



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

DEPARTMENT OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

# ZESILOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÝCH SLOUPŮ OVINUTÍM FRP TKANINOU

STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE COLUMN CONFINED BY FRP FABRIC

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vojtěch KOSTIHA

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. Petr ŠTĚPÁNEK, CSc.

BRNO 2018



# DISERTAČNÍ PRÁCE

© Copyright by Vojtěch Kostiha 2018  
All rights reserved

Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav betonových a zděných konstrukcí

## ABSTRAKT

Zesilování železobetonových sloupů ovinutím nekovovou kompozitní tkaninou rozšiřuje možnosti sanace těchto nosných prvků. Stejně jako při použití klasických stavebních materiálů se u tohoto způsobu zesílení s výhodou využívá víceosého působení zesíleného prvku, tzv. trojosého stavu napjatosti. Použití FRP materiálů (FRP – *fibre reinforced polymers* – *vlákny vyztužené polymery*) umožňuje snazší a rychlejší realizaci zesílení a minimalizaci nárůstu rozměrů zesilovaného sloupu při požadovaném zajištění jeho únosnosti. Díky lineárně-elastickému chování FRP kompozitů až do porušení poskytuje tento materiál výhodnější chování zesíleného sloupu, u kterého úměrně s přitížením narůstá příznivý účinek ovinutí.

Návrh zesílení ovinutím FRP tkaninou vychází z popisu chování ovinutého betonu, u kterého vlivem zesílení dochází ke změně pracovního diagramu. Zlepšené vlastnosti betonu se obvykle vyjadřují charakteristikami ovinutého betonu, tj. pevností ovinutého betonu v tlaku a jeho mezním poměrným přetvořením. Zesílení ovinutím tak zajišťuje nejen zvýšení únosnosti sloupu ale i nárůst jeho duktility. Pro stanovení charakteristik ovinutého betonu byla odvozena celá řada analytických vztahů, mezi kterými ovšem panuje značný rozptyl v obdržených hodnotách. Tyto rozdíly jednak způsobuje historický vývoj v dané oblasti, ale především volba okrajových podmínek (konfigurace vzorku, způsob zesílení, konfigurace zatížení apod.). Správný návrh zesílení není z tohoto důvodu jednoznačný a do značné míry závisí na volbě dostatečně výstižného výpočtového modelu pro konkrétní případ zesílení.

Cílem výzkumných činností prováděných na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně (*dále jen VUT*) byl na základě numerické simulace a experimentálního programu výstižnější popis chování sloupů ovinutých FRP tkaninou. Oproti většině studií bylo chování ovinutých sloupů sledováno v rozsahu takřka celého interakčního diagramu, což umožnilo lépe postihnout vybrané limitující parametry ovinutí. Předložená disertační práce uvádí základní informace o FRP materiálech a jejich vlastnostech, a podává přehled o návrhových přístupech ovinutí sloupů kompozitní tkaninou. Současně prezentuje analytický návrhový postup, jehož výsledky porovnává s řešením numerických modelů a provedenými experimenty. Popis základních principů ovinutí, včetně upozornění na vlivy omezující účinnost tohoto způsobu zesílení by měl vést k jasnějšímu návrhovému postupu.

## **ABSTRACT**

Strengthening of reinforced concrete columns by wrapping a non-metallic composite fabrics extends the possibilities of remediation of these load-bearing elements. Just like the use of classical building materials, the multi-axis action of the strengthened element, the so-called triaxial stress state, is advantageously used in this method of strengthening. The use of FRP (fibre reinforced polymers) materials enables easier and faster implementation of the strengthening and minimization of increase in the dimensions of the strengthened element while ensuring desired load-bearing capacity. Due to the linear-elastic behavior of FRP up to failure, this material provides a more advantageous behavior of strengthened columns. The positive effect of confinement increases proportionally with loading.

The design of strengthening of FRP-confined member is based on description of confined concrete behavior in which the stress-strain diagram changes due to strengthening. Improved concrete properties are usually expressed by the characteristics of confined concrete, i.e. compressive strength of confined concrete and its ultimate strain. Strengthening by confinement thus not only increases the load-bearing capacity of the column but also increases its ductility. Several analytical relationships have been derived for the determination of the characteristics of confined concrete, but there is a considerable variation in the obtained values. These differences are partly due to the historical development in this area, but also by the choice of boundary conditions (sample configuration, strengthening method, load configuration, etc.). The correct design of the strengthening is therefore ambiguous and largely depends on choosing a sufficiently apt computational model for a specific strengthening case.

The aim of the research activities carried out at the Faculty of Civil Engineering of the Brno University of Technology was a more accurate description of the behavior of the FRP-confined columns based on the numerical simulation and the experimental program. Compared to most studies, the behavior of the confined columns was monitored to the extent of almost the entire interaction diagram, which allowed better capture of the selected limiting confinement parameters. The presented dissertation states basic information about FRP materials and their properties, and gives an overview of the design approaches of confining of columns with composite fabric. At the same time, the dissertation presents the analytical design process, which results are compared with the results of numerical models and performed experiments. A description of the basic confinement principles, including a notification about the effects limiting the effectiveness of this strengthening method, should lead to a clearer design process.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Železobetonový sloup, zesílení ovinutím FRP tkaninou, FRP kompozit, trojosý stav napjatosti, numerické modelování.

## **KEYWORDS**

Reinforced concrete column, strengthening by confinement with FRP fabric, FRP composites, triaxial state of stress, numerical modeling.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Ing. Vojtěch KOSTIHA. *Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou*. Brno, 2018. 212 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 předloženou disertační práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pod odborným vedením mého školitele prof. RNDr. Ing. Petra Štěpánka, CSc.

V Brně dne 29. 1. 2018

.....

Ing. Vojtěch Kostiha



## PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především mému školiteli prof. RNDr. Ing. Petru Štěpánkovi, CSc. za odborné vedení celé práce a za cenné rady v oblasti této problematiky. Další dík patří také Ing. Františku Girglemu, Ph.D. za poskytování neocenitelných rad při tvorbě práce.

Práce vznikla v rámci řešení vědeckovýzkumného projektu Grantové agentury České Republiky 103/09/H085 – „Moderní kompozitní konstrukce“ a dále za přispění specifického výzkumu FAST-J-12-28 – „Ověření účinků zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou“.

Experimentální program se uskutečnil za podpory firmy Sika CZ, s.r.o., která dodala kompozitní materiál k zesílení zkušebních vzorků a poskytla cenné rady a zaškolení pro práci s těmito moderními materiály. Poděkování patří také firmě Prefa Brno, a.s., která dodala zkušební vzorky sloupů. Poděkování za odbornou pomoc při návrhu a provádění experimentů patří Ing. Petru Daňkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Veselému a ostatním členům zkušební laboratoře Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí, v jejichž prostorách se experimenty prováděly. Rovněž jsem velmi zavázán Mgr. Soni Kervitcerové za pomoc při finální korekci textu práce. Závěrem bych rád poděkoval všem, kteří přispěli k vytvoření této práce



**OBSAH**

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2. CÍL PRÁCE .....</b>	<b>15</b>
<b>3. ZÁKLADNÍ INFORMACE O ZESÍLENÍ OVINUTÍM FRP TKANINOU</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Dílčí komponenty FRP materiálů pro zesilování .....</b>	<b>16</b>
3.1.1. Nosná vlákna .....	17
3.1.2. Matrice .....	19
<b>3.2. Nekovové kompozitní tkaniny .....</b>	<b>21</b>
3.2.1. Fyzikálně-mechanické vlastnosti laminované FRP tkaniny – kompozitu .....	22
<b>3.3. Zesilování sloupů .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4. Zesílení ovinutím .....</b>	<b>32</b>
3.4.1. Princip působení ovinutí FRP tkaninou na betonový průřez .....	32
3.4.2. Příčný tlak ovinutí .....	34
3.4.3. Faktory ovlivňující výsledný účinek ovinutí .....	36
<b>4. PŘEHLED OBDOBNE ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1. Klasifikace výpočtových modelů sloupů ovinutých FRP tkaninou .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. Přehled přístupů vybraných normativních předpisů a směrnic .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3. Shrnutí stavu poznání .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4. Některé konference věnující se problematice navrhování konstrukcí vyztužených FRP materiály .....</b>	<b>61</b>
<b>5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1. Stanovení vlastností FRP tkaniny .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2. Experimentální ověření chování sloupů ovinutých FRP tkaninou .....</b>	<b>68</b>
5.2.1. Krátké ovinuté sloupy .....	69
5.2.2. Vysoké ovinuté sloupy .....	82
5.2.3. Shrnutí experimentální části .....	95
<b>6. TEORETICKÝ POPIS CHOVÁNÍ OVINUTÝCH SLOUPŮ .....</b>	<b>97</b>
<b>6.1. Analytické stanovení vlastností ovinutého betonu .....</b>	<b>97</b>
6.1.1. Porovnání jednotlivých výpočtových vztahů .....	98
6.1.2. Posouzení výpočtových modelů ovinutého betonu pomocí interakčního diagramu .....	100

6.1.3.	Popis vybraných vlivů omezující výsledný účinek ovinutí.....	115
6.1.4.	Model pro beton ovinutý FRP tkaninou .....	127
6.1.5.	Vliv štíhlosti prvku na účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou ....	130
<b>6.2.</b>	<b>Matematické modelování ovinutých sloupů.....</b>	<b>137</b>
6.2.1.	Obecný přístup nelineární analýzy.....	137
6.2.2.	Materiálový model makroprvku .....	138
6.2.3.	Metody řešení soustavy rovnic .....	143
<b>6.3.</b>	<b>Numerické modely sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou .....</b>	<b>144</b>
6.3.1.	Matematické modelování ovinutí .....	145
6.3.2.	Numerický model krátkého sloupu.....	148
6.3.3.	Numerický model vysokého sloupu .....	152
6.3.4.	Shrnutí matematického modelování ovinutých sloupů .....	157
<b>6.4.</b>	<b>Porovnání výsledků .....</b>	<b>159</b>
6.4.1.	Krátké sloupy z prostého betonu.....	159
6.4.2.	Krátké sloupy ze železobetonu .....	160
6.4.3.	Vysoké sloupy s vlivem štíhlosti .....	163
<b>6.5.</b>	<b>Shrnutí teoretické části .....</b>	<b>175</b>
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚRY .....</b>	<b>177</b>
7.1.	Doporučení pro praxi – návrh zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou .....	184
<b>PŘÍLOHA A – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>		<b>185</b>
<b>LITERATURA .....</b>		<b>191</b>
<b>POUŽITÝ SOFTWARE .....</b>		<b>196</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>196</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>		<b>199</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>202</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>		<b>202</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>		<b>207</b>

## 1. ÚVOD

Během své životnosti jsou stavební konstrukce a jejich nosné prvky vystaveny působení celé řady vlivů, které většinou vedou ke snížení jejich únosnosti. Pokud konstrukce nesplňuje kritéria definovaná mezními stavy únosnosti a použitelnosti, může dojít k omezení nebo k úplnému zákazu jejího užívání. Jediným možným řešením při zachování konstrukce je její sanace a zesílení. Zesilování představuje relativně levné, rychlé a elegantní řešení zabezpečení konstrukce tak, aby vyhovovala na ni kladeným požadavkům. Rozsah a způsob rekonstrukce ze statického hlediska vychází z konstrukčního systému, resp. typu nosného prvku, jeho aktuálního stavu a ze způsobu namáhání.

Obecně lze říci, že rekonstrukci definuje soubor požadavků na estetiku, časová, technologická a finanční náročnost. Vhodnou volbou zesilujícího materiálu je možné optimalizovat návrh z hlediska těchto požadavků. Klasické materiály, jako je beton a ocel, zajišťují požadované zvýšení únosnosti při relativně značném nárůstu průřezu zesilovaného prvku. Technologie provádění ovšem klade nároky na delší dobu realizace. Oproti tomu zesilování kompozitními FRP materiály významně rozšiřuje možnosti návrhu a přináší celou řadu výhod jak z konstrukčního, architektonického, tak i z ekonomického hlediska. Jedná se především o malý nárůst průřezu při zajištění únosnosti, ductility a trvanlivosti, zvýšení rychlosti provádění, snadnou manipulaci s lehkým konstrukčním materiálem a v neposlední řadě také výbornou odolnost FRP materiálů proti environmentálnímu namáhání.

Zesílení musí zajistit dostatečné zvýšení únosnosti anebo tuhosti. Volba typu jeho provedení se odvíjí také od předpokládaného způsobu porušení zesilovaného prvku, resp. od dominantního způsobu namáhání. U sloupů, jakožto svislých převážně tlačných nosných prvků, dochází ke kolapsu tlakovým či ohybovým porušením. Způsob porušení charakterizuje kombinace namáhání osově síly a ohybového momentu, který je dán výstředností působící osově síly. Pokud převládá tlaková osová síla působící s malou výstředností, dochází ke kolapsu tlakovým porušením. V takovém případě je vhodné zesílení provést zabráněním volné deformace v příčném směru např. pomocí FRP třmínek, příčně orientovaných lamel, či vhodněji ovinutím FRP tkaninou. K ohybovému, resp. tahovému porušení dochází při zvyšování ohybového namáhání (tj. při rostoucí výstřednosti osově síly). Zvýšení ohybové únosnosti lze docílit podélně orientovanými lamelami, prutovou FRP

výztuží umístěnou v mělkých drážkách průřezu, nebo aplikací tkaninou s podélnou orientací nosných vláken.

Disertační práce pojednává o způsobu zesílení sloupů s využitím FRP materiálů – zesílení železobetonového sloupu ovinutím FRP tkaninou. V této oblasti probíhá poměrně rozsáhlý výzkum s cílem popsat chování ovinutých sloupů a postihnout vliv faktorů redukcujících účinnost zesílení. Ta je závislá na vzniku trojosého stavu napjatosti a na míře vyvozeného příčného tlaku, jehož velikost ovlivňují jak parametry sloupu, parametry zesilujícího materiálu, tak i způsob namáhání. Z důvodu komplexnosti úlohy bylo vytvořeno množství matematických přístupů predikujících chování ovinutých sloupů, mezi kterými ovšem panuje značný nesoulad. Tato skutečnost značně stěžuje praktický návrh zesílení. Proto je cílem této disertační práce popsat chování ovinutého sloupu v takřka celém rozsahu interakčního diagramu. To umožní poukázat na některé faktory limitující účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou, zejména na vliv aktivace tkaniny a štíhlosti sloupu. Součástí práce je úprava stávajícího, nebo vytvoření nového teoretického modelu, který umožní výstižnou predikci reálného chování ovinutých sloupů při zohlednění zmíněných limitujících faktorů.

#### **Práce je rozdělena do těchto základních celků:**

- **1. Část:** V úvodu formuluje cíle disertační práce. V další, rešeršní, části poskytuje základní informace o problematice zesílení železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou, představuje současný stav poznání a shrnuje základní poznatky zahraničních textů a normativních podkladů.
- **2. Část:** Tato část práce popisuje experimentální program zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou. Jsou zde prezentovány informace o základních charakteristikách použitých materiálů, o konfiguraci zkušebních vzorků a samotných zatěžovacích zkoušek. Dále jsou zde uvedeny dosažené výsledky experimentálního programu.
- **3. Část:** Teoretická část disertační práce shrnuje výsledky analytické studie, popisuje tvorbu matematického modelu a závěry z obou přístupů porovnává s výsledky experimentálního programu. Cílem této části je poukázat na odlišnosti v jednotlivých přístupech a poukázat na faktory snižující účinnost ovinutí.
- **4. část:** V závěru práce jsou uvedena doporučení z hlediska návrhu zesílení železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou, která vycházejí z výsledků předchozích částí disertační práce.

## 2. CÍL PRÁCE

Disertační práce se zabývá zesílením železobetonových sloupů kruhového průřezu ovinutím FRP tkaninou. Jejím cílem je na základě provedených studií výstižně popsat chování ovinutých sloupů a poukázat na některé faktory, jež limitují účinnost tohoto způsobu zesílení. Veškeré poznatky z řešení práce posloužily k úpravě návrhového postupu, který predikuje chování ovinutých sloupů v takřka celém rozsahu interakčního diagramu. Toto řešení tak respektuje chování nejen v oblasti převládajícího tlaku, ale zohledňuje také vliv ohybového namáhání.

### Cíle práce:

- zhodnocení výstižnosti predikce chování ovinutých sloupů dle zvolených existujících přístupů (i se zahrnutím vybraných normativních předpisů);
- provedení experimentálních zkoušek. Cílem je verifikace teoretického chování ovinutých sloupů se zahrnutím limitujících vlivů a jejich zohlednění v návrhovém přístupu v souladu s platným normativním předpisem;
- matematické modelování řešené problematiky. Porovnání výsledků predikovaného a reálného chování sloužilo k optimalizaci návrhového postupu (únosnosti porovnávány pomocí interakčních diagramů).

Definované cíle práce byly dosaženy následujícími postupy:

- vytvoření přehledu stávajících přístupů stanovujících chování ovinutých sloupů, porovnání jejich výsledků pro modelový příklad;
- provedení experimentálních prací – zatěžovací zkoušky ovinutých sloupů v různých modifikacích umožňující popis sledovaných parametrů;
- zpracování nelineární numerické analýzy pomocí matematického modelu vytvořeného v programu ATENA, který byl využit pro verifikaci výsledků experimentální části;
- zpracování limitujících vlivů do návrhových postupů;
- ověření platnosti predikce chování sloupů ovinutých FRP tkaninou.

### 3. ZÁKLADNÍ INFORMACE O ZESÍLENÍ OVINUTÍM FRP TKANINOU

V této části práce jsou uvedeny základní informace o zesilování sloupů ovinutím FRP tkaninou, jejichž znalost je nezbytná pro pochopení řešené problematiky. Je členěna do čtyř podkapitol, které podávají ucelený náhled na ovinutí s pomocí FRP tkaniny.

První a druhá podkapitola se zabývají kompozitními FRP materiály. První podkapitola podává přehled materiálů tvořících tyto kompozity s ohledem na jejich využití při zesílení ovinutím. Druhá podkapitola prezentuje základní informace o těchto kompozitech a poukazuje na přínosy jejich použití. Třetí podkapitola popisuje běžné způsoby zesílení ovinutím se stručnou charakteristikou jejich výhod. Dále uvádí princip fungování ovinutí a výpis vlivů, jež limitují účinnost této metody zesilování. V poslední podkapitole jsou představeny vybrané návrhové přístupy podávající přehled o historickém vývoji dané problematiky.

#### 3.1. Dílčí komponenty FRP materiálů pro zesilování

Použití FRP materiálů ve stavebnictví se datuje do 70. let minulého století, kdy se začaly používat jako náhrada a vhodná alternativa k oceli. První aplikace jsou spojené se zesilováním stávajících konstrukcí, u kterých jejich použití odstraňovalo některé nedostatky oceli. Jedná se především o eliminaci značné hmotnosti, obtížné manipulace, náročnosti provádění, nutnosti ochrany vůči korozi aj. (počáteční aplikace jsou spojené se zesilováním mostů [37]). Rozšíření znalostí o chování FRP materiálů a vytvoření návrhových předpisů umožnily jejich použití v dalších aplikacích při výstavbě nově budovaných konstrukcí.

Kompozitní materiály vznikají složením minimálně dvou základních složek, z nichž se alespoň jedna nachází v pevné fázi a vytváří tak makroskopicky rozeznatelné rozhraní mezi jednotlivými složkami. Výsledný produkt dosahuje unikátních vlastností, jichž nejsou jednotlivé složky kompozitu schopny dosáhnout. V případě FRP materiálů jsou tyto kompozity tvořeny nosnými vlákny (pevná fáze) a polymerovou maticí (kapalná fáze). Ve většině případů mají dominantní zastoupení nosná vlákna, jejichž objemový podíl se pohybuje v rozmezí 50 – 70 % v závislosti na použitém typu vlákna, použité matici, způsobu výroby a požadovaných vlastnostech [8]. Kombinací vláken, použitých matic a způsobů výroby vzniká široký sortiment FRP výrobků s rozdílnými vlastnostmi, které determinují



oblasti jejich použití. Se zaměřením na řešenou problematiku zesilování sloupů ovinutím FRP tkaninou jsou níže v textu stručně uvedeny základní informace o materiálech použitých při výrobě FRP kompozitů (především tkanin), o způsobu a technologii jejich výroby a o jejich výsledných vlastnostech.

### 3.1.1. Nosná vlákna

V současném sortimentu FRP kompozitů mají majoritní zastoupení vlákna skleněná (GRFP – *glass fibre reinforced polymer*), uhlíková (CFRP – *carbon fibre reinforced polymer*) a aramidová (AFRP – *aramid fibre reinforced polymer*). Každý typ vykazuje jiné materiálové charakteristiky, z nichž nejdůležitějšími jsou tahová pevnost, přetvoření při přetržení a modul pružnosti (viz tab. 1). Všechny se vyznačují lineárně pružným chováním až do porušení a určují tak křehké chování výsledného kompozitu.

**Skleněná vlákna** jsou tvořena amorfní anorganickou sloučeninou s výrazným podílem oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Pomocí dalších příměsí, nejčastěji oxidů kovů [40], získávají charakteristické vlastnosti. Vyskytují se v různých formách, z nichž běžně používané typy vláken jsou typ A (*window glass*), E (*electrical glass* – nejrozšířenější typ vláken disponující vysokou elektrickou nevodivostí a výborným poměrem tahové pevnosti a ceny), C (*corrosion resistant glass*) nebo také AR (*alkali-resistant glass* – vlákna s korozivní odolností zejména při působení alkalického prostředí) a typ S (*structural/high strength glass*). Skleněná vlákna představují nejrozšířenější typ vláken s výhodným poměrem užitných vlastností a cenové dostupnosti. Vyznačují se dobrými tahovými vlastnostmi, vysokou tepelnou a elektrickou nevodivostí. Jejich nevýhodou je sklon k dotvarování, dále citlivost na vlhkost a na pH okolního prostředí (zásadité prostředí), které při dlouhodobém působení snižují tahovou pevnost vláken [47].

**Uhlíková vlákna** představují organický semikrystalický materiál tvořený atomy uhlíku uspořádaných do pevné dvojdimenzionální mřížky (krystalická mřížka grafitu). Podle dosahovaných vlastností se dělí do čtyř typů [47], na vlákna standartní (SM – *standart modulus*), vysokopevnostní (HS – *high strength*), s vysokým modulem pružnosti (HM – *high modulus*) a na vlákna s ultra vysokým modulem pružnosti (UHM – *ultrahigh modulus*). Uhlíková vlákna dosahují vynikajících mechanických vlastností, jsou objemově stálá, tepelně i elektricky nevodivá, netečná ve vlhkém prostředí, odolná vůči působení vysokých teplot a mnohých chemických vlivů (např. nepodléhají korozi), odolávají únavovému namáhání

a neprojevují známky dotvarování ani relaxace. Na rozdíl od skleněných vláken nejsou uhlíková vlákna považována za izotropní materiál, protože vykazují výrazně menší modul pružnosti ve směru kolmém na osu vlákna. Mezi jejich nevýhody patří náchylnost ke galvanické korozi při přímém kontaktu s ocelí, nižší tažnost (v porovnání se skleněnými vlákny) a „záporná“ tepelná roztažnost (při zvyšování teploty se zkracují) [8], [47]. Kvůli vysoké pořizovací ceně je jejich použití směřováno především do extrémně namáhaných oblastí. Používají se např. pro účely předpínání a pro zesilování.

**Aramidová (kevlarová) vlákna** jsou tvořena řetězci molekul aromatických polyamidů [8]. Vyznačují se nízkou hmotností, extrémní tažností a relativně vysokou tahovou pevností [47]. Díky schopnosti absorpce značného množství energie našla uplatnění zejména ve zbrojním, leteckém a automobilovém průmyslu. Vzhledem k vysoké ceně vláken a pro její horší mechanické vlastnosti (při porovnání s uhlíkovými vlákny) se jejich použití ve stavitelství omezuje na předpínání a v menší míře i na zesilování konstrukcí (především ovíjení sloupů ve formě tkanin).

Výše uvedené typy vláken představují základní sortiment FRP tkanin používaných při zesilování. Kromě těchto základních typů vláken lze použít například PVA (*polyvinyl alkohol*) nebo vlákna čedičová (BFRP – *basalt fibre reinforced polymer*, při nižší výrobní ceně dosahují vysoké korozivní odolnosti a vykazují podobné vlastnosti jako skleněná vlákna typu S). Oba typy vláken lze rovněž použít na výrobu tkanin používaných při zesilování sloupů [8], [47]. Kombinace typů vláken (hybridní FRP produkty), kdy jsou využívány přednosti použitých vláken, se v případě tkanin neprovádí.

**tabulka 1 - Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken (převzato z [13], [39], [47])**

Vlákna	Typ	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Max. přetvoření [%]	Teplota tavení [°C]
Skleněná	E	2570	72,5	3400	2,5	1100-1550
	A	2460	73	2760	2,5	
	C	2460	74	2350	2 - 3	
	S	2470	88	4600	3,5	
Uhlíková	SM	1700	250	3700	1,4	1200-2400
	HS	1800	250	4800	1,9	
	HM	1900	500	3000	0,6	
	UHM	2100	800	2400	0,3	
Aramidová	-	1440	70-125	3400-4100	2,2 - 4,4	~425
Čedičová	-	2800	93-110	3000-4800	2,2 – 3,1	1450

### 3.1.2. Matrice

Matrice tvoří pojivový a ochranný prvek kompozitního materiálu. Jako pojivo zajišťuje celistvost kompozitu, kdy k sobě váže jednotlivá vlákna a zabezpečuje přenos namáhání do celého průřezu. Jako ochranná vrstva chrání vlákna před vlivy okolního prostředí a proti mechanickému porušení. Po zatvrdnutí matrice udává konečný tvar kompozitu, a především společně s typem a množstvím nosných vláken určuje jeho výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti a ovlivňuje jeho chování.

Matrice vznikají řetězením organických či anorganických monomerů v polymery. Jejich základní dělení probíhá podle typu kovalentních vazeb mezi molekulami polymeru, kdy se dělí na matrice termosetové a termoplastické [27], [46], [47]. Termosetové matrice vytváří po vytvrzení síť silných kovalentních vazeb, tzn. umožňují zpracovatelnost pouze během tvrdnutí. Termoplastické matrice tvoří polymer se slabými kovalentními vazbami mezi jednotlivými molekulami řetězce (Van der Waalsovy síly, či vodíkové vazby), což umožňuje jejich opětovnou tvarovatelnost při zahřátí.

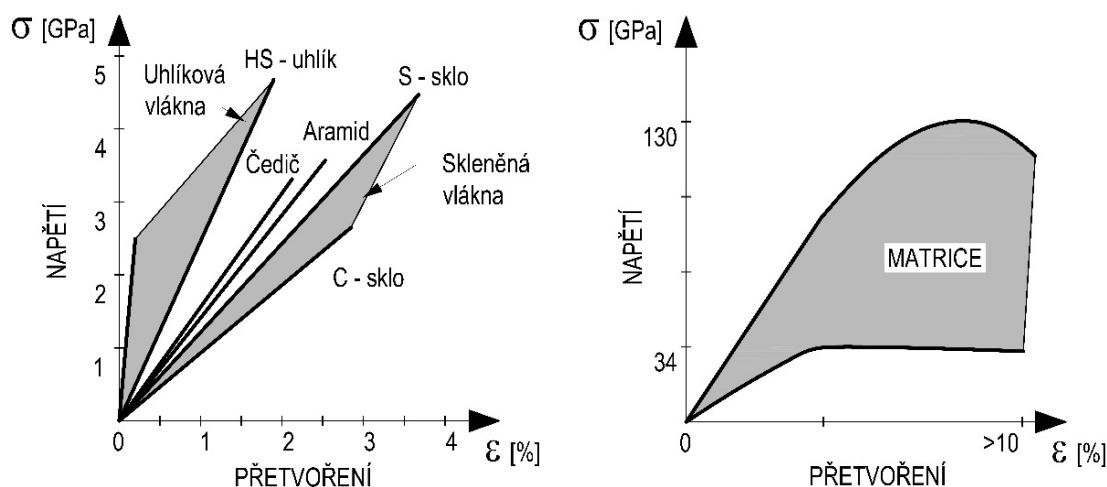
Polymerní matrice jsou citlivé na působení teplot, které ovlivňují jejich vlastnosti i chování. Své charakteristiky si matrice zachovávají v intervalu pracovních teplot (liší se podle typu matrice), jejíž horní hranice je dána tzv. teplotou skelného přechodu  $T_g$ . Při dosažení a překročení  $T_g$  matrice přechází z amorfního polymeru do plastického stavu, což se projevuje jejím rozkladem, měknutím a ztrátou objemové stálosti. Teplota skelného přechodu  $T_g$  se v závislosti na složení nejčastěji pohybuje v rozmezí 100 – 200 °C [8], [38], [47]. Obecně s rostoucí teplotou dochází ke snížení zpracovatelnosti, a především degradaci vlastností matrice. Na druhé straně intervalu působení nízkých teplot vede ke vzniku mikrotrhlin v polymerové matici, které způsobují ztrátu soudržnosti mezi jednotlivými vlákny. Mimo tyto vlastnosti jsou matrice dobré izolanty (nevedou tepelnou ani elektrickou energii), při dlouhodobém konstantním napětí podléhají dotvarování a některé typy jsou náchylné k degradaci vlivem UV záření.

Pro účely zesilování konstrukcí se nejčastěji používají termosetové matrice, které se podle chemického složení dělí na polyesterové, epoxidové, vinyl-esterové, fenolové, polyuretanové a další polymerní pryskyřice (vlastnosti vybraných pryskyřic jsou patrné z tab. 2). Mezi nejpoužívanější patří matrice na bázi epoxidů a vinyl-esterů, přičemž pro zesilování sloupů ovinutím FRP tkaninou jsou převážně používány matrice epoxidové. Z tohoto důvodu bude dále pojednáno pouze o tomto druhu matrice.

**tabulka 2** - Mechanické vlastnosti vybraných termosetových matric (převzato z [46], [47])

Vlastnost	Typ matrice		
	Polyesterová	Epoxidová	Vinyl-esterová
Objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]	1200-1400	1200 – 1400	1150 – 1350
Tahová pevnost [MPa]	34,5 – 104	55 – 130	73 – 81
Youngův modul pružnosti [GPa]	2,10 – 3,45	2,75 – 4,10	3,00 – 3,50
Poissonův součinitel [-]	0,35 – 0,39	0,38 – 0,40	0,36 – 0,39
Koeficient teplotní roztažnosti [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	55 – 100	45 – 65	50 – 75

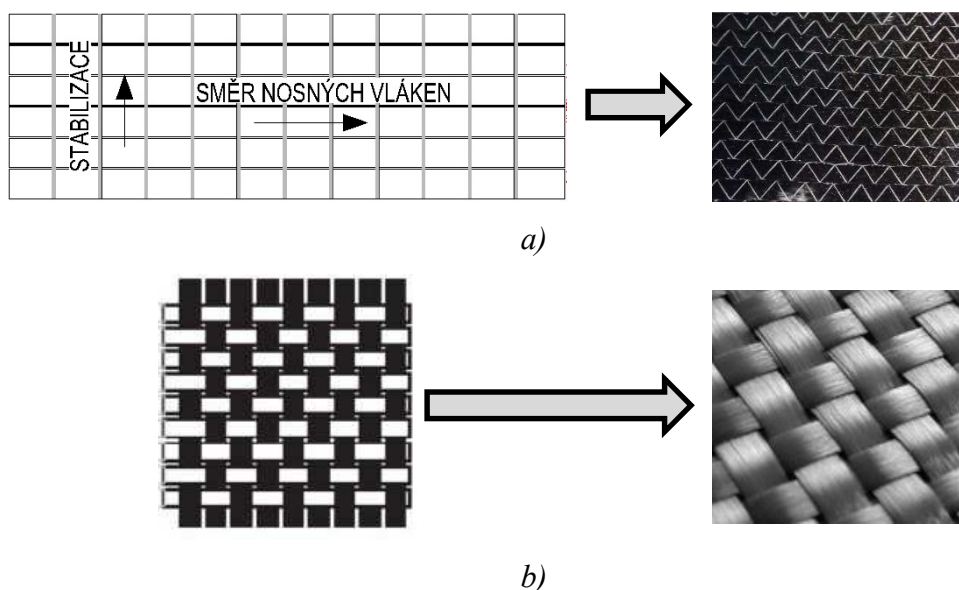
**Epoxidové matrice** vznikají polymerizací sloučenin obsahujících alespoň jednu epoxidovou skupinu na molekulu. Své vlastnosti získávají během vytvrzování v závislosti na chemickém složení a teplotě okolního prostředí. S rostoucí teplotou během vytvrzování (v rozsahu 5 – 150 °C dle [47]) se zvyšují i pevnost v tahu, modul pružnosti, teplotní stabilita a chemická odolnost. Oproti tomu lomová houževnatost a mezní přetvoření klesají. Epoxidové matrice se vyznačují širokou škálou vlastností umožňujících variabilitu jejich použití. Mezi jejich výhody patří vysoké fyzikálně-mechanické vlastnosti, objemová stálost i během vytvrzování, značná korozivní i teplotní odolnost a odolnost vůči chemickým vlivům (kromě působení kyselin). Díky obsahu nezreagovaných epoxidových jednotek mají velmi dobrou přilnavost k mnohým povrchům (zajišťují soudržnost mezi lepenými materiály). Vzhledem k značnému rozsahu vytvrzovací teploty jsou snadno zpracovatelné a jsou vhodné pro použití ruční laminace. Nevýhodou je v porovnání s vinyl-esterovou matricí vyšší pořizovací cena [8], [13], [47].

**obrázek 1** - Idealizovaný pracovní diagram jednotlivých komponent kompozitu: vláken (vlevo) a matrice (vpravo); [13], [40], [46]

### 3.2. Nekovové kompozitní tkaniny

Kompozitní tkaniny představují konečný výrobek určený k zesilování konstrukčních prvků, který se vyrábí tkaním či sešíváním suchých neimpregnovaných nosných vláken. Typickým znakem jsou převládající plošné rozměry nad její tloušťkou (řádově v desetinách milimetru, běžné rozmezí 0,1 – 0,5 mm) a možnost rozlišit od sebe jednotlivá nosná vlákna. Jedná se o polotovary, které jsou většinou dodávány ve formě rolí, a které své výsledné vlastnosti získávají po impregnaci polymerní matricí a jejím následném vytvrzení – vznik FRP kompozitu. Díky tomuto způsobu výroby jsou tkaniny snadno tvarovatelné (nesmí dojít ke zlomení nosného vlákna), což usnadňuje manipulaci a aplikaci na zesilovaný prvek.

Dělení tkanin se provádí podle několika parametrů, mezi základní patří typ nosných vláken, jejich množství a orientace. Podle typu vlákna rozlišujeme tkaniny tvořené skleněnými (GFRP), uhlíkovými (CFRP) nebo aramidovými (AFRP) vlákny (méně časté) [8], [46]. Kromě tkanin vyrobených z jednoho typu vlákna jsou na trhu nabízeny i hybridní tkaniny kombinující různé typy vláken (např. uhlík-sklo, uhlík-aramid).



**obrázek 2 - Znárodnění typů tkaniny (idealizace → reálné provedení)**

*a) jednosměrná tkanina [50]; b) obousměrná tkanina [28]*

Podle orientace vláken se tkaniny dělí na jednosměrné, obou- nebo dvousměrné (viz obr. 2), či vícesměrné (např. rohože s neusměrněnými nastříhanými vlákny). U jednosměrné tkaniny je 100 % nosných vláken orientovaných v jednom směru. Jedná se o jednoduchou vazbu vykazující minimální zvlnění vláken. Ostatní typy tkanin v důsledku spřádání nosných vláken v daném typu vazby vykazují výraznější zvlnění a v porovnání s jednosměrnou

tkaninou dosahují nižších pevností a tuhostí. Rozlišení tkanin podle množství vláken určuje jejich kvalitu a obvykle se v závislosti na typu vlákna vyjadřuje gramáží, tj. hmotností vláken na plochu v  $\text{g/m}^2$  (v případě použití skleněných vláken; většinou v rozmezí 140 – 900  $\text{g/m}^2$ ), nebo pomocí texu<sup>1</sup> (v případě použití uhlíkových vláken) [8]. Množství vláken ovlivňuje způsob laminace tkaniny, která se v případě ruční výroby<sup>2</sup> typické pro zesilování stavebních konstrukcí, dělí na suchý a mokrý proces. Suchý proces spočívá v kladení suché tkaniny do polymerní pryskyřice aplikované na povrchu zesilovaného prvku. Mokrý způsob laminace vyžaduje důkladné prosycení tkaniny ještě před aplikací na povrch zesilovaného prvku. Rozhraní mezi suchým a mokrým způsobem laminace tvoří tkaniny s gramáží kolem 300  $\text{g/m}^2$ . Způsob laminace má zásadní vliv na způsob provedení zesílení, kdy v případě suchého procesu je možné provádět kontinuální laminaci „nekonečného“ pásu tkaniny (tzn. lze zesílit/ovinit celý prvek najednou). Zatímco v případě mokrého procesu se tkanina laminuje po pásích určité délky, které se kladou vedle sebe.

### 3.2.1. Fyzikálně-mechanické vlastnosti laminované FRP tkaniny – kompozitu

Fyzikálně-mechanické vlastnosti laminované FRP tkaniny primárně determinují vlastnosti dílčích složek (nosná vlákna, matrice) a jejich směsný poměr. Sekundárně je ovlivňují postup a kvalita výroby, kvalita a způsob aplikace, historie zatěžování, typ a směr působícího zatížení (statické, cyklické – únavové) a okolní podmínky (teplota a vlhkost).

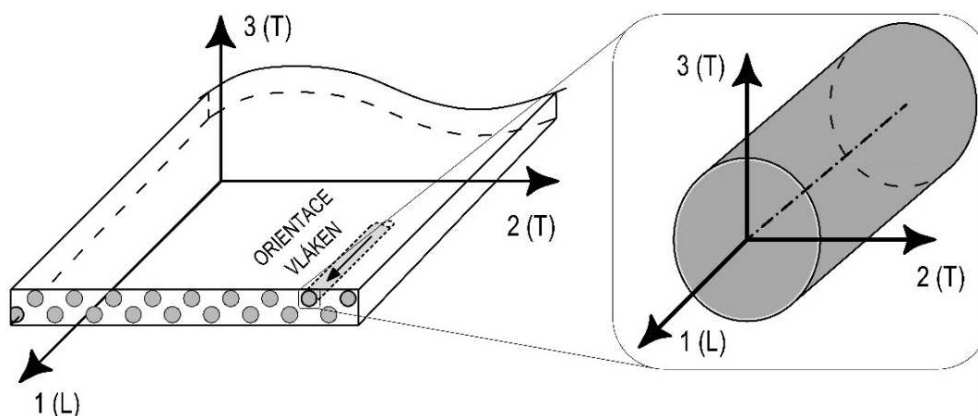
Obecně je možné fyzikálně-mechanické vlastnosti stanovit dvěma způsoby: teoreticky nebo experimentálně. Získaná data poskytují vypovídající informace o vlastnostech kompozitu pouze v rozsahu provedené studie či experimentu a jsou tak platná pro konkrétní složení a postup výroby. Jakákoliv změna ve výrobním postupu či složení kompozitu vede k nutnosti stanovit nové vlastnosti. Popis teoretických i experimentálních postupů včetně vztahů popisujících některé mechanické charakteristiky kompozitu uvádí literatura [8], [37], [46], [47]. Při určování vlastností laminované tkaniny je nutné zohlednit typ vazby (u tkanin působících ve více směrech), orientaci vláken (zejména v případě aplikace více vrstev tkaniny) a způsob laminace.

---

<sup>1</sup> jednotka užívaná v textilním průmyslu - představuje délkovou hustotu vyjádřenou hmotností vlákna na 1 km délky [ $\text{g/km}$ ]

<sup>2</sup> ruční výroba – tzv. lay-up nebo hand lay-up laminace, při které se tkanina postupně prosycuje polymerní matricí na místě použití a následně je vytvrzena za aplikační teploty

Výroba kompozitu se provádí laminací orientovaných nosných vláken, tj. prosycením vláken tkaniny polymerní matricí a následným vytvrzením – vznik FRP tkaniny. Toto uspořádání FRP kompozitu předurčuje jeho ortotropní chování, kdy nabývá různých hodnot materiálových charakteristik ve směru orientace vláken a ve směru kolmém na vlákna – základní vrstva je označována jako ortotropní vrstva (viz obr. 3). V podélném směru jsou materiálové charakteristiky určovány zejména vlastnostmi vláken, zatímco v příčném směru jsou vlastnosti kompozitu dané parametry matrice (výsledné mechanické parametry určované ve směru vláken dosahují násobně vyšších hodnot než ve směru kolmém na vlákna).



**obrázek 3** - Jednosměrné uspořádání vláken v ortotropní vrstvě, resp. vlákně se zobrazením hlavních os: podélná osa – 1 (L) a příčné osy 2 (T) a 3 (T)

Chování FRP laminátu je popsáno pomocí základních charakteristik ortotropní vrstvy, které je možno s využitím směšného pravidla stanovit podle následujících vztahů [8], [47]:

- modul pružnosti v podélném ( $E_1$ ) a příčném směru ( $E_2$ )

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f), \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot (1 - V_f) + E_m \cdot V_f}, \quad (2)$$

kde jednotlivé symboly značí:

$E_1, E_2$  modul pružnosti ve směru vláken, resp. kolmo na vlákna;

$E_f$  modul pružnosti vláken v podélném směru;

$E_m$  modul pružnosti matrice (izotropní materiál);

$V_f$  objemový podíl vláken  $v_f$  vztahžený k objemu kompozitu  $v_c$ ,  $V_f = v_f/v_c$ ;

- modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$ , který vychází ze znalosti smykových modulů použitých dílčích složek kompozitu

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}}\right) \cdot \sqrt{V_f}}, \quad (3)$$

kde symboly značí:

$G_{f12}$  modul pružnosti ve smyku vlákna;

$G_m$  modul pružnosti ve smyku matrice (izotropní materiál);

- Poissonův poměr vyjadřující příčnou kontrakci kompozitu v daném směru

$$\nu_{12} = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f), \quad (4)$$

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \nu_{12}, \quad (5)$$

kde symbol značí:

$\nu_i$  Poissonův součinitel daný podílem poměrných deformací (Poissonův poměr).

Mezi další důležité charakteristiky patří pevnost laminátu. Ta je na rozdíl od elastických konstant (tj. základních charakteristik ortotropní vrstvy) určována lomovými procesy a je tak značně závislá na výskytu defektů kompozitu (dutiny v matrici, zlomy vláken – místa nespojitostí s možnou koncentrací napětí). Vzhledem k dominantnímu způsobu využití laminované FRP tkaniny je prezentována pouze tahová pevnost ve směru vláken, kterou lze popsat vztahem [47]:

$$f_1 = f_{f1} \cdot \left[ V_f + \frac{E_m}{E_{f1}} \cdot (1 - V_f) \right]. \quad (6)$$

Význam jednotlivých symbolů ve výše uvedeném vztahu:

$f_1$  tahová pevnost laminované FRP tkaniny ve směru vláken;

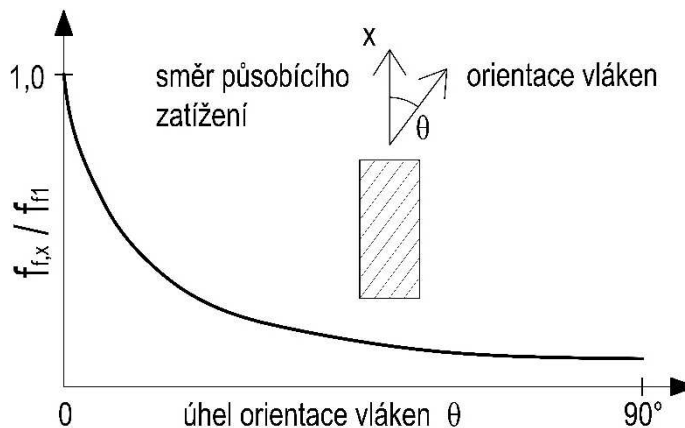
$f_{f1}$  tahová pevnost nosných vláken v podélném směru;

$E_{f1}$  modul pružnosti vláken v podélném směru.

Vzhledem k ortotropii kompozitu jsou vlastnosti vztažené ke dvěma souřadnicovým osám (tj. ve směru vláken – směr 1 a kolmo na vlákna – směr 2). Vlastnosti ve třetím (příčném) směru se většinou předpokládají stejné jako ve směru kolmém na vlákna. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou proto vždy závislé na směru namáhání. Změna pevnosti laminátu



při namáhání ve směru  $x$  ( $f_{f,x}$ ) pootočeném o úhel  $\theta$  vůči směru rovnoběžnému s vlákny 1(L) je vyjádřena na obr. 4. Obdobným způsobem je možné vyjádřit změnu tuhosti, resp. modulu pružnosti laminátu.

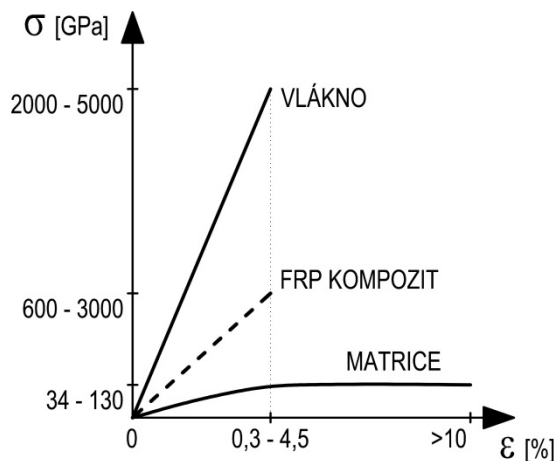


**obrázek 4** - Vliv úhlu výslednice namáhání a orientace vláken tkaniny na tahové charakteristiky laminátu [47]

Z výčtu důležitých mechanických vlastností, kromě již výše uvedených, je nutné zmínit ještě mezní přetvoření při přetržení tkaniny  $\varepsilon_{fu}$  (stanoveno při tahovém namáhání ve směru vláken). Vztah pro jeho stanovení lze odvodit z platnosti Hookova zákona [8]:

$$\varepsilon_{fu} = f_1 \cdot E_1 \cdot \quad (7)$$

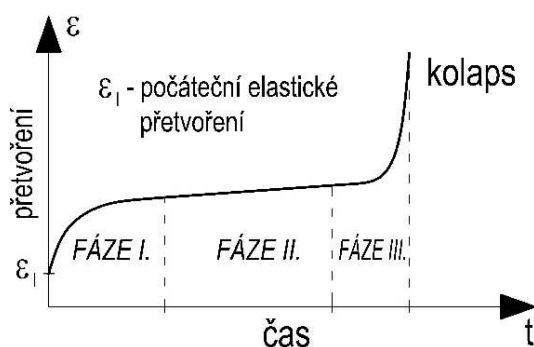
Výsledný produkt laminované tkaniny se při namáhání ve směru vláken vyznačuje lineárně-elastickým chováním s křehkým selháním, tzn. pracovní diagram má vždy lineární průběh až do porušení (patrné z obr. 5). Toto chování souvisí s chováním dílčích složek kompozitu, především s chováním nosných vláken (všechny typy nosných vláken jsou lineárně elastické a selhávají křehkým lomem).



**obrázek 5** - Idealizovaný pracovní diagram FRP kompozitu a jeho jednotlivých složek ([13], [40], [47])

FRP kompozity mění své mechanické vlastnosti v čase, v důsledku této degradace je nutné odlišovat krátkodobé a dlouhodobé chování. V dlouhodobém měřítku vykazují FRP kompozity nárůst deformací (dotvarování) pod působícím zatížením, jsou citlivé na únavové namáhání (v závislosti na typu vláken) a degradují vlivem určitých faktorů vnějšího prostředí (UV záření, pH prostředí apod.).

Při dotvarování dochází k nárůstu nepružné deformace v čase při konstantní hladině působícího zatížení. Pro FRP materiály je možné tento jev rozdělit do tří fází. Primární fáze se projevuje počátečním relativně rychlým nárůstem deformace krátce po vnesení zatížení s následnou klesající intenzitou. Sekundární fáze je charakterizována konstantní rychlostí dotvarování. Terciální fáze se projevuje rychlým nárůstem deformace ve velmi krátkém časovém intervalu s následným křehkým selháním kompozitu. Z tohoto hlediska je nutné stanovit limitní úroveň zatížení, při které nenastane třetí fáze dotvarování.



**obrázek 6** - Vývoj dotvarování FRP materiálů v závislosti na čase (převzato z [47])

Relaxace je opačným jevem dotvarování, kdy při konstantní deformaci dochází k poklesu napětí. V logaritmickém měřítku vykazuje přibližně lineární nárůst a je složena ze tří složek. Relaxace matrice, narovnání vláken uvnitř kompozitu a samotná relaxace vláken. Největší podíl zaujímá relaxace vláken, která je závislá na typu vláken.

Únavové chování je charakterizováno poklesem mechanickým vlastností v důsledku vysokého počtu opakujících se zatěžovacích cyklů. V homogenním materiálu vznikají mikrotrhliny, které vedou k poklesu pevnosti a tuhosti – při návrhu se proto pracuje s pojmy únavová pevnost, či únavová tuhost. Jejich stanovení představuje komplexní úlohu, kdy k selhání kompozitu může dojít na úrovni matrice (trhliny v matrici), na úrovni nosných vláken (přetržení), porušením vazby mezi vlákny a matricí (delaminace), či kombinací předchozích způsobů porušení.

Tyto dlouhodobé účinky se projevují poklesem mechanických vlastností FRP kompozitu. Míra degradace materiálových vlastností závisí na jeho složení (zejména na typu vláken – největší odolnost vykazují uhlíková vlákna). Predikce těchto účinků probíhá za pomoci dlouhodobých urychlených zkoušek, jejichž výsledkem je stanovení parciálních součinitelů omezujících krátkodobé vlastnosti v závislosti na požadované životnosti – stanovení dlouhodobé pevnosti.

Z výše uvedeného vyplývá, že aplikaci FRP tkaniny je vhodné směřovat především pro tahová namáhání ve směru vláken. I když s rostoucí tahovou pevností vzrůstá i únosnost kompozitu v tlaku<sup>3</sup>, nedoporučuje se užití FRP tkaniny pro přenos tohoto namáhání. Působení tlaku klade zvýšené požadavky na zajištění soudržnosti laminovaných vrstev a vzhledem ke složení laminátu vyvolává i nežádoucí interlaminární napjatost mezi vlákny a matricí. Při působení tlakového namáhání může dojít k selhání příčným tahovým porušením, důsledkem boulení vláken anebo smykovým selháním, přičemž charakter porušení je závislý na použitém materiálu, resp. na jeho charakteristikách. Tlaková pevnost kompozitu v závislosti na typu nosného vlákna dosahuje přibližně 20 % tahové pevnosti pro tkaninu s aramidovými vlákny, 50 % pro tkaninu se skleněnými vlákny a 75 % pro tkaninu tvořenou uhlíkovými vlákny [47]. Modul pružnosti v tlaku vykazuje obdobný trend.

Mimo dlouhodobé účinky vykazují FRP materiály degradaci vlastností při působení požáru. Matrice je hořlavý materiál, jehož funkčnost je podmíněna dosažením teploty skelného přechodu  $T_g$ . V závislosti na typu vláken jsou tato schopna přenášet zatížení i po odhoření matrice. Působí však samostatně a podmínkou pro přenos namáhání je jejich dostatečné kotvení (tj. zajištění adheze). Z tohoto důvodu musí být vzhledem k jejich tloušťce před těmito účinky chráněny provedením vhodné povrchové úpravy [18].

Výsledné vlastnosti laminátu FRP tkaniny mohou v případě ruční laminace nabývat různých hodnot pro totožný výrobek. Jejich výši ovlivňují kvalita laminace a aplikace samotné tkaniny a také podmínky okolního prostředí (zejména vlhkost a teplota). Mechanické vlastnosti FRP tkanin vyrobených ruční laminací je možné stanovit pomocí empirických vztahů, jež zohledňují složení kompozitu. Jejich vyčíslení je podmíněné znalostí průřezové plochy kompozitu a objemového podílu jednotlivých složek. V důsledku nepřesnosti při provádění se nabízí dvě možnosti stanovení průřezové plochy, kdy se buďto

---

<sup>3</sup> neplatí v případě aramidových vláken, která vykazují nelineární chování v tlaku již při nízké úrovni namáhání

uvažuje celková plocha průřezu (předvyrobené prvky), anebo se při výpočtu průřezové plochy uvažuje pouze plocha vláken (doporučeno u prvků vyráběných ruční laminací). V závislosti na zvoleném přístupu nabývají vlastnosti pro tentýž kompozit různých hodnot. Při uvažování průřezové plochy vláken dostáváme vyšší hodnoty mechanických vlastností kompozitu. Nicméně nelze použít vlastnosti suchého vlákna, které nabývá výrazně vyšších hodnot a vedlo by k nadhodnocení výsledných vlastností kompozitu. Druhý způsob stanovení vlastností kompozitu představují experimentální zkoušky.

Použití typu tkaniny se odvíjí od způsobu namáhání zesilovaného prvku, navrženého způsobu zesílení a velikosti jeho účinku (pro zesílení sloupů s dominantním osovým namáháním je výhodné použití jednosměrné tkaniny působící v příčném směru; pro zajištění pevnosti, tuhosti, či smykového zesílení se většinou používají obousměrné tkaniny). Mezi přínosy použití FRP tkanin patří snadná manipulace, rychlost aplikace, snadné přizpůsobení tvaru zesilovaného prvku a odolnost vůči vlivům agresivního prostředí. Nevýhodami FRP tkanin jsou vyšší pořizovací cena, zvýšené nároky na kvalitu laminace a nutnost ochrany vůči účinkům požáru. Přehled dostupných kompozitních tkanin je uveden v tab. 3.

Symbole použité v následující tabulce udávají (index  $f$  označuje vlastnosti suchého vlákna, index  $l$  označuje vyšetřovaný směr):

$E_{fl}, E_l$  modul pružnosti vlákna, resp. modul pružnosti laminátu v podélném směru;

$t_{fl}, t$  tloušťka vlákna, resp. tloušťka laminátu;

$\varepsilon_{l,max}$  hodnota přetvoření laminované tkaniny omezená výrobcem;

$\varepsilon_{fl,rupt}$  limitní přetvoření vlákna při přetržení;

$\sigma_{l,max}$  tahová pevnost laminátu ve směru vláken;

$\sigma_{ld}$  návrhová hodnota tahové pevnosti laminované FRP tkaniny;

$\sigma_{fl}$  tahová pevnost vlákna v podélném směru.

tabulka 3 - Vlastnosti vyráběných FRP tkanin

Výrobce	Obchodní název	Nosná vlákna	Konstrukce tkaniny	Gramáž [g/m <sup>2</sup> ]	Hustota vláken [g/cm <sup>3</sup> ]	Vlastnosti suchého vlákna			Vlastnosti laminované vrstvy					
						t <sub>FI</sub> [mm]	σ <sub>FI</sub> [MPa]	E <sub>FI</sub> [GPa]	ε <sub>FI,rupt</sub> [%]	t [mm]	σ <sub>1,max</sub> [MPa]	σ <sub>1,d</sub> [MPa]	E <sub>1</sub> [GPa]	ε <sub>1,max</sub> [%]
Sika CZ, s.r.o.	SikaWrap - C <sup>1)</sup>	uhliková <sup>2)</sup>	jednosměrná	150 - 900	1,76 - 1,82	0,086 - 0,48	3800 - 4900	230 - 242	1,55 - 1,8	0,13 - 1,3	200 - 1000 <sup>4)</sup>	100 - 500	16 - 64	0,6 <sup>5)</sup>
	SikaWrap - G	skelná	jednosměrná	430; 930	2,56	0,172 - 0,358	3400 / 2300 <sup>3)</sup>	76	2,8	1,0; 1,3	230; 700	83 - 150	14; 19	0,6
příklad	SikaWrap - 600 C/120	uhlik MS	jednosměrná	610 ± 20	1,81	0,337	3800	242	1,55	1,3	750	400	50	0,6
	Fyfe&Aeglon Company	uhliková	jednosměrná	393 - 644	1,74 - 1,8	N/A	3790 - 4900	230	1,7 - 2,1	0,51 - 2,0	661 - 986	558 - 834	47,9 - 95,8	1,0 - 1,4
příklad	Tyfo Composite - SCH	skelná	jednosměrná	430; 930	2,55	0,172 - 0,358	3240	72,4	4,5	0,25 - 1,3	309 - 575	223 - 460	18,6 - 26,1	1,5 - 2,2
	Tyfo Composite - SEH	uhliková	jednosměrná	644	1,74	N/A	4000	230	1,7	1,0	986	834	95,8 / 82 <sup>6)</sup>	1,0 / 0,85 <sup>6)</sup>
Sanax	CarboWrap - G	uhliková	jednosměrná	300	1,8	0,167	4300	230	1,8		výrobce neudává vlastnosti laminátu			
	CarboWrap - C	uhliková	obousměrná	245 ± 7	1,79	0,5	4410	235	1,9		výrobce neudává vlastnosti laminátu			
Structural Technologies	V-Wrap <sup>TM</sup> C	uhlik HS	jednosměrná	300 - 1356	1,74 - 1,8	N/A	3790 - 4480	230 - 276	1,7 - 1,9	0,584 - 2,0	986 - 1380	834 - 1100	66,2 - 95,8	1,0 - 1,6
	V-Wrap <sup>TM</sup> EG50	skelná	jednosměrná	915	2,55	N/A	3240	72,4	4,5	1,3	575	460	26,1 / 20,9 <sup>6)</sup>	2,2 / 1,76 <sup>6)</sup>
příklad	V-Wrap <sup>TM</sup> C200	uhlik HS	jednosměrná	644	1,74	N/A	3790	230	1,7	1,0	986	834	95,8 / 82 <sup>6)</sup>	1,0 / 0,85 <sup>6)</sup>
	MapleWrap C UNI-AX	uhlik HS	jednosměrná	300; 600 <sup>7)</sup>	1,8	0,166; 0,333 <sup>7)</sup>	4830	230	2		výrobce neudává vlastnosti laminátu			
Mapel	MapleWrap C UNI-AX HM	uhlik HMI	jednosměrná	300; 600 <sup>7)</sup>	1,82	0,164; 0,329 <sup>7)</sup>	4410	390	1,1		výrobce neudává vlastnosti laminátu			
	MapleWrap G UNI-AX	skelná (E-CR)	jednosměrná	900	2,62	0,48	2560	90,7	3 - 4		výrobce neudává vlastnosti laminátu			
FRP Solutions	FC061	uhlik	jednosměrná	600	-	N/A	4826	234,4	1,4	N/A	1027,3	N/A	69,64	N/A
	FC062	uhlik	obousměrná	670	-	N/A	4500	234,4	N/A	N/A	499,45	N/A	30,26	N/A
	FE261	skelná	jednosměrná	879	2,58	N/A	3440	70,6	4,7	N/A	625,76	N/A	27,02	N/A
S&P Clever reinforcement Company AG	S&P A-Sheet 120	aramid	jednosměrná	600	1,45	0,2	2900	120	2,5	N/A	2200	350 / 525 <sup>8)</sup>	N/A	0,4 / 0,6
	S&P C-Sheet	uhlik (HS, MH)	jednosměrná	230 - 630	1,77 - 2,1	0,113 - 0,335	4500 / 2650 <sup>9)</sup>	240 / 64,0 <sup>9)</sup>	1,75 / 0,4 <sup>9)</sup>	N/A	3700 / 2210 <sup>9)</sup>	1190 / 790 <sup>9)</sup>	N/A	0,4 / 0,6
	S&P G-Sheet	skelná (typ E, AR)	obousměrná	350 - 880	2,6 - 2,68	0,067 - 0,308	3400; 2850 <sup>10)</sup>	73 / 65 <sup>10)</sup>	4,5	N/A	2400 / 2960 <sup>10)</sup>	320 / 210 <sup>10)</sup>	N/A	0,4 / 0,6

Vysvětlivky: 1) označení tkaniny udává typ vlákna a jejich gramáž. V případě uhlikových tkanin nabízí relativně široký sortiment jednosměrných tkanin.

2) v případě uhlikových vláken používá vlákna střední (MS) a nebo vysoké (HS) pevnosti, resp. vysokého modulu pružnosti (HM).

3) značení pevnosti XX / YY udává střední pevnost stanovenou zkouškami / návrhovou pevnost

4) rozptyl tahové pevnosti laminátu je způsoben uvedením krajních hodnot pro nejslabší a nejsilnější tkaninu

(např. v případě výrobce Sika je rozptýl dán vlastnostmi tkanin s označením SikaWrap 150 C/30 a SikaWrap 900 C/150)

5) výrobce omezuje limity přetvoření tkaniny hodnotou 0,6 pro všechny své výrobky bez ohledu na typ tkaniny. Hodnoty návrhových pevností laminátu jsou stanoveny pro toto přetvoření.

6) střední hodnota získaná zkouškami / návrhová hodnota. Zkoušky prováděny podle americké normy ASTM (D3039)

7) výrobce udává dvě možné kvality výrobků, jejich charakteristiky jsou od sebe odlišeny pomocí :

8) tahová únosnost stanovena pro udané hodnoty protažení (0,4 a 0,6 %)

9) vlastnosti jsou stanoveny pro uhliková vlákna typu HS, resp. typu HM (HS / HM)

10) vlastnosti jsou stanoveny pro skelná vlákna typu E, resp. typu AR (E / AR)

N/A nespecifikováno v technickém listu výrobku

Většina výrobců označením výrobku udává typ tkaniny, resp. typ použitých vláken. V technických listech všech výrobců specifikovali požadavky na povrch zesilovaného prvku a také způsob aplikace tkaniny v závislosti na zvoleném typu, rovněž povětšinou uvádějí vlastnosti matrice (ve všech případech jsou předepisovány epoxidové pryskyřice, jejichž teplota skelného přechodu se polybuje pouze kolem 50 - 80 °C) a vlastnosti suchého vlákna. Vlastnosti výsledného laminátu byly u některých výrobců nedostatečně specifikovány anebo chyběly úplně. V případě obousměrných tkanin jen někteří výrobci uvádějí bližší specifikaci tkaniny, tj. směr vláken a jejich vzájemný podíl v tkanině (např. Fyfe & Aegron Company).

### 3.3. Zesilování sloupů

Zesílení sloupů je spojené se zajištěním jejich požadované únosnosti a trvanlivosti tak, aby bylo zabezpečeno další užívání konstrukce. Podle způsobu provedení je možné zesílení sloupů rozdělit na zesílení zvětšením průřezu (např. obetonování), zesílení předpětím a zesílení změnou statického schématu (např. změna rozpětí, změna namáhání apod.). Volba daného způsobu zesílení záleží na konstrukčním uspořádání (ná vaznost ostatních konstrukčních prvků), na provedení sloupu (aktuální stav, použité materiály, vyztužení) a na působícím zatížení. Vzhledem k tématu této práce je blíže pojednáno o zesílení sloupů pomocí zvětšení jeho průřezu.

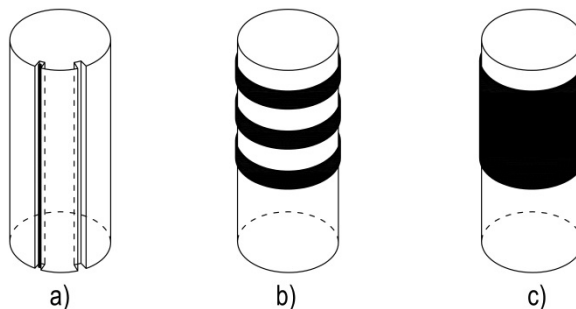
Zesílení s použitím klasických materiálů (tj. beton, ocel) vede k dostatečnému zvýšení únosnosti či duktility prvku, ale pouze při značném nárůstu rozměrů průřezu. Klasickými způsoby se zesílení provádí formou hustě umístěné příčné výztuže (třmínky, spirála) nebo pomocí ocelových plátů a obručí obepínajících zesilovaný sloup. Mezi výhody těchto způsobů zesílení patří variabilita použití, kdy se v závislosti na způsobu namáhání volí odpovídající způsob zesílení. Příčná výztuž slouží ke zvýšení osově a ohybové únosnosti, pláty pak především ke zvýšení smykové únosnosti. Je možné zesilovat celý prvek nebo pouze jeho deficientní část, tzv. lokální zesílení. Vysoká tuhost oceli vede k rychlé aktivaci zesílení, její značná duktilita zvyšuje účinnost zesílení. Kromě pasivní varianty zesílení, u které se účinek projeví až po deformaci zesílené konstrukce, lze v případě ocelových plátů a obručí s výhodou využít možnost vnesení napětí při aplikaci zesílení (např. předehřátí či utažení šroubů), tzv. aktivní varianta zesílení. Nevýhodami klasických způsobů zesílení sloupu ovinutím jsou zvýšená pracnost (manipulace s těžkými prvky), náročnost na provádění (příprava zesilujícího vyztužení, přesnost dílců, nutnost provádění svarů, aj.), požadavky na pracovní prostor a časová náročnost.

Kompozitní materiály na bázi FRP umožňují provádět zesílení novými postupy a s využitím nových technologií, a rozšiřují tak možnosti sanace nosných prvků. Díky svým vlastnostem odstraňují některé nedostatky použití klasických materiálů. Nízká hmotnost a způsob aplikace snižují pracnost při manipulaci a při provádění, vysoká pevnost a značná přetvárnost zvyšují účinnost zesílení. V konečném důsledku vedou k urychlení procesu zesílení a k zajištění požadované únosnosti při minimálním nárůstu průřezu sloupu. Oproti konvenčním způsobům ovinutí (použití klasických materiálů – hustě umístěné třmínky,

případně spirála s malým stoupáním) dosahují novější metody využívající FRP materiály (aplikace FRP tkanin) vyšší účinnosti.

Zesilování sloupů s použitím FRP materiálů je možné provádět dvěma základními způsoby, či jejich kombinací:

- pomocí NSM (*near surface mounted*) výztuže kladené do drážek, patrné z obr. 7a);
- ovinutím FRP materiálu (viz obr. 7b) jednosměrné lamely; 7c) obousměrná tkanina).



**obrázek 7 - Způsoby zesílení sloupů pomocí FRP materiálů**

Vzhledem k chování FRP materiálů při působení v tlaku se zesílení NSM výztuží používá především v oblasti převládajícího ohybového namáhání. Proto se uplatní zejména u sloupů s excentricky působícím zatížením, nebo u vysokých sloupů namáhaných ohybovým momentem jako důsledek jejich štíhlostního poměru. Zesílení sloupu lamelami je možné provést jako NSM výztuž působící v podélném směru proti účinkům ohybového namáhání. Případně ji lze aplikovat jako příčnou výztuž ovíjející sloup. Tento způsob zesílení je limitován tuhostí lamel a průřezem sloupu (poloměrem). Proto zde dochází ke značnému snížení účinnosti zesílení. Daleko komplexnější řešení nabízí zesílení ovinutím, které zvyšuje nejen osovou, ohybovou a smykovou únosnost, ale zajišťuje také nárůst duktility prvku. Jedná se o modifikaci zesílení hustě rozmístěné příčné ocelové výztuže. Díky variabilitě zesílení (možnostem lokálního či celoplošného zesílení, vrstvením FRP tkanin, vhodnou orientací nosných vláken), rychlosti provádění a účinnosti této metody se v určitých aplikacích jeví jako vhodná alternativa ke klasickým způsobům.

Společné pro všechny způsoby zesílení je jeho provedení, které vyžaduje předpřípravu povrchu zesilovaného sloupu (odstranění nesoudržných vrstev a vyrovnání povrchu), aplikaci samotné zesilující vrstvy a následné provedení ochranné vrstvy. Ta zajišťuje funkčnost zesílení z hlediska požadované životnosti a trvanlivosti (např. krycí vrstva betonu), přičemž funkčnost samotného zesílení je podmíněna spolupůsobením původního a nového materiálu. Účinnost zesílení se odvíjí od kvality jeho provedení.

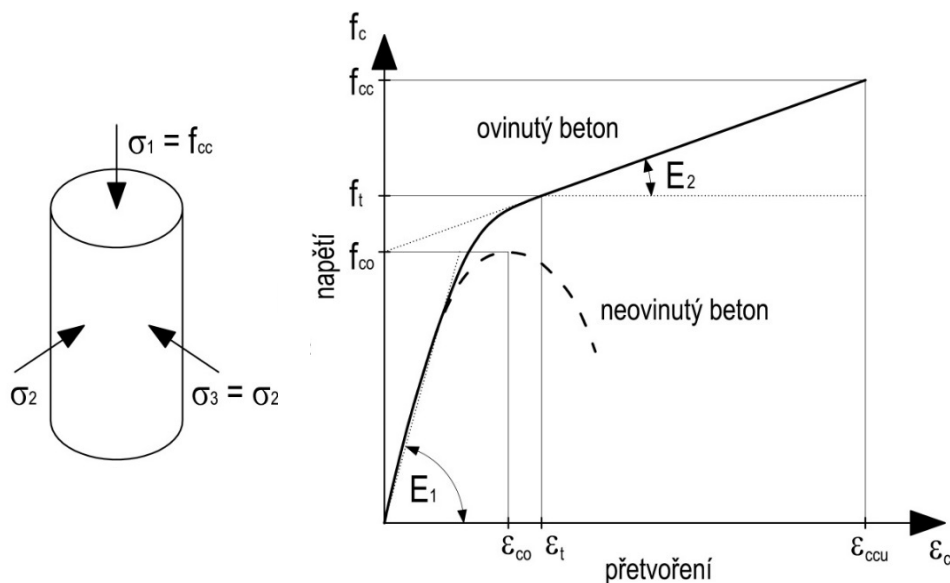
I přes nesporné výhody a znalost těchto progresivních kompozitních materiálů, jejichž počátky spadají do oblastí leteckého a automobilového průmyslu, se prvotní aplikace zesílení datuje do osmdesátých let minulého století. Zde byly FRP materiály použity při zesílení sloupů a primárně sloužily k zajištění jejich seismické odolnosti [8], [17], [27], [38] a [46]. Jejich rozšíření do stavební praxe bránila především neznalost vlastností těchto nově vyvinutých materiálů z hlediska krátkodobého i dlouhodobého působení a také nedostatečný sortiment FRP produktů. Probíhající výzkum však řadu z neznámých postupně odboural. Vzhledem k zaměření práce bude dále pojednáno pouze o zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou.

### **3.4. Zesílení ovinutím**

#### **3.4.1. Princip působení ovinutí FRP tkaninou na betonový průřez**

Správné provedení zesílení ovinutím podstatným způsobem mění chování zesilovaného prvku, u kterého dochází ke zvýšení jeho únosnosti a duktility. Změna chování je podmíněna vznikem trojosého stavu napjatosti. V závislosti na aktivaci ovinutí sloup postupně přechází z jednoose namáhaného průřezu na průřez působící v režimu víceose napjatosti. S uvážením základních fyzikálně mechanických principů je zřejmé, že při osovém zatížení prvku dochází k jeho svislé a také k příčné deformaci, která je úměrná velikosti Poissonova součinitele. U nezesíleného prvku vznik svislých trhlin rozděluje průřez na několik samostatně působících částí, které determinují jeho tlakovou únosnost. U ovinutého prvku je v důsledku omezení příčné deformace oddálen vznik a následný rozvoj těchto trhlin. Průřez prvku působí jako „celistvý“ (průřez účinně ovinutého jádra) až do selhání zesilující vrstvy ovinutí. Ta je vlivem příčné deformace prvku tažena a působí na průřez příčným tlakem. Tento stav lze popsat trojosou napjatostí. Velikost příčného tlaku ovinutí bránící příčné deformaci je při zanedbání kvality provedení závislá na tuhosti ovinutí a přímo úměrná velikosti příčných deformací. Výsledkem je zlepšení mechanických vlastností materiálu ovinutého prvku, které je zobrazeno na pracovním diagramu ovinutého betonu s bilineárním průběhem (viz obr. 8, uvažováno dle [38]).





**obrázek 8** - Pracovní diagram ovinutého betonu s tahovým zpevněním, [38]

Pracovní diagram ovinutého betonu je možné rozdělit do dvou, resp. tří specifických částí. V počáteční fázi, oblasti platnosti Hookova zákona, se betonový průřez chová lineárně pružně. Vzhledem k tuhosti ovinutí vykazují v této části diagramu nezesílený i ovinutý prvek takřka shodné chování (viz např. [40]). Příčná deformace průřezu nepostačuje na aktivaci ovinutí. Z tohoto důvodu dosahuje příčný tlak velmi nízkých hodnot, zesílení ještě není aktivní a průřez se tak vyskytuje ve fázi jednoosého namáhání (charakterizováno sklonem lineární části pracovního diagramu udaného sečnovým modulem pružnosti betonu  $E_1$ ).

Druhá část, označovaná jako přechodová oblast nebo také jako přechodový bod, se nachází v oblasti blízké pevnosti neovinutého betonu v tlaku  $f_{co}$  (dáno odpovídajícím přetvořením betonu  $\epsilon_{co}$ ), resp. je charakterizována přechodovým bodem (daný pevností betonu  $f_t$  a odpovídajícím přetvořením  $\epsilon_t$ ). V této fázi dochází u betonového průřezu ke vzniku a rozvoji trhlin a také k aktivaci ovinutí. Výsledkem je patrná změna chování mezi neovinutým a ovinutým betonem, resp. mezi nezesíleným a ovinutým (zesíleným) sloupem. Zatímco u neovinutého betonu dojde po dosažení maximální pevnosti (charakterizované pevností betonu v tlaku  $f_{co}$  a odpovídajícím přetvořením  $\epsilon_{co}$ ) k výraznému rozvoji trhlin, který v konečném důsledku vede ke kolapsu prvku. U ovinutého betonu se vlivem rozvoje trhlin zvyšuje spolu s narůstající příčnou deformací i příčný tlak. Výsledkem je přechod prvku z fáze jednoosého namáhání do fáze víceosé napjatosti, který umožňuje nárůst pevnosti i přetvoření ovinutého betonu. Značný nárůst příčného přetvoření nekoresponduje s materiálovou konstantou Poissonova součinitele pro neovinutý beton  $\nu_o = 0,2$  [3], [6], [22], [29].

Pro výpočet přechodového bodu lze použít vztahy (uvedené v [33], [38]):

$$\varepsilon_t = \frac{2f_{co}}{E_c - E_2}, \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\varepsilon_{ccu}}. \quad (9)$$

Symbyly v předchozích vztazích jsou vysvětleny na obr. 8 a níže v textu.

Poslední část pracovního diagramu je stejně jako první část lineární, přičemž její sklon určuje tuhost zesílení, resp. úroveň příčného ovinutí (charakterizovaná modulem pružnosti tkaniny  $E_2$ ). Ovinutí je již plně aktivováno a betonový prvek se nachází ve fázi trojosé napjatosti – ovinutý beton. Dochází ke značnému nárůstu tlakové pevnosti ovinutého betonu ( $f_{cc}$ ) a také ke zvýšení jeho mezního přetvoření ( $\varepsilon_{ccu}$ ). Náhlé, křehké porušení ovinutého betonu souvisí s vyčerpáním tahové pevnosti ovíjející vrstvy, která tak determinuje kolaps ovinutého sloupu (dosaženo přetvoření při přetržení laminátu FRP tkaniny). Poměr mezi osovým a příčným přetvořením již není konstantní, ale mění se v závislosti na úrovni ovinutí. Počáteční hodnota Poissonova součinitele  $\nu_o$  platí v rozsahu nízkých deformací (neovinutý beton). Ovinutí, které účinně brání rozpadu průřezu a umožňuje tak nárůst deformací, vede ke vzniku a následnému rozvoji trhlin bez dosažení kolapsu. Vlivem zvyšování příčného tlaku dochází k proporcionálnímu nárůstu příčného přetvoření, které se se vzrůstající tlakovou pevností ustálí na své maximální hodnotě [3], [32].

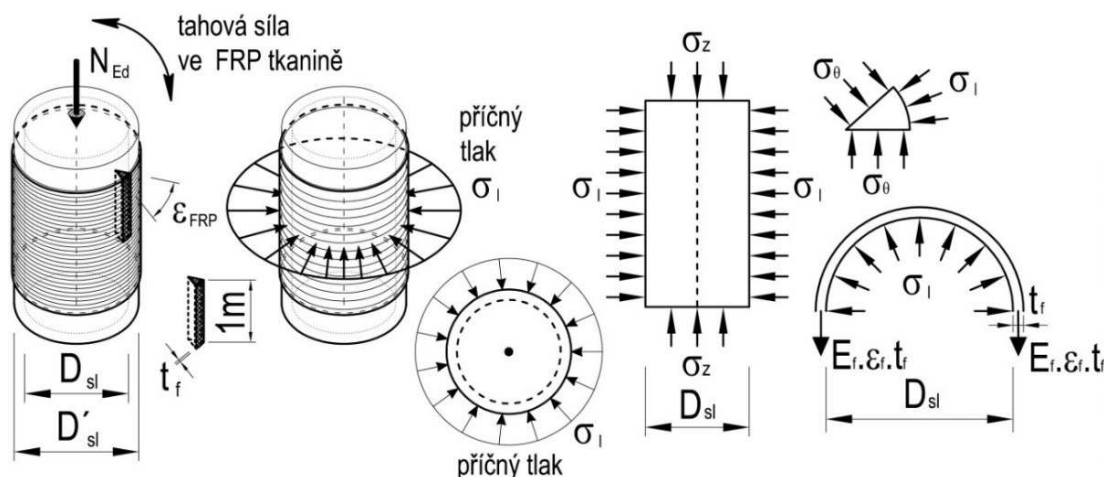
Zesílení ovinutím tak zvyšuje nejen únosnost sloupu a jeho duktilitu, ale mění i způsob jeho porušení. Tahová pevnost zesilujícího materiálu limituje velikost příčného tlaku, který spolu s tuhostí ovinutí ovlivňuje konečný účinek zesílení. S rostoucími hodnotami těchto parametrů vzrůstá příčný tlak, resp. vznik trojosého stavu napjatosti, jehož důsledkem je zvýšení únosnosti průřezu a zvýšení jeho duktility.

### 3.4.2. Příčný tlak ovinutí

Změna vlastností ovinutého betonu je podmíněna působením prvku ve stavu trojosé napjatosti. Přejít ovinutého prvku z jednoosého do trojosého namáhání závisí na vyvození příčného tlaku a na jeho velikosti. Jeho vznik je následkem příčného přetváření prvku vlivem aplikace zatížení, kterému brání zesilující vrstva ovinutí. Příčná deformace prvku napíná ovíjející vrstvu, která působí na prvek radiální složkou napětí – příčným tlakem neboli přitlakem.

Pro sloup kruhového průřezu zesíleného plnoplošným ovinutím FRP tkaninou lze příčný tlak vyjádřit pomocí jednoho z hlavních napětí popisujících trojosý stav napjatosti. Při zohlednění symetrie úlohy a přijetím zjednodušujících předpokladů (viz obr. 9) je možné jej vyjádřit pomocí rovnice (10). Uvažované zjednodušující předpoklady jsou:

- materiál je lineárně pružný (platnost Hookova zákona);
- poměrná přetvoření jsou malá;
- vzhledem k rotační symetrii prvku nemůže dojít ke zkosení (smykové složky napětí jsou nulové);
- platnost Saint-Venantova principu lokálnosti, kdy se lokální charakter zatížení projevuje jen v jeho blízkém okolí;
- předpoklad dokonalé soudržnosti mezi ovíjeným a ovíjejícím materiálem umožňující přenos zatížení a jeho rovnoměrného rozložení.



**obrázek 9 - Princip působení ovinutí – příčný tlak**

Potom je příčné (radiální) tlakové namáhání možné vyjádřit vztahem [2] :

$$\sigma_l = \frac{2 \cdot \sigma_\theta \cdot t_f}{D_{sl}} = \frac{2 \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot t_f}{D_{sl}}, \quad (10)$$

kde symboly označují vlastnosti zesilujícího materiálu a geometrii zesilovaného prvku:

$D_{sl}$  průměr zesilovaného sloupu;

$E_f$  modul pružnosti tkaniny;

$t_f$  tloušťku vrstvy tkaniny;

$\varepsilon_f$  přetvoření tkaniny.

Díky lineárnímu chování zesilujícího materiálu (FRP tkaniny) je velikost přítlaku přímo úměrná obvodovému tahovému napětí  $\sigma_\theta$  a nepřímo úměrná průměru zesilovaného kruhového sloupu. Obvodové tahové napětí ve FRP tkanině popisuje vztah:

$$\sigma_\theta = E_f \cdot \varepsilon_f. \quad (11)$$

### 3.4.3. Faktory ovlivňující výsledný účinek ovinutí

Účinnost zesílení ovinutím závisí na velikosti příčného tlaku, tj. na schopnosti ovinutí vzdorovat tahovým silám vyvolaným příčným přetvořením zesilovaného sloupu. Velikost příčného tlaku je při zajištění dokonalé soudržnosti zesilujícího materiálu ovlivněna parametry ovíječícího materiálu (tahová pevnost, modul pružnosti), parametry zesilovaného prvku (tvar průřezu) a způsobem jeho namáhání (centrický tlak, případně kombinace tlaku a tahu v důsledku působení ohybového momentu). Společně s kvalitou provedení se jedná o souhrn faktorů, které musí být zohledněny při návrhu ovinutí (často zavedením redukčních součinitelů). Tyto faktory tak spolu se základními principy ovinutí definují použitelnost metody zesilování ovinutím.

