předpokládáno, že splňují podmínky pro použití vyššího součinitele maximální únosnosti a ten bude v těchto případech roven 1,9.

V podkapitole je znázorněno srovnání Eurokódu s navrženou metodou na experimentálních vzorcích, u kterých došlo k porušení pouze ve smykem vyztužené oblasti nebo v blízkosti podpory.

7.5.1 Srovnání vlivu součinitele maximální únosnosti dle rovnice (7.2)

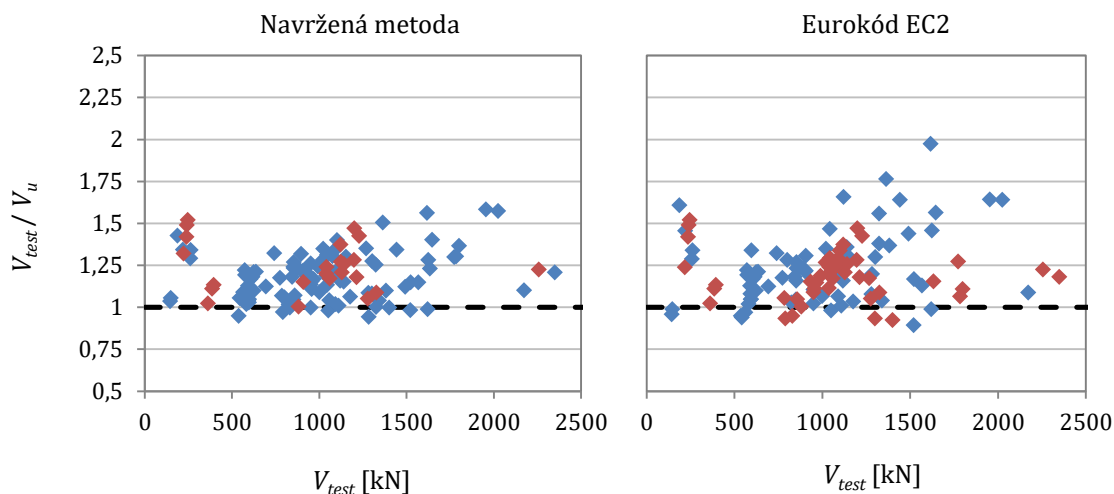
Následující obrázky znázorňují srovnání Eurokódu a navržené metody bez započítaného i se započítaným součinitelem maximální únosnosti spočteným pomocí rovnice (7.2). Takto vypočítaný součinitel byl aplikován při výpočtu předpokládané únosnosti u obou z uvedených metod.

Červeně jsou v jednotlivých grafech značeny výsledky předpovědi únosnosti těch experimentů, u nichž byl rozhodujícím omezením faktor k_{max} .



Obr. 7.11: Srovnání bez započítání součinitele k_{max} dle (7.2)

V navržené metodě měla velikost k_{max} rozhodující vliv na předpověď únosnosti ve 22 případech. U Eurokódu byl tento faktor limitním v 50 případech. V případě metody EC2 je také možné z grafů pozorovat výraznější nárůst bezpečnosti předvídané únosnosti.

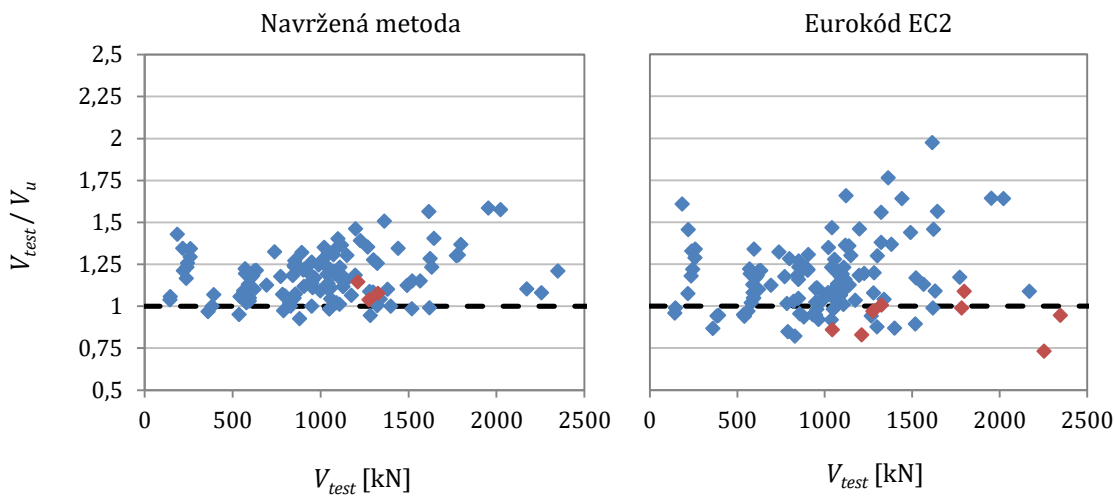


Obr. 7.12: Srovnání se započítaným součinitelem k_{max} dle (7.2)

7.5.2 Srovnání vlivu součinitele maximální únosnosti dle rovnice (7.3)

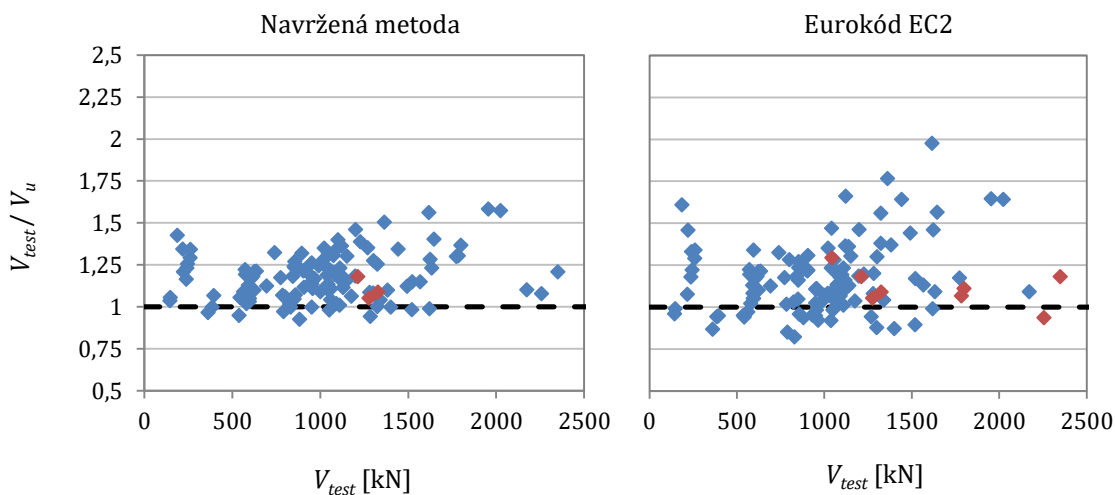
Následující obrázky znázorňují srovnání Eurokódu a navržené metody bez započítaného i se započítaným součinitelem maximální únosnosti spočteným pomocí rovnice (7.3). Takto vypočítaný součinitel byl aplikován při výpočtu předpokládané únosnosti u obou z uvedených metod.

Červeně jsou v jednotlivých grafech značeny výsledky předpovědi únosnosti těchto experimentů, kde byl rozhodujícím omezením faktor k_{max} .



Obr. 7.13: Srovnání bez započítání součinitele k_{max} dle (7.3)

V tomto případě měl součinitel maximální únosnosti výrazně menší vliv oproti součiniteli vypočteném dle rovnice (7.2). V navržené metodě byla jeho velikost rozhodující ve 3 případech. U Eurokódu byl tento faktor limitní hodnotou předpovědi únosnosti u 11 případů.



Obr. 7.14: Srovnání se započítaným součinitelem k_{max} dle (7.3)

7.5.3 Srovnání Eurokódu a navržené metody bez součinitele maximální únosnosti

V následující tabulce je provedeno srovnání navržené metody bez vlivu součinitele k_{max} a Eurokódu s tímto součinitelem spočteným pomocí obou zmíněných rovnic.

Tab. 7.10: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení

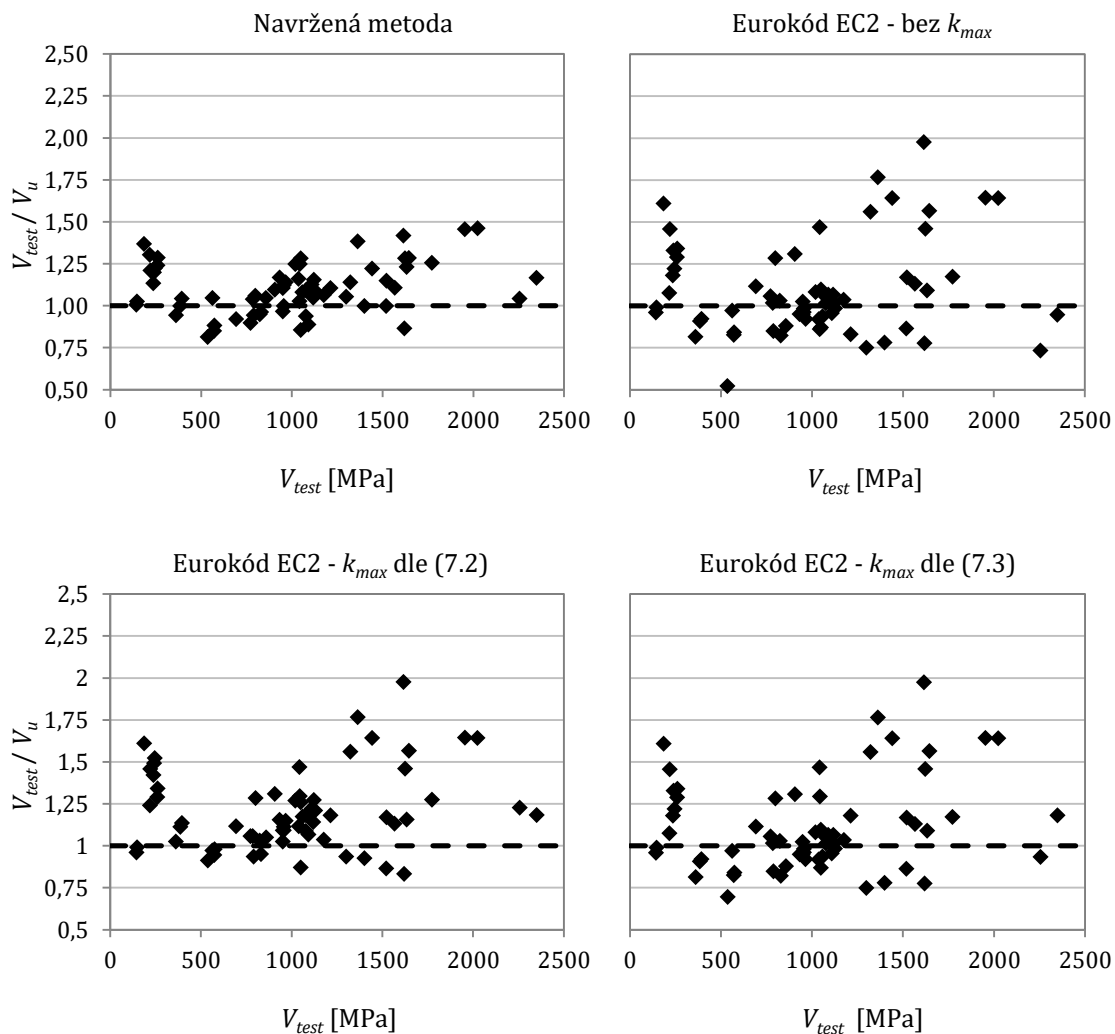
Veličina	Navržená bez k_{max}	Eurokód k_{max} dle (7.2)	Eurokód k_{max} dle (7.3)
Experimentů celkem	127	127	127
Počet na stranu nebezpečnou	8	12	24
Podíl na stranu nebezpečnou	6,30 %	9,45%	18,9%
Průměrná hodnota V_{test}/V_u	1,18	1,22	1,18
Minimální hodnota V_{test}/V_u	0,93	0,89	0,82
Maximální hodnota V_{test}/V_u	1,58	1,98	1,98
5% kvantil	0,99	0,95	0,92
95% kvantil	1,42	1,62	1,62
Variační koeficient	11,9 %	15,7%	17,4%

Z výše uvedených výsledků předpovědí únosnosti v protlačení je možné vidět, že i přes použití součinitelů maximální únosnosti stále dosahuje Eurokód méně přesných hodnot, než navržená metoda.

7.5.4 Srovnání s experimenty s porušením uvnitř smykového vyztužení

V následujícím porovnání jsou použity pouze ty z experimentů, u kterých došlo k porušení v blízkosti podpory nebo ve smyem vyztužené oblasti. Tento způsob porušení splňuje celkem 69 experimentálních vzorků (z toho u 59 případů došlo k porušení v oblasti se smykovou výztuží a v 10 případech k drcení betonu).

Obr. 7.15 znázorňuje přesnost s ohledem na maximální sílu desky V_{test} pro čtyři srovnávané výpočty: navrženou metodu a Eurokód neobsahující součinitel maximální únosnosti, a Eurokód se součinitelem k_{max} určeným z rovnice (7.2) respektive (7.3).



Obr. 7.15: Srovnání metod podle pevnosti betonu v tlaku

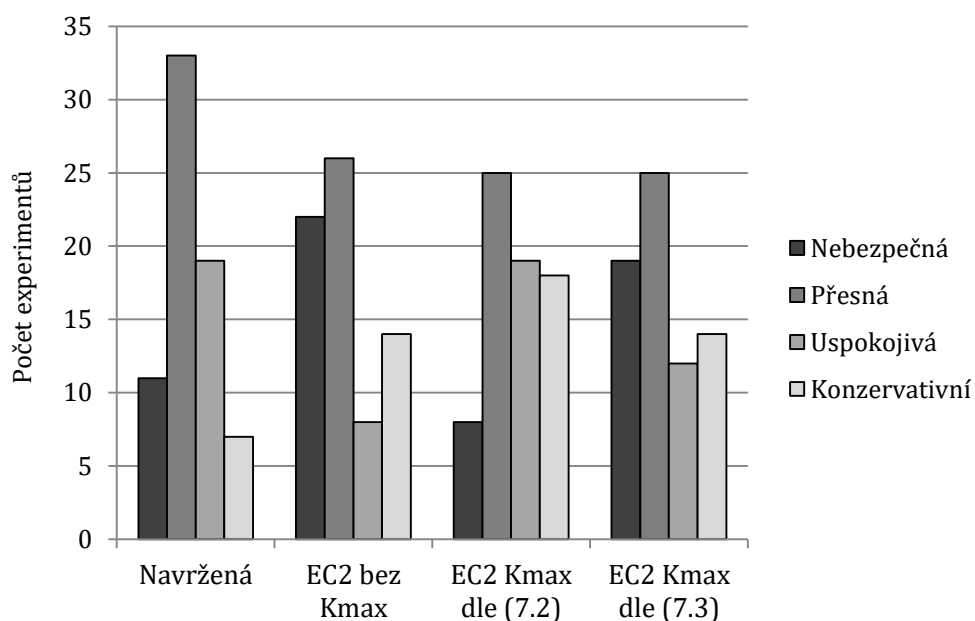
Z výsledků vyplývá, že užití součinitele maximální únosnosti dle rovnice 7.2 výrazně navýší bezpečnost předpovědi únosnosti. Použití vyšších hodnot součinitele k_{max} jako v případě rovnice 7.3 může vést k méně bezpečným odhadům maximální únosnosti, což odpovídá závěrům uvedeným v [25].

Číselně jsou hlavní statistické parametry tohoto srovnání na experimentech s porušením uvnitř smykiem vyztužené oblasti zaznamenány v tab. 7.11.

Tab. 7.11: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení

Veličina	Navržená metoda	Eurokód bez k_{max}	Eurokód k_{max} (7.2)	Eurokód k_{max} (7.3)
Experimentů celkem	69	69	69	69
Průměrná hodnota V_{test}/V_u	1,11	1,10	1,21	1,12
Minimální hodnota V_{test}/V_u	0,81	0,52	0,85	0,69
Maximální hodnota V_{test}/V_u	1,4946	1,98	1,98	1,98
Počet na stranu nebezpečnou	14	30	13	27
Podíl na stranu nebezpečnou	20,3%	43,5%	18,8%	39,1%
5% kvantil	0,87	0,78	0,92	0,80
95% kvantil	1,37	1,64	1,64	1,64
Variační koeficient	13,7%	25,1%	19,3%	23,6%

Na níže uvedeném grafu je možné vidět zařazení výsledků předpovědi do kategorií bezpečnosti dle kapitoly 7.1.



