



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Mostní nosník z vlákny vyztuženého polymeru (FRP)
a vysokohodnotného betonu (HPC)**

**Bridge girder made of fiber-reinforced polymer (FRP)
and high-performance concrete (HPC)**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Ludvík Kolpaský

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. Pavel Ryjáček Ph.D.

Praha, 2021

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Ludvík Kolpaský

Název disertační práce: Mostní nosník z vlákniny vyztuženého polymeru (FRP) a vysokohodnotného betonu (HPC)

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Ryjáčka Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: SGS 15/139/OHK1/2T/11 a TE01020168.

V Praze dne 28.7.2021

.....
podpis

Abstrakt

Cílem práce bylo vyvinout nový typ kompozitního nosníku pro mostní konstrukce. Navržený nosník je složen z korýtkového průřezu z vlákniny vyztuženého polymeru (FRP) a betonové desky z vysokohodnotného betonu (HPC). Spřažení betonové desky je zajištěno pomocí perforované lišty. V experimentální části práce byly provedeny protlačovací zkoušky a zkouška kompozitního nosníku v ohybu o průřezu reálné velikosti. V numerické části byly pomocí dat z experimentu vytvořeny a validovány numerické MKP modely. Pro modelaci FRP byl použit materiálový model betonu s rozetřenou výztuží, který respektoval množství a směr vláken v kompozitu. Na základě výsledků experimentů a modelů bylo popsáno chování perforované lišty a nosníku v ohybu. V rámci práce byl vyvinut kompozitní nosník s vysokou odolností a trvanlivostí pro lávku o rozpětí 12 m.

Klíčová slova: vlákniny vyztužený polymer, vysokohodnotný beton, kompozitní, nosník, perforovaná lišta

Abstract

The goal of the thesis was to develop a new type of composite beam for bridge structures. The designed beam is made of a trough cross-section of fibre-reinforced polymer (FRP) and a concrete slab of high-performance concrete (HPC). Perfobond-rib shear connectors ensure the composite action of the concrete slab. In the experimental part of the thesis, push out tests and a test of a composite beam in bending with a real-size cross-section was performed. In the numerical part, numerical FEM models were created and validated using experimental data. A material model of concrete with smeared reinforcement was used for FRP modelling, which respected the amount and direction of fibres in the composite. Based on the results of experiments and models, the behaviour of the perfobond-rib shear connector and the beam was described. In this thesis, a composite beam with high resistance and durability was developed for a footbridge with a span of 12 m.

Keywords: fibre-reinforced polymer, high-performance concrete, composite, beam, perfobond-rib shear connector

Poděkování

Tato disertační práce byla vypracována na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze v letech 2015-2020.

Hlavní poděkování patří mému školiteli doc. Ing. Pavlovi Ryjáčkovi, Ph.D. za vedení, podporu a osobní přístup v průběhu mého studia.

Děkuji také členům katedry ocelových a dřevěných konstrukcí za cenné rady, náměty a věcné připomínky obdržené při seminářích doktorandů i mimo ně. Zejména děkuji Ing. Zdeňkovi Sokolovi, Ph.D. za pomoc při mé experimentální činnosti a doc. Ing. Tomáši Rotterovi, CSc. za konzultace během mého studia.

Dále děkuji Experimentálnímu centru Fakulty stavební za pomoc při přípravě a provedení experimentů, zejména doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D..

V neposlední řadě bych rád poděkoval své manželce za podporu a trpělivost, kterou mi věnovala po dobu mého studia a psaní této práce.

Tato disertační práce vznikla za finanční podpory granty SGS 15/139/OHK1/2T/11 a TE01020168 (Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu).

Praha, červenec 2021

Ludvík Kolpaský

Obsah

1	ÚVOD	4
2	ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FRP MATERIÁLŮ	5
2.1	Druhy výztuží pro FRP	5
1.1.1	Roving	5
1.1.2	Vyztužující rohož	6
1.1.3	Tkanina	6
2.2	Pojivo (matrice).....	6
2.3	Výroba	7
1.1.4	Ruční výroba	7
1.1.5	Vakuování	8
1.1.6	Pultruze	8
2.3.1	Ostatní metody.....	9
2.4	Mechanické vlastnosti FRP	9
1.1.7	Pevnost, tuhost, objemová hmotnost	9
1.1.8	Odolnost proti vlivu povětrnosti	10
1.1.9	Chemická odolnost.....	11
1.1.10	Únava.....	11
1.1.11	Vysoká teplota a požár.....	12
1.1.12	Nízká teplota	12
3	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	14
3.1	1995, Švýcarsko – Descovic, Triantafillou, Meier [15]	15
3.2	1999, Velká Británie - L. Canning, L. Hollaway, A.M. Thorne [16]	16
3.3	2003, Velká británie – J. Hulatt, L. Hollaway, A.M. Thorne [17].....	17
3.4	2006, Kanada – Fam, Skutezky [18].....	18
3.5	2008, Portugalsko – Correia, Branco, Ferreira [19]	19
3.6	Další výzkum spřažení pultrudovaných I profilů pomocí šroubů:	20
3.7	2010, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [26].....	22
3.8	2010, Kanada – Fam, Honickman [27]	23
3.9	2012, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [28].....	23
3.10	2012, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [29].....	24
3.11	2012 Čína, He, Liu, Chen, Dai [30].....	25
3.12	2013, Velká británie - Gai, Darby , Ibell, Evernden [31].....	26
3.13	2014, Portugalsko – Gonilha, Barros, Correia, Sena-Cruz, Branco, Ramos, Gonçalves, Alvim, Santos [32].....	27
3.14	2016, Portugalsko, Mastali, Valente, Barros [33].....	28
3.15	2018, Čína, USA – Zuo, Mosallam, Xin, Liu, He [34].....	29
3.16	2018, Malajsie, Austrálie – Kong, Yang, Lee [35].....	30
3.17	2019, Polsko – Siwowski, Rajchel [36]	31
3.18	2020, Čína - Liu, Feng, Lu , Yang , Wu [37]	32

4	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	34
5	METODY DOSAŽENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	34
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	35
	6.1 Protlačovací zkoušky.....	36
	6.1.1 Materiálové zkoušky.....	37
	6.1.2 Průběh protlačovací zkoušky	43
	6.1.3 Vyhodnocení	44
	6.2 Návrh a zkouška kompozitního nosníku v ohybu.....	49
	6.2.1 Numerická analýza lávky	50
	6.2.2 Numerická analýza nosníku	53
	6.2.3 Výroba nosníku	54
	6.2.4 Materiálové zkoušky nosníku	58
	6.2.5 Průběh zkoušky.....	64
	6.2.6 Výsledky.....	66
	6.2.7 Vyhodnocení	75
7	NUMERICKÁ ANALÝZA.....	76
	7.1 Materiálový model FRP	77
	7.1.1 WEFT/WARP efekt	77
	7.1.2 Rule of Mixture	78
	7.1.3 Materiál v programu ATENA	80
	7.1.4 Porovnání materiálových modelů.....	82
	7.2 Model vzorku protlačovacích zkoušek.....	83
	7.2.1 Geometrie vzorku.....	83
	1.1.1 Typy použitých prvků, materiály	85
	7.2.2 Výsledky.....	85
	7.3 Model kompozitního nosníku	88
	7.3.1 Model nosníku bez imperfekcí, predikce před experimentem	88
	7.3.2 Výsledky.....	91
	7.3.3 Model nosníku s imperfekcemi.....	93
8	ZÁVĚR	97
	8.1 Experimentální výzkum	97
	8.2 Numerická analýza	98
	8.3 Doporučení pro praktický návrh.....	98
	8.4 Náměty pro další výzkum	99
	8.4.1 Nosník se spřahovací lištou	100
	8.4.2 Tyčový prefabrikát s uhlíkovou pásnicí	101
	8.4.3 Komorové nosníky	102
	8.5 Přínos k řešené problematice	102
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	103
	9.1 Normy.....	103
	9.2 Literatura	103
10	PŘÍLOHY.....	106