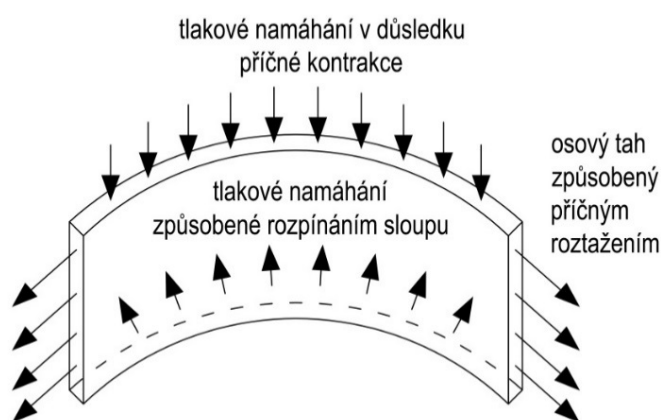
#### Limitující faktory dané parametry ovinutí

Volba materiálu ovinutí determinuje návrh a způsob zesílení, náročnost jeho provedení, a především rozhoduje o výsledném účinku zesílení. Díky vysoké tahové pevnosti a značné přetvárnosti laminátu FRP tkaniny je možné dosáhnout velmi vysoké hodnoty příčného tlaku. Příznivě působí i lineární chování FRP laminátu, které podmiňuje konstantní nárůst příčného tlaku [46]. Účinnost zesílení ovinutím je teoreticky maximalizována a limitují jí vlastnosti laminátu FRP tkaniny (tahová pevnost a přetvoření při přetržení FRP tkaniny). Ve skutečnosti ovšem při zesílení ovinutím nelze uvažovat s charakteristikami laminátu FRP tkaniny získanými z tahových zkoušek [18]. Oproti čistému tahu při tahové zkoušce dochází při ovinutí k odlišnému napjatostnímu stavu (patrné z obr. 10), který redukuje zmiňované vlastnosti. Míru využití FRP tkaniny vyjadřuje efektivní součinitel přetvoření  $\beta$ , který je popsán vztahem

$$\beta = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{f,rup}}, \quad (12)$$

kde  $\varepsilon_{f,rup}$  přetvoření laminátu FRP tkaniny při přetržení při namáhání čistým tahem.

Míra redukce souvisí se zaoblením vláken tkaniny (v závislosti na průřezu prvku), s rozměry při vícevrstvé aplikaci a také s kvalitou provedení [4], [9], [11], [15]. Další redukce je spojená s tzv. aktivací ovinutí, kdy je určitá část příčného přetvoření zesilovaného prvku spotřebována na narovnání vláken tkaniny. Tento negativní jev se projevuje i přes zajištění nezbytného spolupůsobení povrchu sloupu a aplikované vrstvy FRP tkaniny. Projevuje se shodným průběhem pracovního diagramu neovinutého a ovinutého betonu v oblasti nízkých přetvoření a faktickou účinností systému až od jisté hodnoty přetvoření. V závislosti na uvedených vlivech lze nalézt různé hodnoty efektivního součinitele (např. v rozmezí 50 – 80 %  $\varepsilon_{f,rupt}$  dle [3], [38]).



**obrázek 10** - Trojosý stav napjatosti fragmentu FRP tkaniny při ovinutí

Redukce způsobená aktivací systému je charakteristická pro pasivní způsob zesílení, u kterého je velikost příčného napětí závislá přímo na přetvoření sloupu v příčném směru. Pro správný návrh je nutné stanovit počáteční stav prvku před zesílením. Ten je definován napjatostním stavem vyvolaným působením vlastní tíhy a dalším stálým, většinou neodstranitelným, zatížením, kdy je část přetvoření již vyčerpána. K aktivaci zesílení dochází teprve po přetížení prvku.

Nedostatek aktivace systému až po přetížení může být odstraněn predepnutím tkaniny během provádění zesílení, tzv. aktivní způsob zesílení. Tkanina je při aplikaci natahována a po provedení zesílení a vytvrzení lepidla vnáší příčný tlak do zesilovaného prvku bez nutnosti aplikace dalšího zatížení. Vhodnějším využitím FRP tkaniny při aktivním zesílení zvyšuje účinnost ovinutí, tj. dochází ke zvýšení pevnosti a duktility ovinutého betonu. Také oproti pasivní variantě v rané fázi zesílení poskytuje tužší chování a oddaluje vznik trhlin (není tak závislá na příčném přetvoření zesilovaného prvku). Nevýhodou

aktivního způsobu zesílení je nutnost automatizace (napínání a celý proces ovinutí probíhá pomocí stroje), což zvyšuje požadavky na prostor a finanční náročnost [46].

Velikost příčného napětí a tím i výsledný efekt ovinutí jsou ovlivněny také jeho tuhostí  $K_{konf}$ , v tomto případě tuhostí tkaniny, která vyjadřuje citlivost ovinutí na příčné přetvoření. S rostoucí tuhostí ovinutí dochází k rychlejší aktivaci zesílení a k rychlejšímu nárůstu příčného tlaku (projevuje se změnou sklonu třetí části pracovního diagramu ovinutého betonu – tzv. tuhé nebo také silné ovinutí). Pokud není zajištěna dostatečná tuhost ovinutí, budou generovány pouze nízké hodnoty příčného napětí a účinek ovinutí bude zanedbatelný. Ovinutý beton se v takovém případě bude chovat obdobně jako neovinitý (tzv. pružné nebo také slabé ovinutí) [22]. Stupeň ovinutí je možné ovlivnit počtem aplikovaných vrstev FRP tkaniny. Při zohlednění tuhosti ovinutí je příčné napětí možné vyjádřit následovně (převzato z [46]):

$$\sigma_2 = \sigma_l = K_{konf} \cdot k_e \cdot \varepsilon_f, \quad (13)$$

$$K_{konf} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f, \quad (14)$$

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f}{D_{sl}}. \quad (15)$$

Symbole použité v předchozích vztazích značí:

$k_e$  součinitel zohledňující účinnost ovinutí z hlediska jeho provedení;

$k_{konf}$  tuhost ovinutí (tuhost tkaniny);

$\rho_f$  stupeň vyztužení (pro kruhový sloup je vyjádřen vztahem (15) dle [46]).

Další omezení účinnosti ovinutí iniciují způsob zesílení a orientace vláken tkaniny. Způsob zesílení, ve smyslu rozdílného chování v případě celoplošného a lokálního ovinutí (viz obrázek 11), se zohledňuje zavedením součinitele účinnosti  $k_e$  do výpočtu příčného napětí. Ten je pro sloup kruhového průřezu dle [46] vyjádřen vztahem

$$k_e = \frac{A_{ef}}{A_{cc}} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{sl} - \frac{s'}{2}\right)^2}{A_c - \left(1 - \frac{A_s}{A_c}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D_{sl}}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_c}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D_{sl}}\right)^2, \quad (16)$$

kde jednotlivé symboly značí:

$A_c$  průřezová plocha betonu sloupu včetně započítání podélné výztuže;

$A_{cc}$  průřezová plocha betonu po odečtení plochy výztuže,  $A_{cc} = A_c - A_s$ ;

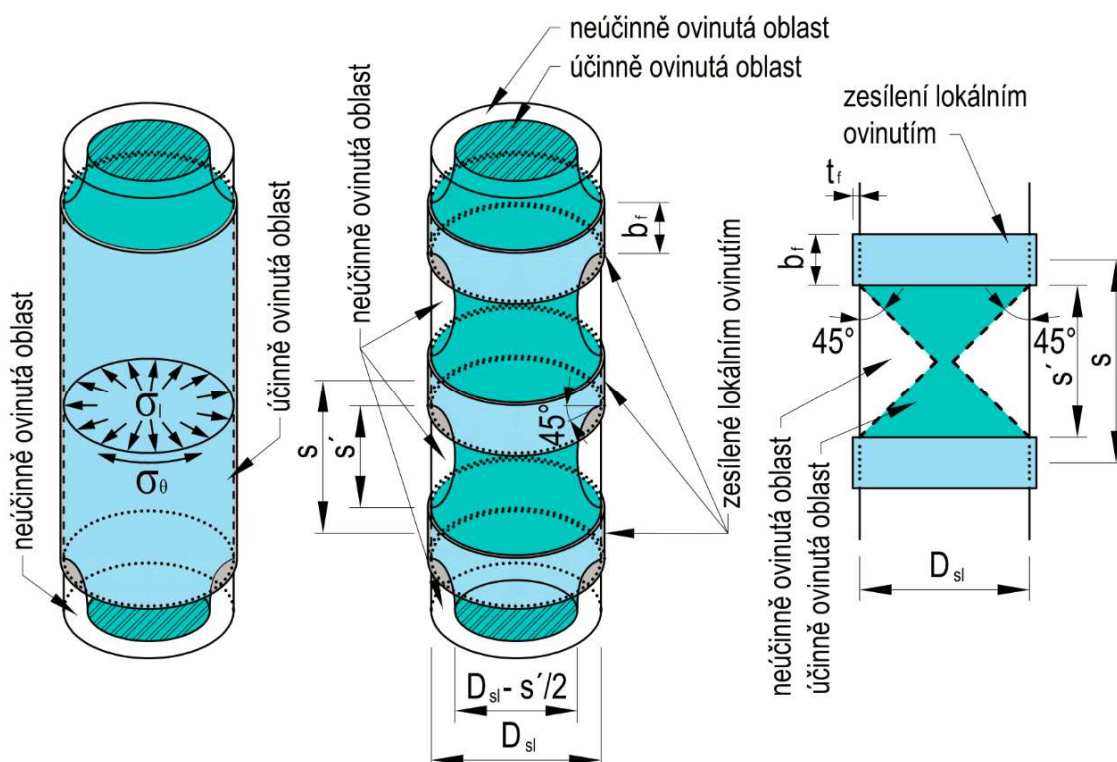
$A_{ef}$  účinně ovinutá plocha betonu mezi dvěma pásy tkaniny;

$A_s$  plocha podélné výztuže sloupu;

$b_f$  šířka pásu tkaniny;

$s'$  světlá vzdálenost mezi pásy tkaniny,  $s' = s - b_f$ .

Rozdíl mezi celoplošným a lokálním zesílením je v účinně ovinuté ploše průřezu. U celoplošného zesílení dochází k rovnoměrnému působení příčného napětí v celém betonovém průřezu po celé zesílené ploše, zatímco u lokální aplikace pásů tkaniny vlivem rozdělení příčného napětí mezi zesílenou a nezesílenou částí sloupu postupně dochází ke snížení účinně ovinutého průřezu (viz obr. 11). Příčné napětí se rozděluje na základě klenbového efektu mezi ovinutými částmi sloupu pod úhlem  $45^\circ$ . V závislosti na vzdálenosti pásů tkaniny nabývá součinitel  $k_e$  různých hodnot, pro plnoplošně ovinuté kruhové sloupy je  $k_e = 1$ , pro lokální ovinutí je pak  $k_e < 1$  [46].



obrázek 11 - Závislost účinnosti ovinutí na způsobu zesílení – plnoplošné a lokální ovinutí

S orientací vláken souvisí míra jejich využití. Pokud nejsou vlákna tkaniny orientovaná přímo ve směru namáhání, ale například v důsledku kontinuálního ovinutí dochází k jejich odklonu pod úhlem daným stoupáním šroubovice, klesá s rostoucím úhlem odklonu jejich schopnost bránit příčné deformaci betonu. Odklon vláken způsobí méně příznivé rozdělení napětí mezi složky osového tahu, tlakového namáhání v příčném směru a smykového namáhání. Vliv orientace vláken lze zohlednit obdobně jako u předchozích vlivů zavedením redukčního součinitele účinnosti ovinutí  $k_e$  dle vztahu [46]

$$k_e = \frac{\sigma_{l,h}}{\sigma_{l,c}} = \left[ 1 + \left( \frac{p}{\pi \cdot D_{sl}} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (17)$$

Symbole použité v předchozích vztazích značí:

$p$  stoupání šroubovice;

$r$  poloměr ovinutí;

$R$  zakřivení tkaniny ve tvaru šroubovice,  $R \approx k^2 \cdot r^2 / r$ ;

$\sigma_{l,c}$  příčný tlak ovinutí na jednotku šířky pro kruhový sloup,  $\sigma_{l,c} = N_f / b_f \cdot r$ ;

$\sigma_{l,h}$  tahové napětí ve vláknech tkaniny,  $\sigma_{l,h} = N_f / b_f \cdot R$ .

#### Limitující faktory dané parametry zesilovaného sloupu

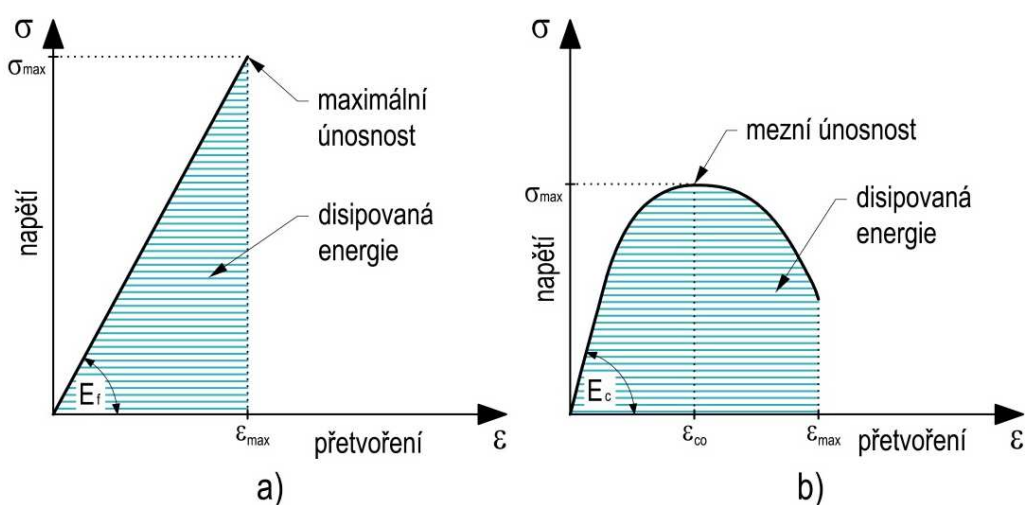
Obdobně jako materiál ovinutí má na účinnost ovinutí vliv i materiálové složení zesilovaného prvku (železobeton). Pro maximalizaci účinku ovinutí je důležitá jak pevnost, tak i duktilita betonu. Obě tyto veličiny přímo vstupují do vztahů pro výpočet charakteristik ovinutého betonu (viz např. [17], [20]) a rozhodují tak o výsledném efektu ovinutí. Obecně je proto nutné před zesilováním zjistit aktuální stav zesilovaného prvku (použité materiály a jejich charakteristiky, vyztužení, způsob namáhání apod.) a na základě toho volit způsob zesílení. Obvykle se zvyšující pevností betonu klesá jeho duktilita [43], proto nelze počítat s konstantním nárůstem osové i ohybové únosnosti v závislosti na vzrůstající pevnosti betonu v tlaku (patrně zejména u vysokopevnostních betonů [14]). Účinnost zesílení sloupu ovinutím se tak se vzrůstající pevností betonu snižuje [21].

Funkčnost ovinutí je podmíněna dostatečnou duktilitou zesíleného prvku, která umožní plné využití vlastností FRP tkaniny a tím pádem i dosažení maximálního příčného tlaku.



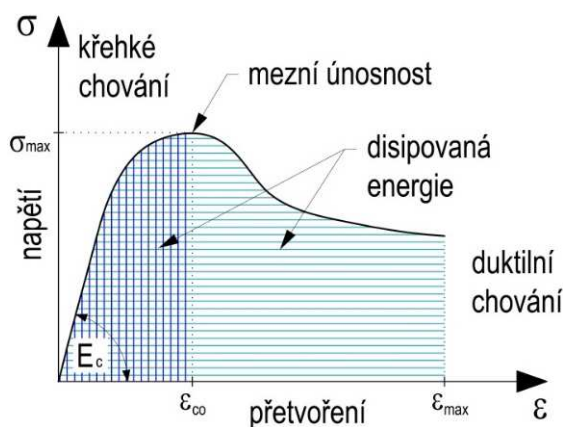
Účinné ovinutí umožňuje betonu přenášet zatížení, resp. distribuovat napětí, do dalších částí i přes jeho plastickou deformaci, aniž by došlo k selhání prvku.

Použití duktilního materiálu je z hlediska návrhu a posouzení žádoucí také z důvodu varování před kolapsem. Oproti křehkým materiálům, které selhávají náhle a bez výraznějšího varování (vykazují malé deformace), u konstrukcí z duktilních materiálů dochází k nadměrným deformacím a výskytu trhlin. Rozdíly v chování jsou pozorovatelné na pracovních diagramech těchto materiálů (viz obr. 12), kde křehké chování reprezentuje FRP tkanina a duktilní chování betonu (znatelný rozdíl ve schopnosti absorpce disipované potenciální energie).



**obrázek 12** - Pracovní diagram a) lineárně pružný křehký materiál; b) duktilní materiál

Pro lepší představu je rozdíl mezi křehkým a duktilním chováním zobrazen na pracovním diagramu obecného materiálu.

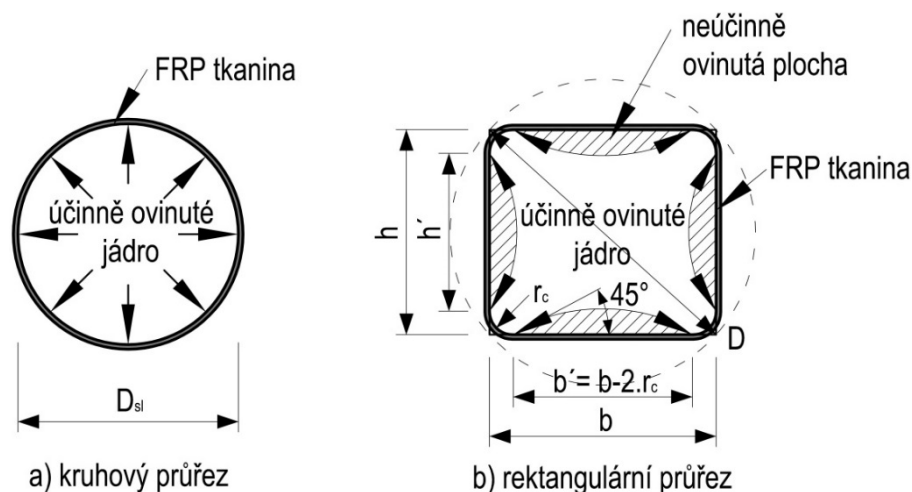


**obrázek 13** - Rozdíl v disipované energii křehkého a duktilního materiálu

I přes použití křehkého materiálu pro ovinutí provedené experimentální práce poukazují na značnou deformaci ovinutých sloupů před jejich kolapsem [29]. Díky trojosému stavu napjatosti je totiž umožněno značně duktilní chování zesíleného prvku.

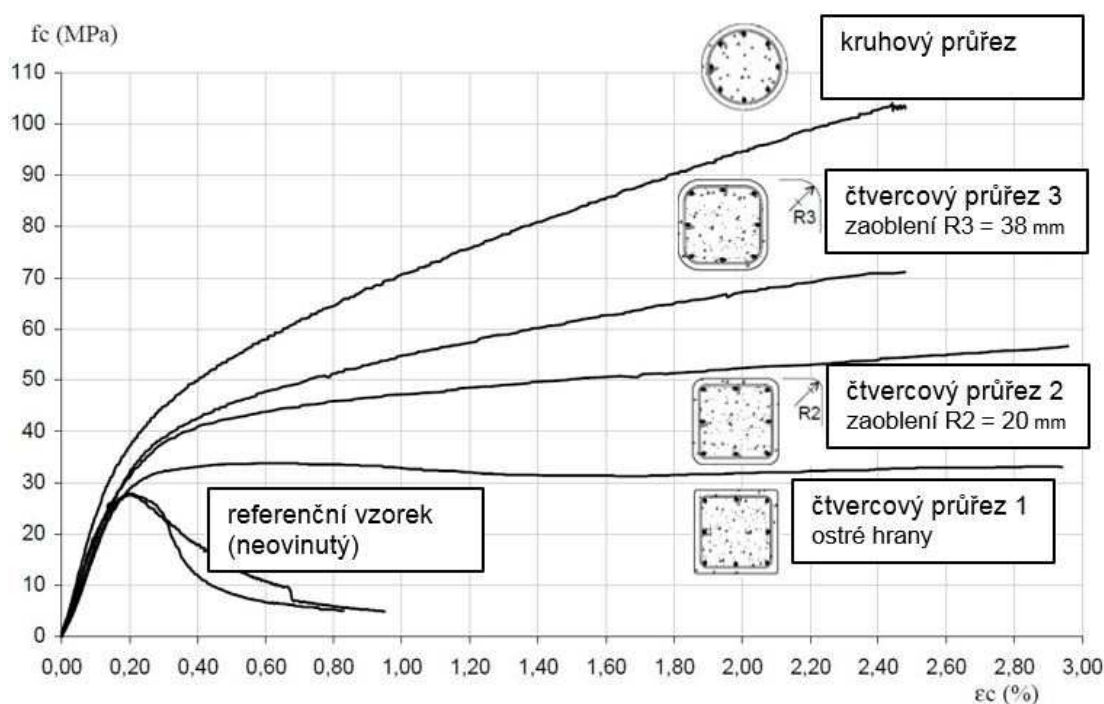
Mezi další faktory ovlivňujícími výsledný efekt ovinutí patří tvar průřezu, rozměry prvku (s rostoucím průměrem klesá výsledný účinek ovinutí), štíhlostní poměr a povrch prvku, který musí zajistit přenos příčných deformací mezi zesilovaným prvkem a materiálem ovinutí (zajistit spolupůsobení s FRP tkaninou). Při nedostatečné soudržnosti těchto vrstev dochází k rozdílnému přetvoření zesilovaného a ovíjejícího materiálu a tím i k redukci účinku ovinutí.

Nejvhodnější tvar pro zesílení ovinutím představuje kruhový průřez, u kterého při centrickém zatížení dochází k rovnoměrnému působení příčného tlaku po obvodu sloupu. U ostatních průřezů dochází v místech změny tvaru průřezu ke koncentraci příčného tlaku, který zapříčiní vznik neúčinně ovinutých částí průřezu (viz obr. 14). To vede ke snížení efektu ovinutí od kruhových, přes eliptické až po pravoúhlé průřezy s ostrými hranami, kde je účinnost ovinutí nejmenší [33]. Zaoblením hran průřezu lze dosáhnout efektivnějšího rozložení příčného napětí, které ve výsledku způsobí vyšší míru ovinutí.



**obrázek 14** - Rozložení příčného napětí v závislosti na tvaru průřezu sloupu

Vliv tvaru průřezu je patrný z průběhu pracovních diagramů ovinutých sloupů různého průřezu se stejnou průřezovou plochou, vyztužením i ovinutím (obr. 15; kruhový průřez, čtvercový průřez 3 se zaoblením hran 38 mm, čtvercový průřez 2 se zaoblením hran 20 mm a čtvercový průřez 1 s ostrými hranami; převzato z [5]). Podobné závěry prezentují i další práce jako např. [12], [21].



**obrázek 15** - Pracovní diagramy ovinutých sloupů s vlivem tvaru průřezu (převzato z [5])  
znázorňující pevnost betonu v tlaku v závislosti na osovém přetvoření

Vliv rozdělení příčného napětí v závislosti na tvaru průřezu se zohledňuje zavedením redukčního součinitele, který se určí na základě velikosti efektivně ovinutého jádra a poměru stran průřezu  $h/b$ . Jeho značení i matematické vyjádření se liší v závislosti na přístupu jednotlivých autorů. Literatura [46] u rektangulárních tvarů průřezu uvažuje roznos příčného napětí pod úhlem  $45^\circ$ , na jehož základě dopočítává efektivně ovinutou plochu. Na základě tohoto součinitele účinnosti  $k_e$  vyjadřuje vztahem

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3A_c \cdot (1 - \rho_s)}, \quad (18)$$

kde použité symboly značí:

$A_c$  plocha betonového průřezu;

$b'$ ,  $h'$  rozměry neúčinně ovinuté plochy;

$\rho_s$  stupeň vyztužení podélnou betonářskou výztuží.

Literatura [38] stanovuje velikost příčného napětí na základě ekvivalentní plochy kruhového průřezu o poloměru  $D$ , který je daný uhlopříčkou rektangulárního průřezu. Potom je vliv průřezu zohledněn součiniteli  $\kappa_a$  a  $\kappa_b$ , které jsou popsány rovnicemi (19) a (20).

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2, \quad (19)$$

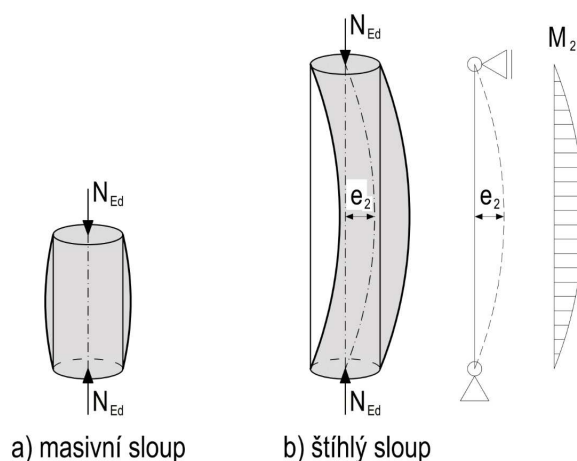
$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0,5}. \quad (20)$$

Použité symboly ve vztazích značí:

$A_e$  *efektivně ovinutá plocha;*

$b, h$  *rozměry průřezu.*

Dalším z limitujících faktorů zesilovaného prvku je jeho štíhlost, která v závislosti na své velikosti redukuje příčný tlak. Vlivem štíhlosti prvku dochází k namáhání průřezu nejen osovým tlakem  $N_{Ed}$ , ale i přidavným ohybovým momentem od účinků druhého řádu  $M_2$  (viz obr. 16). Konstantní tlakové napětí po výšce průřezu od působení  $N_{Ed}$ , kdy je celý průřez tlačенý, se působením  $M_2$  změní na lineární s převládajícím tlakem na jedné straně průřezu. Výsledkem tohoto namáhání je nerovnoměrné rozdělení příčného tlaku po obvodu zesilovaného prvku, což vede ke snížení účinnosti ovinutí. S rostoucí štíhlostí sloupu vzrůstá  $M_2$ , což se projevuje vyšším poklesem výsledného účinku ovinutí. Podle štíhlosti se sloupy dělí na masivní a štíhlé prvky, přičemž negativní vliv  $M_2$  se projevuje zejména u štíhlých sloupů. U těchto při aplikaci  $N_{Ed}$  dochází k deformaci, jež způsobuje přidavné namáhání – ohybový moment  $M_2$  (tzv. účinek II. řádu).



**obrázek 16** - Vliv štíhlosti sloupu: a) masivní prvek b) štíhlý prvek vč. ohybového momentu od účinků II. řádu

Podle [43] lze účinky II. řádu u železobetonových sloupů při splnění podmínky limitního štíhlostního poměru zanedbat. Takové prvky se označují jako masivní. Stanovení účinků II. řádu, tj. zvýšení ohybového namáhání v důsledku deformace sloupu lze provést

různými způsoby (viz např. [16], [29] a [43]). U sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou není vliv štíhlosti v návrhu zohledněn. Předpokládá se použití stejných postupů, jako v případě nezesílených železobetonových sloupů. Toto řešení ovšem může vést ke značně neefektivnímu návrhu a v případě nadhodnocení únosnosti i ke kolapsu zesíleného sloupu.

#### Limitující faktory dané účinky zatížení

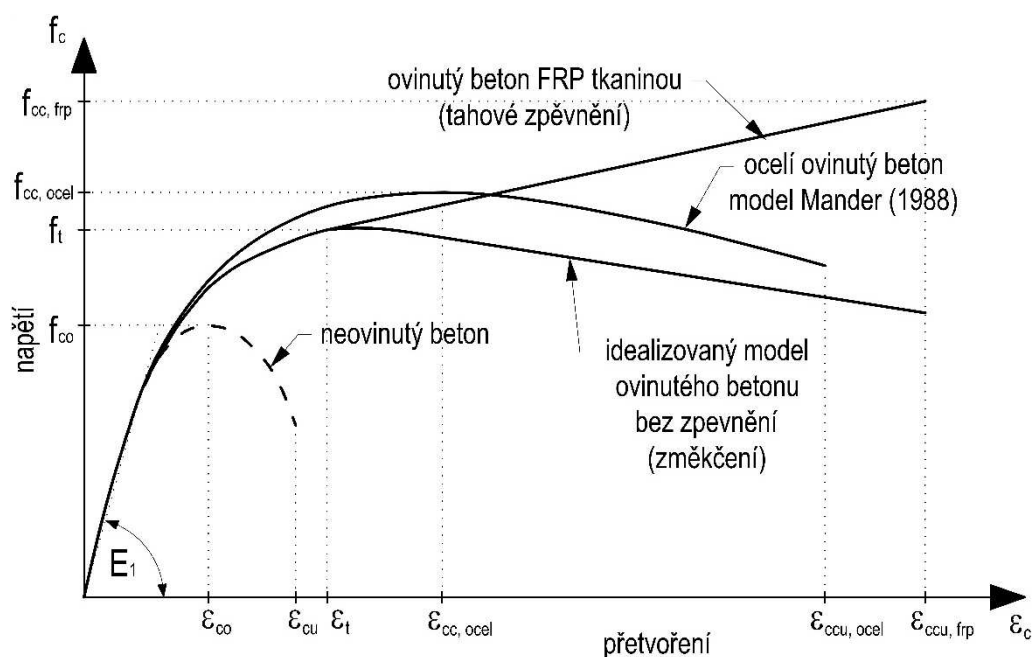
Maximální účinnost ovinutí je ideálním stavem, při kterém z hlediska namáhání působí na sloup pouze dostředná tlaková síla vyvolávající rovnoměrné rozložení příčného napětí. Ve skutečnosti v důsledku působení excentricit od konstrukčního a materiálového uspořádání, nepřesnosti provádění apod. dochází k namáhání kombinací normálové síly  $N$  a ohybového momentu  $M$ . Vliv působení kombinace namáhání  $N+M$  na účinnost ovinutí je obdobný jako v případě štíhlosti (působení přídavného ohybového momentu  $M_2$ ), kdy v důsledku nerovnoměrného rozložení napětí po průřezu dochází k eliminaci příčného tlaku. V kritickém průřezu je potom velikost příčného napětí nedostatečná, čímž dochází ke snížení únosnosti (ohybové i smykové) i duktility prvku. S rostoucím ohybovým namáháním ovinutého sloupu a se stále se zvyšující taženou částí průřezu klesá výsledný účinek ovinutí.

I přes tyto skutečnosti umožňuje zesílení ovinutím FRP tkaninou dosáhnout relativně vysoké míry příčného tlaku a v konečném důsledku i účinku zesílení. Přínosy použití FRP kompozitů v porovnání s ovinutím příčnou ocelovou výztuží jsou patrné z pracovních diagramů neovinutého a ovinutého betonu znázorněných na obr. 17<sup>4</sup>. Z jejich průběhu je patrný rozdíl v chování jednoose namáhaného prvku a prvku nacházejícího se ve stavu trojosé napjatosti. Odlišný průběh pracovních diagramů betonů ovinutého FRP tkaninou a ocelí reflektuje vlastnosti obou zesilujících materiálů. Díky vysokému modulu pružnosti oceli je toto ovinutí citlivější na změny příčných přetvoření a při zanedbání kvality provedení se aktivuje již při nízkých hodnotách zatížení. Na druhou stranu po dosažení meze kluzu oceli již nedochází k nárůstu napětí (dochází k tečení oceli) a příčný tlak vyvinutý ovinutím

---

<sup>4</sup> Jde o obecné znázornění pracovních diagramů ovinutého betonu, které má poukázat na rozdíly plynoucí z vlastností materiálů použitých pro ovinutí. Nelze z tohoto zobrazení usuzovat na výhodnost některého z prezentovaných způsobů zesílení.

tak zůstává konstantní. V případě ovinutí FRP tkaninou po jeho aktivaci dochází k lineárnímu nárůstu pevnosti až do porušení (bilineární pracovní diagram).



**obrázek 17** - Porovnání pracovních diagramů ovinutého betonu (ocelí; FRP tkaninou) [20]

Cílem kapitoly bylo poukázat na složitost stanovení výsledného účinku ovinutí, resp. vyčíslení velikosti příčného tlaku. Další vlivy zohledňující dlouhodobé vlastnosti materiálů (např. dotvarování, relaxace apod.) a účinky dynamického a cyklického zatížení nejsou v této části práce popsány. Byly vybrány pouze faktory relevantní pro cíle práce – vliv působení FRP tkaniny v různých intenzitách zatížení – postupná aktivace FRP tkaniny, vliv štíhlosti. Tyto faktory budou blíže rozebrány dále v práci v kapitolách 5 a 6.

## 4. PŘEHLED OBDOBNÉ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Obecně lze únosnost sloupů stanovit pomocí interakčního diagramu, tj. pomocí grafického znázornění únosnosti průřezu sloupu dané množinou bodů vyjádřených kombinací normálové síly  $N_{Rd}$  a ohybového momentu  $M_{Rd}$ . Každý z bodů reprezentuje stádium působení průřezu od zcela tlačného až po tažený, při kterém jednotlivé body nabývají svých hodnot v závislosti na využití zastoupených materiálů (beton, ocel, FRP tkanina). Výsledná únosnost je dána vlastnostmi materiálů a jejich pracovními diagramy. Pro výstižné určení únosnosti železobetonového sloupu zesíleného ovinutím FRP tkaninou je tedy nezbytně nutné definovat výsledné vlastnosti ovinutého betonu (pevnost ovinutého

betonu v tlaku  $f_{cc}$  a odpovídající mezní přetvoření  $\varepsilon_{ccu}$ ) a jejich vývoj v závislosti na zatížení, resp. deformaci, a definovat tak pracovní diagram ovinutého betonu.

Cílem výzkumů prováděných v oblasti zesilování ovinutím je popis chování ovinutých sloupů působících ve víceosé napjatosti pomocí pracovního diagramu ovinutého betonu. První pokusy o vytvoření návrhového modelu, který by prostřednictvím matematických vztahů dostatečně výstižně predikoval chování ovinutých sloupů, spadají do dvacátých let dvacátého století. Původní výpočtové modely jsou odvozeny pro beton ovinutý ocelovou výztuží. S příchodem nekovových kompozitních materiálů na počátku osmdesátých let dvacátého století vyvstala potřeba modifikace původních modelů, u kterých byl materiál oceli nahrazen FRP kompozity. Tyto modely ovšem nedosahovaly uspokojivé přesnosti (na tuto skutečnost poukázali práce Nammi a Bradford 1995, Samaan a kol. 1998, Spoelstra a Monti). Nezohledňovaly odlišné chování oceli a FRP kompozitu, nedokázaly postihnout interakční fázi mezi FRP ovinutím a betonem, a také nezahrnovaly negativní vlivy ovinutí popsané v kapitole 3.4.3. Zpřesnění predikce chování ovinutých sloupů umožnil nástup výpočetní techniky, kdy bylo možné pomocí numerického modelování (např. metodou konečných prvků) simulovat reálné zatěžovací zkoušky. Intenzivní výzkum probíhal zejména v USA, Japonsku a Kanadě, který vedl k vytvoření řady návrhových předpisů umožňujících použití FRP kompozitů v praxi. Pro názornost je níže uveden stručný historický vývoj v oblasti výzkumu ovinutí pomocí FRP materiálů (čerpáno např. z [10], [25] aj.):

- *Richart a kol. (1928)* - první experimentální práce na železobetonových sloupech kruhového průřezu betonovaných do ocelové trubky (ocelová obruč). Definice ovinutého betonu, kdy prvek působí ve stavu víceosé napjatosti, tzv. hydrostatický tlak.
- *Fardis a Khalili (1982)* – průkopníky betonu ovinutého FRP materiály (zkušební vzorky tvořily sloupy kruhového průřezu ovinuté CFRP tkaninou). Výpočtový model predikující chování ovinutého betonu odvodily od modelů Richart a kol. (1928) a Newman (1969), tj. úpravou modelů pro ovinutý beton pomocí ocelové příčné výztuže. Navržený model nepřesně stanovuje mezní přetvoření ovinutého betonu, ne zcela přesně popisuje rozdílné chování oceli a FRP materiálu.
- *Mander a kol. (1988)* – výpočtový model pro beton ovinutý pomocí ocelové výztuže (příčná výztuž v podobě třmínků či šroubovice), který byl využit při odvození řady

dalších přesnějších modelů. Do výpočtových vztahů implementuje součinitele účinnosti ovinutí, který zohledňuje rozložení příčného tlaku po průřezu zesilovaného prvku (poměr mezi plochou betonu ovinutou příčnou výztuží a plochou betonového průřezu). Rovněž rozlišuje rozdíl mezi plnoplošných a lokálních ovinutím, u kterého dochází k poklesu účinnosti ovinutí.

- *Saadatmanesh (1994)* – zabýval se výzkumem chování ovinutých sloupů jak kruhových, tak i rektangulárních průřezů. Popisoval chování lokálně ovinutých sloupů pomocí FRP pásků z uhlíkové nebo skelné tkaniny. Vycházel z matematického modelu Mander (1988), přičemž sledoval vliv pevnosti betonu, tloušťky laminované vrstvy, vzdálenosti zesilujících pásků a typu FRP materiálu.
- *Cusson a Paultre (1995)* – na základě rozsáhlé analýzy existujících výsledků vyjádřili tlakovou pevnost ovinutého betonu. Původní výpočtový model byl odvozen pro vysokopevnostní beton.
- *Karbhari a Gao (1997)* – definovali bilineární chování betonu ovinutého FRP tkaninou, kdy první část pracovního diagramu se nachází v oblasti lineárního chování a její průběh je shodný s nezesíleným betonem, a druhá část je popsána přírůstkem napětí od účinků ovinutí FRP materiálem. Model zohledňuje úroveň dosaženého přitlaku ve FRP tkanině.
- *Harmon a kol. (1998)* – zkoumali vliv cyklického zatížení na účinnost ovinutí FRP tkaninou, tj. vliv únavy materiálu. Popsali chování a poruchové módy ovinutých kruhových sloupů (krátké vzorky) při cyklickém zatížení, jejichž únosnost je v porovnání s jednorázovým krátkodobým zatěžováním (monotónní zatížení) podstatně nižší. Selhání zkušebních vzorků nastalo v důsledku přetržení FRP tkaniny (neliší se od způsobu selhání vzorků vystavených krátkodobému zatěžování).
- *Miyauchi a kol. (1999)* – pomocí experimentálního programu popsali závislost zvýšení únosnosti na počtu FRP tkanin a vliv pevnosti betonu na účinnosti ovinutí (použití uhlíkové tkaniny). Zkušební vzorky tvořily krátké kruhové sloupy s různou pevností betonu a různým počtem FRP tkanin. Návrhový model vychází



z parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu. Klasifikovali vzrůstající i klesající trend pracovního diagramu a pro obě varianty navrhli výpočtové vztahy.

- *Domingo a kol. (1999)* – výpočtové modely popisující chování sloupů ovinutých FRP tkaninou zohledňují nárůst osového přetvoření v závislosti na vzrůstající tlakové pevnosti. Pro kruhové sloupy ovinuté FRP tkaninou odvodil výpočtový model založený na proměnlivosti poměru mezi podélným a příčným přetvořením (tzv. damage-based stress-strain model). Poměr přetvoření je funkcí mechanických vlastností neovinutého betonu a ovíjející FRP tkaniny, tj. tuhosti ovinutí. Ovinutí tak umožňuje rozšířit míru poškození v účinně ovinutém betonovém jádře.
- *Xiao a Wu (2000)* – výpočtový model odvodili na základě výsledků experimentálních zkoušek železobetonových sloupů ovinutých uhlíkovou tkaninou, pro který definovali bilineární průběh pracovního diagramu. Ve vztazích zohlednili vliv tlakové pevnosti neovinutého betonu a úrovně ovinutí (počet vrstev FRP tkaniny). Stanovili typický způsob porušení ovinutých sloupů zapříčiněný porušením FRP tkaniny. Poukázali na rozdíl ve velikosti přetvoření FRP tkaniny při porušení ovinutého sloupu a limitního přetvoření FRP tkaniny z tahových zkoušek, které dosahuje vyšších hodnot. Navržený model ovšem nevystihoval vznik mikrotrhlin způsobující změkčení pracovního diagramu ovinutého betonu.
- *Lam a Teng (2003)* – na základě rozsáhlé analýzy chování krátkých sloupů kruhového průřezu ovinutých FRP tkaninou (uhlíková, sklená i aramidová), získaných z experimentálních prací různých autorů, odvodili výpočtový model popsáný bilineární pracovním diagramem ovinutého betonu s přechodovou oblastí (změkčení vlivem tvorby trhlin). Slouží pro návrh ovinutí působící přednostně v příčném směru. Ve vztazích zohlednili vliv velikosti příčného tlaku, vliv tuhosti ovinutí a omezili mezní přetvoření FRP tkaniny při přetržení – zavedli součinitel účinnosti ovinutí, který vyjadřuje poměr přetvoření při přetržení ovinuté FRP tkaniny a přetvoření získané z tahových zkoušek FRP tkaniny.
- *Youssef a kol. (2007)* – návrhový pracovní diagram ovinutého betonu byl odvozen na základě výsledků experimentálních prací prováděných na sloupech kruhových i rektangulárních průřezů ovinutých uhlíkovou nebo skelnou tkaninou. Je rozdělen na tři části. První část koresponduje s průběhem pracovního diagramu neovinutého

betonu. Druhá část tvoří přechodovou oblast a popisuje změkčení prvku v důsledku vzniku mikrotrhlin (změna sklonu), v této fázi dochází k aktivaci ovinutí. Třetí část je obdobně jako první charakterizována lineárním průběhem. Ovinutí je zde plně aktivováno a v závislosti na úrovni ovinutí je sklon pozitivní nebo negativní.

- *Thapa a Yazdani (2013)* – návrhový model zahrnuje lineárně-pružné chování FRP materiálu s jeho křehkým porušením a respektuje objemové přetvoření betonu v důsledku míry jeho zatížení a také vznik a rozvoj trhlin. Při jeho tvorbě bylo využito závislosti chování ovinutého betonu na míře vyvozeného příčného tlaku (model zohledňuje degradaci tuhosti v důsledku rozvoje trhlin).
- *Wu a Jiang (2015)* – vytvořili návrhový model zohledňující úroveň ovinutí pomocí disipované energie, tzv. princip rovnováhy energie (elastická a plastická práce). Model vychází z rozsáhlé studie ovinutých sloupů kruhového průřezu v poměru výšky k průměru 2:1. Pracovní diagram ovinutého betonu se v závislosti na úrovni ovinutí dělí na diagram se zpevněním, diagram se změkčením a diagram se změkčením při rovnosti  $f_c \geq f_{cc}$ . Rozhodujícím kritériem pro volbu patřičného typu pracovního diagramu ovinutého betonu je tuhost ovinutí.

Většina provedených studií vycházela z krátkodobých zkoušek vzorků zatížených dostředným tlakem („centrický tlak“). Zkušební vzorky převážně tvořily masivní prvky s poměrem výšky k průměru či příčnému rozměru 2:1. Tato konfigurace zatěžovacích zkoušek byla volena s ohledem na sledované cíle, které v počátcích výzkumu představovaly stanovení základních charakteristik ovinutého betonu. Přesnější predikce chování ovinutých sloupů byly zkoumány ojediněle – např. [7] zkoumaly vliv excentrického zatěžení, [16] a [29] studovali chování sloupů reálné geometrie, nebo dokonce štíhlých ovinutých sloupů. Chování ovinutých sloupů bylo odvozené z osové únosnosti a nezahrnovalo řadu vlivů, jež souvisí s použitím FRP kompozitů.

#### 4.1. Klasifikace výpočtových modelů sloupů ovinutých FRP tkaninou

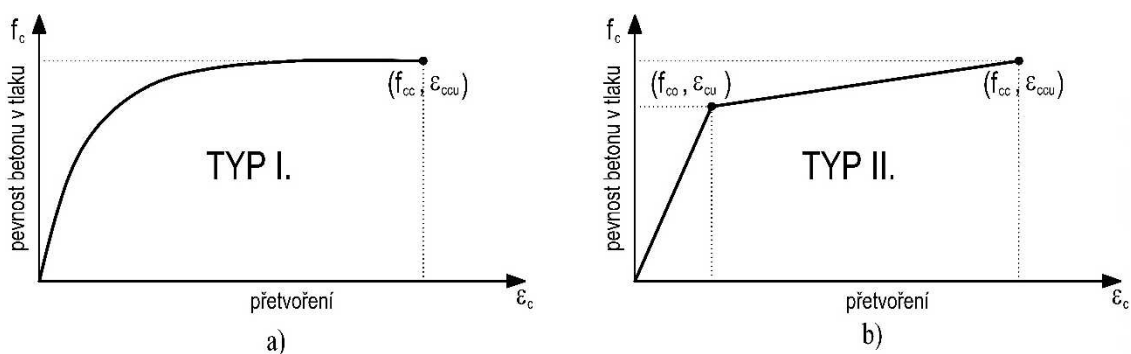
Problematika predikce chování ovinutého betonu je poměrně složitá, což demonstruje nesoulad v návrhových modelech. Tento pramení jednak z postupného rozšiřování znalostí o dané problematice a nutnosti implementovat výsledky výzkumu do návrhových algoritmů, a jednak z obtížné formulace vztahů vystihujících interakci ovinutí a betonu. I přes

skutečnost, že se jedná o relativně nový materiál, byla vytvořena celá řada výpočtových modelů predikujících chování sloupů ovinutých FRP materiály, které je možné dle [6] a [20] rozdělit do dvou kategorií:

### 1. Návrhově orientované (empirické) modely

Pracovní diagramy predikující chování sloupů ovinutých FRP tkaninou a vztahy pro určení výsledných vlastností ovinutého betonu byly odvozeny na základě regresní analýzy výsledků experimentálních zkoušek. Přesnost těchto modelů je limitována rozsahem prováděných experimentálních prací a konfigurací zatěžovacích zkoušek. Jejich výstižnost byla následně ověřena analytickou studií porovnávající predikované a reálné chování.

Návrhově-orientované výpočtové modely je možné rozlišit do tří typů podle tvaru pracovního diagramu. Historicky nejstarší a také nejméně přesné typy modelů jsou charakterizovány parabolickým pracovním diagramem, který byl vyvinut pro aktivní způsob ovinutí nebo pro beton ovinutí ocelovou výztuží – typ I (viz obr. 18a). Výpočtové modely označované typem II. charakterizuje bilineární tvar pracovního diagramu s přechodovým bodem nacházejícím se v blízkosti pevnosti neovinutého betonu (viz obr. 18b). Poslední typ pracovních diagramů vznikl kombinací předchozích dvou typů (kombinace parabolické a lineární části) a je označován jako III. typ. Jedná se o v posledních letech nejvyužívanější přístup, který je možné rozdělit do dalších tří podkategorií na základě přístupu stanovujících jejich průběh (průběhy pracovních diagramů jsou patrné z obr. 19).



**obrázek 18 - Porovnání pracovních diagramů: a) I. typ – parabolický; b) II. Typ – bilineární**

Typ III.1 se nazývá tzv. Hognestadova parabola, jedná se o zvláštní případ pracovního diagramu typu III.3, při kterém platí  $A = 2$  a  $D = 0$  (vysvětlení proměnných  $A$ ,  $D$  viz typ III.3). Křivku popisuje vzestupná parabolická část platná do dosažení přechodového bodu ( $f_{cc}$ ,  $\epsilon_{ccu}$ ),

na kterou navazuje přibližně lineární část. Tuto křivku je možné dle [20] a [22] popsat funkcemi

$$f_c = f_{co} \left[ 2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \text{ platné v rozsahu } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}, \quad (21)$$

$$f_c = f_{co} + E_{c2} \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \text{ platné v rozsahu } \varepsilon_c > \varepsilon_{co}, \quad (22)$$

kde symboly značí:

$\varepsilon_c$  poměrné přetvoření betonu;

$E_{c1}$  modul pružnosti ovinutého betonu – počáteční větev pracovního diagramu;

$E_{c2}$  modul pružnosti ovinutého betonu – sekundární větev pracovního diagramu.

Typ III.2 je dán čtyřparametrickou křivkou dle Richart a Abbott (1975) a je široce využíván při odvozování nových výpočtových modelů pro beton ovinutý FRP tkaninou. Matematický zápis průběhu křivky je vyjádřen následovně [20] a [22]

$$f_c = \frac{(E_{c1} - E_{c2}) \cdot \varepsilon_c}{\left\{ 1 + \left[ \frac{(E_{c1} - E_{c2}) \cdot \varepsilon_c}{f_o} \right]^n \right\}^{\frac{1}{n}}} + E_{c2} \cdot \varepsilon_c, \quad (23)$$

$$f_o = f_{cc} - E_{c2} \cdot \varepsilon_{ccu}, \quad (24)$$

$$n = 1 + \frac{1}{\frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 1}. \quad (25)$$

kde symboly značí:

$f_o$  pevnost ovinutého betonu vyjádřená rozdílem dle vztahu (24);

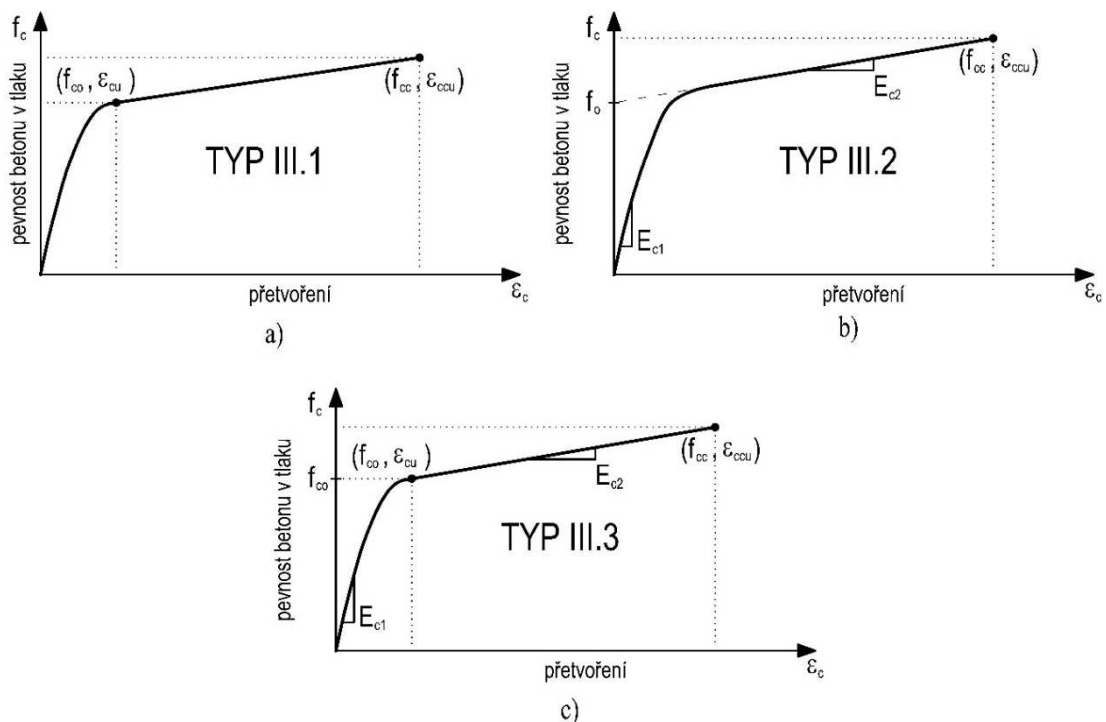
$n$  konstanta v modelu navržením Richard a Abbott.

Křivka typu III.3 je založena na obecném vyjádření dle Sargina (1971). Model byl několikrát modifikován, např. Ahmad a Shah (1982) pro beton ovinutí ocelovou spirálou a Toujani (1999) pro použití FRP materiálů. Dle [20] a [22] je definován následujícím vztahem (26).

$$\frac{f_c}{f_{co}} = \frac{A \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right) + (D-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)^2}{1 + (A-2) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right) + D \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)^2}, \quad (26)$$

$$A = \frac{E_c}{E_{sec}} = \frac{E_c \cdot \varepsilon_{co}}{k_3 \cdot f_{co}}. \quad (27)$$

Parametr  $A$  ovlivňuje počáteční průběh pracovního diagramu (je ovlivněn sečným modulem pružnosti  $E_{sec}$ ), parametr  $D$  kontroluje vzestupnou případně sestupnou větev pracovního diagramu a parametr  $k_3$  je dán poměrem pevnosti ovinutého a neovinutého betonu ( $f_{cc}/f_{co}$ ) a udává přírůstek maximální pevnosti v důsledku ovinutí.



**obrázek 19** - Porovnání pracovních diagramů III. typu (převzato z [20])

Obecný zápis návrhově orientovaných modelů popisujících výsledné vlastnosti ovinutého betonu pomocí FRP tkaniny popisují následující rovnice pro pevnost ovinutého betonu v tlaku ( $f_{cc}$ ) a odpovídající mezní poměrné přetvoření ( $\varepsilon_{ccu}$ ) [20]

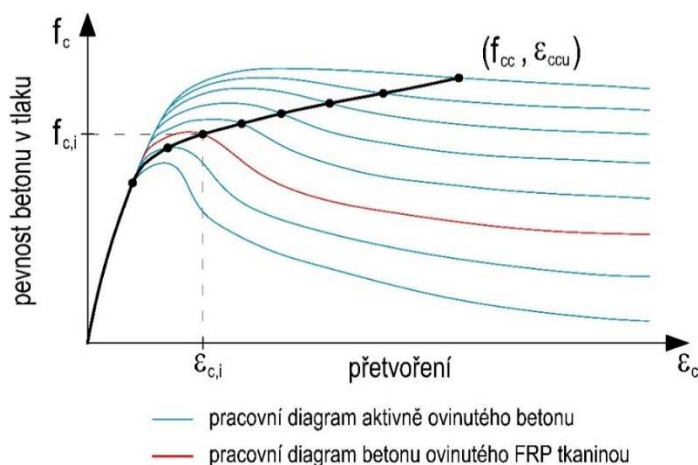
$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = c_1 + k_1 \cdot \frac{k_\varepsilon \cdot \sigma_l}{f_{co}}, \quad (28)$$

$$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{co}} = c_2 + k_2 \cdot \frac{k_\varepsilon \cdot \sigma_l}{f_{co}}, \quad (29)$$

kde  $c_1$ ,  $c_2$  jsou kalibrační konstanty,  $k_1$ ,  $k_2$  jsou koeficienty zohledňující přírůstek pevnosti, resp. přetvoření v důsledku ovinutí a  $k_\varepsilon$  je redukční faktor příčného přetvoření.

## 2. Analyticky orientované (numerické) modely

Výpočtové modely byly odvozeny na základě řady analytických studií a numerických simulací chování sloupů ovinutých FRP tkaninou. Analyticky orientované modely jsou založeny na interakci vnějšího obalu (FRP ovinutí) a vnitřního betonového jádra. Jejich řešení vychází z rovnosti sil a kompatibility přetvoření mezi těmito elementy, při kterém se využívá přírůstková iterační metoda (obr. 20). Oproti návrhově-orientovaným modelům představují univerzálnější řešení. Jejich přesnost závisí na správném popisu chování FRP tkaniny a betonu. Výstižnost navrženého řešení bývá ověřována porovnáním predikovaného a skutečného chování ovinutých prvků (porovnáním dat z provedených experimentálních prací).



**obrázek 20** - Analyticky-orientovaný model pracovního diagramu ovinutého betonu řešený pomocí přírůstkové metody

Matematický model ovinutého betonu vychází z řady přístupů (viz níže), jedním z nejpoužívanějších je tzv. model aktivního ovinutí. Model aktivního ovinutí odvozený Popovicsem (1973) popisuje chování ovinutého betonu na základě energetické rovnováhy. Pro beton ovinutý FRP tkaninou při dosažení určitých hodnot příčného přetvoření předpokládá stejné chování jako pro beton nacházející se v tzv. hydrostatickém tlaku (beton stlačovaný nejen osově, ale i po obvodě – trojosý stav namáhání). Výsledné charakteristiky

ovinutého betonu jsou tedy funkcí příčného tlaku, který vyvolává FRP ovinutí. Tlaková pevnost ovinutého betonu je reprezentována vztahem

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = c_1 + k_1 \cdot \frac{k_\varepsilon \cdot \sigma_l}{f_{co}}, \quad (30)$$

kde konstanta  $r$  vyjadřuje křehkost betonu (původně definována jako  $r = 0,058 \cdot f_{co} + 1$ ) s obecným zápisem ve tvaru

$$r = \frac{E_c}{E_c - f_{cc} / \varepsilon_{ccu}}. \quad (31)$$

Z výpočtových modelů definovaných na základě dalších přístupů je zde uveden jejich stručný výčet bez bližšího popisu. Harmon a kol. (1998) pro odvození výpočtových vztahů využili koncepce tvorby trhlin a jejich oddělování v betonovém průřezu. Závislost mezi osovým a příčným přetvořením definovali funkcí vzniku a rozvoje trhlin. Karabinis a Rousakis (1998) model ovinutého betonu založili na přístupu plasticity, který zahrnuje numerickou integraci. U tohoto modelu je beton uvažován jako elasticko-plastický materiál definovaný podle Druker-Prager modelu s respektováním mezních kritérií. Model Gertlea (1981) popisuje napjatost v betonu definovanou na základě dvou oktaedrických napětí (oktaedrický model normálového a smykového napětí). Tento model modifikoval Becque (2003). Další modely využívají metody konečných prvků, např. Mirmiran (2000).

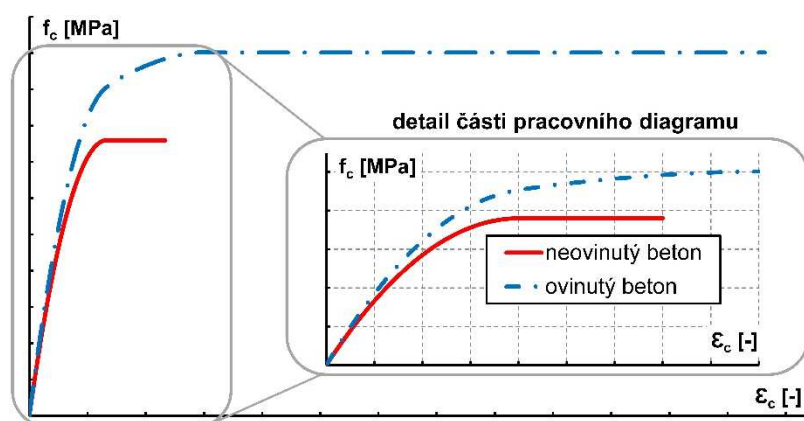
## 4.2. Přehled přístupů vybraných normativních předpisů a směrnic

Pro přehlednost je uveden přístup několika vybraných normativních předpisů k problematice ovinutého betonu. Přehled postihuje pouze základní podstatu návrhových modelů a popisu chování ovinutého betonu. Nezabývá se přístupem předpisů ke spolehlivosti návrhu. Vztahy definující vlastnosti ovinutého betonu jsou uvedeny v tab. 4 a tab. 5.

ČSN EN 1992-1-1 – jde o v České republice platný předpis pro navrhování betonových konstrukcí. Pojem ovinutého betonu rozvíjí ve stručném odstavci, kde predikci chování odvozuje pro beton ovinutý příčnou ocelovou výztuží (hustě umístěné náležitě uzavřené třmínky nebo šroubovice). Účinné ovinutí, jehož následkem je zlepšení chování betonu, podmiňuje dosažením plastického stavu v příčné výztuži. V závislosti na velikosti příčného tlaku definuje vztahy pro výpočet charakteristické pevnosti ovinutého betonu v tlaku  $f_{ck,c}$ , kdy limitní hodnota příčného tlaku musí dosahovat alespoň 5 % tlakové pevnosti neovinutého

betonu. Chování ovinutého betonu definuje parabolicko-rektangulárním pracovním diagramem (obr. 21). Posouzení provádí pomocí interakčního diagramu, který je stanoven pro ovinutý beton, tj. pro beton se zlepšenými fyzikálně-mechanickými parametry. Norma neudává informace o způsobu stanovení velikosti příčného tlaku, a především není připravena pro FRP materiály, tzn. nepostihuje ovinutí FRP tkaninou (více informací podává již neplatná norma ČSN EN 73 1201-88 Navrhování betonových konstrukcí [42]).

CEB-FIB Model Code 1990 – materiálový model ovinutého betonu byl převzat normou ČSN EN 1992-1-1, jedná se tak o model pro beton ovinutý hustě rozmístěnými třmínky nebo šroubovicí. Na rozdíl od výše uvedeného předpisu poskytuje více informací o ovinutém betonu, když udává vztahy pro stanovení velikosti příčného tlaku, definuje redukční součinitele zohledňující vliv tvaru zesilovaného prvku a vzdálenosti příčné výztuže. Model Code 1990 uvádí dva idealizované pracovní diagramy, parabolicko-rektangulární (viz obr. 21) a rektangulární.



**obrázek 21** - Porovnání parabolicko-rektangulárních pracovních diagramů neovinitého a ovinutého betonu dle [43]

CEB-FIB Model Code 2010 – novější vydání předpisu zachovalo původní výpočtový model z roku 1990. V rámci inovací došlo k modifikaci vztahů pro vypočtení napětí a přetvoření ovinutého betonu.

ACI 440.2R – směrnice vydaná Americkou betonářskou společností ACI poskytuje technická doporučení pro návrh a provádění konstrukcí s vnějšími FRP systémy. Materiálový model ovinutého betonu vznikl modifikací modelu Mandera (1988) pro beton ovinutý ocelí. Tento předpis simuluje účinnost ovinutí v závislosti na podmínkách zesílení zavedením redukčních součinitelů (zohledňují tvar průřezu, typ materiálu, způsob zesílení atd.). Do výpočtu zavádí například součinitel ovinutí  $\Phi$ , který nabývá hodnot v závislosti



na způsobu ovinutí příčnou výztuží (0,7 pro spirálu), redukční faktor  $\psi_f$  pro aplikace FRP materiálů (0,95) a postihuje také vliv okolního prostředí pomocí součinitele  $C_E$  (v závislosti na typu zesílení a četnosti plánované údržby nabývá hodnot v rozmezí 0,5-1,0, pro FRP je roven 1,0). Také rozlišuje typ působení prvku zavedením příslušných součinitelů, resp. návrh pro osový tlak, ohyb a smyk, kdy v případě tlakového namáhání omezuje napětí v betonu i betonářské výztuži 60 % jejich mezní hodnoty. Příznivý účinek ovinutí limituje maximálním zvýšením do 100 % původní hodnoty, což odůvodňuje ztrátou funkčnosti ovinutí v důsledku neočekávaných vlivů (např. vandalismus, náraz apod.) a zohledňuje zde rovněž závislost na působícím zatížení (funkce budoucího zatížení po zesílení).

ISIS Canada Educational Module No. 4: An Introduction to FRP-Strengthening of Concrete Structures – výpočtový model popisující chování betonu ovinutého FRP materiálem je odvozen na základě rovnováhy sil v účinně ovinutém jádře betonového průřezu. Použití FRP materiálů tento předpis zohledňuje zavedením redukčního součinitele  $\Phi_{frp}$ , který nabývá hodnot v závislosti na typu FRP materiálu. Předpis udává vztah pro výpočet pevnosti ovinutého betonu v tlaku, u kterého zahrnutím empirických koeficientů a analytických součinitelů zohledňuje způsob zesílení, pevnost betonu, tvar a velikost prvku, aj. Dokument neudává vztah pro určení mezního přetvoření ovinutého betonu, ale stanovuje limitní přetvoření ve FRP tkanině. Podobně jako v případě Model Codu je účinek ovinutí podmíněn velikostí příčného tlaku. Je zde definována minimální, ale i maximální velikost příčného tlaku, které vychází z ductility prvku (respektuje vliv trhlin i excentrické namáhání).

CSA S806 Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers – kanadský normativní předpis definuje pro sloupy kruhového průřezu zesílené ovinutím FRP materiálem vlastní vztahy pro výpočet výsledných vlastností, které vycházejí z velikosti příčného tlaku. Ten je omezen mezním tahovým napětím ve FRP materiálu (jedná se o redukovanou hodnotu tahové pevnosti).

CNR-DT 200/2004 – model ovinutého betonu popisuje pomocí parabolicko-rectangulárního pracovního diagramu. Účinnost ovinutí podmiňuje dosažením limitní hodnoty příčného tlaku o velikosti 5 % pevnosti neovinutého betonu. Ovinutí dělí na aktivní a pasivní variantu, u které k aktivaci ovinutí dojde až po popraskání betonového průřezu při současném využití výztuže na mezi kluzu. Příčný tlak omezuje i shora pomocí maximálního dovoleného přetvoření FRP o velikosti 0,4 %. Zlepšení vlastností v důsledku ovinutí dovoluje v případě centricky nebo lehce excentricky namáhaných prvků. Redukci příčného tlaku provádí zavedením součinitele  $k_{eff} \leq 1$ , který je definován poměrem objemů

efektivně ovinutého betonu a betonu prvku. Další vlivy ovinutí postihuje zavedením redukčních součinitelů, kterými zohledňuje také účinnost ve vertikálním a horizontálním směru, způsob zesílení, orientaci vláken, tvar průřezu aj.

Evropská směrnice FIB Bulletin no. 14, „Externally bonded FRP reinforcement for RC structures“ – poskytuje souhrn doporučení pro návrh konstrukcí s vnější FRP výztuží v souladu s platnými evropskými normativními podklady (EN normy, Model Code), tj. s využitím parciálních součinitelů spolehlivosti dle evropských norem. Podává obecné informace o ovinutém betonu a shrnuje dosavadní poznatky z daného vědního oboru (neposkytuje finální návrhové vztahy a postupy). V úvodu je popsán samotný princip ovinutého betonu, včetně přehledu výzkumu v oblasti matematického popisu jeho chování. V dalších kapitolách dokument poukazuje na vlivy snižující účinek ovinutí (např. tvar sloupu, typ FRP materiálu, způsob zesílení, orientace vláken tkaniny aj.), prezentuje způsob stanovení příčného tlaku (poukazuje na rozdíl mezi ocelí a FRP) a vlivy použitého materiálu pro ovinutí (poukazuje na rozdílné chování při použití uhlíkové a skelné tkaniny).

### 4.3. Shrnutí stavu poznání

Pro úplnost jsou v následujících tabulkách uvedeny výpočtové vztahy k určení charakteristik ovinutého betonu (pevnost ovinutého betonu v tlaku  $f_{cc}$  a odpovídající mezní přetvoření  $\varepsilon_{cc}$ ) podle přístupů vybraných autorů (viz tab. 4) a také podle citovaných směrnic (viz tab. 5). Jednotlivé přístupy jsou řazeny hierarchicky s možností porovnání modifikace výrazů v závislosti na implementaci nových poznatků z řešené problematiky ovinutého betonu. Výrazy jsou prezentovány v konečných formách pro sloup kruhového průřezu (zvoleno z důvodů pozdějšího využití v experimentální a numerické části předložené práce v kapitolách 5 a 6).

tabulka 4 - Přehled vybraných přístupů pro stanovení charakteristik ovinutého betonu

Autor	Pevnost ovinutého betonu v tlaku	Mezní přetvoření ovinutého betonu
Richart a kol. (1928)	$f_{cc} = f_{co} + 4,1\sigma_l$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left( 1 + 20,5 \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)$
Fardis & Khalili (1982)	přiját model Richart $f_{cc} = f_{co} + 4,1\sigma_l$	$\varepsilon_{ccu} = 0,002 + 0,001 \left( \frac{E_f t_f}{D \cdot f_{co}} \right)$
Mander a kol. (1988)	$f_{cc} = f_{co} \left[ 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1,254 \right]$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Cusson & Paultre (1995)	$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2,1 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)^{0,70} \right]$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} + 0,21 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)^{1,70}$
Karbhari & Gao (1997)	$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2,1 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)^{0,87} \right]$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} + 0,01 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)$
Kono a kol. (1998)	$f_{cc} = f_{co}(1 + 0,0572\sigma_l)$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} + 0,28\varepsilon_{co}\sigma_l$
Xiao & Wu (2000)	$f_{cc} = f_{co} \left( 1,1 + k_1 \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)$ $k_1 = 4,1 - 0,75(E_l/f_{co}^2)^{-1}$	$\varepsilon_{ccu} = (\varepsilon_{h,rup} + \varepsilon_o) / \mu_{tu}$
Lam & Teng (2002)	$f_{cc} = f_{co} + 2,0\sigma_l$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left[ 2 + k_2 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right) \right]$ $k_2 = 15$ pro CFRP
Lam & Teng (2003)	$f_{cc} = f_{co} + 3,3\sigma_l$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left[ 1,75 + k_2 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right]$ $k_2 = 5,53$ pro CFRP
Bisby a kol. (2005)	$f_{cc} = f_{co} \left( 1,0 + 2,425 \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} + k_2 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)$ $k_2 = 0,0240$ pro CFRP
Youssef a kol. (2007)	$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2,25 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right)^{1,25} \right]$	$\varepsilon_{ccu} = 0,003368 + 0,259 \left( \frac{\sigma_l}{f_{co}} \right) \sqrt{\frac{f_f}{E_f}}$
Yu & Teng (2011)	$f_{cc} = f_{co} + 3,5E_l \left( 1 + 6,5 \frac{f_{co}}{E_l} \right) \varepsilon_{h,rup}$	$\varepsilon_{cc} = 0,0033 + 0,6 \left( \frac{E_l}{f_{co}} \right)^{0,8} (\varepsilon_{h,rup})^{1,45}$

tabulka 5 - Přístupy vybraných směrnic pro stanovení charakteristik ovinutého betonu

Směrnice	Pevnost ovinutého betonu v tlaku	Mezní přetvoření ovinutého betonu
<b>CEB-FIB Model Code 1990 (1990)</b>	$f_{cc} = f_{ck}(1,0 + 2,5\alpha\omega_w)$ for $\sigma_l < 0,05f_{ck}$ $f_{ck,c} = f_{ck}(1,125 + 1,25\alpha\omega_w)$ for $\sigma_l > 0,05f_{ck}$	$\varepsilon_{c2,c} = 0,002 + (f_{cc}/f_{co})^2$ $\varepsilon_{ccu} = 0,0035 + 0,2(\sigma_l/f_{co})$
<b>ČSN EN 1992-1 (1992)</b>	$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,0 + 5,0 \frac{\sigma_l}{f_{ck}}\right)$ for $\sigma_l < 0,05f_{ck}$ $f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,125 + 2,5 \frac{\sigma_l}{f_{ck}}\right)$ for $\sigma_l > 0,05f_{ck}$	$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}}\right)^2$ $\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \frac{\sigma_l}{f_{ck}}$
<b>ACI 440.2R (2002)</b>	$f_{cc} = f_{co} \left[ 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1,254 \right]$	$\varepsilon_{ccu} = 1,71 (5f_{cc} - 4f_{co})/E_c$
<b>CRN DT 200/2004 (2004)</b>	$f_{cc} = f_{co} \cdot \left[ 1 + 2,6 \left(\frac{\sigma_l}{f_{co}}\right)^{2/3} \right]$	$\varepsilon_{ccu} = 0,0035 + 0,015 \sqrt{\frac{\sigma_l}{f_{co}}}$
<b>ISIS Canada Module No. 4 (2004)</b>	$f_{cc} = f_{co} + k_1\sigma_l = f_{co}(1 + \alpha_{pc}\omega_w)$	nedefinováno
<b>ACI 440.2R (2008)</b>	$f_{cc} = f_{co} + 3,3 \psi_f k_a \sigma_l$ $\psi_f = 0,95$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left[ 1,5 + 12k_b \left(\frac{\sigma_l}{f_{co}}\right) \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0,45} \right]$ $\varepsilon_{cc0} \leq 0,01$
<b>CEB-FIB Model Code 2010 (2010)</b>	$f_{ck,c} = f_{ck} \left[ 1 + 3,5 \left(\frac{\sigma_l}{f_{ck}}\right)^{0,75} \right]$	$\varepsilon_{cc,2} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} - 1\right) \right]$ $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \left(\frac{\sigma_l}{f_{ck}}\right)$
<b>CSA S806 (2012)</b>	$f_{cc} = 0,85f_{co} + k_k k_c \sigma_l = 0,85f_{co} + 6,7\sigma_l^{0,87}$	nedefinováno

Symboły použité v tab. 4 a tab. 5:

- $D$  průměr sloupu (v případě kruhové průřezu);
- $E_c$  modul pružnosti neovinutého betonu;
- $E_f$  modul pružnosti laminované tkaniny;
- $E_l$  modul pružnosti ovinutí (závisí na parametrech FRP tkaniny,  $E_l = 2t_f E_f / D$ );
- $f_{co}$  pevnost neovinutého betonu v tlaku;
- $f_{cc}$  pevnost ovinutého betonu v tlaku;
- $f_{ck}$  charakteristická pevnost neovinutého betonu v tlaku dle [39], [43], [48];
- $k_c$  koeficient tvaru průřezu sloupu dle [41];
- $k_k$  koeficient ovinutí dle [41];

$k_1$	<i>koeficient zvýšení osové pevnosti ovinutého betonu;</i>
$k_2$	<i>koeficient osového přetvoření ovinutého betonu;</i>
$t_f$	<i>tloušťka laminované tkaniny;</i>
$\alpha_{pc}$	<i>koeficient účinnosti zohledňující vliv pevnosti betonu, typ FRP tkaniny a velikost prvku dle [49];</i>
$\varepsilon_{co}$	<i>poměrné přetvoření neovinutého betonu při dosažení maximální pevnosti;</i>
$\varepsilon_{cu}$	<i>mezí poměrné přetvoření neovinutého betonu při porušení;</i>
$\varepsilon_{cc,i}; \varepsilon_{c2,c}$	<i>poměrné přetvoření ovinutého betonu při dosažení maximální pevnosti dle [39], [43] a [48];</i>
$\varepsilon_{ccu}$	<i>mezí poměrné přetvoření ovinutého betonu při porušení;</i>
$\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}$	<i>poměrné přetvoření neovinutého betonu při dosažení maximální pevnosti dle [39], [43] a [48];</i>
$\varepsilon_{cu2,c}$	<i>mezí poměrné přetvoření ovinutého betonu při porušení;</i>
$\varepsilon_f$	<i>limitní přetvoření laminované tkaniny při přetržení z tahových zkoušek;</i>
$\varepsilon_{fe}$	<i>redukováná hodnota přetvoření laminované tkaniny při přetržení (<math>\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \varepsilon_f</math>, kde <math>\kappa_\varepsilon</math> je součinitel předčasného selhání FRP materiálu, dle [37]);</i>
$\varepsilon_{h,rupt}$	<i>přetvoření při přetržení laminátu tkaniny (měřeno na ovinutých vzorcích [3]);</i>
$\kappa_a$	<i>součinitel účinnosti FRP ovinutí pro určení <math>f_{cc}</math> (vliv tvaru průřezu [37]);</i>
$\kappa_b$	<i>součinitel účinnosti FRP ovinutí pro určení <math>\varepsilon_{cc,u}</math> dle [37];</i>
$\mu_{tu}$	<i>průměrná hodnota stupně dilatace ovinutého betonu (závislá na <math>\varepsilon_{cc,u}</math>, dle [3]);</i>
$\sigma_l$	<i>příčný tlak vyvozený ovinutím;</i>
$\psi_f$	<i>redukční faktor pevnosti FRP tkaniny dle [37];</i>
$\omega_w$	<i>mechanický stupeň vyztužení ovinutí, resp. objemový stupeň ovinutí dle [49].</i>

#### 4.4. Některé konference věnující se problematice navrhování konstrukcí vyztužených FRP materiály

Společně s rostoucím objemem výzkumných činností a potřebou předávat si nejnovější poznatky z výzkumu, vývoje a navrhování kompozitních materiálů vyvstala potřeba konání konferencí zaměřených pouze na tuto problematiku. Tématikou FRP materiálů použitých ve stavebnictví se věnují především následující konference:

### **Konference FRPRCS (Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures)**

<i>rok konání</i>	<i>místo konání</i>	<i>pořádající organizace</i>
- 1993	Vancouver, Kanada	ACI
- 1995	Ghent, Belgie	RILEM
- 1997	Sapporo, Japonsko	JSCE
- 1999	Baltimore, Maryland, USA	ACI
- 2001	Camridge, Velká Británie	E&F Spon
- 2003	Singapore	New World Publishers
- 2005	Kansas City, Missouri, USA	ACI
- 2007	Patras, Řecko	FIB
- 2009	Sydney, Austrálie	ICE, ACI
- 2011	Tampa, Florida, USA	ACI
- 2013	Guimarães, Portugalsko	FIB
- 2015	Nanjing, Čína	IIUSE

### **Konference CICE (Composites in Civil engineering)**

- 2001	Hong Kong, Čína
- 2004	Adelaide, Austrálie
- 2006	Miami, Florida, USA
- 2008	Zurich, Švýcarsko
- 2010	Beijing, Čína
- 2012	Rome, Itálie
- 2014	Vancouver, Kanada
- 2016	Hong Kong, Čína

**Konference APFIS (Asia-Pacific Conference on FRP in Structures)**

- 2007        Hong Kong, Čína
- 2009        Soul, Jižní Korea
- 2012        Sapporo, Japonsko
- 2013        Melbourne, Austrálie
- 2015        Nanjing, Čína

Kromě konferencí je nutné zmínit i časopisy zaměřené na problematiku výzkumu, vývoje a navrhování kompozitních materiálů, mezi které patří:

- Composite Structures (Elsevier);
- Construction and Building Materials (Elsevier);
- Journal of Composites for Construction (ASCE);
- Structural Journal (ACI);
- Material and structures (RILEM).

## 5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální program sloužil k popisu reálného chování sloupů ovinutých FRP tkaninou s cílem postihnout vliv sledovaných faktorů (viz níže), které omezují nebo ovlivňují výsledný účinek ovinutí. Za tímto účelem byl experimentální program rozdělen do několika na sebe navazujících částí, které definovaly výslednou podobu zatěžovacích zkoušek. První část zahrnovala stanovení vlastností FRP tkaniny, jejichž znalost je nutná pro stanovení výsledných vlastností ovinutého betonu. V další části byly s ohledem na možnosti zkušebního zařízení definovány parametry zkušebních vzorků a pomocí analytické studie také pevnosti použitého betonu. Třetí část experimentálního programu sestávala z ověření účinnosti ovinutí na krátkých vzorcích sloupů. Poslední část měla za cíl postihnout chování vysokých „štíhlých“ sloupů ovinutých FRP tkaninou. Veškeré výzkumné činnosti se týkaly pouze krátkodobého chování prvků při statickém zatížení. Přehled provedených experimentálních prací, vyhodnocení dosažených výsledků a jejich porovnání s predikovaným chováním z analytické a numerické studie je uveden v kapitole 6.

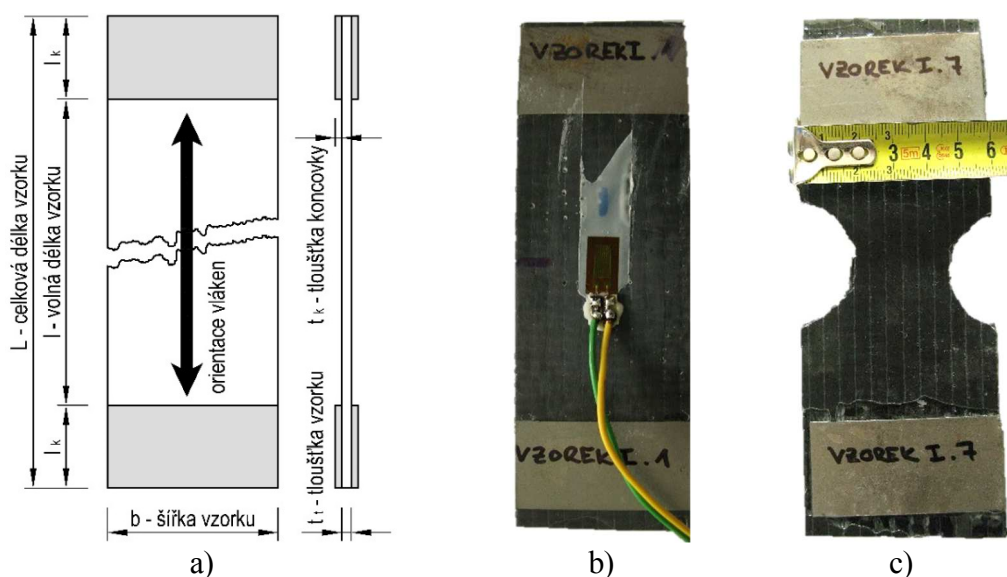
### 5.1. Stanovení vlastností FRP tkaniny

První fáze experimentálního programu spočívala ve stanovení vlastností laminované FRP tkaniny, jež jsou nezbytné pro výpočet únosností zkušebních prvků ovinutého betonu. Vzhledem k tahovému namáhání laminátu tkaniny byly určovány maximální tahová pevnost ( $\sigma_{l,max}; f_{fu}$ ), odpovídající mezní přetvoření při přetržení ( $\epsilon_{fu}$ ) a modul pružnosti ( $E_f$ ). Zkušební postup byl převzat z předpisu [37], který detailně popisuje způsob provedení zkoušek pro stanovení tahových vlastností plochých kompozitních prvků.

Veškeré zkušební vzorky byly zesíleny jedním typem FRP tkaniny s označením SikaWrap – 600 C/120. Jedná se o jednosměrně tkanou prošívanou tkaninu z těžkých uhlíkových vláken střední pevnosti určenou pro mokrý způsob laminace. Veškeré důležité informace jsou uvedeny v technickém listu výrobce [50]. Jsou zde popsány parametry pro návrh ovinutí, tj. definice vlastností tkaniny dodávané ve formě rolí, mechanické vlastnosti suchého vlákna i výsledného laminátu včetně návrhových hodnot. Výrobce dále specifikuje typ použité polymerní pryskyřice (epoxidová matrice s označením Sikadur 300 [51]), podmínky přípravy laminátu a doby vytvrzení pryskyřice. Tyto informace sloužily jako další podklad pro výrobu zkušebních vzorků tkaniny.