Obr. 7.16: Výsledky srovnání na 69 experimentech dle kategorií bezpečnosti

8 ZÁVĚR

Disertační práce je zaměřena na chování lokálně podepřených konstrukcí (desek) se smykovou výztuží. V rámci experimentální studie bylo vytvořeno 6 vzorků desek v měřítku 1:3 o straně 1 metr. Tyto experimenty sloužily k ověření a optimalizaci vytvořené metody založené na metodě strut-and-tie pro předpověď únosnosti v protlačení smykem vyztužených desek. Na základě dosažených výsledků je možné učinit následující závěry.

8.1 Závěry uskutečněné experimentální studie

- Úspěšně byla ověřena proveditelnost experimentů na zmenšených vzorcích desek. Všechny desky selhaly předpokládaným způsobem porušení uvnitř smykem vyztužené oblasti. Maximální dosažené síly jednotlivých vzorků odpovídají předpovědím z výpočtů. Výsledky rozšířily stávající databázi uskutečněných experimentů o mezilehlé hodnoty, zejména v závislosti na změnu únosnosti vzhledem ke stupni vyztužení smykovou výztuží.
- Naměřené deformace samotných desek a výztuže odpovídají výsledkům z uskutečněné nelineární analýzy v programu Midas FEA.
- Použitá náhrada smykových trnů navýšila únosnost desek dle předpokladů prvotních výpočtů. Více vyztužené desky dosáhly vyšších únosností než vzorky s menším stupněm smykového vyztužení. U vysoce vyztužených desek však byl nárůst únosnosti minimální, oproti těm méně vyztuženým.
- Mezi nevýhody provádění zmenšených experimentů patří zejména vysoké nároky na přesnost jejich provedení. Měření mohou být velmi ovlivněna výrobními imperfekcemi, které jsou poměrově větší než u experimentů ve větších měřítcích. Je důležité klást důraz na přesné rozmístění výztuže, což může být obtížné z důvodu minimálních tolerancí.

8.2 Závěry k navržené metody a jejímu srovnání se stávajícími způsoby výpočtu předpovědi únosnosti v protlačení

- Navržená metoda, založená na příhradové analogii, nahrazuje výpočet Eurokódu pro oblast porušení deskových konstrukcí se smykovou výztuží novou náhradní

soustavou vzpěr a táhel. Geometrie tohoto příhradového modelu je stanovena pomocí iteračního procesu na základě rovnosti napětí.

- Účinnost navržené metody byla ověřována na výsledcích 127 experimentů nashromážděných z odborné literatury za poslední desetiletí. Metoda byla porovnávána s předpověďmi únosnosti třech vybraných norem a doporučení: Eurokódu EC2, americké normě ACI 318-11 a metodě uvedené v Model Code 2010.
- Při srovnání vychází výsledky předpovědí ACI 318-11 jako značně konzervativní a často velice podhodnocují skutečnou únosnost testovaných desek. Americká norma dosáhla nejvyšších hodnot poměru V_{test}/V_u s nejvyšším variačním koeficientem. Značně lepších výsledků předpovědi dosahuje výpočet únosnosti pomocí MC 2010.
- Přesnost předpovědi Eurokódu závisí na použitém součiniteli maximální únosnosti. Hodnoty tohoto součinitele vyšší než 1,7 mohou vést k nebezpečným odhadům únosnosti. Toto tvrzení je v souladu se závěry uvedenými v [25]. Obecně dosahuje Eurokód mírně vyšších hodnot variačního koeficientu předpovědí pro všechny hodnoty součinitele k_{max} než MC 2010, s nižší střední hodnotou poměru V_{test}/V_u , což je však mnohdy na úkor bezpečnosti předpovědi.
- Navržená metoda dosahuje poměrně přesných výsledků při předpovídání únosnosti desky. Metoda dosáhla nejnižších hodnot variačního koeficientu u všech srovnávaných metod za zachování podobné střední hodnoty jako v případě Eurokódu, bez nebezpečného nadhodnocování únosnosti desek. Tyto výsledky jsou získány na úkor mírně obtížnějšího výpočtu s nutností použití iteračního přístupu při stanovování geometrie posuzovaných částí modelu.

8.3 Doporučení pro další výzkum

- Rozšíření stávajícího modelu předpovědi pro výztuže z kompozitních materiálů a také jejich dodatečné umístění do deskových konstrukcí. Model dále rozšířit o ověření desek o velké tloušťce a základových konstrukcích, u kterých často dochází k nadhodnocení skutečné únosnosti v protlačení.
- Ověření modelu pro případ, kdy sloupové podpory mají obdélníkový tvar či nesymetrické zatížení, případně s následným rozšířením databáze o experimenty na protlačení s otvory v deskách v blízkosti podpor.

LITERATURA

- [1] GASPARINI, D. A. Contributions of C. A. P. Turner to Development of Reinforced Concrete Flat Slabs 1905-1909. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 2002, **128**(10), s. 1243-1252.
- [2] MUTTONI, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*. USA, 2008, **105**(4), s. 440-450.
- [3] FIB. *Punching of structural concrete slabs*. Fib bulletin 12. Lausanne, Switzerland, 2001, 307 s.
- [4] EC2. *Eurocode 2 Design of concrete structures, part 1-1 : General rules and rules for buildings*. 2004, 241 s.
- [5] LIPS S., *Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement*. Thèse EPFL n°5409, Lausanne, Switzerland, 2012, 273 s.
- [6] ACI 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. USA. American Concrete Institute, 2014, 519 s.
- [7] MC 2010. *Model Code 2010 (Final Draft)*. Lausanne, Switzerland: Fédération internationale du béton fib, 2010.
- [8] SIA 262. *Schweizerischer Ingenieur - und Architektenverein, SIA 262:2013 – Betonbau*. Zürich, Schweiz, 2013, 102 s.
- [9] DIANA FEA. *DIANA – Finite Element Analysis, User's Manual* [online]. Release 10.1. Delft, Netherlands, 2016 [cit. 2018-11-20].
- [10] CORNELISSEN, H. A. W, D. A. HORDIJK a H. W. REINHARDT. Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete. *Heron*. Delft University of Technology, 1986, **31**(2).
- [11] HORDIJK, D. A. a H. W. REINHARDT. *Local Approach to Fatigue of Concrete*. Delft University of Technology, 1991. PhD Thesis.
- [12] THORENFELDT, E., A. TOMASZEWICZ a J. J. JENSEN. Mechanical properties of high strength concrete and application to design. In: *Utilization of high strength concrete*. Stavanger, Norway, 1987, s. 149-159.

- [13] VECCHIO, F. J. a M. P. COLLINS. Compression Response of Cracked Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 1993, **119**(12), s. 3590-3610.
- [14] MENÉTREY, P. Analytical computation of the punching strength of reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. 1996, **93**(5), s. 503-511.
- [15] MENÉTREY, P. Synthesis of punching failure in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2002, **24**(6), s. 497-507.
- [16] MENÉTREY, P. Analytical model for punching load prediction. In: *International Workshop on Punching Shear Capacity of RC slabs*. Stockholm, 2000, s. 191-199.
- [17] REGAN, P. E. a M. W. BREASTRUP. Punching shear in reinforced concrete. *Comité Euro-International du béton*. 1985, (Bulletin d'information 168).
- [18] RIZK, E., H. MARZOUK a R. TILLER. Design of Thick Concrete Plates Using Strut-and-Tie Model. *ACI Structural Journal*. 2012, **109**(5), s. 677-685.
- [19] TILLER, R. *Strut-and-Tie Model for Punching Shear of Concrete Slabs*. Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland St. John's, NL, Canada, 1995, 103 s. Master's thesis.
- [20] MARZOUK, H., E. RIZK a R. TILLER. Design of Shear Reinforcement Using a Strut and Tie Model. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010, **37**(2), s. 181-194.
- [21] ZHOU, P., B. BARR a F. LYDON. Fracture Properties of High Strength Concrete with Varying Silica Fume Content and Aggregates. *Cement and Concrete Research*. 1995, **25**(3), s. 543-552.
- [22] THEODORAKOPOULOS, D. a R. SWAMY. Ultimate Punching Shear Strength Analysis of Slab-Column Connections. *Cement and Concrete Composites*. 2002, **24**(6), s. 509-521.
- [23] BARTOLAC, M., D. DAMJANOVIĆ a I. DUVNJAK. Punching strength of flat slabs with and without shear reinforcement. *Građevinar*. 2015, **67**(8), s. 771-786.
- [24] EINPAUL, J., F. BRANTSCHEN, M. FERNÁNDEZ RUIZ a A. MUTTONI. Performance of punching shear reinforcement under gravity loading: Influence of type and detailing. *ACI Structural Journal*. Farmington Hills, USA, 2016, **113**(4), s. 827-838.

- [25] MAJTÁNOVÁ, L., J. HALVONIK a J. HANZEL. The Maximum Capacity of Flat Slabs. *Solid State Phenomena: 23rd Concrete Days 2016*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016, (259), s. 232-237. ISSN 1662-9779.
- [26] MAJTÁNOVÁ, L., J. HALVONIK a J. HANZEL. The Maximum Capacity of Flat Slabs. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, 29 June - 1 July 2016*. High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 2016.
- [27] HALVONIK, J. a L. FILLO. The Maximum Punching shear resistance of flat slabs. In: *Concrete and Concrete Structures 2013 Conference*. Procedia Engineering 65, 2013, s. 376-381.
- [28] SHEHATA, I. A. E. M. Simplified model for estimating the punching resistance of reinforced concrete slabs. *Materials and Structures*. 1990, **23**(5), s. 364-371.
- [29] SHEHATA, I. A. E. M. *Theory of punching in concrete slabs*. Polytechnic of Central London, UK, 1985, 257 s. PhD thesis.
- [30] ANDRADE, M. A. S. *Punção em Lajes Cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação a Armadura de Flexão*. Dissertação – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999, 176 s. PhD Thesis.
- [31] BEUTEL, R. *Punching of shear reinforced flat slabs with the support in the center*. RWTH, Aachen, Germany, 2003. PhD thesis.
- [32] BEUTEL, R. a J. HEGGER. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. *Cement and Concrete Composites*. 2002, **24**(6), s. 539-549.
- [33] BIRKLE, G. *Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout*. University of Calgary, Calgary, Canada, 2004. PhD Thesis.
- [34] ETTER, S., D. HEINZMAN a T. MARTI. *Experiments on the punching shear strength of the reinforced concrete slabs*. IBK Bericht Nr. 324. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2009, 64 s. ISBN 978-3-7281-3324-1.
- [35] FERREIRA, M. P. *Punching of flat slabs with shear reinforcement and unbalanced moments*. University of Brasilia, Brasilia, Brazil, 2010. PhD thesis.

- [36] GOMES, R. B. a P. E. REGAN. Punching Resistance of RC Flat Slabs with Shear Reinforcement. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 1999, **125**(6), s. 684-692.
- [37] CHANA, P. S. a S. B. DESAI. Design of shear reinforcement against punching. *The Structural Engineering*. 1992, (70), s. 159-164.
- [38] CHANA, P. S. A prefabricated shear reinforcement system for flat slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1993, (99), s. 345-358.
- [39] HEGGER, J., F. HÄUSLER a M. RICKER. Zur maximalen Durchstanstragfähigkeit von Flachdecken. *Beton - und Stahlbetonbau*. 2007, **102**, s. 770-777.
- [40] LADNER, M. *Untersuchungsbericht Durchstanversuche an Flachdeckenausschnitten*. Luzern, Switzerland, 1998, 38 s.
- [41] MARTI, P., J. PRALONG a B. THURLIMANN. *Schubversuche an Stahlbeton-Platten*. Institut für Baustatik und Konstruktion, 1977, 123 s.
- [42] MARZOUK, H. a D. JIANG. Experimental Investigation on Shear Enhancement Types for High-Strength Concrete Plates. *ACI Structural Journal*. 1997, **94**(1), s. 49-58.
- [43] FERREIRA, M., G. MELO, P. REGAN a R. VOLLUM. Punching of Reinforced Concrete Flat Slabs with Double-Headed Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2014, **111**(2), s. 363-374. DOI: 10.14359/51686535.
- [44] REGAN, P. a F. SAMADIAN. Shear Reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. *The Structural Engineer*. 2001, **79**(10), s. 24-31.
- [45] RIZK, E., H. MARZOUK a A. HUSSEIN. Punching Shear of Thick Plates with and without Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2011, **108**(5), s. 581-591.
- [46] SEIBLE, F., A. GHALI a W. H. DILGER. Preassembled shear reinforcing units for flat plates. *ACI Journal*. 1980, **77**(1), s. 28-35.
- [47] THAI XUAN DAM. *Shear Strenght and Behavior of Flat Slab Structures Reinforced with Headed Shear Studs*. University of Michigan, 2016, 274 s. PhD Thesis.
- [48] THAI XUAN DAM a J. WIGHT. Flexurally-triggered punching shear failure of reinforced concrete slab-column connections reinforced with headed shear studs arranged in orthogonal and radial layouts. *Engineering Structures*. 2016, **110**, s. 258-268. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.050.

- [49] TOLF, P. *Plattjocklekens inverkan på betongplattors hållfasthet vid genomstansning*. Bulletin 146. Royal Institute of Technology, Dep. of Structural Mechanics and Engineering, 1988, 64 s.
- [50] TRAUTWEIN, L. M. *Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento Tipo "Stud" Interno e Tipo Estribo Inclinado*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2001, 185 s.
- [51] TRAUTWEIN, L. M. *Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento do Tipo "Stud" Interno*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006, 350 s. PhD Thesis.
- [52] LIPS, S., A. MUTTONI a M. FERNANDEZ-RUIZ. Experimental Investigation on the Punching Strength and the Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal*. 2012, **109**(6), s. 889-900.
- [53] LIPS, S., A. MUTTONI a M. FERNANDEZ-RUIZ. *Durchstanzversuche an Deckenausschnitten mit FIDECA Durchstanzbewehrung*. EPFL-IBéton, Lausanne, Switzerland, 2010, 55 s.
- [54] LIPS, S., A. MUTTONI a M. FERNANDEZ-RUIZ. Experimental Investigation on the Punching Strength and the Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal*. 2012, **109**(6), s. 889-900.
- [55] MUELLER, F. X., A. MUTTONI a B. THURLIMANN. *Durchstanzversuche an Flachdecken mit Aussparungen*. 7305-5. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETHZ, Zürich: Birkhäuser Verlag, 1984, 118 s.
- [56] VOLLUM, R. L., T. ABDEL-FATTAH, M. EDER a A. Y. ELGHAZOULI. Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2. *Magazine of Concrete Research*. 2010, **62**(1), s. 3-16.
- [57] OLIVEIRA, M. H., M. J. M. PEREIRA FILHO, D. R. C. OLIVEIRA, M. P. FERREIRA a G. S. S. A. MELO. Punching resistance of internal slab-column connections with double-headed shear studs. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2013, **6**(5), s. 681-714.
- [58] PROCHÁZKA, J. a J. ŠMEJKAL. Protlačení z pohledu ČSN 1991-1-1 a předpisů pro patentovanou smykovou výztuž. *Beton TKS*. 2014, **5**, s. 60-67.