10.1 Příloha č.1: Katalogové listy materiálů použitých při experimentech	106
10.1.1 Pryskyřice.....	106
10.1.2 Skelná vlákna.....	109
10.1.3 Uhlíková vlákna.....	110
10.1.4 Lepidlo Sikadur -30	114
10.1.5 Kompozitní výztuže PREFA Rebar, PREFACARB.....	120
10.2 Příloha č.2: Výsledky materiálových vlastností spočtených metodou Rule of mixture.....	127
10.2.1 FRP desky použité při protlačovacích zkouškách	127
10.2.2 FRP použité při výrobě nosníku	128
10.3 Příloha č.3: Vstupní data v programu ATENA	130
10.3.1 Model materiálových zkoušek	130
10.3.2 Model protlačovacích zkoušek	130
10.3.3 Model nosníku.....	131
10.4 Příloha č.4: Protokoly o zkouškách.....	133
10.4.1 Protokol – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	133
10.4.2 Protokoly o zkouškách kompozitní GFRP výztuže	136
10.4.3 Zkoušky smykové pevnosti stojiny nosníku.....	158
10.4.4 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 0°	160
10.4.5 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 45°	161
10.4.6 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 90°	162
10.4.7 Tahová zkouška pevnosti pásnice nosníku ve směru 0°	163
10.4.8 Tahová zkouška pevnosti pásnice nosníku ve směru 90°	164

1 Úvod

V současné době patří mezi nepoužívanější konstrukční materiály pro mosty ocel, beton a dřevo. Nevýhodou ocelových a dřevěných mostů je degradace materiálu. Z tohoto důvodu je třeba věnovat velkou pozornost údržbě těchto konstrukcí během jejich životnosti. Jelikož se tato údržba často zanedbává, je třeba vynakládat nemalé prostředky na jejich uvedení do původního stavu, kterého často ani nelze kvůli korozním úbytkům dosáhnout. Protikorozní nátěry je potřeba během životnosti několikrát obnovit. U betonových mostů často dochází k narušení krycí vrstvy výztuže, přístupu vlhkosti do konstrukce a ke korozi výztuže. Tyto opravy vyžadují sanace a dodatečné zesilování konstrukce.

Jedním z nových materiálů, který se v poslední době začal používat pro stavební konstrukce je vlákny vyztužený polymer neboli FRP (fibre-reinforced polymer). Tento materiál kombinuje vysokou pevnost, nízkou hmotnost a vysokou trvanlivost. Tento materiál se kvůli své vyšší ceně používá pro náročné aplikace tam, kde je zapotřebí vysoká odolnost, netečnost vůči radiovému signálu a elektřině či nízká hmotnost. Materiál si tak našel uplatnění v přímořských oblastech s vysokou vzdušnou salinitou, při výstavbě vysílačů, staveb v náročných chemických provozech či při zesilování konstrukcí. Díky rozvoji použití tohoto materiálu se neustále zvyšuje dostupnost a snižuje jeho cena. I přes vyšší počáteční náklady konstrukce z FRP, tento materiál může konkurovat konvenčním materiálům díky jeho vysoké odolnosti, nízkým nákladům na údržbu a vysoké životnosti.

Nevýhodou FRP je nízký modul pružnosti. Důsledkem toho se tyto prvky navrhují zejména s ohledem na použitelnost a nedochází k využití vysoké pevnosti FRP. Spojením FRP s betonem lze tuto chybějící tuhost zajistit. Spřažení přinese i výhody, které známe z ocelobetonových konstrukcí, jako jsou například zvýšená únosnost, požární odolnost, zajištění stability tlačené části průřezu a v neposlední řadě také duktilitu, která je obzvláště důležitá pro nosník z FRP, který má lineární chování až do porušení. Betonová deska chrání proti účinkům UV. Takováto konstrukce je proto vhodná do agresivního prostředí a nevyžaduje tak důkladnou údržbu a dodatečné náklady během životnosti konstrukce.

2 Základní vlastnosti FRP materiálů

Jako FRP (fibre reinforced polymer) se označují kompozity, které jsou složeny z matrice a vláken. Vlákná v průřezu zajišťují pevnost a tuhost. Matrice v prvku má funkci pojiva, které udává tvar prvku a přenáší zatížení mezi jednotlivými vlákny.

2.1 Druhy výztuží pro FRP

Používají se základní 3 typy výztuží, podle kterých se kompozity označují:

- GFRP – skleněná vlákna)
- CFRP – uhlíková vlákna
- AFRP – aramidová vlákna

Vlákná jsou nejčastěji vyráběna o průměru přibližně 10 μ m. Zajišťují v kompozitu pevnost a tuhost. Z toho plynou vlastnosti, které jsou po výztužných vláknech požadovány – vysoký modul pružnosti a pevnost v tahu. Díky nízké ceně je nejpoužívanější E–sklo. Nejlepší vlastnosti mají uhlíková vlákna.

Tabulka 1: Vlastnosti nejčastěji používaných vláken

	Hustota	Pevnost v tahu	Modul pružnosti v tahu
	kg/m ³	MPa	GPa
E-Sklo	2500	3450	75
S-Sklo	2500	4580	83
Uhlík – vysoký modul	1950	2500-4000	350-650
Uhlík – vysokopevnostní	1750	3500	240
Aramid (Kevlar 29)	1440	2760	62
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124
Aramid (Kevlar 149)	1440	3450	175
Aramid (Technora H)	1390	3000	70

1.1.1 Roving

Souběžně uspořádané prameny vláken se nazývají roving. Jsou určeny k výrobě tkanin, jsou dále děleny pro výrobu rohoží nebo jsou rovnou používány při výrobě metodou pultruze. Běžné množství vláken v rovingu je 400 až 1 600.

1.1.2 Vyztužující rohož

Jedná se o netkanou textilií, která je vyrobena z nasekaných krátkých, nahodile rozložených vláken, čím jsou dosaženy téměř izotropní vlastnosti. Vlákna jsou navzájem propojená pryskyřicí a dále navinutá do role. Množství vláken určuje výslednou plošnou hmotnost rohože.

1.1.3 Tkanina

Tkanina je textilií, která je vyrobena z rovingů na tkalcovském stroji podobně jako běžná textilie. Oproti rohožím je ve tkanině větší množství vláken, která mají danou orientaci. Běžně se vyrábějí tkaniny, které mají vlákna pouze v podélném směru, podélném a příčném směru a také pod úhlem 45 °. Používají se při výrobě FRP metodou ruční laminace.



Obr. 1 Roving vlevo, výztužná tkanina vpravo [10.1.3]

2.2 Pojivo (matrice)

Matrice slouží v kompozitu jako pojivo a dává výslednému prvku tvar. Spojuje jednotlivá výztužná vlákna dohromady, takže mezi nimi umožňuje přenos zatížení. Matrice chrání vlákna před vlivy okolí. Druh matrice ovlivňuje elektroizolační vlastnosti, odolnost proti teplotě a chemickou odolnost.

Matrice se dělí na termoplasty a termosety. Termoplasty za zvýšené teploty měknou, tečou a proto se pro stavební konstrukce nehodí. Termosety se vytvrzují teplem, urychlovačem nebo jejich kombinací. Po vytvrzení se v matrici vytvoří pevná struktura. Termosety mají lepší odolnost, modul pružnosti a houževnatost, proto se primárně používají jako matrice pro FRP.

Pro výrobu FRP se používají tyto základní tři pryskyřice:

- Polyesterová pryskyřice
- Vinylesterová pryskyřice
- Epoxidová pryskyřice

Nevýhodou polyesterové pryskyřice je obsah charakteristicky páchnoucích monomerů. Výrobky z ní jsou hořlavé, avšak vhodnými přísadami lze docílit jejich samozhášivosti. Díky své ceně se ale jedná o nepoužívanější pryskyřice při výrobě stavebních prvků.

Výhodou vinylesterové pryskyřice je vyšší ohebnost, díky které je odolnější proti tvorbě mikrotrhlin, což zajišťuje vyšší odolnost proti povětrnostním vlivům a vyšší houževnatost. Používá se tam, kde jsou vysoké požadavky na mechanickou, teplotní nebo chemickou odolnost.