Zkušební vzorky vznikly nařezáním vytvrzeného laminátu CFRP tkaniny. Jejich tvar vycházel z doporučení uvedených v [37] a tvořil je obdélník o rozměrech přibližně  $55 \times 100 \text{ mm}^5$  (šířka x volná délka). Konce zkušebních vzorků byly při laminaci opatřeny ocelovými plechy, což umožnilo upnutí do zkušebního zařízení bez jejich poškození. Celkem bylo vyrobeno 20 ks vzorků laminované FRP tkaniny, které byly v závislosti na způsobu výroby a případné tvarové úpravě rozděleny do tří sad. První sadu tvořilo 6 ks vzorků, u kterých byl z důvodů snížení adheze mezi tkaninou a podkladem použit igelit (z důvodů zabránění poškození tkaniny). Druhá sada sestávala ze 4 ks vzorků vyrobených stejným způsobem jako první sada, ale s provedenou tvarovou úpravou v podobě výřezu. Tato modifikace měla za cíl definovat místo porušení a předejít selhání vzorku v místě uchycení do zkušebního zařízení. Třetí sadu tvořilo 10 ks zkušebních vzorků vyrobených s využitím kluzné vrstvy (pasta na bázi vosku) snižující adhezi mezi tkaninou a podkladem. Typy zkušebních vzorků jsou patrné z obr. 22.

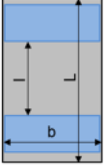
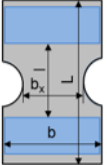
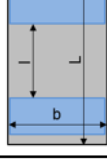


**obrázek 22** - Zkušební vzorek laminované FRP tkaniny a) schéma vzorku; b) reálné provedení sada I. a III.; c) reálné provedení sada II.

Tahová zkouška probíhala v silovém režimu zatěžování s konstantním nárůstem tahové síly až do porušení zkušebního vzorku. U většiny vzorků byla snímána pouze velikost tahové síly, pouze na třech vzorcích byly osazeny fóliové odporové tenzometry s orientací ve směru vláken pro záznam přetvoření v průběhu zatěžování (viz obr. 22). Výsledky tahových zkoušek laminátu CFRP tkaniny jsou uvedeny v tab. 6.

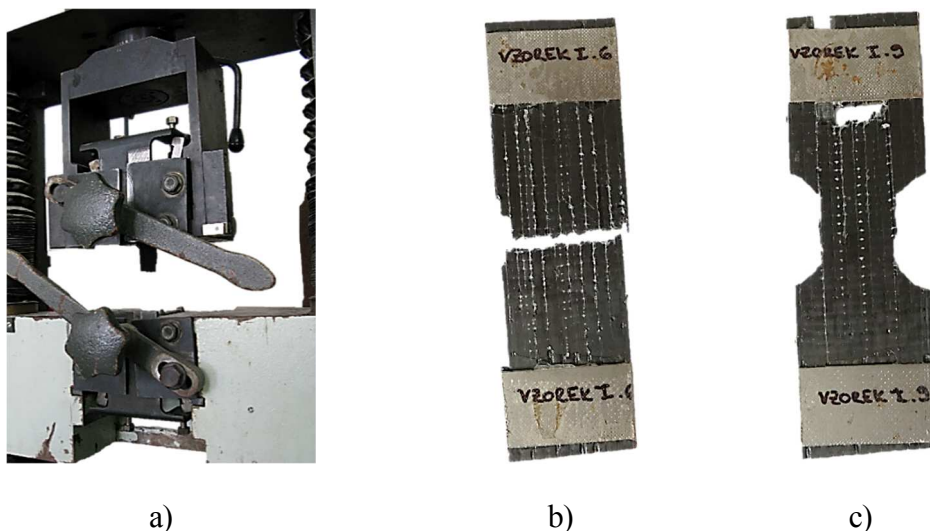
<sup>5</sup> minimální rozměry vzorků dle [37] jsou  $12,7 \times 127 \text{ mm}$  s rozměrovou tolerancí šířky  $\pm 1 \%$  a tloušťky  $\pm 2 \%$ .

tabulka 6 - Výsledky tahové zkoušky laminované FRP tkaniny

Schéma vzorku	Označení	L [mm]	l [mm]	b; b <sub>x</sub> [mm]	t <sub>t</sub> [mm]	A [m <sup>2</sup> ]	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>1,max</sub> [MPa]	způsob porušení
 Sada I.	vzorek I. 1	168	94,83	52,5	1,184	62,160	43,20	694,999	1)
	vzorek I. 2	168	93,68	55,5	0,988	54,834	39,58	721,815	2)+D
	vzorek I. 3	166	93,79	52,5	1,295	67,988	47,64	700,749	1)
	vzorek I. 4	166	95,90	53,0	1,180	62,540	37,00	591,621	2)
	vzorek I. 5	167	93,50	55,0	1,193	65,633	44,53	678,466	1)
	vzorek I. 6	172	102,53	50,5	1,245	62,873	44,98	715,416	1)
 Sada II.	vzorek I. 7	167	96,00	29,4	1,187	34,888	15,50	444,279	D (IS)
	vzorek I. 8	167	97,28	30,3	1,192	36,094	21,80	603,983	D (IS)
	vzorek I. 9	169	96,57	29,7	1,200	35,640	23,50	659,371	2)+D
	vzorek I. 10	175	103,13	31,1	1,332	41,425	18,50	446,588	3)+D
 Sada III.	vzorek II. 1	166	100,50	53,0	1,180	62,540	18,0	287,816	3)
	vzorek II. 2	172	102,52	55,5	1,436	79,698	-	-	3)
	vzorek II. 3	161	98,20	53,0	1,213	64,307	15,0	233,257	3)
	vzorek II. 4	171	98,42	52,0	1,257	65,347	-	-	3)
	vzorek II. 5	165	93,70	52,0	1,317	68,467	21,0	306,719	3)

Poznámka: 1) přetržení přibližně uprostřed  
 2) přetržení v místě uchycení  
 3) odlepení kotevního plechu (nežádoucí způsob porušení)  
 D delaminace (nežádoucí způsob porušení)  
 D (IS) delaminace (interlaminární smyk)

Typické tahové porušení je dosaženo přetržením laminátu v oblasti volné délky  $l$  bez znaků nežádoucích namáhání (např. delaminace v důsledku interlaminárního smyku mezi vlákny, porušení vzorku v blízkosti uchycení nebo jeho pokluz v čelistech). Provedení tahové zkoušky včetně příkladu způsobů porušení je patrné z obr. 23.



obrázek 23 - Zatěžovací zkouška laminátu FRP tkaniny a) provedení zkoušky; b) žádoucí porušení vzorku přetržením; c) nežádoucí selhání vzorku delaminací

Pouze vzorky sady I. selhávaly očekávaným způsobem. Výjimku představoval vzorek I. 4, který se porušil v blízkosti místa uchycení, a proto byl z vyhodnocení vyřazen. Zbylé sady vykazovaly nežádoucí způsoby porušení. Vzorky sady II. selhávaly delaminací zúžené části v důsledku interlaminárního smyku s následným pokluzem v místě uchycení. U sady III. se negativně projevil způsob výroby, kdy u odzkoušených vzorků došlo k odlepení kotevních plechů a následnému pokluzu ještě před dosažením maximální tahové únosnosti laminátu.

Díky záznamu přetvoření u vzorků s osazeným tenzometrickým snímačem bylo možné popsat lineární chování FRP tkaniny až do porušení a stanovit tak mezní přetvoření při porušení a také modul pružnosti v tahu ve směru vláken laminátu. Vyhodnocením naměřených údajů byly stanoveny charakteristiky laminátu FRP tkaniny. Jejich porovnání s vlastnostmi udanými výrobcem je provedeno v tab. 7.

**tabulka 7 - Mechanické vlastnosti laminátu CFRP tkaniny SikaWrap – 600 C/120**

<b>SikaWrap – 600 C/120</b>		<i>modul pružnosti</i> $E_f$ [GPa]	<i>tahová pevnost</i> $f_{tu}$ [MPa]	<i>max. přetvoření</i> $\varepsilon_{fu}$ [%]
SikaCZ, s.r.o.	CFRP suché vlákno	242	3800	1,55
	Sikadur 300	3,5	45	1,50
	laminát FRP – střední hodnoty <sup>1)</sup>	50	576,92	-
	laminát FRP – návrhové hodnoty <sup>2)</sup>	-	307,69	0,60
střední hodnoty z tahové zkoušky		86,42	702,29	0,813

**Poznámka:** 1) hodnoty stanoveny pro tloušťku laminátu 1,3 mm

2) návrhové hodnoty podle výrobce

Provedené experimenty kromě stanovení vlastností laminované tkaniny přinesly následující poznatky:

- provedení zkoušky značně ovlivňuje způsob výroby vzorku (objemový podíl pryskyřice) a také soudržnost s koncovkami pro uchycení do čelistí lisu;
- úprava vzorku s výřezem pro přesnější stanovení průřezové plochy laminátu vedla k nežádoucímu způsobu porušení delaminací, což poukazuje na nevhodné provedení zkušební vzorku;
- parametry laminátu výrobce a tahových zkoušek vykazují značný rozdíl.

## 5.2. Experimentální ověření chování sloupů ovinutých FRP tkaninou

Druhá část experimentálního programu zkoumá chování sloupů ovinutých FRP tkaninou a zabývá se faktory, které ovlivňují účinek tohoto způsobu zesílení. Mezi sledované faktory patří velikost prvku, způsob zesílení a způsob namáhání. Zkušební prvky tvoří sloupy kruhového průřezu, u nějž na rozdíl od ostatních tvarů průřezu dochází k rovnoměrnému rozložení příčného tlaku po obvodu prvku. Lze tak snáze postihnout fázi aktivace vláken FRP tkaniny, stanovit velikost vyvozeného přítlaku a interpretovat vliv sledovaných faktorů.

Experimentální práce byly rozděleny do těchto částí:

- **chování krátkých ovinutých sloupů** zatížených „centrickým“ tlakem, u kterých byl sledován vliv způsobu zesílení (**vliv počtu vrstev FRP tkaniny**) a velikosti vzorku (**vliv průměru sloupu**);
- **chování vysokých ovinutých sloupů** zatížených kombinacemi normálové síly a ohybového momentu v rozsahu takřka celého interakčního diagramu. V této části výzkumu byl sledován **vliv štíhlosti prvku** a také způsobu zesílení (**počet vrstev FRP tkaniny, orientace vláken**) od zcela tlačného až po průřez namáhaný převládajícím tahem.

Simulovat reálné chování sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou je v laboratorních podmínkách velice obtížné. Respektovat způsob podepření, historii zatěžování, počáteční napjatost při zesilování a další podmínky vystihující skutečné působení zesíleného prvku není reálné a pro provedení experimentálních prací je nutné zavést určitá zjednodušení. Tato ovšem nesmí negativně ovlivnit chování zkušebních vzorků a zkreslit tak výsledný účinek zesílení ovinutím FRP tkaninou.

Při konfiguraci zatěžovacích zkoušek se vycházelo z možností technického vybavení zkušebních laboratoří fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, které společně s výsledky první části experimentálního programu definovaly podmínky pro návrh zkušebních prvků (geometrii), jejich materiálové složení, vyztužení, volbu okrajových podmínek a způsob zatěžování. Zatěžovací zkoušky byly plánovány pro stanovení okamžitých krátkodobých vlastností ovinutého betonu při jednorázovém namáhání. Proto mezi přijatá zjednodušení patří opomenutí reologických vlastností betonu (vliv dotvarování a degradace v důsledku působení okolního prostředí). Zkušební vzorky byly podepřeny tak, aby bylo dosaženo reálné chování s ohledem na konfiguraci vzorku i zatěžovací zkoušku.

Krátké sloupy byly prostě podepřeny v hlavě a patě a byly zatěžovány pouze osovou tlakovou silou (chování „masivních“ prvků). Vysoké sloupy byly na obou koncích kloubově uloženy, což umožnilo zatížení tlakovou osovou silou i ohybovým momentem (chování „štíhlých“ prvků). Dalším přijatým zjednodušením bylo provedení ovinutí při nulové počáteční napjatosti, tj. bez přetížení. Toto zjednodušení znamenalo snížení časové, a především technologické náročnosti, přičemž samotný princip působení ovinutí zůstal zachován. Oproti reálné aplikaci došlo ke změně především ve fázi aktivace ovinutí a v míře jeho účinku.

### **5.2.1. Krátké ovinuté sloupy**

Většina publikovaných výsledků popisujících experimentální stanovení chování ovinutých sloupů byla provedena na krátkých vzorcích zatížených dostředným tlakovým namáháním. Toto uspořádání zatěžovací zkoušky eliminuje vliv štíhlosti snižující účinnost zesílení ovinutím a maximalizuje tak dosažené výsledky. Zkušební vzorky krátkých sloupů tvořily sloupy kruhového průřezu s poměrem výšky k průměru přibližně 2:1. Z hlediska štíhlosti se jedná o masivní vzorky se štíhlostí okolo 8, u nichž je vliv účinků II. řádu zanedbatelný. Vzorky byly zatěžovány centrickým tlakem v tzv. silovém režimu zatěžování s konstantním nárůstem svislé normálové síly až do kolapsu. Celkem byly vyhotoveny tři sady zkušebních vzorků – jedna byla provedena ve variantě železobetonové a zbylé dvě byly z prostého betonu.

#### **5.2.1.1 Zkušební vzorky z prostého betonu**

Krátké sloupy z prostého betonu tvořily dvě sady zkušebních vzorků zhotovených shodně z betonu třídy C30/37. Sadu s označením K tvořily sloupy kruhového průřezu o průměru 100 mm a výšce 210 mm, resp. vzorky sady s označením T měly průměr 185 mm a výšku 380 mm – přehled vzorků je znázorněn na obr. 24. Každá sada sestávala ze čtyř vzorků, přičemž jeden vzorek ze série sloužil jako referenční (nezesílený). Zbylé tři vzorky byly zesíleny ovinutím jednosměrnou FRP tkaninou po celé výšce prvku s orientací vláken tkaniny kolmou na osu prvku (působení v příčném směru). Volba rozdílných rozměrů zkušebních vzorků a rozdílný způsob zesílení (jednou nebo třemi vrstvami) umožnily popsat vliv velikosti průměru sloupu, resp. vliv počtu vrstev FRP tkaniny na účinnost ovinutí.



**obrázek 24** - Zkušební vzorky z prostého betonu - vyšší vzorky tvoří sérii T, nižší pak sérii K

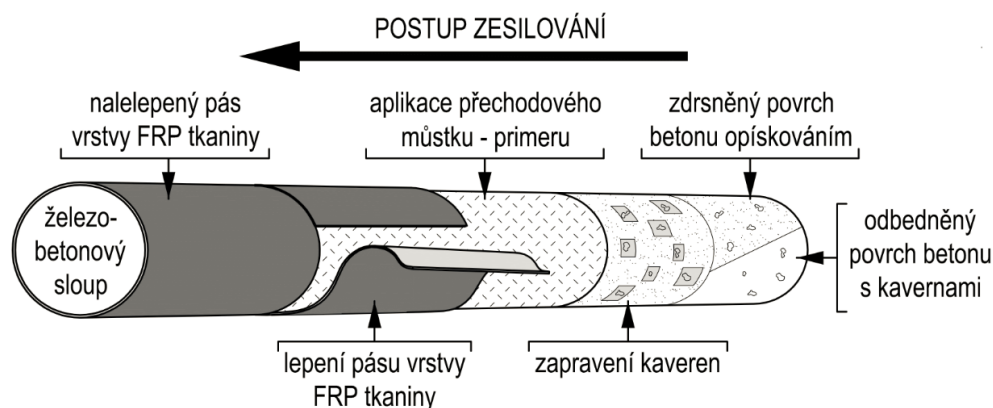
Výroba vzorků byla provedena pomocí bednění připraveného z PVC trubek, které byly pro zdrsnění povrchu zesilovaných vzorků opatřeny vnitřní výstelkou z pěnové fólie (mirelon). Současně s výrobou zkušebních vzorků sloupů byly vyhotoveny i vzorky krychlí a trámů pro stanovení základních materiálových charakteristik betonu. Betonáž, uskladnění i ošetřování vzorků po dobu zrání betonu zajišťovala firma Prefa Brno, a.s. Odbednění vzorků bylo provedeno po 14 dnech od jejich výroby (viz obrázek 25).



**obrázek 25** - Vzorky z prostého betonu a) odbednění; b) výsledný zdrsněný povrch

Zesílení vzorků ovinutím FRP tkaninou předcházela příprava povrchu, při které byly odstraněny nerovnosti a pomocí vhodné směsi zapraveny větší kavery (např. pomocí polymer-cementové malty – Groutex, případně tixotropní lepicí hmoty – Sikadur 30 [52]). Po dalších 14 dnech byly u vybraných prvků na povrchu přibližně uprostřed výšky osazeny fóliové odporové tenzometry v podélném i příčném směru (vzhledem k ose vzorku), které sloužily pro záznam přetvoření betonu.

Zesílení zvolenou tkaninou vyžaduje mokrý proces laminace, tzn. nejdříve je aplikován přechodový můstek (tzv. primer<sup>6</sup>) a poté následuje pokládání impregnovaných pásů tkaniny (tkaninu je před její aplikací na povrch prvku potřeba prosytit lepidlem). Zesilování prvků neprobíhalo kontinuálním ovíjením, ale provádělo se postupným přikládáním jednotlivých pásů o šířce tkaniny po celé výšce prvku (překlátování jednotlivých pásů ve svislém směru není výrobcem vyžadováno). Přesah konce pásů tkaniny činil okolo 200 mm (požadované minimum dle výrobce je 150 mm) a zajišťoval dostatečné kotvení aplikované vrstvy kompozitu (postup zesilování je schematicky znázorněn na obr. 26). V případě krátkých sloupů zesilování představovalo aplikaci jednoho až dvou pásů tkaniny s vlákny orientovanými kolmo na osu prvku. Zesílení vzorků ve výše uvedených sadách bylo provedeno tak, aby bylo možné postihnout vliv počtu vrstev tkaniny na účinnost ovinutí. Vždy trojice vzorků byla zesílena jednou, resp. třemi vrstvami FRP tkaniny. Tímto způsobem zesílené vzorky byly dalších 14 dní uskladněny pro důkladné vytvrzení lepidla<sup>7</sup>.



**obrázek 26** - Schématické znázornění postupu zesílení prvku ovinutím FRP tkaninou při využití tzv. mokrého způsobu aplikace

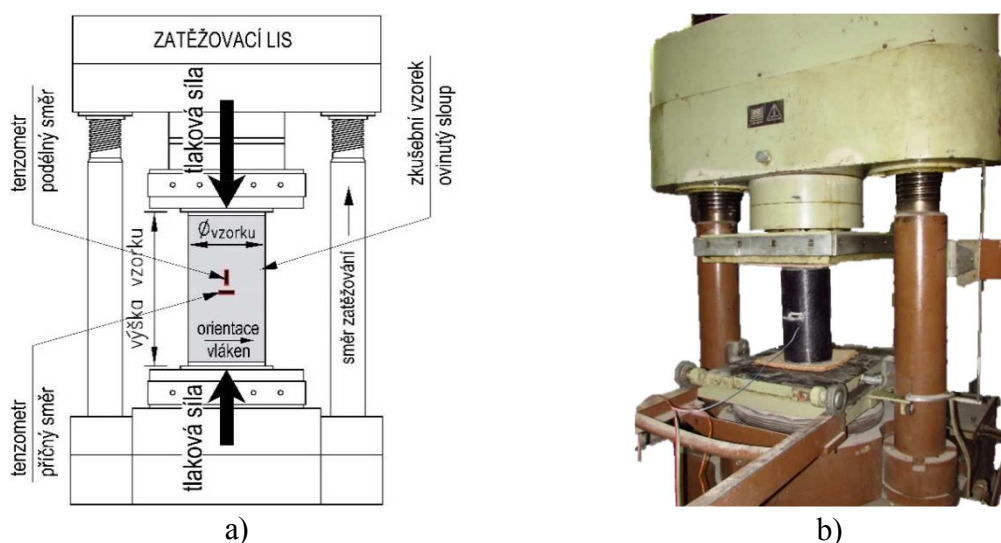
Vzhledem k velikosti vzorku a ke způsobu zatěžování dostředným tlakem byly pro vypovídající záznam chování snímány velikost zatěžovací síly a přetvoření v podélném i v příčném směru. Snímání přetvoření na povrchu betonu i FRP tkaniny zajišťovaly odporové tenzometry (obr. 27). Porovnání měřených přetvoření umožnilo postihnout postupnou aktivaci vláken tkaniny v závislosti na přetvoření prvku. Konfigurace zatěžovací zkoušky je patrná z obr. 28.

<sup>6</sup> primer – polymerní matrice doplněná jemnými vlákny mletého skla či skleněných vloček, která vyplňuje případné menší díry a zároveň zajišťuje funkci přechodového můstku mezi povrchy betonu a tkaniny

<sup>7</sup> doporučená doba vytvrzení lepidla je závislá na okolní teplotě, pro teplotu + 23 °C uvádí výrobce dobu vytvrzení minimálně 7 dnů



**obrázek 27** - Vzorky z prostého betonu a) poloha tenzometrů na povrch betonu; b) zesílení ovinutím včetně osazení tenzometru na povrchu FRP tkaniny



**obrázek 28** - Zatěžovací zkouška sloupů z prostého betonu a) schématické znázornění; b) reálné provedení zkoušky

Chování referenčních vzorků je možné rozdělit do tří fází. V první fázi vykazují lineárně pružné chování (platí zde Hookův zákon) – tzv. stádium do vzniku trhlin. V další fázi vlivem vzniku a rozvoje trhlin dochází ke změně sklonu pracovního diagramu (změkčení průřezu), které je popisováno pružně-plastickým chováním. V poslední fázi po dosažení tlakové pevnosti dochází k porušení prvku (patrně z grafu 1 u vzorku s ozn. Ref.K). Oproti tomu u všech vzorků zesílených ovinutím bylo dosaženo výrazného zvýšení únosnosti a duktility. Počáteční fáze je shodná pro nezesílený i zesílený prvek, ovšem v důsledku příčného tlaku vyvinutého FRP tkaninou dochází u zesíleného vzorku k oddálení vzniku a rozvoje trhlin (změna sklonu pracovního diagramu se projeví později). V další fázi je ovinutí plně aktivní a chování prvku je podmíněno lineárně vzrůstajícím příčným tlakem až do dosažení mezní tahové pevnosti laminátu tkaniny. V této části zesílený prvek vykazuje



lineární chování (patrné z grafu 1 např. u vzorku s ozn. 1K.1). K porušení zesílených vzorků došlo náhlým přetržením FRP tkaniny, kterému předcházely zvuky doprovázející praskání částí laminátu.

Provedením těchto zatěžovacích zkoušek se potvrdil základní předpoklad funkčnosti ovinutí FRP tkaninou s postupným zvyšováním příčného tlaku až do náhlého, křehkého kolapsu prvku. Zesílené vzorky se porušovaly očekávaným způsobem – přetržením laminátu tkaniny, u které byla vlivem příčného tahového namáhání dosažena její mezní tahová pevnost. Po přetržení laminátu tkaniny vykazoval beton v porovnání s referenčními prvky značné porušení. Způsoby porušení nezesíleného a zesíleného vzorku jsou prezentovány na obr. 29.



**obrázek 29** - Způsob porušení krátkého sloupu z prostého betonu a) nezesílený vzorek; b) vzorek zesílený ovinutím laminátem kompozitní tkaniny

V tab. 8 jsou prezentovány výsledky zatěžovacích zkoušek pro uvedené sady vzorků (první symbol v označení vzorku udává počet aplikovaných vrstev laminátu tkaniny, druhý symbol definuje typ sady a poslední symbol značí pořadové číslo vzorku). Přímým porovnáním naměřených dat únosností zesílených vzorků bylo možné postihnout vliv průměru sloupu na účinnost ovinutí. Vzorky sady K (průměr 100 mm) bez ohledu na způsob zesílení dosahovaly cca o 40 % vyšší únosnosti v porovnání se vzorky sady T (průměr 185 mm). Vliv počtu FRP tkanin na účinnost ovinutí byl pozorován porovnáním únosností nezesíleného a zesílených vzorků. Při aplikaci jedné vrstvy FRP tkaniny ovinuté vzorky vykazovaly více než 2,5násobné zvýšení únosnosti, z původních 36,39 MPa vzorky s označením 1K zvýšily svou únosnost v průměru na 93,55 MPa. U vzorků s označením 1T byl dosažen téměř dvojnásobný nárůst únosnosti. V případě aplikace tří vrstev FRP tkaniny

bylo zvýšení únosnosti zesílených vzorků ještě markantnější, v případě vzorků značených 3K se jednalo o 4,34 násobek, resp. o 3,23 násobek pro vzorky s označením 3T.

**tabulka 8 - Vyhodnocení zkoušky krátkých sloupů z prostého betonu**

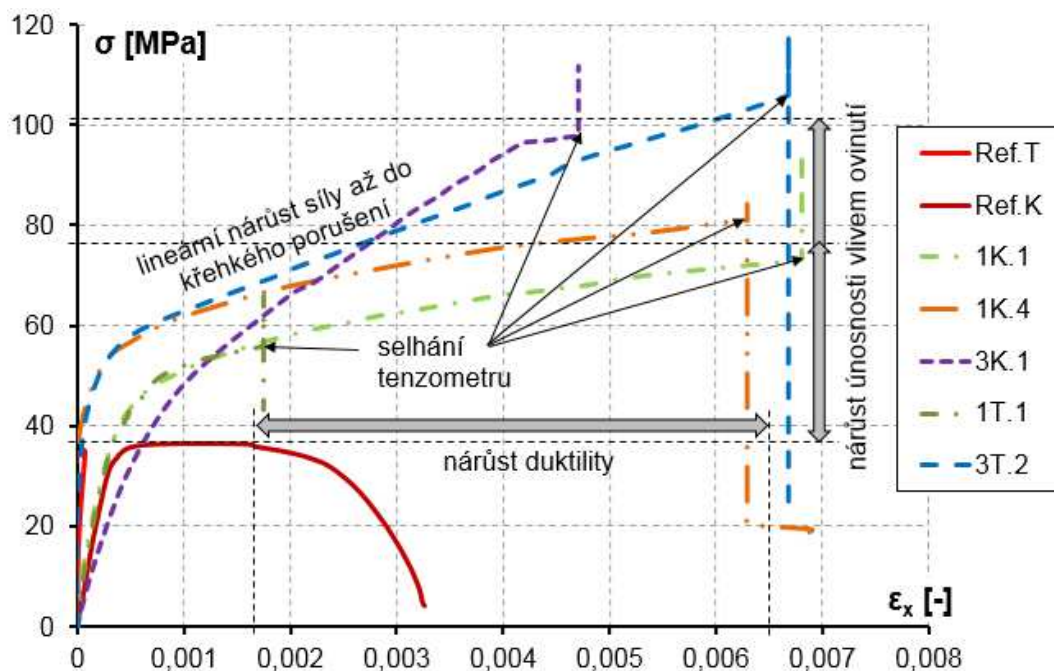
Označení vzorku	Geometrie		Osazení tenzometry			Naměřené hodnoty				Vyhodnocení		
	$h$ [mm]	$\varnothing$ [mm]	$\parallel^B$	$\perp^B$	$\perp^T$	$F_{max}$ [kN]	$\varepsilon_{z,max}$ [-]	$\varepsilon_{x,max}$ [-]	$\varepsilon_{t,max}$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{t,max}$ [MPa]
REF.K	210	100	✓	✓	✗	285,77	-0,0026	0,0039	-	36,39	-	-
1K.1	210	100	✓	✓	✓	733,19	-0,0050	0,0068	0,0076	93,35	93,55	658,87
1K.2	210	100	✗	✗	✓	742,58	-	-	0,0071	94,55		612,04
1K.3	210	100	✗	✗	✗	800,49	-	-	-	101,92		-
1K.4	210	100	✗	✓	✓	662,69	-	0,0063	0,0070	84,38		606,87
3K.1	210	100	✓	✓	✓	1223,74	-0,0050	0,0047	0,0042	155,81	157,91	364,57
3K.2	210	100	✗	✗	✓	1123,63	-	-	0,0067	143,06		578,15
3K.3	210	100	✗	✗	✗	1373,41	-	-	-	174,87		-
REF.T	375	190	✓	✓	✗	1001,54	-0,0005	0,0002	-	35,32	-	-
1T.1	380	185	✓	✓	✓	1772,97	-0,0044	0,0017	0,0076	65,96	67,05	657,10
1T.2	380	185	✗	✗	✓	1731,87	-	-	0,0074	64,43		640,47
1T.3	380	185	✗	✗	✗	1902,20	-	-	-	70,77		-
3T.1	380	190	✗	✗	✓	3076,48	-	-	0,0079	108,51	114,0	682,41
3T.2	380	185	✓	✓	✓	3163,08	-0,0050	0,0067	0,0070	117,67		607,76
3T.3	380	185	✗	✗	✗	3113,41	-	-	-	115,83		-

**Poznámka:**

$\perp$	příčná orientace tenzometru (kolmá na osu prvku)
$\parallel$	podélná orientace tenzometru (rovnoběžná s osou prvku)
✓	značí osazení tenzometru
✗	značí absenci tenzometru
$F_{max}$	maximální tlaková síla
$\varepsilon_{x,max}$	přetvoření betonu kolmo na osu prvku (příčný směr)
$\varepsilon_{z,max}$	přetvoření betonu ve směru osy prvku (podélný směr)
$\varepsilon_{t,max}$	přetvoření tkaniny při přetržení (ve směru vláken)
$\sigma$	průměrná hodnota tlakového napětí
$\sigma_{max}$	tlakové napětí odpovídající $F_{max}$ (únosnost prvku)
$\sigma_{t,max}$	tahové napětí v tkanině
$B$	index značí umístění tenzometru na povrchu betonu

Ovinuté vzorky vykazovaly i značný nárůst duktility, který byl způsoben omezením příčné deformace betonu vlivem přítlaku způsobeného FRP tkaninou (viz graf 1). I když se průřez porušil trhlinami, zůstal „celistvý“ až do přetržení FRP tkaniny (tzn. umožnil přenos napětí v celém průřezu). Vyhodnocení nárůstu duktility nebylo možné na základě výsledků prokázat. Osazené tenzometry neměřily až do kolapsu vzorku, kdy buď došlo k překročení měřící rozsahu ještě před kolapsem vzorku, nebo k jejich odlepení v důsledku vzniku trhliny.

Z tohoto důvodu je porovnání hodnot přetvoření  $\epsilon_x$  mezi referenčním (REF.K) a zesílenými vzorky pouze orientační (interval 1,4 – 1,75násobek hodnoty referenčního vzorku).



**graf 1** - Závislost tlakové síly na příčné (obvodové) deformaci krátkých sloupů z prostého betonu

Společně s experimentálním ověřením chování krátkých sloupů byly pomocí zkoušek dle [44] a [45] zjištěny základní charakteristiky použitého betonu<sup>8</sup>. Zkušební vzorky krychle o hraně 150 mm v počtu 4 ks sloužily ke stanovení pevnosti betonu v tlaku, vzorky trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm v počtu 6 ks byly využity k určení modulu pružnosti. Tyto vlastnosti byly dále využity při matematickém ověření účinků ovinutí a umožnily tak porovnání reálného a predikovaného chování krátkých sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou. Výsledkem této části je stanovení středních hodnot krychlené tlakové pevnosti betonu  $f_{cm}$  a modulu pružnosti v tlaku  $E_{cm}$  uvedených v tab. 9. Oproti požadované třídě betonu C 30/37 je na základě naměřených hodnot provedeno zařazení do kategorie C 40/50.

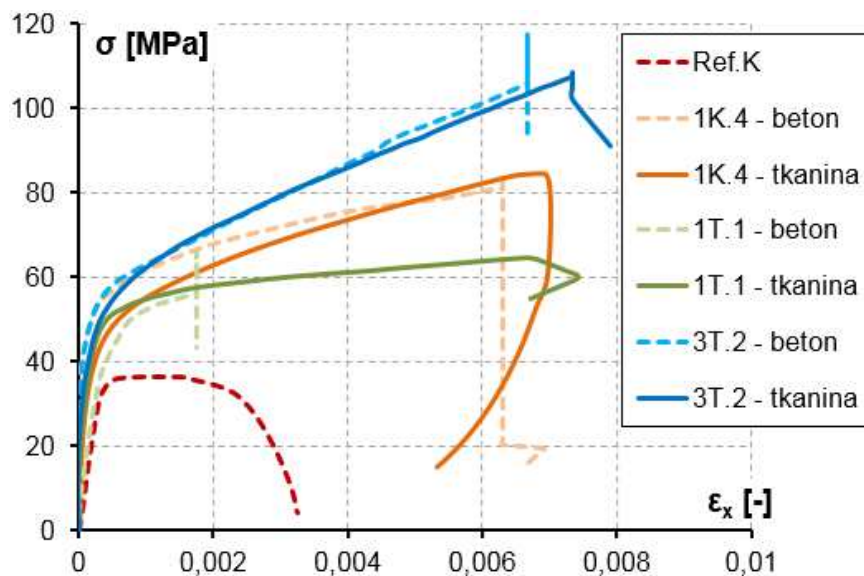
**tabulka 9** - Materiálové charakteristiky betonu krátkých ovinutých sloupů

Vlastnost	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)	49,57	1,55
Modul pružnosti	31,07E+03	2,11E+03

<sup>8</sup> krychlená pevnost betonu v tlaku a statický modul pružnosti byly zjišťovány pro všechny vzorky experimentálního programu. Popis zkoušky a vyhodnocení je provedeno v příloze této práce.

**Provedené experimenty krátkých sloupů z prostého betonu přinesly následující poznatky:**

- základní předpoklad účinnosti zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou byl prokázán na základě zvýšení únosnosti i duktility zesíleného vzorku;
- predikce chování ovinutých sloupů podle [43] není pro použití FRP materiálů dostatečně výstižná, přičemž nerespektuje jejich lineárně-pružné chování. V případě uvážení konstantní velikost příčného tlaku po dosažení definované hodnoty poměrného přetvoření dle [43] již pevnost ovinutého betonu nestoupá. Vyhodnocení experimentů ovšem poukazuje na konstantní zvyšování pevnosti ovinutého betonu v závislosti na rostoucím příčném tlaku až do křehkého selhání přetržením laminátu FRP tkaniny (viz graf 1);
- aktivaci ovinutí, tj. narovnání vláken FRP tkaniny, která se projevu shodným průběhem pracovních diagramu neovinutého a ovinutého betonu, je možné pozorovat přibližně do dosažení únosnosti nezesíleného vzorku (tj. do tlakové pevnosti neovinutého betonu). Poté vlivem ovinutí dochází ke změně průběhu pracovního diagramu betonu – ovinutý beton (viz graf 1). Tyto závěry potvrzuje porovnání přetvoření tkaniny a betonu (viz graf 2), které jsou v počáteční fázi zatěžování přibližně totožné;
- průměr sloupu, stejně jako počet vrstev FRP tkaniny ovlivňují výsledný efekt ovinutí. Průměr sloupu ovlivňuje velikost příčného tlaku působícího po jeho obvodě, kdy s rostoucím průměrem klesá hodnota příčného tlaku a tím i výsledný účinek ovinutí. Počet vrstev tkanin definuje plochu FRP laminátu, tj. s rostoucím počtem vrstev FRP tkaniny se zvyšuje i velikosti působící normálové síly, což zvyšuje účinek ovinutí. Zároveň dochází k nárůstu tuhosti ovinutí, který se projevuje změnou sklonu pracovního diagramu v oblasti plně působícího ovinutí (graf 2). Tyto závěry jsou plně v souladu se vztahem pro výpočet příčného tlaku  $\sigma_t$ ,
- přesné posouzení zvýšení duktility ovinutého prvku nelze s ohledem na naměřená data z tenzometrických snímačů přetvoření provést (neplatné měření v důsledku malého rozsahu snímače, vzniku trhliny v místě osazení tenzometru). Další zatěžovací zkoušky budou využívat i jiného způsobu měření deformací.

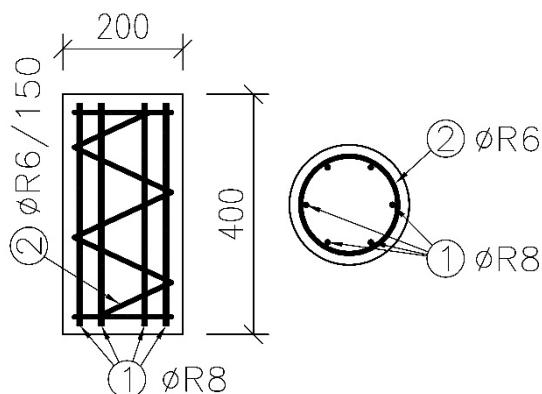


graf 2 - Přetvoření FRP tkaniny a betonu v příčném směru (obvodové přetvoření)

### 5.2.1.2 Zkušební vzorky ze železobetonu

Výzkumný program krátkých sloupů z prostého betonu pro ověření základních předpokladů ovinutí byl následně doplněn o krátké železobetonové sloupy. Zkušební vzorky i provedení zatěžovací zkoušky vycházelo z předchozí části výzkumu, jejíž konfigurace současně umožnila porovnání výstižnosti jednotlivých návrhových vztahů. Krátké železobetonové sloupy tak posloužily dvěma účelům. Ověření chování železobetonového prvku zesíleného ovinutím FRP tkaninou (možnost přímého porovnání účinnosti ovinutí s dostupnými výsledky) a byly také využity při pozdějším matematickém modelování pro porovnání teoretických vztahů s reálným chováním.

Geometrie zkušebních vzorků byla opět volena kruhového průřezu s poměrem výšky k průměru 2:1 (výška vzorku 400 mm, průměr vzorku 200 mm), čímž bylo možné zanedbat vliv štíhlosti ( $\lambda = 8$ ). Vyztužení vzorku z betonářské oceli třídy B 500 tvořilo 6 ks prutové podélné výztuže profilu 8 mm s krytím cca 25 mm a příčná výztuž o průměru prutu 6 mm ve tvaru šroubovice s výškou závitů 150 mm obepínající hlavní nosnou výztuž (geometrie i vyztužení vzorků je patrné z obr. 30). Předpokládaná třída betonu byla volena shodně s předchozími experimenty C30/37.



**obrázek 30** - Geometrie a vyztužení zkušební vzorku železobetonového sloupu

Zkušební vzorky krátkých sloupů vznikly nařezáním vysokých sloupů po jejich odbednění a po provedení povrchové úpravy opískováním. Výroba vzorků, jejich uskladnění i úprava povrchu se prováděla v areálu betonárky Prefa Brno, a.s. (detailněji je tato část popsána v navazující části popisující experimentální ověření chování vysokých sloupů).

**tabulka 10** - Charakteristiky materiálů krátkých železobetonových sloupů

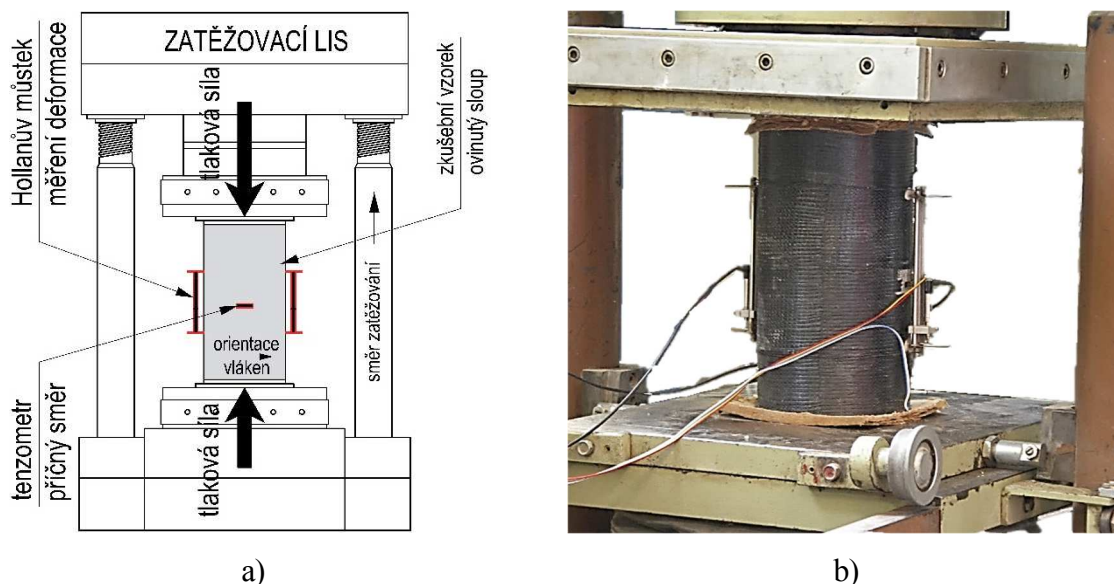
Vlastnost	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
<b>beton C30/37</b>		
<b>Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)</b>	46,449	0,76
<b>Modul pružnosti v tlaku</b>	33,70E+03	1,22E+03
<b>betonářská výztuž<sup>9</sup></b>		
<b>Mez kluzu</b>	574,06	3,54
<b>Mez pevnosti</b>	670,50	2,72
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	199,06E+03	7,67E+03

Celkem bylo vyrobeno 5 ks zkušebních vzorků, z nichž tři byly zesíleny ovinutím a zbylé dva vzorky sloužily jako referenční (nezesílené). Zesílení FRP tkaninou odpovídá vzorku použitému při experimentálním ověření krátkých sloupů z prostého betonu, kdy bylo provedeno plnoplošné ovinutí jednou vrstvou kompozitní tkaniny orientované v příčném směru (umožnilo porovnávat se vzorky z prostého betonu).

Zatěžovací zkouška i snímané veličiny byly totožné jako v případě krátkých sloupů z prostého betonu. Jednalo se o jednorázové centrické zatížení s plynulým nárůstem tlakové síly až do porušení prvku se záznamem síly a odpovídajících deformací. Oproti prvkům z prostého betonu byly podélné deformace na povrchu betonu, resp. FRP tkaniny v případě

<sup>9</sup> popis zkoušky stanovujících základní vlastnosti betonářské oceli jsou blíže popsány v příloze tohoto dokumentu

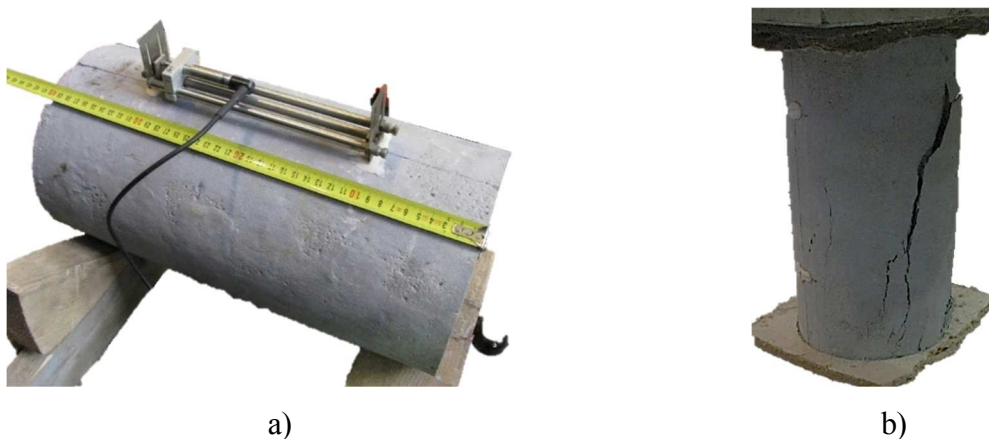
zesílených vzorků snímány na dvou protilehlých místech pomocí osazených Holanových můstků<sup>10</sup> (viz obr. 31). Přetvoření laminátu tkaniny bylo snímáno pomocí odporových tenzometrů, které zaznamenávaly změnu délky obvodu prvku v důsledku stlačení vzorku (protažení po obvodu).



**obrázek 31** - Zatěžovací zkouška krátkých železobetonových sloupů a) schématické znázornění; b) reálné provedení zkoušky

Vyhodnocení naměřených dat poukázalo na příznivý účinek zesílení železobetonových sloupů ovinutých laminátem FRP tkaniny, který se projevil rozdílným chováním referenčních a zesílených vzorků během zatěžování a také odlišným způsobem porušení. Zatímco referenční prvek selhal tlakovým porušením, při kterém došlo k popraskání průřezu (obr. 32), zesílené vzorky se porušily přetržením FRP tkaniny (obr. 33). Ta selhala v okamžiku dosažení tahové pevnosti při značném přetvoření prvku, kdy materiál betonu byl v porovnání s referenčním sloupem více prostoupen trhlinami. Účinek ovinutí se projevil více než dvojnásobným nárůstem únosnosti, kdy vzrostla z původních 34,54 MPa (průměrná hodnota únosnosti referenčních vzorků při odečtení vlivu betonářské výztuže) na hodnotu 75,84 MPa.

<sup>10</sup> snímač posunu (např. mikrometrický úchylkoměr, indukčnostní snímač dráhy apod.) umístěný v posuvném rámečku, který je připevněn (např. přilepením) na měřeném povrchu prvku



**obrázek 32** - Referenční vzorek krátkého železobetonového sloupu a) příprava vzorku; b) způsob porušení



**obrázek 33** - Způsob porušení zesílených vzorků krátkých železobetonových sloupů

Potvrdil se také nárůst duktility prvku, kdy v porovnání s neovinutými vzorky došlo k výraznému nárůstu přetvoření při dosažení maximální únosnosti na téměř čtyřnásobek (z průměrné hodnoty 2,41 ‰ u referenčních vzorků na hodnotu 9,59 ‰ u ovinutých vzorků). U železobetonového prvku bez ovinutí po počáteční lineární fázi dochází vlivem trhlin ke změně směrnice v pracovním diagramu a beton tak přechází do plastického stavu. Prvek je po dosažení limitní únosnosti schopen přenášet zatížení při značném rozvoji trhlin. Přetvoření při kolapsu proto neodpovídá přetvoření při maximální únosnosti. V případě ovinutých prvků je průběh pracovního diagramu do aktivace ovinutí shodný s železobetonovým prvkem, ale po aktivaci dochází k lineárnímu zvýšení únosnosti až do náhlého porušení přetržením FRP tkaniny. Přetvoření při dosažení maximální únosnosti je v případě ovinutého prvku shodné s přetvořením při jeho kolapsu (patrné z grafu 3). Výsledky zatěžovacích zkoušek jsou prezentovány v tab. 11.



tabulka 11 - Vyhodnocení zkoušky krátkých železobetonových sloupů

Označení vzorku	Geometrie		Naměřené hodnoty				Vyhodnocení					
	$h$ [mm]	$\emptyset$ [mm]	$F_{max}$ [kN]	$\varepsilon_{z,odp}$ [-]	$\varepsilon_{z,max}$ [-]	$\varepsilon_{t,max}$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	$s_x$ [MPa]	$\varepsilon_{z,odp,p}$ [‰]	$s_x$ [‰]	$\sigma_t$ [MPa]
REF.1	397	200	1369,45	0,0023	0,0039	-	38,080	34,547	4,996	2,411	0,228	-
REF.2	397	200	1147,47	0,0026	0,0025	-	31,014					-
1S.1	410	200	2538,02	0,0107 <sup>1)</sup>	0,0071 <sup>2)</sup>		75,277	75,843	0,630	9,593	1,077	615,934
1S.2	400	200	2552,31	0,0094 <sup>1)</sup>	0,0046 <sup>2)</sup>		75,731					401,798
1S.3	390	200	2577,14	0,0086 <sup>1)</sup>	0,0062 <sup>2)</sup>		76,522					533,739

**Poznámka:** 1) přetvoření při dosažení maximální únosnosti a při porušení prvku jsou totožné;

2) rozdíly v obvodovém přetvoření tkaniny jsou způsobeny měřicím rozsahem;

$F_{max}$  maximální tlaková síla;

$h$  výška vzorku;

$s_x$  směrodatná odchylka únosnosti vzorků, resp. podélného přetvoření prvků;

$\varepsilon_{t,max}$  obvodové přetvoření tkaniny při porušení (přetržení tkaniny);

$\varepsilon_{z,max}$  přetvoření prvku v podélném směru při porušení prvku;

$\varepsilon_{z,odp}$  přetvoření prvku v podélném směru při dosažení maximální tlakové síly;

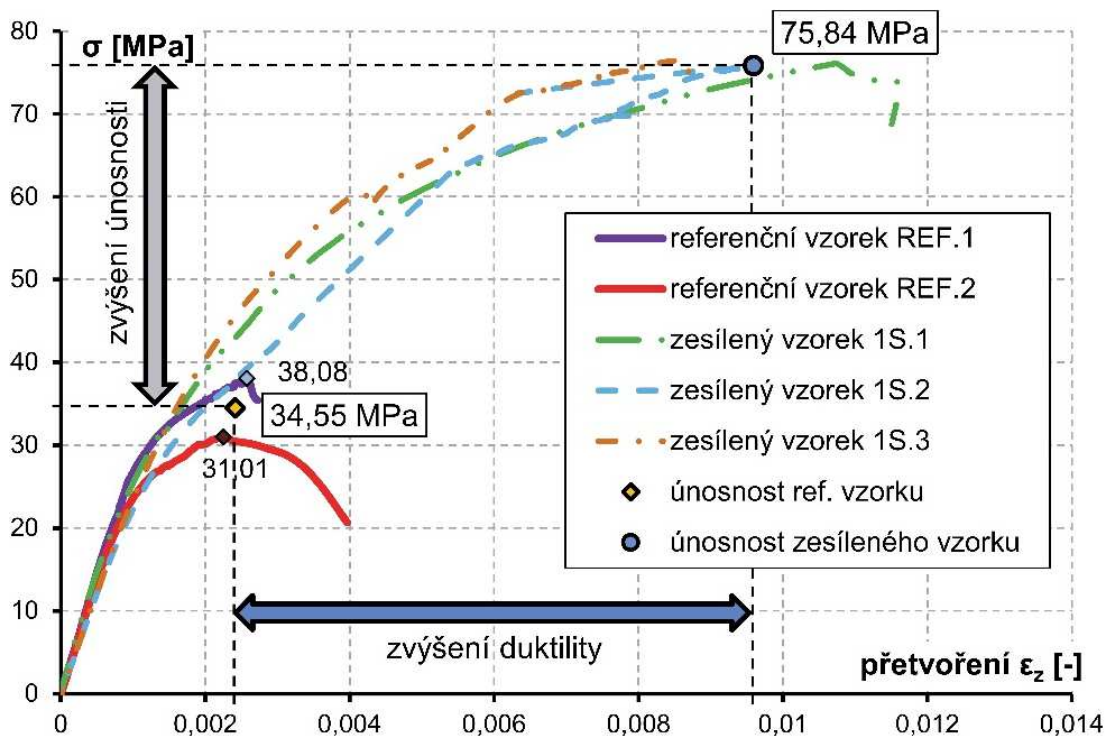
$\varepsilon_{z,odp,p}$  průměrné přetvoření prvku v podélném směru při dosažení maximální tlakové síly;

$\sigma$  průměrná hodnota únosnosti prvků (tlakové napětí);

$\sigma_{max}$  maximální únosnost prvku;

$\sigma_t$  maximální tahové napětí v tkanině při porušení (přetržení tkaniny);

$\emptyset$  průměr prvku.



graf 3 - Pracovní diagram krátkých referenčních a ovinutých železobetonových sloupů

**Experimentální ověření krátkých ovinutých železobetonových prvků přineslo následující poznatky:**

- vyhodnocení železobetonových ovinutých sloupů potvrzuje výsledky krátkých sloupů z prostého betonu, kdy došlo ke značnému nárůstu únosnosti i duktility betonu ovinutého laminátem kompozitní tkaniny. Porušení ovinutých vzorků nastává křehkým selháním přetržením FRP tkaniny, kterému předchází varování v podobě zvuků praskajících částí laminátu.
- na základě měření příčného přetvoření (obvodového přetvoření laminované tkaniny) během zatěžování byla stanovena hodnota přetvoření tkaniny při porušení zkušebních vzorků. Jejím porovnáním s limitním přetvořením vzorků laminátu získaných z tahových zkoušek byl potvrzen základní předpoklad o nižší hodnotě přetvoření při porušení přetržením FRP tkaniny ovinuté kolem prvku. Tento rozdíl je způsoben odlišným namáháním laminátu tkaniny, kdy oproti čistému tahu dochází v případě FRP tkaniny aplikované na povrchu sloupu i ke smykovému namáhání na kontaktu s povrchem vzorku. Dochází tak k víceosému namáhání, které způsobuje pokles užitečných vlastností laminátu (vysvětlení viz kapitola 3.2.1);

### **5.2.2. Vysoké ovinuté sloupy**

Poslední část experimentálního programu navazovala na studium chování krátkých sloupů a svou náplní rozšiřovala oblast poznání řešené problematiky. Oproti převážné většině provedených experimentů bylo sledováno chování nejen dostředně zatíženého prvku. Díky vhodné konfiguraci zatěžovací zkoušky bylo možné popsat chování prvku přecházejícího ze zcela tlačného průřezu až po průřez s výraznou taženou částí. Cílem zatěžovacích zkoušek bylo stanovit účinek ovinutí FRP tkaninou u vysokých štíhlých prvků, postihnout vliv štíhlosti sloupu a popsat chování přes takřka celý interakční diagram. Zkušební vzorky tvořily vysoké železobetonové sloupy, které pro možnost porovnání a extrapolaci dosažených výsledků svou geometrií (kromě výšky), použitými materiály, způsobem vyztužení i provedením zesílení odpovídaly prvku použitému při studiu krátkých železobetonových sloupů.

Zkušební vzorek představoval sloup kruhového průřezu o průměru 200 mm a výšce 2900 mm<sup>11</sup> z betonu třídy C30/37 (štíhlost  $\lambda = 58$ ). Vyztužení prvku tvořilo šest prutů podélné výztuže o průměru 8 mm, příčnou výztuž ve tvaru šroubovice se stoupáním cca 100 a 150 mm pak tvořil prut o průměru 6 mm (ocel třídy B 500). Proměnné stoupání příčné výztuže bylo provedeno z důvodu koncentrace napětí v hlavě a patě sloupu, kde byla zvolena šroubovice s nižším stoupáním (viz obr. 34). Zesílení sloupů bylo provedeno příčně orientovanou CFRP tkaninou SikaWrap – 600 C/120 v celé ploše. Díky různému uspořádání FRP tkaniny bylo možné experimentálně ověřit vliv orientace vláken a počtu vrstev FRP tkaniny.

Vzhledem k výše popsaným cílům bylo nejdříve nutné definovat způsob zesílení a uspořádání zatěžovacích zkoušek, ze kterých bylo usuzováno na potřebný počet zkušebních vzorků. V případě způsobu zesílení ovinutím tkaninou byly voleny tyto varianty:

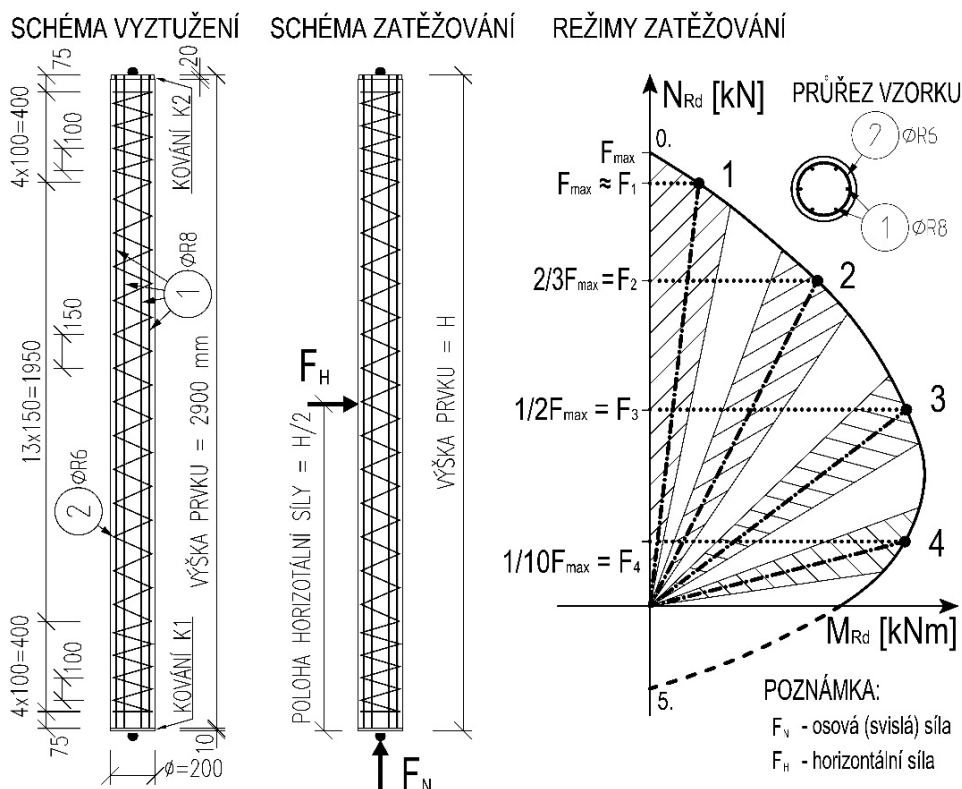
- vlákna orientovaná v příčném směru – působící jen v oblasti převládajícího tlaku;
- vícevrstvá aplikace FRP tkaniny orientované v příčném v celé – působí jen v oblasti převládajícího tlaku;
- vlákna orientovaná v příčném i v podélném směru (obousměrné působení FRP tkaniny) – působí jak tlaku, tak i v oblastech s dominantní složkou ohybového namáhání.

Pro dostatečný popis chování ovinutých sloupů byly zvoleny čtyři režimy zatěžování kombinací normálové síly a ohybového momentu, které postihovaly oblasti tlakového i ohybového porušení (patrné z obr. 34). Intenzity zatížení při zatěžovacích zkouškách vycházely z provedené teoretické studie chování prvků a byly stanoveny v těchto hodnotách:

- $F_1 = F_{max}$  – zatěžování normálovou tlakovou osovou silou až do porušení, při kterém je celý průřez tlačný (teoreticky odpovídá bodu 0. na interakčním diagramu, tj. dostředný tlak);
- $F_2 = 2/3.F_{max}$ ;  $F_3 = 1/2.F_{max}$ ;  $F_4 = 1/10$  až  $1/12.F_{max}$  – zatěžování kombinací tlakové síly a ohybového momentu. Kde  $F_i$  představují požadovanou úroveň tlakové síly, po jejímž dosažení je vzorek zatěžován ohybovým namáháním až do porušení.

---

<sup>11</sup> návrh vzorku byl volen s ohledem na možnosti zkušební laboratoře fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, kdy zatěžovací rám definoval maximální zatížitelnost a také výšku prvku.



**obrázek 34 - Geometrie, vyztužení a režimy zatěžování zkušební vzorku vysokého železobetonového sloupu**

Zvolené režimy zatěžování, kromě posledního  $F_4$ , zastupují častější výskyt kombinace zatížení sloupů v reálných aplikacích, kdy tyto prvky dominantně přenáší tlaková zatížení s menší intenzitou ohybového namáhání. Celkem bylo ve spolupráci s firmou Prefa Brno, a.s. vyrobeno 23 ks zkušebních vzorků. 19 ks bylo zhotoveno z betonu C30/37, zbylé 4 ks byly zhotoveny z betonu C55/67 (viz tab. 12). Provedení vzorků z běžného a vysokopevnostního betonu umožnilo porovnat i vliv pevnosti betonu na účinnost zesílení ovinutím kompozitní tkaninou<sup>12</sup>. Výroba vzorků se uskutečnila ve svislé poloze do papírového bednění. Po umístění armokošů, které byly pro osazení kotevních desek v hlavě a v patě vzorku opatřeny kováním, byla provedena vlastní betonáž (viz obr. 35 až obr. 37). Betonáž vzorků z běžného betonu byla z kapacitních důvodů míchačky rozdělena do dvou částí (z každé směsi betonu byly současně zhotoveny zkušební vzorky krychlí a trámů pro stanovení materiálových charakteristik). Povrch sloupů po odbednění bylo nutné pro zajištění dostatečné soudržnosti mezi betonem a lepenou tkaninou upravit opískováním (proběhlo

<sup>12</sup> Porovnání vlivu pevnosti betonu bylo možné provést na základě výsledků zatěžovacích zkoušek.

cca měsíc a půl od betonáže). Přibližně po třech měsících od betonáže byly vzorky převezeny k zesílení.

*tabulka 12 - Materiálové charakteristiky betonu vysokých železobetonových sloupů*

Vlastnost	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
<b>beton C30/37 – směs I</b>		
Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)	46,449	0,76
Modul pružnosti v tlaku	33,70E+03	1,22E+03
<b>beton C30/37 – směs II</b>		
Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)	51,952	3,05
Modul pružnosti v tlaku	34,37E+03	1,16E+03
<b>beton HPC (C55/67) – směs III</b>		
Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)	72,121	3,24
Modul pružnosti v tlaku	40,33E+03	0,91E+03



a)



b)

*obrázek 35 - Výroba zkušebních vzorků – a) vyztužení sloupů; b) osazení tenzometrů na výztuži*

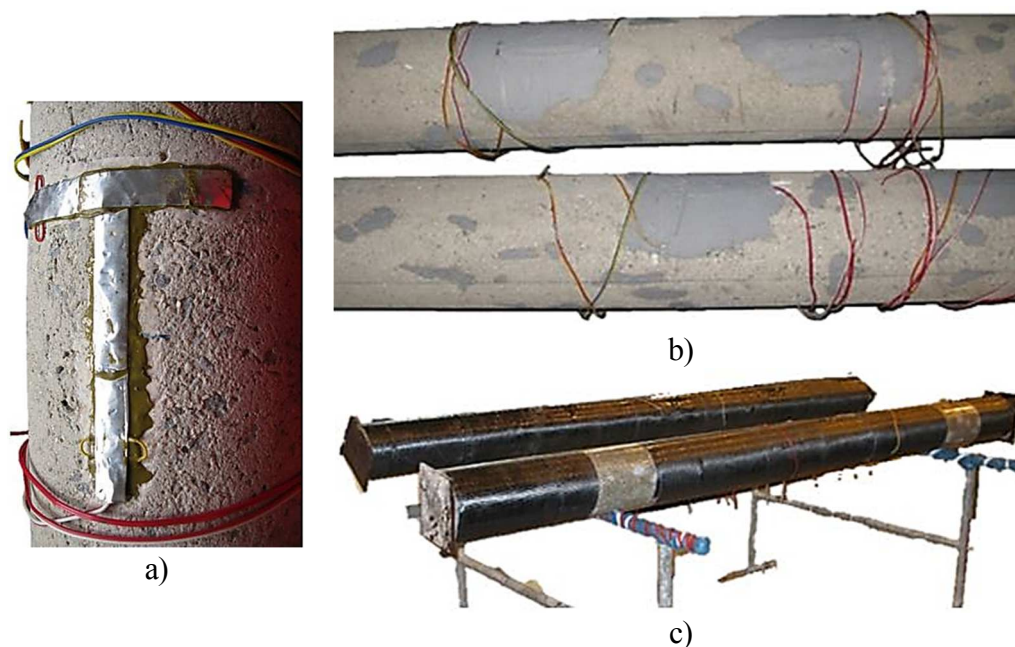


*obrázek 36 - Výroba zkušebních vzorků – pohled na papírové bednění včetně umístění armokoše*



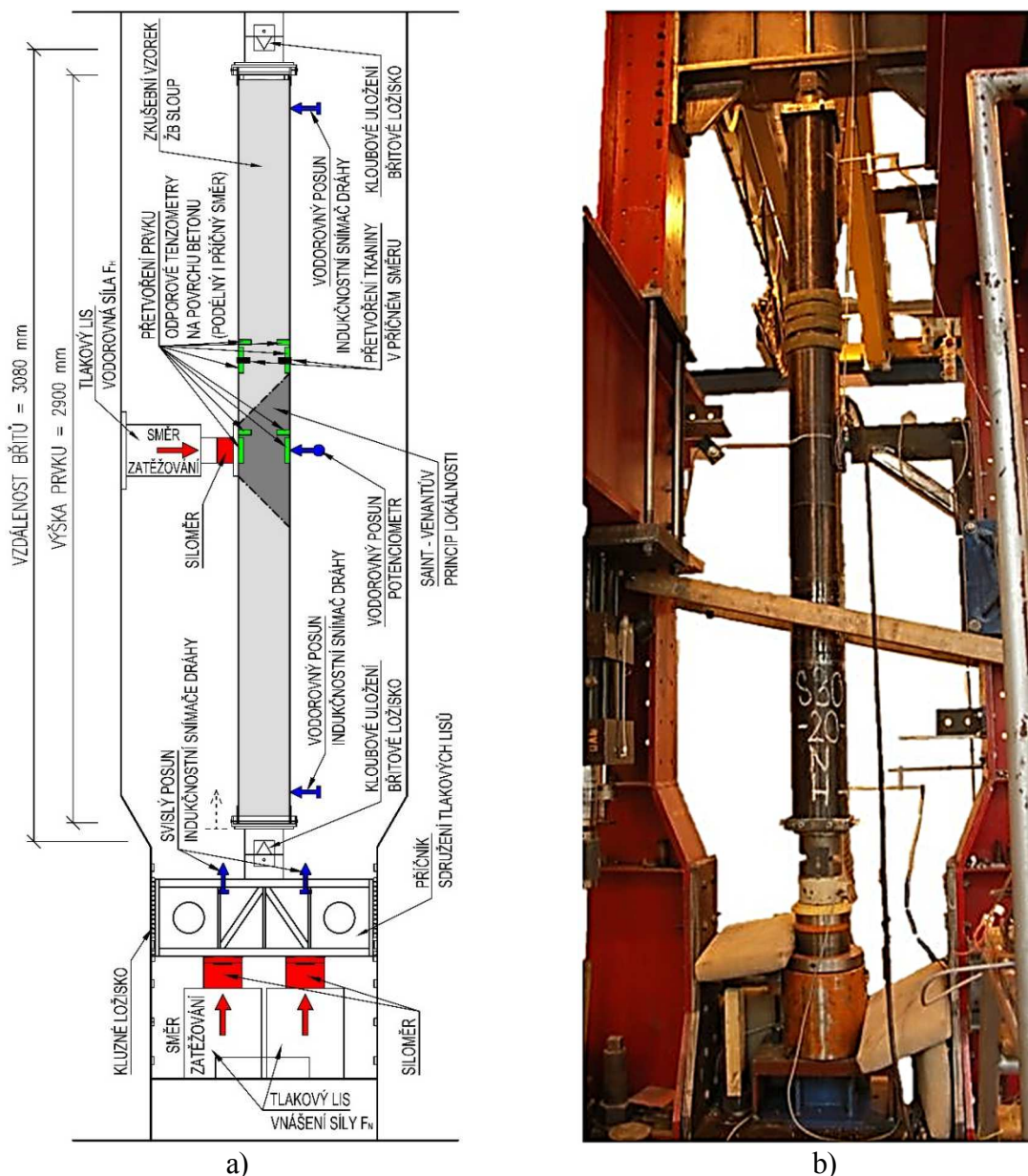
**obrázek 37** - Výroba zkušebních vzorků – a) odbednění; b) pohled na vyrobené vzorky

Příprava povrchu a postup zesílení je popsán již u krátkých sloupů (patrné z obr. 38), a proto zde není podrobněji uveden. Před zesilováním bylo nutné opatřit vzorky kotevními deskami, které byly po vycentrování přivařeny ke kování armokoše. Zesilování probíhalo mokrým procesem po jednotlivých páslech tkaniny bez nutnosti jejich vzájemného překrytí. Protože výrobní postup umožňuje aplikaci dalších vrstev teprve po vytvrdnutí poslední lepené vrstvy, doba zesílení vzorku se v závislosti na jeho variantě pohybovala od dvou do sedmi dnů (v případě vícevrstvé aplikace FRP tkaniny).



**obrázek 38** - Zesílení zkušebních vzorků – a) osazení tenzometrů na povrchu betonu;  
b) příprava povrchu – zapravení kaveren a nerovností vlivem tenzometrů;  
c) zesílení tkaninou

Konfigurace zatěžovací zkoušky (obr. 39) umožňovala zatěžování kombinací tlakové síly a ohybového momentu. Osová tlaková síla byla vnášena v patě sloupu pomocí hydraulického válce (maximální velikost tlakové síly při sdružení dvou hydraulických válců byla 4 MN). Namáhání ohybovým momentem simulovalo zatěžování vertikálně působící tlakovou silou umístěnou v polovině výšky zkušebních vzorků (kolmo na podélnou osu prvku).



**obrázek 39** - Zatěžovací zkouška – a) schematické provedení; b) reálné provedení

Zatěžovací zkouška probíhala v silovém režimu, tzn. sestávala z jednorázového postupného zvyšování síly po krocích až do porušení. Velikost kroku byla volena na 100 kN s časovou prodlevou cca minuty mezi kroky pro ustálení vnášených deformací. V případě

kombinovaného namáhání byla nejprve po krocích dosažena úroveň tlakové síly, teprve potom byla plynule vnášena síla působící ve vertikálním směru až do selhání vzorku. Při aplikaci horizontální síly bylo nutné dorovnávat úbytek tlakového namáhání v důsledku vodorovné deformace vzorku. Eliminace nežádoucích excentricit byla provedena jednak vycentrováním vzorků ve zkušebním rámu a také jejich uložením na obou koncích prostřednictvím břitových ložisek. Kloubové uložení umožnilo prvku při namáhání pouze normálovou silou vybočit v rovině kolmé na osu břítu, resp. společně s horizontální silou vzorku definovaly směr vybočení. Toto provedení usnadnilo záznam deformací a následné vyhodnocení zkoušky.

Pro detailní popis chování ovinutých sloupů během zatěžování byly snímány velikosti vnášených sil, svislý a vodorovné posuny v definovaných bodech po výšce zkušebního prvku pomocí indukčnostních snímačů dráhy (v blízkosti uložení sloupu), resp. prostřednictvím potenciometrického snímače (uprostřed výšky sloupu). Dále bylo u vybraných vzorků odporovými tenzometry zaznamenáváno přetvoření na povrchu betonu v příčném i podélném směru ve dvou výškových úrovních (v polovině výšky prvku a 350 mm nad středem prvku). Stejným způsobem bylo sledováno také přetvoření podélné výztuže (poloha jednotlivých snímačů je patrná z obr. 39). Pro snímání aktivace tkaniny a jejího postupného přetváření byl u vybraných vzorků osazen tenzometr přímo na povrchu tkaniny ve směru vláken (snímání obvodového přetvoření v příčném směru na osu prvku).

V závislosti na očekávaném přínosu zesílení ovinutím FRP tkaninou byl volen různý počet zkušebních vzorků v dané sérii, které byly charakterizovány kombinací typu zesílení ovinutím a režimem zatížení (např. vzorky s vícevrstvou aplikací příčné tkaniny byly zatěžovány pouze centrickým tlakem). Pro porovnání účinků ovinutí byl ponechán 1 ks sloupu od každé třídy betonu bez zesílení, tyto sloužily jako referenční vzorek. Přehled zkušebních vzorků s popisem způsobu zesílení a režimu zatěžování je uveden v tab. 13.



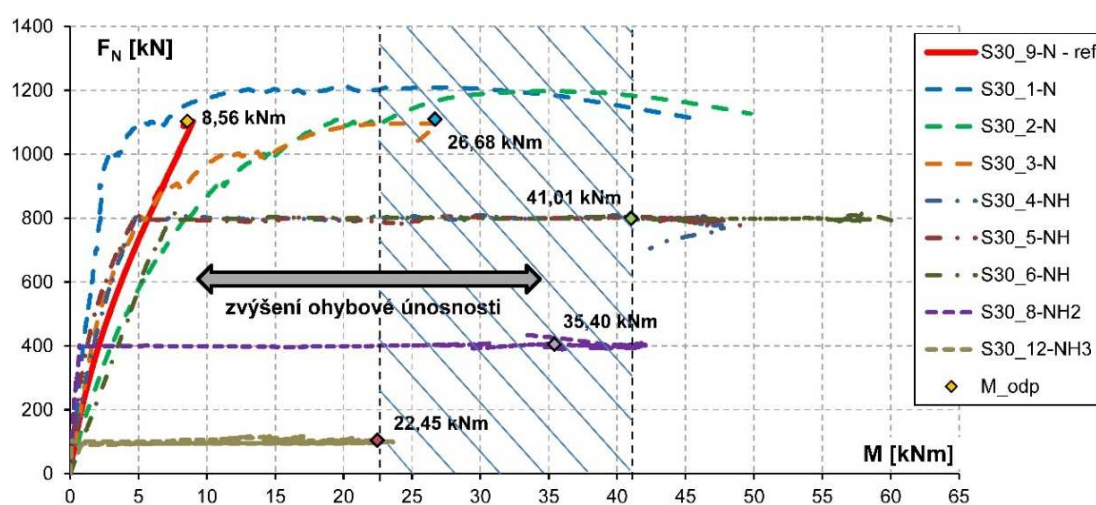
tabulka 13 - Konfigurace zkušebních vzorků vysokých sloupů

Ozn. vzorku	Betonová směs	Typ zesílení	Režim zatěžování
S30_7-N	HPC - III	-	1. $F_N$
S30_9-N	C30/37 - I	-	1. $F_N$
S30_1-N	C30/37 - II	1x příčná	1. $F_N$
S30_2-N	C30/37 - II	1x příčná	1. $F_N$
S30_3-N	C30/37 - II	1x příčná	1. $F_N$
S30_4-NH	C30/37 - II	1x příčná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_5-NH	C30/37 - I+II	1x příčná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_6-NH	C30/37 - II	1x příčná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_8_NH2	C30/37 - I+II	1x příčná	3. $1/2F_N \rightarrow F_H$
S30_12_NH3	C30/37 - I	1x příčná	4. $1/10F_N \rightarrow F_H$
S30_10_NH	C30/37 - I	příčná+podélná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_11_NH	C30/37 - I	příčná+podélná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_14_NH	C30/37 - II	příčná+podélná	2. $2/3F_N \rightarrow F_H$
S30_13_NH2	C30/37 - I	příčná+podélná	3. $1/2F_N \rightarrow F_H$
S30_15_NH2	C30/37 - I	příčná+podélná	3. $1/2F_N \rightarrow F_H$
S30_18_NH2	C30/37 - II	příčná+podélná	3. $1/2F_N \rightarrow F_H$
S30_19_NH3	C30/37 - I+II	příčná+podélná	4. $1/10F_N \rightarrow F_H$
S30_20_NH3	C30/37 - I	příčná+podélná	4. $1/10F_N \rightarrow F_H$
S30_16_N	C30/37 - II	3x příčná	1. $F_N$
S30_17_N	C30/37 - I+II	3x příčná	1. $F_N$
HPC_21_NH	HPC - III	3x příčná	5. $F_{N,HPC} \rightarrow F_H$
HPC_22_NH	HPC - III	3x příčná	5. $F_{N,HPC} \rightarrow F_H$
HPC_23_NH	HPC - III	3x příčná	5. $F_{N,HPC} \rightarrow F_H$

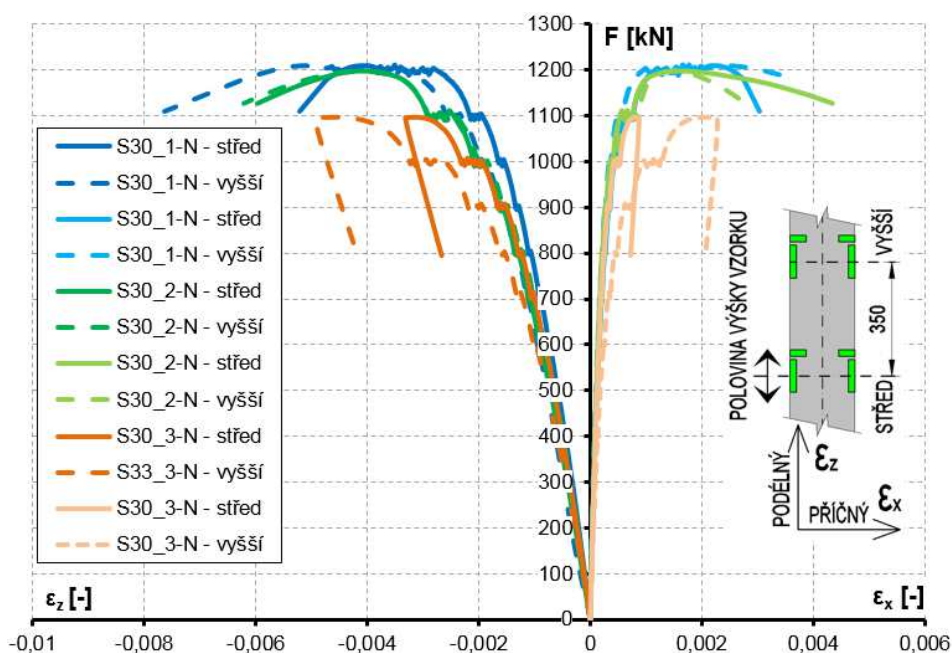
**Poznámka:** S30; HPC - označení použité betonové směsi  
*n* - pořadové číslo zkušebního vzorku (S30\_*n*-N - např. S30\_7\_N);  
*N*; *NH<sub>i</sub>* - režim namáhání, *N* - pouze normálová síla (režim  $F_1$ )  
, *NH<sub>i</sub>* - kombinace *N*+horizontální síly (režimy  $F_2$ - $F_4$ )

Chování vysokých sloupů ovlivnila jejich štíhlost, kdy se účinek ovinutí neprojevil v takové míře, jako tomu bylo v případě krátkých sloupů. Přímé porovnání únosnosti prvku bylo možné provést pouze pro centrické zatížení tlakovou silou (režim  $F_1$ ). Referenční prvek betonu normální pevnosti se porušil při tlakové síle 1105 kN. Průměrná únosnost série vzorků zesílených jednou vrstvou příčné tkaniny byla 1168 kN, což znamená navýšení únosnosti pouze o 5,7 %. U vzorku S30\_3-N došlo oproti ostatním vzorkům série k selhání při nižší úrovni zatížení o cca 100 kN, což významně ovlivnilo statistické vyhodnocení celkového příspěvku únosnosti vzorků zesílených tkaninou. Při vyřazení tohoto vzorku z vyhodnocení by se nárůst únosnosti vlivem ovinutí zvýšil na 8,9 % (průměrná únosnost 1204 kN). Srovnání únosností, resp. duktility sloupů ovinutých jednou vrstvou příčně orientované tkaniny je zobrazeno na grafech 4 a 5. V případě série vzorků zesílených třemi vrstvami

příčné tkaniny nebylo možné z důvodu nízkého počtu vzorků provést statistické vyhodnocení. Navíc tyto vzorky vykazovaly značný rozdíl v únosnostech, kdy se u vzorku S30\_16-N zesílení ovinutím na únosnosti vůbec neprojevovalo. Při uvažování hodnoty únosnosti vzorku S30\_17-N, který se porušil při 1320 kN, došlo při porovnání s referenčním vzorkem k navýšení o 19,4 %. V daleko větší míře se ovinutí prvku projevilo v maximální vybočení vzorku při kolapsu. Referenční prvek vlivem působení tlakové síly vykazoval vybočení okolo 4,8 mm (vybočení střednice prvku v horizontálním směru), zatímco u zesílených vzorků došlo k výraznějšímu vybočení okolo 20 mm (jednovrstvé zesílení), resp. 12 mm (třívrstvé zesílení). Z porovnání je patrné duktilnější chování zesílených prvků.



graf 4 - Únosnost zkušebních vzorků zesílených jednou příčnou vrstvou tkaniny v různých režimech zatěžování



graf 5 - Přetvoření zkušebních vzorků v podélném i příčném směru ve dvou úrovních

Ostatní vzorky vysokých sloupů reprezentujících různé způsoby působení průřezu a varianty zesílení nebylo možné přímo porovnat s chováním nezesíleného vzorku. Toto porovnání by znamenalo výrobu většího počtu referenčních (nezesílených) vzorků, nebo omezilo rozsah provedených zesílených sloupů a tím i celého výzkumu. Referenční prvky byly podrobeny pouze centrickému tlaku, chování prvků v dalších režimech namáhání bylo predikováno pomocí podmínek spolehlivosti průřezu v kapitole 6.3.3 a znázorněno interakčním diagramem zpracovaným v kapitole 6.4. Vliv způsobu zesílení a zatížení je proto provedeno vzájemným porovnáním jednotlivých sérií zkušebních vzorků.

Vliv podélně orientované tkaniny byl sledován prostřednictvím vzorků zesílených vrstvami FRP tkaniny působícími v podélném i v příčném směru (obousměrné působení). Podle očekávání došlo v porovnání se vzorky zesílenými pouze příčně orientovanou vrstvou FRP tkaniny ke zvýšení ohybové únosnosti<sup>13</sup>. Díky podélné vrstvě FRP tkaniny byly vzorky schopné odolávat vyšším intenzitám horizontálních sil ve všech režimech zatížení ( $F_2$  až  $F_4$ ). V režimu zatěžování  $F_2$ , kdy je horizontální síla vnášena po dosažení přibližně 2/3 únosnosti zesílených vzorků ( $F_{max}$ ), došlo k navýšení ohybové únosnosti o 26 % (zvýšení z původních 41,01 kNm pro vzorky zesílené příčně orientovanou FRP tkaninou na hodnotu 51,72 kNm). Třetí vzorek vykazoval značně vyšší únosnost (okolo 75 kNm) a proto nebyl zahrnut do vyhodnocení. V případě jeho započítání by se ohybová únosnost zvýšila o 45 %. U režimu zatěžování  $F_3$  (horizontální síla vnášena po dosažení 50 %  $F_{max}$ ) bylo pozorováno navýšení ohybové únosnosti vlivem podélně orientované FRP tkaniny o 35 % (z původních 35,4 kNm došlo k navýšení na 51,13 kNm). Třetí vzorek opět vykazoval výrazně vyšší únosnost (okolo 70 kNm) a proto byl opět z vyhodnocení vyřazen. V případě započítání by došlo k navýšení o cca 61 %. Vyhodnocení je kvůli značnému rozptylu dosažených výsledků pouze orientační. Režim zatížení  $F_4$  (horizontální síla vnášena po dosažení  $1/10 \cdot F_{max}$ ) korespondoval s výsledky předchozích testů, kdy došlo k navýšení ohybové únosnosti na více jak dvojnásobek (z hodnoty 22,45 kNm pro příčně působící FRP tkaninu na 47,81 kNm při obousměrném působení tkaniny).