SEZNAM UŽITÝCH ZKRATEK

$A_{sw,1}$	plocha průřezu jednoho kusu smykové výztuže
A_{sw}	celková plocha výztuží v jednom obvodu smykové výztuže
A_{sx}	plocha ohybové výztuže ve směru x
A_{sy}	plocha ohybové výztuže ve směru y
A_v	plocha prutů smykové výztuže v kontrolním obvodu ve vzdálenosti $2d$ od podpory
E_c	modul pružnosti betonu
E_s	modul pružnosti ohybové výztuže
E_{sw}	modul pružnosti smykové výztuže
G_f	lomová energie
$V_{R,cs}$	únosnost v protlačení desky se smykovou výztuží
$V_{R,max}$	hodnota maximální síly v protlačení
$V_{R,out}$	únosnost v protlačení mimo oblast se smykovou výztuží
V_R	únosnost desky v protlačení
V_{Rc}	únosnost v protlačení bez smykové výztuže
V_{ct}	příspěvek únosnosti tahové únosnosti betonu
V_{dow}	příspěvek únosnosti způsobený působením podélné výztuže (hmoždinkový efekt)
$V_{node,1}$	diagonální únosnost styčnicku
$V_{node,1}$	horizontální únosnost styčnicku
$V_{node,max}$	maximální únosnost styčnicku
V_{out}	únosnost protlačení mimo smykově vyztuženou oblast
V_s	smyková síla působící na desku v metodě Model Code 2010
$V_{strut,1}$	únosnost diagonální vzpěry
$V_{strut,2}$	únosnost horizontální vzpěry
V_{sw}	únosnost smykové výztuže v protlačení

V_{test}	síla v protlačení zjištěná experimentálně
V_{tie}	únosnost táhla reprezentujícího smykovou výztuž
V_u	maximální síla v protlačení naměřená během experimentu
b_d	tloušťka diagonální vzpěry
b_x	délka strany započítané ohybové výztuže při výpočtu dle Eurokódu směr x
b_y	délka strany započítané ohybové výztuže při výpočtu dle Eurokódu směr y
d_g	maximální velikost frakce kameniva
$d_{v,out}$	vzdálenost mezi horní ohybovou výztuží a spodním koncem smykové výztuže
f_{bd}	návrhová hodnota mezního napětí v soudržnosti
$f_{c,cube}$	pevnost betonu v tlaku (krychelná)
f_c	pevnost betonu v tlaku (válcová)
f_{ct}	pevnost betonu v tahu
f_s	mez kluzu podélné ocelové výztuže
f_y	mez kluzu podélné výztuže
$f_{yw,ef}$	efektivní napětí ve smykové výztuži
f_{yw}	mez kluzu smykové výztuže
k_1	součinitel ekvivalentní krychelné pevnosti betonu dle normy BS 8110-97
k_{dg}	součinitel frakce kameniva
k_{max}	součinitel maximální únosnosti
k_r	součinitel zohledňující pootočení desky
k_{sys}	součinitel zohledňující způsob vyztužení v MC 2010
k_ψ	součinitel pootočení desky
l_{ch}	charakteristická délka reprezentující velikostní efekt (Rizk, Marzouk, Tiller)
m_R	únosnost desky v ohybu
m_s	průměrný moment v podpoře způsobený zatížením
n_r	počet prutů smykové výztuže v jednom obvodu
n_s	počet obvodů smykové výztuže

r_1	poloměr vycházející z geometrie modelu zobrazené na obrázku obr. 2.14
r_2	poloměr vycházející z geometrie modelu zobrazené na obrázku obr. 2.14
r_s	vzdálenost od středu podpory po místo nulového momentu (<i>point of contra-flexure</i>)
s_0	vzdálenost prvního prutu smykové výztuže od podpory
s_1	vzdálenost mezi dvěma obvody smykové výztuže
s_r	radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže
$u_{0,5d}$	kontrolní obvod desky uvažovaný ve vzdálenosti $0.5d$ líce sloupu
u_0	obvod sloupové podpory
u_1	první kontrolní obvod (velikost záleží na použité metodě výpočtu)
u_{2d}	kontrolní obvod určený ve vzdálenosti $2d$ od okraje podpory/sloupu
u_{out}	kontrolní obvod mimo oblast se smykovou výztuží
x_1	tloušťka styčnicku
β_{sw}	úhel prutů smykové výztuže
ε_{cu}	maximální poměrné přetvoření betonu
ρ_e	stupeň vyztužení vztažený k základní hodnotě meze kluzu oceli 500 MPa
$\rho_{w,eff}$	efektivní stupeň vyztužení smykovou výztuží
ρ_w	stupeň vyztužení smykovou výztuží
ρ_x	stupeň vyztužení ohybovou výztuží ve směru x
ρ_y	stupeň vyztužení ohybovou výztuží ve směru y
$\sigma_{R,max}$	maximální povolené napětí v betonu z doporučení pro příhradovou analogii
σ_s	napětí v ohybové výztuži
σ_{sw}	napětí ve smykové výztuži
τ_c	tangenciální únosnost betonu
φ_{max}	maximální pootočení desky
ϕ_s	průměr ohybové výztuže
ϕ_w	průměr jednoho prutu smykové výztuže

AVG	průměrná hodnota poměru test/teorie
CoV	variační koeficient
h	v kapitole 5 šířka pásu koncentrovaných trhlin (<i>crack band width</i>)
h	výška desky
μ	Poissonovo číslo
A	součinitel hustoty betonu
c	délka strany/průměr sloupové podpory
d	efektivní tloušťka desky
k	součinitel únosnosti v protlačení bez smykové výztuže v Eurokódu EC2
k	velikostní faktor v navržené metodě
n	poměr mezi modulem pružnosti oceli a betonu
s	nakloněná délka trhliny
u	obvod sloupu (podpory)
x	výška tlačené oblasti
α	úhel mezi horizontální a diagonální betonovou vzpěrou
β	redukční součinitel příspěvku únosnosti betonu táhla příhradového modelu
ζ	součinitel napětí ohybové výztuže v Menétreyho metodě
η	velikostní součinitel desky v Menétreyho metodě výpočtu
θ	úhel smykové trhliny
μ	velikostní součinitel desky v Menétreyho metodě výpočtu
ν	součinitel tlakové pevnosti betonu
ξ	součinitel zohledňující vliv stupně vyztužení ohybovou výztuží
ρ	stupeň vyztužení ohybovou výztuží
ψ	pootočení desky

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Protlačení deskových konstrukcí	13
Obr. 2.1: Rozměry kontrolního obvodu u_1	19
Obr. 2.2: Kontrolní obvod u_{out} pro výpočet protlačení dle EC2	20
Obr. 2.3: Kontrolní obvod u_1 pro ACI 318-11	21
Obr. 2.4: Obvod u_{out} pro ortogonální umístění výztuže v metodě ACI 318-11.....	23
Obr. 2.5: Obvod u_{out} pro radiální umístění výztuže v metodě ACI 318-11.....	23
Obr. 2.6: Kontrolní obvod u_1 dle MC 2010	24
Obr. 2.7: Oblast započítané smykové výztuže v metodě Model Code 2010	26
Obr. 2.8: Efektivní výška smykové výztuže $d_{v, out}$ pro MC 2010	27
Obr. 2.9: Kontrolní obvod u_{out} výpočtu mimo smykem vyztuženou oblast dle MC 2010	27
Obr. 2.10: Kontrolní obvod u_1 dle SIA 262:2013	29
Obr. 2.11: Oblast započítané smykové výztuže v metodě Model Code 2010.....	29
Obr. 2.12: Kontrolní obvod mimo smykově vyztuženou oblast dle SIA 262:2013	30
Obr. 2.13: Efektivní výška smykové výztuže $d_{v, out}$ pro SIA 262:2013.....	30
Obr. 2.14: Schéma příhradového modelu od Menétreyeho [3].....	31
Obr. 2.15: Schéma strut-and-tie modelu Rizka, Marzouka a Tillera [18].....	34
Obr. 2.16: Schéma výpočtu smykové výztuže modelu Rizka, Marzouka a Tillera [18]	36
Obr. 3.1: Rozmístění ohybové výztuže vyrobených desek.....	38
Obr. 3.2: Dimenze a schéma použitého smykového vyztužení desky: a) tvar jednoho prutu výztuže, b) boční pohled, c) půdorys, d) způsob ukotvení k podélné výztuži.....	39
Obr. 3.3: Dimenze a schéma použitého smykového vyztužení desky.....	40
Obr. 3.4: Postup vázání armatury desek.....	41
Obr. 3.5: Postup betonáže desek.....	42
Obr. 3.6: Schéma uložení desky ve zkušebním rámu během zatěžovací zkoušky	45
Obr. 3.7: Rozmístění snímačů na horním povrchu testovaných desek	46

Obr. 3.8: Umístění vertikálních snímačů k ocelovému nosníku	46
Obr. 3.9: Pohled na zkušební rám při přípravě ke zkoušce desky B6	47
Obr. 3.10: Rozmístění snímačů na horním povrchu testovaných desek.....	47
Obr. 3.11: Poloha tenzometrů hlavní ohybové výztuže desek	48
Obr. 3.12: Umístěné tenzometry na hlavní ohybové výztuži.....	48
Obr. 4.1: Závislost průhybu na zatížení v bodu V1.....	49
Obr. 4.2: Naměřené průhyby desky A4 při zatěžovací zkoušce ve směru X.....	51
Obr. 4.3: Naměřené průhyby desky A4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y.....	51
Obr. 4.4: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce A4	52
Obr. 4.5: Naměřené průhyby desky A6 při zatěžovací zkoušce ve směru X.....	53
Obr. 4.6: Naměřené průhyby desky A6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y.....	53
Obr. 4.7: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce A6	54
Obr. 4.8: Naměřené průhyby desky B4 při zatěžovací zkoušce ve směru X.....	55
Obr. 4.9: Naměřené průhyby desky B4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y.....	55
Obr. 4.10: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce B4.....	56
Obr. 4.11: Naměřené průhyby desky B6 při zatěžovací zkoušce ve směru X.....	57
Obr. 4.12: Naměřené průhyby desky B6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y.....	57
Obr. 4.13: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce B6.....	58
Obr. 4.14: Naměřené průhyby desky C4 při zatěžovací zkoušce ve směru X	59
Obr. 4.15: Naměřené průhyby desky C4 při zatěžovací zkoušce ve směru Y	59
Obr. 4.16: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce C4.....	60
Obr. 4.17: Naměřené průhyby desky C6 při zatěžovací zkoušce ve směru X	61
Obr. 4.18: Naměřené průhyby desky C6 při zatěžovací zkoušce ve směru Y	61
Obr. 4.19: Naměřené hodnoty tenzometrů umístěných na desce C6.....	62
Obr. 4.20: Porušení desky A6.....	63
Obr. 4.21: Porušení desky B4.....	63
Obr. 4.22: Porušení desky B6.....	64

Obr. 5.1: Model fixovaných trhlin [9]	66
Obr. 5.2: Model rotovaných trhlin [9]	66
Obr. 5.3: Tahové změkčení betonu dle modelu Hordijka.....	67
Obr. 5.4: Model chování betonu v tlaku dle Thorenfeldta	68
Obr. 5.5: Redukce tlakové pevnosti účinkem příčných trhlin dle Vecchia a Collinse.....	68
Obr. 5.6: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky A4	70
Obr. 5.7: Maximální průhyby desky A4: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	70
Obr. 5.8: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech	71
Obr. 5.9: Přetvoření betonu na horním povrchu desky A4	71
Obr. 5.10: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky A6.....	72
Obr. 5.11: Maximální průhyby desky A6: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	72
Obr. 5.12: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech.....	73
Obr. 5.13: Přetvoření betonu na horním povrchu desky A6.....	73
Obr. 5.14: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky B4.....	74
Obr. 5.15: Maximální průhyby desky B4: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	74
Obr. 5.16: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech.....	75
Obr. 5.17: Přetvoření betonu na horním povrchu desky B4.....	75
Obr. 5.18: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky B6.....	76
Obr. 5.19: Maximální průhyby desky B6: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	76
Obr. 5.20: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech.....	77
Obr. 5.21: Přetvoření betonu na horním povrchu desky B6.....	77
Obr. 5.22: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky C4.....	78
Obr. 5.23: Maximální průhyby desky C4: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	78
Obr. 5.24: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech.....	79
Obr. 5.25: Přetvoření betonu na horním povrchu desky C4.....	79
Obr. 5.26: Průhyb zatěžování experimentu a numerické analýzy desky C6.....	80
Obr. 5.27: Maximální průhyby desky C6: a) ve směru X, b) ve směru Y.....	80

Obr. 5.28: Přetvoření výztuže ve dvou měřených bodech	81
Obr. 5.29: Přetvoření betonu na horním povrchu desky C6	81
Obr. 6.1: Schématické znázornění příhradového modelu navržené metody	85
Obr. 6.2: Detail styčnicku v oblasti sloupové podpory desky	88
Obr. 6.3: Odvození únosnosti styčnicku: a) horizontální, b) diagonální	88
Obr. 6.4: Odvození úhly diagonální vzpěry	89
Obr. 6.5: Odvození tloušťky diagonální vzpěry	90
Obr. 6.6: Schéma odvození únosnosti vzpěr	91
Obr. 6.7: Obvod vzpěry: a) čtvercového sloupu, b) kruhového sloupu	92
Obr. 6.8: Oblast započítané výztuže navržené metody	93
Obr. 6.9: Schéma množství započítané výztuže <i>nef</i>	94
Obr. 7.1: Srovnání metod podle efektivní tloušťky desky.....	101
Obr. 7.2: Znázornění rozdělení výsledků srovnání do kategorií bezpečnosti	102
Obr. 7.3: Srovnání metod podle efektivní tloušťky desky.....	104
Obr. 7.4: Srovnání metod podle tvaru a rozměrů sloupové podpory.....	105
Obr. 7.5: Srovnání metod podle stupně vyztužení ohybovou výztuží.....	106
Obr. 7.6: Srovnání metod podle stupně vyztužení smykovou výztuží.....	107
Obr. 7.7: Srovnání metod podle pevnosti betonu v tlaku.....	108
Obr. 7.8: Schéma hlavních způsobů porušení lokálně podepřených desek.....	109
Obr. 7.9: Srovnání přesnosti metod dle předpokládaného způsobu porušení.....	111
Obr. 7.10: Srovnání přesnosti metod dle úspěšného předpovězení způsobu porušení..	113
Obr. 7.11: Srovnání bez započítání součinitele k_{max} dle (7.2).....	115
Obr. 7.12: Srovnání se započítaným součinitelem k_{max} dle (7.2).....	115
Obr. 7.13: Srovnání bez započítání součinitele k_{max} dle (7.3).....	116
Obr. 7.14: Srovnání se započítaným součinitelem k_{max} dle (7.3).....	116
Obr. 7.15: Srovnání metod podle pevnosti betonu v tlaku	118
Obr. 7.16: Výsledky srovnání na 69 experimentech dle kategorií bezpečnosti	119

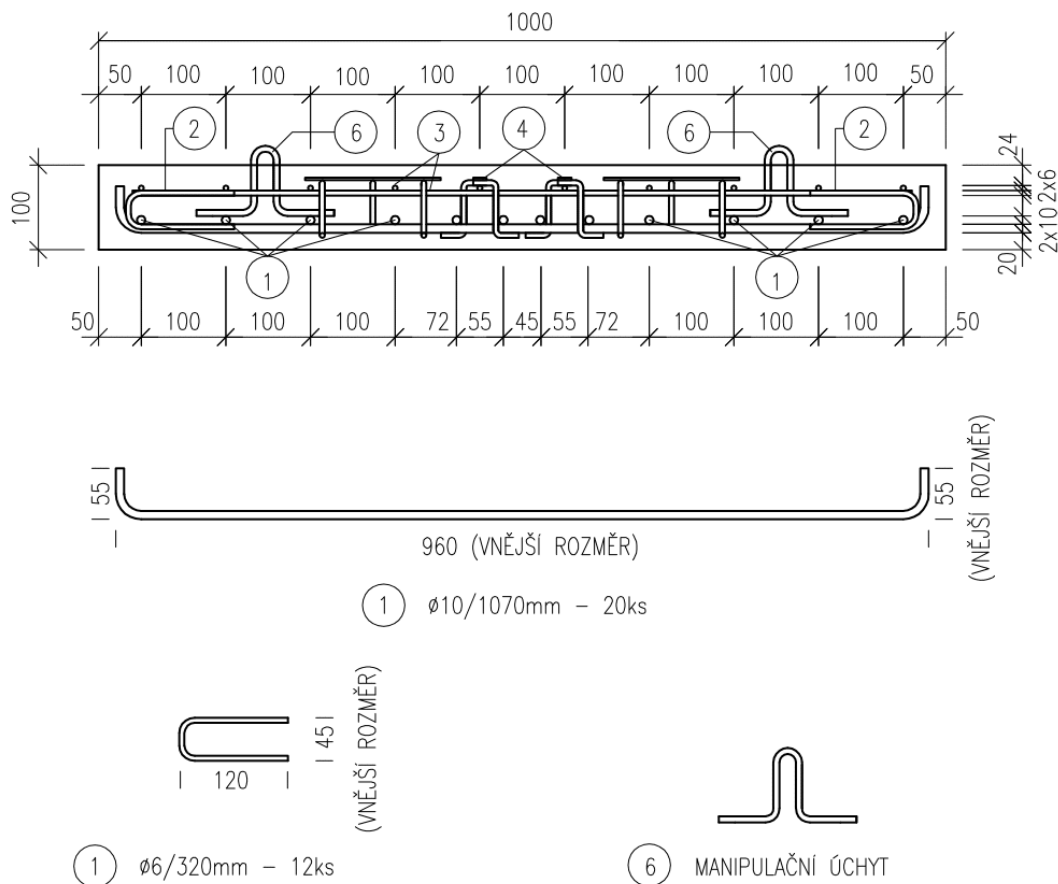
SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Parametry testovaných desek	37
Tab. 3.2: Parametry smykové výztuže	39
Tab. 3.3: Složení použité betonové směsi desek.....	41
Tab. 3.4: Parametry testovaných krychlí pro desky A4, A6, B4, C4 a C6 a zjištěná krychelná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cube}$	43
Tab. 3.5: Parametry testovaných hranolů pro desky A4, A6, B4, C4 a C6 a zjištěný modul pružnosti betonu E_c	43
Tab. 3.6: Parametry testovaných krychlí pro desku B6 a zjištěná krychelná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cube}$	44
Tab. 3.7: Parametry testovaných hranolů pro desku B6 a zjištěný modul pružnosti betonu E_c	44
Tab. 4.1: Naměřené maximální posuny desek a jejich pootočení při porušení	50
Tab. 5.1: Parametry materiálových charakteristik modelu konečných prvků.....	69
Tab. 5.2: Parametry materiálových charakteristik modelu konečných prvků.....	69
Tab. 5.3: Maximální dosažená síla v čase porušení desky	82
Tab. 5.4: Maximální průhyb v čase porušení desky	82
Tab. 5.5: Pootočení v čase porušení desky.....	82
Tab. 6.1: Souhrnný seznam vzorců navržené metody.....	95
Tab. 7.1: Seznam experimentů pro srovnání se základními parametry desek (* obsahují kruhové sloupy)	98
Tab. 7.2: Hodnoty předpovědi únosnosti v protlačení pro jednotlivé sady experimentů..	99
Tab. 7.3: Vyhodnocení srovnání metod předpovědi únosnosti v protlačení	100
Tab. 7.4: Srovnání bezpečnosti předpovědi únosnosti v protlačení	101
Tab. 7.5: Počet dosazených výsledků dle jednotlivých kategorií bezpečnosti.....	102
Tab. 7.6: Srovnání metod dle množství jejich vstupních parametrů.....	103