Tabulka 2 Vlastnosti nejčastěji používaných organických matic [5]

Matrice	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Deformace do lomu
	[g/cm ³]	[GPa]	[MPa]	[%]
Termosety	1,10 - 1,67	1,3 - 6,0	20 - 180	1 - 30
Epoxidy	1,1 - 1,4	2,1 - 6,0	35 - 90	1 - 10
Polyestery	1,1 - 1,5	1,3 - 4,5	45 - 85	1 - 5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50 - 60	1 - 5
Polyamidy	1,2 - 1,9	3,0 - 3,1	80 - 190	2 - 40
Termoplasty	0,9-1,45	1,0 - 4,0	20 - 250	5 - 150
Polypropylen	0,9	1,1 - 1,5	28 - 41	10 - 700
Polyamid	1,42	2,8 - 3,4	76 - 83	60 - 300
Polykarbonát	1,21	2,1 - 2,8	62 - 76	110 - 130
Polyaryletherketon	1,31	3,8	70	50 - 150

Epoxidové pryskyřice mají velice dobré mechanické vlastnosti a výrobky z nich mají vysokou chemickou odolnost. Vzhledem k ceně se kombinují s dražšími typy vláken, například s uhlíkovými.

Všechny typy pryskyřic jsou citlivé na UV záření, proto vyžadují vhodnou ochranu pomocí speciálních přísad nebo povrchových rohoží.

2.3 Výroba

1.1.4 Ruční výroba

Ruční výroba spočívá v nanášení pryskyřice do připravené formy, postupném kladení výztužných tkanin či rohoží, které jsou poté přejety speciálním válečkem, který promísí

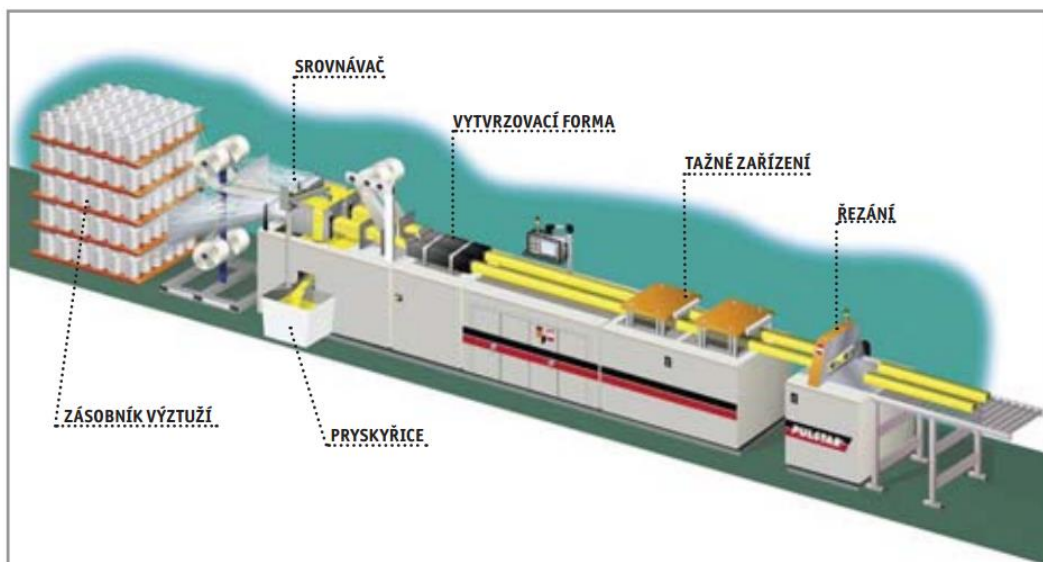
pryskyřici mezi vlákna a vytlačí vzduchové bubliny. Tyto kroky se opakují, dokud se nedosáhne potřebné tloušťky nebo předepsaného vyztužení kompozitu. Tato metoda je nejstarší způsob výroby FRP. Výhodou je možnost provádět FRP libovolných tvarů a vyztužení včetně orientace vlákna a jejich množství. Nevýhodou je vysoká pracnost spojená s nerovnoměrnou kvalitou prvku a vlastnosti výsledného kompozitu jsou horší v porovnání s metodou pultruze, jelikož jsou vlákna v pryskyřici zatuhlá v nepředepnutém stavu.

1.1.5 Vakuování

Metoda ruční laminace byla vylepšeno o poslední krok, a to uzavření výsledného prvku do vaku, ze kterého je následně odsátý vzduch. Absence vzduchových bublin v kompozitu příznivě ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti i odolnost.

1.1.6 Pultruze

Metoda pultruze je proces, při kterém lze vyrábět liniové prvky vysoké kvality. Pultruze se provádí v lince která je sestavena ze zásobníku výztuží, srovnávače, vytvrzovací formy, tažného zařízení a řezacího zařízení. Napnutá vlákna procházejí vytvrzovací formou, ve které dochází ke vstřikování pryskyřice a jejímu tuhnutí za tepla, zde je také určen příčný řez profilu. Kontinuální prvek se následně řeže na jednotlivé tyče, podle objednané délky.

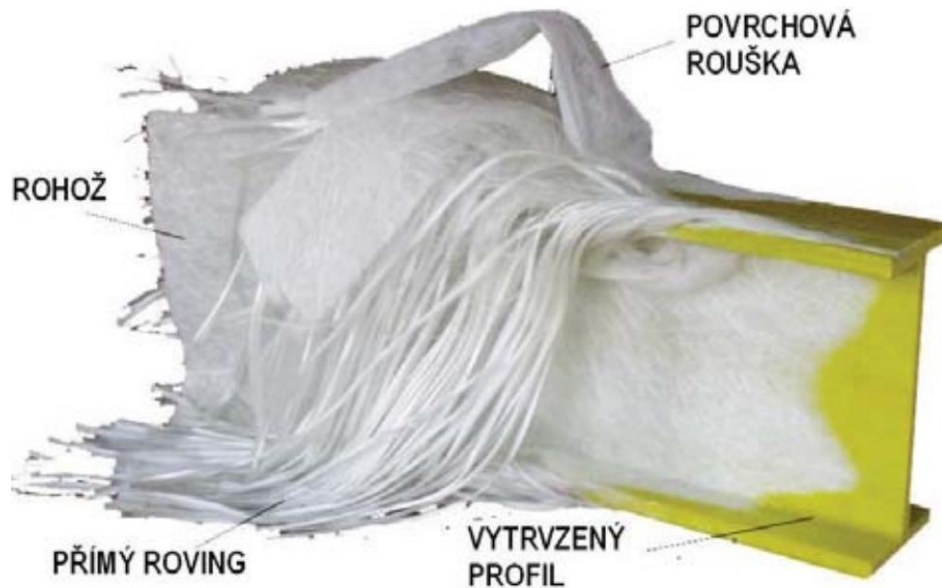


Obr. 2 Schéma výroby pultrudovaných FRP profilů [6]

Hlavní výhodou je přesnost, rychlost výroby a nízké plynoucí úspory z rozsahu. Mechanické vlastnosti výsledného kompozitu jsou výrazně lepší oproti ostatním způsobům výroby, a to především proto, že jsou vlákna ve vytvrzené matici

v napnutém stavu. Vlákna je možné kombinovat, takže je možné vyrábět prvky s pásnicemi s uhlíkovými vlákny, které mají vyšší modul pružnosti a pevnost, a stojiny vyztužené skelnými, levnějšími vlákny. Povrch profilu se vyztužuje povrchovou rouškou, která zlepšuje odolnost prvku proti UV záření.

Nevýhodou je vysoká pořizovací cena technologie a pracnost nastavení linky mezi výrobou odlišných průřezů. Tuto nevýhodu však vyvažuje množství vyráběného produktu.



Obr. 3 Jednotlivé složky pultrudovaného profilu [6]

2.3.1 Ostatní metody

Mezi další metody, které se však zřídka používají pro konstrukční prvky, jsou metoda navíjení, nanášení kompozitů sprejem do formy a metoda lisování se vstřikem do matrice.

2.4 Mechanické vlastnosti FRP

1.1.7 Pevnost, tuhost, objemová hmotnost

Pevnost a tuhost FRP ovlivňuje množství vláken, jejich vlastnosti a orientace v prvku. U pultrudovaných prvků je použit především roving v podélném směru, který je dále doplněn rohožemi zejména kvůli vyztužení stojiny a spojení stojiny s pásnicemi. U metody ruční laminace se nejčastěji používá vyztužných tkanin. Ty mají vlákna v na sebe kolmém směru. Výsledný prvek pak má ortotropní vlastnosti. Příklad vlastností pultrudovaného profilu z E-skla a polyesterové matrice jsou v tabulce 3.