Zkušební vzorky z vysokopevnostního betonu (ozn. HPC) byly z důvodu kapacity zatěžovacího rámu zatěžovány pouze kombinací normálové síly a ohybového momentu.

---

<sup>13</sup> ohybová únosnost sloupu byla stanovena na základě velikosti maximální horizontální síly a odpovídajícího vybočení uprostřed sloupu. Při stanovení ohybového momentu byly odečteny nepřesnosti v uložení sloupu, jeho počáteční křivost a také nepřesnosti při provádění, kdy poloha výztuží byla změřena po porušení vzorku po jeho rozřezání.

Uspořádání i provedení zatěžovací zkoušky bylo totožné jako u předchozích vzorků z běžného betonu (ozn. S30). Úroveň tlakového namáhání pro počátek zatěžování horizontální silou byla vzhledem k absenci zatěžovacího režimu  $F_1$  („centrický tlak“) u zesíleného vzorku stanovena na základě analytické studie hodnotou 2000 kN. Správnost řešení byla ověřena pomocí únosnosti referenčního vzorku. Vliv pevnosti betonu na výsledný účinek ovinutí lze stanovit na základě porovnání chování zesílených sloupů z běžného a vysokopevnostního betonu. Protože odlišný režim zatěžování neumožňuje přímé porovnání výsledků, je porovnání provedeno opět na základě ohybové únosnosti (příp. srovnání vybočení uprostřed prvku). Zkušební vzorky z HPC betonu při porovnání s referenčních vzorkem vykazovaly přibližně dvojnásobnou ohybovou únosnost. U vzorků zhotovených z nižší pevnostní třídy betonu byl tento nárůst přibližně trojnásobný. Funkčnost zesílení ovinutím FRP tkaninou je ověřena zahrnutím výsledků zatěžovacích zkoušek do predikované únosnosti sloupů vyjádřené formou interakčního diagramu (prezentováno v kapitole 6.4). Celkový přehled dosažených výsledků je uveden v tab. 14.

**tabulka 14 - Vyhodnocení zkoušky krátkých železobetonových sloupů**

Označení vzorku	$F_{N,max}$ [kN]	$F_H$ [kN]	$F_{N,odp}$ [kN]	$\varepsilon_{z,max}$ [-]	$\varepsilon_{L,max}$ [-]	$x_{stř,odp}$ [mm]	$M_{odp}$ [kNm]	$F_{N,max,p}$ [kN]	$s_x$ [kN]	$F_{H,p}$ [kN]	$s_x$ [kN]	$M_{odp,p}$ [kNm]	$s_x$ [kNm]
S30_9-N	1105,86	-	1103,66	0,00249	-	4,84	<b>8,56</b>	8,98	→ maximální ohybová únosnost <sup>1)</sup>				
S30_1-N	1211,34	-	1109,54	0,00475	0,00236	19,60	20,31	1168,70	62,61	-	-	<b>26,68</b>	7,69
S30_2-N	1197,94	-	1127,08	0,00386	-	38,30	35,22						
S30_3-N	1096,82	-	1095,35	0,00356	-	20,70	24,51						
S30_4-NH	809,82	26,67	800,80	0,00237	0,00017	18,83	37,20	813,07	6,48	27,99	4,96	<b>41,01</b>	6,67
S30_5-NH	808,85	23,83	799,41	0,00276	-	22,86	37,12						
S30_6-NH	820,53	33,48	798,38	0,00228	-	21,78	48,71						
S30_8_NH2	457,70	32,93	405,91	0,00164	0,00026	27,19	<b>35,40</b>	42,20	→ maximální ohybová únosnost <sup>1)</sup>				
S30_12_NH3	117,41	24,85	105,33	0,00031	0,00012	39,96	<b>22,45</b>	23,89	→ maximální ohybová únosnost <sup>1)</sup>				
S30_10_NH	815,56	49,14	792,91	0,00371	-	47,21	75,15	815,19	0,34	38,04	9,87	<b>59,53</b>	14,20
S30_11_NH	814,89	34,71	791,73	0,00263	-	31,22	56,05						
S30_14_NH	815,13	30,26	791,78	0,00297	0,00036	30,22	47,39						
S30_13_NH2	415,35	53,17	395,31	0,00141	-	70,35	68,30	431,74	21,37	51,36	3,16	<b>56,86</b>	10,15
S30_15_NH2	455,90	47,71	399,88	0,00280	-	31,18	48,92						
S30_18_NH2	423,96	53,19	401,65	0,00239	0,00011	33,36	53,36						
S30_19_NH3	106,97	51,27	99,28	0,00026	0,00003	32,32	42,04	106,75	0,31	58,82	10,68	<b>47,81</b>	8,16
S30_20_NH3	106,53	66,38	81,21	0,00025	-	59,31	53,58						
S30_16_N	1102,79	-	1011,65	0,00488	-	27,28	31,95	1211,59	153,88	-	-	<b>28,13</b>	5,41
S30_17_N	1320,40	-	1307,94	0,00421	0,00054	12,19	24,31						
S30_7-N	1721,07	-	1718,41	0,00389	-	7,16	<b>12,26</b>						
HPC_21_NH	2018,49	23,0	1963,06	0,00137	-	9,43	53,65	2026,86	7,67	14,59	8,09	<b>55,64</b>	7,75
HPC_22_NH	2033,54	6,874	1988,58	0,00274	-	17,67	64,20						
HPC_23_NH	2028,56	13,908	1993,89	0,00287	0,00147	15,98	49,08						

**Symboly použité v tabulka 14:**

- 1) maximální ohybová únosnost prvku bez ohledu na dosažení  $F_{H,max}$ ;
- $F_H$  maximální tlaková síla působící v horizontálním směru (simulace ohybového namáhání);
- $F_{H,p}$  průměrná hodnota maximální tlakové síly působící v horizontálním směru;
- $F_{N,max}$  maximální tlaková síla působící ve svislém směru;

$F_{N,max,p}$  průměrná hodnota maximální tlakové síly působící ve svislém směru;

$F_{N,odp}$  tlaková síla ve svislém směru při dosažení  $F_H$  (maximální ohybové namáhání);

$M_{odp}$  ohybová únosnost prvku při dosažení  $F_H$ ;

$M_{odp,p}$  průměrná hodnota ohybové únosnosti prvku při dosažení  $F_H$ ;

$s_x$  směrodatná odchylka veličiny předcházejícího sloupce;

$x_{stř,odp}$  průhyb uprostřed prvku po odečtení odchylek v hlavě a patě při dosažení  $F_H$ ;

$\epsilon_{t,max}$  maximální poměrné přetvoření FRP tkaniny v příčném směru (protážení po obvodu);

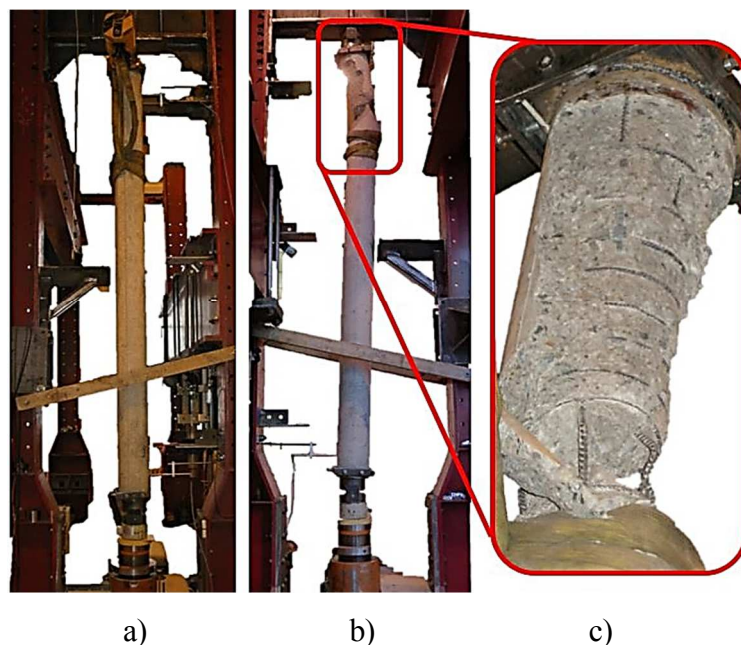
$\epsilon_{z,max}$  maximální poměrné přetvoření ve svislém směru (zkrácení).

### **Závěry vyplývající z výsledků zkoušek vysokých železobetonových sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou:**

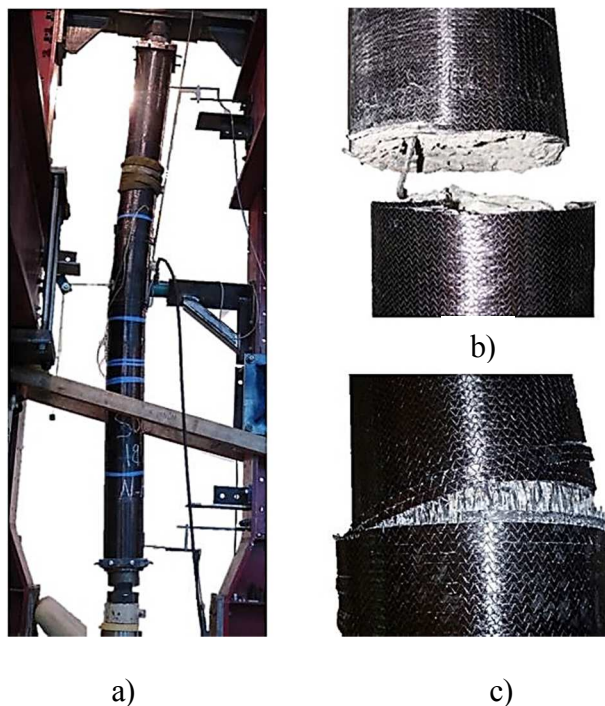
- účinnost zesílení sloupu ovinutím byla prokázána i v případě vysokých sloupů, u kterých v důsledku štíhlosti došlo ke značnému snížení příznivého efektu ovinutí. Vysoké sloupy jsou oproti krátkým sloupům namáhány kombinací tlakové síly s výrazným podílem ohybového namáhání, což vede ke stabilitnímu selhání. Větší či menší část průřezu je tažena, a proto zde není tkanina zcela využita. Tím dochází k redukci příčného tlaku a ke snížení nárůstu únosnosti vlivem ovinutí. Nelze dosáhnout tlakového porušení odpovídající centrickému namáhání, resp. porušení blízké bodu 0. interakčního diagramu. Kromě mírného zvýšení únosnosti a tuhosti zesíleného prvku se ovinutí projevilo především v podstatném nárůstu duktility;
- na základě experimentů je možné konstatovat, že se vzrůstajícím počtem tkanin roste příznivý vliv ovinutí (nárůst únosnosti v případě jednovrstvé aplikace dosahoval cca 9 %, u třívrstvé aplikace tkaniny přibližně 19 %). Toto tvrzení nebylo možné z důvodu nízkého počtu relevantních výsledků statisticky podložit. Výsledný nárůst únosnosti prvku byl opět podmíněn štíhlostí sloupu. Duktilita prvku se zvyšujícím počtem tkaniny zůstala zachována, přičemž ji determinuje limitní přetvoření tkaniny;
- zesílení vzorků aplikací příčné i podélné vrstvy tkaniny (simulace obousměrné tkaniny) vedlo ke zvýšení ohybové únosnosti prvku. Tkanina s podélně orientovanými vlákny působí jako přídavná podélná výztuž, která se aktivně podílí na únosnosti vzorku jen v případě jejího tahového namáhání (využití vzrůstá s rostoucím vybočením vzorku);
- kromě zvýšení únosnosti, tuhosti a duktility prvku vedlo zesílení ovinutím ke změně chování. Porovnání chování nezesílených a zesílených sloupů bylo možné provést pouze pro první režim zatěžování (tj. pouze osová tlaková síla). Referenční vzorky

se i před silnější vyztužení příčnou výztuží porušovaly v oblasti hlavy při relativně nízkém vybočení (docházelo ke koncentraci napětí v místě uložení prvku – obr. 40). Zesílené vzorky kolabovaly v důsledku vyčerpání ohybové únosnosti při značném vybočení, při kterém došlo k náhlému porušení v jednom řezu. Porušení prvku v případě dostředného tlaku iniciovalo přetržení tkaniny, zatímco při ohybovém namáhání došlo k porušení rovnoběžně s nosnými vlákny bez jejich přetržení. Na blížící se kolaps vždy upozorňovaly zvuky praskání jednotlivých vláken laminátu (viz obr. 41);

- vliv pevnosti betonu bylo možné popsat porovnáním chování sloupů z vysokopevnostního betonu a sloupů z betonu C30/37. Referenční vzorky vykazovaly podobné selhání u obou pevností betonu, kdy k porušení došlo v oblasti hlavy sloupu vlivem koncentrace tlakového napětí. Nárůst osové únosnosti zesílených vzorků nebylo možné vzhledem k režimům zatěžování porovnat. Vliv pevnosti betonu byl popsán pomocí porovnání ohybové únosnosti, resp. duktility. Ohybová únosnost ovinutých vzorků u obou pevností betonu vzrostla, přičemž navýšení oproti referenčnímu vzorku bylo u obou skupin vzorků (beton C30/37 a HPC) obdobné. Lehce vyšší duktilitu vykazovaly vzorky zhotovené z betonu C30/37.



**obrázek 40** - Referenční vzorek – a) režim zatěžování; b) porušení vzorku; c) detail porušení



*obrázek 41 - Ovinutý vzorek (S30\_18\_NH2) – a) režim zatěžování; b) typické porušení vzorku zesíleného příčnou tkaninou při ohybovém namáhání; c) typické porušení vzorku s příčnou i podélnou vrstvou tkaniny*

### 5.2.3. Shrnutí experimentální části

Provedení experimentů ovinutých sloupů v různých konfiguracích přineslo poznatky, které jsou stručně shrnuty v následujícím přehledu (detailnější popis je uveden ve shrnutí každé části experimentálního programu):

- zesílení ovinutím CFRP tkaninou v různých modifikacích vždy vedlo ke zvýšení užitných vlastností prvku v podobě nárůstu osově i ohybové únosnosti a zvýšení jeho duktility;
- postupná aktivace ovinutí (v důsledku narovnání vláken tkaniny) se projevuje shodným průběhem pracovního diagramu nezesíleného i zesíleného prvku v počáteční fázi zatěžování. Vliv ovinutí je patrný až po dosažení hodnoty tlakové pevnosti neovinutého betonu;
- při stanovení účinků ovinutí nelze uvažovat s limitní hodnotou přetvoření při přetržení tkaniny získanou z tahových zkoušek. Tohoto přetvoření nelze v případě ovinuté tkaniny vlivem odlišného způsobu namáhání dosáhnout;

- **se vzrůstajícím počtem vrstev FRP tkaniny a se zmenšujícím průměrem zesilovaného sloupu vzrůstá účinnost ovinutí** (platí pro aplikaci tkaniny působící v příčném směru). Účinek ovinutí není přímo úměrný zvyšujícímu se počtu vrstev FRP tkanin, u které v důsledku vrstvení dochází ke změně parametrů laminátu tkaniny (změna tloušťky i vlastností v závislosti na měnícím se poměru lepidla);
- vliv pevnosti betonu na účinnost ovinutí bylo možné popsat na základě porovnání výsledků vzorků z běžného a z HPC betonu pro dané režimy zatěžování. Vzhledem k dosaženým výsledkům lze konstatovat, že **s rostoucí pevností betonu dochází ke snížení příznivého účinku ovinutí**;
- **účinek zesílení ovinutím je redukován v důsledku zvyšujícího se ohybového namáhání, resp. v závislosti na zvyšující se excentricitě působícího zatížení**. Se zvyšující se velikostí tažené části průřezu dochází ke snížení příčného tlaku vyvolaného FRP tkaninou, tzn. **s rostoucím ohybovým namáháním klesá výsledný účinek ovinutí**;
- **rostoucí štíhlost prvku, obdobně jako zvyšující se excentricita působícího normálového zatížení zvyšují ohybové namáhání prvku a snižují trojosý stav napjatosti vyvolaný ovinutím FRP tkaninou, tj. snižují účinnost ovinutí**;
- **podélně orientovaná vlákna tkaniny působí především u ohýbaných prvků jako přídatná podélná výztuž** (bez efektu víceosé napjatosti). Jejich aktivace je podmíněna vybočením prvku (kolmo na vlákna) a vyvoláním tahového napětí v nosných vláknech laminátu tkaniny.



## 6. TEORETICKÝ POPIS CHOVÁNÍ OVINUTÝCH SLOUPŮ

Tato část disertační práce se zabývá problematikou návrhu a posouzení železobetonových sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou, a to především s ohledem na stanovení výsledných vlastností ovinutého betonu. Pro stanovení únosnosti ovinutého sloupu je znalost těchto parametrů nezbytná. Správný návrh zesílení je podmíněn výstižností vztahů vyjadřujících pevnost ovinutého betonu v tlaku a jeho mezní poměrné přetvoření. Výsledné chování sloupů je zde prezentováno závislostí osově a ohybové únosnosti (míra odolnosti zesíleného sloupu vyjádřená pomocí interakčního diagramu).

Problematika stanovení charakteristik ovinutého betonu je řešena analytickou studií jednotlivých přístupů (viz kapitola 4.3, tab. 4 a tab. 5), porovnáním výsledků dohledaných experimentů (např. [17] a [20]) a také numerickým modelováním (FEM software). Příznivý účinek víceosého působení ovinutého sloupu vyjádřený zvýšením mechanických vlastností betonu byl vyšetřován i s uvážením limitujících faktorů (např. štíhlost prvku, nebo reálné využití tkaniny). Cílem teoretické části práce bylo poukázat na odlišnosti ve stanovení výsledných vlastností ovinutého betonu (např. [10], [17], [20]) a pomocí provedených studií popsat nárůst pevnosti a přetvoření betonu vlivem ovinutí FRP tkaninou. V závěru této kapitoly je provedeno porovnání výsledků z analytických a numerických výpočtů s výsledky získanými z experimentální části disertační práce (viz kapitola 5).

### 6.1. Analytické stanovení vlastností ovinutého betonu

Vztahy popisující vlastnosti ovinutého betonu vycházejí z trojosého stavu napjatosti, kdy tlaková pevnost i přetvoření ovinutého betonu závisí na velikosti příčného tlaku vyvolaného ovinutím FRP tkaninou. Formulace empirických vzorců prezentovaných v kapitole 4.3 v tab. 4 a tab. 5, které definují vlastnosti ovinutého betonu, je pro všechny shodná a vychází z totožného vztahu pro přítlak (příčný tlak). Odlišnosti v jednotlivých vztazích jsou způsobeny snahou o zobecnění této víceparametrické úlohy (zohlednění řady parametrů ovlivňující účinek ovinutí uvedených v kapitole 3.4.3). Výstižnost uvedených přístupů je přitom silně ovlivněna přijatými předpoklady a také konfigurací experimentálních zkoušek. Většina výsledků je získána z tlakových zkoušek krátkých, z hlediska štíhlosti masivních prvků, které nepostihují chování sloupu v celém rozsahu. Analytická studie si proto kladla za cíl na modelovém příkladu poukázat na odlišnosti ve stanovení výsledných vlastností ovinutého betonu a na značný rozptyl výsledků dle použitých vztahů.

### 6.1.1. Porovnání jednotlivých výpočtových vztahů

Pro porovnání hodnot vlastností ovinutého betonu získaných při využití vztahů prezentovaných v kapitole 4.3 v tab. 4 a tab. 5 byl uvažován jednoduchý případ tlačného prvku. Jde o železobetonový prvek kruhového průřezu o průměru 200 mm a výšce 400 mm. Podélnou výztuž prvku tvoří šest prutů o průměru 8 mm z oceli třídy B 500. Příčná výztuž ve tvaru šroubovice se stoupáním 150 mm je z totožné oceli a tvoří jí prut o průměru 6 mm. Zesílení prvku ovinutím je uvažováno formou celoplošné jednovrstvé aplikace příčně orientované jednosměrné uhlíkové tkaniny SikaWrap 600 C/120 o tloušťce 1,24 mm. Charakteristiky použitých materiálů byly převzaty z experimentální části a pro přehlednost jsou uvedeny v tab. 15. Modelový případ svou konfigurací odpovídá zkušebním vzorkům z experimentální části této práce (kapitola 5.2.1, část zkušební vzorky ze železobetonu) a je proto možné přímo porovnávat teoretické a predikované hodnoty únosností prvku zesíleného ovinutím FRP tkaninou.

*tabulka 15 - Charakteristiky materiálů uvažovaných pro modelový případ*

Vlastnost	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
<b>beton C30/37 – směs I</b>		
<b>Krychelná pevnost (krychle 150 x 150)</b>	46,449	0,76
<b>Válcová pevnost</b>	37,159	-
<b>Modul pružnosti v tlaku</b>	33,70E+03	1,22E+03
<b>betonářská výztuž B 500</b>		
<b>Mez kluzu</b>	574,06	3,54
<b>Mez pevnosti</b>	670,50	2,72
<b>Modul pružnosti</b>	199,06E+03	7,67E+03
<b>laminát uhlíkové tkaniny SikaWrap - 600 C/120</b>		
<b>Tahová pevnost</b>	702,289	17,15
<b>Přetvoření při přetržení [%]</b>	0,813	-
<b>Modul pružnosti</b>	86,42E+03	-

Pro možnost vzájemného porovnání přístupů stanovujících charakteristiky ovinutého betonu a pro maximalizaci diferencí těchto přístupů byly přijaty následující předpoklady výpočtu. Rozdílné pojetí spolehlivosti návrhu z hlediska vlastností materiálů bylo eliminováno uvážením materiálových součinitelů shodně hodnotou 1,0 (tzn. výpočet je proveden ve středních hodnotách materiálových vlastností). Stejný postup byl využit pro stanovení hodnoty příčného tlaku, jehož velikost je u některých přístupů omezena shora v závislosti na přetvoření tkaniny, nebo zavedením součinitelů účinnosti ovinutí. Přítlak byl jednotně uvažován hodnotou 8,708 MPa a je stanoven z mezních charakteristik laminované tkaniny po dosazení do vzorce (10). Při výpočtu bylo uvažováno s nulovým počátečním

zatížením působícím na zesilovaný prvek před aplikací tkaniny a dále byla zanedbána postupná aktivace tkaniny (díky tomu bylo možné využít plné přetvárnosti tkaniny). Výsledné hodnoty stanovené na základě vztahů uvedených v tab. 4 a tab. 5 jsou prezentovány v tab. 16.

*tabulka 16 - Výsledné vlastnosti ovinutého betonu stanovené dle jednotlivých přístupů*

Autor	$f_{co}$ [MPa]	$\sigma_l$ [MPa]	$f_{cc}$ [MPa]	$\varepsilon_{ccu}$ [-]	$\sigma_l^*$ [MPa]	$f_{cc}^*$ [MPa]	$\varepsilon_{ccu}^*$ [-]
<i>Richart a kol. (1928)</i>	37,159	8,708	72,863	0,0116	5,748	60,724	0,0083
<i>Fardis &amp; Khalili (1982)</i>			72,863	0,0164		60,724	0,0164
<i>Mander a kol. (1988)</i>			77,650	0,0129		66,929	0,0100
<i>Cusson &amp; Paultre (1995)</i>			65,420	0,0198		58,288	0,0108
<i>Karbhari &amp; Gao (1997)</i>			59,243	0,0043		52,543	0,0035
<i>Kono a kol. (1998)</i>			55,668	0,0069		49,375	0,0052
<i>Xiao &amp; Wu (2000)</i>			68,163	0,0213		58,885	0,0216
<i>Lam &amp; Teng (2002)</i>			54,576	0,0141		48,654	0,0093
<i>Lam &amp; Teng (2003)</i>			65,896	0,0084		56,126	0,0062
<i>Bisby a kol. (2005)</i>			58,277	0,0076		51,097	0,0057
<i>Youssef a kol. (2007)</i>			50,792	0,0088		45,269	0,0070
<i>Yu &amp; Teng (2011)</i>			74,508	0,0115		72,172	0,0096
Směrnice			$f_{co}$ [MPa]	$\sigma_l$ [MPa]		$f_{cc}$ [MPa]	$\varepsilon_{ccu}$ [-]
<i>CEB-FIB Model Code 1990 (1990)</i>	37,159	8,708	63,575	0,0059	5,748	56,172	0,0046
				0,0504			0,0344
<i>ČSN EN 1992-1 (1992)</i>			63,575	0,0504		56,172	0,0344
<i>ACI 440.2R (2002)</i>			77,650	0,0122		66,929	0,0094
<i>CRN DT 200/2004 (2004)</i>			73,883	0,0108		64,997	0,0094
<i>ISIS Canada Module No. 4 (2004)</i>			71,992	-		60,149	-
<i>ACI 440.2R (2008)</i>			65,896	0,0136		56,126	0,0088
<i>CEB-FIB Model Code 2010 (2010)</i>			80,965	0,0138		69,236	0,0106
				0,0504			0,0344
<i>CSA S806 (2012)</i>			75,622	-		62,263	-

**Poznámka:** \* proměnné označené indexem\* jsou počítány s uvážením součinitele  $K_e = 0,66$ ;  
 $f_{co}$  pevnost neovinutého betonu v tlaku (střední hodnota);  
 $f_{cc}$  pevnost ovinutého betonu v tlaku (střední hodnota);  
 $\sigma_l$  příčné napětí (přítlak vyvozený ovinutím);  
 $\varepsilon_{ccu}$  mezní poměrné přetvoření ovinutého betonu.

Výsledný rozptyl středních hodnot pevností ovinutého betonu v tlaku dosahuje přibližně 60 %, kdy pevnost ovinutého betonu se pohybuje v rozmezí 50,79 MPa až 80,97 MPa. V porovnání s neovinutým betonem se v extrému jedná o více než dvojnásobný nárůst tlakové pevnosti. Mezní poměrné přetvoření ovinutého betonu nabývá ještě výraznější difference, kterou udává interval 0,0043 – 0,0504 (více

než jedenáctinásobný rozdíl přetvoření ovinutého betonu). Tento výrazný nesoulad v predikci limitního přetvoření ovinutého betonu je způsoben přístupy nevhodnými ke stanovení vlastností ovinutého betonu při zesílení ovinutím FRP tkaninou. Konkrétně se jedná o evropské směrnice ČSN EN 1992-1-1 [43] a Model Code 1990 [39], resp. Model Code 2010 [48], které příznivý efekt ovinutí připisují příčné výztuži z betonářské oceli a nezohledňují tak odlišné chování oceli a FRP tkaniny. Při vynechání těchto směrnic je rozptyl mezního přetvoření ovinutého betonu dán intervalem 0,0043 – 0,0213, což představuje téměř pětinasobné zvýšení duktility prvku. Výchozími hodnotami pro stanovení přetvoření ovinutého betonu bylo přetvoření neovinutého betonu při dosažení jeho tlakové pevnosti  $\varepsilon_{co} = 0,002$  a mezní hodnota přetvoření  $\varepsilon_{cu} = 0,0035$ .

Při zavedení součinitele efektivnosti ovinutí  $k_e^{14}$ , který zohledňuje odlišný způsob namáhání laminátu tkaniny při ovinutí, dochází ke snížení sledovaných parametrů ovinutého betonu (tab. 16, vlastnosti označeny symbolem \*). Ovšem rozptyl pevnosti ovinutého betonu v tlaku i mezního poměrného přetvoření zůstal zachován. Při uvažování limitních hodnot tlakových pevností se interval pohyboval v rozmezí 45,269 MPa – 69,236 MPa. U mezního přetvoření byl interval 0,0035 – 0,0344 (hodnota stanovena pro ovinutí příčnou ocelovou výztuží dle [43]), resp. 0,0035 – 0,0216 při uvažování součinitele  $k_e$ . Diference v predikci tlakové pevnosti ovinutého betonu dosahuje cca 53 %, přičemž v porovnání s pevností neovinutého betonu došlo v maximu ke zvýšení o přibližně 85 %. Výraznější rozdíl je možné pozorovat v případě mezního poměrného přetvoření ovinutého betonu, kdy je při porovnání jednotlivých přístupů dosaženo téměř desetinásobného, resp. šestinasobného navýšení. Jak je patrné z uvedených hodnot vlastností ovinutého betonu panuje mezi jednotlivými přístupy značný nesoulad a pro praxi je tak obtížné zvolit vhodný výpočtový model.

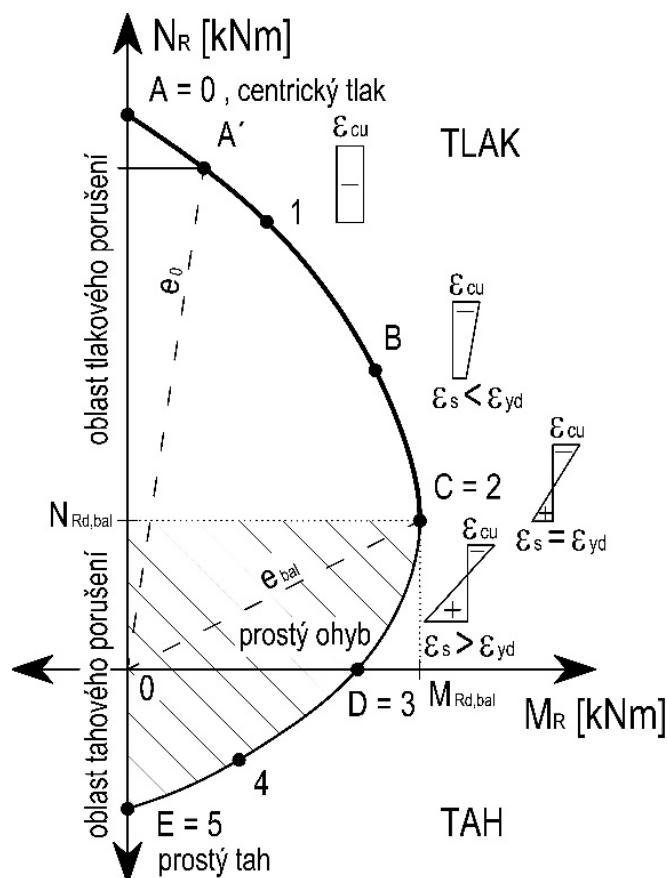
### 6.1.2. Posouzení výpočtových modelů ovinutého betonu pomocí interakčního diagramu

Interakční diagram prvku vyjadřuje obálku únosností průřezu, kterou tvoří množina bodů definovaných osovou (normálovou  $N_R$ ) a ohybovou ( $M_R$ ) únosností. Tato popisuje únosnosti průřezu přecházejícího ze zcela tlačенého až po tažený. Oblast definovanou hraniční křivkou únosnosti je možné pomyslně rozdělit na části reprezentující odlišné

---

<sup>14</sup>  $k_e$  – součinitel efektivnosti ovinutí se zavádí z důvodu odlišného působení tkaniny během ovinutí a při tahových zkouškách laminátu, na základě kterých jsou stanoveny základní charakteristiky laminované tkaniny (dochází k redukci přetvoření při přetržení).

způsoby namáhání. To umožňuje zjednodušit konstrukci interakčního diagramu při využití charakteristických bodů (viz obr. 42, body 0 – 5; platí pro nezatížený průřez – bez počáteční napjatosti). Tento postup byl využit i v případě ovinutých sloupů, kdy oproti železobetonu bylo nutné při stanovení únosnosti průřezu respektovat chování ovinutého betonu.

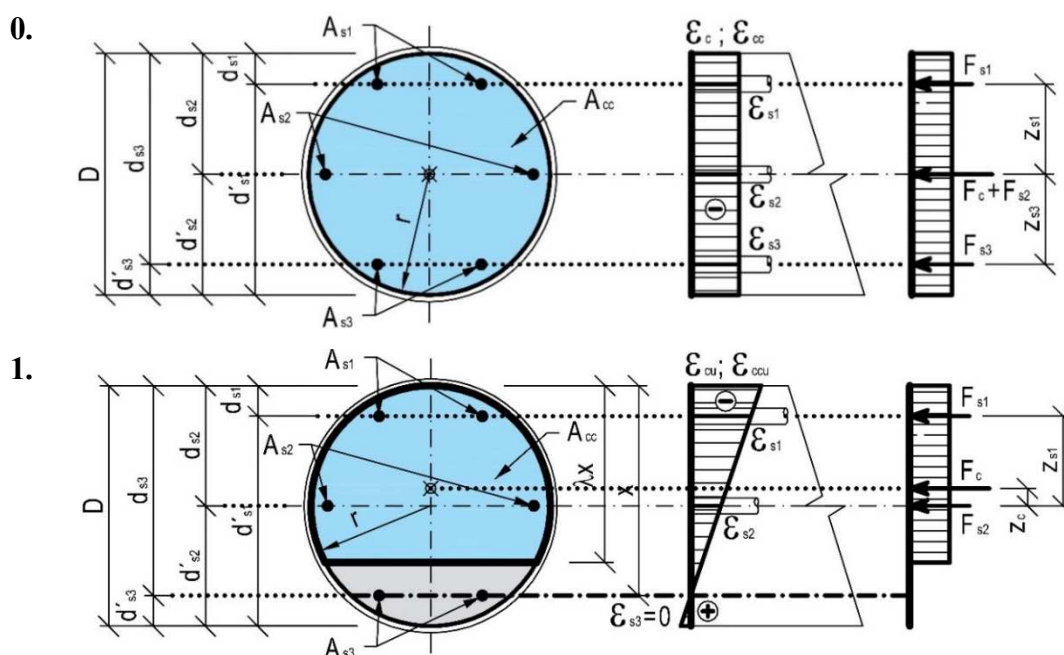


obrázek 42 - Interakční diagram znázorňující chování sloupu

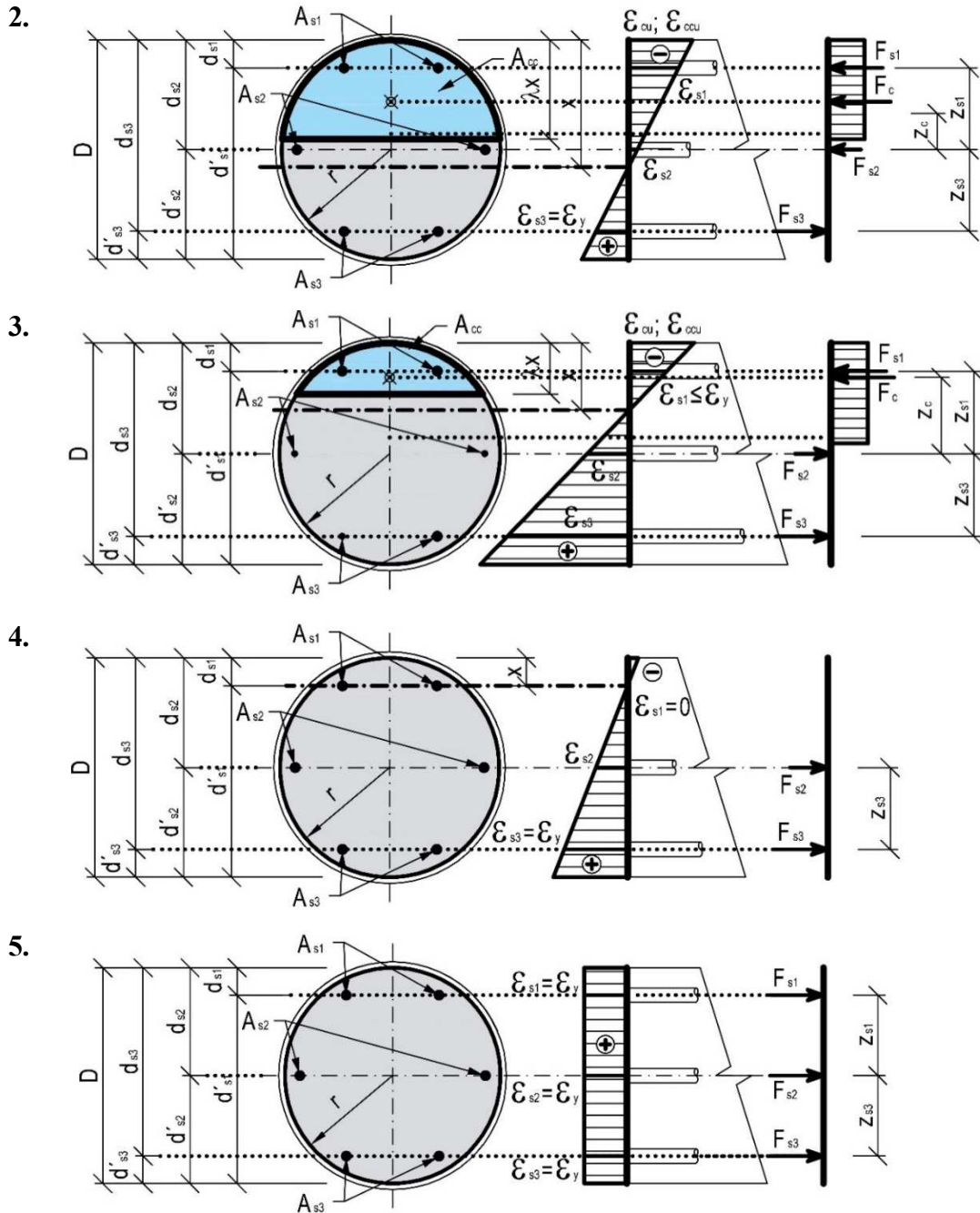
#### Body interakčního diagramu:

- **centrický tlak** – je reprezentován bodem A, resp. 0 a označuje teoretický případ namáhání sloupu při působení tlakové síly s nulovou excentricitou;
- **oblast tlakového porušení** – charakterizuje namáhání prvku tlakovou normálovou silou působící na malé, nebo žádné (bod 0) excentricitě. Jedná o oblast interakčního diagramu vymezenou body A až C (0 – 2), kde dochází k selhání v důsledku dosažení tlakové pevnosti betonu (drcení). Prvek v takovém případě selhává náhle bez varování v podobě výrazných deformací. Přetvoření betonu je vyčerpáno a tažená výztuž přitom není plně využita (platí i pro bod 1, kdy neutrálná osa leží v těžišti tažené výztuže);

- **oblast tahového porušení** – označuje namáhání prvku tlakovou normálovou silou působící na velké excentricitě a na diagramu je vymezen body C až E (2 – 5). Při tomto režimu selhání dochází ke značné deformaci prvku před jeho kolapsem. V této oblasti se ocel po dosažení meze kluzu plasticky přetváří až do mezního poměrného přetvoření betonu. Po jeho dosažení dochází k drcení betonu a k porušení prvku (neplatí pro bod E). Iniciátorem porušení je tažená výztuž;
- **rozhraní mezi tlakovým a tahovým porušením** – je definováno bodem C (2 – rozhraní mezi malou a velkou výstředností v tlaku). Ten udává taková excentricita normálové síly, při které je u tažené výztuže dosaženo právě meze kluzu (na obr. 42 znázorněno úsečkou definovanou body 0 a C) a v krajních vláknech tlačného betonu mezní přetvoření. Normálová síla  $N_{Rd,bal}$  tvoří rozhraní mezi tlakovým a tahovým porušením;
- **prostý ohyb** – reprezentuje bod D (3), při kterém je prvek namáhán pouze ohybovým momentem;
- **tahové porušení** – popisuje bod 4, kdy působí tahové síly na mezi porušení leží v těžišti tažené výztuže. Tento bod tvoří rozhraní mezi malou a velkou výstředností v tahu. Bod 5 popisuje tahové namáhání s vyloučeným taženým betonem.



obrázek 43 - Schéma výpočtu charakteristických bodů interakčního diagramu



obrázek 43 - Schéma výpočtu charakteristických bodů interakčního diagramu - pokračování

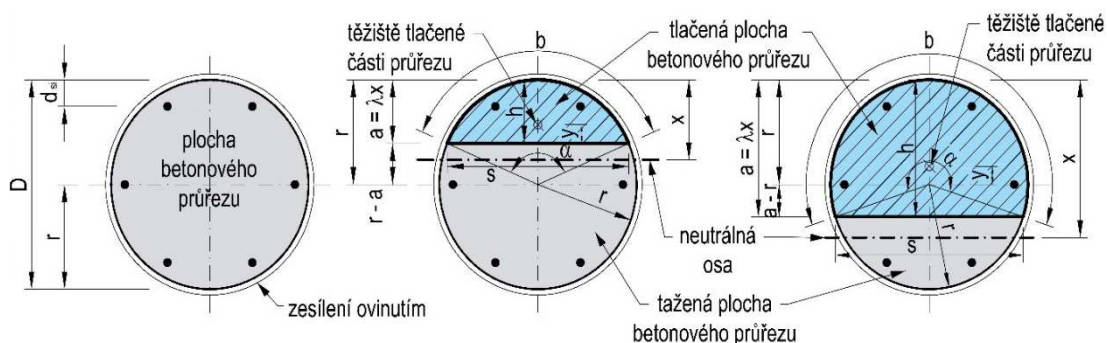
### Předpoklady výpočtu interakčního diagramu ovinutého sloupu

- zachování rovinnosti průřezu, tzn. přetvoření vláken průřezu je přímo úměrné jejich vzdálenosti od neutrálné osy;
- předpokládá se dokonalá soudržnost mezi betonem a výztuží a mezi povrchem betonu a laminátem FRP tkaniny, tzn. je zajištěno spolupůsobení použitých materiálů;
- výpočtu mezního stavu únosnosti je dosaženo mezního přetvoření alespoň v jednom materiálu (beton, ocel, laminát FRP tkaniny);
- aplikovaná vrstva lepeného laminátu FRP tkaniny se chová lineárně pružně až do porušení;
- beton v tažené oblasti průřezu nepůsobí a veškerá tahová napětí přenáší výztuž;
- napětí v betonu, ve výztuží a ve FRP tkanině se určí pomocí pracovních diagramů;
- chování ovinutého betonu je idealizováno pracovním diagramem;
- vliv aktivace ovinutí, kdy je část přetvoření spotřebována na narovnání vláken tkaniny, se zanedbává;
- trojosý stav napjatosti příznivě ovlivňuje chování prvku pouze v případě, že tlačená část průřezu je větší než tažená (ovinutí je aktivováno);
- hodnota přítlaku (příčného tlaku) vyvozeného laminátem kompozitní tkaniny může dosahovat maximálně pevnost neovinutého betonu v tlaku;
- poměrné přetvoření neovinutého betonu v oblasti tlaku je omezeno mezní hodnotou  $\varepsilon_{cu3}$ , resp. v případě ovinutého betonu hodnotou  $\varepsilon_{ccu}$ ;
- poměrné přetvoření po obvodu ovinutého prvku je omezeno hodnotou přetvoření při přetržení tkaniny z tahových zkoušek se zohledněním součinitele účinnosti ovinutí;
- nulová počáteční napjatost prvku, tj. prvek je zesilován v nezátíženém stavu s nulovým počátečním přetvořením (platí pro tuto práci);
- mezní stav je definován vyčerpáním pevnosti alespoň u jednoho z použitých materiálů.



Způsob řešení spočívá ve stanovení bodů interakčního diagramu vyjádřených normálovou  $N_R$  a ohybovou  $M_R$  únosností, jejichž velikost vychází ze silové a momentové rovnováhy na průřezu vztažených k jeho těžišti pro danou polohu neutrálné osy. Celková únosnost prvku se skládá z příspěvku tlačeného betonu ( $F_c$ ,  $M_c$ ) a betonářské výztuže ( $F_s$ ,  $M_s$ ). Vliv ovinutí je započítáván odpovídajícím zvýšením mechanických vlastností betonu v závislosti na velikosti vyvozeného příčného tlaku. Jeho velikost není konstantní, ale mění v závislosti na poměru tlačené a tažené plochy průřezu prvku, kdy s narůstající taženou částí hodnota příčného tlaku klesá (vlákna tkaniny nejsou tažena). Při převládajícím tahu jsou ve výpočtu únosnosti sloupu uvažovány charakteristiky neovinutého betonu (hodnoty napětí jsou odečítány z idealizovaného parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu). Příspěvek ocelové výztuže je dán součtem odpovídajících únosností jednotlivých vložek, jejichž hodnota je stanovena pomocí aktuálního napětí vycházejícího ze znalosti přetvoření konkrétního prutu (použit bilineární pracovní diagram).

Kruhový průřez představuje jednoose symetrickou úlohu, u které je na základě polohy neutrálné osy dopočten středový úhel  $\alpha$  a z něj je následně stanovena velikost tlačené plochy betonu (výpočet plochy kruhové úseče). Jednotlivé body interakčního diagramu jsou dopočítávány na základě volby polohy neutrálné osy. K zobrazení únosnosti prvku jsou využity charakteristické body interakčního diagramu. Vzhledem k symetrickému vyztužení prvku postačuje zobrazení poloviny interakčního diagramu.



**obrázek 44 - Princip výpočtu tlačené části betonového průřezu**

Postup výpočtu je obecně popsán pomocí následujících kroků:

1. volba polohy neutrálné osy  $x$  (tlačený průřez postupně přechází do taženého);

ze znalosti  $x \rightarrow$

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{s}{2r}\right) \rightarrow \text{pro } 0 \leq \alpha \leq \pi \quad (32)$$

$$\alpha = 2\pi - 2 \arcsin\left(\frac{s}{2r}\right) \rightarrow \text{pro } \pi < \alpha < 2\pi \quad (33)$$

2. výpočet plochy a těžiště tlačené části betonového průřezu (viz obr. 45);

$$\text{pro } \alpha \in \langle 0; \pi \rangle; a = \lambda x \leq r \rightarrow A_{cc} = \frac{r^2}{2} (\alpha - \sin \alpha); \quad (34)$$

$$\text{pro } \alpha \in \langle \pi; 2\pi \rangle; a = \lambda x > r \rightarrow A_{cc} = r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - \left(r-h\sqrt{2hr-r^2}\right); \quad (35)$$

$$y = r \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\alpha - \sin \alpha} \right]. \quad (36)$$

3. stanovení charakteristik betonu a následné určení  $F_{cc}$  – na základě známého průběhu poměrných přetvoření se určí napětí z pracovních diagramů neovinutého, resp. ovinutého betonu;

$$\text{pro } A_{cc} \leq A_{ct} \rightarrow \text{uvažovány charakteristiky neovinutého betonu } f_c, \varepsilon_c; \quad (37)$$

$$\text{pro } A_{cc} > A_{ct} \rightarrow \text{uvažovány charakteristiky ovinutého betonu } f_{cc}, \varepsilon_{cc}. \quad (38)$$

4. stanovení příspěvků únosnosti betonářské výztuže;

$$\text{pro } d_{si} \leq x \rightarrow \varepsilon_{si} = \varepsilon_{cu3} \left( \frac{x - d_{si}}{x} \right); \quad (39)$$

$$\text{pro } d_{si} > x \rightarrow \varepsilon_{si} = \varepsilon_{cu3} \left( \frac{d_{si} - x}{x} \right); \quad (40)$$

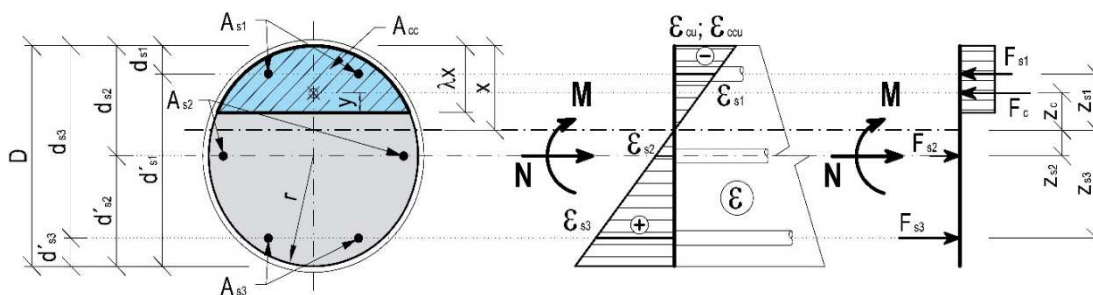
$$\text{pro } \varepsilon_{si} < \varepsilon_y \rightarrow \sigma_{si} = E_s \cdot \varepsilon_{si} < f_y; \quad (41)$$

$$\text{pro } \varepsilon_{si} > \varepsilon_y \rightarrow \sigma_{si} = f_y. \quad (42)$$

5. výpočet únosnosti průřezu (metoda mezní rovnováhy);

$$N_R = F_{cc} + \sum_i F_{si}; \quad (43)$$

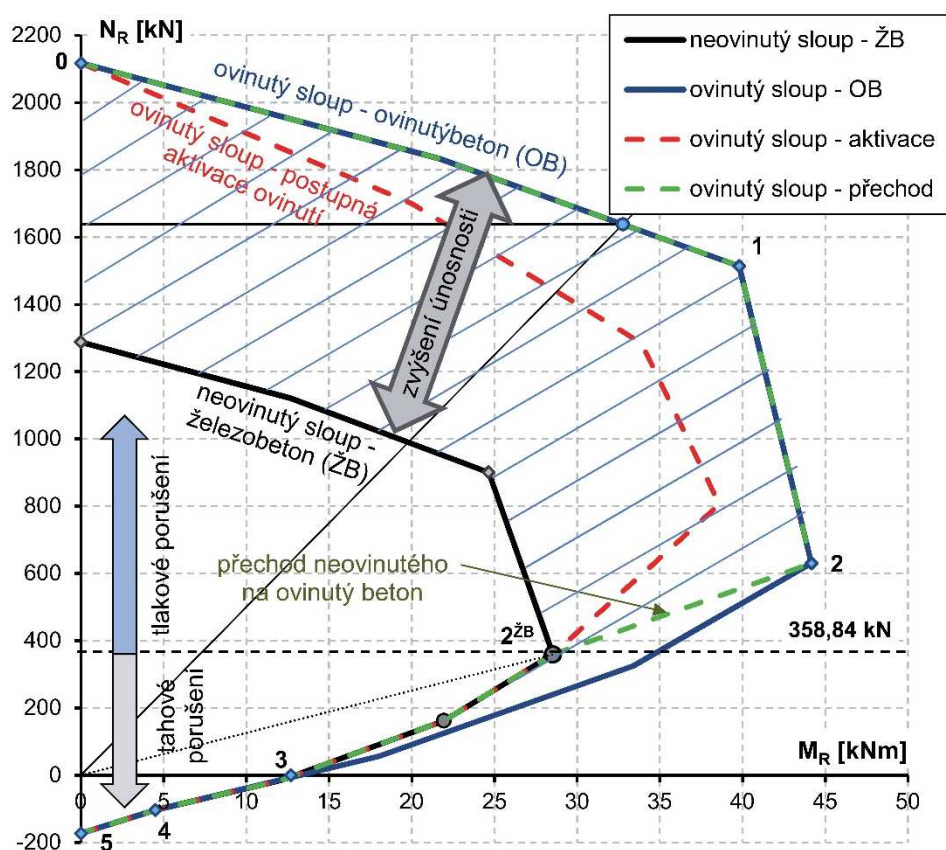
$$M_R = F_{cc} z_c + \sum_i (F_{si} z_{si}); \quad (44)$$



obrázek 45 - Princip stanovení únosnosti průřezu

- Použité značení:
- $a$  výška tlačené části průřezu za předpokladu rovnoměrného rozdělení napětí ( $a = \lambda x$ );
  - $A_{cc}$  tlačené plocha betonového průřezu;
  - $A_{si}$  plocha dané vrstvy výztuže;
  - $b$  délka oblouku kruhové úseče;
  - $d_{si}$  účinná výška dané vrstvy výztuže;
  - $d'_{si}$  poloha vrstvy výztuže vztahena ke spodním vláknům průřezu;
  - $D, r$  průměr prvku, resp. poloměr prvku;
  - $F_{cc}$  výslednice síly tlačené části betonového průřezu;
  - $F_{si}$  výslednice síly dané vrstvy výztuže;
  - $h$  výška oblouku kruhové úseče;
  - $N_R, M_R$  normálová, resp. ohybová únosnost prvku;
  - $r$  poloměr prvku;
  - $s$  délka tětiny kruhové úseče;
  - $x$  poloha neutrálné osy;
  - $y$  vzdálenost těžiště tlačené části průřezu od těžiště průřezu;
  - $z_c, z_{si}$  rameno vnitřních sil vztahené k těžišti průřezu;
  - $\alpha$  středový úhel kruhové úseče;
  - $\epsilon_{cu}, \epsilon_{ccu}$  mezní poměrné přetvoření neovinutého/ovinutého betonu.

Únosnost průřezu je znázorněna interakčním diagramem, který je sestaven propojením charakteristických bodů<sup>15</sup>. Modelový příklad představoval sloup z kapitoly 6.1.1, který svou geometrií, použitými materiály, vyztužením i způsobem zesílení odpovídal zkušebnímu vzorku krátkého sloupu (viz kapitola 5.2.1.2). Pro porovnání účinku ovinutí je podle [43] znázorněna únosnost neovinutého železobetonového sloupu (ozn. „*neovinutý sloup – ŽB*“). Protože se jedná z hlediska štíhlosti o masivní prvek, účinky II. řádu byly zanedbány. Zohledněny jsou pouze počáteční imperfekce  $e_0$ . Porovnání nezesíleného a zesíleného sloupu je patrné z grafu 6.



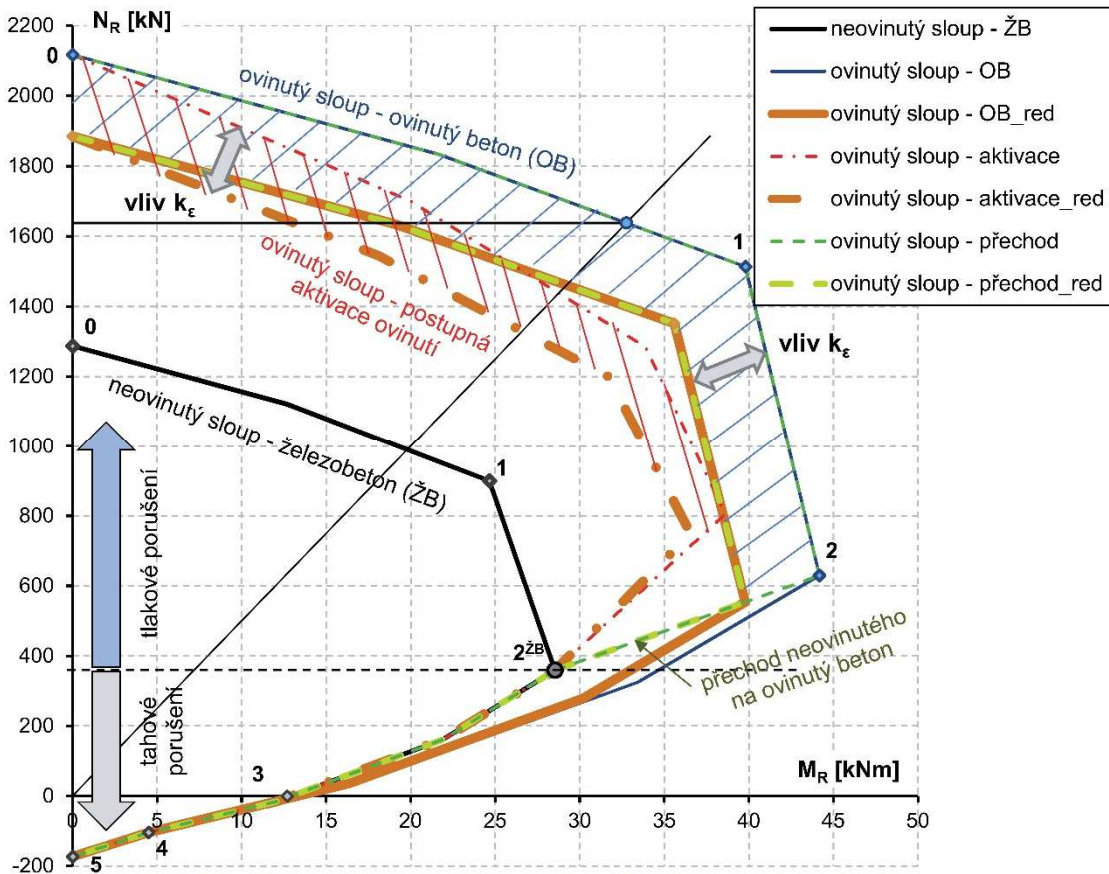
graf 6 - Interakční diagram neovinutého a ovinutého vzorku krátkého sloupu dle [43]

Únosnost ovinutého betonu je stanovena dle přístupu [43] a je znázorněna v několika provedeních, kdy ozn. „*ovinutý sloup – OB*“ znázorňuje výpočet s uvažováním parametrů ovinutého betonu přes celý interakční diagram (efekt ovinutí je vyšrafován). Tento stav nekoresponduje s působením příčně orientované tkaniny, jejíž příznivý efekt v podobě přitlaku postupně vymizí s přibývajícím ohybovým namáháním prvku. Chování, charakterizované zvyšováním pevnosti a duktility materiálu v důsledku narůstajícího

<sup>15</sup> znázornění interakčního diagramu pomocí charakteristických bodů představuje určité zjednodušení, které ne zcela přesně vystihuje únosnost průřezu. Přesnější řešení by poskytlo vnesené většího počtu charakteristických bodů, které by vyhladilo obálku únosnosti průřezu.

přítlaku, je možné postihnout pomocí únosnosti průřezu vyjádřené průběhem s ozn. „*ovinitý sloup – přechod*“. Shodný průběh únosnosti s neovinitým betonem je patrný do dosažení bodu  $2^{žB}$ , který definuje rozhraní mezi tlakovým a tahovým porušením. V tomto bodě dochází k aktivaci ovinutí, kde se víceosé namáhání sloupu projeví v podobě zavedení charakteristik ovinutého betonu do výpočtu. Idealizace chování v tomto případě stále nepostihuje skutečné chování, protože náhle přechází do trojosého namáhání při využití maximálního přítlaku. Vhodnější idealizaci představuje únosnost průřezu popsána průběhem s ozn. „*ovinitý sloup – aktivace*“, u které jsou na základě pracovního diagramu ovinutého betonu při respektování přetvoření prvku dopočítávány hodnoty příčného tlaku a jemu odpovídající pevnostní charakteristiky pro ovinutý beton (dále jen aktivace ovinutí). Výpočet je proveden při zanedbání redukce příčného tlaku při použití součinitele účinnosti ovinutí  $k_\epsilon$ , což umožňuje přímé porovnání s výsledky řešeného přístupu prezentovanými v tab. 16.

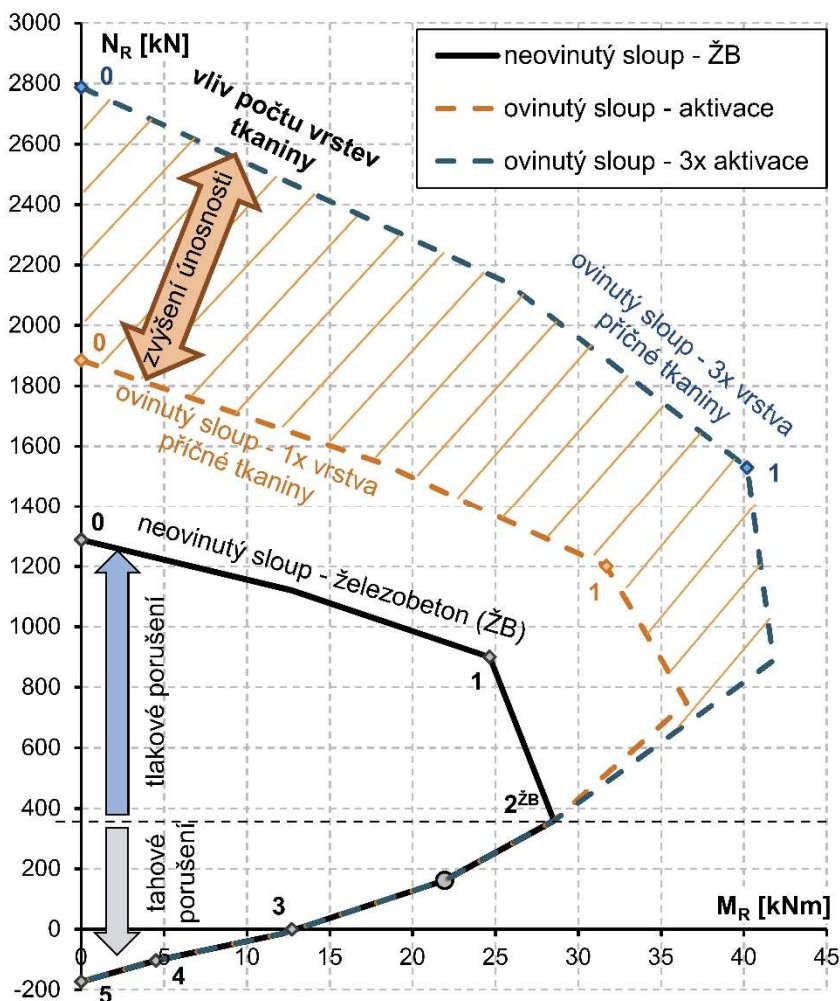
Výstižnější řešení představuje zavedení součinitele účinnosti ovinutí  $k_\epsilon$ , který lépe popisuje reálné chování ovinutého laminátu tkaniny (vysvětlení viz kapitoly 3.4.3 a 4.1). Hodnota tohoto součinitele je převzata na základě dat uvedených v kapitole 6.1.3 této práce –  $k_\epsilon = 0,656$ . Vliv součinitele  $k_\epsilon$  je znázorněn na grafu 7 (šrafovaná oblast), ze kterého je patrný pokles únosnosti ovinutých sloupů.



graf 7 - Porovnání zahrnutí vlivu součinitele účinnosti ovinutí  $k_\epsilon$

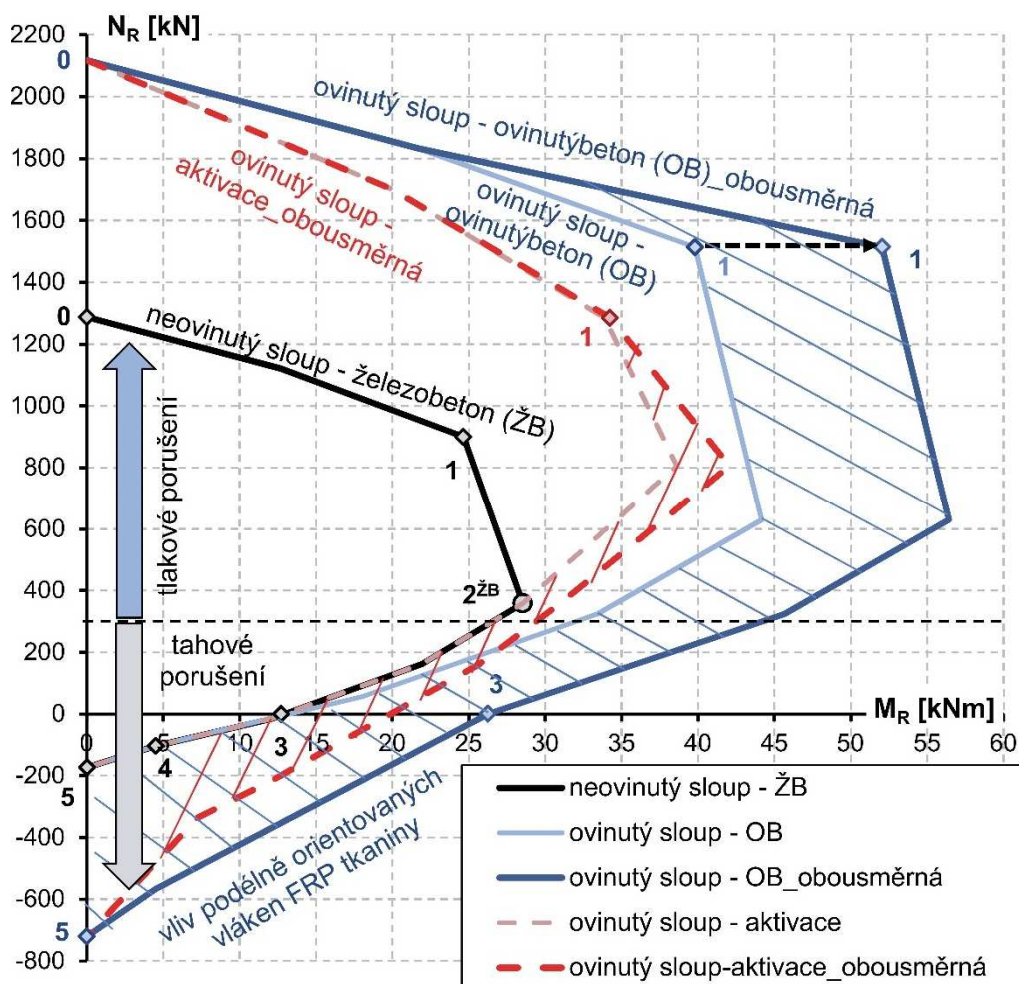
Konstrukci interakčního diagramu pro sloup zesílený ovinutím FRP tkaninou působící v příčném směru lze tak provést několika způsoby. Výstižnost jejich řešení je silně ovlivněna způsobem, jakým je do výpočtu jednotlivých bodů zahrnuto skutečné chování takto zesílených prvků především s ohledem na reálné působení tkaniny (tj. s postupným zvyšováním mechanických vlastností betonu v závislosti na velikosti přtlaku při zohlednění omezení přetvoření laminátu tkaniny při ovinutí determinované součinitelem efektivity ovinutí).

Další interakční diagramy znázorňují vliv počtu tkanin na výsledný efekt ovinutí (graf 8). Porovnány jsou únosnosti sloupů zesílených ovinutím při použití jedné a tří vrstev FRP tkaniny (šrafovaná oblast) s uvážením postupné aktivace ovinutí. Se zvyšujícím se počtem tkanin dochází ke zvýšení výsledného efektu ovinutí, který je důsledkem zvyšující se tuhosti zesilující vrstvy kompozitu. S rostoucím počtem aplikovaných vrstev tkanin roste i míra příčného tlaku a tím i výsledný efekt ovinutí.



graf 8 - Porovnání vlivu počtu tkanin na výsledný efekt ovinutí

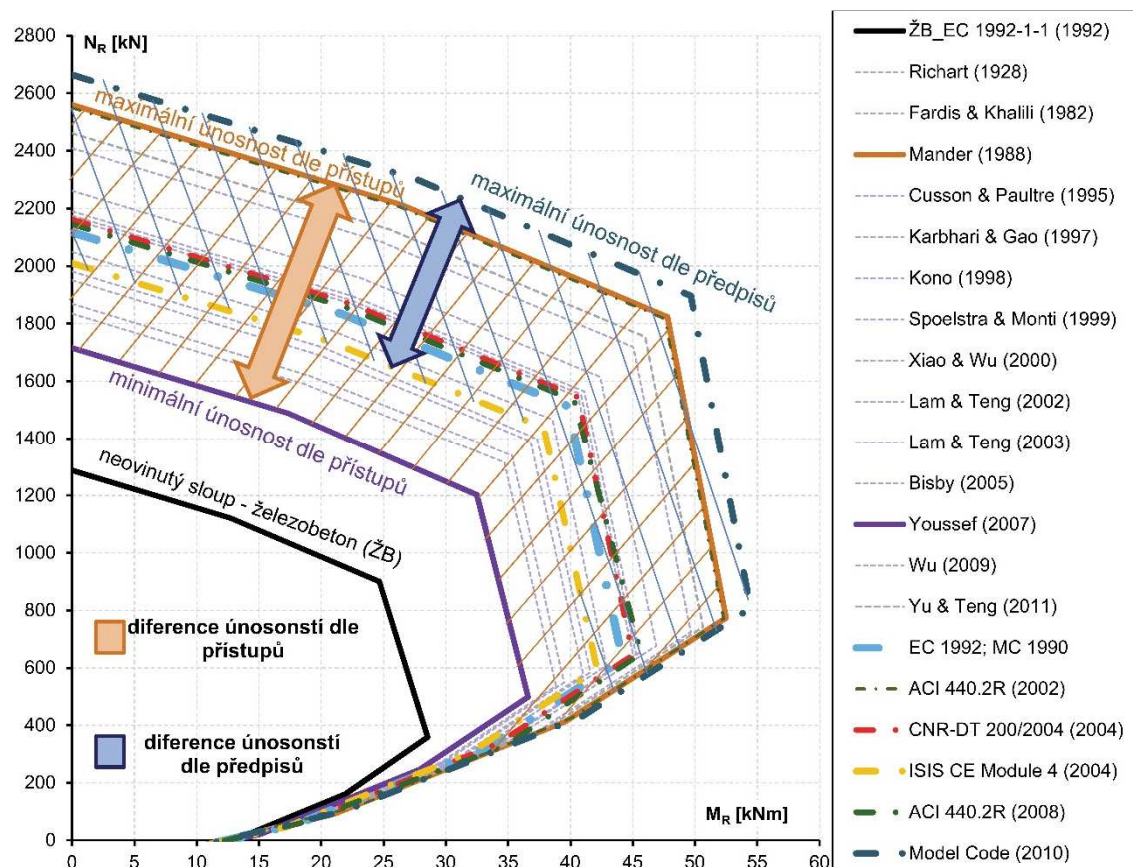
Na grafu 9 je zobrazen vliv obousměrně působícího laminátu pro případ plně působícího ovinutí a také pro postupnou aktivaci ovinutí. Při použití jednosměrné tkaniny (stejně jako v případě experimentálního programu) je toto působení realizováno provedením dvou na sebe kolmých vrstev. Jedna vrstva působí v příčném směru a způsobuje tak víceosé namáhání sloupu (ovinutý beton) a druhá vrstva s podélnou orientací vláken (ve směru osy sloupu) funguje jako přídavná podélná výztuž. Vliv podélně orientované vrstvy laminátu se projeví pouze na straně tažených vláken průřezu, kde dochází k příznivému využití tahové pevnosti laminátu tkaniny. V případě tlačeneho prvku, či na straně tlačenech vláken průřezu se příspěvek této vrstvy laminátu neprojevuje. Při uvážení aktivace ovinutí došlo ke značné redukci účinku vlivu podélně orientované FRP tkaniny (červeně šrafovaná oblast).



graf 9 - Porovnání vlivu tkaniny působící v obou směrech

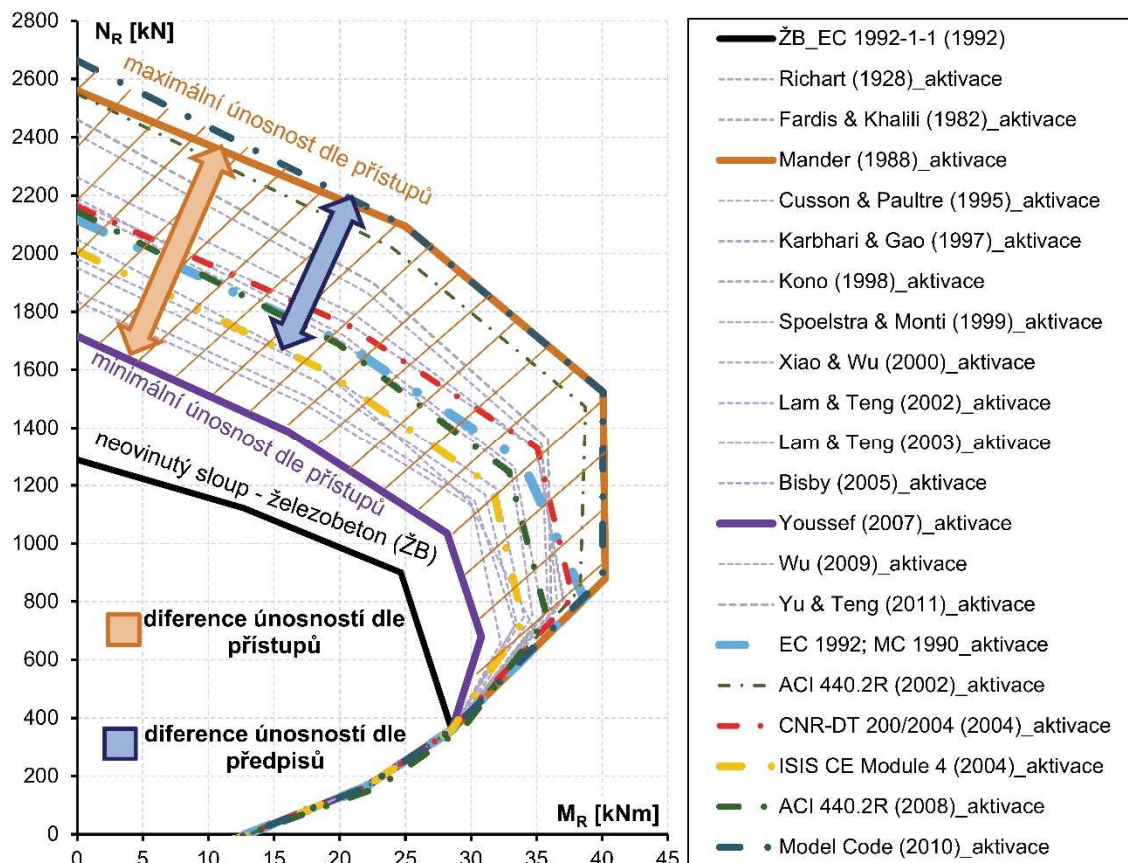
Porovnání jednotlivých přístupů, resp. únosností ovinutého železobetonového sloupu vyčíslených na základě charakteristik ovinutého betonu dle jednotlivých přístupů je zobrazeno na grafech 10 a 11 (dělení na normativní předpisy a ostatní přístupy). Díky tomu

je možné pozorovat celkový rozptyl dosažených únosností, ale také vzájemně porovnávat jednotlivé přístupy. Legislativně platný předpis [43] se nachází téměř v polovině (v dolní části) rozptylu vymezeného maximální a minimální únosností z vynesných přístupů. Při srovnání směrnic se jedná o konzervativnější přístup (únosnost sloupu stanovená dle [43] leží v těsné blízkosti minimální únosnosti ze všech směrnic).



graf 10 - Porovnání jednotlivých přístupů ke stanovení únosnosti ovinutého sloupu

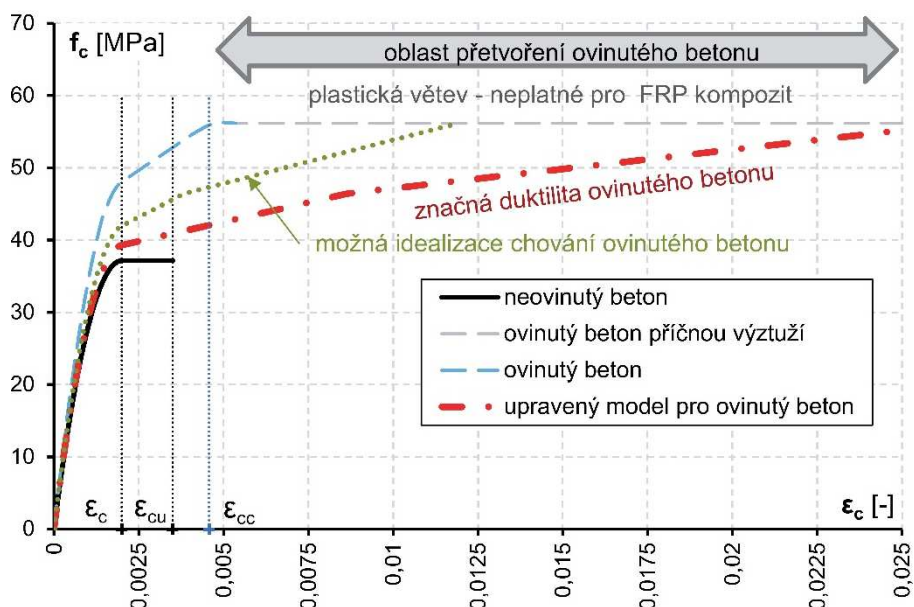




**graf 11** - Porovnání jednotlivých přístupů ke stanovení únosnosti ovinutého sloupu se zavedením redukčního součinitele  $k_e$

### Výpočtový model definovaný předpisem ČSN EN 1992-1-1 [43]

Matematický model vychází z [42] a je určen převážně pro beton ovinutý příčnou výztuží (náležitě uzavřené hustě umístěné třmínky, šroubovice aj.). Jeho výstižnost je při použití FRP tkaniny nedostačující, což je patrné z obdržení charakteristik (především vysoká hodnota mezního poměrného přetvoření  $\varepsilon_{cu}$ ) i z pracovního diagramu ovinutého betonu (graf 12). Předpis definuje pracovní diagram betonu ovinutého příčnou výztuží, který se vyznačuje lineárním nárůstem pevnosti betonu v tlaku až do dosažení meze kluzu v příčné výztuži (dosaženo  $f_{cc}$ ). Poté dochází k plastizaci příčné výztuže charakterizované narůstajícím přetvořením při konstantním napětí až do kolapsu. Přitom je podle vztahů možné dosáhnout velmi vysokého, v případě použité CFRP tkaniny nereálného, mezního poměrného přetvoření ovinutého betonu  $\varepsilon_{cu}$ .



graf 12 - Pracovní diagram ovinutého betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [43]

Výstižnější predikci chování betonu ovinutého FRP tkaninou poskytují následující upravené pracovní diagramy vycházející z původního modelu ovinutého betonu dle [42], tj. „betonu ovinutého příčnou výztuží“. Model pracovního diagramu „ovinutý beton“ má shodný průběh s modelem betonu ovinutého příčnou výztuží, ale je omezen mezním přetvořením při maximální hodnotě tlakové pevnosti betonu. Model „upravený model pro ovinutý beton“ znázorňuje teoretické chování ovinutého betonu s konstantním nárůstem pevnosti ovinutého betonu v tlaku až do dosažení mezního poměrného přetvoření dle modelu „betonu ovinutého příčnou výztuží“. U tohoto modelu bylo převzato přetvoření pro beton ovinutý příčnou výztuží (nereálně pro FRP tkaninu). Tyto modely tvoří limitní křivky, mezi kterými se nachází výstižný materiálový model betonu ovinutého FRP tkaninou (viz model „idealizace chování ovinutého betonu“), který respektuje chování FRP tkaniny. Při zadaných okrajových podmínkách (viz předpoklady výpočtu interakčního diagramu) je chování ovinutého betonu závislé na tuhosti zesílení a velikosti přetvoření při přetržení laminátu tkaniny.

### Shrnutí predikce chování ovinutého betonu

Stanovení mechanických vlastností ovinutého betonu a jeho materiálový model je popsán řadou přístupů a směrnic, jejichž přesnost je podmíněna správným popisem chování laminátu FRP tkaniny při zohlednění vlivů omezujících příznivý účinek příčného tlaku – zohlednění součinitele efektivnosti ovinutí, vlivu počtu vrstev a dalších. Vzhledem k rozptylu dosažených výsledků modelového příkladu železobetonového sloupu je pro projektanta v praxi obtížné usuzovat na dostatečnou výstižnost zvoleného výpočtového modelu.

Další kapitoly této práce jsou proto zaměřeny na výstižnou predikci chování ovinutého betonu za pomoci matematických vztahů.

### 6.1.3. Popis vybraných vlivů omezující výsledný účinek ovinutí

Víceosé namáhání ovinutých prvků je přičítáno působení FRP tkaniny, která vlivem přítlaku účinně brání příčné kontrakci tohoto prvku. Jinými slovy velikost příčného tlaku determinuje výsledný efekt zesílení ovinutím. Pro výstižný popis chování ovinutého betonu je tak nezbytně nutné popsat vlivy limitující velikost přítlaku. Z těchto vlivů popsaných v kapitole 3.4.3 zde bude blíže pojednáno pouze o omezení vyjádřené součinitelem efektivnosti (účinnosti) ovinutí  $k_e$ , o vlivu průměru zesilovaného prvku, o vlivu třídy betonu a v neposlední řadě i o vlivu počtu aplikovaných vrstev FRP tkaniny.

Za tímto účelem byly shromážděny výsledky experimentálních prací zaměřených na zesílení prvků kruhového průřezu ovinutím CFRP tkaninou (viz tab. 17). Většina prvků sestávala z krátkých sloupů zhotovených z prostého betonu s poměrem výšky k průměru 2:1. Vstupní hodnoty, výsledky zatěžovacích zkoušek a částečně i jejich vyhodnocení byly převzaty z dohledaných publikací (viz tab. 17). Sledované vlivy omezující účinek ovinutí FRP tkaninou byly statisticky vyhodnoceny použitím normálního (Gaussova) rozdělení náhodné veličiny součinitele účinnosti ovinutí  $k_e$ , resp. zvýšením pevnosti ovinutého betonu  $f_{cc}/f_{co}$ . Pro značnou nekonzistenci nashromážděných výsledků, především z důvodu nezávislosti jednotlivých experimentálních prací, lze závěry z nich vyplývající považovat pouze za orientační. I přesto tuto skutečnost tato studie přinesla cenné informace o sledovaných limitujících vlivech ovinutí.

**tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou (čerpáno např. z [18], [19], [29], [33])**

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	$f_{co}$ [MPa]	$\epsilon_{co}$ [‰]	$l_f$ [mm]	$E_f$ [GPa]	$\epsilon_f$ [‰]	$f_{cc}$ [MPa]	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}$ [‰]	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{h,rup}$ [‰]	$\epsilon_{h,rup}/\epsilon_f$	$f_j$ [MPa]				
Harmon Slattery (1992)	PB I.1	51	2,0	41	-	0,09	235	14,9	86,0	2,10	36,0	-	11,32	0,76	-				
	PB I.7	51	2,0	103	-	0,69	235	14,9	303,6	2,95	11,0	-	1,94	0,13	-				
Demers a Neale (1994)	PB I.1	152	3,32	43,7	-	1,0	25	15,0	48,4	1,11	9,70	-	12,75	0,85	4,19				
	PB I.3	3,0				75,2			1,72	18,30	10,65		0,71	10,51					
		3,0				73,4			1,68	18,30	11,85		0,79	11,69					
	PB II.1	152	3,32	32,2	-	1,0	25	15,0	41,1	1,28	14,10	-	13,65	0,91	4,49				
Howie a Karbhari (1994)	PB I.1	152	2,01	38,6	2,1	0,31	73	10,3	45,5	1,18	-	-	-	-	2,02				
		152							41,9	1,09						47,2	1,22		
		152							56,5	1,46						60,6	1,57		
	PB I.2	152				0,61	71	14,8	61,9	1,60	-	-	-	-	-	-	5,57		
		152							80,9	2,10								76,4	1,98
		152							75,8	1,96								89,5	2,32
	PB I.3	152				0,92	78	14,3	89,9	2,33	-	-	-	-	-	-	8,91		
		152							75,8	1,96								89,9	2,33
		152							89,0	2,31								47,1	1,22
	PB I.4	152				1,22	96	14,1	47,1	1,22	-	-	-	-	-	-	14,34		
		152							89,9	2,33								89,0	2,31
		152							89,0	2,31								47,1	1,22
	PB I.2b	152				0,61	40	16,5	47,7	1,24	-	-	-	-	-	-	3,50		
		152							50,0	1,30								50,0	1,30
		152							68,3	1,77								67,3	1,74
	PB I.3b	152				0,92	54	15,2	64,7	1,68	-	-	-	-	-	-	6,56		
152		67,3	1,74	64,7	1,68														
152		64,7	1,68	52,7	1,37														
PB I.4b	152	1,22	28	14,0	49,3	1,28	-	-	-	-	-	-	4,15						
	152				49,3	1,28								52,6	1,36				
	152				52,6	1,36								52,6	1,36				
Picher (1996)	PB I.1	153	1,99	39,7	-	0,36	83	15,3	56,0	1,41	10,70	-	8,42	0,55	3,29				
Karbhari a Gao (1997)	PB I.1	152	2,01	18,0	-	1,0	96	14,1	82,2	4,57	-	-	-	-	11,75				
		152				1,0	150	7,5	70,6	3,92									
	PB II.1	152	2,01	38,4	-	1,0	24	11,0	44,9	1,17	11,0	-	-	-	2,29				
	PB II.2	152				2,0	23	15,0	59,7	1,55	13,0								
	PB II.3	152				3,0	26	14,0	77,7	2,02	22,0								
152		4,0				32	14,0	89,5	2,33	24,0									
Miyauchi (1997)	PB I.1	150	2,0	45,2	-	0,11	231	15,1	59,4	1,31	9,50	-	-	-	-				
		150				0,22			79,4	1,76	12,50								
	PB II.1	150	2,0	31,2	-	0,11	231	15,1	52,4	1,68	12,10	-	-	-	-				
		150				0,22			67,4	2,16	15,50								
		150				0,33			81,7	2,62	20,10								
	PB III.1	100	2,0	51,9	-	0,11	231	15,1	75,2	1,45	9,60	-	-	-	-				
		100				0,22			104,6	2,02	12,80								
	PB IV.1	100	2,0	33,7	-	0,11	231	15,1	69,6	2,07	14,10	-	-	-	-				
		100				0,22			88,0	2,61	14,90								
100		0,33				109,9			3,26	19,0									
Watanabe (1997)	PB I.1	100	2,0	30,2	2,3	0,17	235	14,6	46,6	1,54	15,10	6,57	9,34	0,64	-				
	PB I.3	100				0,50			87,2	2,89	31,10	13,52	8,18	0,56	-				
		100				0,67			104,6	3,46	41,50	18,04	7,59	0,52	-				
	PB I.1a	100				0,14	637	3,8	41,7	1,38	5,80	2,52	2,28	0,60	-				
		100				0,28			56,0	1,85	8,80	3,83	2,17	0,57	-				
	PB I.3a	100				0,42	63,3	2,10	13,0	5,65	2,17	0,57	-						
Kono (1998)	PB I.1	100	2,0	32,3	-	0,17	235	16,3	50,7	1,57	7,90	-	9,62	0,59	-				
	PB II.3	100	2,0	34,8	-	0,50	235	16,3	110,1	3,16	24,90	-	6,19	0,38	-				
Arduini (1999)	PB I.1	150	2,0	36,9	-	0,17	235	14,9	47,6	1,29	0,80	-	-	-	-				
	PB I.3	150				0,50			81,1	2,20	1,40								
Bortolotti (1999)	PB I.1	155	2,0	49,78	-	0,13	230	15,2	54,3	1,09	7,70	-	-	-	-				
	PB I.2	155				0,26			68,8	1,38	14,70								
	PB I.3	155				0,39			82,3	1,65	17,50								

tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	$f_{cc}$ [MPa]	$\varepsilon_{cc}$ [‰]	$t_f$ [mm]	$E_f$ [GPa]	$\varepsilon_f$ [‰]	$f_{cc}$ [MPa]	$f_{cc}/f_{cc0}$	$\varepsilon_{cc}$ [‰]	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{cc0}$	$\varepsilon_{n,rup}$ [‰]	$\varepsilon_{n,rup}/\varepsilon_f$	$f_j$ [MPa]	
Matthys (1999)	PB I.1	150	2,0	34,9	2,1	0,12	240	16,3	44,3	1,27	8,50	4,05	11,57	0,71	-	
		150							42,2	1,21	7,20	3,43	10,76	0,66	-	
	PB I.2	150							41,3	1,18	4,0	1,90	1,89	0,46	-	
		150							40,7	1,17	3,60	1,71	1,76	0,43	-	
Purba a Muffi (1999)	PB I.1	190,6	4,13	27,07	-	0,22	230	15,1	53,9	1,99	5,70	-	-	-	-	
		190,6							49,6	1,83	4,90	-	-	-	-	
Toutanji (1999)	PB I.1	76	4,01	30,93	-	0,11	231	15,1	95,0	3,07	24,50	-	12,53	0,83	-	
	PB I.1b					0,17	373	7,9	94,0	3,04	15,50	-	5,53	0,70	-	
Rochette Labossiere (2000)	PB I.1	100	2,0	42,0	2,2	0,60	83	15,3	73,5	1,75	16,50	7,50	8,87	0,58	8,81	
		100							73,5	1,75	15,70	7,14	9,49	0,62	9,41	
		100							67,6	1,61	13,50	6,14	7,96	0,52	7,90	
Shahawy (2000)	PB I.4	153	1,99	19,4	-	1,44	83	27,5	75,7	3,90	35,60	-	5,78	0,21	9,02	
	PB II.1	153	1,99	49,0	-	0,36	83	27,5	59,1	1,21	6,20	-	7,43	0,27	2,90	
Zhang (2000)	PB I.3	150	2	34,3	-	3,0	30	30,0	59,0	1,72	20,10	-	-	-	23,76	
Xiao a Wu (2000)	PB I.1	152	2,01	33,7	2,5	0,38	105	15,0	47,9	1,42	12,0	4,80	8,40	0,56	4,41	
		152							49,7	1,47	14,0	5,60	11,55	0,77	6,06	
		152							49,4	1,47	12,40	4,96	8,70	0,58	4,57	
	PB I.2	152				64,6	1,92	16,50	6,60	9,15	0,61	9,61				
		152				75,2	2,23	22,50	9,0	10,05	0,67	10,55				
		152				71,8	2,13	21,60	8,64	10,05	0,67	10,55				
	PB I.3	152				82,9	2,46	24,50	9,80	8,25	0,55	12,99				
		152				95,4	2,83	30,30	12,12	9,0	0,60	14,18				
	PB II.1	152				54,8	1,25	6,0	2,61	8,10	0,54	4,25				
		152				52,1	1,19	3,90	1,70	7,65	0,51	4,02				
		152				48,7	1,11	3,70	1,61	2,85	0,19	1,50				
	PB II.2	152				84,0	1,92	15,70	6,83	9,15	0,61	9,61				
		152				79,2	1,81	13,70	5,96	8,40	0,56	8,82				
		152				85,0	1,94	16,60	7,22	10,05	0,67	10,55				
	PB II.3	152				96,5	2,20	17,40	7,57	10,05	0,67	15,83				
		152				92,6	2,11	16,80	7,30	7,95	0,53	12,52				
		152				94,0	2,15	17,50	7,61	7,05	0,47	11,10				
	PB III.1	152				57,9	1,05	2,80	1,04	7,05	0,47	3,70				
		152				58,1	1,05	3,10	1,15	1,95	0,13	1,02				
		152				62,9	1,14	4,10	1,52	6,15	0,41	3,23				
	PB III.2	152				74,6	1,35	3,90	1,44	7,35	0,49	7,72				
		152				77,6	1,41	8,10	3,0	8,25	0,55	8,66				
		152				106,5	1,93	14,30	5,30	7,65	0,51	12,05				
	PB III.3	152				108,0	1,96	14,50	5,37	8,55	0,57	13,47				
152		103,3	1,87	11,80	4,37	7,05	0,47	11,10								
152		103,3	1,87	11,80	4,37	7,05	0,47	11,10								
Dias da Silva a Santos (2001)	PB I.1	150	4,0	28,2	-	0,11	240	15,4	31,4	1,11	3,90	-	2,60	0,17	-	
	PB I.2	150				0,22			57,4	2,04	20,50		11,80	0,77	-	
	PB I.3	150				0,33			69,5	2,46	25,90		11,40	0,74	-	
	PB I.1a	150				0,17	390	7,7	41,5	1,47	7,50	3,70	0,48	-		
	PB I.2a	150				0,33			65,6	2,33	18,10	6,90	0,90	-		
	PB I.3a	150				0,50			79,4	2,82	16,90	6,40	0,83	-		
Karabinis a Rousakis (2001)	PB Ia.0	200	1,60	40,9	2,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	PB Ib.0	200		38,5	2,80				-	-	-	-	-	-	-	-
	PB I.1	200	1,60	39,7	2,76	0,12	240	15,5	43,0	1,08	8,0	2,90	-	-	-	-
		200							41,6	1,05	7,10	2,57				
		200							46,0	1,16	3,50	1,27				
	PB I.2	200				51,5	1,30	8,80	3,19	-	-	-				
		200				50,0	1,26	5,80	2,10							
		200				55,0	1,39	8,60	3,12							
	PB I.3	200	1,60	39,7	2,76	0,35	240	15,5	67,0	1,69	17,60	6,38	-	-	-	-
		200							51,5	1,30	10,90	3,95				
		200							45,0	1,13	6,72	2,43				

tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	$f_{co}$ [MPa]	$\varepsilon_{co}$ [‰]	$t_f$ [mm]	$E_f$ [GPa]	$\varepsilon_f$ [‰]	$f_{cc}$ [MPa]	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}$ [‰]	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rup}$ [‰]	$\varepsilon_{h,rup}/\varepsilon_f$	$f_f$ [MPa]
Karabinis a Rousakis (2001)	PB IIa.0	200	1,60	33,9	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PB IIb.0	200		35,7	1,80										
	PB II.1	200	1,60	34,8	1,91	0,12	240	15,5	42,5	1,22	8,60	4,50	-	-	-
		200							42,0	1,21	12,40	6,49			
		200							41,0	1,18	3,0	1,57			
	PB II.2	200	1,60	34,8	1,91	0,23	240	15,5	50,0	1,44	6,0	3,14	-	-	-
		200							48,5	1,39	10,40	5,45			
		200							50,0	1,44	10,70	5,60			
	PB II.3	200	1,60	34,8	1,91	0,35	240	15,5	63,0	1,81	17,20	9,01	-	-	-
		200							67,5	1,94	17,10	8,95			
		200							65,5	1,88	16,90	8,85			
	Micelli (2001)	PB I.1	100	2,0	37,0	-	0,16	227	16,7	60,0	1,62	10,20	-	12,02	0,72
Pessiki (2001)	PB I.1	152	4,01	26,2	-	1,0	38	15,0	50,6	1,93	14,40	-	9,0	0,60	4,50
	PB I.2	152				2,0			64,0	2,44	16,50		7,20	0,48	7,20
Rousakis (2001)	PB I.1	150	2,0	25,15	-	0,17	118	17,1	38,8	1,54	4,40	-	-	-	3,02
	PB II.5	150	2,0	82,13	-	0,85	118	17,1	137,9	1,68	24,50	-	7,70	0,45	10,29
Wang a Cheong (2001)	PB I.1	200	3,0	27,9	1,60	0,36	235	18,7	82,80	2,97	15,20	9,50	8,5	0,45	-
		200							81,20	2,91	14,30	8,94	10,70	0,57	-
De Lorenzis (2002)	PB I.2	120	2,0	43,0	2,2	0,30	91,0	11,3	58,5	1,36	11,60	5,27	7,01	0,62	3,19
		120							65,6	1,53	9,50	4,32	8,02	0,71	3,65
	PB I.3	150	2,0	38,0	2,1	0,45	91,0	11,3	62,0	1,63	9,50	4,52	8,02	0,71	4,38
		150							67,3	1,77	13,50	6,43	8,02	0,71	4,38
	ŽB I.2	120	2,0	43,0	2,2	0,30	91,1	11,3	58,5	1,36	8,70	3,95	-	-	3,40
		120							65,6	1,53	8,20	3,73	-	-	3,40
	ŽB I.3	150	2,0	38,0	2,1	0,45	91,1	11,3	62,0	1,63	7,10	3,38	-	-	4,08
		150							67,3	1,77	12,40	5,90	-	-	4,08
Bullo (2003)	PB I.1	150	2,0	32,54	-	0,17	390	7,7	52,6	1,62	8,30	-	4,70	0,61	-
		150							56,6	1,74	9,30		5,24	0,68	-
		150							61,1	1,88	8,30		4,24	0,55	-
	PB I.3	150	2,0	32,54	-	0,50	390	7,7	97,3	2,99	18,20	-	6,39	0,83	-
		150							83,8	2,57	12,70		4,39	0,57	-
		150							100,2	3,08	16,90		5,39	0,70	-
C&M <sup>1)</sup>	PB I.1	100	2,0	20,05	-	0,17	230	14,9	49,6	2,47	25,50	-	-	-	-
Harriss a Khandel (2003)	PB I.1	152	2,01	32,1	-	1,0	25	14,0	32,9	1,02	6,0	-	10,36	0,74	3,41
	PB I.2	152				2,0			35,8	1,12	8,60	-	11,90	0,85	7,83
	PB I.3	152				3,0			52,2	1,63	13,80	-	15,54	1,11	-
Lin a Li (2003)	PB I.1	150	2,0	17,2	-	1,0	26	18,0	37,2	2,16	-	-	-	-	4,12
		120				1,0			42,1	2,45	-	-	-	-	4,12
		100				1,0			44,4	2,58	-	-	-	-	4,12
	PB I.2	150	2,0	17,2	-	2,0	26	18,0	53,7	3,12	-	-	-	-	8,24
		120				2,0			61,2	3,56	-	-	-	-	8,24
		100				2,0			68,9	4,01	-	-	-	-	8,24
	PB I.3	150	2,0	17,2	-	3,0	26	18,0	70,9	4,12	-	-	-	-	12,36
		120				3,0			82,5	4,80	-	-	-	-	12,36
		100				3,0			90,0	5,23	-	-	-	-	12,36
	PB II.1	150	2,0	20,6	-	1,0	26	18,0	43,7	2,12	-	-	-	-	4,12
		120				1,0			47,3	2,30	-	-	-	-	4,12
		100				1,0			55,2	2,68	-	-	-	-	4,12
	PB II.2	150	2,0	20,6	-	2,0	26	18,0	59,6	2,89	-	-	-	-	8,24
		120				2,0			74,0	3,59	-	-	-	-	8,24
		100				2,0			78,8	3,83	-	-	-	-	8,24
	PB II.3	150	2,0	20,6	-	3,0	26	18,0	81,3	3,95	-	-	-	-	12,36
		120				3,0			87,7	4,26	-	-	-	-	12,36
		100				3,0			99,9	4,85	-	-	-	-	12,36
	PB III.1	150	2,0	27,5	-	1,0	26	18,0	47,2	1,72	-	-	-	-	4,12
		120				1,0			54,3	1,97	-	-	-	-	4,12
		100				1,0			60,0	2,18	-	-	-	-	4,12
PB III.2	150	2,0	27,5	-	2,0	26	18,0	67,3	2,45	-	-	-	-	8,24	
	120				2,0			78,3	2,85	-	-	-	-	8,24	
	100				2,0			87,2	3,17	-	-	-	-	8,24	
PB III.3	150	2,0	27,5	-	3,0	26	18,0	85,5	3,11	-	-	-	-	12,36	
	120				3,0			95,1	3,46	-	-	-	-	12,36	
	100				3,0			105,5	3,84	-	-	-	-	12,36	

tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	$f_{co}$ [MPa]	$\varepsilon_{co}$ [‰]	$t_f$ [mm]	$E_f$ [GPa]	$\varepsilon_f$ [‰]	$f_{cc}$ [MPa]	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}$ [‰]	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{n,rupt}$ [‰]	$\varepsilon_{n,rupt}/\varepsilon_f$	$f_j$ [MPa]
Rousakis (2003)	PB I.1	150	2,0	20,43	-	0,17	234	19,2	41,3	2,02	9,60	-	8,06	0,42	-
	PB I.2	150				0,34			57,2	2,80	14,20		6,34	0,33	-
	PB I.3	150				0,51			63,1	3,09	14,20		5,76	0,30	-
	PB II.1	150	2,0	49,2	-	0,17	234	19,2	79,0	1,61	3,90	-	4,42	0,23	-
	PB II.2	150				0,34			83,9	1,71	3,50		2,69	0,14	-
	PB II.3	150				0,51			100,6	2,04	6,20		4,80	0,25	-
Faella (2004)	PB I.1	150	2,0	21,1	-	0,17	240	15,0	50,1	2,37	17,40	-	-	-	-
		150							51,8	2,45	17,90				
		150							58,1	2,75	20,10				
	PB I.2	150	2,0	21,1	-	0,34	240	15,0	71,1	3,37	24,60	-	-	-	-
		150							75,0	3,55	25,20				
	PB II.1	150	2,0	28,0	-	0,17	240	-	59,4	2,12	13,30	-	-	-	-
		150							66,7	2,38	14,20				
		150							87,6	3,12	19,90				
PB II.2	150	2,0	28,0	-	0,34	240	-	91,0	3,24	18,20	-	-	-	-	
	150														
Lam a Teng (2004)	PB I.1	152	2,01	35,9	2,0	0,17	230	14,9	50,4	1,40	12,70	6,35	9,83	0,66	-
		152							47,2	1,31	11,10	5,55	8,64	0,58	-
		152							53,2	1,48	12,90	6,45	8,94	0,60	-
	PB I.2	152	2,01	35,9	2,0	0,33	230	14,9	68,7	1,91	16,80	8,40	9,39	0,63	-
		152							69,9	1,95	19,60	9,80	9,24	0,62	-
	PB I.1	152	2,01	34,3	1,9	0,50	230	14,9	82,6	2,41	20,50	10,79	7,60	0,51	-
		152							90,4	2,64	24,10	12,68	8,34	0,56	-
		152							97,3	2,84	25,20	13,26	8,64	0,58	-
	PB I.2	152	2,01	34,3	1,9	0,17	230	14,9	50,3	1,47	10,20	5,37	8,49	0,57	-
		152							50,0	1,46	10,80	5,68	6,85	0,46	-
		152							56,7	1,65	11,70	6,16	6,56	0,44	-
	Thériault (2004)	PB I.1	51	2,0	18	-	0,17	230	15,1	70,0	3,89	-	-	-	-
PB II.2		152	2,0	37	-	0,33	230	15,1	64,0	1,73	-	-	-	-	-
		152	5,93						64,0	1,73	-	-	-	-	
PB III.4		304	2,0	35	-	0,66	230	15,1	66,0	1,89	-	-	-	-	-
PB IV.4		304	6	39	-	0,66	230	15,1	70,0	1,79	-	-	-	-	-
Berthet (2005)	PB I.2	70	2,0	112,6	-	0,34	230	14,0	141,1	1,25	4,50	-	7,14	0,51	-
		70							143,1	1,27	4,90		7,42	0,53	-
		70							189,5	1,68	7,20		7,56	0,54	-
	PB I.5	70	2,0	112,6	-	0,85	230	14,0	187,9	1,67	7,0	-	7,28	0,52	-
		70													
	PB II.2	70	2,0	169,7	-	0,34	230	14,0	186,4	1,10	6,70	-	4,62	0,33	-
		70							1,02	230	14,0		296,4	1,75	10,20
	PB III.1	160	2,0	25	-	0,17	230	14,0	42,8	1,71	16,30	-	9,66	0,69	-
		160							37,8	1,51	9,30		9,66	0,69	-
		160							45,8	1,83	16,70		9,66	0,69	-
	PB III.2	160	2,0	25	-	0,33	230	14,0	56,7	2,27	17,30	-	9,10	0,65	-
		160							55,2	2,21	15,80		9,10	0,65	-
		160							56,1	2,24	16,80		9,10	0,65	-
	PB IV.1	160	2,0	40,7	-	0,11	230	14,0	49,8	1,22	5,50	-	10,22	0,73	-
		160							50,8	1,25	6,60		9,52	0,68	-
		160							48,8	1,20	6,10		12,04	0,86	-
	PB IV.1b	160	2,0	40,7	-	0,17	230	14,0	53,7	1,32	6,60	-	8,82	0,63	-
		160							54,7	1,34	6,20		8,54	0,61	-
		160							51,8	1,27	6,40		10,50	0,75	-
	PB IV.2	160	2,0	40,7	-	0,22	230	14,0	59,7	1,47	6,0	-	7,98	0,57	-
		160							60,7	1,49	6,90		8,40	0,60	-
		160							60,2	1,48	7,30		8,12	0,58	-
	PB IV.4	160	2,0	40,7	-	0,44	230	14,0	91,6	2,25	14,40	-	9,24	0,66	-
		160							89,6	2,20	13,60		9,80	0,70	-
		160							86,6	2,13	11,70		8,96	0,64	-
	PB IV.9	160	2,0	40,7	-	0,99	230	14,0	142,4	3,50	24,60	-	9,94	0,71	-
		160							140,4	3,45	23,90		10,08	0,72	-
PB IV.12	160	2,0	40,7	-	1,32	230	14,0	166,3	4,09	27,0	-	10,08	0,72	-	
PB V.3	160	2,0	51,97	-	0,33	230	14,0	82,6	1,59	8,30	-	9,38	0,67	-	
	160							82,6	1,59	7,0		8,68	0,62	-	
	160							82,3	1,58	7,70		8,96	0,64	-	
PB V.6	160	2,0	51,97	-	0,66	230	14,0	108,1	2,08	11,40	-	6,72	0,48	-	
	160							112,0	2,16	11,20		8,82	0,63	-	
	160							107,9	2,08	11,20		8,82	0,63	-	

tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	f <sub>co</sub> [MPa]	ε <sub>co</sub> [‰]	t <sub>f</sub> [mm]	E <sub>f</sub> [GPa]	ε <sub>f</sub> [‰]	f <sub>cc</sub> [MPa]	f <sub>cc</sub> /f <sub>co</sub>	ε <sub>cc</sub> [‰]	ε <sub>cc</sub> /ε <sub>co</sub>	ε <sub>h,rup</sub> [‰]	ε <sub>h,rup</sub> /ε <sub>f</sub>	f <sub>l</sub> [MPa]			
C&H <sup>2)</sup>	PB I.1	152	2,0	33,2	-	2,0	25	14,0	46,8	1,41	9,30	-	12,46	0,89	8,20			
Mandal (2005)	PB I.1	100	2,0	31,0	-	0,80	47	16,7	73,8	2,38	30,80	-	-	-	8,29			
	PB II.1	100	2,0	46,0	-	0,80	47	16,7	77,1	1,68	18,40	-	-	-	8,29			
	PB III.1	100	2,0	55,0	-	0,80	47	16,7	72,1	1,31	8,0	-	-	-	8,29			
	PB IV.1	100	2,0	67,0	-	0,80	47	16,7	90,0	1,34	3,20	-	-	-	8,29			
	PB V.1	100	2,0	81,0	-	0,80	47	16,7	100,4	1,24	3,30	-	-	-	8,29			
Modarelli (2005)	PB I.1	150	2,0	28,0	-	0,17	221	14,0	55,3	1,97	9,0	-	15,26	1,09	-			
	PB II.1	150	2,0	38,0	-	0,17	221	14,0	62,7	1,65	4,80	-	13,16	0,94	-			
Lam (2006)	PB I.1	152	2,01	41,1	2,6	0,17	250	15,2	52,6	1,28	9,0	3,46	8,06	0,53	-			
		57,0							1,39	12,10	4,65	10,79	0,71	-				
		55,4							1,35	11,0	4,23	10,64	0,70	-				
	PB I.2	152	2,01	38,9	2,5	0,33	247	15,2	76,8	1,97	19,10	7,35	10,64	0,70	-			
		79,1							2,03	20,80	8,0	11,25	0,74	-				
		65,8							1,69	12,50	4,81	7,90	0,52	-				
Wu (2006)	PB I.1	152	1,97	23,07	-	0,14	563	-	50,5	2,19	12,70	-	5,10	-	-			
		48,9							2,12	12,0	-	5,10	-	-				
	PB I.1a	152				0,17	243	-	44,9	1,95	20,10	-	17,40	-	-			
		152							0,17	243	-	45,9	1,99	21,50	-	17,40	-	-
PB I.2a	152	0,33	243	-	82,0	3,55	37,50	-	17,40	-	-							
Yan (2006)	PB I.2	406	2,25	15,2	-	2,0	87	14,0	49,1	3,23	22,0	-	6,02	0,43	5,16			
Ciupala (2007)	PB I.1	100	2,0	33,0	-	0,12	240	15,5	57,8	1,75	-	-	13,95	0,90	-			
		100							57,8	1,75	-	13,95	0,90	-				
	PB I.2	100				0,23	240	15,5	89,1	2,70	21,40	-	16,12	1,04	-			
	PB I.3	100				0,35	240	15,5	115,5	3,50	25,70	-	14,42	0,93	-			
Jiang a Teng (2007)	PB I.2	152	2,01	38,0	2,2	0,68	241	15,0	110,1	2,90	25,50	11,59	9,75	0,65	-			
		152							107,4	2,83	26,10	11,86	9,60	0,64	-			
	PB I.3	152				1,02	241	15,0	129,0	3,39	27,90	12,68	8,85	0,59	-			
		152							135,7	3,57	30,80	14,0	9,30	0,62	-			
	PB I.4	152				1,36	241	15,0	161,3	4,24	37,0	16,82	8,70	0,58	-			
		152							158,5	4,17	35,40	16,09	8,70	0,58	-			
	PB II.1	152				2,01	37,7	2,8	0,11	260	15,0	48,5	1,29	9,0	3,21	9,30	0,62	-
		152										50,3	1,33	9,10	3,25	10,95	0,73	-
	PB III.1	152				2,01	44,2	2,6	0,11	260	15,0	48,1	1,09	6,90	2,65	7,35	0,49	-
		152										51,1	1,16	8,90	3,42	9,75	0,65	-
	PB III.2	152				0,22	260	15,0	0,22	260	15,0	65,7	1,49	13,0	5,0	11,85	0,79	-
		152										62,9	1,42	10,30	3,96	9,45	0,63	-
	PB IV.3	152				2,01	47,6	2,8	0,33	251	15,0	82,7	1,74	13,0	4,64	9,0	0,60	-
		152										85,5	1,80	19,40	6,93	11,25	0,75	-
152	85,5	1,80	18,20	6,50	10,65	0,71	-											
Shehata (2007)	PB I.1	150	2,0	25,6	-	0,17	235	15,0	43,9	1,71	-	-	-	-	-			
	PB I.2	150				0,33			59,6	2,33	-	-	-	-				
	PB II.1	150	2,0	29,8	2,1	0,17	235	15,0	57,0	1,91	12,30	5,86	12,45	0,83	-			
		PB II.2							150	0,33	72,1	2,42	17,40	8,29	12,0	0,80	-	
	PB III.1	150	2,0	34,0	-	0,17	235	15,0	61,2	1,80	9,10	-	-	-	-			
	PB III.2	150							0,33	82,1	2,41	11,0	-	-	-	-		
	PB III.2*	225							0,33	62,9	1,85	10,90	-	-	-	-		
	PB IV.1	150	2,0	61,7	-	0,17	235	15,0	76,4	1,24	6,0	-	-	-	-			
PB IV.2	150	0,33							97,3	1,58	8,70	-	-	-	-			
Wang a Wu (2008)	PB I.1	150	2,0	30,9	-	0,17	219	19,9	53,8	1,74	-	-	12,34	0,62	-			
		150				0,17			61,2	1,98	-	-	-	-				
		150				0,17			52,3	1,69	-	-	-	-				
	PB I.2	150				0,33	219	19,9	88,2	2,85	-	-	13,13	0,66	-			
		150							0,33	85,6	2,77	-	-	-	-			
	PB II.1	150				0,17	226	19,2	68,0	1,31	-	-	15,74	0,82	-			
		150							0,17	69,2	1,33	-	-	-	-			
	PB II.2	150				0,33	226	19,2	66,5	1,28	-	-	-	-	-			
		150							100,0	1,92	-	-	-	-				
		150							94,9	1,82	-	-	15,55	0,81	-			
150	0,33	103,0	1,98	-	-	-	-											



tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	f <sub>co</sub> [MPa]	ε <sub>co</sub> [‰]	t <sub>f</sub> [mm]	E <sub>f</sub> [GPa]	ε <sub>f</sub> [‰]	f <sub>co</sub> [MPa]	f <sub>co</sub> /f <sub>co</sub>	ε <sub>co</sub> [‰]	ε <sub>co</sub> /ε <sub>co</sub>	ε <sub>h,rup</sub> [‰]	ε <sub>h,rup</sub> /ε <sub>f</sub>	f <sub>f</sub> [MPa]	
Cui (2009)	PB II.1	152	1,97	48,1	-	1,0	85	9,6	80,9	1,68	15,10	-	10,56	1,10	7,09	
		152							86,6	1,80	15,30		11,23	1,17	7,09	
	PB II.2	152	1,97	48,1	-	2,0	85	9,6	109,4	2,27	20,10	-	9,70	1,01	14,17	
		152							126,7	2,63	26,60		12,19	1,27	14,17	
	PB II.3	152	1,97	48,1	-	3,0	85	9,6	162,7	3,38	30,0	-	11,62	1,21	21,26	
		152							153,6	3,19	28,90		10,37	1,08	21,26	
	PB III.2	152	1,97	79,9	-	2,0	85	9,6	142,1	1,78	11,30	-	9,89	1,03	14,17	
		152							140,8	1,76	9,70		10,94	1,14	14,17	
	PB III.3	152	1,97	79,9	-	3,0	85	9,6	172,9	2,16	14,80	-	9,79	1,02	21,26	
		152							181,8	2,28	14,70		11,14	1,16	21,26	
	PB IV.1	152	1,97	45,6	-	0,11	241	15,1	57,7	1,27	12,10	-	16,76	1,11	-	
		152							55,4	1,21	13,10		16,01	1,06	-	
	PB IV.2	152	1,97	45,6	-	0,22	241	15,1	78,0	1,71	19,70	-	16,16	1,07	-	
		152							86,8	1,90	21,40		17,97	1,19	-	
	PB IV.3	152	1,97	45,6	-	0,33	241	15,1	106,5	2,34	29,0	-	17,82	1,18	-	
		152							106,0	2,32	28,30		17,97	1,19	-	
	PB V.1	152	1,97	45,7	-	0,16	436	7,6	67,5	1,48	11,10	-	7,83	1,03	-	
		152							64,1	1,40	10,30		7,68	1,01	-	
	PB V.2	152	1,97	45,7	-	0,33	436	7,6	84,2	1,84	13,30	-	6,38	0,84	-	
		152							83,1	1,82	12,30		6,31	0,83	-	
PB V.3	152	1,97	45,7	-	0,49	436	7,6	99,7	2,18	15,60	-	6,0	0,79	-		
	152							94,9	2,08	14,30		5,47	0,72	-		
PB VI.2	152	1,97	85,6	-	0,33	436	7,6	117,7	1,38	7,10	-	4,33	0,57	-		
	152							117,5	1,37	5,50		4,10	0,54	-		
PB VI.4	152	1,97	85,6	-	0,65	436	7,6	161,6	1,89	10,20	-	3,80	0,50	-		
	152							162,6	1,90	9,50		3,72	0,49	-		
Benzaid a Mesbah (2013)	PB I.0	160	2,0	25,93	2,73	-	-	-	25,9	1,0	2,73	1,0	1,77	0,13	-	
	PB I.1	160				1,0	34	14,0	39,6	1,53	12,78	4,68	13,12	0,94	5,58	
	PB I.3	160				3,0	-	-	66,1	2,55	15,16	5,55	13,18	0,94	16,80	
	PB II.0	160	2,0	49,46	1,69	-	-	-	49,5	1,0	1,69	1,0	1,33	0,10	-	
	PB II.1	160				1,0	34	14,0	52,8	1,07	2,52	1,49	2,90	0,21	1,23	
	PB II.3	160				3,0	-	-	82,9	1,68	7,27	4,30	13,15	0,94	16,77	
	PB III.0	160	2,0	61,81	2,64	-	-	-	61,8	1,0	2,64	1,0	2,40	0,17	-	
	PB III.1	160				1,0	34	14,0	62,7	1,01	3,04	1,15	3,04	0,22	1,29	
	PB III.3	160				3,0	-	-	93,2	1,51	9,80	3,71	9,80	0,70	12,50	
	ŽB I.0	160	2,0	29,51	3,77	-	-	-	29,5	1,0	3,77	1,0	4,95	0,35	-	
	ŽB I.1	160				1,0	34	14,0	49,9	1,69	15,34	4,07	13,15	0,94	5,59	
	ŽB I.3	160				3,0	-	-	71,4	2,42	22,98	6,10	13,24	0,95	16,88	
	ŽB II.0	160	2,0	58,24	3,02	-	-	-	58,2	1,0	3,02	1,0	5,05	0,36	-	
	ŽB II.1	160				1,0	34	14,0	77,5	1,33	8,36	2,77	13,16	0,94	5,59	
	ŽB II.3	160				3,0	-	-	100,4	1,72	13,58	4,50	13,18	0,94	16,80	
	ŽB III.0	160	2,0	63,0	2,69	-	-	-	63,0	1,0	2,69	1,0	4,90	0,35	-	
	ŽB III.1	160				1,0	34	14,0	76,2	1,21	3,75	1,39	5,20	0,37	2,21	
	ŽB III.3	160				3,0	-	-	94,8	1,50	6,18	2,30	5,62	0,40	7,17	
Aire (2014)	PB I.0	150	2,0	42,0	2,4	-	-	-	42,0	1,0	2,40	1,0	-	-	-	
	PB I.1	150				0,12	240	15,5	46,0	1,10	11,0	4,6	9,50	0,61	-	
	PB I.3	150				0,35			77,0	1,83	22,60	9,4	10,50	0,68	-	
	PB I.6	150				0,70			108,0	2,57	32,3	13,5	10,60	0,68	-	
	PB II.0	150	2,0	69,0	2,4	-	-	-	69,0	1,0	2,40	1,0	-	-	-	
	PB II.1	150				0,12	240	15,5	94,0	1,36	2,80	1,17	9,00	0,58	-	
	PB II.3	150				0,35			99,0	1,43	10,10	4,21	10,30	0,66	-	
	PB II.6	150				0,70			156,0	2,26	16,0	6,67	10,80	0,70	-	
	PB II.9	150				1,05			199,0	2,88	22,10	9,21	11,90	0,77	-	
	PB II.12	150				1,40			217,0	3,14	19,60	8,17	8,40	0,54	-	
	Kosiha - krátké sloupky (2014) - prostý beton	REF.K	100	2,10	36,39	2,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1K.1	100				1,24	86,42	8,13	93,35	2,57	4,97	1,91	6,80	0,84	14,58
1K.2		100	94,55							2,60	-	-	-	-	11,50	
1K.3		100	101,92							2,80	-	-	-	-	11,50	
1K.4		100	84,38							2,32	-	-	6,30	0,78	11,50	
3K.1		100	3,72				86,42	8,13	155,81	4,28	4,97	1,91	4,71	0,58	34,49	
3K.2		100							143,06	3,93	-	-	-	-	34,49	
3K.3		100							174,87	4,81	-	-	-	-	34,49	

tabulka 17 - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou - pokračování

Autor	Označení	Ø [mm]	H/Ø [-]	$f_{co}$ [MPa]	$\varepsilon_{co}$ [‰]	$t_f$ [mm]	$E_f$ [GPa]	$\varepsilon_f$ [‰]	$f_{cc}$ [MPa]	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}$ [‰]	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rupt}$ [‰]	$\varepsilon_{h,rupt}/\varepsilon_f$	$f_f$ [MPa]
Kostíha - krátké sloupy (2014) - prostý beton	REF.T	190	1,97	35,32	0,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1T.1	185	2,05			1,24	86,42	8,13	65,96	1,87	4,36	1,67	1,75	0,22	2,03
	1T.2	185				70,77	2,0	-	-	-	-	-	-	6,21	
	1T.3	185				108,51	3,07	-	-	-	-	-	-		
	3T.1	190	2,0			3,72	86,42	8,13	117,67	3,33	5,00	1,92	6,68	0,82	23,22
	3T.2	185	2,05						115,83	3,28	-	-	-	-	-
3T.3	185	2,05	-	-	-				-	-	-	-	-		
Kostíha - krátké sloupy (2014) - železobeton	REF.1	200	1,99	43,59	2,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	REF.2	200	1,99	36,53	2,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1S.1	200	2,05	40,06	2,41	1,24	86,42	8,13	80,79	2,02	10,70	4,44	7,10	0,87	7,61
	1S.2	200	2,0						81,24	2,03	9,40	3,90	4,60	0,57	4,93
1S.3	200	1,95	82,03						2,05	8,60	3,57	6,20	0,76	6,64	
Kostíha - vysoké sloupy (2014) - železobeton	S30_9-N	200	14,50	41,56	2,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S30_1-N	200	14,55			1,24	86,42	8,13	45,53	1,10	4,75	1,91	-	-	5,747713
	S30_2-N	200	14,53			45,06	1,08	3,86	1,55	-	-	-	-	-	
	S30_3-N	200	14,50			41,26	0,99	3,56	1,43	-	-	-	-	-	

- Poznámka:**
- 1) Campione a Miraglia (2003);
  - 2) Carey a Harries (2005);
- $E_f$  modul pružnosti CFRP tkaniny, resp. laminátu CFRP tkaniny;
- $f_i$  velikost říčného tlaku ovinutí;
- $f_{co}$  pevnost neovinutého betonu v tlaku (střední hodnota);
- $f_{cc}$  pevnost ovinutého betonu v tlaku (střední hodnota);
- $H$  výška vzorku;
- $t_f$  tloušťka CFRP tkaniny, resp. tloušťka laminátu CFRP tkaniny;
- $\varepsilon_{co}$  poměrné přetvoření neovinutého betonu při dosažení maximální tlakové pevnosti;
- $\varepsilon_{cc}$  mezní poměrné přetvoření ovinutého betonu;
- $\varepsilon_f$  mezní poměrné přetvoření při přetržení tkaniny, resp. laminátu tkaniny;
- $\varepsilon_{h,rupt}$  mezní poměrné přetvoření při přetržení ovinuté tkaniny, resp. laminátu;
- $\varepsilon_{ho}$  příčné přetvoření prvku (tj. po obvodě prvku – protažení v důsledku stlačení);
- Ø průměr vzorku;
- příliš vysoké přetvoření ovinuté tkaniny při porušení (odporuje většině výsledků).

**Značení vzorků:** PB 1.Xa\* PB – prostý beton; ŽB – železobeton;

l – směs betonu;

X – počet vrstev tkaniny;

a – při totožné konfiguraci vzorku označuje jiný druh tkaniny;

\* – udává jiný poměr výšky k průměru vzorku.

### Popis vlivu součinitele účinnosti ovinutí $k_\varepsilon$

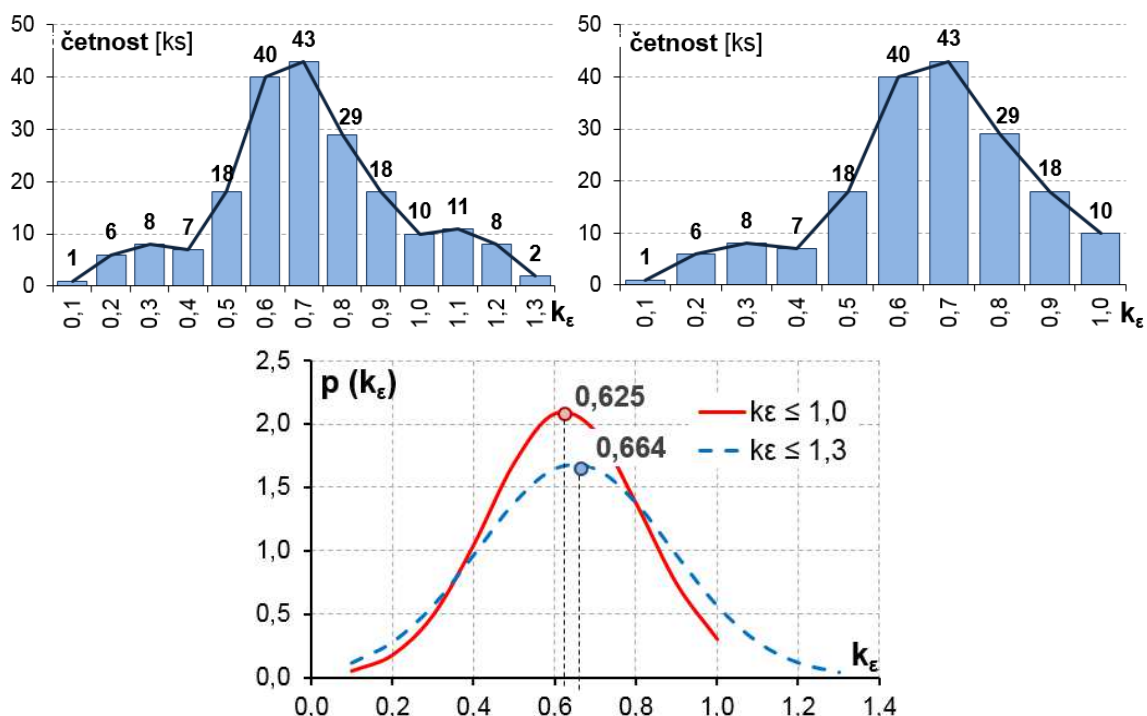
Součinitel  $k_\varepsilon$  vyjadřuje míru využití vlastností laminátu tkaniny při ovinutí sloupu, kterou porovnává s vlastnostmi laminátu tkaniny stanovenými na základě tahových zkoušek. Lze jej vyjádřit poměrem přetvoření při přetržení FRP tkaniny při ovinutí  $\varepsilon_f$  a z tahových zkoušek  $\varepsilon_{h,rupt}$ , proto je možné jej popsat vztahem

$$k_\varepsilon = \varepsilon_{h,rupt} / \varepsilon_f \quad (45)$$

Vzhledem k odlišnosti namáhání FRP tkaniny při tahové zkoušce (jednoosé namáhání tahem ve směru vláken) a při ovinutí (víceosé namáhání) dochází k redukci využití vlastností FRP tkaniny. Součinitel  $k_\varepsilon$  může proto dosahovat maximálně hodnoty 1,0. Řada výše

uvedených přístupů tuto skutečnost reflektuje buďto stanovením velikosti součinitele  $k_\varepsilon$  v závislosti na použitém typu materiálu (např. americké směrnice [37], [37] pro CFRP tkaninu udává hodnotu 0,55), nebo omezením maximálního přetvoření FRP laminátu  $\varepsilon_f$  (např. [39] limituje velikost přetvoření hodnotou 0,4 %), či stanovením maximální velikosti příčného tlaku  $\sigma_l^{/6}$  [49].

Provedením analýzy dat z tab. 17 byla výsledná hodnota součinitele  $k_\varepsilon = 0,664$  (při zohlednění hodnot součinitele  $k_\varepsilon > 1$ )<sup>17</sup>. Při respektování kombinovaného namáhání tkaniny při ovinutí nelze dosáhnout většího přetvoření při přetržení než v případě zatížení prostým tahem. Z tohoto důvodu není hodnota součinitele  $k_\varepsilon > 1$  vypovídající a po vyřazení těchto dat byla stanovena nová hodnota  $k_\varepsilon = 0,625$  (patrné z grafu 13).

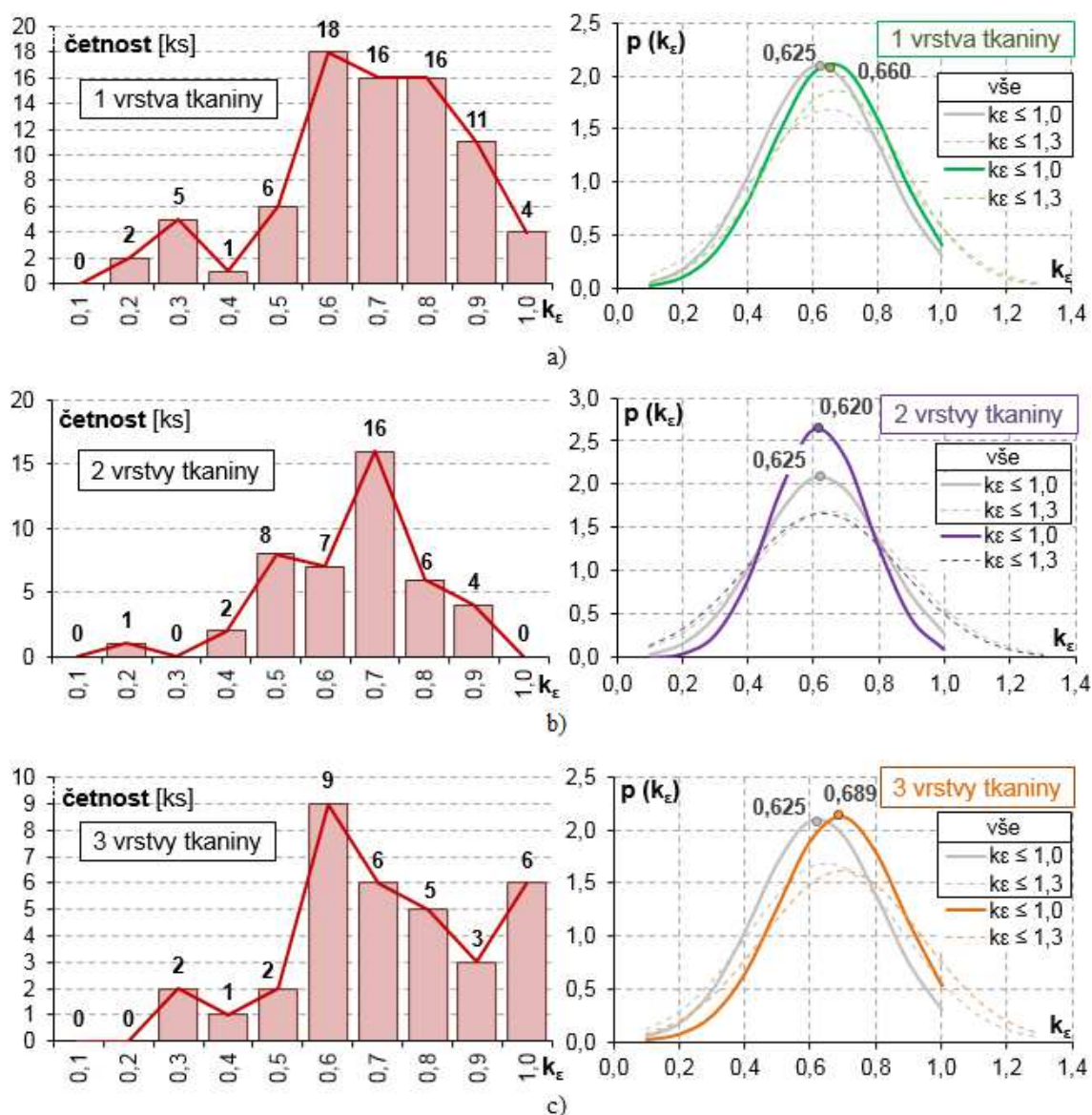


**graf 13** - Četnost a normální rozdělení součinitele efektivnosti ovinutí  $k_\varepsilon$

Další zpřesnění součinitele  $k_\varepsilon$  bylo docíleno zohledněním vlivu počtu vrstev FRP tkaniny, které je patrné z grafu 14. Závislost počtu FRP tkanin byla z hlediska četnosti dat provedena pro 1 až 3 vrstvy. Pro ilustraci je znázorněno i porovnání s rozdělením součinitele bez vlivu počtu vrstev FRP tkanin a čárkovanou čarou je zobrazeno rozdělení tohoto součinitele při zahrnutí vzorků s  $k_\varepsilon > 1,0$ .

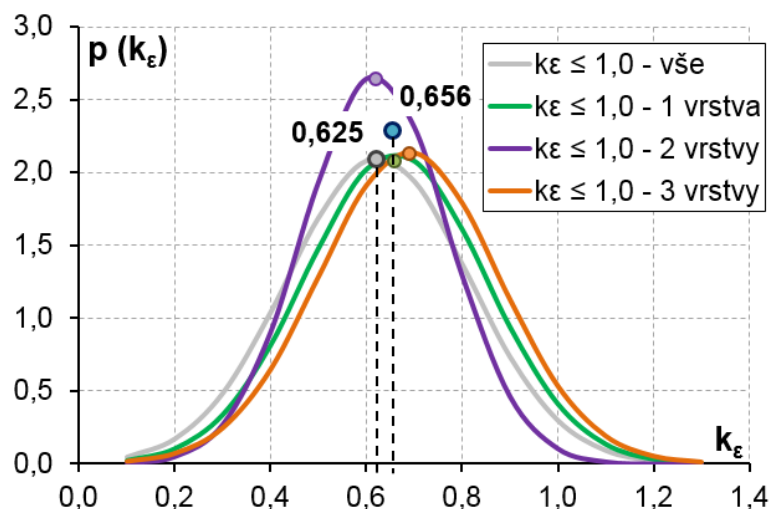
<sup>16</sup> příčný tlak, nebo také přítlak vyvozený laminátem FRP tkaniny je v publikacích značen odlišným způsobem. V této práci je příčný tlak značen  $\sigma_l$  nebo  $f_l$ ;

<sup>17</sup> součinitel účinnosti ovinutí  $k_\varepsilon$  nemůže nabývat hodnot větších než 1,0. Hodnoty součinitele  $k_\varepsilon$  vyšší než 1,0 jsou převzaty z uvedených zdrojů.



**graf 14 - Četnost a normální rozdělení součinitele  $k_\epsilon$  v závislosti na počtu vrstev FRP tkaniny: a) 1 vrstva; b) 2 vrstvy; c) 3 vrstvy**

V závislosti na počtu vrstev byla stanovena průměrná hodnota součinitele  $k_\epsilon = 0,656$  (viz graf 15). Pro jednu vrstvu laminátu FRP tkaniny nabýval součinitel  $k_\epsilon$  hodnoty 0,660, pro dvě vrstvy laminátu FRP tkaniny  $k_\epsilon = 0,620$  a pro tři vrstvy laminátu FRP tkaniny pak  $k_\epsilon = 0,689$ . V modelovém příkladu porovnání jednotlivých přístupů pro výpočet charakteristik ovinutého betonu byla uvažována průměrná hodnota součinitele  $k_\epsilon$ . Tato byla následně použita i pro znázornění únosnosti průřezu sloupu prostřednictvím interakčních diagramů.

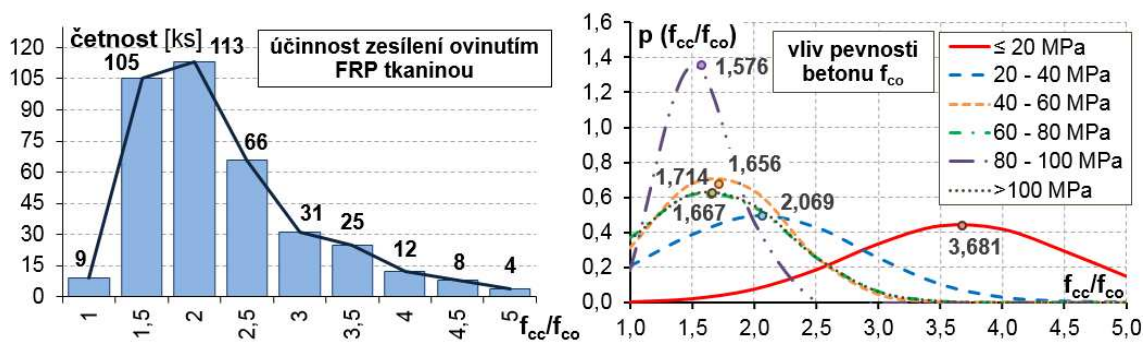


graf 15 - Normální rozdělení součinitele  $k_\epsilon$  zohledňující počet vrstev FRP tkaniny

### Účinnost ovinutí vyjádřená zvýšením pevnosti ovinutého betonu

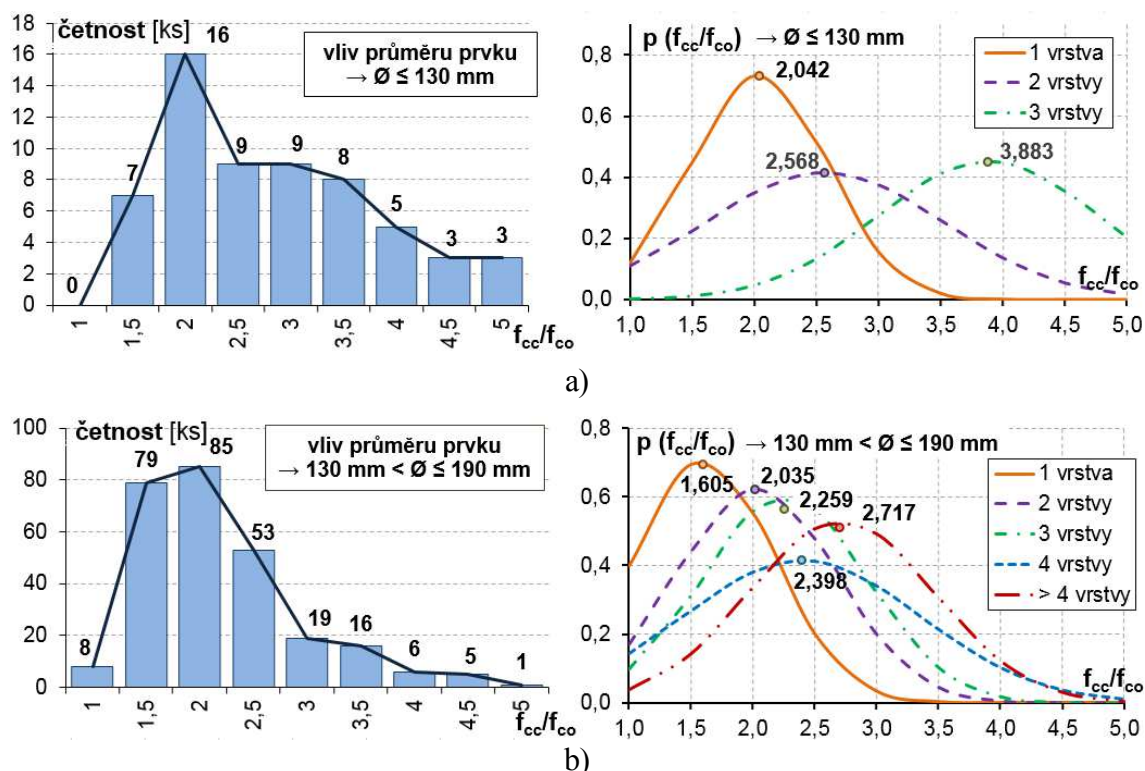
Z dalších vlivů limitujících účinnost ovinutí kompozitní tkaninou byl sledován vliv pevnosti betonu, tj. porovnání pevnosti ovinutého  $f_{cc}$  a neovinutého betonu  $f_{co}$ , vyjádřené poměrem  $f_{cc}/f_{co}$ . Sledovány byly vliv počáteční tlakové pevnosti betonu  $f_{co}$ , vliv průměru zesilovaného prvku a také vliv počtu FRP tkanin, resp. vliv tuhosti zesilující vrstvy.

Počáteční pevnost betonu je důležitým parametrem, který přímo vstupuje do vztahů definujících mechanické vlastnosti ovinutého betonu a nepřímo ovlivňuje jeho chování prostřednictvím duktility (tato charakteristika klesá s rostoucí pevností betonu v tlaku). Schopnost plastického přetváření betonu do dosažení meze pevnosti ovlivňuje napjatost tkaniny v příčném směru a determinuje míru vyvozeného přtlaku. Sledování vlivu pevnosti neovinutého betonu na účinnost ovinutí umožnilo rozdělení výsledků z tab. 17 do skupin podle velikosti počáteční pevnosti betonu  $f_{co}$ . Z grafu 16 je patrné, že účinnost ovinutí obdobně jako duktilita vykazuje sestupný trend při stoupající hodnotě tlakové pevnosti neovinutého betonu.



graf 16 - Četnost a normální rozdělení účinnosti ovinutí v závislosti na pevnosti betonu  $f_{co}$

Vlivy průměru sloupu a počtu vrstev FRP tkanin byly porovnávány společně, kdy pro daný interval průměru sloupu bylo stanoveno normální rozdělení účinnosti ovinutí v závislosti na počtu vrstev FRP tkanin. Oba tyto parametry ovlivňují velikost příčného tlaku, který je přímo úměrný počtu vrstev FRP tkanin a nepřímo úměrný průměru sloupu. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin, kdy první skupinu tvořily vzorky s průměrem do 130 mm a druhá skupina sestávala ze vzorků s průměrem v intervalu 130 až 190 mm. Výsledky statistického vyhodnocení sledovaných parametrů jsou patrné z grafu 17.



**graf 17 - Četnost a normální rozdělení účinnosti ovinutí vyjádřené poměrem  $f_{cc}/f_{co}$**

v závislosti na: a) průměru prvku do 130 mm; b) průměru prvku v intervalu 130 – 190 mm

Při porovnání vlivu zvolených velikostí průměru sloupu je v závislosti na počtu vrstev FRP tkanin pozorovatelný nárůst účinnosti ovinutí pro první skupinu vzorků o průměru do 130 mm. Vzhledem k počtu relevantních vzorků je možné porovnávat pouze 1 až 3 vrstvy FRP tkaniny, nicméně u všech skupin střední hodnota rozdělení dosahuje vyšších hodnot u vzorků s menším průměrem. Na základě tohoto lze konstatovat, že se vzrůstajícím průměrem sloupu klesá účinnost ovinutí (souvisí s rozkladem sil a výslednými radiálními silami působící po obvodu ovinutého sloupu).

V případě vlivu počtu aplikovaných vrstev FRP tkaniny se potvrdila závislost zvyšující se účinnosti ovinutí s rostoucím počtem vrstev FRP tkaniny (u obou skupin vzorků

rozlišených podle velikosti průměru bylo na základě počtu vrstev FRP tkanin možné tento trend sledovat).

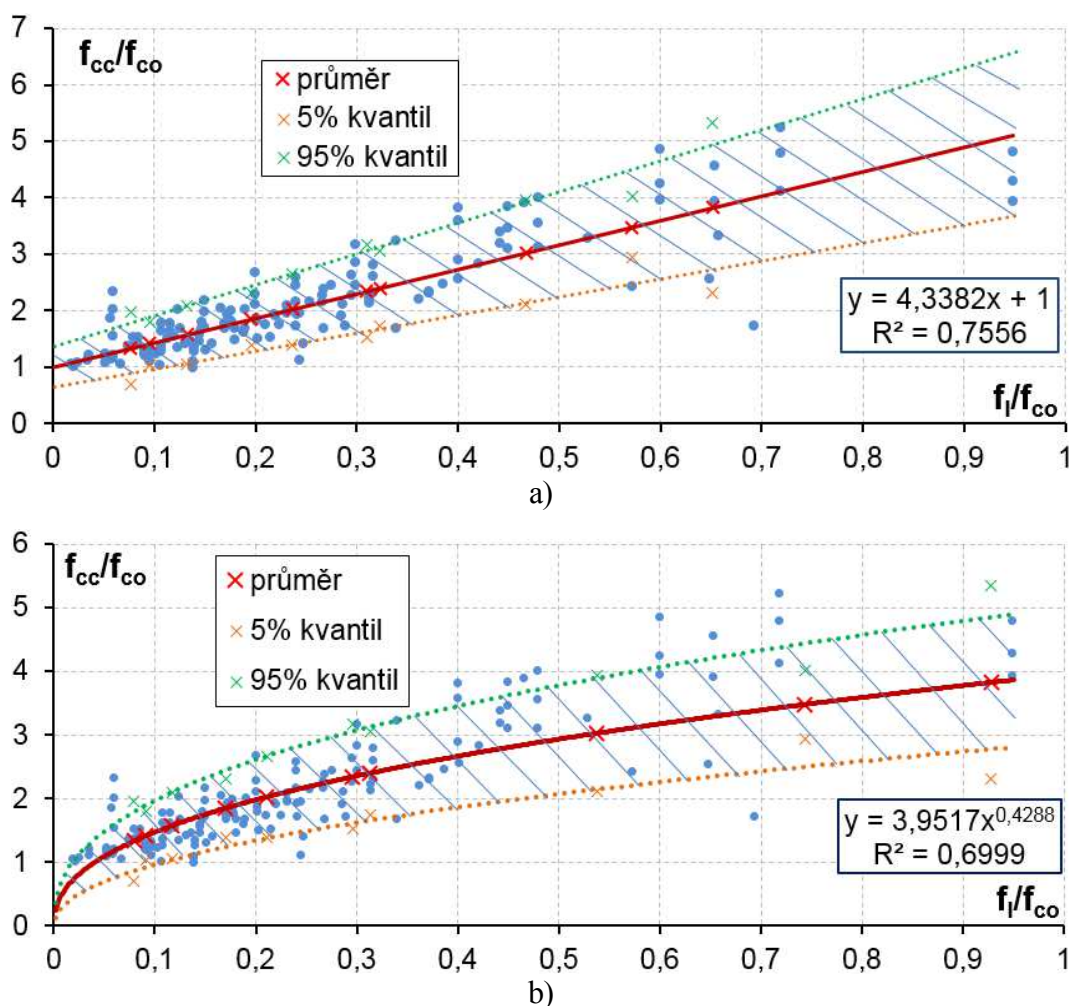
Vliv pevnosti laminované vrstvy FRP tkaniny nebylo možné pro nedostatek dat vyhodnotit (většina zdrojů blíže nespecifikuje pevnost laminátu).

#### 6.1.4. Model pro beton ovinutý FRP tkaninou

Cílem této části disertační práce bylo na základě analýzy dat z tab. 17 vytvořit výpočtový model ovinutého betonu pro predikci jeho tlakové pevnosti  $f_{cc}$ . Koncepce vztahu vycházela z vyjádření pevnosti ovinutého betonu definované dle Richart (1928) [17], jehož formulace sloužila při odvození řady pozdějších modelů. Obecně lze tento model pevnosti ovinutého betonu zapsat následovně

$$f_{cc} = f_{co} + \alpha \cdot f_l^\beta \rightarrow \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + \alpha \cdot \frac{f_l^\beta}{f_{co}}, \quad (46)$$

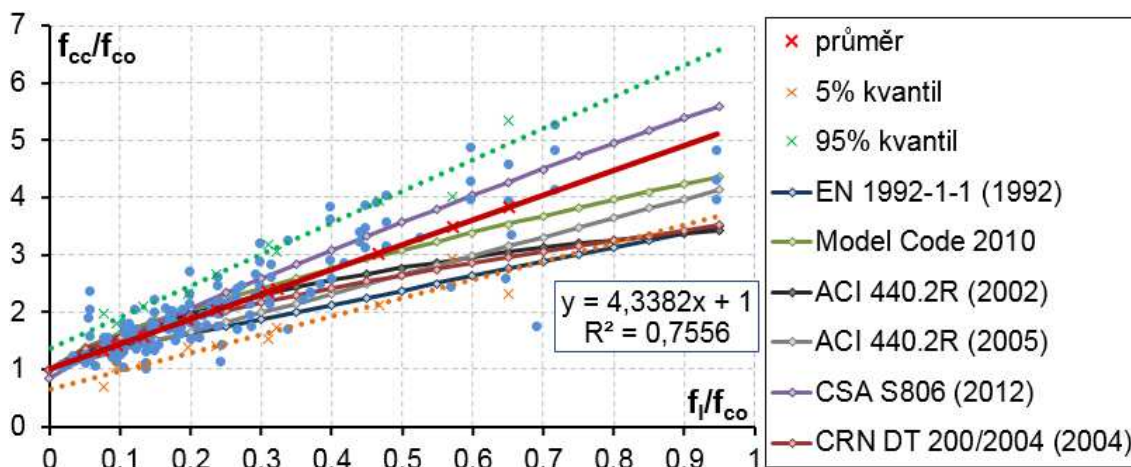
kde symboly  $\alpha$  a  $\beta$  představují neznámé parametry kalibrované na základě výsledků zatěžovacích zkoušek. Ostatní parametry, postihující v předchozích podkapitolách zmíněné vlivy ovinutí, byly v obecném zápisu vztahu opomenuty. Jejich zpracování do vztahu formou součinitelů neovlivňuje sledované parametry  $\alpha$  a  $\beta$ . Kalibrace vztahu byla provedena pomocí regresní analýzy s využitím minimalizace diferencí mezi predikovanou a experimentálně stanovenou pevností ovinutého betonu (patrné z grafu 18, kde varianta a) představuje lineární aproximaci výsledků přímkou – lineární regrese a b) znázorňuje mocninnou regresi). Výstižnost modelu je omezena pouze na aplikaci uhlíkové tkaniny. Kromě středních hodnot pevností ovinutého betonu v tlaku  $f_{cc}$  byla znázorněna oblast definovaná spodním (5 %) a horním (95 %) kvantilem. Tato byla využita při pozdějším porovnání výstižnosti predikce chování dle zvolených přístupů. Hodnota spolehlivosti lineární aproximace přímkou dosahuje 75 %. Tento průběh plně nerespektuje chování sloupů ovinutých FRP tkaninou při zohlednění vlivu počáteční pevnosti betonu  $f_{co}$ , kdy s její narůstající hodnotou dochází k postupnému snižování účinnosti ovinutí. Z tohoto důvodu byla provedena i aproximace mocninnou funkcí se spolehlivostí přibližně 70 %, která svým průběhem lépe vystihuje vliv počáteční pevnosti betonu.



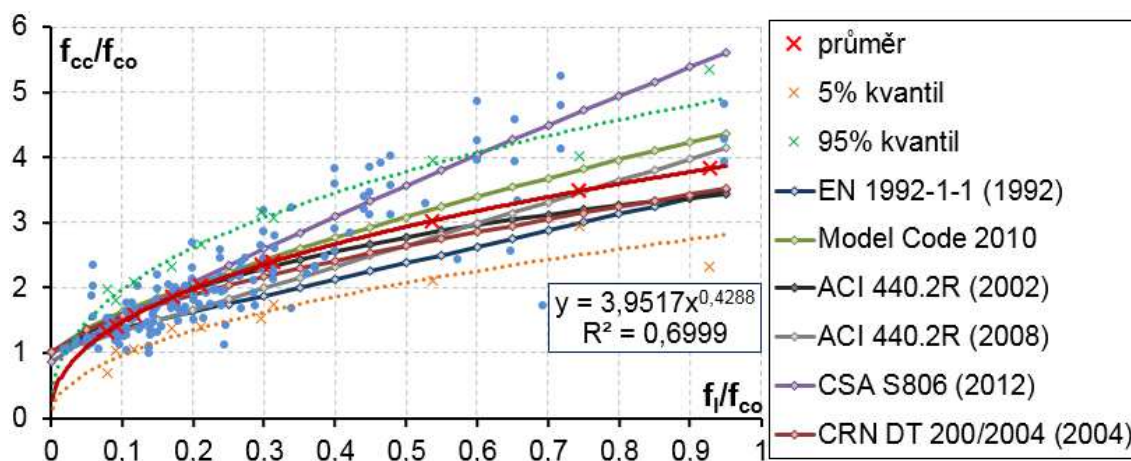
**graf 18** - Regresní analýza experimentálních prací – a) lineární aproximace; b) aproximace mocninnou funkcí

Tvorba vztahu popisující vývoj pevnosti ovinutého betonu v závislosti na velikosti přítlaku vycházela z porovnání modelů směrnic (viz tab. 5), kdy jako výchozí byl použit model s nejmenší odchylkou od regresní křivky proložené výsledky zatěžovacích zkoušek (založeno na metodě nejmenších čtverců). Na základě tohoto porovnání byly jako výchozí zvoleny modely Model Code 2010 [48] a ACI 440.2R (2002) [36]. Pro porovnání byly vyneseny průběhy tlakové pevnosti ovinutého betonu  $f_{cc}$  dle dalších směrnic, přičemž všechny uvedené spadají do oblasti definované spodním a horním kvantilem (při lineární regresí, viz graf 19). Předpis EN 1992-1-1 [43] patří mezi konzervativnější modely. Naopak je tomu v případě modelu dle CSA S806 [41], který při aproximaci mocninnou funkcí při dosažení poměru přítlaku k počáteční tlakové pevnosti neovinutého betonu  $f_l/f_{co} = 0,6$  překračuje horní hranici 95 % kvantilu (patrné z grafu 20).





**graf 19** - Porovnání výstižnosti predikce pevnosti ovinutého betonu v tlaku dle uvedených směrnic

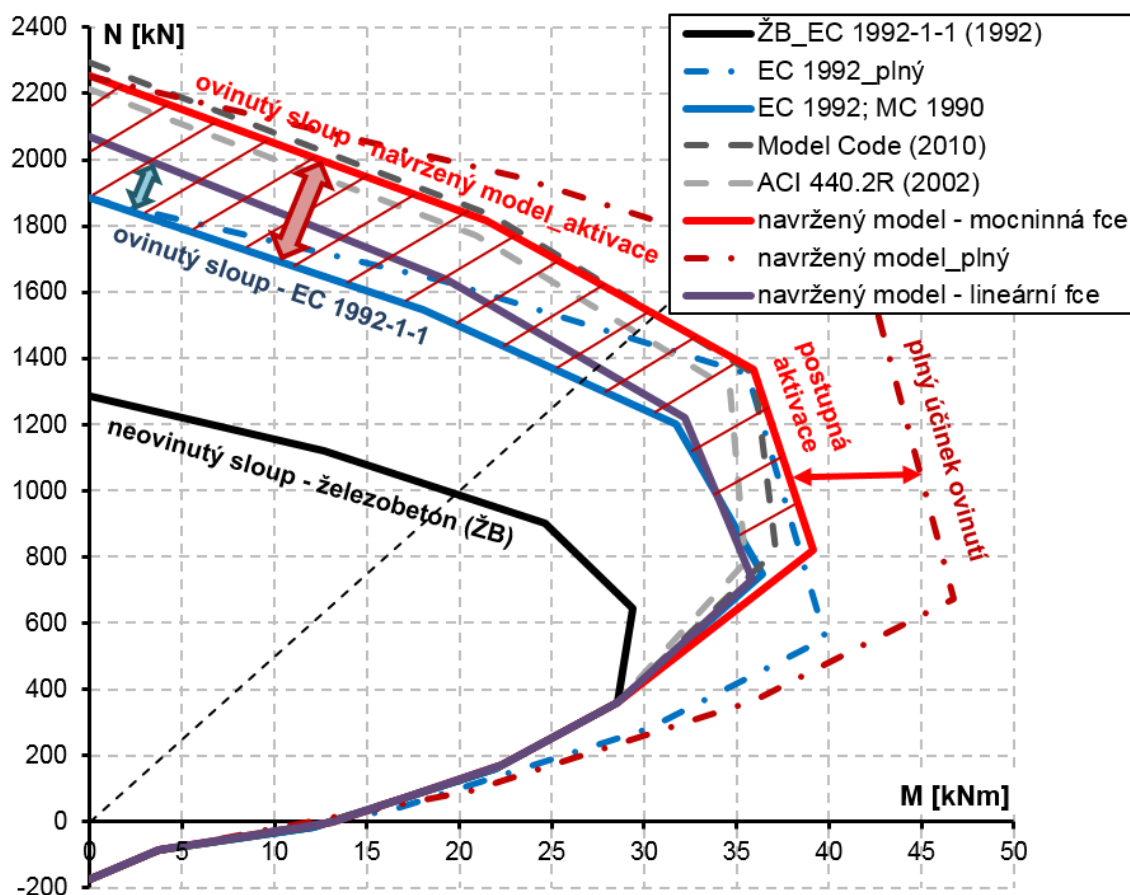


**graf 20** - Navržený model pro výpočet pevnosti ovinutého betonu v tlaku

Neznámé parametry  $\alpha$  a  $\beta$  byly na základě provedené analýzy stanoveny hodnotami  $\alpha = 3,0$ , resp.  $\beta = 0,73$ . Přesnost modelu je kromě počtu relevantních dat značně závislá na použitém typu analýzy, kdy například v případě lineární aproximace nabývají parametry hodnot  $\alpha = 1,0$  a  $\beta = 4,34$  (viz graf 19). Rozdílný přístup analýzy tak vede k predikci odlišných hodnot tlakové pevnosti ovinutého betonu  $f_{cc}$ . Proto by volba aproximace hledané funkce měla respektovat skutečné chování ovinutého betonu. Na základě tohoto je konzervativnější, ale zároveň z hlediska fyzikálního chování ovinutého betonu výstižnější použití aproximace mocninnou funkcí (porovnání je patrné z grafu 20). Svým průběhem se predikovaný model pevnosti ovinutého betonu  $f_{cc}$  nachází mezi vybranými modely směrnic [36] a [48]. Přesnost modelu bude ověřena v poslední kapitole této části při porovnání predikovaných a reálných výsledků.

Výsledný tvar vztahu predikujícího pevnosti ovinutého betonu  $f_{cc}$  v tlaku je popsán rovnicí

$$f_{cc} = f_{co} \cdot \left[ 1 + 3,0 \cdot \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0,73} \right]. \quad (47)$$



graf 21 - Únosnost ovinutého sloupu stanovená podle navrženého modelu

### 6.1.5. Vliv štíhlosti prvku na účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou

Důležitým parametrem je v případě tlačných prvků jejich štíhlost, která významným způsobem ovlivňuje jejich chování a zároveň determinuje způsob jejich porušení. Vlivem štíhlosti dochází u tlačného prvku k vybočení (svislý průhyb), jež vede k nárůstu ohybového namáhání. Z hlediska štíhlosti je možné dělit prvky na masivní tlačné prvky, na středně štíhlé prvky a na velmi štíhlé prvky. U masivních prvků jsou hodnoty svislých průhybů zanedbatelné (podélný ohyb lze zanedbat) a jejich únosnost je vyčerpána dosažením mezního přetvoření materiálu. U středně štíhlých prvků je nutno stanovit rovnováhu na přetvořeném prvku, přičemž je únosnost stále vyčerpána dosažením mezního přetvoření v nejvíce namáhaném průřezu. V případě masivních a středně štíhlých prvků se jedná o pevnostní

problém únosnosti. U velmi štíhlých tlačných prutů do dosažení kritické síly  $F_{cr}$  ( $N_{cr}$  – kritické Eulerovo břemeno) je prvek schopen přenášet rostoucí ohybové momenty od podélného ohybu. Po jejím dosažení ovšem odpovídající přetvoření vyvolá přírůstek ohybového momentu, se kterým se již tlačný prvek není schopen vyrovnat. Únosnost prvku je dosažena ztrátou stability, jedná se tak o stabilitní selhání.

U vysokých štíhlých sloupů dochází v důsledku vznikající svislého průhybu (vybočení) k nárůstu ohybového namáhání, tzn. oproti masivnímu sloupu je při stejné úrovni namáhání normálovou silou větší část průřezu tažena. Výsledkem je snížení únosnosti sloupu vlivem účinků II. řádu. U ovinutých sloupů se vliv štíhlosti projevuje stejným způsobem. V tažené části průřezu dochází u ovinutých sloupů ke kontrakci FRP tkaniny, jejíž příznivý účinek v podobě příčného tlaku je tímto eliminován. Nelze tak počítat s charakteristikami ovinutého betonu při plné účinnosti ovinutí (maximální charakteristiky ovinutého betonu). Ale vlastnosti ovinutého betonu je nutné stanovit na základě aktuální velikosti příčného tlaku, který se mění v závislosti na štíhlosti sloupu. Podstata úlohy spočívá ve stanovení velikosti redukovaného příčného tlaku, následném výpočtu charakteristik ovinutého betonu a stanovení únosnosti průřezu. Toto řešení představuje iterační proces, kdy se změnou velikosti příčného tlaku se změní i výška tlačné oblasti průřezu a je nutné ověřit využití tkaniny (velikost příčného tlaku). Uvedený jev vede ke snížení počáteční hodnoty příčného tlaku a je proto nutné opětovné provedení výpočtu se změněnou velikostí příčného tlaku<sup>18</sup>. Tento proces je nutné opakovat až do uživatelem definované vs. přijatelné chyby řešení (odchylka počáteční a konečné hodnoty příčného tlaku).

Výpočet redukované hodnoty příčného tlaku vlivem štíhlosti je možné zjednodušit při použití kritické Eulerovy síly  $F_{cr}$  a počáteční výstřednosti prvku  $e_i$ . Z výše popsaného je patrné, že s rostoucí štíhlostí klesá velikost příčného tlaku (snižuje se účinnost ovinutí). Jak kritická síla  $F_{cr}$ , tak i počáteční výstřednost  $e_i$  jsou závislé na výšce sloupu, resp. na jeho štíhlosti. Výchozím stavem je únosnost průřezu stanovená při plném využití tkaniny, tj. při uvážení charakteristik ovinutého betonu při maximální velikosti příčného tlaku. V interakčním diagramu pro plně ovinutý průřez je možné vymezit oblast únosnosti pokrývající nepřesnosti při provádění (vychází z řešení teorie I. řádu při využití  $e_i$  – rovnice 49 a 50) a zároveň je tento shora limitován kritickou silou  $F_{cr}$  (rovnice 48)

---

<sup>18</sup> Velikost příčného tlaku se mění v závislosti na výšce tlačné oblasti, resp. na poměru tlačné a tažené plochy průřezu prvku. Jeho hodnota klesá s narůstající taženou částí průřezu (vlákna tkaniny zde nejsou tažena).

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_0^2}, \quad (48)$$

$$e_i = \frac{l_0}{400}, \quad (49)$$

$$M_{0,i} = N_i \cdot e_i. \quad (50)$$

Symbole použité ve vztazích značí:

$EI$  jmenovitá ohybová tuhost (dle [43]);

$e_i$  geometrická imperfekce (nepřesnost při provádění);

$l_0$  účinná výška prvku;

$N_i$  normálová síla;

$M_{0,i}$  ohybový moment odpovídající úrovni  $N_i$  při počáteční výstřednosti.

Průnik spojnice  $F_{cr}$  a únosnosti průřezu při namáhání prostým ohybem s oblastí definovanou počáteční výstředností  $e_i$  definuje limitní sílu  $N_{lim}$  (znázorněno v grafu 24). Výslednou redukci příčného tlaku je možné stanovit na základě poměru limitní síly  $N_{lim}$  a maximální únosnosti plně ovinutého průřezu  $N_{R,max}$  (odpovídá normálové únosnosti v bodě 0 interakčního diagramu) dle následujícího vztahu

$$f_l = f_{l,poč} \cdot \frac{N_{lim}}{N_{R,max}}, \quad (51)$$

kde jednotlivé symboly značí:

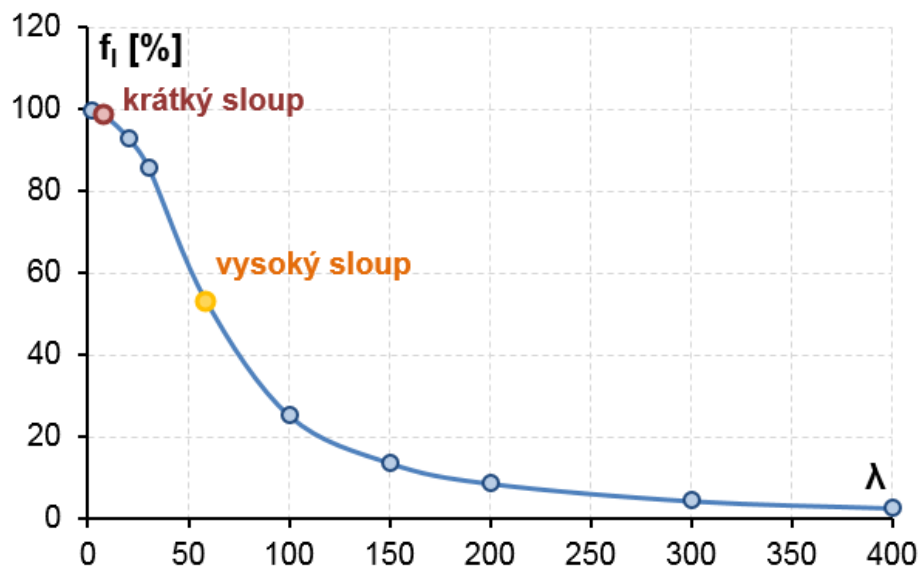
$f_l$  redukovaná hodnota příčného tlaku vlivem štíhlosti prvku;

$f_{l,poč}$  počáteční hodnota příčného tlaku při plném využití tkaniny;

$N_{lim}$  limitní síla únosnosti průřezu;

$N_{R,max}$  normálová únosnost plně ovinutého průřezu při centrickém tlaku.