Tab. 7.7: Počet předpovědí srovnávaných metod dle typů porušení desky v protlačení	110
Tab. 7.8: Rozdělení desek v databázi dle známých způsobů porušení	111
Tab. 7.9: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení.....	112
Tab. 7.10: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení.....	117
Tab. 7.11: Srovnání metod dle úspěšnosti předpovědi způsobu porušení.....	119

PŘÍLOHA A VÝKRESY DESEK A4 A A6

ŘEZ A-A:

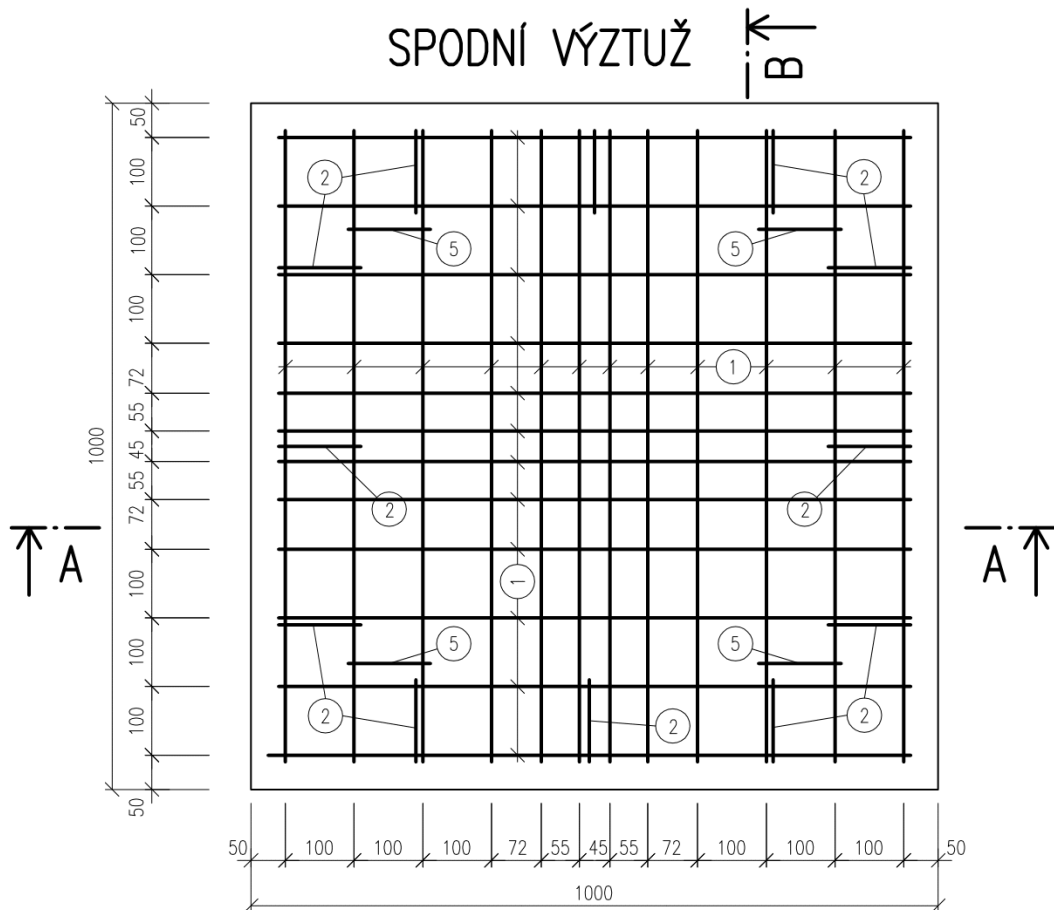


VÝPIS OCELI

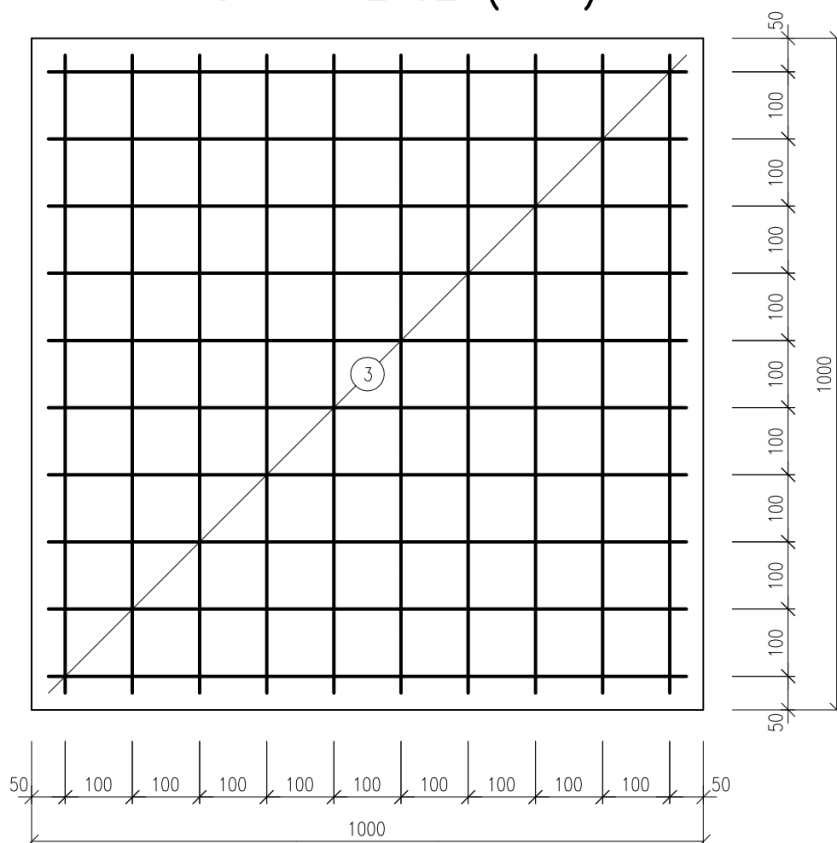
OZNAČENÍ PRVKU	PROFIL	KUSŮ CELKEM	DÉLKA PLOCHA [m; m ²]	CELKOVÁ DÉLKA/PLOCHA		
				OCEL B500B		
				ØR6	ØR10	16x3
1	Ø10	24	1,06	-	25,44	-
2	Ø6	12	0,32	3,84	-	-
3	Ø6 KARI 6/100	1	19,0	19,0	-	-
* 4	Ø6	36	0,11	3,96	-	-
5	16x3 PÁSOVINA	12	0,14	-	-	1,92
SOUČET DÉLEK/PLOCH [m; m ²]				26,8	25,44	1,92
HMOTNOST JEDNOTKOVÁ [kg/bm; kg/m ²]				0,222	0,616	0,377
HMOTNOST CELKOVÁ [kg]				5,95	15,67	0,73
OCEL CELKEM				22,35 kg		

* SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU A4 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 4mm
 SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU A6 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 6mm

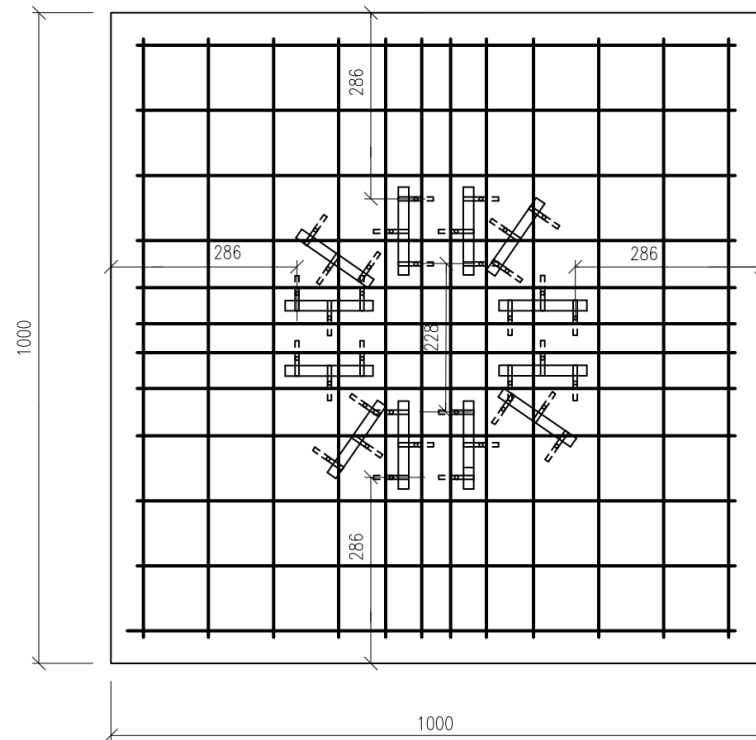
SPODNÍ VÝZTUŽ



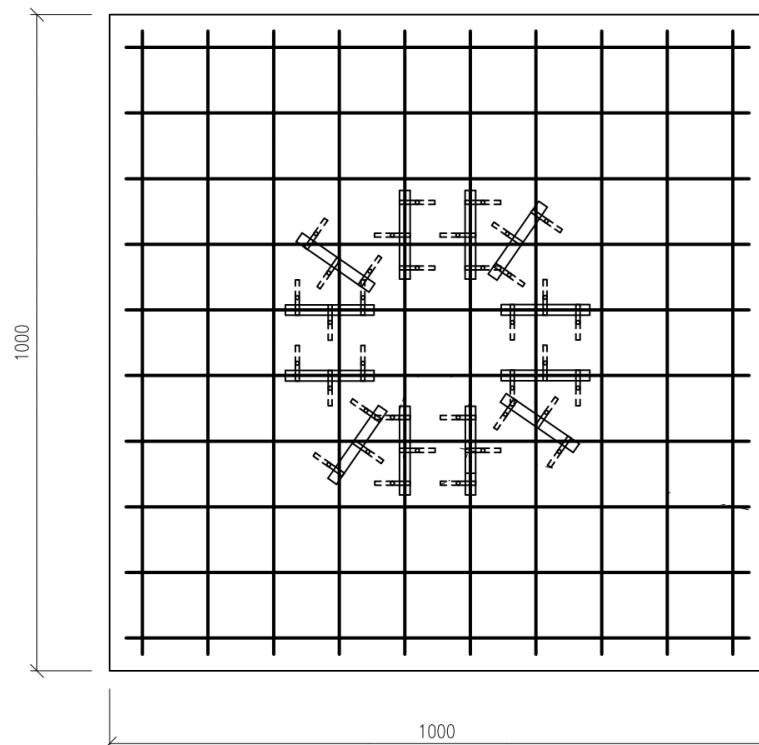
HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)



SPODNÍ VÝZTUŽ

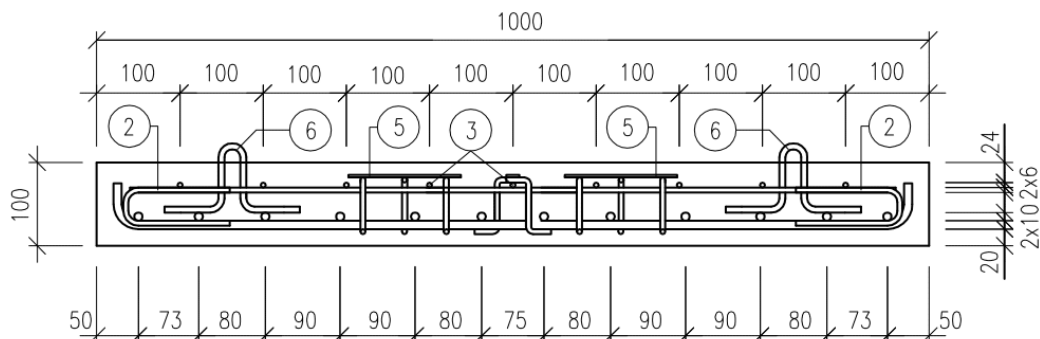


HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)

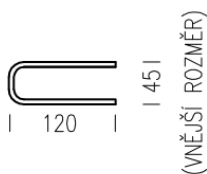


PŘÍLOHA B VÝKRESY DESEK B4 A B6

ŘEZ A-A:



① $\varnothing 10/1060\text{mm} - 20\text{ks}$



① $\varnothing 6/320\text{mm} - 12\text{ks}$



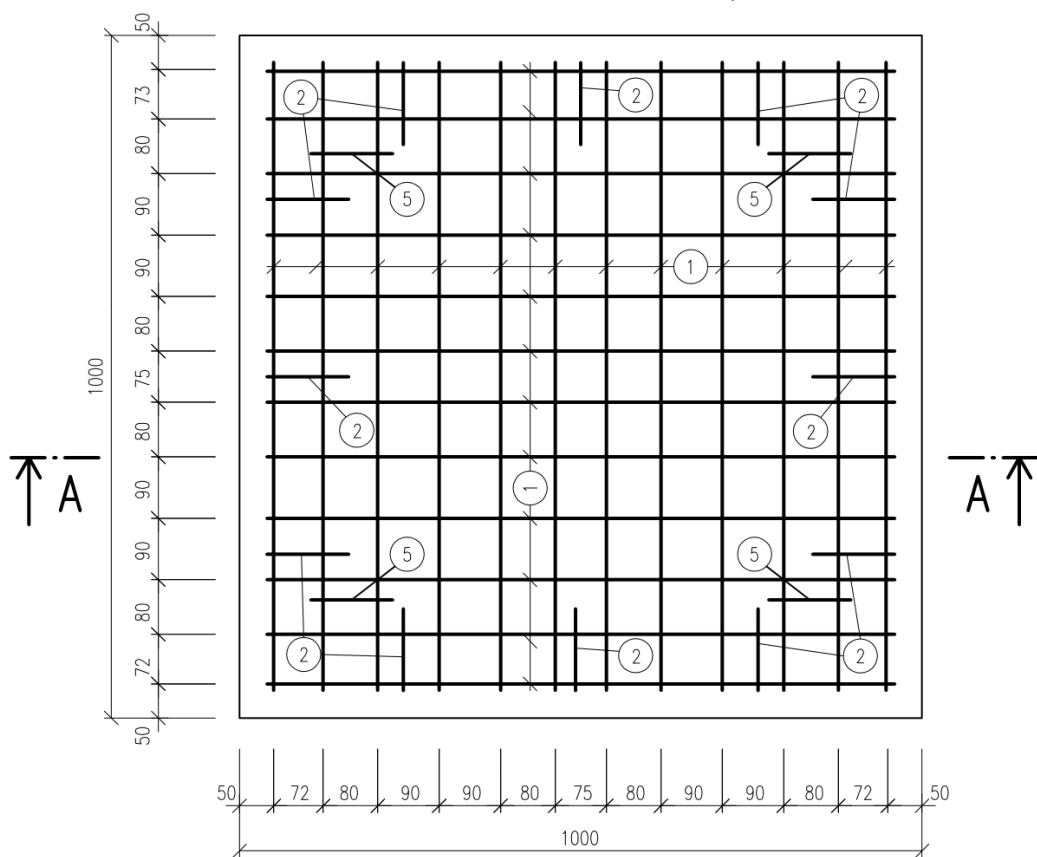
⑥ MANIPULAČNÍ ÚCHYT

VÝPIS OCELI

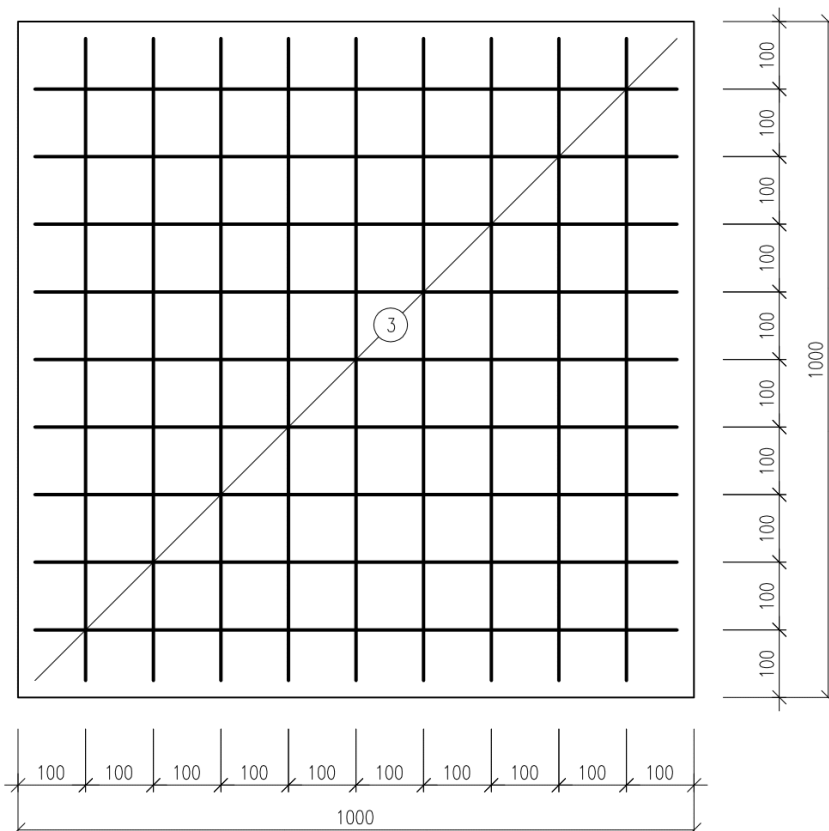
OZNAČENÍ PRVKU	PROFIL	KUSŮ CELKEM	DÉLKA PLOCHA [m; m ²]	CELKOVÁ DÉLKA/PLOCHA OCELI B500B		
				$\varnothing R6$	$\varnothing R10$	16x3
1	$\varnothing 10$	24	1,06	-	25,44	-
2	$\varnothing 6$	12	0,32	3,84	-	-
3	$\varnothing 6$ KARI 6/100	1	19,0	19,0	-	-
* 4	$\varnothing 6$ ($\varnothing 4$)	24	0,11	2,64	-	-
5	16x3 PÁSOVINA	8	0,14	-	-	1,12
SOUČET DÉLEK/PLOCH [m; m ²]				25,48	25,44	1,12
HMOTNOST JEDNOTKOVÁ [kg/bm; kg/m ²]				0,222	0,616	0,377
HMOTNOST CELKOVÁ [kg]				5,67	15,67	0,42
OCEL CELKEM				21,76 kg		

* SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU B4 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 4mm
SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU B6 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 6mm

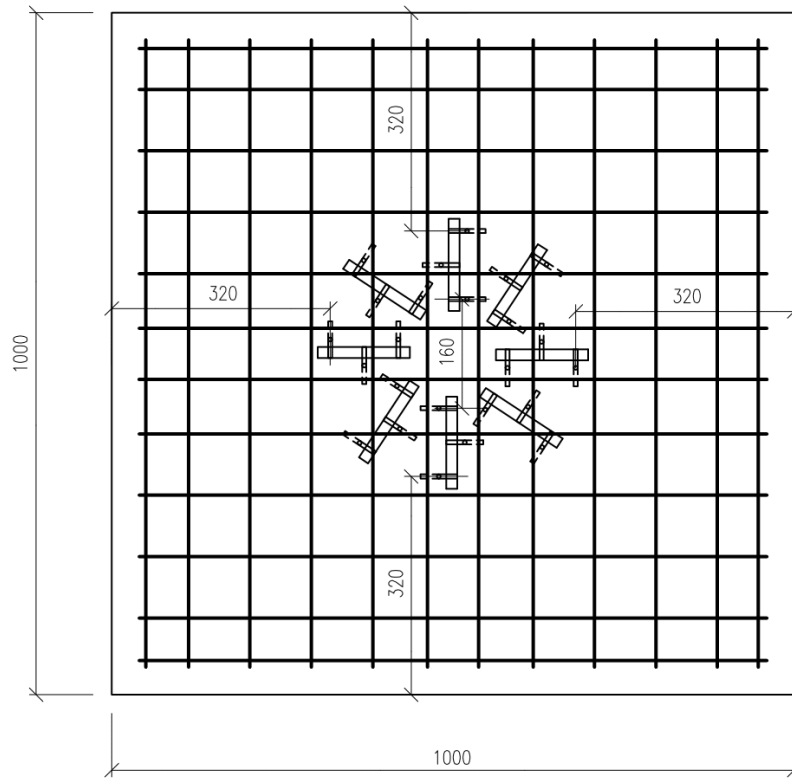
SPODNÍ VÝZTUŽ i¹⁰



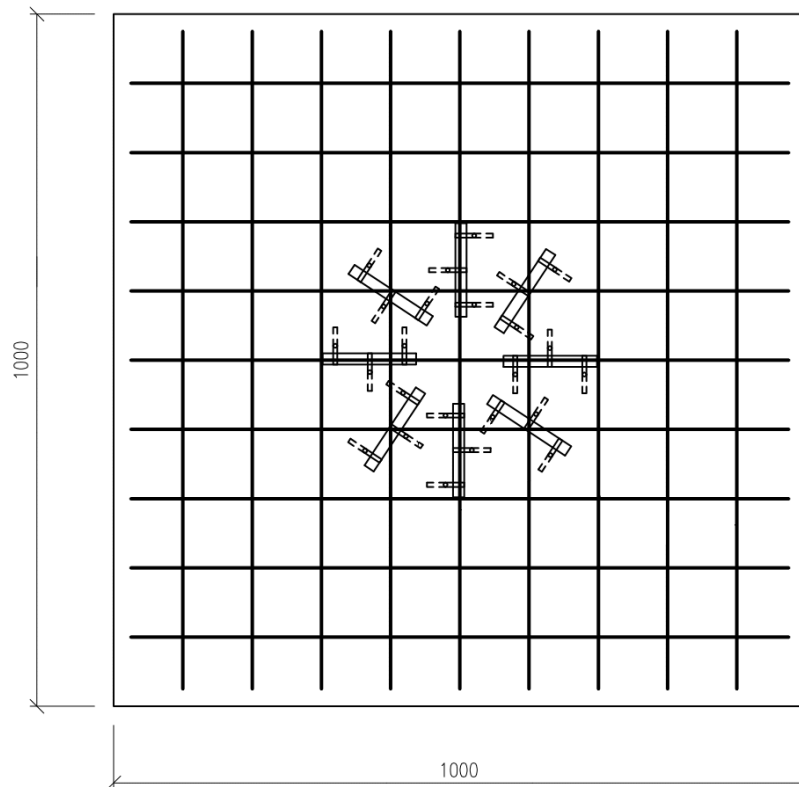
HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)



SPODNÍ VÝZTUŽ

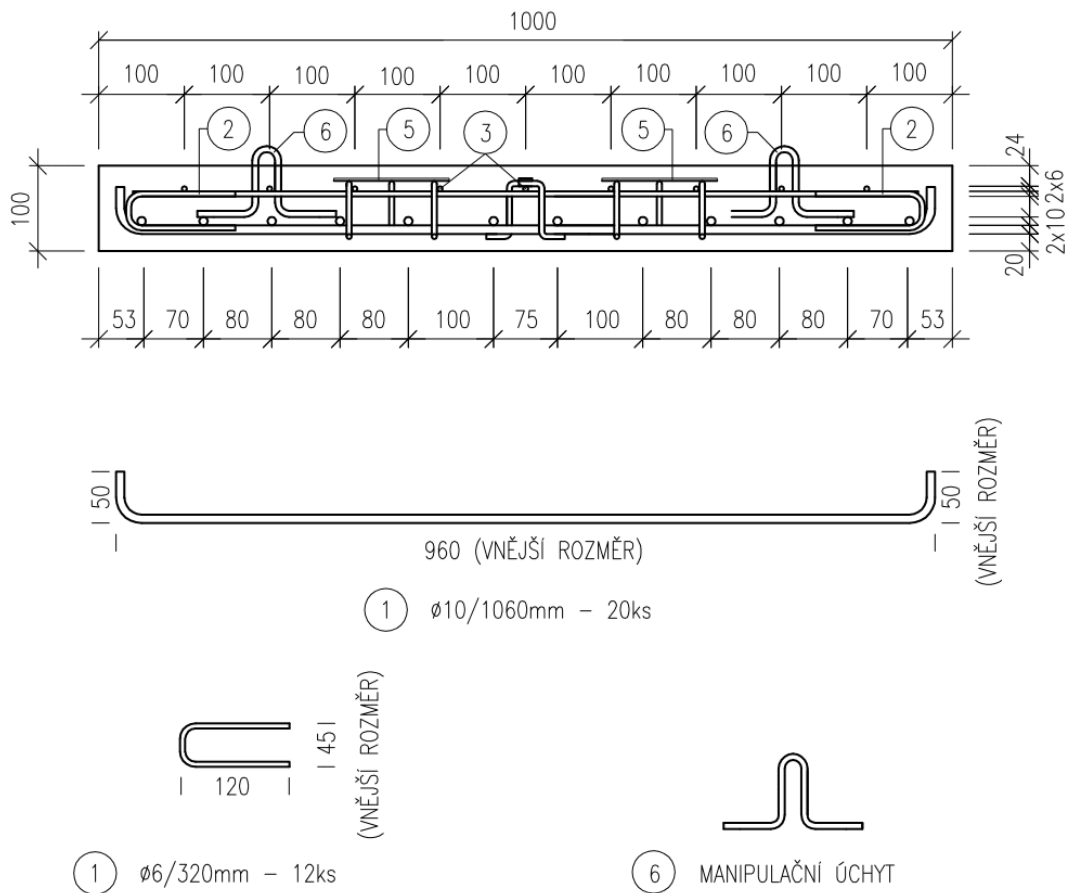


HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)



PŘÍLOHA C VÝKRESY DESEK C4 A C6

ŘEZ A-A:

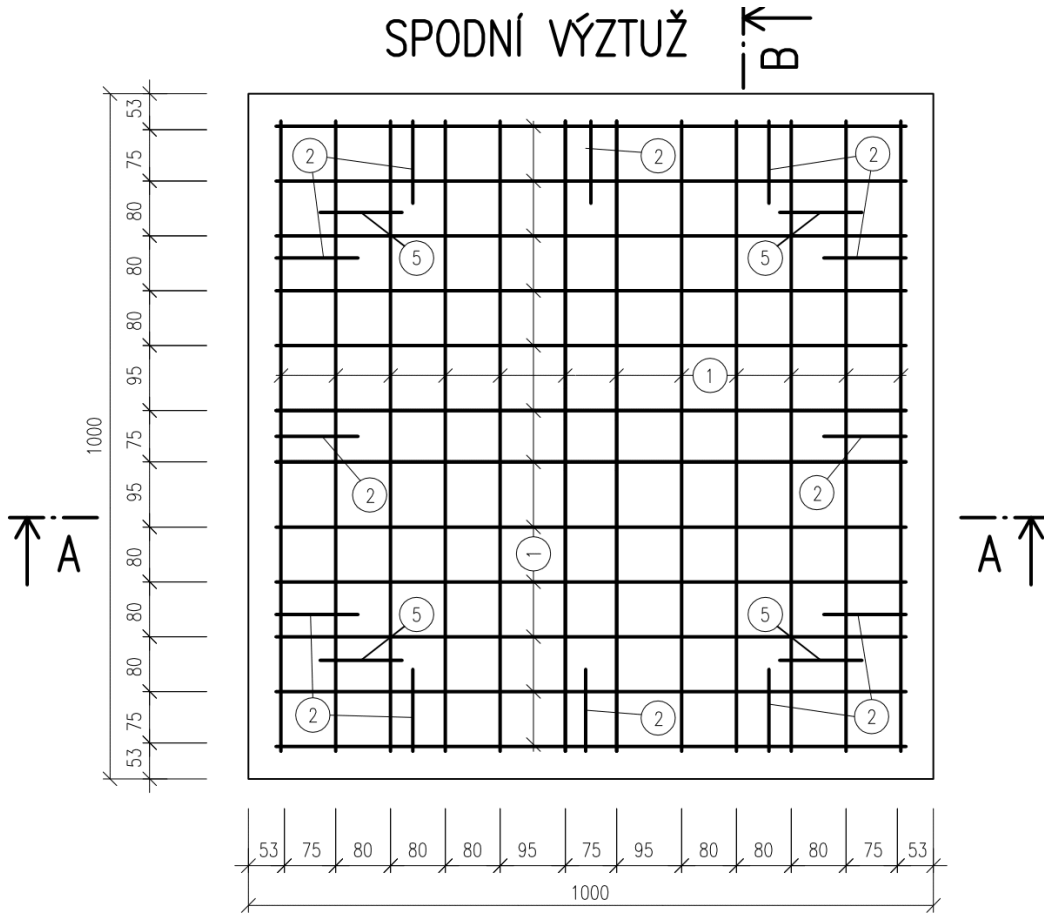


VÝPIS OCELI

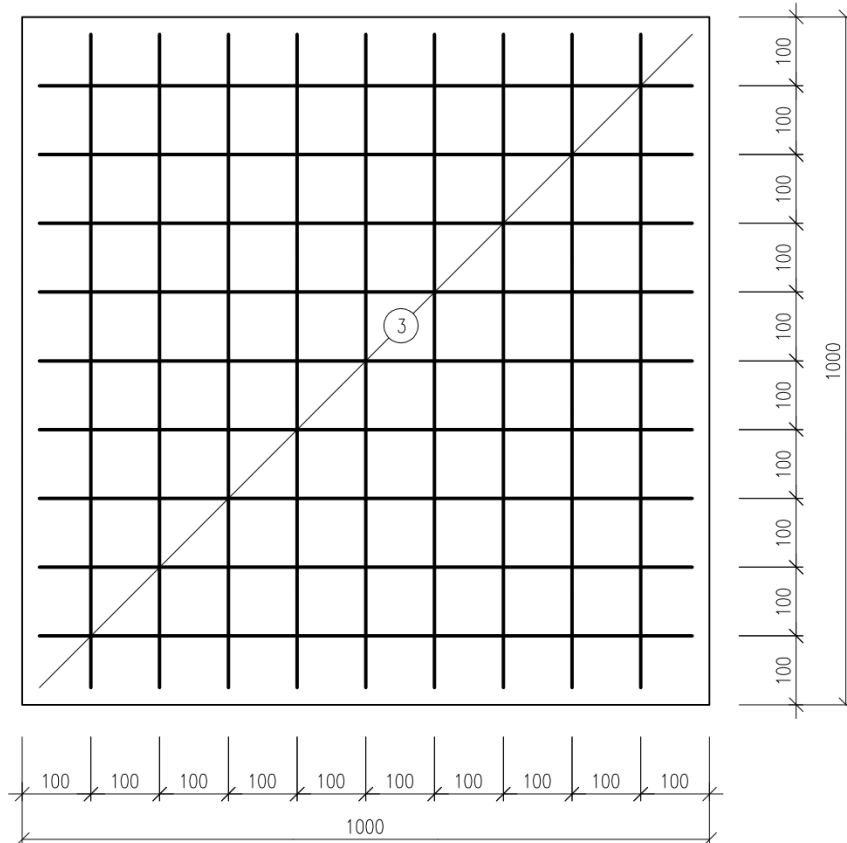
OZNAČENÍ PRVKU	PROFIL	KUSŮ CELKEM	DÉLKA PLOCHA [m; m ²]	CELKOVÁ DÉLKA/PLOCHA OCELI B500B		
				$\varnothing R6$	$\varnothing R10$	16x3
1	$\varnothing 10$	24	1,06	-	25,44	-
2	$\varnothing 6$	12	0,32	3,84	-	-
3	$\varnothing 6$ KARI 6/100	1	19,0	19,0	-	-
* 4	$\varnothing 6$	24	0,11	2,64	-	-
5	16x3 PÁSOVINA	12	0,14	-	-	1,92
SOUČET DÉLEK/PLOCH [m; m ²]				25,48	25,44	1,92
HMOTNOST JEDNOTKOVÁ [kg/bm; kg/m ²]				0,222	0,616	0,377
HMOTNOST CELKOVÁ [kg]				5,61	15,67	0,73
OCEL CELKEM				22,01 kg		

* SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU C4 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 4mm
 SMYKOVÁ VÝZTUŽ PRO DESKU C6 Z PRUTŮ O PRŮMĚRU 6mm

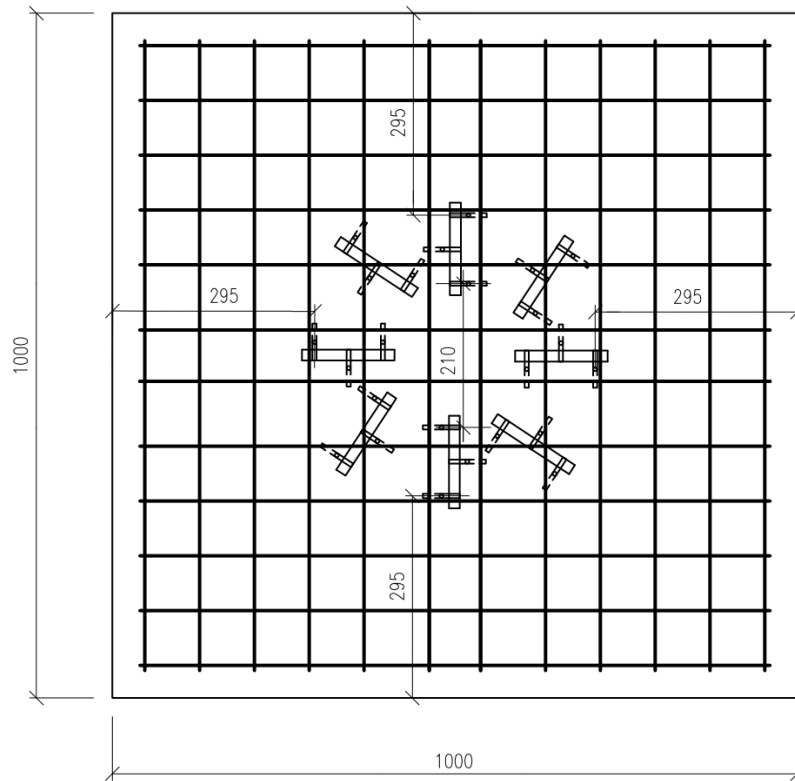
SPODNÍ VÝZTUŽ



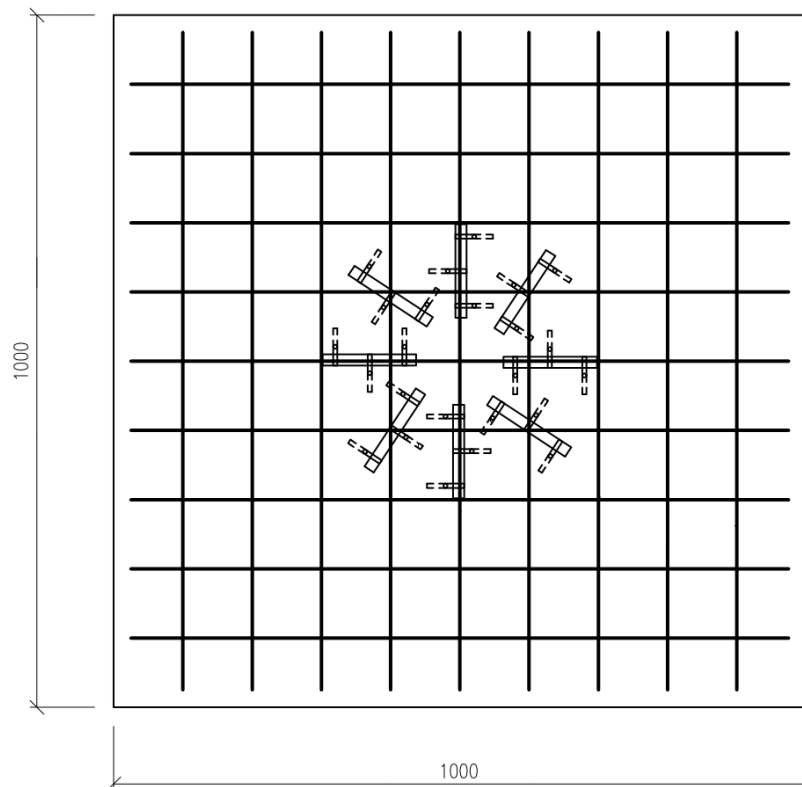
HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)



SPODNÍ VÝZTUŽ



HORNÍ VÝZTUŽ (KARI)



PŘÍLOHA D

Tato příloha obsahuje databázi uskutečněných experimentů na protlačení symetricky zatížených lokálně podepřených desek včetně dílčích výpočtu provedených pomocí navržené metody. Jednotlivé experimenty jsou v tabulkách značený následovně.

- **Andrade, M. A. S.** [30]
A301, A302, A303, A304, A305, A306, A307, A308
- **Beutel, R., Hegger, J.** [31, 32]
Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, P1-I, P1-II, P2-I, P2-II, P2-III, P3-I, P4-III, P4-III
- **Birkle, G.** [33]
S2-Birkle, S3-Birkle, S4-Birkle, S5-Birkle, S6-Birkle, S8-Birkle, S9-Birkle, S11-Birkle, S12-Birkle
- **Etter, S., Heinzmann, D., Jager, T., Marti, P.** [34]
SP2, SP3
- **Ferreira, M. P.** [35]
C1-F, C2-F, C3-F, C4-F, C5-F, C6-F, C7-F, C8-F, S1-F, S2-F, S7-F
- **Gomes, R. B., Regan, P. E.** [36]
S3-Gomes, S4-Gomes, S5-Gomes, S6-Gomes, S7-Gomes, S8-Gomes, S9-Gomes, S10-Gomes, S11-Gomes
- **Chana, P. S.** [37, 38]
2-Chana, 3-Chana, 4-Chana, 5-Chana, 6-Chana, 7-Chana, 8-Chana
- **Hegger, J., Häusler, F., Ricker, M.** [39]
EM1
- **Ladner, M.** [40]
V2, V4
- **Marti, P., Pralong, J., Thurlimann, B.** [41]
P3
- **Marzouk, H., Jiang, D.** [42]
HS22, HS23

- **Regan, P.** (výsledky publikovány jinými autory) [43]
1-Regan, 2-Regan, 3-Regan, 5-Regan, 6-Regan
- **Regan, P., Samadian, F.** [44]
A1, A2, R2, R3
- **Rizk, E., Marzouk, H., Hussein, A.** [45]
HSS2
- **Seible, F., Ghali, A., Dilger, W. H.** [46]
SC7, SC8, SC9, SC10, SC11, SC12, SC13
- **Thai Xuan Dam** [47, 48]
S080, S08R, S120, S12R
- **Tolf, P.** [49]
S1.1s, S1.2s, S1.3s, S1.4s, S2.1s, S2.2s, S2.3s, S2.4s
- **Trautwein, L. M.** [50, 51]
E1, E2, L1, L4, L9
- **Bartolac, M., Damjanović, D., Duvnjak, I.** [23]
S1-1, S1-2, S1-3
- **Lips, S., Muttoni, A., Fernandez-Ruiz, M.** [52, 53, 54]
PL6, PL7, PL8, PL9, PL10, PL11, PL12, PF1, PF2, PF4, PF5
- **Mueller, F. X., Muttoni, A., Thurlimann, B.** [55]
P22
- **Vollum, R. L., Abdel-Fattah, T., Eder, M., Elghazouli, A. Y.** [56]
S2-Vollum, S3-Vollum, S4-Vollum, S5-Vollum, S6-Vollum
- **Lyčka, L.** (tato studie)
A4, A6, B4, B6, C4, C6

Veličina	Označ.	Jednot.	A301	A302	A303
Efektivní tloušťka	d	[mm]	0,164	0,164	0,154
Šířka sloupu	c	[mm]	0,2	0,2	0,2
Tvar sloupu	tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec
Rozpětí desky	l	[m]	3	3	3
Pevnost betonu v tlaku	f_{ck}	[MPa]	37,8	34,2	42,8
Max. frakce kameniva	d_g	[mm]	19	19	19
Stupeň vyztužení	ρ	[%]	1,2	1,2	1,306
Mez kluzu ohybové výzt.	f_y	[MPa]	588	588	588
Mez kluzu ohybové výzt.	E_s	[GPa]	200	200	200
Plocha smykové výztuže	A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
Počet prutů v obvodu	n_r	[-]	8	8	8
Počet obvodů	n_s	[-]	6	12	18
Vzdálenost od podpory	s_0	[mm]	80	40	40
Vzdálenost mezi obvody	s_1	[mm]	80	40	40
Mez kluzu smykové výzt.	f_{yw}	[MPa]	602	602	602
Způsob porušení desky	mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř
Naměřená únosnost	V_{test}	[kN]	830	790	966
Úhel smykové trhliny	θ	[°]	40,9	40,5	40,3
Výška pásnice	x	[mm]	36,0	38,3	32,6
Šířka styčnicku	x_1	[mm]	31,1	32,7	27,7
Pevnost styčnicku	$\sigma_{R,max}$	[MPa]	32,1	29,5	35,5
Únosnost styčnicku	V_{node}	[kN]	841,2	813,4	840,8
Únosnost vzpěr	V_{strut}	[kN]	838,9	812,7	825,6
Únosnost táhla	V_{tie}	[kN]	1204,4	1606,1	1607,0
Únosnost mimo vyztuž.	V_{out}	[kN]	0,0	0,0	0,0
Celková únosnost	V_u	[kN]	838,9	812,7	825,6
Poměr test/teorie	V_{test}/V_u	[-]	1,00	0,97	1,17

Označ.	Jednot.	A304	A305	A306	A307	A308
d	[mm]	0,164	0,154	0,164	0,164	0,154
c	[mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	36,1	29,6	37,4	34	37,5
d_g	[mm]	19	19	19	19	19
ρ	[%]	1,2	1,306	1,2	1,2	1,306
f_y	[MPa]	588	588	588	588	588
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	1,23E-04	1,23E-04
n_r	[-]	8	8	8	8	8
n_s	[-]	20	8	14	8	8
s_0	[mm]	40	60	40	60	40
s_1	[mm]	40	60	40	60	60
f_{yw}	[MPa]	602	602	602	678	678
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Mimo	Uvnitř
V_{test}	[kN]	956	785	950	1090	1020
θ	[°]	40,7	39,0	40,8	40,5	39,9
x	[mm]	37,0	41,0	36,2	38,4	35,4
x_1	[mm]	31,9	33,2	31,3	32,8	29,6
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	30,9	26,1	31,8	29,4	31,9
V_{node}	[kN]	828,6	741,7	838,3	811,7	807,5
V_{strut}	[kN]	827,1	733,1	836,2	811,1	794,7
V_{tie}	[kN]	1616,2	1333,3	1622,9	1867,9	1517,5
V_{out}	[kN]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V_u	[kN]	827,1	733,1	836,2	811,1	794,7
V_{test}/V_u	[-]	1,16	1,07	1,14	1,34	1,28

Označ.	Jednot.	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
d	[mm]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
c	[mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,263
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	25	26	24	32	28
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	0,8	0,8	0,8	0,8	1,25
f_y	[MPa]	890	890	890	890	562
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,54E-04	1,54E-04	1,54E-04	1,54E-04	2,01E-04
n_r	[-]	12	12	12	12	12
n_s	[-]	5	5	5	5	5
s_0	[mm]	100	88	95	88	94
s_1	[mm]	200	200	188	175	188
f_{yw}	[MPa]	580	580	580	580	544
mód	[-]	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	1323	1442	1616	1646	2024
θ	[°]	47,9	48,1	47,7	49,1	45,1
x	[mm]	71,2	69,5	73,0	61,1	65,9
x_1	[mm]	78,7	77,4	80,1	70,7	66,1
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	22,5	23,3	21,7	27,9	24,9
V_{node}	[kN]	1053,7	1072,9	1033,8	1172,9	1285,6
V_{strut}	[kN]	1245,3	1265,8	1223,8	1371,9	1406,7
V_{tie}	[kN]	1258,5	1266,3	1250,5	1309,5	1740,4
V_{out}	[kN]	11570,1	11722,4	11413,7	12562,4	13942,8
V_u	[kN]	1053,6	1072,8	1033,7	1172,8	1285,6
V_{test}/V_u	[-]	1,26	1,34	1,56	1,40	1,57

Označ.	Jednot.	Z6	P1-I	P1-II	P2-I	P2-II
d	[mm]	0,25	0,19	0,19	0,19	0,19
c	[mm]	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
tvar	[-]	Kruh	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	2,4	2,4	2,4	2,4
f_{ck}	[MPa]	37	25,9	24,9	36	28,3
d_g	[mm]	20	16	16	16	16
ρ	[%]	1,25	0,81	0,81	0,81	0,81
f_y	[MPa]	562	549	549	549	549
E_s	[GPa]	200	203,2	203,2	203,2	203,2
A_{sw}	[m ²]	2,01E-04	7,85E-05	7,85E-05	5,03E-05	5,03E-05
n_r	[-]	12	14	16	14	12
n_s	[-]	5	2	2	4	4
s_0	[mm]	94	100	105	50	75
s_1	[mm]	188	100	90	100	100
f_{yw}	[MPa]	544	570	570	592	592
mód	[-]	Těsné	Mimo	Mimo	Mimo	Mimo
V_{test}	[kN]	1954	1151	1055	1326	1109
θ	[°]	49,9	39,6	39,5	40,6	39,9
x	[mm]	55,5	42,2	43,2	34,4	39,9
x_1	[mm]	65,8	34,9	35,6	29,5	33,4
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	31,5	23,2	22,4	30,8	25,1
V_{node}	[kN]	1233,9	1312,7	1292,6	1473,4	1357,6
V_{strut}	[kN]	1434,3	1103,3	1086,8	1233,6	1139,7
V_{tie}	[kN]	1653,4	1873,1	2024,6	1312,4	1385,9
V_{out}	[kN]	15300,2	883,8	865,4	1367,0	1098,0
V_u	[kN]	1233,8	883,8	865,4	1233,6	1098,0
V_{test}/V_u	[-]	1,58	1,30	1,22	1,07	1,01

Označ.	Jednot.	P2-III	P3-I	P4-III	P6-I	S2-Birkle
d	[mm]	0,19	0,22	0,222	0,223	0,124
c	[mm]	0,4	0,32	0,32	0,32	0,25
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3
f_{ck}	[MPa]	35,6	22	26,4	44	29
d_g	[mm]	16	16	16	16	20
ρ	[%]	0,81	1,142	1,132	1,761	1,53
f_y	[MPa]	549	597	597	532	488
E_s	[GPa]	203,2	203,2	203,2	203,2	200
A_{sw}	[m ²]	5,03E-05	5,03E-05	5,03E-05	1,13E-04	7,09E-05
n_r	[-]	14	12	12	20	8
n_s	[-]	4	5	5	6	6
s_0	[mm]	65	110	110	110	45
s_1	[mm]	100	164	125	160	90
f_{yw}	[MPa]	592	666	666	536	393
mód	[-]	Mimo	Uvnitř	Uvnitř	Těsné	Uvnitř
V_{test}	[kN]	1276	1624	1522	2349	574
θ	[°]	40,6	40,0	41,0	42,1	37,1
x	[mm]	34,6	66,8	60,0	51,7	33,0
x_1	[mm]	29,7	56,2	52,2	46,7	25,0
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	30,5	20,1	23,6	36,3	25,6
V_{node}	[kN]	1468,3	1408,4	1538,1	2109,4	726,3
V_{strut}	[kN]	1229,4	1305,6	1422,4	1943,0	630,2
V_{tie}	[kN]	1550,1	1265,3	1324,3	2833,3	782,0
V_{out}	[kN]	1315,5	1450,0	1856,1	2553,3	480,7
V_u	[kN]	1229,4	1265,3	1324,3	1943,0	480,7
V_{test}/V_u	[-]	1,04	1,28	1,15	1,21	1,19