Tabulka 3 Materiálové vlastnosti pultrudovaných profilů [7]

Typické hodnoty tuhosti a příčné smrštění (za sucha)			
Modul pružnosti, 0°	E_{0°	23 000/28 000	[MPa]
Modul pružnosti 90°	E_{90°	8 500	[MPa]
Modul smyku	G	3000	[MPa]
Poissonovo číslo	ν_{0°	0.23	[-]
Poissonovo číslo	ν_{90°	0.09	[-]
Typické pevnostní hodnoty (za sucha)			
Ohybová pevnost, 0°	$f_{b,0^\circ}$	240	[MPa]
Ohybová pevnost, 90°	$f_{b,90^\circ}$	100	[MPa]
Tahová pevnost, 0°	$f_{t,0^\circ}$	240	[MPa]
Tahová pevnost, 90°	$f_{t,90^\circ}$	50	[MPa]
Tlaková pevnost, 0°	$f_{c,0^\circ}$	240	[MPa]
Tlaková pevnost, 90°	$f_{c,90^\circ}$	70	[MPa]
Smyková pevnost	f_τ	25	[MPa]

Velkou výhodou FRP produktů je jejich objemová hmotnost, která se pohybuje v rozmezí 20-30% objemové hmotnosti oceli.

1.1.8 Odolnost proti vlivu povětrnosti

Vzhledem k vysoké ceně kompozitů oproti běžným materiálům používaným ve stavebnictví se FRP materiál hodí převážně tam, kde lze využít jeho dobré odolnosti a trvanlivosti. Pokud je povrch FRP profilů kompaktní, je velmi odolný proti vlivu povětrnosti. Vlivem UV záření však dochází k degradaci matrice. Kompozitní profily se proto již ve výrobě opatřují povrchovými rouškami, ty jsou zpravidla vyrobené ze skelných vláken, která UV záření pohlcují a zabraňují degradaci matrice v jádru průřezu. [5] . K degradaci tak dochází pouze na povrchu prvku, ta však výrazně mechanické vlastnosti neovlivní.

Absorbovaná vlhkost může způsobit degradaci pryskyřice, která vede k tvorbě trhlin, ke ztrátě soudržnosti matrice s vlákny a ke korozi skelné výztuže. V důsledku této koroze může dojít k poklesu pevnosti a tuhosti FRP. Smyková a ohybová pevnost je více citlivá na tuto degradaci oproti tahové pevnosti, která závisí převážně na vláknech. Průnik vlhkosti je definován třemi způsoby – difúzí molekul vody mezi řetězci polymeru, kapilaritou a šířením vody v mikrotrhlinách a pórech vzniklých během výroby. Tuto degradaci může urychlit zvýšená teplota, přítomnost posypové soli či vzdušná salinita typická pro přímořské oblasti. [8]

1.1.9 Chemická odolnost

Zatímco proti kyselinám mají FRP profily výbornou odolnost, při styku s alkáliemi se může projevit degradace E-skla, které je jako výztuž pro FRP nejpoužívanější. Alkalický roztok může proniknout ke skelným vláknům a ovlivnit jejich vlastnosti. Křehnutí jednotlivých vláken může způsobit snížení pevnosti v tahu a ztrátu adheze výztuže s matricí. Volba matrice pro skelná vlákna do prostředí, kde hrozí kontakt s alkáliemi (beton, zemina) je klíčovým faktorem pro životnost. Výzkumy ukazují, že vinylester má mnohem lepší odolnost proti alkáliím, než epoxidová a polyesterová matrice, protože je tvrdší a více odolná proti tvoření mikrotrhlin a tím méně propustná. To přispívá i v odolnosti proti kyselinám a ostatním chemickým roztokům. Propustnost alkalických solných roztoků matricí je také možný, je ovšem podmíněn vysokým napětím, které zapříčiní vývoj trhliny, a zvýšená teplota, která zvýší míru sorpce. Karbonová vlákna alkáliím sice odolávají, kvůli své ceně však nejsou pro běžné aplikace používána. [9] Solné roztoky bez přítomnosti alkálií mají jen o trochu horší vliv na degradaci FRP než voda [11]. Volba vhodné matrice je shrnuta v tabulce 4.

Tabulka 4: Vhodnost matric podle firmy GDP koral [10]

	methylnmethaakrylát	Isoftal. Polyester	Vinylester
Kyseliny	**	**	***
Zásady	*	*	**
Chlorovaná rozpouštědla	-	-	*
organická rozpouštědla	-	-	*
Slaná voda	**	**	***
Benzín/nafta	**	**	***
Průmyslové detergenty	***	***	***

- nedoporučováno / * odolné / **dobře odolné / *** výborně odolné

1.1.10 Únava

Jelikož se FRP profily díky nízkému modulu pružnosti a vysoké pevnosti většinou navrhuje na mezní stav použitelnosti, rozkmit napětí nemá takový rozsah, že by vedl k porušení FRP. Riziková jsou ovšem místa, kde dochází ke koncentraci napětí například v místě lokálních zatížení nebo přípojů. Cyklické namáhání může u FRP profilů vést k delaminaci jednotlivých vrstev výztuže, k tvorbě a zvětšování trhlin v matrici a ke ztrátě adheze mezi vlákny a matricí.

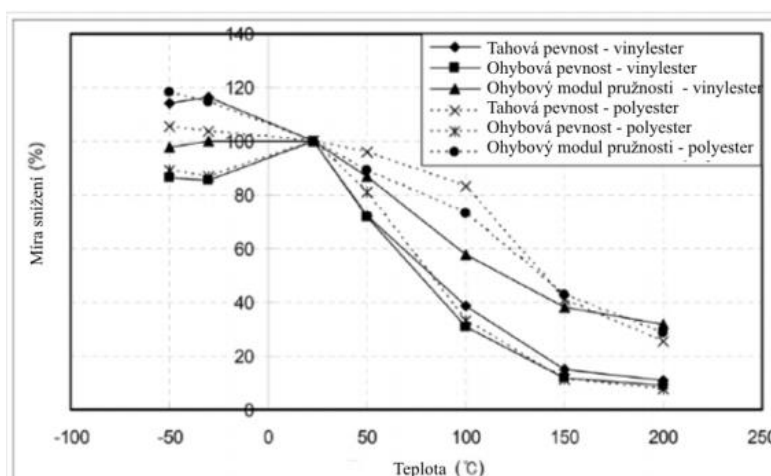
Konstrukce by měla být posouzena na únavu, pokud je předpokládaný počet cyklů větší než 5000. a když napětí od charakteristické kombinace je větší než 15% pevnosti

materiálu, nebo v případě kdy je cyklické namáhání větší než 40 % celkového namáhání.

Ke stanovení zbytkové únavové životnosti se většinou používají S-N křivky stanovené na základě experimentů nebo metoda zbytkové životnosti.

1.1.11 Vysoká teplota a požár

Mezní teplota pro skelná vlákna je 880 °C, pro aramidová vlákna 180 °C a pro uhlíková vlákna 1600°C. Při působení vysokých teplot však měkne polymerová matrice už při teplotě přesahující 70 °C, proto jsou její vlastnosti rozhodující při požadavku na odolnost proti vysoké teplotě. U některých matric, vhodných pro požární odolnost může být tato teplota až 140 °C [12] Od dosažení této teploty klesá modul pružnosti vlivem měknutí matrice. Při kritické teplotě dochází k porušení chemických vazeb ve struktuře pryskyřice, což je příčinou snížení pevnosti kompozitu. V porovnání s nevyztuženými polymery mají FRP výrobky tu výhodu, že vlákna, která jsou nehořlavá, oddělují zbylou část pryskyřice od ohně a omezují ztrátu pryskyřice z jádra průřezu. Při návrhu prvků, kde je požadována požární odolnost, je potřeba experimentálně tuto odolnost ověřit pro jednotlivé prvky konstrukce.