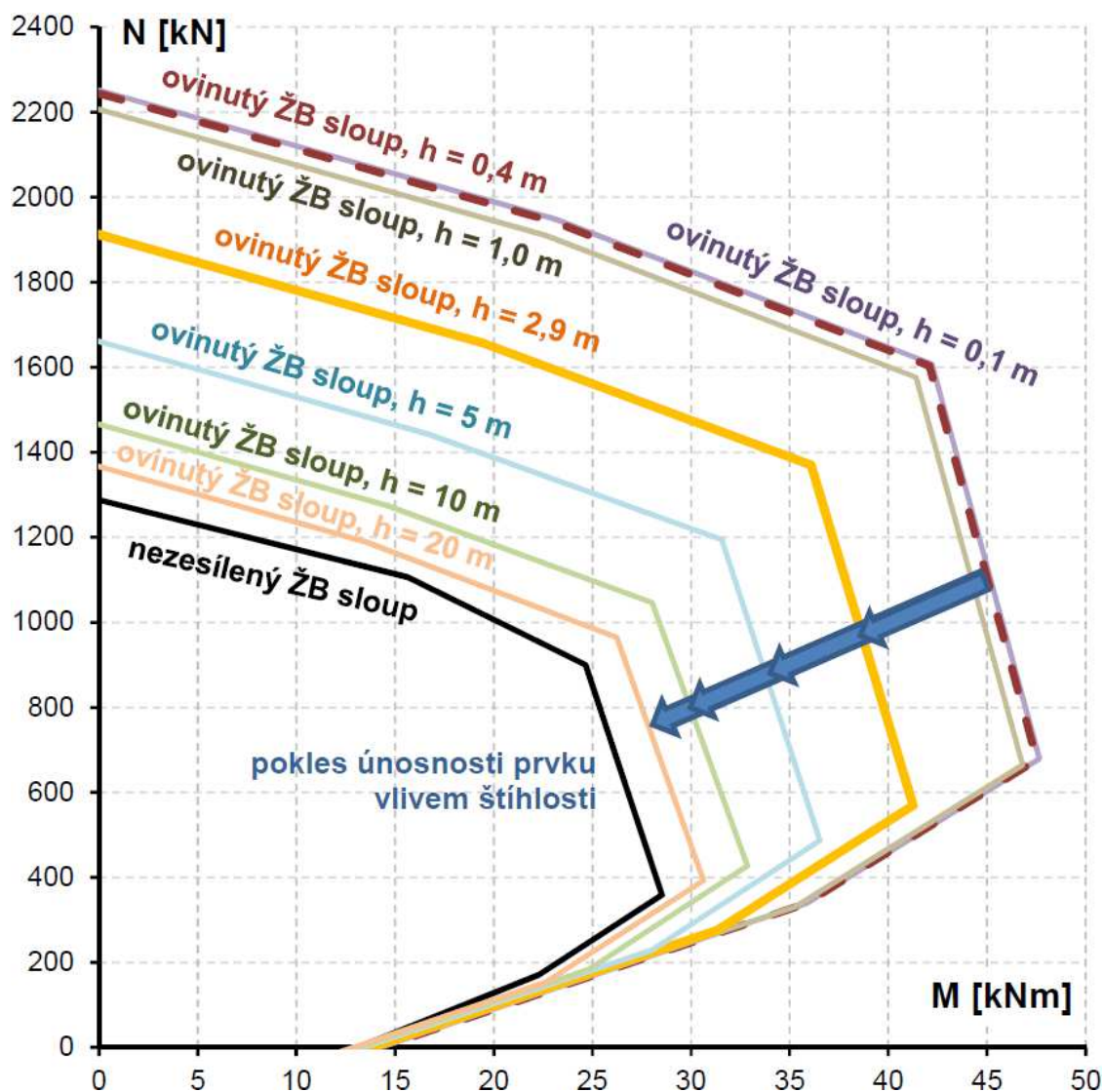
Výše prezentované řešení je podloženo parametrickou studií ovinutého sloupu, u nějž geometrie, vyztužení, způsob zesílení a materiálové charakteristiky byly převzaty ze zkušebního prvku vysokého sloupu (viz kapitola 5.2.2, uvažován beton třídy C30/37). Jedinou proměnnou ve studii byla výška sloupu, která byla volena v intervalu 0,1 – 20 m. Proměnná výška sloupu umožnila popsat závislost poměru  $N_{lim}/N_{R,max}$  na štíhlosti prvku  $\lambda$ . Tím bylo možné vyjádřit pokles příčného tlaku  $f_l$  vlivem štíhlosti prvku (viz graf 22).



graf 22 - Závislost příčného tlaku  $f_l$  na štíhlosti prvku  $\lambda$

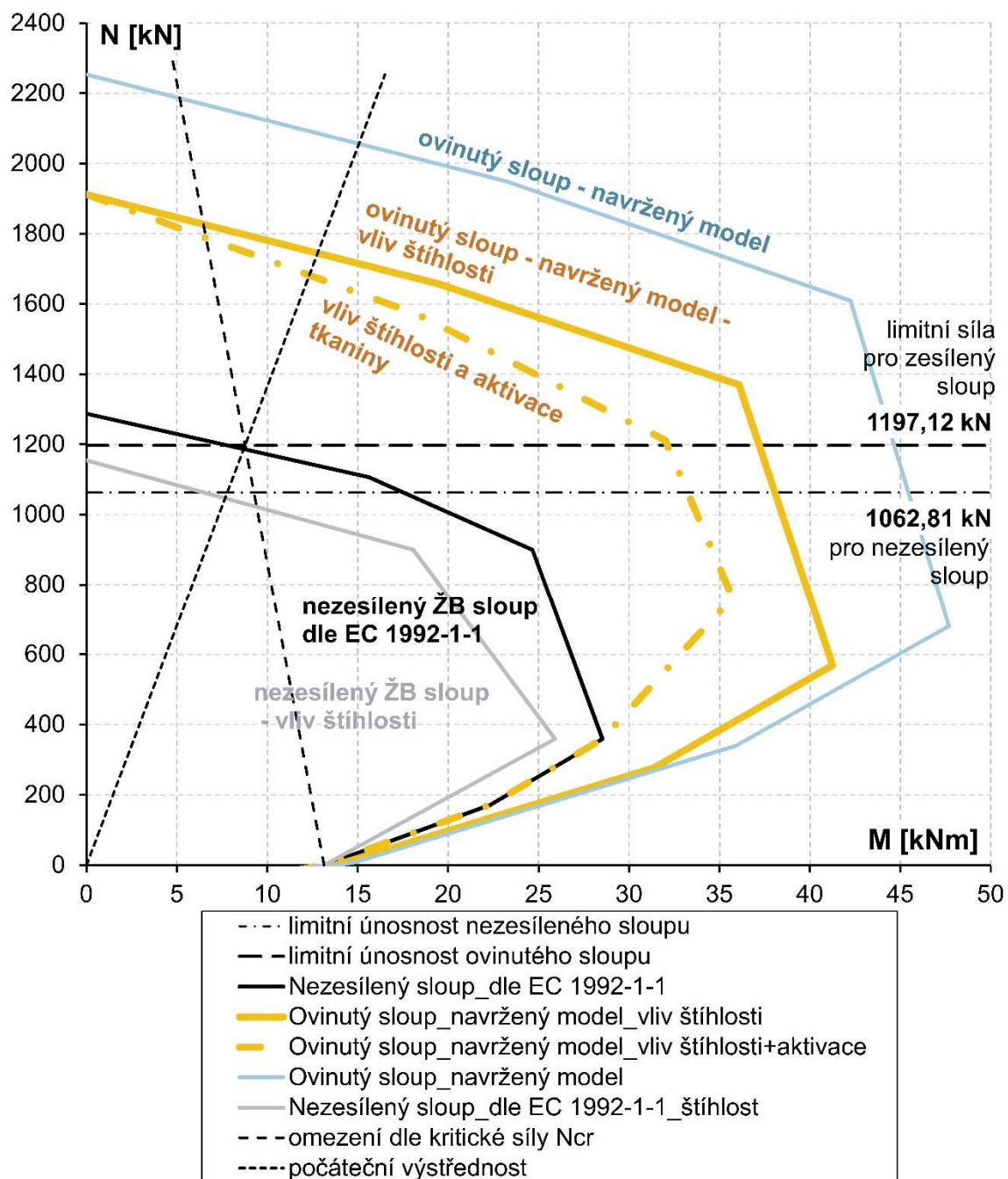
V parametrické studii byly záměrně použity výšky 0,4 m (konfigurace vzorku odpovídá zkušebnímu vzorku krátkého sloupu viz kapitola 5.2.1.2) a 2,9 m (konfigurace odpovídá zkušebnímu vzorku vysokého sloupu viz kapitola 5.2.2), což umožnilo přímé porovnání s výsledky experimentálního programu. Pokles příčného tlaku při nízkých štíhlostech je malý (přibližně 15% pokles  $f_l$  při štíhlosti 30) a odpovídá přístupu dle [43], kdy lze vliv štíhlosti u masivních sloupů zanedbat. Výrazný pokles příčného tlaku je patrný zejména v rozsahu štíhlosti 30 – 100, kdy se velikost příčného tlaku snížila na cca 25 % svého maxima.

Pokles únosnosti průřezu ovinutého sloupu v závislosti na výšce sloupu je zobrazen na grafu 23. Únosnosti průřezu ovinutého sloupu jsou sestrojeny při využití navrženého modelu ovinutí (viz kapitola 6.1.4) a jsou znázorněny i interakční diagramy pro prvek krátkého sloupu (ozn. „*ovinutý ŽB sloup, h = 0,4 m*“) a vysokého sloupu (ozn. „*ovinutý ŽB sloup, h = 2,9 m*“).



graf 23 - Závislosti únosnosti průřezu ovinutého sloupu na štíhlosti prvku  $\lambda$

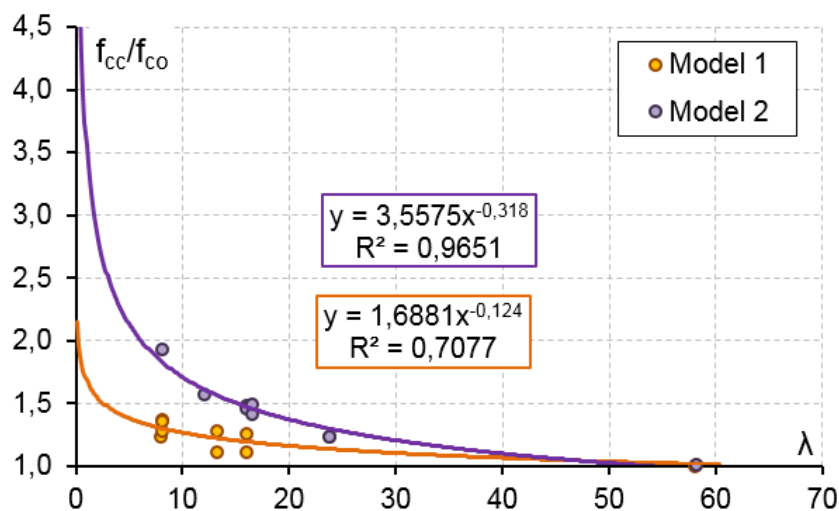
Výsledek zahrnutí vlivu štíhlosti je zobrazen na grafu 24. Interakční diagram prvku je sestaven pro modelový příklad odpovídající zkušebnímu prvku vysokého sloupu z kapitoly 5.2.2, u nějž byly charakteristiky ovinutého betonu stanoveny dle navrženého modelu (viz kapitola 6.1.4) při použití součinitele účinnosti ovinutí  $k_\varepsilon = 0,656$ . Pro porovnání jsou zobrazeny únosnosti průřezu pro plně ovinutý beton (ozn. „*ovinutý sloup\_navržený model*“), snížená únosnost o vliv štíhlosti (ozn. „*ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti*“) a snížená únosnost zohledňující aktivaci ovinutí (ozn. „*ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti+aktivace*“). Limitní síla pro ovinutý prvek je stanovena hodnotou 1197 kN. Pro případ nezesíleného sloupu vychází hodnota limitní síly 1062 kN.



graf 24 - Princip zohlednění vlivu štíhlosti na únosnost ovinutého sloupu

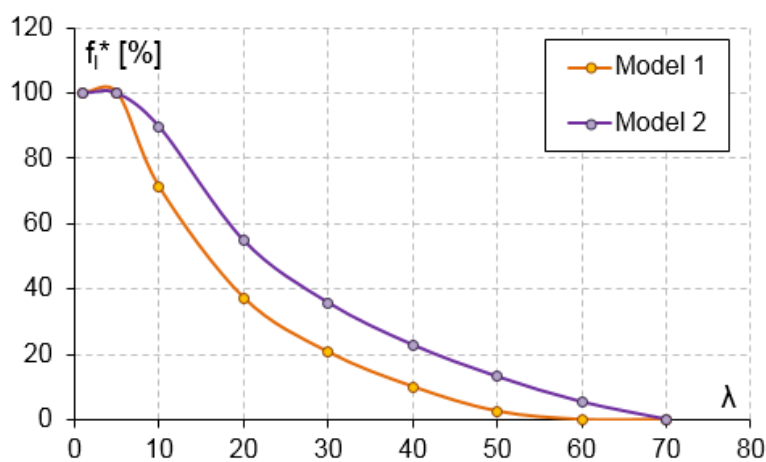
Vliv štíhlosti prvku na účinnost ovinutí byl sledován také na základě dat uvedených v tab. 17 (pro vzájemné srovnání byly uvažovány pouze vzorky s podobnou konfigurací zkoušek). Porovnávány byly vzorky ovinuté jednou vrstvou FRP tkaniny s příčnou orientací vláken. Z grafu 25 je patrná závislost klesající účinnosti ovinutí ( $f_{cc}/f_{co}$ ) v závislosti na zvyšující se štíhlosti  $\lambda$  (koresponduje se závěry představenými v [24] a [26]). Na základě vlastností laminátu FRP tkaniny byly vytvořeny dva modely. „Model I“ představoval souhrn výsledků sloupů ovinutých laminátem FRP tkaniny o modulu pružnosti  $E_f \leq 100$  GPa.

„Model 2“ představoval souhrn výsledků ovinutých laminátem FRP tkaniny o modulu pružnosti  $E_f > 100$  GPa.



graf 25 - Závislost účinnosti ovinutím FRP tkaninou na štíhlosti prvku

Redukce příčného tlaku  $f_i^*$  (vyjádřená procentuálním podílem z maximálního přítlaku dosaženého v případě masivního prvku) vlivem štíhlosti prvku je znázorněna na grafu 26. Z jejího průběhu je možné vyčíst limitní štíhlost  $\lambda \approx 60$ , při které je vliv zesílení ovinutím FRP tkaninou prakticky zcela eliminován.



graf 26 - Redukce příčného tlaku  $f_i^*$  vlivem štíhlosti prvku

Závislost redukce příčného tlaku  $f_i$  na štíhlosti prvku  $\lambda$  mají pro navržené řešení (graf 22) a pro průběh sestavený na základě dat z tab. 17 (graf 26) obdobný průběh. Rozdíl je v míře redukce příčného tlaku, který je v případě dat z tab. 17 podstatně vyšší. Ověření výstižnosti navrženého řešení je provedeno porovnáním výsledků ze zatěžovacích zkoušek a z numerického řešení (kapitola 6.4.3.).



Štíhlost prvku je nutné zohlednit také v zatížení prvku (uvážení teorie II. řádu), kdy se vliv štíhlosti při posouzení únosnosti tlačných prvků zohledňuje pomocí přídatného ohybového momentu  $M_2$  (stanoven na základě vybočení prvku – excentricita  $e_2$ ). Při posouzení se tento moment přičítá k účinkům zatížení (posun v interakčním diagramu ve vodorovném směru). Stanovení velikosti momentu  $M_2$  lze provést např. podle postupů uvedených v [43].

## 6.2. Matematické modelování ovinutých sloupů

Matematický popis chování ovinutých sloupů tvoří další kapitolu této práce, jejímž úkolem bylo pomocí nelineární analýzy porovnat výstižnost modelů predikujících vlastnosti ovinutého betonu (z analytické studie uvedené v kapitole 6.1). Srovnání výsledků teoretické analýzy s výsledky z experimentálních prací umožnilo kalibrovat navržený pevnostní model ovinutého betonu a zároveň aproximovat závislost štíhlosti a redukce příčného tlaku. K tomuto účelu bylo využito numerické modelování problematiky pomocí programu založeném na metodě konečných prvků.

### 6.2.1. Obecný přístup nelineární analýzy

Nelineární řešení metodou konečných prvků vychází ze základních axiomů mechaniky těles, tj. z rovnic popisujících zachování hmoty, energie, hybnosti a z konstitutivních vztahů popisujících závislost mezi přetvořením a napětím, resp. ze vztahů definujících posunutí a deformaci konstrukce. Tvoří jej systém rovnic, jež popisují tzv. nelinearitu fyzikální (materiálová) nebo geometrickou [35]. Obecně lze zavedením těchto nelinearit řešit jakoukoliv úlohu, přičemž lze využít i kombinaci materiálové a geometrické nelinearity. Základním principem nelineární analýzy je proměnnost materiálových charakteristik či geometrických údajů v průběhu výpočtu v závislosti na čase nebo na zatížení.

Typy nelinearit dle [35]:

- materiálová nelinearita je definována vztahy mezi napětím a přetvořením, které tvoří fyzikální rovnice popisující materiálové charakteristiky. Obvykle je využívána při simulaci chování vyztužených betonových konstrukcí, kdy definuje nelineární chování materiálu (např. železobeton porušený trhlinami);
- geometrická nelinearita je definována geometrickými rovnicemi, tj. vztahy mezi posunutím a přetvořením, jež popisují deformovaný tvar konstrukce. Využívají se

v případech, kdy jsou deformace vzhledem k rozměrům konstrukce velké a nelze již využít rovnice popisující původní nezátíženou geometrii jako u lineárního výpočtu. Tento druh nelinearity zahrnuje většinu stabilitních problémů;

- kombinace geometrické i materiálové nelinearity představuje nejpřesnější přístup k nelineární analýze konstrukce. Při řešení většinou není možné aplikovat celkovou hodnotu zatížení najednou, ale je třeba jej postupně přidávat v zatěžovacích krocích. Výstižnost simulace reálného chování ovlivňuje volba základních předpokladů.

Přesnost řešení ovlivňuje síť konečných prvků. V případě použitého softwaru ATENA je síť prvků generována automaticky podle nastavení uživatele. Její hustotu je možné ovlivnit volbou tvaru a velikosti konečného prvku a také případným lokálním zahuštěním (v okolí definovaného bodu, linie či makroprvku). Řešení softwaru ATENA využívá Lagrangeovské sítě s konečnými prvky deformovanými na základě posledního řešeného kroku, tj. v posledním řešeném čase. Poloha bodů sítě je vztažena k posunutým (prostorovým, deformovaným) souřadnicím – tento princip se nazývá „Updated Lagrangian“. Druhá formulace Lagrangianova principu je vztažena k základním (materiálovým) nedeformovaným souřadnicím a nazývá se „Total Lagrangian“ [35]. Prvky Lagrangeovské sítě mění svoji polohu v závislosti na deformující se konstrukci, tzn. síť konečných prvků se deformuje společně s hmotou (materiálové souřadnice). Oproti Eulerovské síti, kde jsou konečné prvky sítě geometricky neměnné (využití v mechanice kapalin a plynů), se Lagrangeovské prvky využívají nejčastěji v mechanice těles.

### 6.2.2. Materiálový model makroprvku

Při tvorbě matematického modelu je vhodné dodržet obecné zásady modelování [31], které vedou k dobré shodě simulovaného a reálného chování řešeného prvku. Vytvořený numerický model by se okrajovými podmínkami měl co nejvíce blížit reálnému působení prvku, tzn. materiálové modely musí odpovídat skutečným materiálům (použití středních hodnot). V ideálním případě by vlastnosti materiálů měly být získány z doprovodných zkoušek. Při simulaci experimentu je nezbytné co nejpřesněji modelovat způsob podepření zkoušené konstrukce a také způsob aplikace zatížení (použití ocelových podkladních a roznášecích destiček apod.). Odezva konstrukce při nelineárním výpočtu závisí na historii zatížení (neplatí zde zákon superpozice zatěžovacích stavů). Pro nelineární analýzu metodou konečných prvků je nejvhodnější pravidelná a rovnoměrná síť konečných prvků. Zahušťování sítě v místech koncentrace napětí a singularit (nespojivosti) není oproti lineární

analýze při nelineárním výpočtu vhodné. Singularity se zde automaticky odbourají poškozením materiálu a přerozdělením vnitřních sil v prvku. V neposlední řadě by měla být zajištěna objektivita modelu, tzn. nezávislost řešení na síti konečných prvků.

Program ATENA 3D byl vyvinut pro nelineární analýzu betonových konstrukcí, ale díky široké základně materiálových modelů jej lze s výhodou použít pro numerickou simulaci chování ocelových, kompozitních a jiných materiálů. Díky tomu umožňuje simulovat chování nevyztužených i vyztužených konstrukcí včetně zohlednění soudržnosti betonářské výztuže s betonem. Při vytváření numerického modelu železobetonového sloupu zesíleného ovinutím FRP tkaninou byly použity materiálové modely pro beton, betonářskou výztuž, laminát nekovové uhlíkové tkaniny a pro ocelové roznášecí destičky.

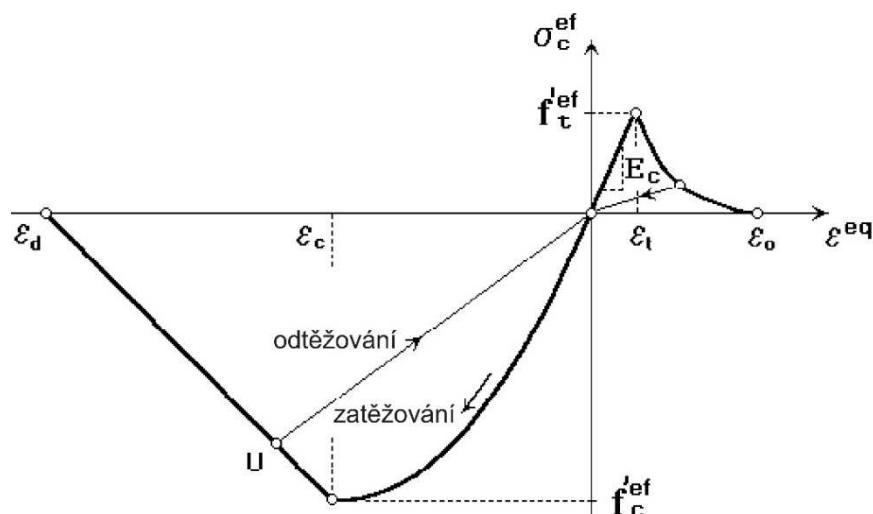
### Materiálový model betonu

U betonových a železobetonových konstrukcí se pro popis materiálu betonu jako vhodný ukázal být materiálový model založený na lomové mechanice. Z dostupných materiálových modelů byl využit model NonLinearCementitious 2. Jedná se o 3D křehko-plastický, nebo lomově-plastický („*fracture-plastic*“) model betonu kombinující konstitutivní modely pro tahové (lomové) a tlakové (plastické) chování. Tento model vytvořený Menetrey-Willam je schopen při výpočtu zohlednit chování betonu (viz [34]):

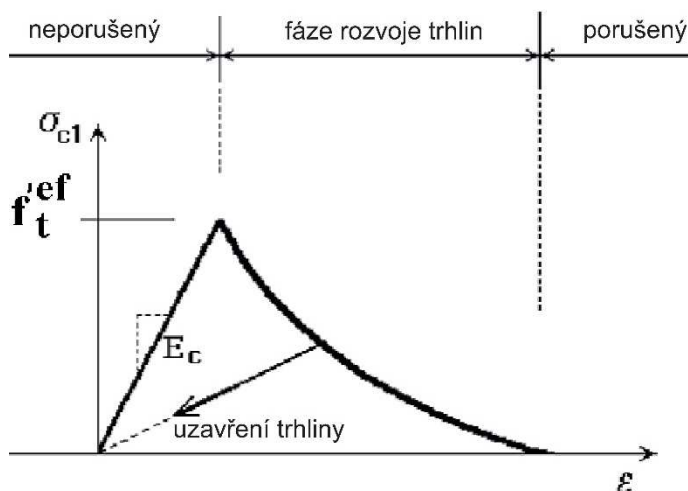
- nelineární odezvu v tlaku včetně zpevnění a změkčení;
- vznik trhlin v taženém betonu založený na nelineární lomové mechanice;
- redukce pevnosti v tlaku po vzniku trhlin;
- jev tahového zpevnění;
- redukce smykové pevnosti po vzniku trhlin;
- dva modely směru trhlin: model fixované trhliny a model rotované trhliny.

Algoritmus modelu je založen na rekurzivním iterativním postupu (tzv. rekurzivní substituce), kdy je zpětně dopočítávána hodnota napětí. Z důvodu nedostatečné konvergence v případě změkčení či dilatace materiálů je model rozšířen o relaxační metodu ke stabilizaci výpočtu. Řešení materiálového modelu je založeno na materiálovém modelu betonu SBETA, který změkčení počítá z odpovídající tahové pevnosti jako funkci otevření trhliny (Rankinův model pro popraskaný beton). Tvar poruchové oblasti není u tohoto modelu pevně dán, ale mění se v závislosti na hodnotě parametru přetvoření při zpevnění, resp. při změkčení.

Chování betonu v tlaku a v tahu je popsáno odpovídajícím pracovním diagramem, přičemž tlakové chování betonu je uvedeno na obr. 46. Chování betonu v tahu je možné rozdělit na fáze působení před a po vzniku trhlin, přičemž vznik a otevírání trhlin se řídí principem rozetřené trhliny („*smeared crack model*“). Ten je simulován pomocí dvou přístupů (např. [34]), modelem fixované trhliny a modelem rotované trhliny („*fixed and rotated crack model*“) při respektování modelu šířky pásu trhlin („*crack band model*“) – patrné z obr. 47. V první fázi před dosažením tahové pevnosti je chování neporušeného betonu idealizováno jako lineárně pružné (do vzniku trhliny, kdy je dosažena vrcholová hodnota napětí v tahu). Další fáze popisují rozvoj trhlin (charakterizované procesní zónou) a porušený beton (zde napětí zcela vymizí). Základním předpokladem je rovnoměrné šíření trhliny uvnitř materiálu, což se odráží v konstitutivním modelu při zavedení ortotropie.



obrázek 46 - Jednoosý konstitutivní zákon pro beton použitý v programu ATENA (dle [34])



obrázek 47 - Fáze vzniku a rozvoje trhlin v programu ATENA (dle [34])

Model lze využít k simulaci praskání betonu, praskání betonu pod ovinutím a praskání betonu vlivem působení obklopujícího materiálu a pokrývá jak fyzikální změny, tak i stupeň uzavření trhlin. Používá se při zahrnutí dotvarování, nebo pokud je potřeba měnit parametry materiálu během výpočtu (případ ovinutého betonu kdy se s přitlakem mění jeho charakteristiky). Vliv trojosého stavu napjatosti je u tohoto materiálového modelu automaticky zahrnut, kdy je obálka porušení upravena tak, aby lépe vystihovala chování betonu v tlaku při trojosém působení. V tomto případě je důležité správně popsat vliv objemových změn v důsledku porušení průřezu (popraskání betonu). Při defaultním nastavení (hodnota 0) nejsou tyto objemové změny zohledněny. Výsledkem je konzervativní chování takového modelu. Vhodnější simulaci poskytuje nastavení hodnoty roztažení v důsledku tlakového působení v rozmezí 0,5 - 0,9.

#### Model betonářské výztuže

Výztuž v programu ATENA může být modelována dvěma rozdílnými způsoby: diskrétně formou konkrétních prutů nebo jako rozptýlená výztuž s daným stupněm vyztužení a orientací, u které je tato součástí makroprvku (makroprvek získává „ideální charakteristiky“). Pro výztuž se předpokládá jednoosé namáhání a její chování je idealizováno pomocí lineárního, bilineárního (elasticko-plastický model bez i se zpevněním) či multilineárního tvaru (respektuje reálný průběh pracovního diagramu s vyznačením meze úměrnosti, meze kluzu, meze pevnosti a meze porušení). Ve vytvořených modelech bylo vyztužení zadáváno konkrétními pruty, tj. jako diskrétní výztuž s materiálovým modelem označeným Reinforcement (jedná se o bilineární materiálový model bez zpevnění).

#### Model kompozitního laminátu FRP tkaniny

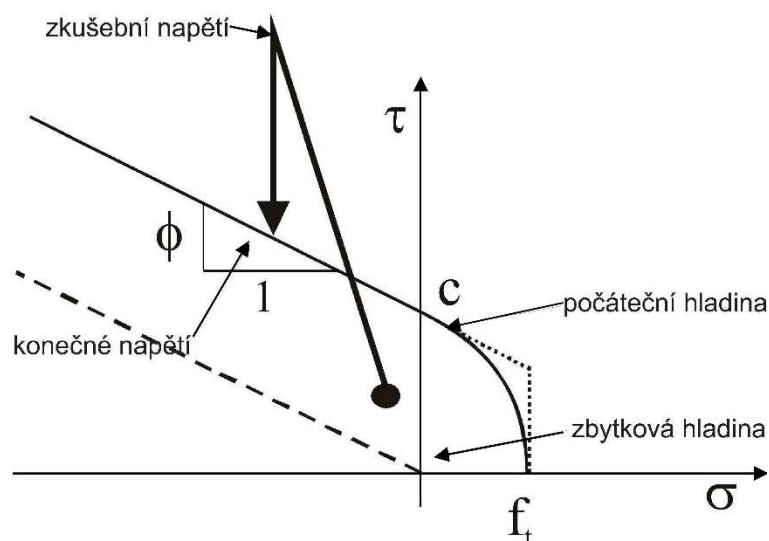
Ovinutí FRP tkaninou je možné modelovat jako další makroprvek s definicí chování kontaktu na styku s povrchem betonu nebo jako desko-skořepinový prvek. Vzhledem k lineárnímu chování laminátu FRP tkaniny až do porušení vychází materiálový model z lineárně elastického materiálu oceli (označení Reinforcement) bez tlakového působení. Model respektuje skutečné chování tkaniny v tlaku, kdy v případě tlakového namáhání dochází k deaktivaci tlakového příspěvku tkaniny.

### Model ocelových roznášecích desek

Roznášecí desky zabezpečují přenos zatížení do prvku v místech vnášení zatížení a v místech jeho uložení. Chování roznášecích desek nesmí ovlivnit chování sledovaného prvku (tj. nepodílí se na únosnosti prvku). Z tohoto důvodu byl zvolen materiálový model 3D ElasticIsotropic (materiál vykazuje ve všech směrech stejné vlastnosti) s lehce upravenou tuhostí, která korespondovala s provedením zatěžovací zkoušky (zkušební vzorky uložené na břitových ložiscích z kalené oceli).

### Materiálový model kontaktu

Kontakty, resp. kontaktní plochy zajišťují spojitost sítě konečných prvků mezi makroprvky (např. mezi modelem sloupem a roznášecími deskami, mezi zesilující vrstvou laminátu a modelem sloupu) a v závislosti na volbě jejich typu definují míru vzájemného spolupůsobení. Model 2D kontaktu je v programu ATENA založen na principu Mohr-Coulombova modelu chování zemin (suché tření), který pomocí smykové koheze  $c$  a koeficientu tření  $\phi$  (úhel vnitřního tření) definuje závislost smykového napětí  $\tau$  v kontaktu na vnášeném příčném napětí  $\sigma$  (viz obr. 48). Model 2D kontaktu na rozhraní jednotlivých makroprvků zohledňuje také tahové porušení (reprezentované tahovou soudržností  $f_t$ ). Podrobnější informace o modelu kontaktu je možné nalézt v [34].



**obrázek 48** - Model 2D kontaktu (dle [34])

### 6.2.3. Metody řešení soustavy rovnic

Jak již bylo popsáno výše, při nelineární analýze je prvek zatěžován dílčími přírůstky zatížení, tzv. zatěžovacími kroky. V těchto krocích jsou kombinovány jednotlivé zatěžovací stavy, které definují různé způsoby namáhání (bodové, liniové nebo plošné silové zatížení, poklesy podpor, zatížení deformací, teplotou, smrštěním, předpětím aj.) a jejich prostřednictvím je zadáno také podepření prvku. K řešení zatěžovacích kroků lze v programu ATENA využít metodu Newton-Raphson, modifikovanou metodu Newton-Raphson nebo metodu Arc-Length. Obecné řešení uvedených metod spočívá v soustavě lineárních algebraických rovnic zapsaných ve formě

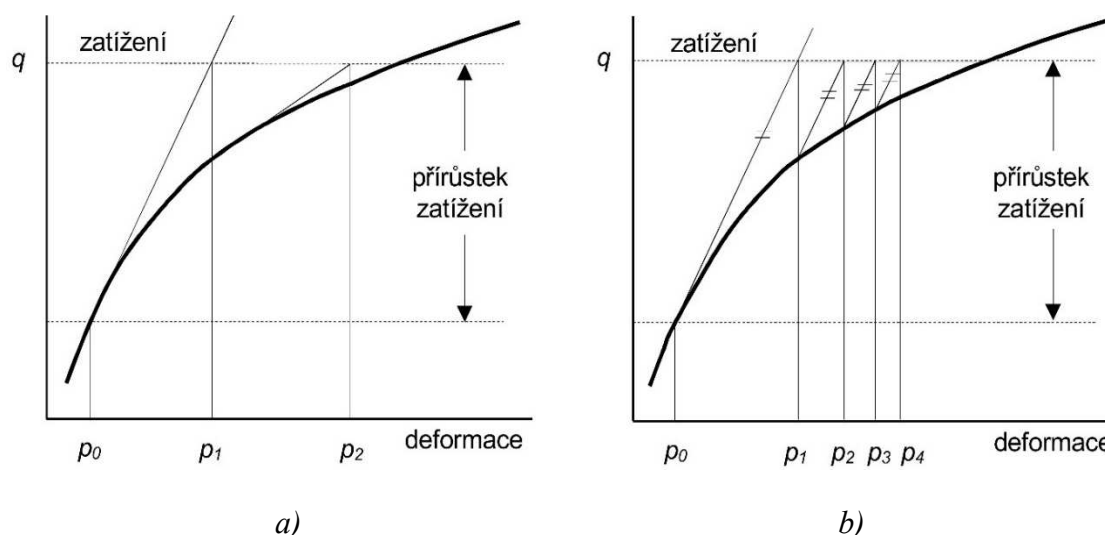
$$A \cdot \underline{x} = \underline{b}, \quad (52)$$

kde  $A$  je globální matice soustavy;  
 $\underline{b}$  vektor porušení (vektor pravé strany);  
 $\underline{x}$  vektor neznámých veličin.

Při numerickém modelování bylo řešení založeno na metodě Newton-Raphson, proto je zde popsána pouze tato metoda.

Metoda Newton-Raphson používá koncept přírůstkového řešení po zatěžovacích krocích, kdy je matice tuhosti vypočtena z hodnot získaných v předchozím kroku. Vzhledem k nelineární úloze (rovnice popisující matici tuhosti jsou nelineární) je nutné výpočet provádět iterativním postupem při splnění podmínek konvergenčních kritérií (viz níže). Díky zavedení zjednodušení, při kterém se v průběhu zatěžovacího kroku zanedbává závislost matice tuhosti na deformaci, je výpočet v iteračním kroku lineární (obr. 49a).

Modifikovaná metoda Newton-Raphson využívá matici tuhosti sestavenou pro první iteraci daného kroku i pro ostatní iterace, což vede ke značné časové úspoře při výpočtu aktuální matice tuhosti, na druhou stranu tento postup způsobuje horší konvergenci řešení (obr. 49b).



**obrázek 49** - Principy metod a) plné Newton-Raphson; b) modifikované Newton-Raphson (dle [34])

Při nelineární analýze je možné využít kombinaci obou výše uvedených metod, v takovém případě se doporučuje začít s plnou metodou a později ji změnit na modifikovanou (v oblasti mezních situací).

Řešení nelineárního modelu je během výpočtu kontrolováno pomocí těchto konvergenčních kritérií ([34]):

- úroveň deformačních změn během poslední iterace (Euklidovská norma);
- velikost nevyrovnané síly, kterou konstrukce v daném stavu a při dané matici tuhosti nebyla schopna přenést;
- množství nevyrovnané energie (minimum potenciální energie);
- nevyvážené síly v rámci maxima složky.

### 6.3. Numerické modely sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou

Numerické modely vycházely ze zkušebních vzorků experimentálního programu, ze kterých převzaly geometrii, použité materiály, vyztužení, způsob zesílení a také způsob podepření a zatěžování (podrobněji viz kapitoly 5.2.1 a 5.2.2). Modely sloupů jsou proto rozděleny do tří skupin: krátké prvky z prostého betonu, krátké železobetonové prvky a vysoké železobetonové prvky. Protože použitý software neumožňoval přímé zadání kruhového průřezu, byl tento tvar průřezu nahrazen pravidelným  $n$ -úhelníkem. Síť konečných prvků byla z tohoto důvodu tvořena čtyřstěny (tetra prvky) a na základě jejich velikosti byla tato generována programem automaticky. Veškeré numerické modely byly



z důvodu lepší stability výpočtu zatěžovány deformačně po krocích. Prostřednictvím monitorů, které umožňují průběžné sledování změn jednotlivých veličin během výpočtu, byly zaznamenávány velikosti zatížení a velikosti posunů ve zvoleném směru. Monitory byly umístěny v místech vnášení zatížení, podepření prvku a dále v místech snímačů osazených při reálných experimentech. Při výpočtu byla zvolena iterační metoda Newton-Raphson v kombinaci s metodou Line Search bez iterací.

### 6.3.1. Matematické modelování ovinutí

Při vytváření matematického modelu reálně popisujícího chování ovinutého sloupu se postupovalo od jednodušších po složitější varianty. Prvotní model ovinutí byl simulován změnou charakteristik betonu. V další variantě bylo ovinutí tvořeno reálným provedením, tj. fyzickým modelem vrstvy FRP tkaniny ovíjející model sloupu. Poslední varianta využila alternativního ovinutí diskrétní výztuží. Numerický model ovinutí tvoří tyto varianty:

- Změna materiálových vlastností makroprvku betonu sloupu – toto řešení představuje nejjednodušší způsob řešení problematiky, kdy nejsou zahrnuty faktory omezující účinek ovinutí a není zohledněna ani postupná změna chování ovinutého prvku v závislosti na míře příčného tlaku. Takto uvažovaný model sestával pouze z makroprvku sloupu a z roznášecích desek. Změna chování prvku byla docílena úpravou materiálových charakteristik betonu tak, aby odpovídaly vlastnostem ovinutého betonu.
- Model ovinutí respektující reálný stav – numerický model tvoří makroprvek betonu sloupu, který je obklopen makroprvkem zesilujícího laminátu FRP tkaniny. Tento je modelován s odpovídajícími parametry (fyzikálními vlastnostmi i tloušťkou laminátu). Spolupůsobení obou makroprvků bylo zajištěno plným kontaktem, který zajišťuje dokonalou soudržnost mezi tkaninou a povrchem betonu sloupu. Nevýhoda modelu spočívá ve vytvoření sítě konečných prvků, která musela být vzhledem k malé tloušťce laminátu FRP tkaniny v místě ovinutí zjemňována. Velký počet prvků sítě neúměrně prodlužoval výpočtový čas.
- Model s provedenou změnou parametrů tkaniny – představuje modifikaci předchozího modelu, která spočívá ve změně tloušťky ovinutí při zachování jeho tuhosti (úměrně s rostoucí tloušťkou FRP tkaniny byl snižován její modul

pružnosti). Úprava zajistila výhodnější generaci sítě konečných prvků, což vedlo ke zkrácení výpočtového času.

- *Model ovinutí dle ATENA* (dle [31]) – model byl vytvořen podle doporučení výrobce softwaru. Navržený model odstraňuje problém s generací sítě konečných prvků v případě ovinutí velmi tenkou FRP tkaninou a zároveň zajišťuje výstižný materiálový model FRP tkaniny. Ovinutí je v tomto případě vytvořeno pomocí desko-skořepinových prvků. Desko-skořepinový prvek je tvořen vrstvami, kterým je možné definovat materiálové charakteristiky (např. jedna vrstva představuje materiál FRP tkaniny, další vrstva materiál lepidla). Makroprvku tak lze přiřadit procentuální poměr lepidla a tkaniny, nebo je možné ponechat výsledné vlastnosti laminátu. Simulaci zesílení je vhodné provádět po více vrstvách s tím, že je nutné dodržet směr lokálních souřadnic prvku. Při vytváření sítě konečných prvků by měl být pro obecný prvek (beton sloupu) dle doporučení [31] využit prvek tetraedru (čtyřstěn) a pro FRP tkaninu prvek šestistěnu (brick).
- *Model s alternativním ovinutím diskrétní výztuží* – ovinutí je u tohoto modelu simulováno hustě rozmístěnou diskrétní výztuží (obdoba příčné výztuže) s materiálovým modelem pro FRP tkaninu, která je uložena v nulovém makroprvku obklopující beton sloupu. Nulový makroprvek tvoří materiál s velmi nízkou tuhostí (3D ElasticIsotropic), díky čemuž nedochází k nadhodnocení získaných výsledků. Předpoklad dokonalé soudržnosti je respektován i u tohoto modelu prostřednictvím plného kontaktu.

Pro kalibraci numerického modelu posloužil nejjednodušší vzorek ovinutého sloupu, který svou konfigurací odpovídal zkušebním vzorkům krátkého sloupu z prostého betonu s označením K (průměr 100 mm, bližší popis viz kapitola 6.3.2). Zesílení ovinutím je uvažováno jednou vrstvou CFRP tkaniny. Správnost modelu byla ověřována na nezesíleném vzorku (označen „*ref\_K*“). Způsob modelování vlivu ovinutí FRP tkaninou prostřednictvím pouhé změny charakteristik betonu není vhodnou aproximací problematiky. Výstižnost modelu v absolutní únosnosti prvku je značně závislá na zvolených výchozích hodnotách ovinutého betonu (tj. poskytuje značný rozdíl v závislosti na zvoleném přístupu – viz kapitola 6.1.1), model není schopen postihnout zvýšení duktility v důsledku ovinutí a selhává po dosažení maximální pevnosti vlivem vzniku a rozvoje trhlin. Změnou charakteristik nelze matematicky postihnout skutečné působení FRP tkaniny. Tímto způsobem simulace ovinutí

nelze výstižně predikovat chování ovinutého betonu („*ovinitý beton\_EC*“ – charakteristiky stanoveny dle přístupu [43]; „*ovinitý beton\_EC\_k*“ – charakteristiky sníženy o součinitel efektivity ovinutí  $k_e$ ; „*ovinitý beton\_NM*“ – charakteristiky získány z navrženého pevnostního modelu, viz kapitola 6.1.4).

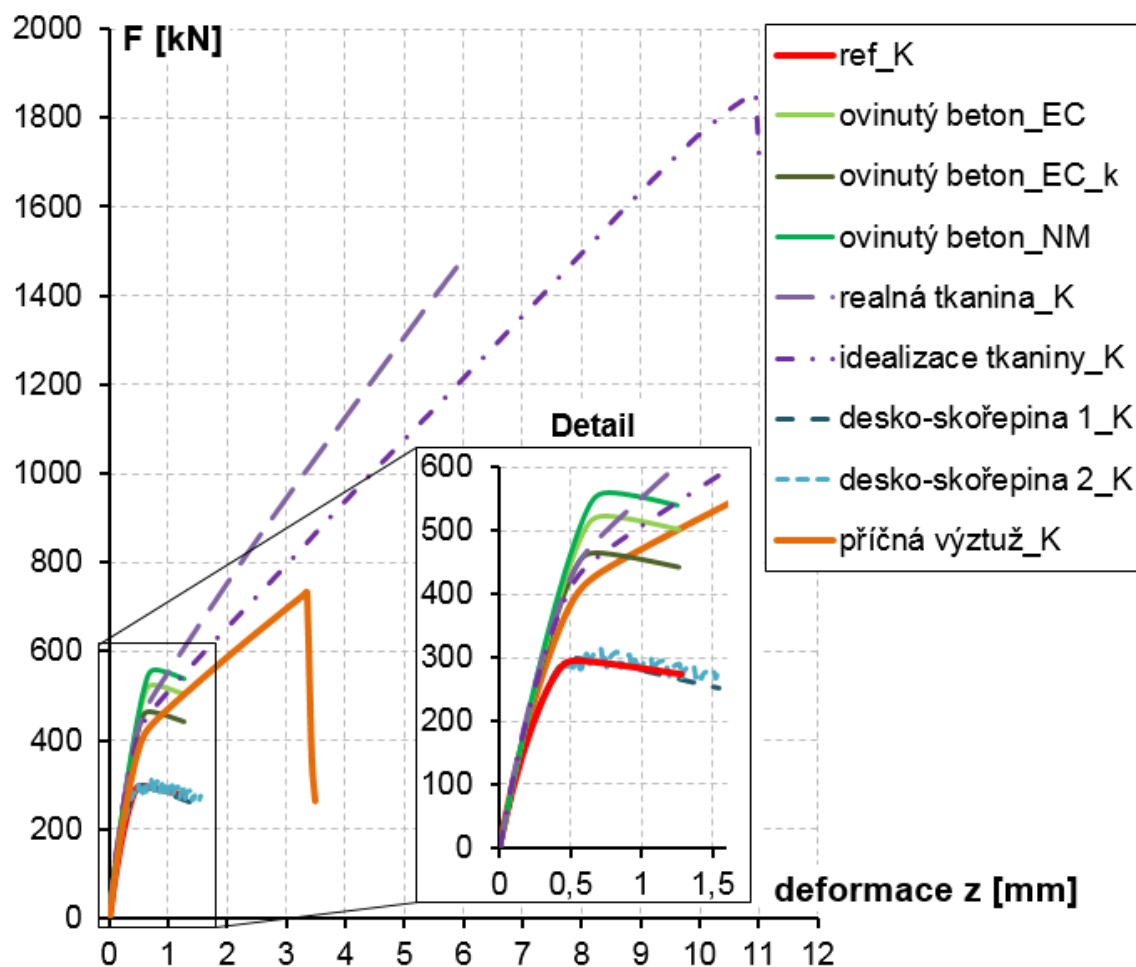
Matematický model ovinutého sloupu s reálnými vlastnostmi laminátu FRP tkaniny (především tloušťky) byla FRP tkanina modelována pomocí pružného izotropního materiálu (ozn. „*reálná tkanina\_K*“). S ohledem na zvolený materiálový model bylo nutné sledovat napětí v laminátu tkaniny a výpočet ukončit dosažením její limitní pevnosti. Oproti předchozímu modelu dochází k výstižnějšímu průběhu zatěžovací křivky s patrnou změnou sklonu v přechodovém bodě, který je plně v souladu s pracovními diagramy ovinutých betonů (viz kapitola 6.1.2, graf 12). Únosnost i duktilita prvku jsou patrně v důsledku volby materiálového modelu tkaniny nadhodnoceny.

Další model ovinutí s upravenou tloušťky FRP tkaniny poskytoval obdobné řešení jako v případě modelu s reálným provedením laminátu FRP tkaniny. Průběh zatěžovací křivky respektoval chování ovinutého betonu, ale oproti předchozímu modelu je i při zachování tuhosti ovinutí znatelný rozdíl ve sklonu křivky v oblasti, kde se projevuje zesílení ovinutím. Tento sklon je určován parametry laminátu FRP tkaniny, proto se v závislosti na změně modulu pružnosti laminátu změnil i průběh zatěžovací křivky (ozn. „*idealizace tkaniny\_K*“). Zvolený materiálový model (jako v případě předchozího) nadhodnocuje výsledné chování ovinutého betonu.

Numerický model ovinutého sloupu, kde ovinutí FRP tkaninou simulovaly desko-skořepinové prvky, nevedl k očekávanému zvýšení únosnosti a duktility zesíleného prvku. Zatěžovací křivka svým průběhem kopírovala prvek nezesíleného sloupu (ozn. „*desko-skořepina 1\_K*“). Správnost výpočtu byla sledována dodržáním konvergenčních kritérií. Modifikace s použitím GAP kontaktu nepřinesla zlepšení a prvek opět vykazoval chování nezesíleného sloupu (roztřepený průběh křivky v případě modelu s GAP kontaktem – ozn. „*desko-skořepina 2\_K*“).

Poslední způsob modelování ovinutí pomocí příčné výztuže umístěné v přechodové vrstvě nulového makroprvku selhával porušením této výztuže při dosažení její tahové pevnosti (ozn. „*příčná výztuž\_K*“). Materiálový model diskrétní výztuží vhodně vystihoval skutečné chování laminátu FRP tkaniny. Průběh zatěžovací křivky odpovídal teoretickému

chování ovinutého sloupu. Tento model ovinutí byl proto použit při dalším modelování. Porovnání jednotlivých přístupů modelování ovinutí je prezentováno na grafu 27.



graf 27 - Porovnání přístupů modelování zesílení ovinutím FRP tkaninou

### 6.3.2. Numerický model krátkého sloupu

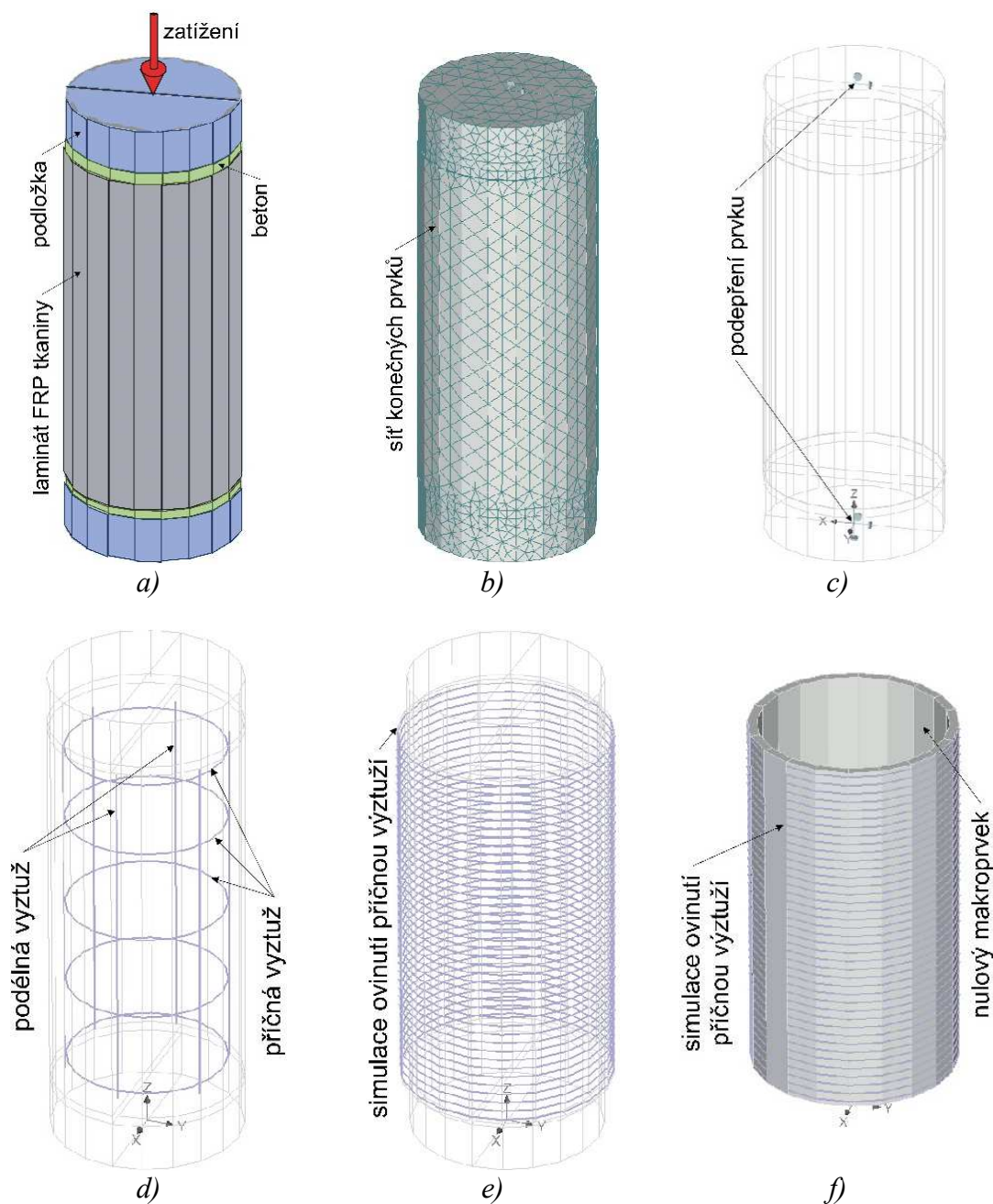
Numerický model krátkého sloupu byl vytvořen tak, aby bylo možné interpretovat data získaná z experimentů. Proto byly vytvořeny tři skupiny vzorků „kruhového“ průřezu s poměrem průměru k výšce 2:1, které sestávaly z krátkého sloupu z prostého betonu s ozn. „K“ (průměr prvku 100 mm), z krátkého vzorku z prostého betonu s ozn. „T“ (průměr prvku 185 mm) a železobetonového prvku s ozn. „ZB“ (průměr 200 mm). Vyztužení betonářskou výztuží bylo modelováno diskrétní prutovou výztuží. Zesílení ovinutím bylo simulováno diskrétně modelovanou příčnou výztuží umístěnou v přechodové vrstvě nulového makroprvku. Plocha a vzdálenost příčné výztuže simulující ovinutí zachovávaly tuhost laminované FRP tkaniny (patrné z grafu 29). Vlastnosti použitých materiálů jsou

patrné z tab. 18. Zatížení bylo vnášené deformačně v hlavě prvku přes roznášecí desku. Podepření prvku v patě odpovídalo provedení zatěžovací zkoušky.

Modelovány byly jak vzorky zesílené ovinutím FRP laminátem (pomocí modelu ovinutého betonu ozn. „*příčná výztuž*“, viz kapitola 6.3.1), tak i nezesílený (referenční) vzorek. Díky tomu bylo možné porovnat výstižnost numerického modelu (přímé srovnání s výsledky ze zatěžovacích zkoušek) a také znázornit účinek ovinutí.

**tabulka 18 - Vstupní hodnoty matematického modelu ovinutých sloupů**

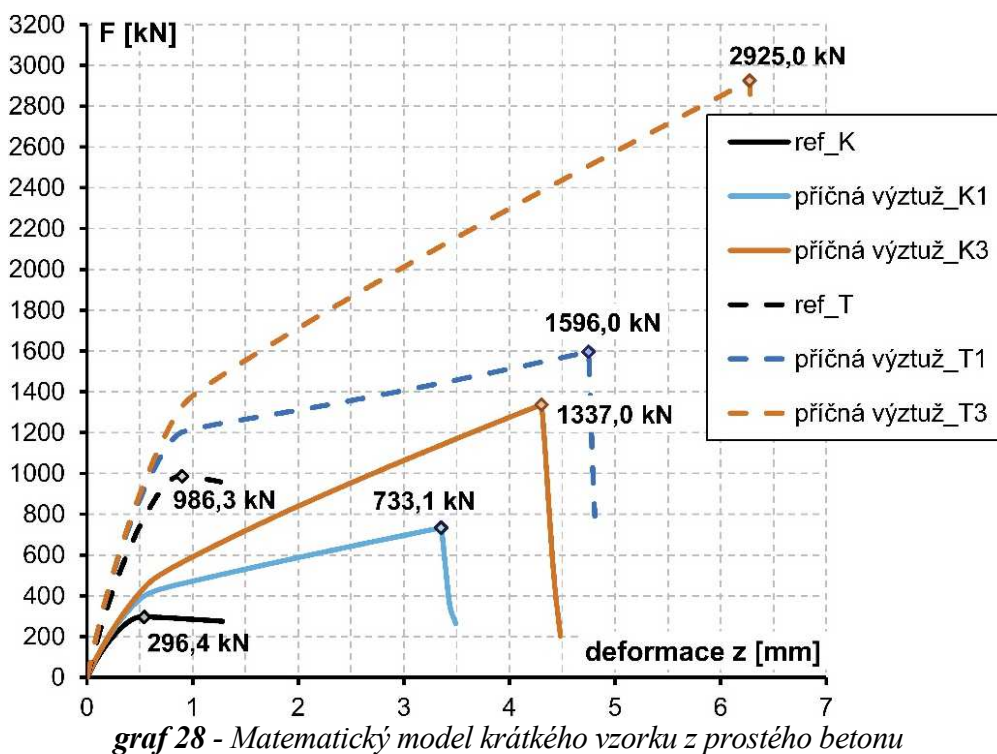
<b>Materiál</b>	<b>Vlastnost</b>	<b>Hodnota</b>													
<b>Beton - sloup</b>	Typ prvku	<b>3DNonLinearCementitious2</b>													
	Vzorky zhotoveny z	<b>prostý beton</b>	<b>železobeton</b>	<b>HPC</b>											
	Modul pružnosti $E_c =$	3,11E+04 MPa	3,37E+04 MPa	3,95E+04 MPa											
	Poissonovo číslo $\nu =$	0,20	0,20	0,20											
	Pevnost v tahu $f_t =$	3,239 MPa	3,101 MPa	3,723 MPa											
	Pevnost v tlaku $f_c =$	4,213 MPa	3,948 MPa	5,194 MPa											
<b>Laminát FRP tkaniny - diskrétní výztuž</b>	Typ prvku	<b>Reinforcement (výztuž)</b>													
	Typ diagramu	multilineární													
	Modul pružnosti $E =$	8,642+04 MPa													
	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> <p>Typ: Multilineární</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Bod</th> <th>Rel.přetvoření []</th> <th>Napětí [MPa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,000E+00</td> <td>0,000E+00</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8,127E-03</td> <td>7,023E+02</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9,000E-03</td> <td>0,000E+00</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Přidat"/> <input type="button" value="Upravit"/> <input type="button" value="Odstranit"/></p> </div> <div style="flex: 1;"> </div> </div>				Bod	Rel.přetvoření []	Napětí [MPa]	1	0,000E+00	0,000E+00	2	8,127E-03	7,023E+02	3	9,000E-03
Bod	Rel.přetvoření []	Napětí [MPa]													
1	0,000E+00	0,000E+00													
2	8,127E-03	7,023E+02													
3	9,000E-03	0,000E+00													
<b>Laminát FRP tkaniny</b>	Typ prvku	<b>Pružný ID</b>													
	Modul pružnosti $E =$	8,642E+04 MPa													
<b>Výztuž</b>	Typ prvku	<b>Reinforcement (výztuž)</b>													
	Typ diagramu	bilineární													
	Modul pružnosti $E =$	1,991E+05 MPa													
	Pevnost v tahu $f_t =$	574,06 MPa													
<b>Nulový makroprvek</b>	Typ prvku	<b>3D ElasticIsotropic (pružný-osově symetrický)</b>													
	Modul pružnosti $E =$	1,0E+03 MPa													
<b>Roznášecí desky</b>	Typ prvku	<b>3D ElasticIsotropic (pružný-osově symetrický)</b>													
	Modul pružnosti $E =$	2,0E+06 MPa													

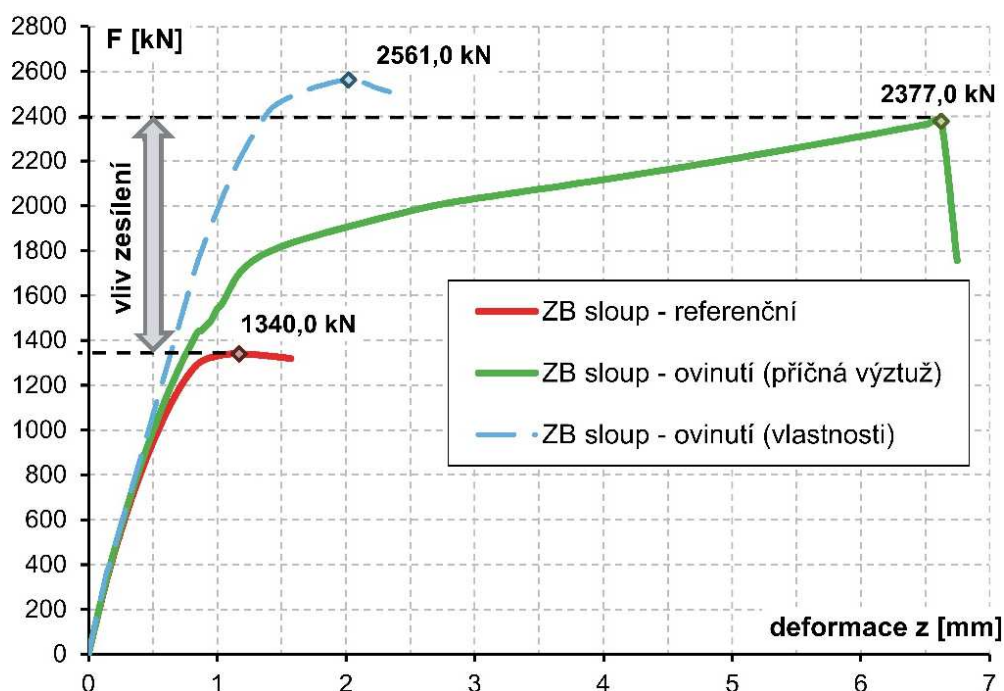


**obrázek 50** - Numerický model krátkého sloupu: a) dělení na makroprvky; b) generace sítě konečných prvků; c) způsob podepření a zatížení; d) vyztužení prvku; e) simulace ovinutí tkaninou; f) nulový makroprvek pro uložení výztuže simulující ovinutí

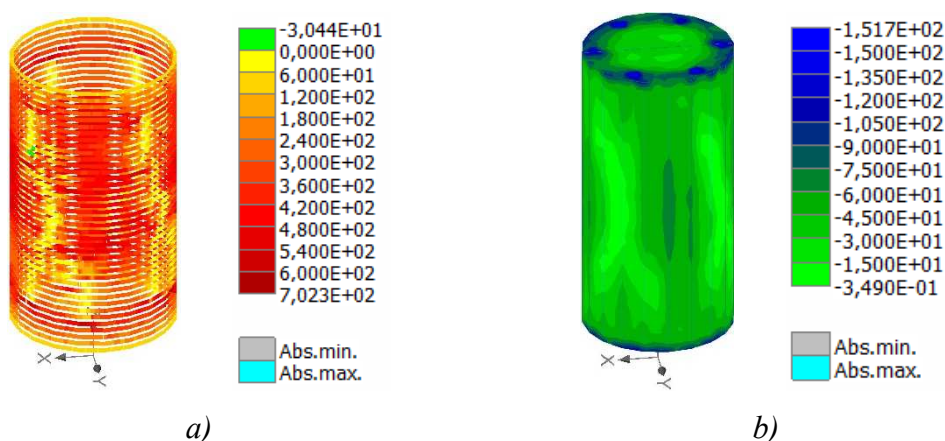
Zatěžovací křivky ovinutých sloupů se v počáteční fázi shodují s nezesíleným sloupem. Účinek ovinutí se projeví až v pozdější fázi při dosažení přibližně 40 – 50 % pevnosti neovinutého betonu v tlaku. Pokračující část zatěžovací křivky je definována tuhostí ovinutí (patrné při porovnání průběhu křivek pro simulaci ovinutí jednou a třemi vrstvami FRP tkaniny). U modelu železobetonového krátkého sloupu je pro názornost provedena simulace ovinutí FRP tkaninou změnou charakteristik betonu na vlastnosti ovinutého betonu

stanovených dle [43] (ozn. „ZB sloup – ovinutí (vlastnosti)“; model popsáný v kapitole 6.3.1). Únosnost ovinutých sloupů determinuje tahová pevnost v příčné výztuži simulující ovinutí FRP tkaninou (viz obr. 51). Toto chování koresponduje se závěry prezentovanými v předchozích kapitolách (např. kapitola 5), kdy vzorky selhávaly náhle v důsledku porušení FRP tkaniny. U sloupů s ozn. „K“ bylo dosaženo nárůstu únosnosti při jednovrstvém ovinutí o přibližně 150 %, resp. při ovinutí třemi vrstvami FRP tkaniny o 350 %. Vliv průměru sloupu na účinnost ovinutí byl sledován na modelech s ozn. „T“, u kterých došlo k nárůstu při jednovrstvém ovinutí o cca 60 %, resp. při třívrstevném ovinutí o 200 %. Pokles relativního nárůstu únosnosti při porovnání sad modelů s ozn. „K“ a „T“ lze přičítat právě průměru zesilovaného sloupu. Numerický model železobetonových sloupů (ozn. „ZB“) vykazoval obdobné chování jako v případě vzorků z prostého betonu. Při porovnání ovinutého a nezesíleného sloupu došlo k navýšení únosnosti o cca 78 %. Vyhodnocení numerických modelů je uvedeno na následujících grafech. Graf 28 srovnává chování sloupů z prostého betonu ovinutých jednou vrstvou FRP tkaniny (ozn. „K1“, „T1“), resp. třemi vrstvami FRP tkaniny (ozn. „K3“, „T3“) a graf 29 porovnává výstižnost predikce chování železobetonových prvků ovinutých FRP tkaninou v závislosti na volbě modelu ovinutí. **Srovnání výsledků z numerických simulací krátkých sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou s výsledky získanými ze zatěžovacích zkoušek je provedeno v kapitole 6.4.1 a 6.4.2.**





graf 29 - Matematický model krátkého vzorku ze železobetonu



obrázek 51 - Průběh napětí: a) v příčné výztuži simulující ovinutí; b) v ovinutém betonu

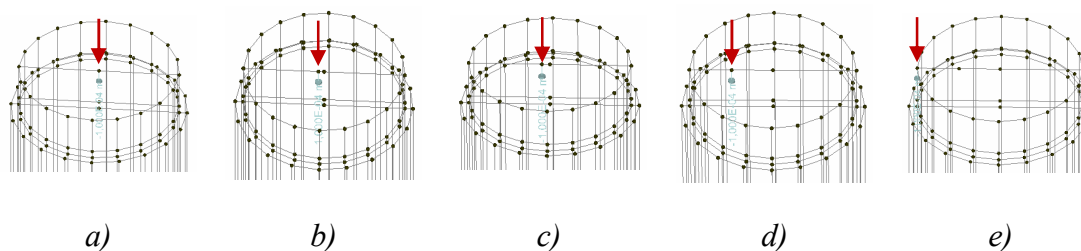
### 6.3.3. Numerický model vysokého sloupu

Numerický model vysokého sloupu simuloval chování štíhlého prvku, jeho geometrie, vyztužení a způsob zesílení ovinutím včetně použitých materiálů byly převzaty ze zkušebních vzorků vysokých ovinutých sloupů (detailní popis lze nalézt v kapitole 5.2.2). Materiálové charakteristiky použité při numerické simulaci jsou patrné z tab. 18 (parametry betonu s ozn. *železobeton*). Modelování vysokého prvku vycházelo z modelů krátkého sloupu, tzn. model sloupu tvořil 3D makroprvek s n-úhelníkovým průřezem. Vyztužení prvku betonářskou výztuží bylo modelováno diskretními pruty a obdobně jako v předchozí části



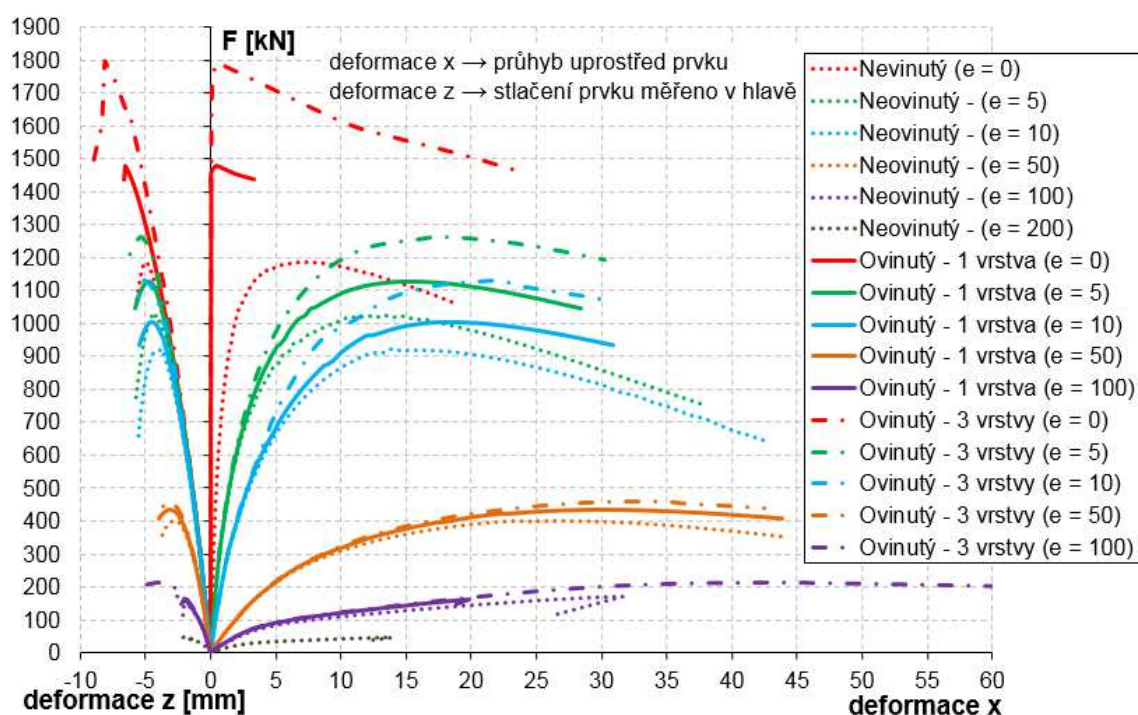
bylo pro simulaci zesílení ovinutím FRP tkaninou využito diskrétně modelované příčné výztuže umístěné v nulovém makroprvku (materiálový model *Reinforcement*). Sít konečných prvků sestávala z čtyřstěnnů s definovanou velikostí hrany. Okrajové podmínky, tj. uložení a zatížení, byly zohledněny kloubovým podepřením v hlavě a v patě sloupu přes roznášecí desky s využitím plného spolupůsobení mezi makroprvkem sloupu a roznášecí desky (plný kontakt). Zatížení bylo vnášeno v jednotlivých zatěžovacích krocích.

Model vysokého sloupu byl vytvořen s cílem postihnout vliv štíhlosti prvku na účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou. Konfigurace modelu vycházela z experimentálního programu vysokých ovinutých sloupů, což mělo umožnit přímé porovnání predikovaných a reálných výsledků. Reálné provedení zatěžovacích zkoušek vysokých sloupů nebylo možné při numerickém řešení simulovat. Numerická simulace zatěžovací zkoušky, umožňující zatěžování přírůstkem po zatěžovacích krocích, by při dodržení postupu reálného provedené zatěžování kladla značné nároky na uživatele a samotný čas výpočtu. V průběhu řešení při zatěžování vodorovnou silou by bylo nutné pro udržení požadované hladiny tlakového zatížení neustále přitěžovat normálovou silou, jejíž hodnota se vzrůstající vodorovnou deformací sloupu klesala. Zatěžovací kroky by se musely přidávat na základě řešení posledního zatěžovacího kroku za účelem dosažení požadované úrovně normálového tlakového namáhání. Kromě přírůstku horizontální deformace by v některých krocích bylo nutné přidat neznámou velikost svislé deformace. Výpočet bylo nutné z výše popsaného důvodu zjednodušit, ovšem při zachování možnosti porovnání výsledků s experimentem. Simulaci ohybového namáhání zajišťovalo excentrické působení normálového zatížení (excentrické umístění zatížení i podpor – viz obr. 52). Hodnoty excentricit byly voleny tak, aby pokryly oblast experimentálního programu. Celkem bylo vytvořeno pět režimů namáhání s excentricitou  $e = 0$  mm (působí v ose prvku a simuluje dostředný tlak odpovídající bodu 0. interakčního diagramu),  $e = 5$  mm,  $e = 10$  mm,  $e = 50$  mm a  $e = 100$  mm. Zvolený způsob zatížení nekoresponduje s průběhem reálných zatěžovacích zkoušek, jejich výsledky jsou proto zatíženy chybou. Na druhou stranu umožnily dosáhnout výsledků v relativně krátkém čase a také vytvořit obálku únosnosti průřezu, kterou bylo možné porovnávat s výsledky z experimentálního programu a z analytického řešení.



**obrázek 52** - Režimy zatížení na excentricitě: a)  $e = 0$  mm; b)  $e = 5$  mm; c)  $e = 10$  mm;  
d)  $e = 50$  mm; e)  $e = 100$  mm

Různé režimy zatížení umožnily predikci chování ovinutých sloupů v rozsahu od zcela tlačeného průřezu až po dominantní složku tahového namáhání. Únosnost ovinutých sloupů limitovalo dosažení tahové pevnosti laminátu FRP tkaniny. Na základě porovnání výsledků z jednotlivých režimů zatížení bylo možné potvrdit vliv ohybového namáhání, s jehož rostoucí intenzitou klesá účinnost ovinutí. Současně s tímto se potvrdil nárůst duktility ovinutého sloupu. Porovnání modelu nezesíleného a ovinutého sloupu pro dané režimy zatížení se zahrnutím vlivu počtu vrstev FRP tkaniny je patrné z grafu 34.



**graf 30** - Matematický model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv počtu tkanin

Vliv vyššího počtu vrstev FRP tkaniny byl postihnut numerickým modelem s ozn. „Ovinutý – 3 vrstvy (režim zatížení)“, který simuloval ovinutí třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny. Tyto modely dosahovaly obecně vyšších hodnot absolutní

únosnosti v porovnání se sloupem ovinutým pouze jednou vrstvou FRP tkaniny a stejný trend je možné vypočítat i v případě duktility, resp. vodorovné deformace uprostřed prvku (potvrzuje závěry z kapitol 5.2.2 a 6.1.3).

Výjimku představoval model s ozn. „*Ovinutý - 1 vrstva ( $e = 100$ )*“, který představuje železobetonový sloup ovinutý jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny se zatížením působícím na excentricitě 100 mm. U tohoto modelu došlo oproti nezesílenému sloupu při stejném režimu zatížení (ozn. „*Neovinutý - ( $e = 100$ )*“) k poklesu únosnosti o cca 5 % (ze 171,9 kN na 163,1 kN). Ještě výraznější byl pokles vybočení prvku ve vodorovném směru snímaném uprostřed jeho výšky o přibližně 40 % (z původních 31,54 mm na 19,60 mm). Kolaps sloupu nebyl zapříčiněn dosažením limitní hodnoty tahové pevnosti v ovinutí, ale výpočet byl ukončen z důvod nesplnění konvergenčních kritérií. Zbylé modely vždy korespondovaly s předpokládaným chování ovinutých sloupů a v porovnání s nezesíleným sloupem pro daný režim zatížení vykazovaly vyšší hodnoty únosnosti i duktility.

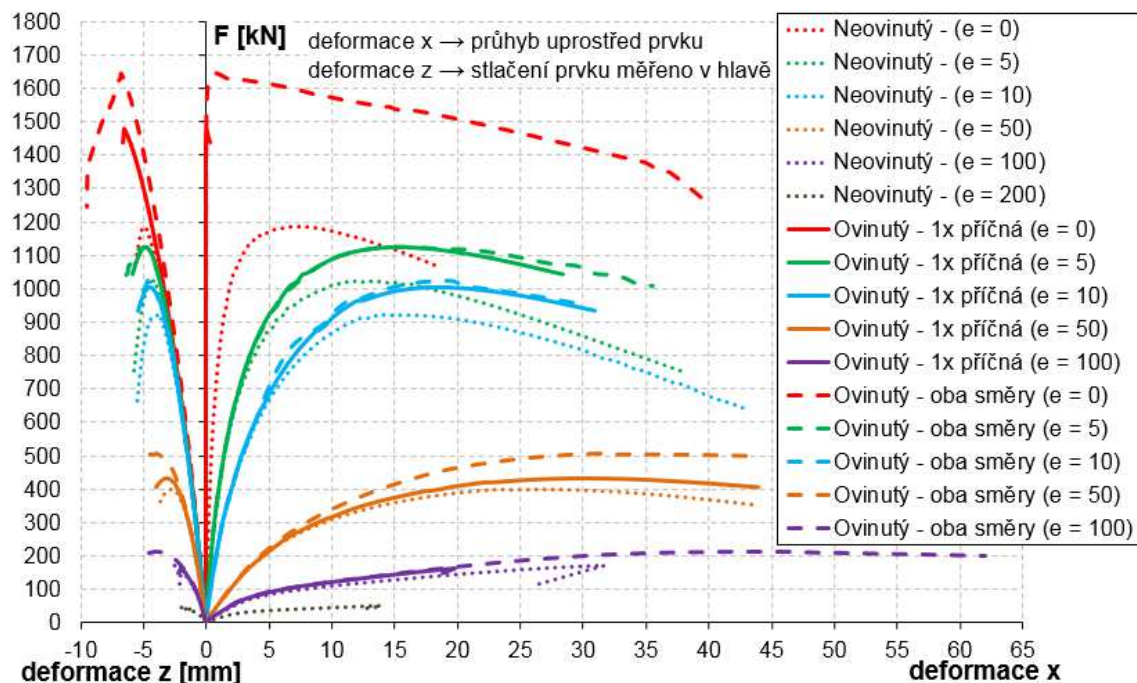
Správnost simulace ohybového namáhání pomocí síly působící na excentricitě potvrzuje i míra porušení průřezu trhlinami (patrné z obr. 53), u kterého tato narůstá se zvyšující excentricitou zatížení. Model sloupů s označením *a)* až *e)* představují jednotlivé režimy zatěžování, tj. zatížení svislou deformací působící na excentricitě 0 až 100 mm.



**obrázek 53** - Porušení průřezu v jednotlivých režimech zatěžování – zobrazení trhlín

Další skupina matematických modelů sledovala vliv vyztužení obousměrně působící FRP tkaninou, tj. příčně i podélně orientovaná nosná vlákna (v reálném případě vytvořeno aplikací dvou vrstev FRP tkaniny se vzájemně kolmou orientací nosných vláken). Úprava modelu sestávala pouze v modifikaci vrstvy simulující ovinutí (modely s označením

„*Ovinutý – oba směry (režim zatížení)*“). K příčně orientovaným prutům byly přidány pruty s podélnou orientací při využití totožného pravidla jako v případě příčné vrstvy, a to zachování tuhosti systému ovinutí. Konfigurace modelu i režimy zatěžování zůstaly totožné.

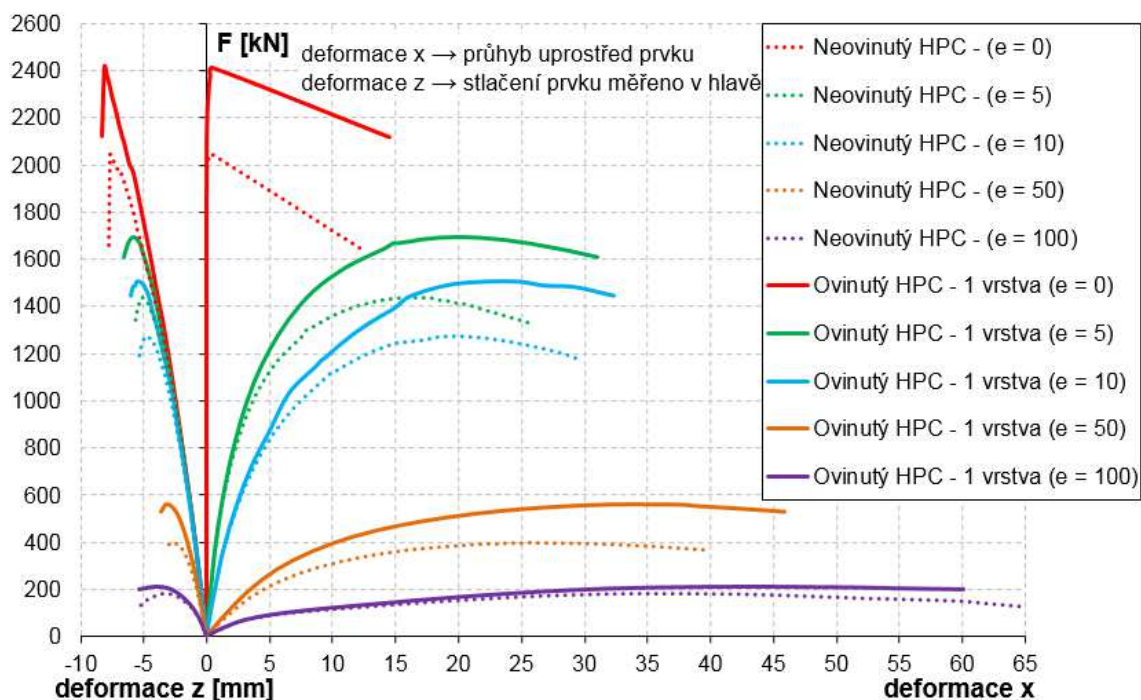


**graf 31** - Model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv podélně orientované FRP tkaniny

Porovnání rozdílů v chování sloupů ovinutých příčnou, resp. obousměrnou FRP tkaninou je patrné z grafu 31. Numerické modely potvrzují závěry analytické studie (viz kapitola 6.1.2), u které se účinek podélně orientované vrstvy tkaniny projevil až v oblasti s výrazným ohybovým namáháním. Rozdíly v chování ovinutých sloupů jsou proto v případě matematických modelů patrné v režimech zatížení s excentricitou  $e = 50$  mm. Předchozí režimy zatížení dosahují obdobných zatěžovacích křivek pro sloupy ovinuté FRP tkaninou působící v příčném směru (ozn. „*Ovinutý – 1 vrstva (režim zatížení)*“) i pro sloupy ovinuté FRP tkaninou působící v obou směrech.