Označ.	Jednot.	S3-Birkle	S4-Birkle	S5-Birkle	S6-Birkle	S8-Birkle
d	[mm]	0,124	0,124	0,124	0,124	0,19
c	[mm]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	2,3	2,3	2,3	2,3	3,26
f_{ck}	[MPa]	32	38	36	33	35
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,53	1,53	1,53	1,53	1,29
f_y	[MPa]	488	488	448	448	531
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,09E-05	7,09E-05	7,09E-05	7,09E-05	7,09E-05
n_r	[-]	8	8	8	8	8
n_s	[-]	6	5	5	5	5
s_0	[mm]	45	30	30	30	50
s_1	[mm]	90	60	60	60	100
f_{yw}	[MPa]	393	465	465	465	460
mód	[-]	Uvnitř	Mimo	Mimo	Mimo	Uvnitř
V_{test}	[kN]	572	636	624	615	1050
θ	[°]	37,5	38,1	38,1	37,8	40,5
x	[mm]	31,0	27,9	27,6	29,2	43,1
x_1	[mm]	23,8	21,8	21,7	22,6	36,9
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	27,9	32,2	30,8	28,6	30,1
V_{node}	[kN]	753,6	798,9	758,4	736,4	1349,0
V_{strut}	[kN]	653,1	690,9	655,7	637,4	1226,5
V_{tie}	[kN]	795,8	821,2	813,0	800,3	1226,6
V_{out}	[kN]	467,9	524,5	515,1	520,1	1069,7
V_u	[kN]	467,9	524,5	515,1	520,1	1069,7
V_{test}/V_u	[-]	1,22	1,21	1,21	1,18	0,98

Označ.	Jednot.	S9-Birkle	S11-Birkle	S12-Birkle	SP2	SP3
d	[mm]	0,19	0,26	0,26	0,294	0,294
c	[mm]	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Kruh	Kruh
l	[m]	3,26	4	4	4,1	4,1
f_{ck}	[MPa]	35	30	33,5	34,5	33,4
d_g	[mm]	20	20	20	32	32
ρ	[%]	1,29	1,1	1,1	1,26	1,26
f_y	[MPa]	531	524	524	601	601
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,09E-05	1,27E-04	1,27E-04	2,54E-04	2,54E-04
n_r	[-]	8	8	8	8	8
n_s	[-]	6	5	6	2,5	2,5
s_0	[mm]	75	65	95	470	470
s_1	[mm]	150	130	195	150	150
f_{yw}	[MPa]	460	409	409	529	529
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	1091	1620	1520	3080	3350
θ	[°]	40,5	44,0	44,5	44,8	44,7
x	[mm]	43,1	59,5	55,6	70,8	72,2
x_1	[mm]	36,9	57,5	54,5	70,3	71,4
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	30,1	26,4	29,0	29,7	28,9
V_{node}	[kN]	1349,0	1996,0	2079,1	2396,5	2367,9
V_{strut}	[kN]	1226,5	1837,2	1909,5	2373,4	2346,9
V_{tie}	[kN]	1226,6	1870,2	1545,7	2901,7	2886,8
V_{out}	[kN]	1069,7	1637,6	1699,0	16977,2	16794,8
V_u	[kN]	1069,7	1637,6	1545,7	2373,4	2346,9
V_{test}/V_u	[-]	1,02	0,99	0,98	1,30	1,43

Označ.	Jednot.	C1-F	C2-F	C3-F	C4-F	C5-F
d	[mm]	0,143	0,14	0,142	0,14	0,14
c	[mm]	0,27	0,36	0,45	0,36	0,36
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	48	47	49	48	50
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,48	1,52	1,49	1,52	2
f_y	[MPa]	540	540	540	540	540
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	10	10	10	12	10
n_s	[-]	6	6	6	6	6
s_0	[mm]	70	70	70	70	70
s_1	[mm]	100	100	100	100	100
f_{yw}	[MPa]	535	535	535	535	535
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř
V_{test}	[kN]	858	956	1077	1122	1118
θ	[°]	39,2	38,6	38,6	38,7	38,3
x	[mm]	28,8	28,9	28,3	28,5	30,7
x_1	[mm]	23,5	23,1	22,6	22,8	24,2
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	38,8	38,2	39,4	38,8	40,0
V_{node}	[kN]	841,9	1092,5	1374,3	1098,1	1202,6
V_{strut}	[kN]	800,3	942,2	1118,4	946,9	1038,3
V_{tie}	[kN]	1088,0	1134,5	1217,5	1241,8	1208,0
V_{out}	[kN]	897,2	861,6	892,7	0,0	963,8
V_u	[kN]	800,3	861,6	892,7	946,9	963,8
V_{test}/V_u	[-]	1,07	1,11	1,21	1,18	1,16

Označ.	Jednot.	C6-F	C7-F	C8-F	S1-F	S2-F
d	[mm]	0,143	0,143	0,143	0,145	0,143
c	[mm]	0,36	0,36	0,36	0,3	0,3
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Kruh	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	49	49	48	49	49
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,48	1,47	1,47	1,46	1,48
f_y	[MPa]	540	540	540	540	540
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	10	10	12	12	12
n_s	[-]	6	7	6	2	4
s_0	[mm]	70	55	70	70	70
s_1	[mm]	100	80	100	100	100
f_{yw}	[MPa]	535	535	535	535	535
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Mimo	Uvnitř
V_{test}	[kN]	1078	1110	1059	1022	1128
θ	[°]	38,9	38,9	38,8	39,2	39,1
x	[mm]	28,4	28,3	28,7	28,6	28,4
x_1	[mm]	22,9	22,8	23,0	23,3	23,1
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	39,4	39,4	38,8	39,4	39,4
V_{node}	[kN]	1111,5	1108,3	1102,9	1198,5	1190,2
V_{strut}	[kN]	963,3	960,6	956,1	1020,6	1010,2
V_{tie}	[kN]	1159,5	1416,1	1256,8	1285,2	1273,5
V_{out}	[kN]	903,4	901,3	1016,8	756,9	1011,1
V_u	[kN]	903,4	901,3	956,1	756,9	1010,2
V_{test}/V_u	[-]	1,19	1,23	1,11	1,35	1,12

Označ.	Jednot.	S7-F	S2-Gomes	S3-Gomes	S4-Gomes	S5-Gomes
d	[mm]	0,143	0,153	0,158	0,159	0,159
c	[mm]	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	49	35,8	39	32	35
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,48	1,31	1,27	1,27	1,27
f_y	[MPa]	540	680	670	670	670
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,33E-04	2,83E-05	3,74E-05	5,03E-05	7,85E-05
n_r	[-]	12	8	8	8	8
n_s	[-]	4	2	2	3	4
s_0	[mm]	70	80	80	80	80
s_1	[mm]	100	80	80	80	80
f_{yw}	[MPa]	518	430	430	430	430
mód	[-]	Mimo	Uvnitř	Uvnitř	Mimo	Mimo
V_{test}	[kN]	1197	693	773	853	853
θ	[°]	39,1	39,2	40,0	39,3	39,7
x	[mm]	28,4	39,0	37,3	42,5	40,2
x_1	[mm]	23,1	31,8	31,3	34,8	33,3
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	39,4	30,7	32,9	27,9	30,1
V_{node}	[kN]	1190,2	836,8	876,7	823,9	851,4
V_{strut}	[kN]	1010,2	824,7	868,8	820,8	846,7
V_{tie}	[kN]	1700,9	752,8	860,6	932,5	1174,7
V_{out}	[kN]	1011,1	615,8	657,4	671,3	691,6
V_u	[kN]	1010,2	615,8	657,4	671,3	691,6
V_{test}/V_u	[-]	1,18	1,13	1,18	1,27	1,23

Označ.	Jednot.	S6-Gomes	S7-Gomes	S8-Gomes	S9-Gomes	S10-Gomes
d	[mm]	0,159	0,159	0,159	0,159	0,154
c	[mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	37	34	34	40	35
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,27	1,27	1,27	1,27	1,31
f_y	[MPa]	670	670	670	670	670
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	1,13E-04	1,13E-04	1,17E-04	2,83E-05
n_r	[-]	8	8	8	8	8
n_s	[-]	4	5	6	9	5
s_0	[mm]	80	80	80	80	80
s_1	[mm]	80	80	80	80	80
f_{yw}	[MPa]	430	430	430	430	430
mód	[-]	Mimo	Mimo	Mimo	Mimo	Uvnitř
V_{test}	[kN]	1040	1120	1200	1227	800
θ	[°]	39,9	39,5	39,5	40,2	39,2
x	[mm]	38,8	40,9	40,9	37,0	39,5
x_1	[mm]	32,4	33,8	33,8	31,2	32,3
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	31,5	29,4	29,4	33,6	30,1
V_{node}	[kN]	867,9	842,6	842,6	890,2	831,3
V_{strut}	[kN]	862,2	838,4	838,4	883,1	820,8
V_{tie}	[kN]	1184,9	1445,8	1445,8	1506,3	753,8
V_{out}	[kN]	844,6	821,1	821,1	1126,7	811,4
V_u	[kN]	844,6	821,1	821,1	883,1	753,8
V_{test}/V_u	[-]	1,23	1,36	1,46	1,39	1,06

Označ.	Jednot.	S11-Gomes	2-Chana	3-Chana	4-Chana	5-Chana
d	[mm]	0,154	0,2	0,2	0,2	0,21
c	[mm]	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	35	31,6	29,2	32,3	27,2
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,31	0,785	0,785	0,785	0,86
f_y	[MPa]	670	500	500	500	500
E_s	[GPa]	200	203,2	203,2	203,2	203,2
A_{sw}	[m ²]	3,74E-05	5,03E-05	5,03E-05	5,03E-05	7,85E-05
n_r	[-]	8	12	12	24	12
n_s	[-]	5	4	4	4	4
s_0	[mm]	80	100	100	100	105
s_1	[mm]	80	150	150	150	157,5
f_{yw}	[MPa]	430	520	520	520	520
mód	[-]	Uvnitř	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	907	1057	1139	1302	1382
θ	[°]	39,2	42,2	42,0	42,3	40,7
x	[mm]	39,5	36,9	38,7	36,4	44,5
x_1	[mm]	32,3	33,5	34,8	33,1	38,2
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	30,1	27,6	25,8	28,1	24,2
V_{node}	[kN]	831,3	1109,6	1079,3	1117,9	1465,3
V_{strut}	[kN]	820,8	1013,7	987,1	1020,9	1255,9
V_{tie}	[kN]	826,4	1151,6	1132,5	1573,2	1532,3
V_{out}	[kN]	811,4	1049,9	1022,6	1318,4	10680,3
V_u	[kN]	811,4	1013,7	987,1	1020,9	1255,9
V_{test}/V_u	[-]	1,12	1,04	1,15	1,28	1,10

Označ.	Jednot.	6-Chana	7-Chana	8-Chana	EM1	V2
d	[mm]	0,21	0,21	0,21	0,16	0,24
c	[mm]	0,4	0,4	0,4	0,29	0,3
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Kruh
l	[m]	3	3	3	2,8	3
f_{ck}	[MPa]	34,3	31,9	31,4	29,8	30,1
d_g	[mm]	20	20	20	16	32
ρ	[%]	0,86	0,86	0,86	1,96	1,4
f_y	[MPa]	500	500	500	558	510
E_s	[GPa]	203,2	203,2	203,2	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	5,03E-05	5,03E-05	1,13E-04
n_r	[-]	24	32	12	28	12
n_s	[-]	4	4	4	6	50
s_0	[mm]	105	105	105	80	100
s_1	[mm]	157,5	157,5	157,5	120	100
f_{yw}	[MPa]	520	520	520	584	646
mód	[-]	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	1283	1492	1324	1213	1784
θ	[°]	41,4	41,2	41,1	37,3	43,2
x	[mm]	38,5	40,3	40,7	48,5	61,0
x_1	[mm]	34,0	35,3	35,6	37,0	57,3
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	29,6	27,8	27,5	26,2	26,5
V_{node}	[kN]	1589,7	1551,9	1543,5	1192,0	1367,0
V_{strut}	[kN]	1358,6	1327,5	1320,5	1059,7	1430,5
V_{tie}	[kN]	2258,5	2673,0	1339,2	1645,9	2425,2
V_{out}	[kN]	1581,0	1543,3	1535,2	11174,2	14378,2
V_u	[kN]	1358,6	1327,5	1320,5	1059,7	1366,9
V_{test}/V_u	[-]	0,94	1,12	1,00	1,14	1,31

Označ.	Jednot.	V4	P3	HS22	HS23	1-Regan
d	[mm]	0,24	0,152	0,12	0,12	0,15
c	[mm]	0,3	0,3	0,25	0,25	0,3
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	2,824	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	27,4	33,5	60	60	33
d_g	[mm]	32	16	20	20	20
ρ	[%]	1,4	1,4	1,1	1,1	1,45
f_y	[MPa]	510	596	490	490	550
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,13E-04	5,03E-05	2,66E-04	2,66E-04	7,85E-05
n_r	[-]	12	12	8	8	10
n_s	[-]	50	4	3	4	4
s_0	[mm]	100	80	60	60	80
s_1	[mm]	100	80	90	90	120
f_{yw}	[MPa]	646	563	400	400	550
mód	[-]	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	1799	824	605	590	881
θ	[°]	42,8	38,0	39,9	39,9	38,0
x	[mm]	64,7	39,1	17,2	17,2	38,1
x_1	[mm]	59,9	30,6	14,4	14,4	29,8
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	24,4	29,0	45,6	45,6	28,6
V_{node}	[kN]	1315,7	897,0	751,5	751,5	1102,9
V_{strut}	[kN]	1380,3	842,4	639,5	639,5	951,7
V_{tie}	[kN]	2395,2	1167,5	1821,2	1821,2	1130,5
V_{out}	[kN]	13934,7	809,3	517,1	522,1	980,2
V_u	[kN]	1315,7	809,3	517,1	522,1	951,7
V_{test}/V_u	[-]	1,37	1,02	1,17	1,13	0,93

Označ.	Jednot.	2-Regan	3-Regan	5-Regan	6-Regan	A1
d	[mm]	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16
c	[mm]	0,3	0,3	0,24	0,24	0,2
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Kruh	Kruh	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	30	26	62	42	38,8
d_g	[mm]	20	20	20	20	20
ρ	[%]	1,76	1,76	1,65	1,75	1,64
f_y	[MPa]	550	550	550	550	570
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	1,13E-04	1,13E-04	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	12	10	12	12	8
n_s	[-]	6	5	5	5	6
s_0	[mm]	60	60	80	75	80
s_1	[mm]	100	120	120	120	80
f_{yw}	[MPa]	550	550	550	550	519
mód	[-]	Těsné	Těsné	Těsné	Těsné	Mimo
V_{test}	[kN]	1141	1038	1268	1074	1000
θ	[°]	37,0	36,4	40,8	38,8	39,8
x	[mm]	44,5	48,6	29,2	36,0	39,8
x_1	[mm]	33,6	35,8	25,2	29,0	33,2
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	26,4	23,3	46,6	34,9	32,8
V_{node}	[kN]	1145,9	1079,5	937,4	822,2	921,4
V_{strut}	[kN]	992,2	936,6	957,3	830,6	917,2
V_{tie}	[kN]	1254,7	1349,9	1635,8	1218,6	1249,6
V_{out}	[kN]	1012,9	965,7	1346,9	1131,0	935,5
V_u	[kN]	992,2	936,6	937,4	822,2	917,2
V_{test}/V_u	[-]	1,15	1,11	1,35	1,31	1,09

Označ.	Jednot.	A2	R3	R2	HSS2	SC7
d	[mm]	0,16	0,16	0,16	0,2175	0,121
c	[mm]	0,2	0,2	0,2	0,4	0,305
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	2,65	1,8
f_{ck}	[MPa]	44,7	33	39	79	33,6
d_g	[mm]	20	20	20	14	13
ρ	[%]	1,64	1,26	1,26	1,42	1,17
f_y	[MPa]	570	670	540	460	450
E_s	[GPa]	200	200	200	203,2	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	1,13E-04	7,85E-05	7,09E-05	2,52E-05
n_r	[-]	8	8	8	8	36
n_s	[-]	4	4	6	6	2
s_0	[mm]	80	80	80	45	60
s_1	[mm]	120	120	80	57	121
f_{yw}	[MPa]	519	442	635	400	350
mód	[-]	Uvnitř	Mimo	Mimo	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	950	850	950	2172	623
θ	[°]	40,4	39,5	40,8	43,1	38,3
x	[mm]	36,4	41,8	33,8	29,1	24,7
x_1	[mm]	30,9	34,5	29,2	27,2	19,5
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	36,7	28,6	32,9	54,0	29,1
V_{node}	[kN]	962,1	836,9	813,3	2304,2	791,2
V_{strut}	[kN]	955,2	834,4	805,7	1971,1	642,6
V_{tie}	[kN]	1070,2	1142,1	1198,3	2529,3	710,3
V_{out}	[kN]	980,7	811,8	858,3	2804,9	566,4
V_u	[kN]	955,2	811,8	752,4	1971,1	566,4
V_{test}/V_u	[-]	1,00	1,05	1,26	1,10	1,10