Obr. 4 Graf materiálových vlastností závislých na teplotě [13]

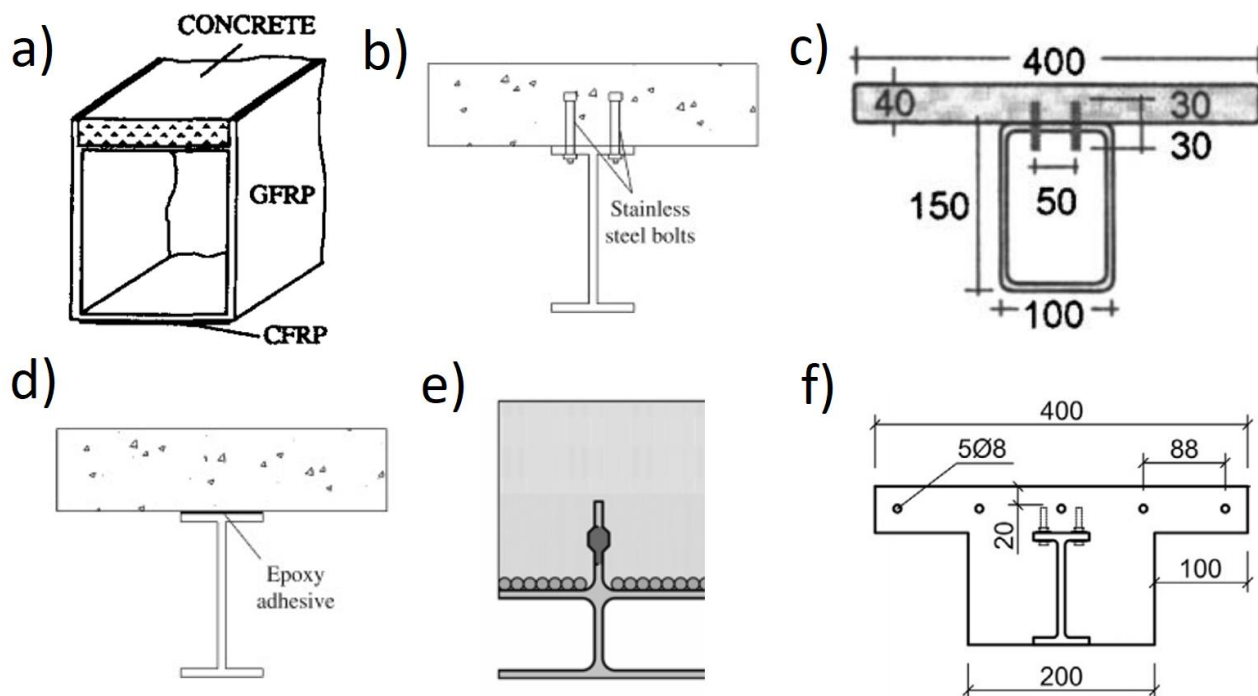
1.1.12 Nízká teplota

Díky rozdílné tepelné roztažnosti výztuže a matrice mohou mít nízké teploty u FRP kompozitů za následek tvrdnutí polymerové matrice a kvůli residuálnímu pnutí mezi matricí a vlákny může docházet k rozvoji mikrotrhlin a tím ke ztrátě adheze. Mikrotrhliny se mohou dále zvětšovat při cyklickém zmrazování a rozmrazování. Tyto cykly v kombinaci s vlhkostí a mořskou či posypovou solí zvyšují riziko poškození tvořením a expanzí solných krystalů. To může mít za následek zhoršení vlastností jako

je tuhost, pevnost, stabilita a odolnost proti únavě. Pevnost v tahu ve směru vláken klesá v rozmezí od -10 do 40 °C, zatímco pevnost kolmo na vlákna se zvětšuje díky zpevnění matrice. Nicméně efekt nízkých teplot se zdá být na vlastnosti FRP nepatrný a není rozhodujícím pro běžné aplikace. Při experimentech, ve kterých byly FRP vzorky vystaveny 150 cyklům zmrazení a rozmrazení v rozsahu teplot od +23 °C do -40 °C, se ukázalo, že pevnost v tahu FRP ze skelných vláken a epoxidové pryskyřice se snížila pouze o 10 %. Podobný test s uhlíkovými vlákny neprokázal významný úbytek pevnosti v tahu ani modulu pružnosti. [14] Výrobci zaručují pro běžné matrice odolnost do -20°C.

3 Současný stav problematiky

FRP materiál má vysokou pevnost, avšak jeho modul pružnosti je oproti pevnosti neúměrně nízký. Jeho vyšší cena tento materiál předurčuje pro použití tam, kde lze uplatnit jeho trvanlivost, v mostních konstrukcích. U těchto konstrukcí je důležitá vysoká ohybová tuhost a únosnost, s ohledem na zatížení, které je dominantní a především dynamické. Způsob, kterým lze chybějící tuhost zajistit je pomocí spřažení FRP nosníků s betonem. Tento úkol stojí před výzkumníky posledních několik dekád. Vývoj spřažení FRP s betonem začal v roce 1995 ve Švýcarsku, kde byly vyzkoušeny jedny z prvních kompozitních nosníků [15]. Vývoj spřažení se od začátku ubíral dvěma směry, a to spřažením soudržností tak, že bylo nanášeno lepidlo těsně před vylitím betonové desky nebo byly použity šrouby skrz horní pásnici, které sloužily jako trny, jež známe u ocelobetonových konstrukcí. V roce 2006 byly tyto základní způsoby rozšířeny v Kanadě, kdy se spřažení zajistilo pomocí trnů z FRP výztuže, které byly osazeny do předem vyvrtaných otvorů v horní pásnici [18]. V roce 2008 pak přibyl způsob spřažení pomocí lepení FRP nosníku na betonovou desku v obrácené poloze [19]. Spřažení pomocí perforované lišty bylo publikováno v roce 2010 [26]. V roce 2015 doplnil způsob spřažení pomocí obetonování celého FRP průřezu [21].



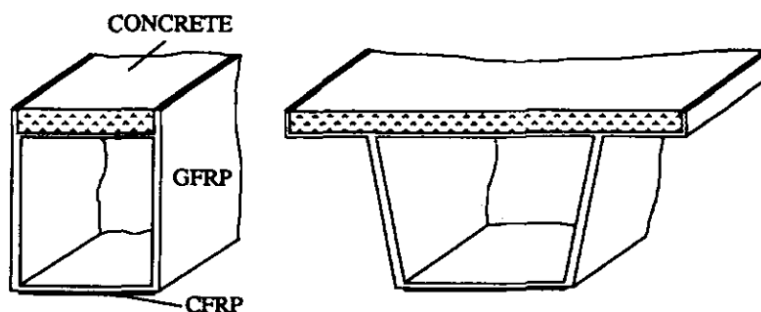
Obr. 5 Způsoby spřažení pomocí: a) soudržnosti [15], b) šroubů [19], c) trnů z FRP výztuže [18] d) nalepení betonové desky [19], e) perforované lišty [26], f) obetonování průřezu [21]

Z hlediska tuhosti spřažení má jednoznačně nejlepší výsledky spřažení pomocí opískování povrchu, nebo pomocí lepení. Z hlediska únosnosti a duktility mají nejlepší výsledky perforovaná lišta a spřažení pomocí šroubů. Nejlepší výsledky tak prokázaly vzorky, které kombinovaly oba způsoby spřažení, a to jak pomocí soudržnosti, které zajistí tuhost spřažení v mezním stavu použitelnosti, tak mechanické spřažení, které zajistí dostatečnou únosnost v mezním stavu únosnosti poté, co lepené spřažení začne ztrácet soudržnost.

Vývoj spřažení vyvrcholil stavbou několika mostních staveb, jež využívají technologii spřaženého FRP nosníku s betonem. Vývoj kompozitní lávky v Portugalsku byl publikován v roce 2014. [32] Dvojice pultrudovaných nosníků výšky 400 mm byla připojena k betonové desce pomocí trnů, které byly do betonové desky dodatečně osazeny na chemickou maltu do předem vyvrtaných děr. Spřažení doplňovalo nanesené lepidlo před usazením FRP nosníků. V roce 2015 byl postaven silniční most o rozpětí 22 m [36]. Nosníky jsou vyrobeny metodou ruční laminace s následným vakuováním. Spřažení je zde realizováno pomocí galvanizovaných trnů navařených na ocelový plech, který je vlepen na spodní hranu horní pásnice. Vývoj segmentového pultrudovaného nosníku výšky 560 mm vedl v Číně k realizaci dvou kompozitních lávek [37]. Spřažení zde bylo realizováno pomocí opískování povrchu FRP nosníku ve styku s betonem před betonáží a zároveň vložení betonářské výztuže průměru 10 mm skrze stěny FRP průřezu. Níže je vývoj podrobně popsán bodově po letech dle publikovaných článků.