Poslední část numerické simulace železobetonových sloupů ovinutých FRP tkaninou se zaměřovala na vliv pevnosti betonu. Konfigurace modelu byla převzata z předchozího modelu vysokých sloupů ovinutých třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny. Pouze se změnil materiálový model betonu z původního ozn. *železobeton* za beton s ozn. *HPC* (tab. 18). Předpoklad zvýšení únosnosti i duktility ovinutého sloupu vlivem vyšší pevnosti betonu se projevil ve všech režimech zatížení kromě posledního (při  $e = 100$  mm). Při tomto jsou účinky ovinutí takřka eliminovány, a proto je únosnost sloupu dána charakteristikami neovinutého betonu (viz graf 36, ozn. „*Ovinutý HPC – 3 vrstvy (režim zatížení)*“). Srovnání

se sloupy z betonu nižší pevnosti (ozn. „*Ovinutý – 3 vrstvy (režim zatížení)*“) je patrné z tab. 19.



graf 32 - Model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv pevnosti neovinitého betonu

#### 6.3.4. Shrnutí matematického modelování ovinutých sloupů

Chování krátkých železobetonových sloupů je kromě dostředného tlaku rozšířeno o kombinace namáhání tlakové síly a ohybového momentu (režimy zatížení shodné s vysokými sloupy). Díky tomu bylo možné popsat vliv štíhlosti prvku na účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou, kdy rozdíly v chování krátkých a vysokých sloupů v jednotlivých režimech zatížení jsou způsobeny právě štíhlostí prvku. Při porovnání výsledků nezesíleného a ovinutého prvku dosahují krátké železobetonové sloupky oproti vysokým sloupům vyšší účinnosti ovinutí pro každý režim zatížení. Rozdíl v maximálním nárůstu únosnosti krátkých a vysokých sloupů se pohyboval okolo 50 % pro první režimy zatížení (s excentricitou do 10 mm), pro další režimy zatížení účinek ovinutí postupně vymizel. Přehled výsledků numerických modelů potvrzující výše prezentované závěry je uveden v tab. 19<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> ohybová únosnost sloupu je dopočtena na základě deformace (průhybu uprostřed) při maximální hodnotě zatížení. Hodnoty průhybu byly stanoveny vyhodnocením snímaných vodorovných deformací ve dvou na sebe kolmých směrech.

tabulka 19 - Výsledky numerických simulací sloupů ovinutých FRP tkaninou

Numerický model		F [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	$\Delta F$ [%]	deformace x [mm]	$\Delta x$ [%]	$\Delta M$ [%]	
krátký vzorek	prostý beton*	ref_K (nezesílený)	296,40	37,739	-	-	-	-
		K1 (ovinití 1 vrstva)	733,10	93,329	147,30	-	-	-
		K3 (ovinití 3 vrstvy)	1337,0	170,167	350,91	-	-	-
		ref_T (nezesílený)	986,30	36,692	-	-	-	-
		T1 (ovinití 1 vrstva)	1596,0	59,370	61,81	-	-	-
	T3 (ovinití 3 vrstvy)	2925,0	108,794	83,25	-	-	-	
	železobeton	ZB sloup - referenční	1340,0	40,364	-	-	-	-
		ZB sloup_ref (e=5)	1209,9	36,447	-	3,547	-	10,341
		ZB sloup_ref (e=10)	1088,9	32,80	-	5,693	-	17,088
		ZB sloup_ref (e=50)	763,0	22,983	-	1,768	-	39,499
ZB sloup_ref (e=75)		342,50	10,317	-	1,216	-	26,104	
ZB sloup_ref (e=100)		109,40	3,295	-	0,210	-	10,963	
ovinití 1 vrstvou příčně orientované FRP tkaniny								
ZB sloup - ovinutí		2377,0	71,597	77,38	-	-	-	
ZB_ovinutý (e=5)		2240,0	67,470	85,12	1,769	50,12	15,163	
ZB_ovinutý (e=10)		2014,0	60,663	84,95	3,149	44,68	26,482	
ZB_ovinutý (e=50)	1012,0	30,482	32,63	7,290	312,33	57,977		
ZB_ovinutý (e=75)	412,30	12,419	20,37	4,755	291,04	32,883		
ZB_ovinutý (e=100)	138,70	4,178	26,77	0,336	60,20	13,917		
vysoký sloup	železobeton	Neovinutý - (e=0)	1187,0	35,755	-	6,872	-	8,157
		Neovinutý - (e=5)	1025,0	30,876	-	13,30	-	18,758
		Neovinutý - (e=10)	923,40	27,815	-	13,760	-	21,940
		Neovinutý - (e=50)	401,10	12,082	-	26,260	-	30,588
		Neovinutý - (e=100)	171,90	5,178	-	31,540	-	22,612
	ovinití 1 vrstvou příčně orientované FRP tkaniny							
	Ovinutý - 1xpř. (e=0)	1478,0	44,518	24,51	0,493	-92,82	0,729	
	Ovinutý - 1xpř. (e=5)	1126,0	33,916	9,85	14,60	9,77	22,070	
	Ovinutý - 1xpř. (e=10)	1002,0	30,181	8,51	17,460	26,89	27,515	
	Ovinutý - 1xpř. (e=50)	433,9	13,069	8,17	29,880	13,78	34,660	
Ovinutý - 1xpř. (e=100)	163,1	4,913	-5,12	19,601	-37,86	19,507		
ovinití 3vrstvami příčně orientované FRP tkaniny								
Ovinutý - 3xpř. (e=0)	1793,0	54,0	51,03	0,421	-93,87	0,755		
Ovinutý - 3xpř. (e=5)	1263,0	38,038	23,20	17,580	32,18	28,519		
Ovinutý - 3xpř. (e=10)	1132,0	34,093	22,57	22,380	62,65	36,654		
Ovinutý - 3xpř. (e=50)	459,50	13,839	14,54	34,860	32,75	38,993		
Ovinutý - 3xpř. (e=100)	213,0	6,415	23,89	42,870	35,92	30,431		
ovinití obousměrně působící FRP tkaninou								
Ovinutý - oba (e=0)	1643,0	49,488	38,41	0,904	-86,85	1,485		
Ovinutý - oba (e=5)	1124,0	33,856	9,65	14,440	8,57	21,851		
Ovinutý - oba (e=10)	1025,0	30,874	11,00	19,640	42,73	30,381		
Ovinutý - oba (e=50)	508,40	15,313	26,74	31,490	19,92	41,430		
Ovinutý - oba (e=100)	212,90	6,413	23,84	43,450	37,76	30,541		
HPC beton	železobeton	Neovinutý - (e=0)	2047,0	61,990	-	0,434	-	0,888
		Neovinutý - (e=5)	1435,0	43,457	-	16,040	-	30,192
		Neovinutý - (e=10)	1272,0	38,520	-	19,980	-	38,135
		Neovinutý - (e=50)	399,10	12,086	-	25,640	-	30,188
		Neovinutý - (e=100)	182,70	5,533	-	34,510	-	24,575
	ovinití 1 vrstvou příčně orientované FRP tkaniny							
	Ovinutý - 1xpř. (e=0)	2415,0	73,130	17,97	0,462	25,62	1,115	
	Ovinutý - 1xpř. (e=5)	1696,0	51,358	18,18	22,010	62,18	45,809	
	Ovinutý - 1xpř. (e=10)	1508,0	45,665	18,55	24,280	44,07	51,694	
	Ovinutý - 1xpř. (e=50)	561,30	16,997	40,63	36,750	101,58	48,693	
Ovinutý - 1xpř. (e=100)	212,50	6,435	16,30	43,430	46,37	30,479		

**Poznámka:**  $F$  maximální hodnota tlakové síly;  
 $M$  ohybová únosnost prvku (stanoveno na základě vybočení a excentricity zatížení);  
 $x$  vybočení uprostřed výšky prvku (průhyb ve vedodorovném směru);  
 $\sigma^*$  tlakové napětí přepočítané z  $F$  (normálová únosnost prvku);  
 $\Delta F$  porovnání normálové únosnosti v daném režimu zatížení vyjádřené v procentech;  
 $\Delta x$  porovnání vybočení v daném režimu zatížení vyjádřené v procentech.

## 6.4. Porovnání výsledků

Tato část práce je věnována porovnání výsledků z předchozího řešení problematiky analytickou studií (přístupem popsáním v kapitole 6.1 pomocí navrženého modelu pro výpočet pevnosti ovinutého betonu v tlaku) s daty získanými z provedených zatěžovacích zkoušek experimentálního programu (kapitola 5.2) a numerického modelování (kapitola 6.3). Porovnány jsou výsledky krátkých i vysokých sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou ve všech variantách. Porovnání je provedeno pomocí interakčních diagramů. Při analytickém vyjádření bodů interakčního diagramu byl využit navržený pevnostní model ovinutého betonu odvozený v kapitole 6.1.4 redukováný součinitelem účinnosti ovinutí 0,656 (viz kapitola 6.1.3). Pro přehlednost je vždy porovnávána kombinace reálného a teoretického chování, tzn. experiment vs. numerický model a experiment vs. analytický model.

### 6.4.1. Krátké sloupy z prostého betonu

Porovnání dosažených výsledků probíhalo u krátkých sloupů pouze na úrovni maximální únosnosti dosažené při dostředném zatížení (odpovídá bodu 0 v interakčním diagramu). Přehled dosažených výsledků u sloupů z prostého betonu s vyjádřením odchylky maximální únosnosti je uveden v tab. 20, kde vzorky označené „K“ představují kruhové sloupy o průměru 100 mm, resp. vzorky ozn. „T“ sloupy o průměru 185 mm.

Pro referenční (nezesílené) sloupy byla v případě analytického i numerického modelu dosažena maximální odchylka v porovnání s experimentem necelé 4 %. Numerický model ovinutých sloupů s menšími rozměry (ozn. „K“) dosahoval v porovnání s experimentem odchylku v únosnosti okolo 8 %. V případě varianty ovinutých sloupů s většími rozměry (ozn. „T“) dosahovala odchylka hodnoty okolo 12 %, přičemž predikovaná únosnost nabývala vyšší hodnoty. Rozdíl ve výsledcích numerické simulace byl způsobem odlišným přístupem při vytváření modelu sloupů, kdy průřez vzorku ozn. „K“ tvořil n-úhelník o 8 hranách, zatímco vzorky s většími průměry byly tvořeny n-úhelníkem o 20 hranách.

V případě analytických modelů byla výstižnost podmíněna volbou přístupu definujícího vlastnosti ovinutého betonu. Pro porovnání byly kromě navrženého modelu uvedeny také únosnosti sloupů stanovené při využití předpisů [43] (ozn. indexem 1), [36] (ozn. indexem 2) a [48] (ozn. indexem 3). Navržený model dosahoval maximální odchylky 7,25 % (porovnáváno s průměrnou hodnotou únosnosti skupiny zkušebních vzorků), přičemž lehce nadhodnocoval osovou únosnost krátkých sloupů.

tabulka 20 - Porovnání výsledků krátkých sloupů z prostého betonu

označení prvku	únosnost $F$ [kN]		odchylka	$F$ [kN]	odchylka
	experiment	numerika	$\Delta F$ [%]	analytika	$\Delta F$ [%]
REF.K	285,77	296,40	3,72	291,84	2,13
1K.1	733,19	733,10	-0,01	554,03 <sup>1)</sup>	-24,59
1K.2	742,58		-1,28	673,22 <sup>2)</sup>	-8,37
1K.3	800,49		-8,42	715,54 <sup>3)</sup>	-2,61
1K.4	662,69		10,62	681,50 <sup>4)</sup>	-7,25
průměr 1K	734,74		-0,22		
3K.1	1223,74	1337,0	9,26	1147,42 <sup>1)</sup>	-7,49
3K.2	1123,63		18,99	1042,77 <sup>2)</sup>	-15,92
3K.3	1373,41		-2,65	1405,88 <sup>3)</sup>	13,35
průměr 3K	1240,26		7,80	1240,13 <sup>4)</sup>	-0,01
REF.T	1001,54	986,30	-1,52	998,84	-0,27
1T.1	1772,97	1596,0	-9,98	1871,16 <sup>1)</sup>	3,82
1T.2	1731,87		-7,85	1541,25 <sup>2)</sup>	-14,49
1T.3	1902,20		-16,10	1841,27 <sup>3)</sup>	2,16
průměr 1T	1802,34		-11,45	1913,00 <sup>4)</sup>	6,14
3T.1	3076,48	2925,0	-4,92	2639,01 <sup>1)</sup>	-15,35
3T.2	3163,08		-7,53	2948,81 <sup>2)</sup>	-5,42
3T.3	3113,41		-6,05	3402,45 <sup>3)</sup>	9,13
průměr 3T	3117,66		-6,18	3121,76 <sup>4)</sup>	0,13

- Vysvětlivky:** <sup>1)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle EC 1992-1-1;  
<sup>2)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle ACI 440.2R (2002);  
<sup>3)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle Model Code 2010;  
<sup>4)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle návržného modelu (kapitola 6.1.4).

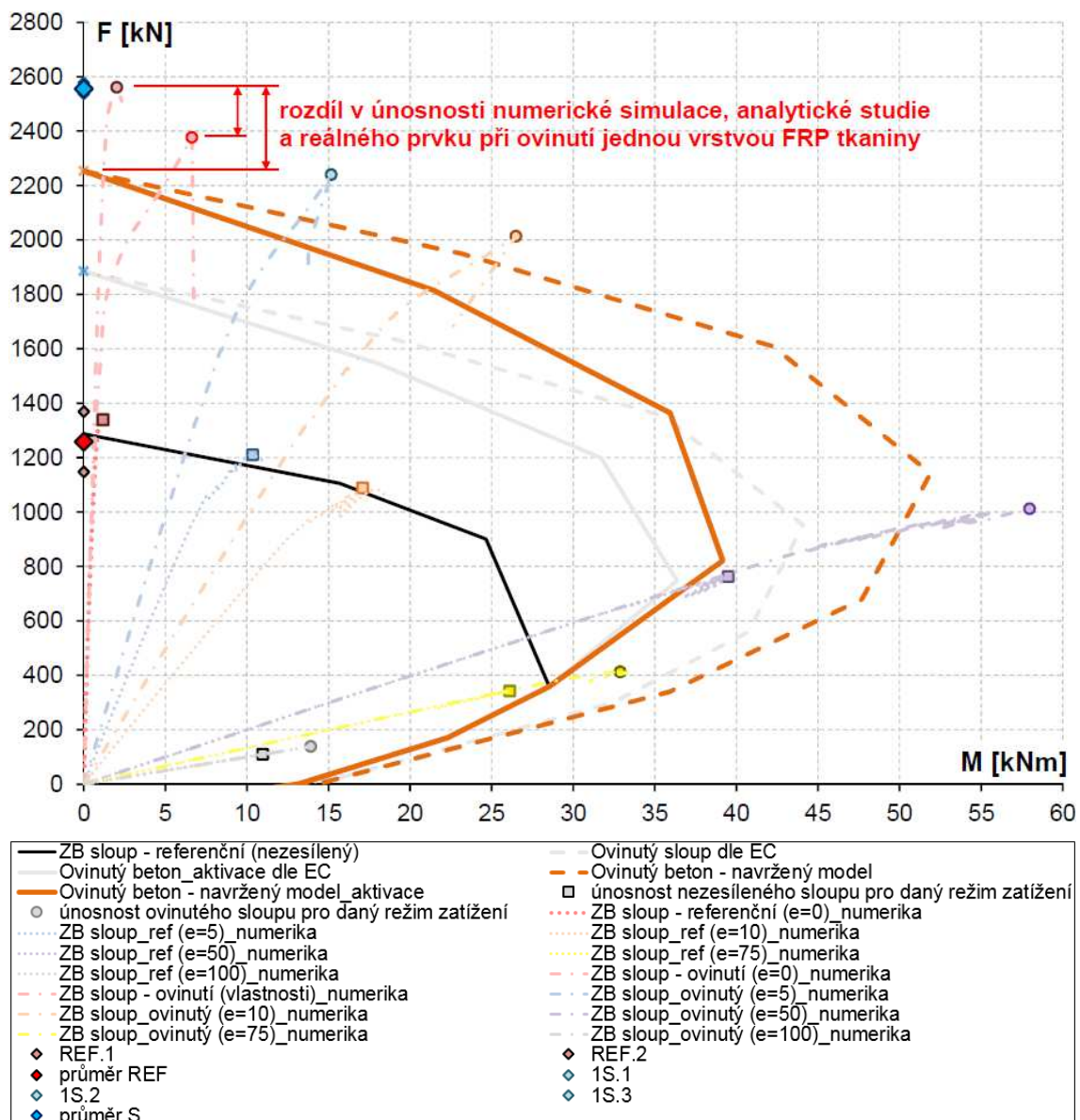
**Poznámka:** odchylka  $\Delta F$  pro jednotlivé přístupy je stanovena poměrem únosnosti numerického řešení a únosnosti z experimentů. V případě analytické studie je odchylka stanovena k průměrné hodnotě únosnosti z experimentů.

#### 6.4.2. Krátké sloupy ze železobetonu

Krátké železobetonové sloupy tvořily vzorky o průměru 200 mm, podrobnosti o tvaru, geometrii, vyztužení a způsobu zesílení jsou uvedeny v kapitole 5.2.1. Porovnání predikovaného chování z numerické a analytické studie s reálným chováním ze zatěžovacích zkoušek je patrné z grafu 33. Vliv ovinutí jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny lze porovnávat v několika bodech definovaných režimy zatížení (např. excentricita zatížení  $e = 0$  mm pro případ středního tlaku). Interakční diagram s ozn. „Ovinutý beton“ byl stanoven pro plnou účinnost ovinutí (uvažováno v celém rozsahu) s využitím navrhovaného



modelu ovinutého betonu (viz kapitola 6.1.4). U interakčního diagramu s ozn. „*Ovinutý beton\_aktivace*“ je v závislosti na přetvoření průřezu dopočítávána velikost příčného tlaku a tomu odpovídající charakteristiky ovinutého betonu. Rozdíl mezi uvedenými modely je způsoben aktivací ovinutí (podrobněji viz kapitola 6.1.2).



graf 33 - Porovnání chování krátkých sloupů ze železobetonu ovinutých FRP tkaninou

Z grafu 33 je patrná shoda všech přístupů při stanovení únosnosti nezesíleného „referenčního“ sloupu, kdy odchylky od únosnosti dosažené při zatěžovací zkoušce jsou pro numerický model 6,5 % a pro analytický model 2,3 %. Při porovnání sloupu ovinutého FRP tkaninou nabývá hodnota odchylky maximální únosnosti v dostředném tlaku pro numerický model přibližně 7 %. Únosnost stanovená na základě navrženého modelu pevnosti ovinutého betonu v tlaku při porovnání s chováním ze zatěžovacích zkoušek

dosahovala odchylky přibližně 12 %. Teoreticky stanovené únosnosti zesílených sloupů dosahovaly nižších hodnot v porovnání s výsledky zatěžovacích zkoušek. Numerické řešení zatížené chybou zvoleného způsobu zatěžování (pomocí excentricit) vykazovalo pro centrický tlak dobrou shodu. Ostatní body lze porovnávat pouze s analytickým řešením, proti kterému dosahovalo vyšších hodnot. Přehled porovnání je uveden v tab. 21.

Rozšíření numerické simulace o další režimy namáhání umožnilo porovnat teoretické únosnosti spolu s analytickým modelem sloupu. Díky tomu je možné vysledovat pokles účinnosti ovinutí v režimech s vyšší hodnotou excentrického zatížení ( $e = 75$  mm). Závěry vyplývající z porovnání dosažených výsledků potvrzují předpoklad postupné aktivace ovinutí (popsané v kapitole 6.1.2), kterou je nutné zohlednit při praktickém návrhu zesílení. Při výpočtu únosnosti ovinutého sloupu je nutné počítat s postupným zvýšením pevnosti ovinutého betonu v závislosti na aktivaci ovinutí.

**tabulka 21 - Porovnání výsledků krátkých sloupů ze železobetonu**

Označení vzorku	únosnost $F$ [kN]		odchylka	$F$ [kN]	odchylka
	experiment	numerika	$\Delta F$ [%]	analytika	$\Delta F$ [%]
<b>REF.1</b>	1369,45	1340,0	-2,15	1287,45	-5,99
<b>REF.2</b>	1147,47		16,78		12,20
<b>průměr Ref</b>	1258,46		6,48		2,30
<b>1S.1</b>	2538,02	2377,0	-6,34	1884,78 <sup>1)</sup>	-26,26
<b>1S.2</b>	2552,31		-6,87	2214,97 <sup>2)</sup>	-13,34
<b>1S.3</b>	2577,14		-7,77	2295,18 <sup>3)</sup>	-10,20
<b>průměr S</b>	2555,82		-7,0	2253,57 <sup>4)</sup>	-11,83

- Vysvětlivky:**
- <sup>1)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle EC 1992-1-1;
  - <sup>2)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle ACI 440.2R (2002);
  - <sup>3)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle Model Code 2010;
  - <sup>4)</sup> vlastnosti ovinutého betonu stanoveny dle navržerného modelu (kapitola 6.1.4).

**Poznámka:** v případě analytického studie je odchylka pro jednotlivé přístupy stanovena k průměrné hodnotě únosnosti z experimentů.

Výše prezentované porovnání krátkých sloupů poukázalo na výstižnost/přesnost výpočtových modelů určujících chování sloupu zesíleného ovinutím FRP tkaninou. Porovnání teoretického chování numerické a analytické simulace rovněž upozornilo na nutnost respektovat postupnou aktivaci ovinutí, kdy je velikost tlakové pevnosti ovinutého betonu stanovena na základě aktuální velikosti příčného tlaku.

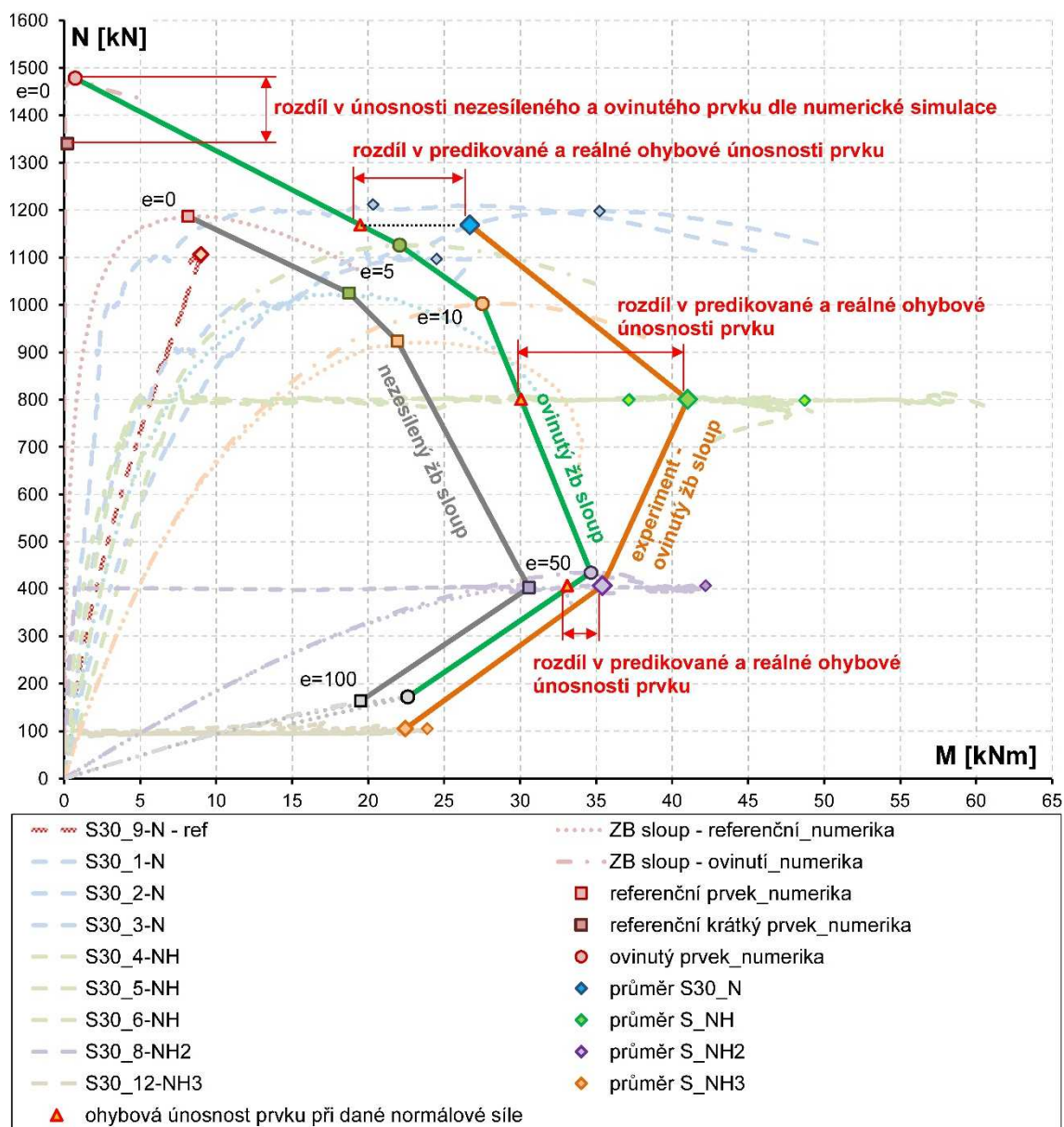
### 6.4.3. Vysoké sloupy s vlivem štíhlosti

Chování vysokých sloupů bylo díky režimům zatížení popsáno v takřka celém rozsahu interakčního diagramu. Konfigurace zkušebních vzorků navíc umožnila sledovat vliv štíhlosti, způsobu provedení ovinutí FRP tkaninou (vliv počtu vrstev, vliv orientace vláken) a také vliv pevnosti betonu. Konfigurace vzorku vysokého sloupu je detailně popsána v kapitole 5.2.2. Pro přehlednost byla vždy porovnávána reálná a teoretická únosnost prvku, tzn. srovnání je znázorněno ve dvou grafech vyjadřujících kombinaci zatěžovací zkoušky a numerické simulace, resp. zatěžovací zkoušky a analytického výpočtu. Pro úplnost je nutné připomenout zjednodušení zatěžování numerického modelu s použitím excentricity (důvody zjednodušení jsou vysvětleny v kapitole 6.3.3), které do řešení vnášejí chybu. S cílem eliminace této chyby je přímé porovnání výsledků provedeno pomocí interakčního diagramu (porovnání ohybové únosnosti pro danou úroveň normálové síly). Obálka únosnosti průřezu byla v případě numerického modelování vytvořena spojnici bodů maximálních únosností ve zvolených režimech zatěžování. Přesnost tohoto řešení závisí na množství vynesných bodů odpovídajících různým režimům zatěžování (na základě doplnění těchto bodů lze řešení dále zpřesnit).

#### Zesílení sloupu ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny

První dvojice grafů porovnává chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny. Graf 34 zobrazuje zatěžovací křivky ze zatěžovacích zkoušek v definovaných režimech zatěžování (viz kapitola 5.2.2), které porovnává s numerickou simulací. Porovnání predikované a experimentem stanovené únosnosti ovinutého sloupu potvrdilo předpoklad o aktivaci ovinutí v důsledku vzniku a rozvoje trhlin (oblast aktivace okolo 40 – 50 % osově únosnosti nezesíleného sloupu – viz kapitola 6.1.2). V tomto místě dochází ke zvýšení únosnosti ovinutého prvku jak v případě numerické simulace (při porovnání nezesíleného a ovinutého sloupu), tak především v případě reálného sloupu. Tento závěr potvrzuje porovnání zatěžovacího režimu 3.  $F_N = 400$  kN a numerické simulace při excentricitě pohybující se okolo 50 mm. Odchylka ohybové únosnosti nabývá v tomto případě cca 6,5 %, přičemž numerická simulace poskytuje konzervativnější hodnoty. Další body dosahují větších odchylek, viz tab. 22. Řešení matematického modelu v podobě maximální osově únosnosti (1468 kN) při uvažování nulové hodnoty excentrického zatížení převyšuje reálnou únosnost vzorku (1168 kN). Tento rozdíl je způsoben nepřesnostmi při provádění (např. při výrobě sloupu,

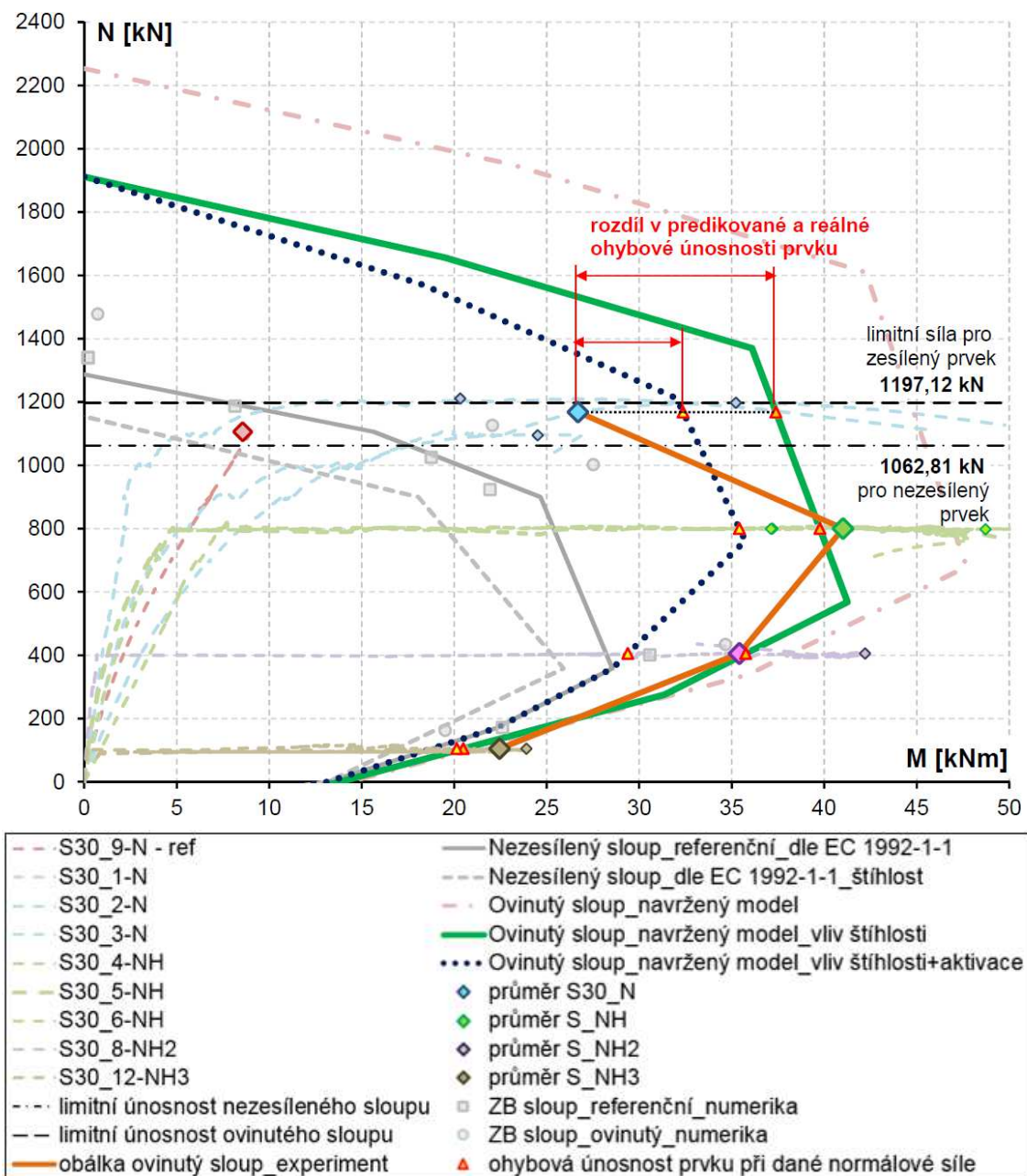
přesnost jeho uložení v zatěžovacím rámu apod.), proto není možné tyto hodnoty přímo porovnávat – platí pro nezesílený i pro ovinutý sloup.



**graf 34** - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu ovinutého jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny

Grafické porovnání analytického řešení s experimentálně stanoveným chováním ovinutého sloupu je prezentováno na grafu 35. Zde jsou znázorněny únosnosti ovinutého sloupu se zahrnutím účinků II. řádu. Pro plné ovinutí jde o model s ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model“ (únosnost je počítána na základě maximální hodnoty tlakové pevnosti ovinutého betonu). Vliv štíhlosti prvku na pokles únosnosti prvku vyjadřuje model s ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti“. Poslední model s ozn. „Ovinutý

*sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti+aktivace*“ vyjadřuje další redukci únosnosti vlivem aktivace ovinutí (únosnost je počítána na základě aktuální pevnosti ovinutého betonu). Z porovnání lze usuzovat na oblast náhlého poklesu účinnosti ovinutí (tzv. přechodová oblast), která leží mezi oběma hraničními křivkami a nachází se v rozmezí zatěžovacích režimů 1.  $F_N = F_{max}$  a 2.  $F_N = 800$  kN. Porovnání výsledků je prezentováno v tab. 22, kde je tzv. přechodová oblast patrná z porovnání odchylek řešení pro výše uvedené modely analytického řešení. Omezení maximální osové únosnosti je provedeno pomocí kritické limitní síly (patrné z grafu 35).



**graf 35** - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny

**tabulka 22 - Porovnání výsledků vysokých sloupů ovinutých jednou vrstvou FRP tkaniny**

Únosnost	F [kN]	M [kNm]	M [kNm]	odchylka	M [kNm]		odchylka	
Ozn. vzorku	experiment		numerika	$\Delta M$ [%]	analytika		$\Delta M$ [%]	
<b>S30_9-N</b>	1105,86	8,98	13,47	49,93	15,66		74,39	
<b>S30_N</b>	1168,70	26,68	19,48	-26,99	38,38*	46,93	43,86*	75,88
<b>S30_NH</b>	800,80	41,01	30,05	-26,74	40,33*	48,98	-1,65*	19,43
<b>S30_NH2</b>	405,91	35,40	33,09	-6,52	29,67*	38,86	-16,19*	9,77
<b>S30_NH3</b>	105,33	22,45	-	-	20,13*	21,14	-10,35*	-5,84

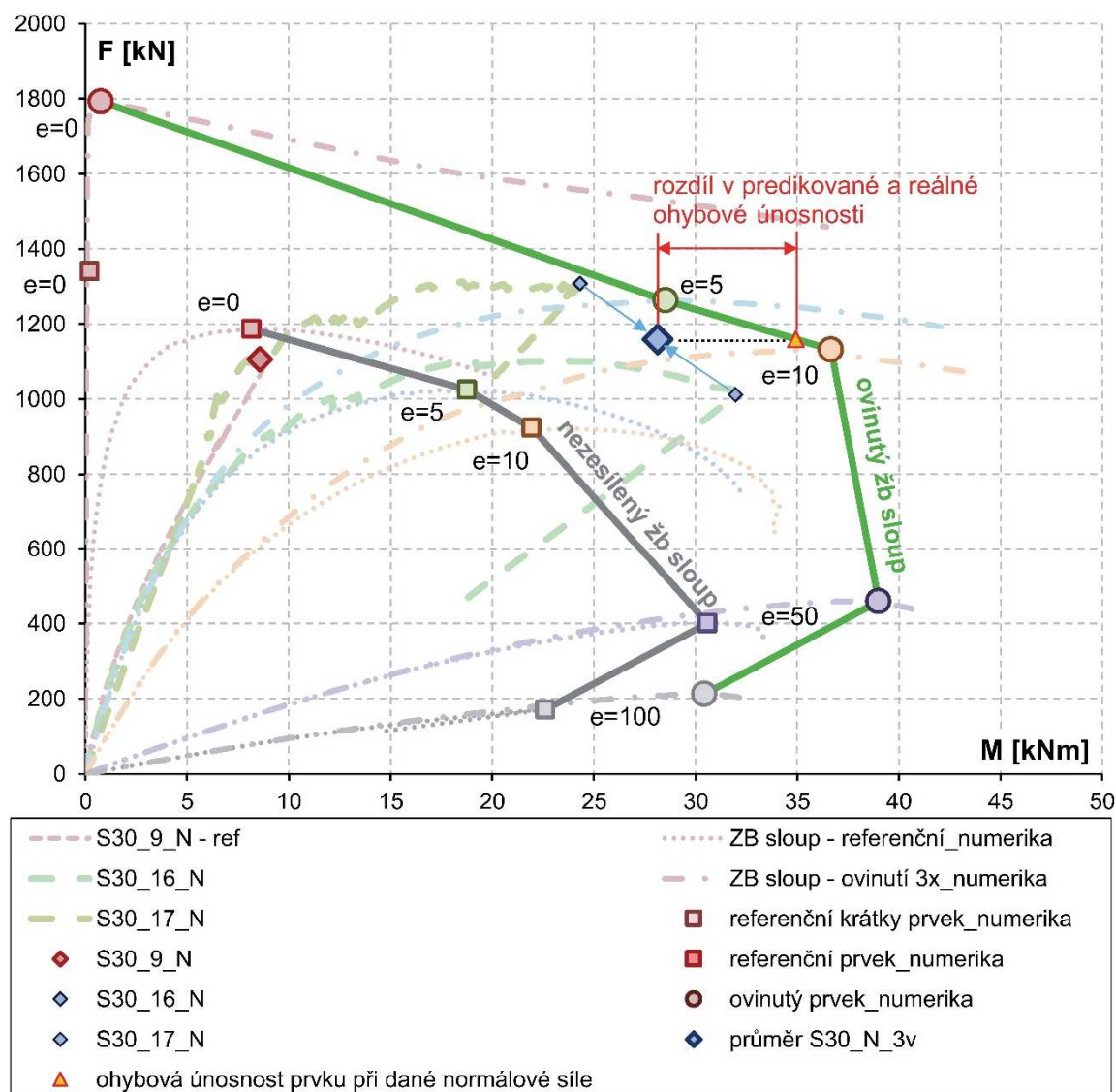
**Vysvětlivky:**  $\Delta M$  teoretická ohybová únosnost stanovená pro danou úroveň normálové síly;

\* hodnoty uvažovány pro model aktivace ovinutí.

**Poznámka:** odchylka ohybové únosnosti je stanovena k průměrné hodnotě ze zatěžovací zkoušky.

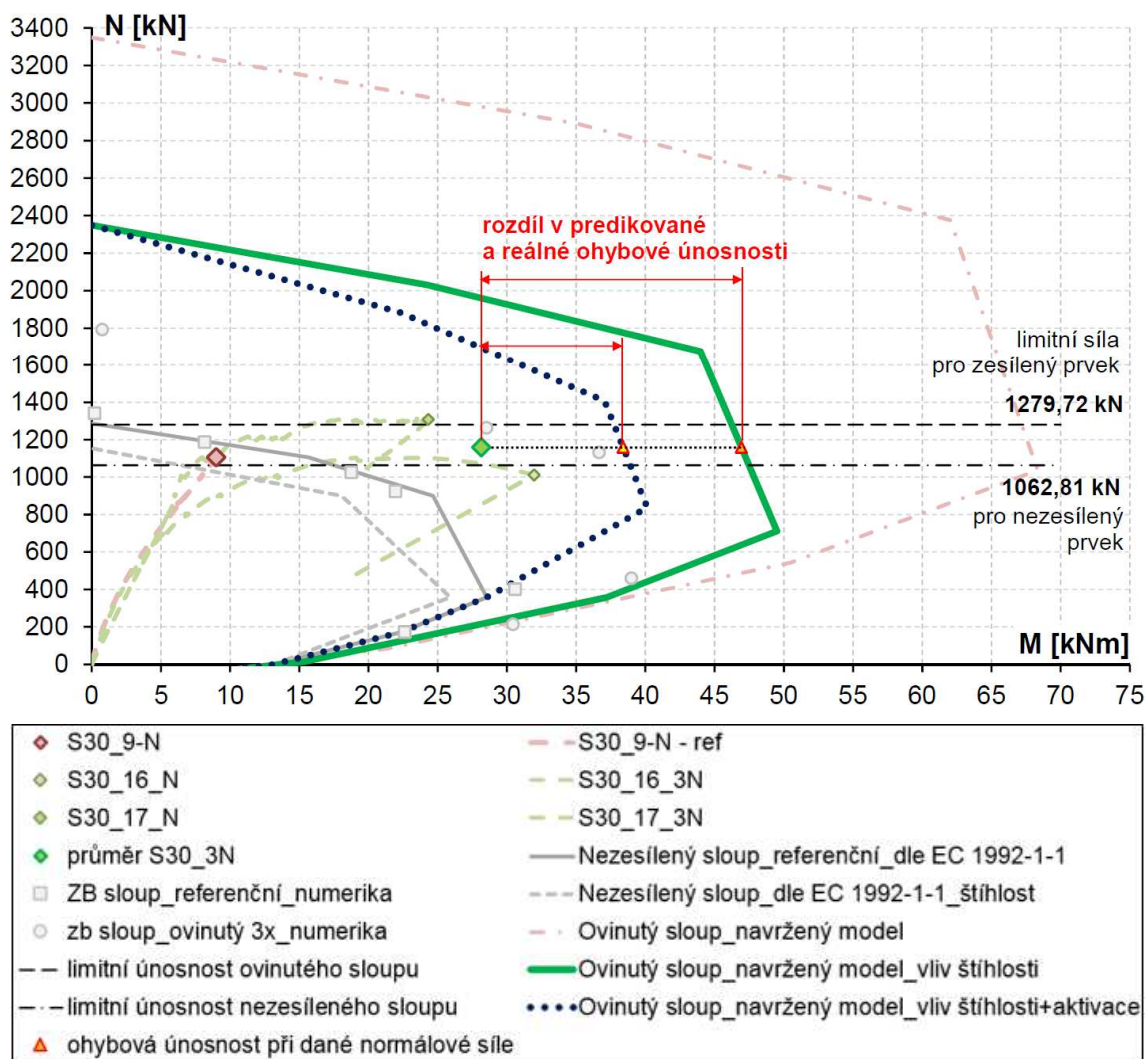
### Zesílení sloupu ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny

Účinek vícevrstvé aplikace ovinutí FRP tkaninou je pozorovatelný na grafech 36 a 37. Porovnáním výsledků numerické simulace sloupů ovinutých jednou a třemi vrstvami FRP tkaniny se potvrdil předpoklad nárůstu únosnosti z kapitoly 6.1.2. Graf 36 znázorňuje porovnání numerické simulace a chování ovinutého sloupu zjištěné experimenty, ve kterém lze opět pozorovat účinek ovinutí především v oblasti vyšších hodnot normálového zatížení. Odchylka teoretického řešení od experimentem stanovené únosnosti vyjádřená rozdílem ohybové únosnosti činí přibližně 24 %. Na rozdíl od předchozího řešení v tomto případě matematický model nadhodnocuje únosnost sloupu. Odchylka řešení je způsobena ne zcela správným modelem zatěžování s využitím excentrického působení normálové síly, malým počtem charakteristických bodů interakčního diagramu, způsobem modelování ovinutí pomocí příčné výztuže a také rozptylem výsledků zatěžovacích zkoušek. V důsledku vícevrstvé aplikace dochází k jinému poměru mezi složkami kompozitu (lepidla a tkaniny) a k lehké změně materiálových vlastností. Zpřesnění numerického řešení by proto přinesla úprava modelu ovinutí zohledňující tuto skutečnost.



**graf 36** - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu ovinutého třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny

Analytické řešení vlivu štíhlosti na účinnost ovinutí byla zobrazena pomocí tří modelů (viz graf 37). Únosnosti průřezů jsou vyjádřeny pro model plného ovinutí (ozn. „*Ovinutý sloup\_navržený model*“, tj. bez vlivu štíhlosti), pro model s vlivem štíhlosti (ozn. „*Ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti*“) a pro model zohledňující také aktivaci ovinutí (ozn. „*Ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti+aktivace*“). Odchylka teoretického řešení se zahrnutím vlivu štíhlosti od experimentálně stanovené únosnosti vyjádřená rozdílem ohybové únosnosti činí přibližně 67 % pro model plného ovinutí, resp. 37 % pro model aktivace ovinutí. Předložené teoretické řešení nadhodnocuje únosnost ovinutého sloupu. Číselné porovnání dosažených výsledků je prezentováno v tab. 23.



**graf 37** - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny

**tabulka 23** - Porovnání výsledků vysokých sloupů zesílených třemi vrstvami FRP tkaniny

Únosnost	F [kN]	M [kNm]	M [kNm]	odchylka	M [kNm]	odchylka
Ozn. vzorku	experiment		numerika	$\Delta M$ [%]	analytika	$\Delta M$ [%]
<b>S30_9-N</b>	1105,86	8,98	13,47	49,93	15,66	74,39
<b>S30_16_N</b>	1011,648	31,95	34,93	24,16	46,93	66,82
<b>S30_17_N</b>	1307,94	24,31			aktivace ovinutí *	
<b>S30_3N</b>	1159,79	28,13			38,38*	36,45*

**Vysvětlivky:**  $\Delta M$  teoretická ohybová únosnost stanovená pro danou úroveň normálové síly;  
 \* hodnoty uvažovány pro model aktivace ovinutí.

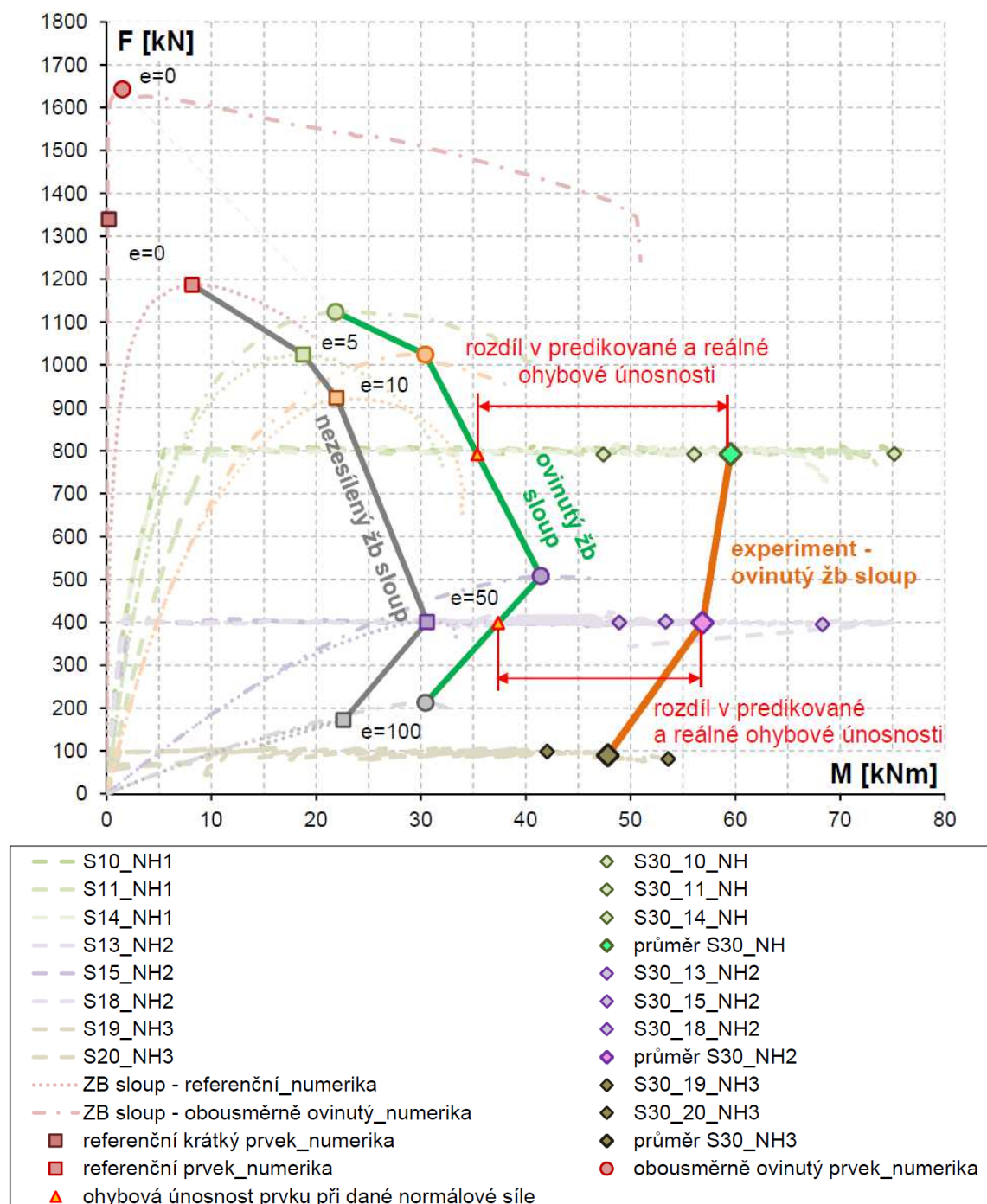
**Poznámka:** odchylka ohybové únosnosti je stanovena k průměrné hodnotě ze zatěžovací zkoušky.



### Zesílení sloupu ovinutím FRP tkaninou působící v obou směrech

Porovnání výsledků numerického modelu a zatěžovacích zkoušek prezentuje graf 38. Z průběhů interakčních diagramů je patrný efekt podélně orientovaných vláken, který se projevuje zvýšením únosnosti zejména v oblasti ohybového namáhání. Tento závěr dokládá srovnání výsledků numerických modelů simulujících ovinutí příčně orientovanou FRP tkaninou (graf 34) s modely simulující obousměrně působící ovinutí. Pro zatížení působící na excentricitě  $e = 5$  mm dosahují oba modely podobných hodnot ohybové únosnosti (příčná FRP tkanina cca 22,07 kNm, obousměrná FRP tkanina cca 21,85 kNm). Odchylka postupně narůstá v závislosti na využití podélných vláken FRP tkaniny, kdy pro excentricitu  $e = 10$  mm nabývá přibližně 10 % (27,51 kNm vs. 30,38 kNm pro obousměrnou FRP tkaninu), pro excentricitu  $e = 50$  mm dosahuje již téměř 20 % (34,66 kNm vs. 41,43 kNm pro obousměrnou FRP tkaninu). Nejvyšší odchylku vykazuje zatížení s maximální excentricitou  $e = 100$  mm s hodnotou přibližně 56 % (19,51 kNm vs. 30,43 kNm pro obousměrnou FRP tkaninu).

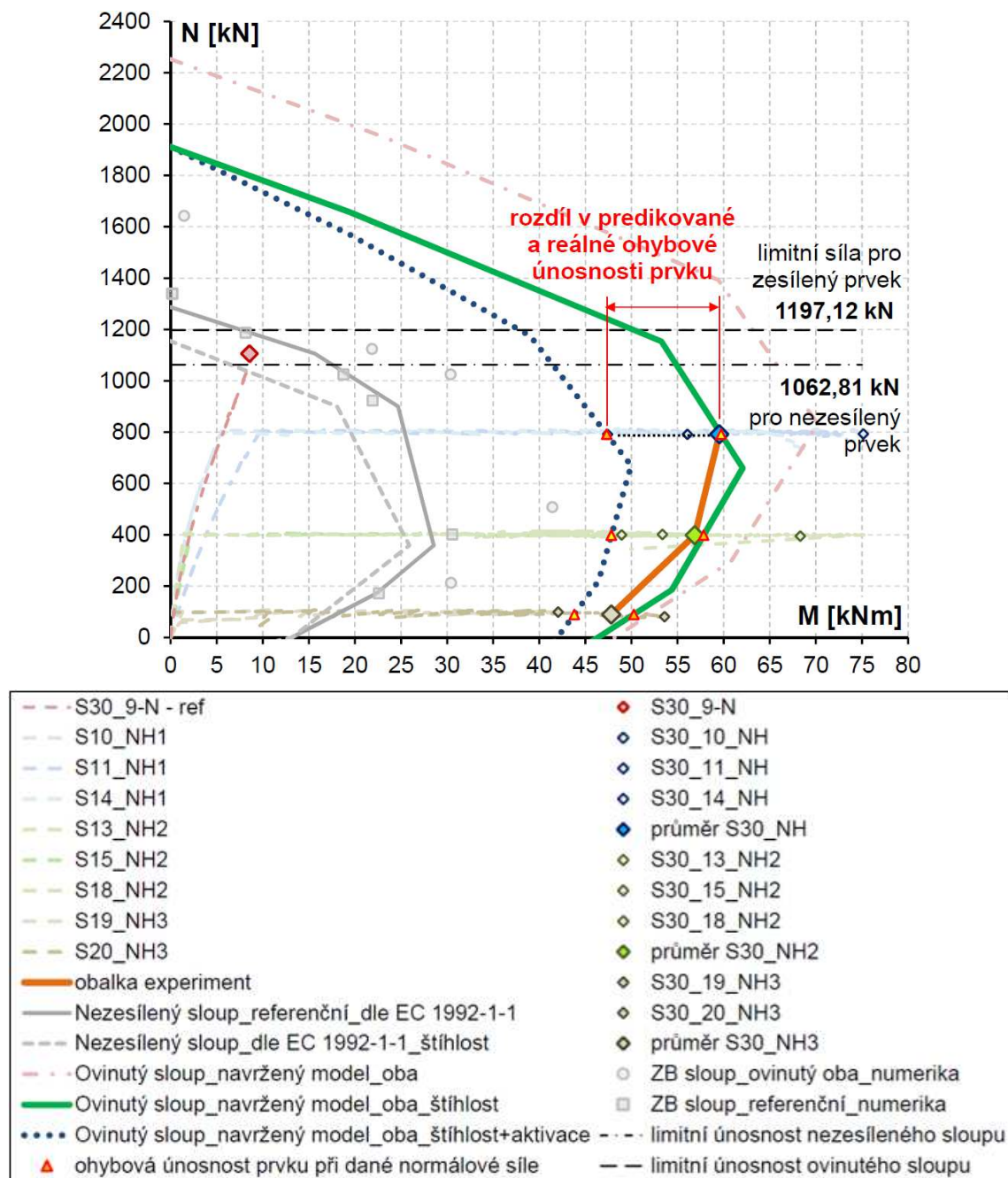
Při porovnání predikovaných a experimentálně zjištěných únosností představuje matematický model konzervativní řešení, jehož výstižnost je zatížena maximální chybou kolem 40 %. Přesnost numerického modelu je ovlivněna způsobem simulace režimů zatěžovacích zkoušek, změnou vlastností kompozitu způsobenou vrstvením FRP tkanin a také samotným modelováním podélně orientované vrstvy ovinutí. Simulované režimy zatěžování s využitím excentricky působící normálové síly nepodávají přímo porovnatelné hodnoty. Pro porovnání je nutné stanovit odpovídající ohybové únosnosti modelu při daných hodnotách normálové síly. Více vrstvá aplikace FRP tkaniny při reálném provedení vede k nárůstu množství lepidla ve výsledném laminátu, což vede ke změně materiálových vlastností. Také způsob modelování podélné výztuže pomocí diskretních prutů nevystihuje kontinuální ovinutí FRP tkaninou, kdy je přesnost řešení podmíněna hustotou výztuží po obvodě průřezu. Přesnost modelu lze zvýšit větším počtem charakteristických bodů interakčního diagramu a vhodnějším modelem podélně působící FRP tkaniny.



**graf 38** - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou

Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování je zobrazeno na grafu 39. Pro znázornění poklesu účinnosti ovinutí vlivem štíhlosti a také vlivu postupné aktivace ovinutí jsou únosnosti průřezu vyneseny ve třech modelech. Model plného ovinutí (ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model\_ob“), který uvažuje maximální charakteristiky ovinutého betonu. Model zahrnující vliv štíhlosti (ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model\_ob\_štíhlost“), který v závislosti na štíhlosti prvku redukuje příčný

tlak, resp. charakteristiky ovinutého betonu. A model zohledňující aktuální využití tkaniny (ozn. „Ovinutý sloup navržený model\_oba\_štíhlost+aktivace“), u kterého je velikost příčného tlaku dopočítána na základě odpovídajícího přetvoření. Při porovnání s hodnotami z experimentů je přesnost řešení modelu zahrnujícího vliv štíhlosti zatížena chybou okolo 5 %. Toto řešení lehce nadhodnocuje únosnost sloupu. Zatímco model postupné aktivace ovinutí se jeví jako konzervativní, když dosahoval odchylky ve srovnání s experimenty až 20 % (viz tab. 24).



graf 39 - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou

**tabulka 24 - Výsledků vysokých sloupů ovinutých obousměrně působící FRP tkaninou**

Únosnost	F [kN]	M [kNm]	M [kNm]	odchylka	M [kNm]		odchylka	
Ozn. vzorku	experiment		numerika	$\Delta M$ [%]	analytika		$\Delta M$ [%]	
<b>S30_9-N</b>	1105,86	8,98	13,47	49,93	15,66		74,39	
<b>S30_NH</b>	792,14	59,53	35,36	-40,60	47,31*	59,70	-20,53*	0,30
<b>S30_NH2</b>	398,95	56,86	37,35	-34,30	47,81*	57,82	-15,91*	1,70
<b>S30_NH3</b>	90,24	47,81	30,43	-	43,78*	50,24	-8,42*	5,09

**Vysvětlivky:**  $\Delta M$  teoretická ohybová únosnost stanovená pro danou úroveň normálové síly;

\* hodnoty uvažovány pro model aktivace ovinutí;

\*\* hodnoty uvažovány pro model plného ovinutí;

S30\_NH – označení skupiny vzorků S30\_10\_NH, S30\_11\_NH, S30\_14\_NH;

S30\_NH2 – označení skupiny vzorků S30\_13\_NH2, S30\_15\_NH2, S30\_18\_NH2;

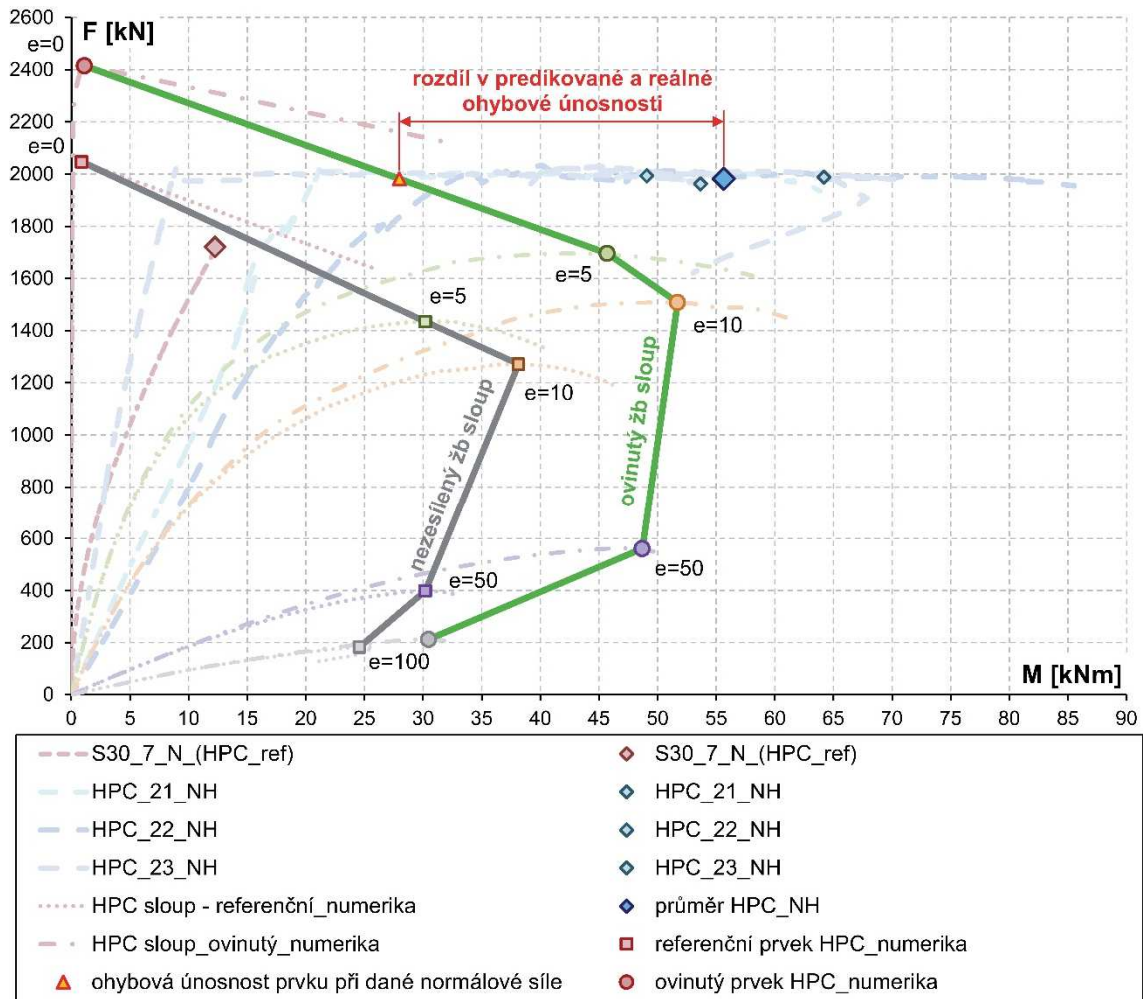
S30\_NH3 – označení skupiny vzorků S30\_19\_NH3, S30\_20\_NH3.

**Poznámka:** odchylka ohybové únosnosti je stanovena k průměrné hodnotě ze zatěžovací zkoušky; pro skupiny vzorků jsou hodnoty uvažovány průměrnou hodnotou.

### Ovinutí sloupu z vysokopevnostního betonu FRP tkaninou

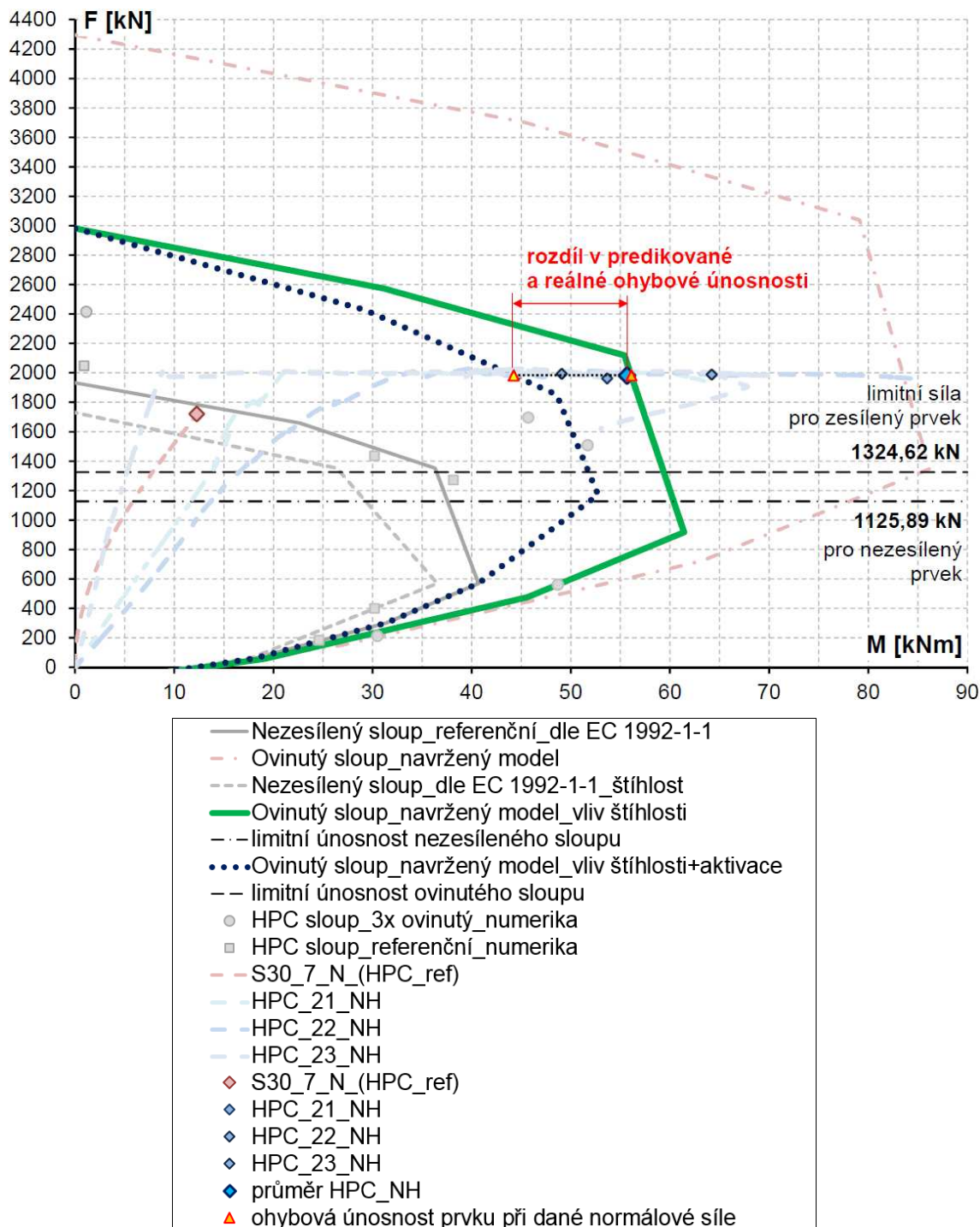
Konfigurace numerického modelu i analytického řešení vycházela z modelu sloupu z běžného betonu (beton C30/37). Změna se projevila pouze v materiálu betonu, který se změnil na HPC (charakteristiky betonu převzaty z experimentální části, viz kapitola 5.2.2). Předpoklady vlivu pevnost betonu jsou popsány v kapitole 6.1.3 a poukazují na klesající účinnost ovinutí v závislosti na vzrůstající pevnosti betonu. Cílem této studie bylo prokázat výstižnost předloženého řešení s použitím navrženého modelu pevnosti ovinutého betonu, prokázat nezávislost řešení na volbě materiálu betonu a výsledky porovnat s výsledky numerické studie a zatěžovacích zkoušek.

Numerické řešení popisuje chování ovinutého sloupu vynesemím několika bodů únosnosti (popř. jejich spojnicí), které definuje zatížením působícím na dané excentricitě (viz předchozí řešení). Výsledná odchylka mezi predikovaným a experimentálně zjištěným chováním ovinutého sloupu dosáhla hodnoty takřka 50 %, přičemž numerická simulace představuje konzervativní řešení. Výstižnost tohoto řešení je ovlivněna režimem zatěžování, počtem vnesených bodů únosnosti a také způsobem modelování ovinutí. Ovinutí bylo simulováno pomocí příčné výztuže, které ne zcela přesně vystihuje skutečné chování ovinutí laminátem FRP tkaniny, a to především s ohledem na změnu vlastností kompozitu při více vrstvé aplikaci (změna poměru složek kompozitu, tloušťky vrstvy apod.). Porovnání únosnosti z numerické simulace a ze zatěžovací zkoušky je prezentováno na grafu 40.



**graf 40** - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu z vysokopevnostního betonu zesíleného ovinutím FRP tkaninou

Přesnost analytického řešení je prezentována na grafu 41, kde je provedeno porovnání s experimentálně stanoveným chováním ovinutého sloupu. Odchylka ohybové únosnosti analytického modelu od zatěžovací zkouškou stanovené únosnosti pro daný režim zatížení je cca 1 % pro model ovinutí zohledňující vliv štíhlosti (ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti“), resp. přibližně 20 % pro model zohledňující navíc i aktivaci ovinutí (ozn. „Ovinutý sloup\_navržený model\_vliv štíhlosti+aktivace“). Model aktivace ovinutí oproti experimentu snižuje únosnost průřezu ovinutého sloupu. Pro názornost je zobrazen i model plného ovinutí s ozn. „Ovinutý beton\_navržený model“. Číselné porovnání je uvedeno v tab. 25.



**graf 41** - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu z vysokopevnostního betonu zesíleného ovinutím FRP tkaninou

**tabulka 25 - Porovnání výsledků vysokých sloupů z HPC betonu ovinutých FRP tkaninou**

Únosnost	F [kN]	M [kNm]	M [kNm]	odchylka	M [kNm]	odchylka
Ozn. vzorku	experiment		numerika	$\Delta M$ [%]	analytika	$\Delta M$ [%]
S30_7-N	1721,07	12,26	16,49	34,54	15,66	27,77
HPC_NH	1981,84	55,64	27,98	-49,72	56,09	0,80
					44,23*	-20,52*

**Vysvětlivky:**  $\Delta M$  teoretická ohybová únosnost stanovená pro danou úroveň normálové síly;

\* hodnoty uvažovány pro model aktivace ovinutí;

HPC\_NH – označení skupiny vzorků HPC\_21\_NH, HPC\_22\_NH, HPC\_23\_NH.

**Poznámka:** odchylka ohybové únosnosti je stanovena k průměrné hodnotě ze zatěžovací zkoušky; pro skupiny vzorků jsou hodnoty uvažovány průměrnou hodnotou.

## 6.5. Shrnutí teoretické části

Kapitola 6 uvádí popis teoretického chování sloupů zesílených ovinutím nekovovou FRP tkaninou včetně odvození analytických vztahů popisujících stanovení výsledné pevnosti ovinutého betonu v tlaku s ohledem na účinnost metody zesílení (viz kapitola 6.1). Analytická studie zahrnující různé vlivy ovinutí byla v další části doplněna o výsledky matematického modelování (tvorba modelu viz kapitola 6.3, výsledky numerických simulací viz kapitola 6.3.4). Výstižnost teoretického řešení byla ověřena porovnáním s experimentálně zjištěnou únosností zkušebních vzorků sloupů (výsledky experimentů viz kapitola 5.2). Na závěr této kapitoly jsou shrnuty poznatky vyplývající z řešení dané problematiky.

Provedené srovnání analytického a numerického řešení s výsledky experimentálního programu vedlo k těmto poznatkům:

- **výše prezentované porovnání sloupů poukázalo na obtížnou volbu výpočtového modelu určujícího chování sloupů zesíleného ovinutím FRP tkaninou, který výrazně ovlivňuje přesnost řešení.** Rozdíl mezi jednotlivými přístupy (viz kapitola 6.1.1) dosahuje takřka 60 %, což v praktickém návrhu může vést k fatálním následkům;
- **při stanovení charakteristik ovinutého betonu je nutné zohlednit reálné chování tkaniny zavedením součinitele účinnosti ovinutí  $k_e$ .** Tento součinitel zohledňuje napjatostní stav tkaniny při ovinutí sloupu a redukuje její tahovou pevnost (viz kapitola 6.1.3). Mimo tento je nutné zohlednit další vlivy, které limitují výsledný účinek ovinutí jako například zde studované vrstvení FRP tkaniny, orientace vláken tkaniny, štíhlost a pevnost betonu;

- **předložené řešení stanovení pevnosti ovinutého betonu v tlaku pomocí navrženého modelu (viz kapitola 6.1.4) představuje s ohledem na výsledky krátkých sloupů konzervativní řešení, přičemž v porovnání s legislativně platnou normou ČSN EN 1992-1-1 [43] podává přesnější výsledky.** Při porovnání výsledků krátkých sloupů (viz kapitoly 6.4.1 a 6.4.2) vykazuje navržený model chybu pohybující se kolem 10 %, zatímco normativní předpis [43] je zatížen chybou až 26 %. V případě vysokých sloupů byla sledována řada vlivů, jež limitují účinek ovinutí. Z uvedených porovnání je patrné, že při vyšší intenzitě namáhání došlo ke značné redukci účinnosti ovinutí (odchylka dosahovala až 70 %), zatímco při nižších intenzitách je přesnost vyšší (odchylka se pohybuje okolo 15%). Výsledky analytické studie ovinutých sloupů byly získány za použití navrženého modelu pro stanovení pevnosti ovinutého betonu s použitím součinitele účinnosti ovinutí  $k_e = 0,656$ . Navržený model je aproximován mocninnou funkcí a vychází z modelů Model Code 2010 [48] a ACI 440.2R (2002) [36]. Vznikl modifikací parametrů  $\alpha = 3,0$  a  $\beta = 0,73$ , které vychází z rozsáhlé studie výsledků zatěžovacích zkoušek. Po úpravě jej lze zapsat ve tvaru:

$$f_{cc} = f_{co} \cdot \left[ 1 + 3,0 \cdot \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0,73} \right];$$

- **porovnání teoretického chování numerické a analytické simulace s výsledky zatěžovacích zkoušek rovněž upozornilo na nutnost respektovat postupnou aktivaci ovinutí, kdy je velikost tlakové pevnosti ovinutého betonu stanovena na základě aktuální míry příčného tlaku.** Výpočet únosnosti průřezu nelze provádět pro charakteristiky ovinutého betonu stanovené na základě limitních hodnot příčného tlaku, ale je nutné zohlednit aktuální velikost tohoto napětí (viz porovnání vysokých sloupů v kapitole 6.4.3);
- **vliv štíhlosti prvku má zásadní dopad na chování sloupu ovinutého FRP tkaninou, kdy je patrný náhlý pokles účinnosti ovinutí v oblastech vyššího normálového namáhání (náhlý pokles účinnosti ovinutí).** Je nutné stanovit limitní namáhání, při kterém dochází ke značnému snížení účinnosti ovinutí (viz porovnání výsledků z kapitoly 6.4.3).
- **nutnost lépe postihnout tzv. „přechodovou“ oblast (přechod mezi aktivací ovinutí a plnou účinností ovinutí).** Výsledky vysokých sloupů (kapitola 6.4.3)



poukazují na postupný přechod mezi únosností průřezu stanovenou na základě plného ovinutí a na základě postupné aktivace ovinutí;

- **obousměrně působící FRP tkanina příznivě působí nejen v oblastech převládajícího tlaku, kde se projevuje vliv ovinutí (příčně orientovaná vlákna tkaniny), ale i v místech značného ohybového namáhání (vliv podélně orientovaných vláken).** Podélně orientovaná vlákna tkaniny působí jako přídatná podélná výztuž aktivovaná vybočením (vodorovnou deformací) sloupu;
- **pevnost betonu ovlivňuje výsledný účinek ovinutí, kdy s její rostoucí hodnotou klesá účinek ovinutí** (negativní vliv křehkého chování betonů vyšších tlakových pevností);
- **vícevrstvá aplikace FRP tkaniny v důsledku technologického postupu patrně vede ke změně charakteristik kompozitu, které je nutné zohlednit při návrhu zesílení.** Na tuto skutečnost poukazují výsledky vysokých sloupů s vícevrstvou aplikací tkaniny. V důsledku vrstvení FRP tkanin dochází ke změně poměru množství polymerního lepidla a vláken tkaniny. Toto se projevuje změnou charakteristiky laminátu a také tloušťky laminované vrstvy. Změnu charakteristik laminátu v důsledku vrstvení by bylo nutné ověřit zkouškami.

Malý počet zkušebních vzorků pro některé režimy zatěžování při zkoumání vlivů omezujících příznivý účinek zesílení ovinutím FRP tkaninou nezaručuje nezávislé vyhodnocení (nepostihují nahodilost jevu). Proto závěry z těchto částí výzkumu lze uvažovat pouze jako orientační. I přesto poskytují data cenné informace, díky kterým je možné si udělat představu o efektu jednotlivých vlivů a možnostech způsobu jeho zohlednění při stanovení únosnosti sloupu ovinutého FRP tkaninou.

## 7. ZÁVĚRY

Předložená disertační práce se zabývá problematikou zesilování sloupů ovinutím za použití moderního progresivního materiálu laminátu FRP tkaniny. Ačkoli je zesílení ovinutím ve stavebnictví známou technikou, která pro zvýšení únosnosti prvku využívá principů víceosého stavu napjatosti, použití nekovových vláken vyztužených polymerů přináší do této oblasti řadu otázek komplikujících rozšíření této metody zesílení v praxi. Cílem rozsáhlých výzkumů prováděných řadou výzkumných pracovišť po celém světě je

stanovení výstižného návrhového postupu, jež zohlední řadu faktorů limitujících výsledný efekt ovinutí. Za tímto účelem byla zpracována i tato práce, která se snažila popsat nejen funkčnost ovinutí, ale také poukázat na současný stav poznání a upozornit na nedostatky v návrhových postupech. Současně s tím si kladla za cíl vytvoření návrhového modelu predikujícího vlastnosti ovinutého betonu a zahrnutí některých vlivů limitujících účinek ovinutí.

### **Naplnění stanovených cílů disertační práce:**

Práce se zaměřila na základní znalosti potřebné pro správný návrh zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou, tzn. nezabývala se samotným návrhem zesílení. Nesoulad návrhových postupů při stanovení charakteristik ovinutého betonu (viz kapitola 6.1.1), který v extrému dosahuje více než padesáti procentní odchylky, komplikuje praktický návrh zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou. Cílem práce byl proto popis principu ovinutí FRP tkaninou včetně zahrnutí vlivů, jež limitují jeho příznivý účinek. Tyto základní vstupy jsou klíčem k úspěšnému návrhu zesílení. Proto jsou hlavním výsledkem práce vytvořený pevnostní model ovinutého betonu (kapitola 6.1.4), který poskytuje dobrou shodu s výsledky experimentálního programu i numerické simulace, a také koncepce stanovení účinků způsobu ovinutí (vrstvení tkanin, orientace vláken), vlivu aktivace vláken, vlivu štíhlosti prvku a vlivu pevnosti betonu zesilovaného sloupu. Předložené řešení poskytuje ucelený náhled na problematiku ovinutých sloupů, kdy definuje výsledné vlastnosti ovinutého betonu a samotný způsob stanovení únosnosti ovinutého sloupu pomocí interakčního diagramu. Současně odstraňuje nedostatek normativního předpisu [43], který nezohledňuje problematiku FRP kompozitů a není tak pro jejich použití připraven.

V práci jsou uvedeny výsledky experimentálního programu sloupů zesílených ovinutím uhlíkovou tkaninou v různých konfiguracích (krátký vs. vysoký sloup, vícevrstvá aplikace tkaniny, příčné vs. obousměrné působení tkaniny), které umožnily popsat faktory limitující účinnost ovinutí. Závěry experimentálního programu byly zohledněny při odvození analytických vztahů pro návrh a popis chování ovinutých sloupů, jejichž výsledkem je odvozený navržený pevnostní model ovinutého betonu, součinitel účinnosti ovinutí zohledňující reálný napjatostní stav tkaniny, popis aktivace zesílení ovinutím a v neposlední řadě také zahrnutí vlivu štíhlosti při využití stávajících výpočtových postupů. Součástí práce je i numerické modelování při využití nelineární analýzy metodou konečných prvků (FEM) v programu ATENA 3D.

Výsledky teoretického popisu chování ovinutých sloupů a experimentů byly vzájemně porovnány jak číselně, tak grafický prostřednictvím hlavních sledovaných veličin (závislost normálové síly a ohybového momentu) pomocí interakčních diagramů (viz kapitola 6.4).

Teorii popsanou v analytické části práce lze využít pro stanovení pevnosti ovinutého betonu v tlaku (navržený pevnostní model) a také pro zohlednění vlivů, limitujících účinek ovinutí. Navržený model pevnost ovinutého betonu je odvozen pro uhlíkovou tkaninu. Pro jeho použití s ostatními typy tkanin by byla nutná jeho modifikace na základě výzkumu. Model rovněž nezohledňuje vlivy limitující účinek ovinutí. Tyto zohledňuje koncepce výpočtů popsaná u jednotlivých vlivů (viz kapitoly 3.4.3 a 6.1). Pro porovnání únosnosti sloupu zesíleného ovinutím FRP tkaninou pomocí interakčních diagramů lze využít model plného ovinutí a jeho zpřesnění pomocí modelu aktivace ovinutí, které definují hranice reálného chování. Model postupné aktivace ovinutí zohledňuje aktuální využití FRP tkaniny na základě velikosti přetvoření průřezu a definuje tak velikost příčného tlaku (kapitola 6.1.2).