Označ.	Jednot.	SC8	SC9	SC10	SC11	SC12
d	[mm]	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121
c	[mm]	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
f_{ck}	[MPa]	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6
d_g	[mm]	13	13	13	13	13
ρ	[%]	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
f_y	[MPa]	450	450	450	450	450
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	2,52E-05	2,52E-05	2,52E-05	3,10E-05	3,10E-05
n_r	[-]	20	20	20	16	16
n_s	[-]	2	3	4	2	4
s_0	[mm]	60	60	60	60	29,04
s_1	[mm]	121	60	40,333333	121	50,82
f_{yw}	[MPa]	490	490	490	500	500
mód	[-]	Mimo	Mimo	Těsné	Mimo	Mimo
V_{test}	[kN]	592	594	537	596	595
θ	[°]	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3
x	[mm]	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
x_1	[mm]	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	29,1	29,1	29,1	29,1	29,1
V_{node}	[kN]	791,2	791,2	791,2	791,2	791,2
V_{strut}	[kN]	642,6	642,6	642,6	642,6	642,6
V_{tie}	[kN]	580,6	904,9	1229,3	578,1	897,6
V_{out}	[kN]	569,2	565,7	565,3	10000,0	566,7
V_u	[kN]	569,2	565,7	565,3	578,1	566,7
V_{test}/V_u	[-]	1,04	1,05	0,95	1,03	1,05

Označ.	Jednot.	SC13	S080	S08R	S120	S12R
d	[mm]	0,121	0,216	0,216	0,216	0,216
c	[mm]	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	1,8	3,05	3,05	3,05	3,05
f_{ck}	[MPa]	33,6	34,8	37	31,1	33
d_g	[mm]	13	13	13	13	13
ρ	[%]	1,17	0,87	0,87	1,25	1,25
f_y	[MPa]	450	460	460	460	460
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	3,10E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	16	12	12	12	12
n_s	[-]	4	8	8	8	8
s_0	[mm]	29,04	95	95	95	95
s_1	[mm]	50,82	105	105	105	105
f_{yw}	[MPa]	500	460	460	460	460
mód	[-]	Mimo	Mimo	Uvnitř	Mimo	Uvnitř
V_{test}	[kN]	580	1280	1300	1340	1400
θ	[°]	38,3	43,5	43,7	42,2	42,4
x	[mm]	24,7	37,6	36,2	48,3	46,6
x_1	[mm]	19,5	35,7	34,5	43,7	42,5
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	29,1	30,0	31,5	27,2	28,6
V_{node}	[kN]	791,2	1278,5	1303,2	1425,5	1456,2
V_{strut}	[kN]	642,6	1177,6	1199,2	1321,8	1348,9
V_{tie}	[kN]	897,6	1846,4	1864,1	1921,0	1939,6
V_{out}	[kN]	568,6	1184,9	1480,9	1287,8	1608,5
V_u	[kN]	568,6	1177,6	1199,2	1287,8	1348,9
V_{test}/V_u	[-]	1,02	1,09	1,08	1,04	1,00

Označ.	Jednot.	S1.1s	S1.2s	S1.3s	S1.4s	S2.1s
d	[mm]	0,097	0,099	0,1	0,099	0,195
c	[mm]	0,125	0,125	0,125	0,125	0,25
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh	Kruh
l	[m]	1,27	1,27	1,27	1,27	2,54
f_{ck}	[MPa]	22,9	23,6	23,4	24	19,3
d_g	[mm]	16	16	16	16	32
ρ	[%]	0,838	0,838	0,34	0,34	0,82
f_y	[MPa]	706	711	709	710	669
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,96E-05	1,96E-05	1,96E-05	1,96E-05	7,85E-05
n_r	[-]	16	16	8	8	16
n_s	[-]	2	2	2	2	2
s_0	[mm]	45	45	45	45	90
s_1	[mm]	75	75	75	75	150
f_{yw}	[MPa]	610	630	620	620	700
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Mimo
V_{test}	[kN]	261	259	144	147	894
θ	[°]	36,3	36,4	38,7	38,7	40,1
x	[mm]	26,6	26,7	17,3	16,8	57,1
x_1	[mm]	19,5	19,7	13,8	13,5	48,2
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	20,8	21,4	21,2	21,7	17,8
V_{node}	[kN]	194,4	200,3	138,8	139,2	677,2
V_{strut}	[kN]	222,8	231,7	159,3	159,0	727,5
V_{tie}	[kN]	357,1	364,9	224,4	223,2	954,0
V_{out}	[kN]	194,6	200,7	148,0	147,8	725,4
V_u	[kN]	194,3	200,2	138,8	139,2	677,2
V_{test}/V_u	[-]	1,34	1,29	1,04	1,06	1,32

Označ.	Jednot.	S2.2s	S2.3s	S2.4s	E1	E2
d	[mm]	0,195	0,198	0,198	0,159	0,159
c	[mm]	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2
tvar	[-]	Kruh	Kruh	Kruh	Čtverec	Čtverec
l	[m]	2,4	2,54	2,54	3	3
f_{ck}	[MPa]	19,7	21,8	21,7	35,2	36,6
d_g	[mm]	32	32	32	19	19
ρ	[%]	0,82	0,34	0,34	1,26	1,26
f_y	[MPa]	673	671	669	559	559
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	16	8	8	12	12
n_s	[-]	2	2	2	11	13
s_0	[mm]	90	90	90	35	30
s_1	[mm]	150	150	150	60	60
f_{yw}	[MPa]	640	670	670	575	575
mód	[-]	Mimo	Uvnitř	Mimo	Mimo	Mimo
V_{test}	[kN]	851	562	542	1100	990
θ	[°]	40,2	43,5	43,4	40,3	40,4
x	[mm]	56,5	34,7	34,7	36,4	35,6
x_1	[mm]	47,8	32,9	32,9	30,9	30,3
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	18,1	19,9	19,8	30,2	31,2
V_{node}	[kN]	685,2	514,9	513,3	791,9	802,3
V_{strut}	[kN]	735,8	544,7	543,0	785,2	795,0
V_{tie}	[kN]	957,6	629,9	629,2	1488,3	1495,5
V_{out}	[kN]	730,4	569,9	569,1	0,0	0,0
V_u	[kN]	685,2	514,9	513,3	785,2	795,0
V_{test}/V_u	[-]	1,24	1,09	1,06	1,40	1,25

Označ.	Jednot.	L1	L4	L9	S1-1	S1-2
d	[mm]	0,159	0,164	0,154	0,096	0,096
c	[mm]	0,2	0,2	0,2	0,13	0,13
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	1,5	1,5
f_{ck}	[MPa]	36,8	43,4	39,4	43,1	45,2
d_g	[mm]	19	19	19	16	16
ρ	[%]	1,26	1,26	1,26	1,5	1,5
f_y	[MPa]	559	559	559	560	560
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,23E-04	2,01E-04	7,85E-05	2,83E-05	2,83E-05
n_r	[-]	12	12	12	16	16
n_s	[-]	11	11	11	3	3
s_0	[mm]	35	35	35	45	45
s_1	[mm]	60	60	60	70	70
f_{yw}	[MPa]	575	575	575	506	506
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř
V_{test}	[kN]	1050	1038	933	394	361,3
θ	[°]	40,4	41,3	40,3	37,6	37,7
x	[mm]	35,4	33,0	32,9	21,2	20,6
x_1	[mm]	30,2	29,0	27,9	16,3	15,9
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	31,4	35,9	33,2	35,7	37,0
V_{node}	[kN]	803,7	876,1	792,2	369,0	373,8
V_{strut}	[kN]	796,3	871,6	778,0	369,8	374,4
V_{tie}	[kN]	2026,4	3032,8	1480,9	536,6	540,7
V_{out}	[kN]	0,0	0,0	0,0	416,1	416,5
V_u	[kN]	796,3	871,6	778,0	368,9	373,7
V_{test}/V_u	[-]	1,32	1,19	1,20	1,07	0,97

Označ.	Jednot.	S1-3	PL6	PL7	PL8	PL9
d	[mm]	0,096	0,198	0,197	0,2	0,266
c	[mm]	0,13	0,13	0,26	0,52	0,34
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	1,5	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	42,7	36,6	35,9	36	32,1
d_g	[mm]	16	16	16	16	16
ρ	[%]	1,5	1,59	1,59	1,57	1,59
f_y	[MPa]	560	583	583	583	531
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	2,83E-05	1,54E-04	1,54E-04	1,54E-04	2,54E-04
n_r	[-]	16	12	16	24	16
n_s	[-]	3	6	7	7	6
s_0	[mm]	45	80	80	80	100
s_1	[mm]	70	160	160	160	200
f_{yw}	[MPa]	506	519	519	519	516
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Těsné	Uvnitř
V_{test}	[kN]	385,2	1363	1773	2256	3132
θ	[°]	37,5	47,6	40,9	38,4	43,7
x	[mm]	21,3	50,8	51,2	51,5	70,7
x_1	[mm]	16,4	55,6	44,3	40,8	67,6
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	35,4	31,2	30,7	30,8	28,0
V_{node}	[kN]	368,0	904,9	1422,3	2614,1	2400,4
V_{strut}	[kN]	368,9	1061,1	1363,4	2089,2	2242,3
V_{tie}	[kN]	535,9	1231,3	1734,8	3817,6	2797,6
V_{out}	[kN]	408,7	1834,1	2228,4	3173,4	3654,0
V_u	[kN]	367,9	904,9	1363,4	2089,2	2242,3
V_{test}/V_u	[-]	1,00	1,51	1,30	1,08	1,40

Označ.	Jednot.	PL10	PL11	PL12	PF1	PF2
d	[mm]	0,343	0,201	0,201	0,209	0,208
c	[mm]	0,44	0,26	0,26	0,13	0,26
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	3	3
f_{ck}	[MPa]	33	34,2	34,6	31,1	30,4
d_g	[mm]	16	16	16	16	16
ρ	[%]	1,55	1,56	1,56	1,5	1,51
f_y	[MPa]	580	554	554	583	583
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	3,80E-04	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	16	8	16	12	17
n_s	[-]	5	7	7	6	6
s_0	[mm]	130	80	80	50	50
s_1	[mm]	260	160	160	100	100
f_{yw}	[MPa]	563	592	592	536	536
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř
V_{test}	[kN]	5193	1176	1633	1043	1567
θ	[°]	46,3	41,2	41,3	48,7	41,2
x	[mm]	92,5	52,0	51,6	57,6	58,4
x_1	[mm]	96,8	45,4	45,2	65,7	51,0
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	28,6	29,5	29,8	27,2	26,7
V_{node}	[kN]	4308,1	1395,7	1401,6	919,6	1403,5
V_{strut}	[kN]	3887,5	1341,5	1346,9	1078,8	1362,1
V_{tie}	[kN]	4252,1	1105,3	1325,7	1216,6	1800,9
V_{out}	[kN]	5743,0	1390,4	2274,1	13395,2	13275,4
V_u	[kN]	3887,5	1105,3	1325,7	919,6	1362,1
V_{test}/V_u	[-]	1,34	1,06	1,23	1,13	1,15

Označ.	Jednot.	PF4	PF5	P22	S2-Vollum	S3-Vollum
d	[mm]	0,274	0,354	0,1535	0,174	0,174
c	[mm]	0,34	0,44	0,3	0,27	0,27
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Kruh	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	2,824	3	3
f_{ck}	[MPa]	32,5	33,4	32,9	24	27,2
d_g	[mm]	16	16	16	20	20
ρ	[%]	1,54	1,5	1,31	1,28	1,28
f_y	[MPa]	583	580	575	567	567
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05
n_r	[-]	22	29	20	8	8
n_s	[-]	50	50	2	5	3
s_0	[mm]	50	50	90	90	90
s_1	[mm]	100	100	150	90	90
f_{yw}	[MPa]	550	550	565	560	560
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Těsné	Těsné
V_{test}	[kN]	2667	4717	1044	843	903
θ	[°]	44,1	47,3	38,3	38,4	38,9
x	[mm]	74,5	93,2	37,9	51,3	47,5
x_1	[mm]	72,3	100,9	30,0	40,6	38,4
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	28,3	28,9	28,6	21,7	24,2
V_{node}	[kN]	2577,9	4507,4	864,1	987,4	1041,0
V_{strut}	[kN]	2417,6	4068,0	812,9	914,4	962,0
V_{tie}	[kN]	2604,4	3702,3	1081,5	1259,2	1285,7
V_{out}	[kN]	16852,1	20573,3	794,6	712,5	742,9
V_u	[kN]	2417,6	3702,3	794,6	712,5	742,9
V_{test}/V_u	[-]	1,10	1,27	1,31	1,18	1,22

Označ.	Jednot.	S4-Vollum	S5-Vollum	S6-Vollum	A4	A6
d	[mm]	0,174	0,174	0,174	0,07	0,07
c	[mm]	0,27	0,27	0,27	0,13	0,13
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	3	3	3	1	1
f_{ck}	[MPa]	27,2	23,2	23,2	25,6	25,6
d_g	[mm]	20	20	20	8	8
ρ	[%]	1,28	1,28	0,64	1,22	1,22
f_y	[MPa]	567	567	567	500	500
E_s	[GPa]	200	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	5,03E-05	1,01E-04	1,01E-04	1,26E-05	2,83E-05
n_r	[-]	8	8	8	12	12
n_s	[-]	3	5	5	3	3
s_0	[mm]	90	90	90	50	50
s_1	[mm]	90	90	90	50	50
f_{yw}	[MPa]	485	485	485	500	500
mód	[-]	Těsné	Těsné	Těsné	Uvnitř	Uvnitř
V_{test}	[kN]	906	872	740	240,3	245,2
θ	[°]	38,9	38,3	40,4	36,7	36,7
x	[mm]	47,5	52,4	37,0	18,2	18,2
x_1	[mm]	38,4	41,3	31,5	13,5	13,5
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	24,2	21,0	21,0	23,0	23,0
V_{node}	[kN]	1041,0	972,7	742,8	217,6	217,6
V_{strut}	[kN]	962,0	901,4	682,1	195,0	195,0
V_{tie}	[kN]	1056,7	1430,3	1303,3	208,9	324,9
V_{out}	[kN]	742,9	704,5	559,2		
V_u	[kN]	742,9	704,5	559,2	195,0	195,0
V_{test}/V_u	[-]	1,22	1,24	1,32	1,23	1,26

Označ.	Jednot.	B4	B6	C4	C6
d	[mm]	0,07	0,07	0,07	0,07
c	[mm]	0,075	0,075	0,13	0,13
tvar	[-]	Čtverec	Čtverec	Čtverec	Čtverec
l	[m]	1	1	1	1
f_{ck}	[MPa]	25,6	50,3	25,6	25,6
d_g	[mm]	8	8	8	8
ρ	[%]	1,35	1,35	1,35	1,35
f_y	[MPa]	500	500	500	500
E_s	[GPa]	200	200	200	200
A_{sw}	[m ²]	1,26E-05	2,83E-05	1,26E-05	2,83E-05
n_r	[-]	8	8	8	8
n_s	[-]	3	3	3	3
s_0	[mm]	50	50	50	50
s_1	[mm]	50	50	50	50
f_{yw}	[MPa]	500	500	500	500
mód	[-]	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř	Uvnitř
V_{test}	[kN]	186,4	218	220,2	236,8
θ	[°]	36,4	38,5	36,4	36,4
x	[mm]	19,1	12,6	19,1	19,1
x_1	[mm]	14,1	10,0	14,1	14,1
$\sigma_{R,max}$	[MPa]	23,0	40,2	23,0	23,0
V_{node}	[kN]	130,6	162,1	226,3	226,3
V_{strut}	[kN]	145,6	178,7	203,0	203,0
V_{tie}	[kN]	163,9	267,0	182,0	259,3
V_{out}	[kN]				
V_u	[kN]	130,5	162,1	182,0	203,0
V_{test}/V_u	[-]	1,43	1,35	1,21	1,17