3.1 1995, Švýcarsko – Descovic, Triantafillou, Meier [15]

Jeden z prvních experimentů spřažení FRP s betonem byl proveden ve Švýcarsku. Způsob spřažení spočíval v aplikaci čerstvého betonu na horní pásnici, která byla před betonáží odmaštěna pomocí acetonu a nanasena tenká vrstva epoxidové pryskyřice. Nosník byl doplněn při spodních vláknech vlepenou lamelou z uhlíkových vláken.

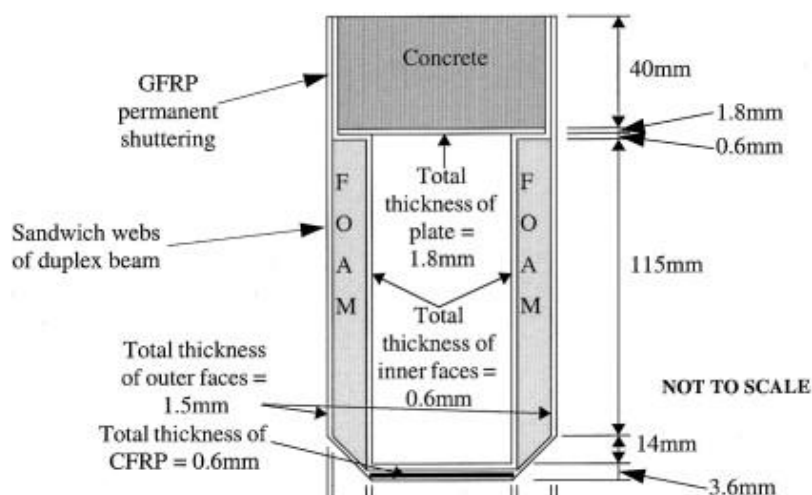


Obr. 6 Navržený nosník pro experiment (vlevo), možný způsob budoucího použití (vpravo)

Předpokladem experimentu bylo, že soudržnost mezi FRP a betonovou deskou nebude slabým místem nosníku. První nosník se však při experimentu porušil ztrátou soudržnosti právě mezi FRP a betonovou deskou. Druhý a třetí nosník byl proto opatřen v místě spřažení šrouby s paralelním uspořádáním o rozteči 190 mm rovnoměrně uspořádané po délce nosníku. Ty byly vloženy do vyvrtaných otvorů, vůle mezi šrouby a betonovou deskou byla vyplněna epoxidovou pryskyřicí s nízkou viskozitou. U těchto nosníků při určité úrovni zatížení došlo k delaminaci betonové desky a k poklesu zatěžovací síly. Při dalším přitěžování došlo k aktivaci předepnutých šroubů a k překonání předchozí maximální síly. Vzorek se dále porušil podrcením betonové desky.

3.2 1999, Velká Británie - L. Canning, L. Hollaway, A.M. Thorne [16]

Ve Spojeném království byly navrženy a provedeny experimenty spřaženého FRP nosníku, který navazoval na vývoj nosníku ve Švýcarsku. FRP nosník byl vyroben pomocí metody pre-preg, která spočívá v přidávání jednotlivých prefabrikovaných vrstev na připravenou formu. Takto připravený celek se následně vytvrdil za zvýšené teploty. Nosníky byly vyrobeny z vrstev, která obsahovala skelná vlákna pod úhlem $\pm 45^\circ$. Mezi vnitřní a vnější stěnou byla umístěna polymerní pěna, která eliminuje boulení stěn. V oblasti dolních vláken byly umístěny 3 vrstvy výztuže. Prostřední z těchto vrstev obsahovala uhlíková vlákna uspořádaná v podélném směru pro zvýšení tuhosti a únosnosti.



Obr. 7 Příčný řez navrženého nosníku

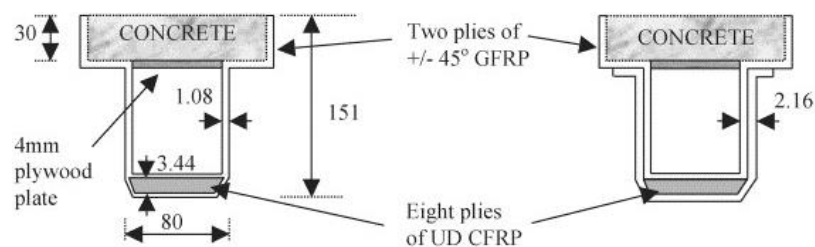
Spřažení FRP nosníku s betonovou deskou bylo dosaženo pomocí šesti typů spřažení. První typ spřažení spočíval ve vytvoření smykových zarážek ve stěnách nosníku (bednění). Druhá metoda spočívala ve vybetonování desky v dočasném bednění,

kteřá se následně po upravení svislých styčných ploch otryskáním a odmaštěním vlepila pomocí epoxidového lepidla do připraveného FRP nosníku. Třetím způsobem spřažení byly mechanické prostředky – šrouby umístěné příčně o rozteči 150 mm. Ve čtvrtém typu spřažení byly použity podložky umístěné mezi svislé stěny FRP nosníku a betonovou deskou. Ty byly 14 dní po betonáži vyjmuty a vzniklý prostor mezi betonovou deskou a bednicími deskami byl zainjektován. Pátý typ spřažení byl podobný jako u čtvrtého nosníku s tím rozdílem, že pryskyřice byla aplikována pomocí vakuové injektáže. U šestého typu spřažení byla použita epoxidová pryskyřice aplikovaná těsně před betonáží nosníku.

Nejlepší výsledky dosáhl druhý způsob spřažení, ve kterém byla betonová deska dodatečně nalepena. Metody spřažení pomocí injektáže, vakuové injektáže a aplikace pryskyřice těsně před betonáží dosáhly podobných výsledků, mírně horších než v případě dodatečného nalepení betonové desky. Spřažení pomocí mechanických prostředků dosáhlo 75% účinnosti dodatečně nalepené desky.

3.3 2003, Velká británie – J. Hulatt, L. Hollaway, A.M. Thorne [17]

V roce 2003 stejný tým provedl sérii experimentů zaměřených na boulení stěny, soudržnost FRP s betonovou deskou, chování nosníku pod dlouhodobým a pod cyklickým zatížením. Spřažení s betonovou deskou bylo zajištěno pomocí epoxidové pryskyřice Sikadur 31 nanesené těsně před betonáží na styčné plochy nosníku. Nosník prvního typu byl zaměřen na boulení stěny, proto byl nosník vyztužen výztuhami ve vzdálenosti 75 mm s výjimkou třetin rozpětí, kde byly výztuhy vynechány. V těchto místech se očekávalo boulení stěny nosníku. Byly vyzkoušeny 2 typy výztuh, diafragma z GFRP a dřevěné pruty o průměru 12 mm. Druhý typ nosníku měl zdvojenou stojinu, aby bylo zaručeno, že dojde k jinému typu porušení než boulení stěn. Všechny nosníky druhého typu byly vyztuženy vlepěným diafragmatem z GFRP. Dva nosníky byly zkoušeny do porušení. Dva nosníky byly zkoušeny pod dlouhodobým zatížením o délce trvání 438 a 379 dní. Poslední vzorek byl zatížen 10 miliony cykly o frekvenci 0,5 Hz.



Obr. 8 Vzorek zaměřený na boulení stojiny (vlevo), vzorek s důrazem na spřažení (vpravo)

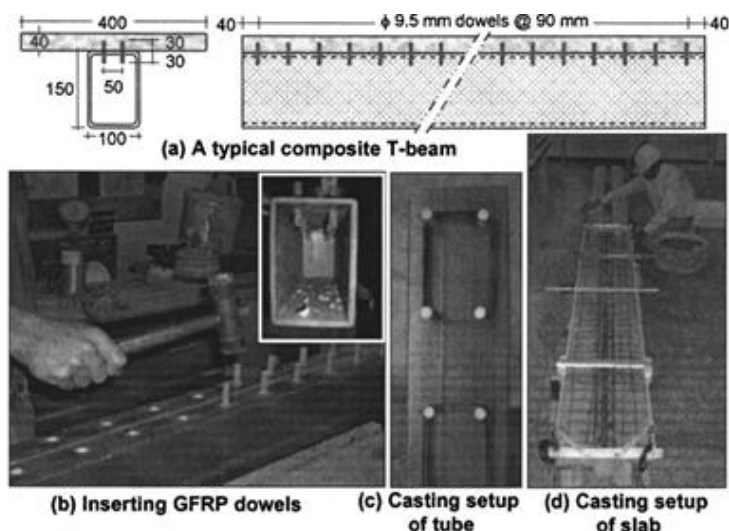
Nosníky prokázaly lineární chování až do porušení. Nosník s dřevěnými výztuhami měl stejnou tuhost jako nosník s GFRP diafragmatem, ovšem únosnost byla o 22% nižší. U prvního typu nosníku se objevilo boulení v místě vynechání výztuh nebo v místě nedostatečně přilepených výztuh. Po počátečních známkách boulení došlo k poruše lepeného spoje diafragmatu, k delaminaci stěny a k následnému kolapsu.