**Na základě výsledků zatěžovacích zkoušek a výzkumu v oblasti teoretického chování sloupů ovinutých FRP tkaninou byly získány následující poznatky:**

- výzkum krátkých sloupů (zatěžovací zkoušky, teoretická analýza i provedené statistické vyhodnocení) vedl k těmto poznatkům:
  - **výsledky experimentů** krátkých sloupů (tj. bez vlivu štíhlosti) z prostého betonu **prokázaly snížení účinku zesílení ovinutím FRP tkaninou v závislosti na vzrůstajícím průměru sloupu** (viz kapitola 6.4.1), čímž potvrdily předpoklad pro výpočet z kapitoly 3.4.3. Tento pokles souvisí s rozkladem sil v tkanině, u které při daném způsobu namáhání tkaniny v závislosti na průměru sloupu dochází ke změně velikosti radiální složky napětí, tzn. mění se velikost příčného tlaku (poklesem příčného tlaku při zvětšujícím se průměru zesilovaného sloupu a naopak);
  - **vícevrstvá aplikace FRP tkaniny vede ke zvýšení únosnosti zesilovaného sloupu, která ovšem není úměrná nárůstu plochy laminátu tkaniny** (potvrzují výsledky z kapitoly 6.4.1). Vrstvení FRP tkaniny mění její materiálové vlastnosti laminátu. Dochází ke změně poměru polymerního lepidla a tkaniny při vícevrstvé laminaci, narůstá tloušťka vrstvy laminátu a mění se i jeho vlastnosti;

- krátké vzorky zatěžované dostředným tlakem maximalizovaly účinnost zesílení ovinutím FRP tkaninou, když se únosnost při jednovrstvém zesílení zvýšila více než dvakrát, resp. třikrát při třívrstevném zesílení. Zkušební vzorky se porušovaly přetržením nosných vláken tkaniny, kdy byla dosažena její tahová pevnost (odlišná od tahové pevnosti určené z tahových zkoušek). **Zesílení ovinutím příčně orientovanou FRP tkaninou lze účinně využít v oblastech převládajícího tlakového namáhání;**
- **účinky ovinutí nelze stanovit na základě limitní tahové pevnosti, resp. limitního přetvoření FRP tkaniny při přetržení získanou z tahových zkoušek.** Vlivem zakřivení tkaniny podle tvaru ovíjeného prvku (v případě kruhových sloupů v závislosti na poloměru) dochází k odlišnému způsobu namáhání FRP tkaniny oproti namáhání čistým tahem při tahové zkoušce. Při ovinutí proto nelze těchto hodnot dosáhnout;
- výzkum vysokých sloupů (zatěžovací zkoušky, teoretická analýza i provedené statistické vyhodnocení) vedl k těmto poznatkům:
  - **účinek příčně orientované FRP tkaniny klesá se vzrůstajícím ohybovým namáháním,** kdy je odpovídající část tkaniny stlačována v místech tažené části průřezu a není možné její plné využití (eliminace příčného tlaku). Pokles účinnosti zesílení ovinutím potvrzují výsledky vysokých sloupů (viz kapitola 6.4.3), kdy pro případ převládajícího ohybu účinek zesílení zcela vymizí (shodná únosnost nezesíleného i zesíleného sloupu);
  - k **aktivaci zesílení** ovinutím FRP tkaninou dochází postupně při zatěžování průřezu, tzn. aktivace tkaniny a míra jejího využití jsou spojeny s přetvořením průřezu. **Počátek aktivace,** projevující se nárůstem únosnosti zesilovaného prvku, **iniciuje vznik trhlin v průřezu (cca 40 % pevnosti neovinutého betonu).** Tento závěr je podložen výsledky experimentů i teoretických studií (viz kapitoly 6.1.2 a 6.4.3) provedených pro prvek s nulovou počáteční napjatostí (zatížen až po zesílení). Platí pro pasivní způsob zesílení bez počátečního dopnutí (aktivace) tkaniny. V případě prvku s nenulovou počáteční napjatostí je aktivace ovinutí podmíněna vznikem a dalším rozvojem trhlin, nelze jí proto definovat úroveň tlakové pevnosti prvku (námět pro budoucí výzkum);
  - **s rostoucí štíhlostí prvku dochází ke snížení účinku zesílení ovinutím FRP tkaninou** (viz kapitola 6.1.5). Vlivem ohybového namáhání (důsledek štíhlosti)

přechází tlačena část průřezu do tažené, což vede k poklesu nebo k úplné eliminaci příčného tlaku a tím i k redukci účinků ovinutí. Vysoké sloupy kolabovaly v důsledku štíhlosti při maximální tlakové síle srovnatelné s nezesíleným vzorkem (viz kapitoly 5.2.2 a 6.4.3). Zesílení v tomto případě vedlo pouze k nárůstu duktility (ohybové únosnosti);

- **při zesílení ovinutím tkaninou působící v obou směrech je výsledná únosnost sloupu dána součtem účinků zesílení v příčném směru (trojosý stav napjatosti) a působení tkaniny v podélném směru (přidavná podélná ohybová výztuž).** Jednotlivé příspěvky únosnosti odpovídají ploše a vlastnostem laminátu tkaniny v odpovídajícím směru. Účinek podélně orientovaných vláken tkaniny se tak projevuje především v oblastech s převládajícím ohybovým namáháním, což potvrzují výsledky matematické studie i experimentu. Teoretické chování pro tento případ poskytuje dobrou shodu s výsledky experimentálního programu (viz kapitoly 6.1.2 a 6.4.3);
- **účinnost zkoumané metody zesílení se snižuje v závislosti na vzrůstající pevnosti betonu v tlaku** (viz kapitola 3.4.3), což potvrdilo reálné i predikované chování ovinutých sloupů (viz kapitoly 6.1.3 a 6.4.3).
- obecně platné poznatky získané nezávisle na konfiguraci zatěžovací zkoušky:
  - **při výpočtu vlastností ovinutého betonu nelze počítat s vlastnostmi suchého vlákna tkaniny. Je nutné dosazovat skutečné vlastnosti laminátu** získané z tahových zkoušek (jednoosé namáhání), které je v důsledku odlišného působení tkaniny při ovinutí (víceosé namáhání) nutné redukovat. **Tato skutečnost se ve výpočtu zohledňuje zavedením součinitele účinnosti ovinutí  $k_e$ .** Ve většině uvedených návrhových přístupů ovšem není redukce vlastností laminátu reflektována;
  - **způsob stanovení vlastností laminátu FRP tkaniny by měl reflektovat její působení v reálné aplikaci.** Je nutné si uvědomit způsob výroby, použití a namáhání FRP tkaniny a podle toho redukovat vlastnosti laminátu. Například v případě obousměrné strojně splétané tkaniny je nutné v závislosti na zakřivení vláken v důsledku vzájemného propletení a v závislosti na poměru nosných vláken v daném směru určovat výsledné vlastnosti laminátu (nejlépe zatěžovacími zkouškami).

- **více vrstvá aplikace** klade zvýšené nároky na provádění, kdy vlivem technologického postupu nelze zaručit parametry tkaniny shodné s jednovrstvou aplikací. Vrstvení **způsobuje nárůst tloušťky vrstvy** vlivem změny poměru složek laminátu (lepidlo, tkanina) a tím **i změnu výsledných vlastností souvrství laminátu**. Kvůli horším mechanickým vlastnostem polymerního lepidla se v závislosti na směsném pravidle snižují i vlastnosti laminátu. Výsledkem je redukce příčného tlaku a tím i účinku ovinutí;
- **princip stanovení únosnosti průřezu za pomoci charakteristik ovinutého betonu** („model plného ovinutí“) **nevystihuje skutečné chování ovinutých sloupů** (viz výsledky v kapitolách 5.2.2 a 6.4.3). Při výpočtu je nutné respektovat skutečné chování, tj. vliv aktivace zesílení („model aktivace zesílení“) s postupným zvyšováním pevnosti ovinutého betonu na základě aktuální velikosti příčného tlaku;
- **navržený pevnostní model pro výpočet vlastností ovinutého betonu pro sloupky zesílené CFRP tkaninou poskytuje dobrou shodu s experimentem zjištěným chováním ovinutých sloupů** (na základě porovnání výsledků krátkých i vysokých sloupů – viz kapitol 6.4). Pro výstižnější predikci chování ovinutých sloupů by bylo nutné blíže popsat přechod mezi modelem plného ovinutí a modelem aktivace ovinutí – detailní popis tzv. „přechodové oblasti“. A rovněž popsat náhlý pokles účinnosti ovinutí u vysokých sloupů při vyšších intenzitách normálového namáhání (námět pro budoucí výzkum);
- mechanismus porušení u sloupů ovinutých příčně orientovanou FRP tkaninou lze odlišit podle způsobu namáhání. V případě převládajícího tlakového namáhání dochází k přetržení nosných vláken tkaniny s následným kolapsem sloupu, kdy beton prvku vykazuje značné porušení (drcení betonu). V případě převládajícího ohybového namáhání porušení/ kolaps prvku zapříčiní trhlinka v tkanině jdoucí rovnoběžně s nosnými vlákny. Nedochozí k porušení nosných vláken tkaniny, ale selhávají konstrukční nenosná vlákna tkaniny. Sloup se poruší v jednom řezu, kdy trhlinka prostoupí napříč celým betonovým průřezem (ohybové porušení).

**Této práce může být dále využito při následujících vědecko-výzkumných činnostech:**

- jako podklad pro ověření a verifikaci vztahů sloužících pro výpočet vlastností ovinutého betonu při využití nekovové FRP tkaniny jako zesilujícího materiálu. Tento návrh lze provádět plně v souladu s platnými normativními předpisy (EN normy) pro mezní stavy únosnosti;
- jako podklad pro optimalizaci navrženého pevnostního modelu ovinutého betonu, případně pro optimalizaci omezujících faktorů (reálné působení tkaniny, aktivace ovinutí, štíhlost prvku apod.). Databázi výsledků z provedených experimentů a z nich odvozené závislosti lze dále využít při plně pravděpodobnostním návrhu zesílení ovinutím FRP tkaninou;
- vytvoření praktické příručky pro návrh a posouzení zesílení ovinutím FRP tkaninou a obecně pro práci s FRP materiálem.

**Pro přesnější popis problematiky by bylo vhodné rozvinout a doplnit následující:**

- pro výstižnější popis chování zesílených sloupů je nutné lépe popsat aktivaci zesílení, tzn. přesněji ověřit chování ovinutého laminátu tkaniny při zatěžování kombinací normálové síly a ohybového momentu. Toto lze zajistit detailnějším popisem přetvoření tkaniny, pro jejíž snímání by bylo nutné osadit více snímačů po obvodu sloupu;
- detailně popsat tzv. přechodovou oblast (rozhraní mezi postupnou aktivací a plným ovinutím), která respektuje postupné využití tkaniny související s přetvořením průřezu a lépe tak vystihuje skutečné chování ovinutých sloupů;
- popis vlivu podélně orientované vrstvy FRP tkaniny, jak pro případ obousměrného působení laminátu, tak i pro případ samostatného působení (působení pouze v podélném směru);
- je třeba se zaměřit na popis vlivu štíhlosti prvku na snížení účinnosti zesílení ovinutím FRP tkaninou, a to zejména s ohledem na náhlý a značný pokles účinnosti ovinutí při působení vyšších intenzit normálového tlakového namáhání;
- pro výstižné stanovení výsledných vlastností ovinutého betonu by bylo vhodné popsat způsob určení výsledných vlastností laminátu zohledňujících reálné působení tkaniny při ovinutí (vliv druhu tkaniny, způsobu výroby apod.);

- popsat vliv počáteční napjatosti zesilovaného prvku, který by lépe odpovídal reálnému provedení zesílení;
- předložená práce se zabývala krátkodobým chováním ovinutých sloupů při jednorázovém zatěžování, proto by bylo vhodné doplnit popis chování i o dlouhodobé účinky (dotvarování, cyklické zatížení, únava apod.). Pro tyto účely by bylo třeba zaměřit se také na dlouhodobé vlastnosti laminované tkaniny.

### **7.1. Doporučení pro praxi – návrh zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou**

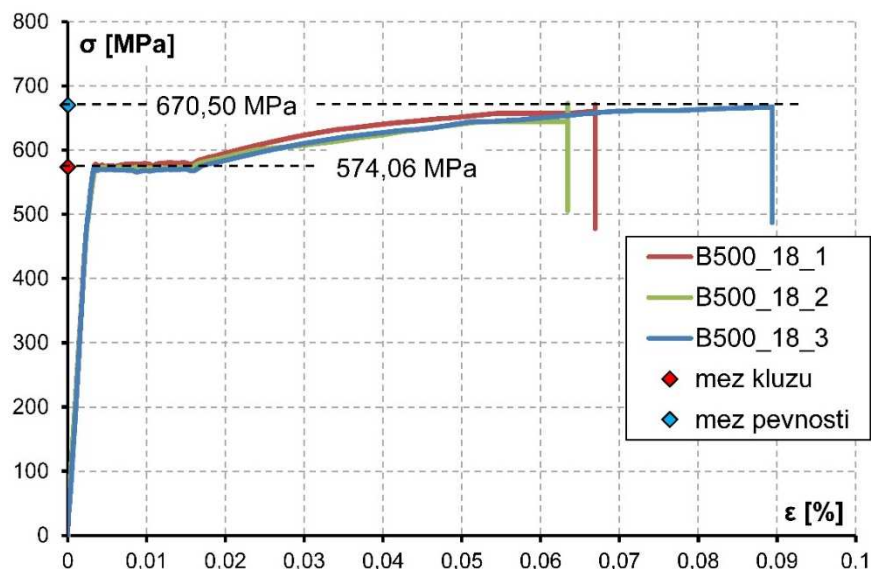
- při výpočtu vlastností ovinutého betonu nezbytných pro návrh zesílení je nutné vycházet z materiálových vlastností laminátu FRP tkaniny (nelze použít vlastnosti suchého vlákna), jež byly stanoveny blíže popsáním způsobem pomocí zatěžovacích zkoušek materiálu;
- výše popsané analytické vztahy umožňují stanovit pracovní diagram ovinutého betonu, tj. závislost mezi napětím v betonu a jeho poměrným přetvořením;
- údaje uvedené v předložené disertační práci nezohledňují dlouhodobé chování (především FRP materiálu). Při návrhu je třeba tento fakt reflektovat provedením návrhu v konzervativních hodnotách (viz např. [47]);
- praktický návrh zesílení ovinutím by měl vycházet z předpisů zohledňujících chování vlákniny vyztužených kompozitních materiálů, a které zohledňují omezení účinnosti zesílení spjaté s použitím těchto moderních materiálů (např. americké předpisy ACI).



## PŘÍLOHA A – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

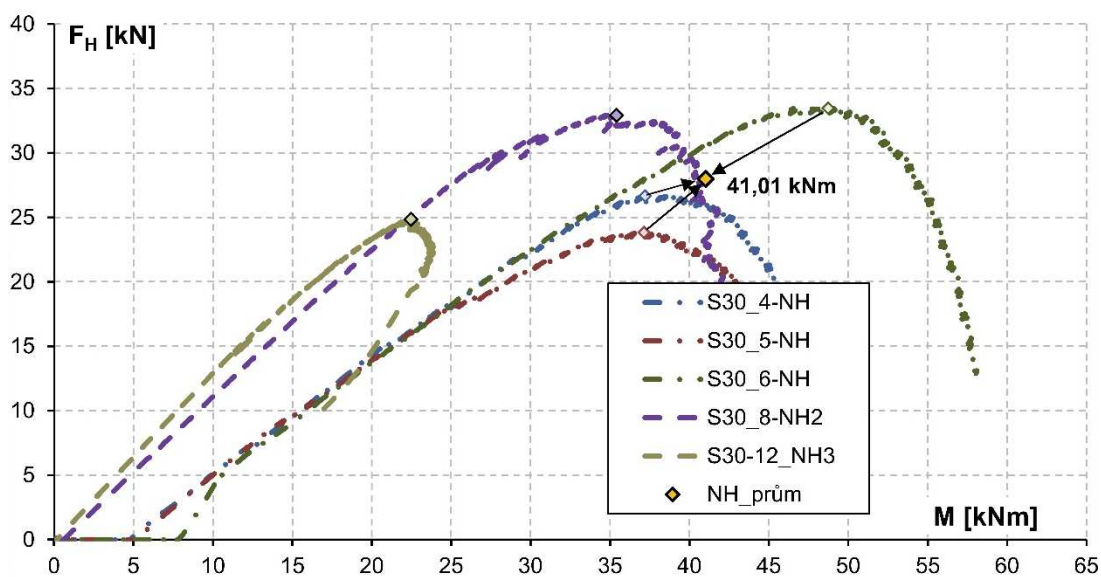
V této kapitole jsou obsaženy výsledky experimentálních prací, na které se odkazuje samotná práce. Jedná se především o výsledky zatěžovacích zkoušek vysokých železobetonových sloupů zesílených ovinutím FRP tkaninou v konfiguracích dle tab. 13.

### Zatěžovací zkoušky stanovující vlastnosti betonářské výztuže třídy B 500

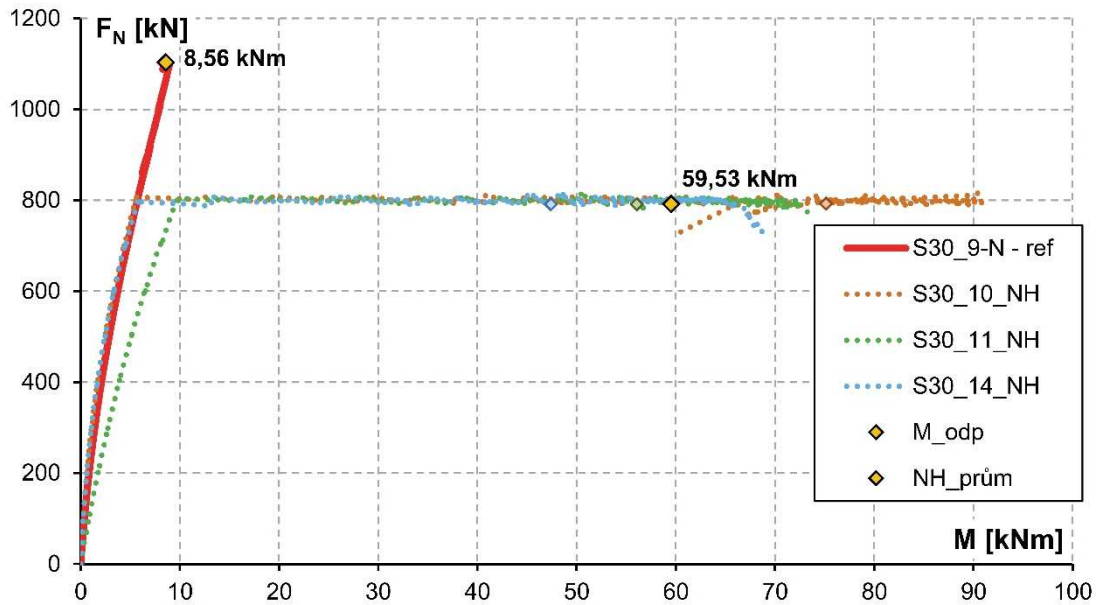


graf 42 - Pracovní diagram betonářské oceli třídy B 500

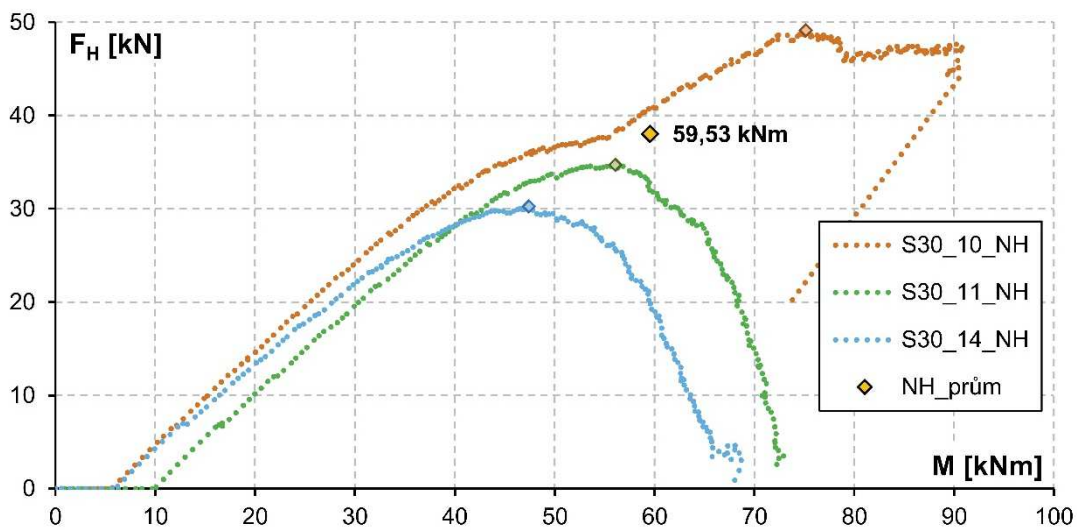
### Zatěžovací zkoušky vysokých železobetonových sloupů ovinutých FRP tkaninou



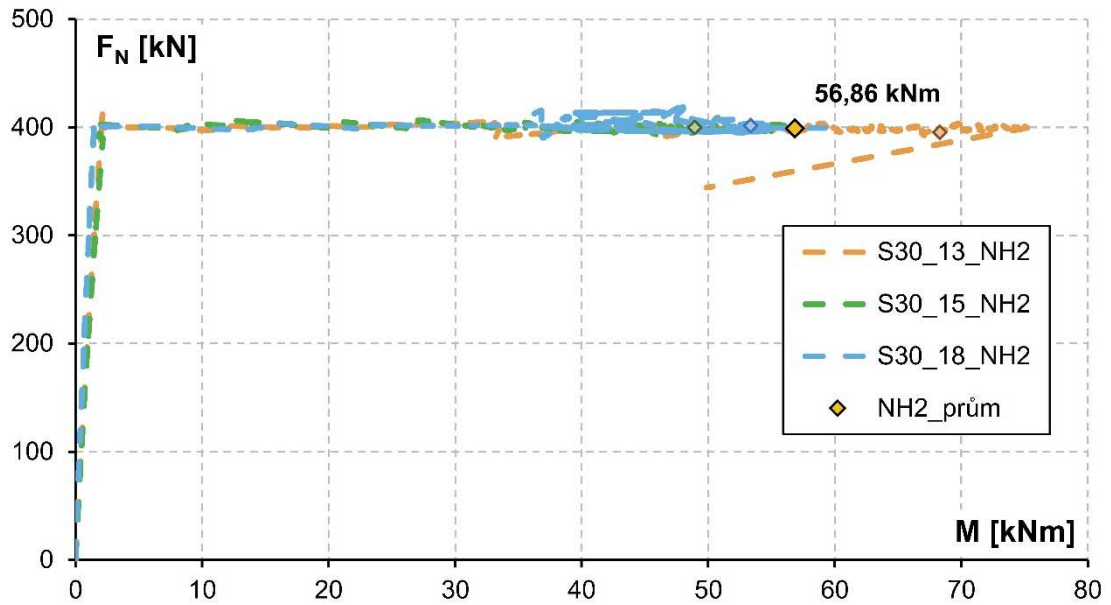
graf 43 - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny



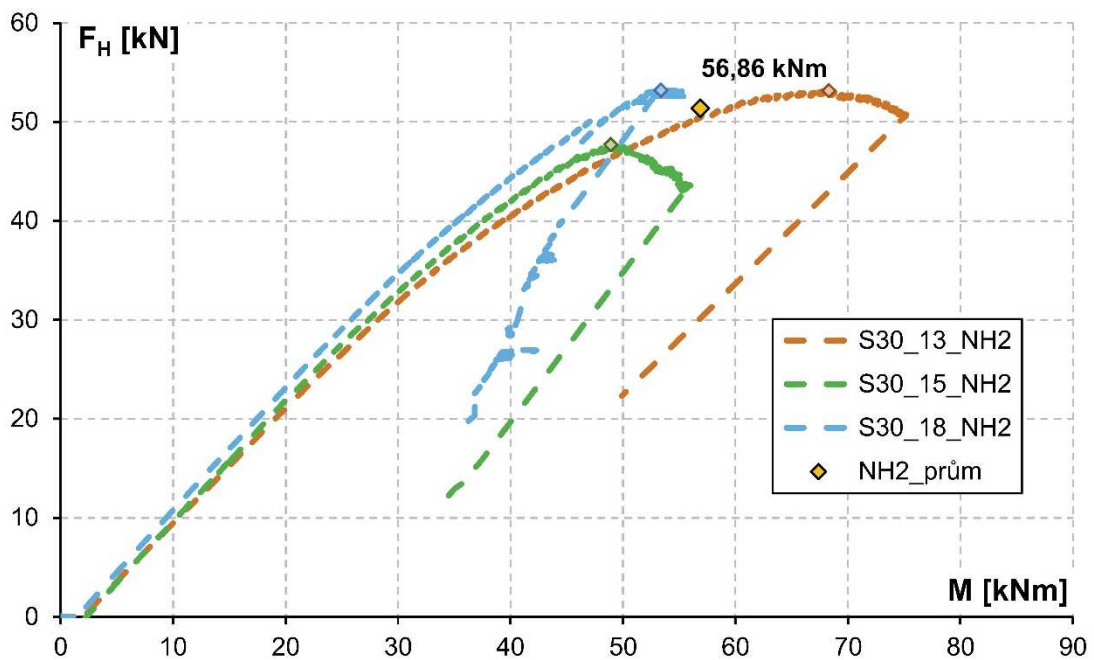
**graf 44** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 800$  kN



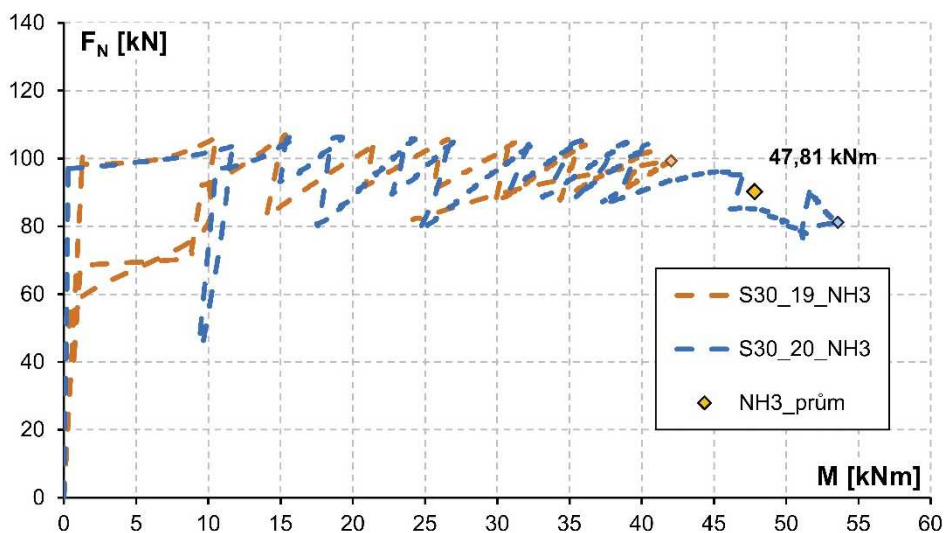
**graf 45** - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 800$  kN



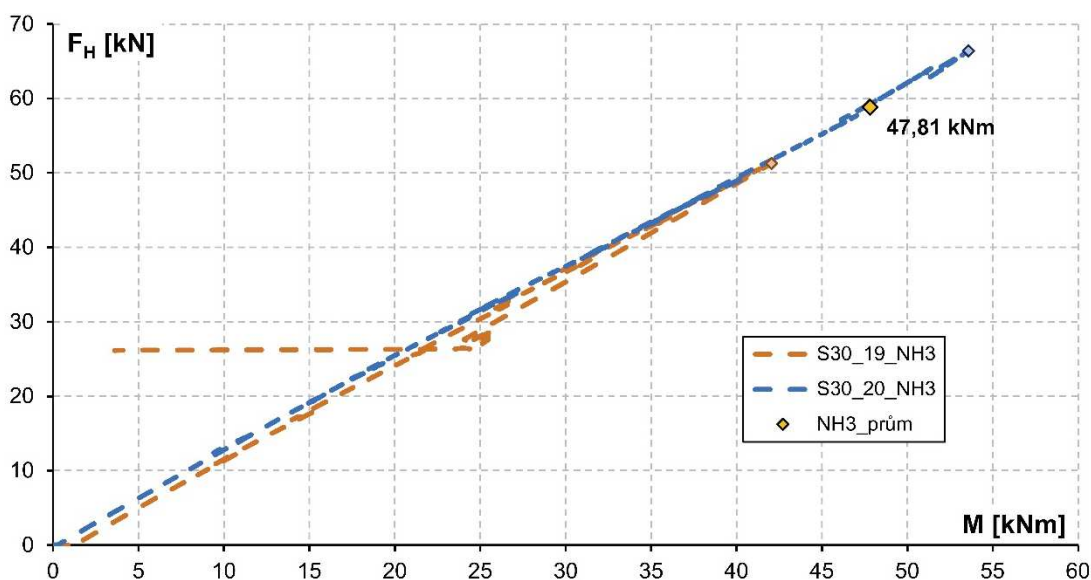
**graf 46** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 400$  kN



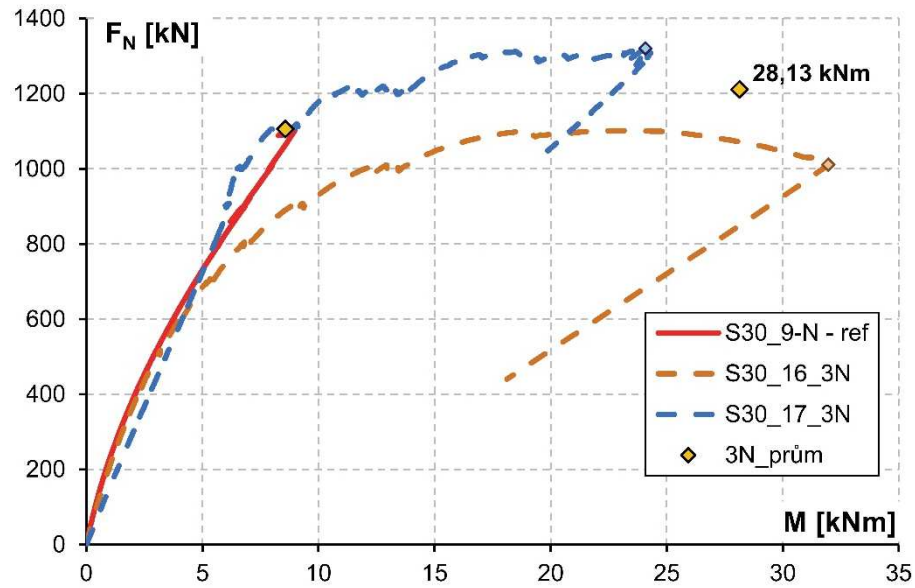
**graf 47** - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 400$  kN



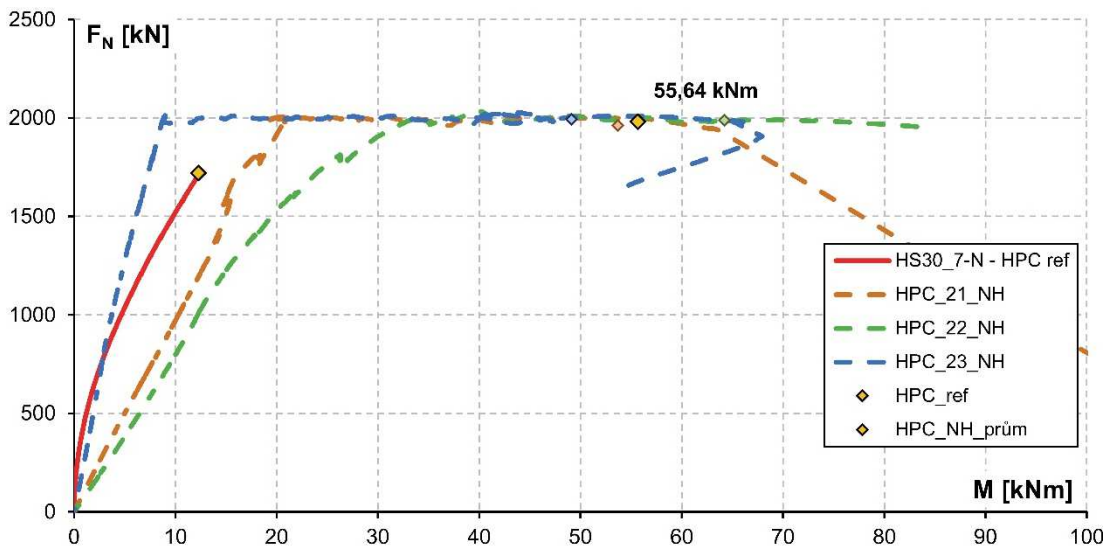
**graf 48** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 100$  kN



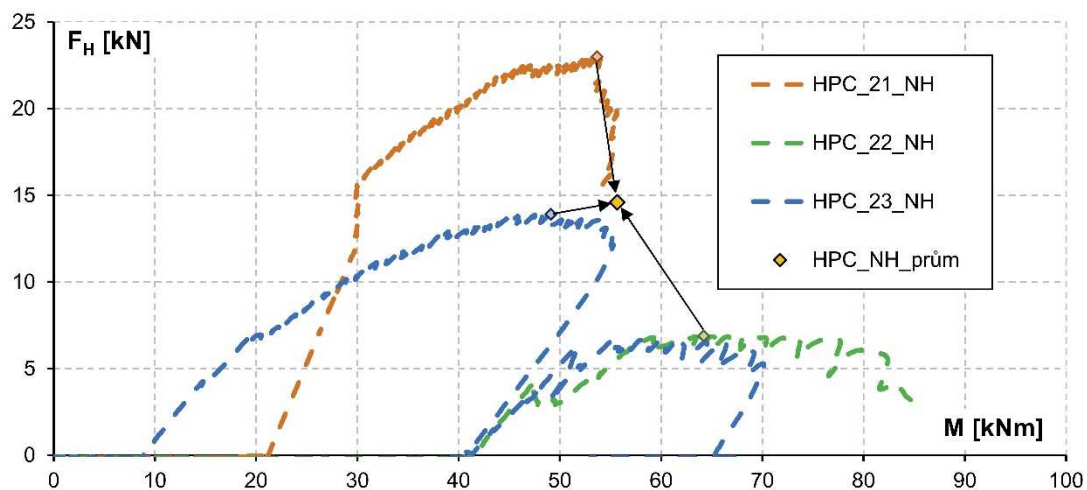
**graf 49** - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro  $F_N = 400$  kN



**graf 50** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny



**graf 51** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny pro  $F_N = 2000$  kN



**graf 52** - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny pro  $F_N = 2000$  kN

## LITERATURA

- [1] Claeson, Ch.: „*Finite element analysis of confined concrete columns*“. 1996. Göteborg, Sweden
- [2] Gere, M. J.; Timoshenko, P. J.: „*Mechanics of materials*“, 1997, 4th ed. Boston: PWS Pub Co. ISBN 0-53495-102-3
- [3] Xiao, Y.; Wu, H.: „*Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets*“, *Journal of Materials in civil engineering*, 2000, Vol. 12(2), p. 139-146
- [4] Setunge, S.: „*Review of strengthening using externally bonded Fiber Reinforced Polymed Composites*“, Melbourne: CRC Construction Innovation, 2002, 59 s
- [5] De Paula, R. F.; da Silva, M. G.: „*Sharp edge effects on FRP confinement of RC square columns, 3rd International Conference on Composites in Infrastructure*“, ICCI 2002
- [6] Lam, L.; Teng, J. G.: „*Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete*“, *Construction and Building Materials*, 2003, 17 (6-7), p. 471-489. Doi: 10.1016/S0950-0618(03)00045-X. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006180300045X>
- [7] Li, J.; Hadi, M. N. S.: „*Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading*“. *Composite Structures*. 2003, 62 (2), p. 145-153. Doi: 10.1016/S0263-8223(03)00109-0. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822303001090>
- [8] Bank, L. C.: „*Composites for construction: Structural design with FRP materials*“, 2006, Hoboken, New Jersey, USA. ISBN 978-0471-68126-7
- [9] Matthys, S.; Toujani, J.; Taerwe, L.: „*Stress-strain behavior of large-scale circular columns confined with FRP composites*“, *Journal of Structural engineering*, 2006, Vol. 1(132), p. 13-133
- [10] Megalooikonomou, K. G.: „*Modelling of FRP-confinement of rectangular RC sections*“. 2007. Dissertation of Rose School
- [11] Campione, G.; Fossetti, M.: „*Compressive behaviour of concrete elliptical columns confined by single hoops*“. *Engineering Structures*, 2007, 29 (3), p. 408-417. Doi:

- 10.1016/j.engstruct.2006.05.006. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029606002100>
- [12] Wang, L.-M.; Wu, Y.-F.: „*Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test*“, Engineering Structures, 2008, Vol. 30(2), p. 493-505. Doi: 10.1016/j.engstruct.2007.04.016
- [13] Hollaway, L. C.; Teng, J. G.: „*Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites*“, 2008, Cambridge, GB, Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1845-69448-7
- [14] Ho, J. C. M.; Lam, J. Y. K.; Kwan, A. K. H.: „*Effectiveness of adding confinement for ductility improvement of high-strength concrete columns*“, Engineering Structures, 2010, Vol. 32(3), p. 714-725. Doi: 10.1016/j.engstruct.2009.11.017
- [15] Zhang, D. J.; Wang, Y. F.; Ma, Y. S.: „*Compressive behaviour of FRP-confined square concrete columns after creep*“. Engineering Structures, 2010, 32 (8), p. 1957-1963. Doi: 10.1016/j.engstruct.2010.02.023. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029610000763>
- [16] Gajdošová, K.; Bilčík, J.: „*Slender reinforced concrete columns strengthened with fibre reinforced polymers*“. Slovak Journal of Civil Engineering. 2011-01-1, XIX (2). Doi: 10.2478/v10189-011-0010-3. ISSN 1210-3896. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/sjce.2011.xix.issue-2/v10189-011-0010-3/v10189-011-0010-3.xml>
- [17] Hernández, H.; Jara, J. M.; Jara, M.: „*Revision of constitutive models for repairing bridge columns with fiber polymers*“, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2011, Volume 3, No 4
- [18] Li, S. Q.; Chen, J. F.; Bisby, L. A.; Hu, Y. M.; Teng, J. G.: „*Strain efficiency of FRP jackets in FRP-Confined concrete-filled circular steel tubes*“. International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2012, 12 (01), p. 75-94. Doi: 10.1142/S0219455412004574. ISSN 0219-4554. Dostupné z: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219455412004574>
- [19] Yazici, V.; Hadi, N. S. M.: „*Normalized Confinement Stiffness Approach for Modeling FRP-Confined Concrete*“. Journal of Composites for Construction. 2012, 16 (5), p.



- 520-528. Doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000283. ISSN 1090-0268. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000283>
- [20] Ozbakkaloglu T.; Jian C., Lim; Vincent, T.: „*FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models*”, Engineering Structures, April, 2013, Volume 49, pages 1068-1088
- [21] Benzaid, R.; Mesbah, H.-A.: „*Circular and Square Concrete Columns Externally Confined by CFRP Composite: Experimental Investigation and Effective Strength Models*“, Fiber Reinforced Polymers – The Technology Applied for Concrete Repair. InTech, 2013. Doi: 10.5772/51589. ISBN 978-953-51-0938-9. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/fiber-reinforced-polymers-the-technology-applied-for-concrete-repair/circular-and-square-concrete-columns-externally-confined-by-cfrp-composite-experimental-investigatio>
- [22] Colajanni, P.; Papia, M.; Spinella, N.: „*Stress-Strain Law for Confined Concrete with Hardening or Softening Behavior*“, Advances in Civil Engineering, 2013, p. 1-11. Doi: 10.1155/2013/804904. ISSN 1687-8086. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/ace/2013/804904/>
- [23] Lignola, G. P.; Giamundo, V.; Prota, A.; Manfredi, G.: „*FRP Wrapping of RC Members under Combined Axial Load and Bending*“. FRPRCS-11. 2013. UM Guimarães, Portugal. ISBN 978-97286-9-284-1
- [24] Jiang, T.; Teng, J. G.: „*Behavior and Design of Slender FRP-Confined Circular RC Columns*“. Journal of Composites for Construction. 2013, 17 (4), p. 443-453. Doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000333. ISSN 1090-0268. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000333>
- [25] Bhandari, D.; Thapa, B. T.: „*Constitutive modeling of FRP confined concrete from damage mechanics*“, 2014, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN 978-3-659-62015-7
- [26] Saravanan, J.; Sugura, K.; Raghunath, P. N.: „*Slenderness effect on high strength concrete columns confined with GFRP wraps*“. Indian Journal of Engineering & Materials Science. 2014, 21, p. 67-74. ISSN: 0971-4588
- [27] Zoghi, M.: „*The international handbook of FRP composites in civil engineering*“. 2014. ISBN 978-0-84932-013-2

- [28] Dhand, V.; Mittal, G.; Rhee, K. Y.; Park, S.-J.; Hui, D.: „*A short review on basalt fiber reinforced polymer composites*“. *Composites Part B: Engineering*. 2015, 73, p. 166-180. Doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836814005873>
- [29] Jiang, J. F.; Wu, Y. F.: „*Plasticity-based criterion for confinement design of FRP jacketed concrete columns*“, *Materials and Structures*, 2016, 49 (6), p. 2035-2051. Doi: 10.1617/s11527-015-0632-4. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0632-4>
- [30] Youcef, S. Y.; Amziane, S.; Chemrouk, M.: „*Effectiveness of strengthening by CFRP on behavior of reinforced concrete columns with respect to the buckling instability*“. *Materials and Structures*. 2015, 48 (1-2), p. 35-51. Doi: 10.1617/s11527-013-0166-6. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0166-6>
- [31] Červenka, V.; Červenka, J.: „*Atena Program Documentation, Part 2-2 – User Manual for ATENA 3D*“. Červenka Consulting, Praha, 2015
- [32] Yin, P.; Huang, L.; Yan, L.; Zhu, D.: „*Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement. Part A: experimental study*“, *Materials and Structures*, 2016, Vol. 49(3), p. 1001-1011. Doi: 10.1617/s11527-015-0554-1. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0554-1>
- [33] Cao, Y. G.; Jiang, Ch.; Wu, Y. F.: „*Cross-sectional unification on the stress-strain model of concrete subjected to high passive confinement by Fiber-Reinforced Polymer*“, *Polymers* 2016, 2016, Vol. 8(186). Doi:10.3390/polym8050186
- [34] Červenka, V.; Jendele, L.; Červenka, J.: „*Atena Program Documentation, Part 1 – ATENA Theory*“. Červenka Consulting, Praha, 2016
- [35] Němec, I.: „*Nelineární mechanika – základy nelineární mechaniky*“. Studijní opory (modul 0D7 – M01), FAST VUT v Brně, Brno, 2006
- [36] *ACI 440.2R-02: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440, 2002. ISBN 0-87031-088-7

- [37] *ACI 440.3R-04 Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*, ACI Committee 440, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2004, USA. ISBN 0-87031-162-X
- [38] *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440, 2008, USA. ISBN 978-0-87031-285-4
- [39] *CEB-FIP model code 1990: design code*. CEB Bulletin No. 213/214. London: T. Telford, 1993, 460. ISBN 978-0-7277-1696-5
- [40] *CRN-DT 200/2004: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*, Advisory Committee on technical recommendations for construction, 2004, Italy
- [41] *CSA Standart S806-12 - Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*, Canadian Standards Association, 2012, 206. Ontario, Kanada. ISBN 978-1-55491-931-4
- [42] *ČSN 73 1201 Navrhování betonových konstrukcí, 1988*
- [43] *ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006*
- [44] *ČSN EN 12390-3 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, 2009*
- [45] *ČSN ISO 1920-10 (73 1319) Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, 2014*
- [46] *FIB Bulletin no. 14, „Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FBR EBR) for reinforced concrete structures“*, International Federation for Structural Concrete, 2001, Lausanne, Switzerland. ISBN 2-88394-054-1
- [47] *FIB Bulletin no. 40, „FRP reinforcement in RC structures“*, International federation for structural concrete, 2007, Lausanne, Switzerland. ISBN 978-2-88394-080-2
- [48] International Federation For Structural Concrete Fib. *„Model Code 2010: first complete draft“*. Lausanne, Switzerland: Fédération internationale du béton, 2010, 312. ISBN 978-2-88394-095-6

- [49] ISIS Canada Educational Module No. 4: *An Introduction to FRP-Strengthening of Concrete Structures*, 2004, ISIS Canada Education Committee, Kanada
- [50] Technický list produktu kompozitní tkaniny SikaWrap – 600 C/120, výrobce SikaCZ, s.r.o. Dostupné z: [cze.sika.com/dms/getdocument.get/6b2257ec-4d38-3492-bf05-e18573d8b1e5/SikaWrap%20600%20C120.pdf](http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/6b2257ec-4d38-3492-bf05-e18573d8b1e5/SikaWrap%20600%20C120.pdf)
- [51] Technický list produktu dvou komponentní epoxidové pryskyřice Sikadur 300, výrobce SikaCZ, s.r.o. Dostupné z: [http://cze.sika.com/cs/produkty\\_a\\_reseni/dokumentace/PDS/PDS\\_G\\_Sika\\_Wrap.html](http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/dokumentace/PDS/PDS_G_Sika_Wrap.html)
- [52] Technický list produktu dvou komponentní tixotropní lepicí hmoty Sikadur 30, výrobce SikaCZ, s.r.o. Dostupné z: [cze.sika.com/dms/getdocument.get/44712157-51d3-3a7e-895a-2125795a3cfe/Sikadur-30%20CE.pdf](http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/44712157-51d3-3a7e-895a-2125795a3cfe/Sikadur-30%20CE.pdf)

## POUŽITÝ SOFTWARE

- [53] ATENA 3D, verze 5.3.4, CERVENKA CONSULTING, Coporight© 1992-2016, Nelineární analýza betonových a železobetonových konstrukcí metodou konečných prvků
- [54] Autocad® 2008, 1982-2016 Autodesk, Inc. CAD systém pro tvorbu technické dokumentace

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- obrázek 1** - Idealizovaný pracovní diagram jednotlivých komponent kompozitu: vláken (vlevo) a matrice (vpravo); [13], [40], [46]..... 20
- obrázek 2** - Znázornění typů tkaniny (idealizace → reálné provedení) ..... 21
- obrázek 3** - Jednosměrné uspořádání vláken v ortotropní vrstvě, resp. vlákně se zobrazením hlavních os: podélná osa – 1 (L) a příčné osy 2 (T) a 3 (T) ..... 23
- obrázek 4** - Vliv úhlu výslednice namáhání a orientace vláken tkaniny na tahové charakteristiky laminátu [47] ..... 25
- obrázek 5** - Idealizovaný pracovní diagram FRP kompozitu a jeho jednotlivých složek ([13], [40], [47]) ..... 25
- obrázek 6** - Vývoj dotvarování FRP materiálů v závislosti na čase (převzato z [47]) ..... 26
- obrázek 7** - Způsoby zesílení sloupů pomocí FRP materiálů ..... 31
- obrázek 8** - Pracovní diagram ovinutého betonu s tahovým zpevněním, [38] ..... 33
- obrázek 9** - Princip působení ovinutí – příčný tlak ..... 35

<b>obrázek 10</b> - Trojosý stav napjatosti fragmentu FRP tkaniny při ovinutí.....	37
<b>obrázek 11</b> - Závislost účinnosti ovinutí na způsobu zesílení – plnoplošné a lokální ovinutí. .....	39
<b>obrázek 12</b> - Pracovní diagram a) lineárně pružný křehký materiál; b) duktilní materiál ...	41
<b>obrázek 13</b> - Rozdíl v disipované energii křehkého a duktilního materiálu .....	41
<b>obrázek 14</b> - Rozložení příčného napětí v závislosti na tvaru průřezu sloupu .....	42
<b>obrázek 15</b> - Pracovní diagramy ovinutých sloupů s vlivem tvaru průřezu (převzato z [5]) znázorňující pevnost betonu v tlaku v závislosti na osovém přetvoření.....	43
<b>obrázek 16</b> - Vliv štíhlosti sloupu: a) masivní prvek b) štíhlý prvek vč. ohybového momentu od účinků II. řádu.....	44
<b>obrázek 17</b> - Porovnání pracovních diagramů ovinutého betonu (ocelí; FRP tkaninou) [20] .....	46
<b>obrázek 18</b> - Porovnání pracovních diagramů: a) I. typ – parabolický; b) II. Typ – bilineární .....	51
<b>obrázek 19</b> - Porovnání pracovních diagramů III. typu (převzato z [20]) .....	53
<b>obrázek 20</b> - Analyticky-orientovaný model pracovního diagramu ovinutého betonu řešený pomocí přírůstkové metody .....	54
<b>obrázek 21</b> - Porovnání parabolicko-rektangulárních pracovních diagramů neovinitého a ovinutého betonu dle [43] .....	56
<b>obrázek 22</b> - Zkušební vzorek laminované FRP tkaniny a) schéma vzorku; b) reálné provedení sada I. a III.; c) reálné provedení sada II. ....	65
<b>obrázek 23</b> - Zatěžovací zkouška laminátu FRP tkaniny a) provedení zkoušky; b) žádoucí porušení vzorku přetržením; c) nežádoucí selhání vzorku delaminací.....	66
<b>obrázek 24</b> - Zkušební vzorky z prostého betonu - vyšší vzorky tvoří sérii T, nižší pak sérii K .....	70
<b>obrázek 25</b> - Vzorky z prostého betonu a) odbednění; b) výsledný zdrsňený povrch.....	70
<b>obrázek 26</b> - Schématické znázornění postupu zesílení prvku ovinutím FRP tkaninou při využití tzv. mokrého způsobu aplikace .....	71
<b>obrázek 27</b> - Vzorky z prostého betonu a) poloha tenzometrů na povrch betonu; b) zesílení ovinitím včetně osazení tenzomteru na povrchu FRP tkaniny .....	72
<b>obrázek 28</b> - Zatěžovací zkouška sloupů z prostého betonu a) schématické znázornění; b) reálné provedení zkoušky .....	72

<b>obrázek 29</b> - Způsob porušení krátkého sloupu z prostého betonu a) nezesílený vzorek; b) vzorek zesílený ovinutím laminátem kompozitní tkaniny .....	73
<b>obrázek 30</b> - Geometrie a vyztužení zkušební vzorku železobetonového sloupu.....	78
<b>obrázek 31</b> - Zatěžovací zkouška krátkých železobetonových sloupů a) schématické znázornění; b) reálné provedení zkoušky.....	79
<b>obrázek 32</b> - Referenční vzorek krátkého železobetonového sloupu a) příprava vzorku; b) způsob porušení .....	80
<b>obrázek 33</b> - Způsob porušení zesílených vzorků krátkých železobetonových sloupů .....	80
<b>obrázek 34</b> - Geometrie, vyztužení a režimy zatěžování zkušební vzorku vysokého železobetonového sloupu .....	84
<b>obrázek 35</b> - Výroba zkušebních vzorků – a) vyztužení sloupů; b) osazení tenzometrů na výztuži .....	85
<b>obrázek 36</b> - Výroba zkušebních vzorků – pohled na papírové bednění včetně umístění armokoše .....	85
<b>obrázek 37</b> - Výroba zkušebních vzorků – a) odbednění; b) pohled na vyrobené vzorky... 86	
<b>obrázek 38</b> - Zesílení zkušebních vzorků – a) osazení tenzometrů na povrchu betonu; b) příprava povrchu – zapravení kaveren a nerovností vlivem tenzometrů; c) zesílení tkaninou .....	86
<b>obrázek 39</b> - Zatěžovací zkouška – a) schematické provedení; b) reálné provedení .....	87
<b>obrázek 40</b> - Referenční vzorek – a) režim zatěžování; b) porušení vzorku; c) detail porušení .....	94
<b>obrázek 41</b> - Ovinutý vzorek (S30_18_NH2) – a) režim zatěžování; b) typické porušení vzorku zesíleného příčnou tkaninou při ohybovém namáhání; c) typické porušení vzorku s příčnou i podélnou vrstvou tkaniny .....	95
<b>obrázek 42</b> - Interakční diagram znázorňující chování sloupu .....	101
<b>obrázek 43</b> - Schéma výpočtu charakteristických bodů interakčního diagramu .....	102
<b>obrázek 44</b> - Princip výpočtu tlačené části betonového průřezu .....	105
<b>obrázek 45</b> - Princip stanovení únosnosti průřezu.....	107
<b>obrázek 46</b> - Jednoosý konstitutivní zákon pro beton použitý v programu ATENA (dle [34]) .....	140
<b>obrázek 47</b> - Fáze vzniku a rozvoje trhlin v programu ATENA (dle [34]) .....	140
<b>obrázek 48</b> - Model 2D kontaktu (dle [34]).....	142

<b>obrázek 49</b> - Principy metod a) plné Newton-Raphson; b) modifikované Newton-Raphson (dle [34]).....	144
<b>obrázek 50</b> - Numerický model krátkého sloupu: a) dělení na makroprvky; b) generace sítě konečných prvků; c) způsob podepření a zatížení; d) vyztužení prvku; e) simulace ovinutí tkaninou; f) nulový makroprvek pro uložení výztuže simulující ovinutí.....	150
<b>obrázek 51</b> - Průběh napětí: a) v příčné výztuži simulující ovinutí; b) v ovinutém betonu.....	152
<b>obrázek 52</b> - Režimy zatížení na excentricitě: a) $e = 0$ mm; b) $e = 5$ mm; c) $e = 10$ mm; d) $e = 50$ mm; e) $e = 100$ mm.....	154
<b>obrázek 53</b> - Porušení průřezu v jednotlivých režimech zatěžování – zobrazení trhlin.....	155

## SEZNAM GRAFŮ

<b>graf 1</b> - Závislost tlakové síly na příčné (obvodové) deformaci krátkých sloupů z prostého betonu.....	75
<b>graf 2</b> - Přetvoření FRP tkaniny a betonu v příčném směru (obvodové přetvoření).....	77
<b>graf 3</b> - Pracovní diagram krátkých referenčních a ovinutých železobetonových sloupů ...	81
<b>graf 4</b> - Únosnost zkušebních vzorků zesílených jednou příčnou vrstvou tkaniny v různých režimech zatěžování.....	90
<b>graf 5</b> - Přetvoření zkušebních vzorků v podélném i příčném směru ve dvou úrovních.....	90
<b>graf 6</b> - Interakční diagram neovinutého a ovinutého vzorku krátkého sloupu dle [43]....	108
<b>graf 7</b> - Porovnání zahrnutí vlivu součinitele účinnosti ovinutí $k_e$ .....	109
<b>graf 8</b> - Porovnání vlivu počtu tkanin na výsledný efekt ovinutí.....	110
<b>graf 9</b> - Porovnání vlivu tkaniny působící v obou směrech.....	111
<b>graf 10</b> - Porovnání jednotlivých přístupů ke stanovení únosnosti ovinutého sloupu.....	112
<b>graf 11</b> - Porovnání jednotlivých přístupů ke stanovení únosnosti ovinutého sloupu se zavedením redukčního součinitele $k_e$ .....	113
<b>graf 12</b> - Pracovní diagram ovinutého betonu dle ČSN EN 1992-1-1 [43].....	114
<b>graf 13</b> - Četnost a normální rozdělení součinitele efektivnosti ovinutí $k_e$ .....	123
<b>graf 14</b> - Četnost a normální rozdělení součinitele $k_e$ v závislosti na počtu vrstev FRP tkaniny: a) 1 vrstva; b) 2 vrstvy; c) 3 vrstvy.....	124
<b>graf 15</b> - Normální rozdělení součinitele $k_e$ zohledňující počet vrstev FRP tkaniny.....	125

<b>graf 16</b> - Četnost a normální rozdělení účinnosti ovinutí v závislosti na pevnosti betonu $f_{co}$	125
<b>graf 17</b> - Četnost a normální rozdělení účinnosti ovinutí vyjádřené poměrem $f_{cc}/f_{co}$ v závislosti na: a) průměru prvku do 130 mm; b) průměru prvku v intervalu 130 – 190 mm	126
<b>graf 18</b> - Regresní analýza experimentálních prací – a) lineární aproximace; b) aproximace mocninnou funkcí	128
<b>graf 19</b> - Porovnání výstižnosti predikce pevnosti ovinutého betonu v tlaku dle uvedených směrnic	129
<b>graf 20</b> - Navržený model pro výpočet pevnosti ovinutého betonu v tlaku	129
<b>graf 21</b> - Únosnost ovinutého sloupu stanovená podle navrženého modelu	130
<b>graf 22</b> - Závislost příčného tlaku $f_t$ na štíhlosti prvku $\lambda$	133
<b>graf 23</b> - Závislosti únosnosti průřezu ovinutého sloupu na štíhlosti prvku $\lambda$	134
<b>graf 24</b> - Princip zohlednění vlivu štíhlosti na únosnost ovinutého sloupu	135
<b>graf 25</b> - Závislost účinnosti ovinutím FRP tkaninou na štíhlosti prvku	136
<b>graf 26</b> - Redukce příčného tlaku $f_t^*$ vlivem štíhlosti prvku	136
<b>graf 27</b> - Porovnání přístupů modelování zesílení ovinutím FRP tkaninou	148
<b>graf 28</b> - Matematický model krátkého vzorku z prostého betonu	151
<b>graf 29</b> - Matematický model krátkého vzorku ze železobetonu	152
<b>graf 30</b> - Matematický model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv počtu tkanin	154
<b>graf 31</b> - Model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv podélně orientované FRP tkaniny	156
<b>graf 32</b> - Model vysokého sloupu ze železobetonu – vliv pevnosti neovinutého betonu	157
<b>graf 33</b> - Porovnání chování krátkých sloupů ze železobetonu ovinutých FRP tkaninou	161
<b>graf 34</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu ovinutého jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny	164
<b>graf 35</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny	165
<b>graf 36</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu ovinutého třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny	167



<b>graf 37</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny .....	168
<b>graf 38</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou .....	170
<b>graf 39</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu zesíleného ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou.....	171
<b>graf 40</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a numerickou simulací predikovaného chování vysokého sloupu z vysokopevnostního betonu zesíleného ovinutím FRP tkaninou .....	173
<b>graf 41</b> - Porovnání experimentálně zjištěného a analytickou studií predikovaného chování vysokého sloupu z vysokopevnostního betonu zesíleného ovinutím FRP tkaninou .....	174
<b>graf 42</b> - Pracovní diagram betonářské oceli třídy B 500.....	185
<b>graf 43</b> - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím jednou vrstvou příčně orientované FRP tkaniny .....	185
<b>graf 44</b> - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 800$ kN .....	186
<b>graf 45</b> - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 800$ kN.....	186
<b>graf 46</b> - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 400$ kN .....	187
<b>graf 47</b> - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 400$ kN.....	187
<b>graf 48</b> - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 100$ kN .....	188
<b>graf 49</b> - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím obousměrně působící FRP tkaninou pro $F_N = 400$ kN.....	188
<b>graf 50</b> - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny .....	189

- graf 51** - Závislost normálové tlakové síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny pro  $F_N = 2000$  kN ..... 189
- graf 52** - Závislost horizontální síly a ohybové únosnosti vzorků vysokých sloupů zesílených ovinutím třemi vrstvami příčně orientované FRP tkaniny pro  $F_N = 2000$  kN ... 190

## SEZNAM TABULEK

<b>tabulka 1</b> - Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken (převzato z [13], [39], [47]) .....	18
<b>tabulka 2</b> - Mechanické vlastnosti vybraných termosetových matric (převzato z [46], [47]) .....	20
<b>tabulka 3</b> - Vlastnosti vyráběných FRP tkanin .....	29
<b>tabulka 4</b> - Přehled vybraných přístupů pro stanovení charakteristik ovinutého betonu .....	59
<b>tabulka 5</b> - Přístupy vybraných směrnic pro stanovení charakteristik ovinutého betonu .....	60
<b>tabulka 6</b> - Výsledky tahové zkoušky laminované FRP tkaniny .....	66
<b>tabulka 7</b> - Mechanické vlastnosti laminátu CFRP tkaniny SikaWrap – 600 C/120 .....	67
<b>tabulka 8</b> - Vyhodnocení zkoušky krátkých sloupů z prostého betonu .....	74
<b>tabulka 9</b> - Materiálové charakteristiky betonu krátkých ovinutých sloupů .....	75
<b>tabulka 10</b> - Charakteristiky materiálů krátkých železobetonových sloupů .....	78
<b>tabulka 11</b> - Vyhodnocení zkoušky krátkých železobetonových sloupů .....	81
<b>tabulka 12</b> - Materiálové charakteristiky betonu vysokých železobetonových sloupů .....	85
<b>tabulka 13</b> - Konfigurace zkušebních vzorků vysokých sloupů .....	89
<b>tabulka 14</b> - Vyhodnocení zkoušky krátkých železobetonových sloupů .....	92
<b>tabulka 15</b> - Charakteristiky materiálů uvažovaných pro modelový případ .....	98
<b>tabulka 16</b> - Výsledné vlastnosti ovinutého betonu stanovené dle jednotlivých přístupů ...	99
<b>tabulka 17</b> - Výsledky zatěžovacích zkoušek sloupů ovinutých CFRP tkaninou (čerpáno např. z [18], [19], [29], [33]) .....	116
<b>tabulka 18</b> - Vstupní hodnoty matematického modelu ovinutých sloupů .....	149
<b>tabulka 19</b> - Výsledky numerických simulací sloupů ovinutých FRP tkaninou .....	158
<b>tabulka 20</b> - Porovnání výsledků krátkých sloupů z prostého betonu .....	160
<b>tabulka 21</b> - Porovnání výsledků krátkých sloupů ze železobetonu .....	162
<b>tabulka 22</b> - Porovnání výsledků vysokých sloupů ovinutých jednou vrstvou FRP tkaniny .....	166

<b>tabulka 23</b> - Porovnání výsledků vysokých sloupů zesílených třemi vrstvami FRP tkaniny	168
<b>tabulka 24</b> - Výsledků vysokých sloupů ovinutých obousměrně působící FRP tkaninou	172
<b>tabulka 25</b> - Porovnání výsledků vysokých sloupů z HPC betonu ovinutých FRP tkaninou	175

## SEZNAM ZKRATEK

$a$	<i>výška tlačené části průřezu za předpokladu rovnoměrného rozdělení napětí (<math>a = \lambda x</math>)</i>
$A_c$	<i>průřezová plocha betonu</i>
$A_{cc}$	<i>tlačené plocha betonového průřezu</i>
$A_e$	<i>účinně ovinutá plocha průřezu</i>
$A_{ef}$	<i>účinně ovinutá plocha průřezu mezi dvěma pásy tkaniny</i>
$A_s$	<i>plocha výztuže</i>
$A_{si}$	<i>plocha <math>i</math>-té vrstvy výztuže</i>
$b$	<i>délka oblouku kruhové úseče</i>
$b, h$	<i>rozměry průřezu, šířka/výška</i>
$b', h'$	<i>rozměry neúčinně ovinuté plochy, šířka/výška</i>
$b_f$	<i>šířka pásu zesilujícího laminátu tkaniny</i>
$c_1, c_2$	<i>kalibrační konstanty vztahů pro výpočet vlastností ovinutého betonu</i>
$C_E$	<i>součinitel vlivu okolního prostředí</i>
$d'_{si}$	<i>poloha vrstvy výztuže vztažena ke spodním vláknům průřezu</i>
$d_{si}$	<i>účinná výška dané vrstvy výztuže</i>
$D, D_{sl}$	<i>průměr prvku</i>
$e_2$	<i>deformace způsobená účinky II. řádu (excentricita II. řádu)</i>
$E_c$	<i>modul pružnosti betonu (neovinutého)</i>
$E_f, E_{fl}, E_l$	<i>modul pružnosti vláken v podélném směru, resp. laminované tkaniny ve směru vláken</i>
$E_i$	<i>modul pružnosti materiálu v definovaném směru</i>
$E_m$	<i>modul pružnosti matrice (izotropní materiál)</i>
$f_l$	<i>příčný tlak (přítlak působící po obvodu zesilovaného prvku)</i>

---

$f_c, f_{co}$	pevnost betonu v tlaku (neovinutého)
$f_{cc}$	pevnost ovinutého betonu v tlaku
$f_{cc,ocel}, f_{cc,FRP}$	tlaková pevnost betonu ovinutého ocelí, resp. FRP tkaninou
$f_{ck}$	charakteristická pevnost betonu v tlaku (neovinutého)
$f_{ck,c}$	charakteristická pevnost ovinutého betonu v tlaku
$f_{ft}$	tahová pevnost nosných vláken v podélném směru
$f_i$	pevnost betonu charakterizující přechodový bod (přechod mezi neovinutých a ovinutým betonem)
$f_i$	tahová pevnost laminované tkaniny ve směru vláken
$F_c, F_{cc}$	výslednice síly tlačené části betonového průřezu
$F_H$	posouvající síla (horizontální směr působení)
$F_{H,max}$	maximální posouvající síla (horizontální směr působení)
$F_N$	normálová síla (vertikální směr působení)
$F_{N,max}$	maximální normálová síla (vertikální směr působení - tlak)
$F_{N,odp}$	normálová síla (vertikální směr působení - tlak) při dosažení maximální horizontální síly
$F_{si}$	výslednice síly dané vrstvy výztuže
$G_{f12}$	modul pružnosti ve smyku v příčném směru vlákna
$G_m$	modul pružnosti matrice ve smyku
$h$	výška oblouku kruhové úseče
$k$	sklon šroubovice
$k_c$	koeficient tvaru průřezu zesilovaného prvku
$k_e, k_{eff}, k_e$	součinitel účinnosti ovinutí
$k_k$	koeficient ovinutí
$K_{konf}$	tuhost zesílení (tuhost ovinutí)
$k_1$	koeficient zvýšení osové pevnosti ovinutého betonu
$k_2$	koeficient osového přetvoření ovinutého betonu
$N_{bal}, N_{Rd,bal}$	tlaková síla udávající rozhraní mezi tlakovým a tahovým porušením průřezu
$N_{Ed}$	normálová síla, normálové zatížení
$N_f$	maximální tahová síla dosažená při zkoušce laminátu tkaniny
$N_R, M_R$	normálová, resp. ohybová únosnost prvku
$M_{odp}$	ohybová únosnost při dosažení maximální horizontální síly $F_{H,max}$
$M_2$	ohybový moment od účinků II. řádu

---

$p$	<i>stoupání šroubovice;</i>
$r$	<i>poloměr prvku</i>
$R$	<i>poloměr zakřivení zesilující vrstvy tkaniny v důsledku ovinutí</i>
$s$	<i>délka tětiny kruhové úseče; osová vzdálenost zesilujících pásů laminované tkaniny</i>
$s'$	<i>světla vzdálenost mezi zesilujícími pásy tkaniny</i>
$s_x$	<i>směrodatná odchylka</i>
$t, t_f, t_{fl}$	<i>tloušťka tkaniny (suchého vlákna), tloušťka laminované vrstvy tkaniny</i>
$T_g$	<i>teplota skelného přechodu</i>
$V_f$	<i>objemový podíl vláken vztažený k objemu kompozitu</i>
$x$	<i>poloha neutrálné osy</i>
$x_{stř, odp}$	<i>vodorovná deformace uprostřed výšky prvku po odečtení deformací v uložení prvku při</i>
$y$	<i>vzdálenost těžiště tlačené části průřezu od těžiště průřezu</i>
$z_c, z_{si}$	<i>rameno vnitřních sil (tlačeného betonu, výztuže) vztažené k těžišti průřezu</i>
$\alpha$	<i>středový úhel kruhové úseče</i>
$\alpha_{pc}$	<i>koeficient účinnosti zohledňující vliv pevnosti betonu, typ FRP tkaniny a velikost prvku</i>
$\beta$	<i>efektivní součinitel přetvoření tkaniny</i>
$\varepsilon_{l, max}$	<i>limitní přetvoření laminované tkaniny udané výrobcem</i>
$\varepsilon_c, \varepsilon_{co}$	<i>poměrné přetvoření betonu (neovinutého)</i>
$\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}$	<i>poměrné přetvoření betonu (neovinutého) při dosažení maximální pevnosti</i>
$\varepsilon_{cc,i}, \varepsilon_{c2,c}$	<i>poměrné přetvoření ovinutého betonu při dosažení maximální pevnosti</i>
$\varepsilon_{cc, ocel}, \varepsilon_{cc, FRP}$	<i>mezí poměrné přetvoření betonu ovinutého oceli, resp. ovinutého FRP tkaninou</i>
$\varepsilon_{cu}$	<i>mezí poměrné přetvoření betonu (neovinutého)</i>
$\varepsilon_{cu2,c}, \varepsilon_{ccu}$	<i>mezí poměrné přetvoření ovinutého betonu</i>
$\varepsilon_f, \varepsilon_{FRP}$	<i>přetvoření vlákna či FRP kompozitu, resp. limitní přetvoření laminované tkaniny při přetržení získané z tahových zkoušek</i>
$\varepsilon_{fe}$	<i>redukováná hodnota přetvoření laminované tkaniny při přetržení</i>
$\varepsilon_{f1, rup}, \varepsilon_{fu}$	<i>mezí přetvoření při přetržení (laminátu, tkaniny, vlákna)</i>
$\varepsilon_{h, rup}$	<i>přetvoření při přetržení laminované tkaniny (měřeno na ovinutých vzorcích)</i>
$\varepsilon_{max}, \varepsilon_{l, max}$	<i>poměrné přetvoření při porušení</i>
$\varepsilon_{si}$	<i>poměrné přetvoření dané vrstvy výztuže</i>
$\varepsilon_t$	<i>mezí poměrné přetvoření charakterizující přechodový bod (přechod mezi neovinutým a ovinutým betonem)</i>
$\varepsilon_{yd}$	<i>poměrné přetvoření dané vrstvy výztuže odpovídající napětí na mezi kluzu</i>
$\varepsilon_{z, odp}$	<i>poměrné přetvoření v definovaném směru při dosažení maximální únosnosti prvku</i>

---

$\kappa_a$	<i>součinitel vlivu tvaru průřezu pro určení pevnosti ovinutého betonu v tlaku</i>
$\kappa_b$	<i>součinitel vlivu tvaru průřezu pro určení přetvoření ovinutého betonu</i>
$\mu_{tu}$	<i>průměrná hodnota stupně dilatace ovinutého betonu</i>
$\rho_s, \rho_f$	<i>stupeň vyztužení betonářskou výztuží, resp. zesilující vrstvou</i>
$\sigma$	<i>napětí</i>
$\sigma_{l,max}, \sigma_{fu}, f_{fu}$	<i>tahová pevnost laminátu ve směru vláken</i>
$\sigma_{ld}$	<i>návrhová hodnota tahové pevnosti laminované tkaniny</i>
$\sigma_{fl}$	<i>tahová pevnost vlákna v podélném směru</i>
$\sigma_i$	<i>normálové napětí definovaného směru</i>
$\sigma_l$	<i>příčné napětí působící po obvodu prvku – přítlak (hlavní radiální napětí)</i>
$\sigma_{max}$	<i>maximální pevnost</i>
$\sigma_\theta$	<i>hlavní obvodové napětí</i>
$\nu_i$	<i>Poissonovo číslo vyjadřující podíl poměrných deformací (Poissonův poměr, součinitel)</i>
$\emptyset$	<i>průměr</i>
$\psi_f$	<i>redukční faktor pevnosti FRP tkaniny</i>
$\Phi$	<i>redukční součinitel zohledňující způsob zesílení</i>
$\Phi_{FRP}$	<i>redukční součinitel zohledňující typ použitého materiálu</i>
$\omega_w$	<i>mechanický stupeň vyztužení, resp. objemový stupeň ovinutí</i>

## BIBLIOGRAFIE

### Publikované články

- [I.] Matušíková, A.; Rozehnalová, P.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Štěpánek, P.: „*An Engineering Heat and Mass Transport Model Utilized for Concrete at Fire*“. Key Engineering Materials (web), 2017, vol. 738, no. 58, p. 58-68. ISSN: 1662-9795
- [II.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Matušíková, A.; Daněk, P.; Štěpánek, P.: „*Stanovení smykové únosnosti kompozitní výztuže*“. In 23. Betonářské dny (2016) Sborník. Litomyšl: 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-906097-6-1
- [III.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Matušíková, A.; Štěpánek, P.: „*Experimental study of concrete columns strengthening by FRP fabric confinement*“. In CINPAR 2016 - XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation. Porto: FEUP, 2016. p. 1-13. ISBN: 978-972-752-203-3
- [IV.] Girgle, F.; Matušíková, A.; Bodnárová, L.; Kostiha, V.; Štěpánek, P.: „*Dlouhodobé vlastnosti nekovové výztuže určené do betonových konstrukcí*“. In Betonárske dni 2016 - Zborník prednášok. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. s. 211-216. ISBN: 978-80-227-4622-9
- [V.] Girgle, F.; Bodnárová, L.; Matušíková, A.; Kostiha, V.; Prokeš, J.; Januš, O.: „*Experimentální ověření dlouhodobých mechanických vlastností kompozitních výztuží vystavených alkalickému prostředí*“. In 13. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY - sborník příspěvků. SEKURKON s.r.o., 2016. s. 36-42. ISBN: 978-80-86604-70-1
- [VI.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Matušíková, A.; Štěpánek, P.: „*Strengthening of concrete structures by using modern composite materials - FRP fabric confinement*“. In CESB16 Central Europe Towards sustainable Building 2016 Innovations for sustainable Future. 1. Praha: Grada Publishing, a. s. for Czech Technical University in Prague as 6265. title, 2016. p. 797-804. ISBN: 978-80-271-0248-8
- [VII.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.; Matušíková, A.: „*Strengthening of short circular columns using FRP materials – determining the effect of confinement*“. Key Engineering Materials (print), 2016, vol. 691, no. -, p. 61-72. ISSN: 1013-9826
- [VIII.] Čairović, Đ.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Kadlec, J.; Štěpánek, P.: „*Comparison and review of concrete-to-concrete interface shear resistance according to major design codes*“. Solid State Phenomena, 2016, no. 249, p. 166-172. ISSN: 1662-9779

- [IX.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Čairović, D.; Štěpánek, P.: „*The Effectiveness of Strengthening of Reinforced Concrete Column Confined by FRP Wrapping*“. Solid State Phenomena, 2016, vol. 249, no. -, p. 284-289. ISSN: 1662-9779
- [X.] Štěpánek, P.; Šulák, P.; Šimůnek, P.; Kostiha, V.; Čairović, D.: „*Zesílení železobetonové desky pomocí výztuže FRP*“. In Sborník příspěvků z 9. seminára Sanácia betónových konštrukcií. Brno: Tribun EU, 2015. s. 131-136. ISBN: 978-80-263-0882-9
- [XI.] Čairović, D.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Kadlec, J.; Štěpánek, P.: „*Comparison and review of concrete-to-concrete interface shear resistance*“. In 22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference. Litomyšl: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. p. 1-6. ISBN: 978-80-906097-0-9
- [XII.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Čairović, D.; Štěpánek, P.: „*Účinnost zesílení železobetonového sloupu ovinutím FRP tkaninou*“. In 22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference. Litomyšl: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-906097-0-9
- [XIII.] Girgle, F.; Horák, D.; Kostiha, V.; Prokeš, J.; Štěpánek, P.: „*Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu*“. Materiály pro stavbu, 2015, roč. 20, č. 2, s. 30-33. ISSN: 1213-0311
- [XIV.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.; Kučerová, A.: „*Moderní metody zesilování sloupů pomocí FRP materiálů – stanovení účinku ovinutí*“. Beton TKS, 2014, roč. 14, č. 6, s. 56-62. ISSN: 1213-3116
- [XV.] Čairović, D.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Kadlec, J.; Štěpánek, P.: „*Konstrukční prvky z lehkého betonu vyztužené nekovovou kompozitní výztuží*“. In 21. BETONÁŘSKÉ DNY 2014 Sborník ke konferenci. Hradec Králové: 2014. s. 1-7. ISBN: 978-80-903806-7-7
- [XVI.] Girgle, F.; Kostiha, V.; Štěpánek, P.: „*Využití moderních kompozitních materiálů pro návrh odolných betonových konstrukcí*“. In Betonárske dni 2014 a 5. post kongresové kolokvium SNK fib. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2014. s. 179-184. ISBN: 978-80-8076-114-1
- [XVII.] Girgle, F.; Růžičková, J.; Daněk, P.; Štěpánek, P.; Kostiha, V.: „*Zatěžovací zkouška velkorozponové střešní konstrukce pavilonu D*“. In Sborník recenzovaných příspěvků, Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví. Brno: VUT v Brně, 2014. s. 81-92. ISBN: 978-80-214-5032-5



- [XVIII.] Girgle, F.; Kostiha, V.; Mansour, M.: „*Odolné konstrukce vyztužené nekovovou FRP výztuží*“. In Seminář FRP výztuže – Sborník. Brno: Ing. Václav Pokorný – LITERA BRNO, 2014. s. 91-97. ISBN: 978-80-214-4925-1
- [XIX.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Mansour, M.: „*Zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou*“. In Seminář FRP výztuže; Sborník. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 79-90. ISBN: 978-80-214-4925-1
- [XX.] Girgle, F.; Kostiha, V.; Prokeš, J.; Daněk, P.; Štěpánek, P.: „*Využití moderních kompozitních materiálů v reálných aplikačních oblastech*“. Beton TKS, 2014, roč. 14, č. 2, s. 66-71. ISSN: 1213-3116
- [XXI.] Kostiha, V.: „*Aplikace FRP výztuže při návrhu odolných konstrukcí*“. In SBORNÍK anotací konference JUNIORSTAV 2014. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 129-129. ISBN: 978-80-214-4851-3
- [XXII.] Štěpánek, P.; Kostiha, V.; Girgle, F.; Mansour, M.; Laníková, I.: „*Vliv zesílení sloupů ovinutím kompozitní tkaninou na jejich únosnost*“. In 8. seminář Sanácia betónových koštrukcií. 1. Bratislava: Jaga, 2013. s. 137-142. ISBN: 978-80-8076-109-7
- [XXIII.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.; Mansour, M.; Kučerová, A.: „*Design of the resistant structures reinforced by inner FRP reinforcement*“. In 20th Czech Concrete day 2013 (20. Betonářské dny 2013). 1. Praha: ČBS Servis, s. r. o., 2013. p. 429-433. ISBN: 978-80-87158-34-0
- [XXIV.] Girgle, F.; Štěpánek, P.; Daněk, P.; Horák, D.; Kostiha, V.: „*Newly developed anchoring element for prestressed FRP reinforcement – functionality and design*“. In FRPRCS-11: 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. Guimaraes: University of Minho, 2013. p. 1-10. ISBN: 978-972-8692-84-1
- [XXV.] Kostiha, V.: „*Advanced methods of strengthening RC members – Near surface mounted FRP reinforcement mounted FRP reinforcement*“. In YOUNG SCIENTIST 2013, Herľany, April 10-12, 2013. 1. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2013. p. 1-8. ISBN: 978-80-553-1305-4
- [XXVI.] Kostiha, V.: „*Confinement of reinforced concrete column using composites fabric – method of strengthening structures*“. In YOUNG SCIENTIST 2013, Herľany, April 10-12, 2013. 1. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2013. p. 1-8. ISBN: 978-80-553-1305-4

- [XXVII.] Kostiha, V.: „*Železobetonové sloupy ovinuté FRP tkaninou*“. In Sborník anotací JUNIORSTAV 2013. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverří 331/95, 602 00 Brno, 2013. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-4670-0
- [XXVIII.] Kostiha, V.: „*Zesilování železobetonových prvků pomocí NSM kompozitní výztuže*“. In Sborník anotací JUNIORSTAV 2013. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverří 331/95, 602 00 Brno, 2013. s. 165-165. ISBN: 978-80-214-4670-0
- [XXIX.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.; Mansour, M.: „*Strengthening of circular reinforced concrete columns using FRP wrap*“. In Conference Proceedings – 1st CECOM 2012 CONFERENCE. 1. Lodz, Republika Polsko: Publisher Lodz University of Technology, 2012. p. 11-12. ISBN: 978-83-7283-514-7
- [XXX.] Kostiha, V.; Štěpánek, P.; Girgle, F.; Mansour, M.; Laníková, I.: „*Zesilování železobetonových prvků pomocí kompozitní NSM výztuže*“. In Sborník příspěvků – Konference 19. Betonářské dny 2012 spojené s výstavou BETON 2012. 1. Praha: ČBS Servis, s. r. o., 2012. s. 461-465. ISBN: 978-80-87158-32-6
- [XXXI.] Kostiha, V.; Mansour, M.; Girgle, F.; Kučerová, A.; Štěpánek, P.: „*Zesilování sloupů ovinutím kompozitní tkaninou*“. In Sborník příspěvků – Konference 19. Betonářské dny 2012 spojené s výstavou BETON 2012. 1. Praha: ČBS Servis, s. r. o., 2012. s. 225-230. ISBN: 978-80-87158-32-6
- [XXXII.] Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.: „*Zesilování sloupů ovinutím FRP tkaninou*“. In Sborník Konference sanace a rekonstrukce 2012. stavebnictví. Brno: SSBK, Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. s. 328-337. ISBN: 978-80-02-02414-9
- [XXXIII.] Kostiha, V.: „*Zesilování železobetonových prvků užitím NSMR techniky*“. In IX. International Scientific Conference FCE TUKE; Young Scientist 2012. Košice: Technická Univerzita v Košiciach, 2012. s. 52-52. ISBN: 978-80-553-0905-7
- [XXXIV.] Kostiha, V.: „*Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP bandáží*“. In JUNIORSTAV 2012. Brno: VUT Fakulta stavební v Brně, 2012. s. 163-163. ISBN: 978-80-214-4393-8

### **Vyvinuté produkty**

- [XXXV.] Girgle, F.; Kostiha, V.; Matušíková, A.; Štěpánek, P.: Metodika CESTI TE01020468; *Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek*. VUT v Brně, FAST, ÚBZK (certifikovaná metodika)

- [XXXVI.] Štěpánek, P.; Terzijski, I.; Kadlec, J.; Girgle, F.; Čairović, D.; Kostiha, V.; Ševčík, M.; Holák, M.: Filigránový prvek FL1; *Filigránový vylehčený nosník*. VUT FAST Brno, Prefa Brno (funkční vzorek)
- [XXXVII.] Štěpánek, P.; Terzijski, I.; Kadlec, J.; Girgle, F.; Čairović, D.; Kostiha, V.; Holák, M.; Ševčík, M.: BP1; *Sendvičový balkonový segment*. VUT FAST Brno, Prefa Brno (funkční vzorek)
- [XXXVIII.] Horák, D.; Kostiha, V.; Girgle, F.; Štěpánek, P.: certifikát; *Zákrytová deska*. VUT FAST Brno, Prefa Brno (funkční vzorek)
- [XXXIX.] Girgle, F.; Kostiha, V.; Štěpánek, P.; Horák, D.; Šimůnek, P.; Laníková, I.; Prokeš, J.; Holák, M.; Ševčík, M.: prvek s NSM; *Funkční vzorek prvku zesíleného nepředpjatou kompozitní NSM výztuží*. Prefa Brno; Prefa Kompozity Brno; VUT FAST Brno. (funkční vzorek)
- [XL.] Girgle, F.; Štěpánek, P.; Prokeš, J.; Šulák, P.; Šimůnek, P.; Kostiha, V.; VUT v Brně, PREFA Kompozity a.s.: *Vícepramenné splétané lano*. 28755, užitný vzor. (2015)

## CURRICULUM VITAE

### *Osobní údaje*

jméno: Ing. Vojtěch Kostiha  
datum narození: 26. března 1986  
místo narození: Vyškov  
adresa: B. Němcové 332, Brankovice 683 33  
státní příslušnost: ČR  
rodinný stav: svobodný

### *Vzdělání*

2011 – současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Doktorské studium  
Studijní program: Konstrukce a dopravní stavby  
Školitel: prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.

2009 – 2011 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Navazující magisterské studium  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Pozemní stavitelství  
Zaměření: Konstrukce a statika staveb

2005 – 2009 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Bakalářské studium  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Pozemní stavitelství

### *Pracovní zkušenosti*

2015 – současnost Bestex, spol. s r.o.  
Projektant – statik (spolupráce na projektové  
činnosti a expertních posudcích)

2011 – 2013 Nemetschek Scia, s.r.o.  
Externí tester statického softwaru SCIA

### *Vědecká a výzkumná činnost*

2011 – současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Člen řešitelského týmu (spolupráce na řešení  
projektu)

- GD103/09/H085 – Moderní kompozitní konstrukce
- MPO FR-TI 4/159 - Light weight structures