U nosníku druhého typu nedošlo během zatěžování k žádným známkám poruchy spřažení. V obou případech došlo k porušení podrcením betonové desky v tlaku.

Deformace na nosníku, který byl dlouhodobě zatěžován, vzrostly pod zatížením o 30 %, což je podle autorů důsledkem dotvarování betonu, spíše než dotvarování FRP. Tento vzorek při zatížení do porušení prokázal vyšší tuhost i únosnost díky delší době zrání betonu. Na nosníku vystavenému cyklickým zatěžováním zůstaly po odtížení zbytkové deformace odpovídající 50 % maximálního protažení u betonové desky. U CFRP činila zbytková deformace 10 % jeho maximálního protažení.

3.4 2006, Kanada – Fam, Skutezky [18]

V roce 2006 proběhl v Kanadě výzkum kompozitního pultrudovaného nosníku uzavřeného obdélníkového průřezu 150x100x7 s betonovou deskou. Spřažení bylo provedeno pomocí mechanických spojovacích prostředků – hmoždinek z FRP výztuže průměru 9,5 mm o roztečích 50 a 90 mm. Ohybovým zkouškách předcházela série třech protlačovacích zkoušek na profilech 100x100x7. Experimenty byly zaměřeny na porovnání ohybové únosnosti a tuhosti samotného FRP nosníku, nosníku vyplněného betonem, nosníku s betonovou deskou a nosníku vyplněného betonem a spřaženého s betonovou deskou. Nakonec byl vyzkoušen i efekt tenké uhlíkové lamely přilepené ke spodním vláknům nosníku.

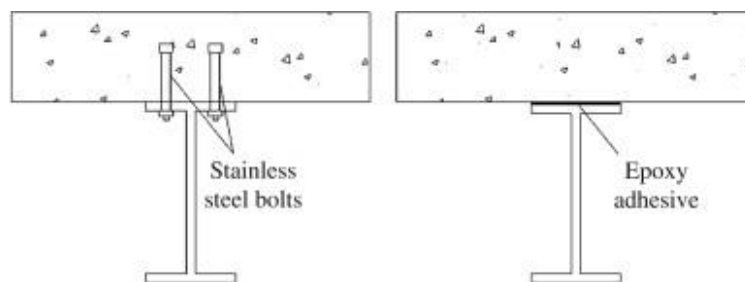


Obr. 9 Příčný a podélný řez nosníkem, instalace spřažení

Experimenty prokázaly, že nosník vyplněný betonem oproti samotnému nosníku má výrazně vyšší únosnost, ovšem tuhost je přibližně stejná. Betonová deska výrazně zvýšila tuhost i únosnost nosníku. Spřažený nosník bez betonové výplně měl nižší tuhost kvůli většímu prokluzu ve spřažení. Uhlíková lamela výrazně zvýšila únosnost nosníku.

3.5 2008, Portugalsko – Correia, Branco, Ferreira [19]

V roce 2008 byl v Portugalsku proveden výzkum a experimenty spřažení pultrudovaných profilů pomocí mechanických spojovacích prostředků a epoxidové pryskyřice. Nosníky použité při experimentech byly vyrobeny metodou pultruze za použití skelných vláken a polyesterové pryskyřice. Jednalo se o nosníky profilu I výšky 200 mm, šířky 100 mm, tloušťka stěny 10 mm. V první fázi byly provedeny protlačovací zkoušky. Celkem bylo vyzkoušeno 6 vzorků. 3 vzorky byly spřaženy pomocí šroubů průměru 8 a 10 mm, další tři vzorky byly spřaženy pomocí epoxidové pryskyřice. Výsledky protlačovacích zkoušek prokázaly, že lepený spoj má vysokou tuhost až do porušení, které nastalo buď v místě lepeného spoje nebo smykovým porušením betonu v blízkosti spoje. Porušení bylo vždy křehké. Naproti tomu vzorky se spojovacími mechanickými prostředky prokázaly jistou úroveň duktility, ovšem jejich tuhost nebyla tak vysoká jako u lepeného spoje. K porušení došlo stříhem šroubů nebo podrcením betonu v oblasti spojovacích prostředků.



Obr. 10 Spřažení pomocí šroubů (vlevo), spřažení pomocí epoxidové pryskyřice (vpravo)

Pro ověření spřažení v ohybu byl proveden v další fázi experiment se šesti spřaženými nosníky a jedním referenčním nespřaženým nosníkem. Spřažené nosníky vykazovaly vyšší tuhost o 350 % a vyšší únosnost o 300 % oproti referenčnímu nosníku. Ze šesti nosníků se pouze jeden porušil v místě spřažení. Zbylé nosníky se porušily podrcením betonové desky, smykovou trhlinou ve stojně nosníku nebo stabilitními jevy, konkrétně boulením stojiny a kolaps stojiny nosníku v místě podpor. Proto v další fázi byly zkoušeny způsoby pro stabilizaci stojiny pomocí obetonování nebo vlepení ocelového profilu tvaru C.

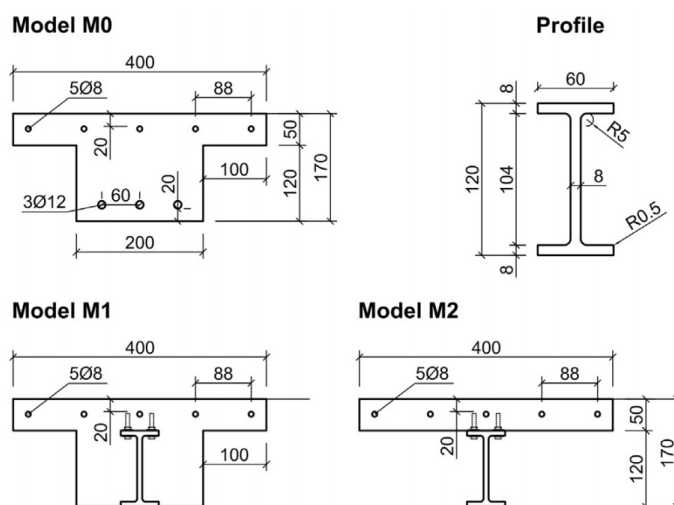
3.6 Další výzkum spřažení pultrudovaných I profilů pomocí šroubů:

- 2015, USA – Nguyen, Mutsuyoshi, Zatar [20]

Byly použity pultrudované profily výšky 250 mm a šířky 95 mm, které byly vyztuženy mimo skelných vláken i uhlíkovými vlákny ve spodní pásnici nosníku. Spřažení bylo uskutečněno pomocí lepeného spoje kombinovaného se šrouby přímými nebo ukloněnými. Horní tenká betonová deska byla z UHPFRC (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete).

- 2015, Španělsko – Neagoe, Gil, Pérez [21]

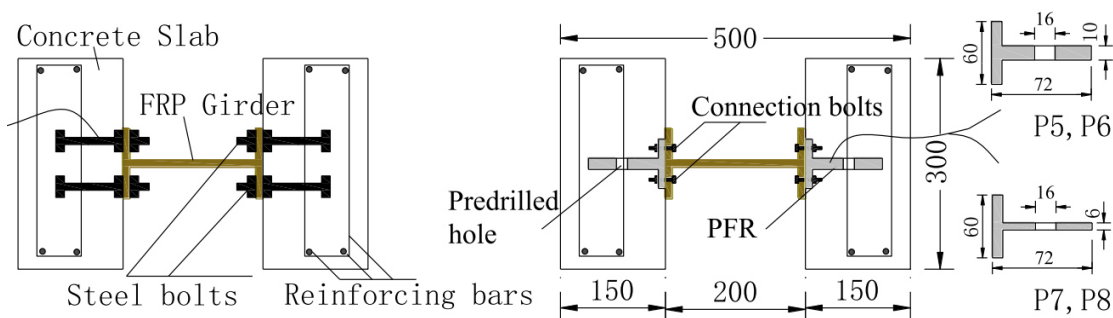
Neagoe a kolektiv rozšířili experimenty o plně zabetonované nosníky.



Obr. 11 Příčné řezy zkoušených nosníků

- 2016, Čína – Zou, Feng, Wang [22]

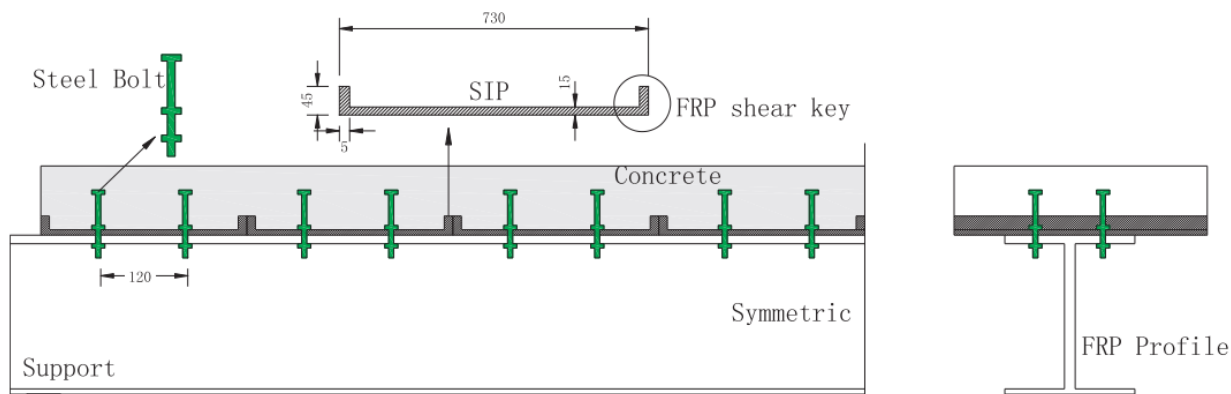
V Číně byly zkoušeny vzorky se šrouby běžné pevnosti, vzorky s vysokopevnostními šrouby a vzorky s perforovanou lištou. Perforovaná lišta měla v porovnání s přípojem pomocí trnů 2,5x větší smyková únosnost. 10x větší tuhost spřažení. Lišta se porušovala smykovými trhlinami v podélném směru díky relativně nízké smykové pevnosti pultrudovaných profilů. K dalšímu vývoji bylo doporučeno spřažení pomocí perforované lišty.



Obr. 12 Půdorysné řezy zkoušených nosníků

- **2018, USA – Zou, Feng, Wang, Wu, Feng [24]**

Zajímavým způsobem spřažení publikoval Zou a kolektiv. Spřažení je uskutečněno pomocí pultrudovaných GFRP profilů, které jsou nalepeny na horní pásnici nosníku v příčném směru a tvoří tak ztracené bednění pro betonovou desku.

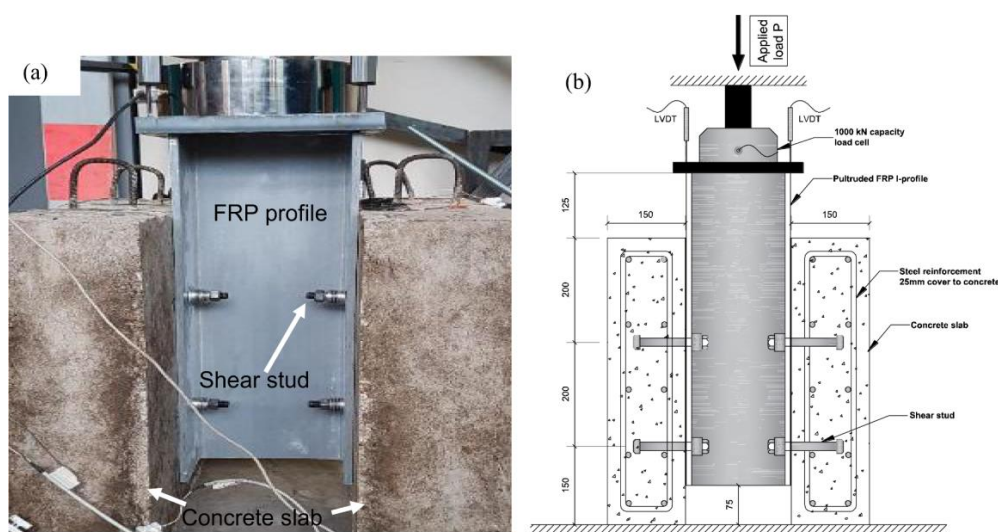


Obr. 13 Podélný a příčný řez zkoušeného nosníku

Kombinované spřažení bylo výrazně lepší než spřažení jen s trny, jelikož zajistilo plné spřažení s betonovou deskou. Spřažení nebylo slabým místem nosníku, jelikož se nosníky porušovaly smykem ve stojině I profilu.

- **2020, UK - Etim, Gand , Saidani, Fom, Ganjian, Okon [25]**

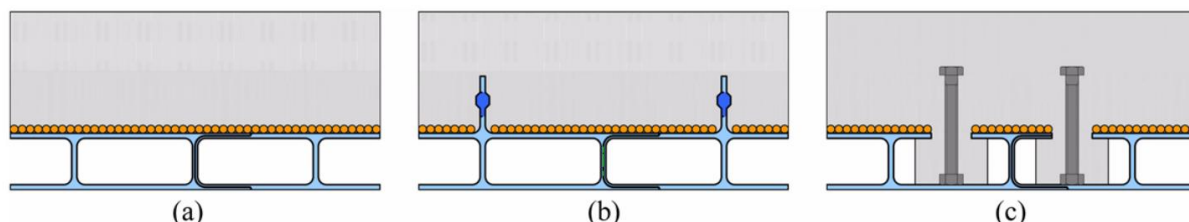
Efekt průměru šroubů byl zkoumán v Anglii. Pultrudované GFRP I nosníky 200x200x10 mm byly spřaženy s běžným betonem pomocí šroubů o průměru 12, 16 a 19 mm. Šrouby průměry 12 mm měly únosnost 48 kN, šrouby průměru 16 mm pak 54 kN. Šrouby průměru 19 mm větší únosnosti nedosáhly, jelikož se změnil způsob porušení a začala se trhat příčná vlákna v pásnici.



Obr. 14 Protlačovací zkouška

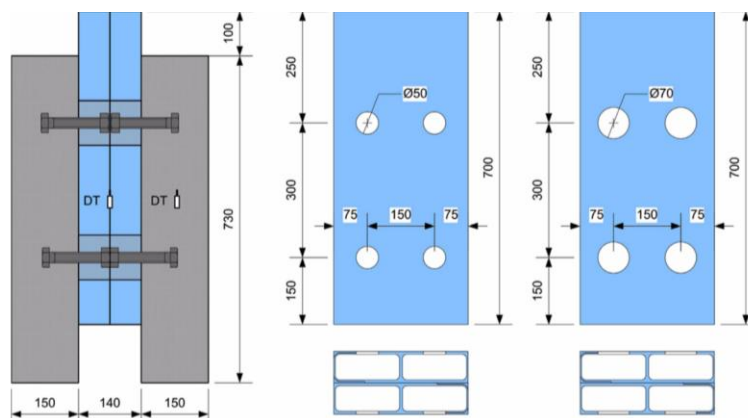
3.7 2010, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [26]

Na univerzitě v Jižní Koreji se zabývali vývojem spřaženého mostkovkového panelu. Byly zkoumány tři různé varianty spřažení. První typ spřažení spočívá v soudržnosti betonové desky s opískovaným povrchem FRP. Další varianty kombinují tento způsob s horizontálními a vertikálními hmoždinkami.



Obr. 15 Způsoby spřažení: a) opískovaný povrch b) kombinace opískovaného povrchu a horizontálních hmoždinek c) kombinace opískovaného povrchu a vertikálních hmoždinek

Před ohybovými zkouškami byla provedena série protlačovacích zkoušek na pultrudovaných obdélníkových trubkách. Byly zkoušeny otvory průměru 50 a 70 mm o rozteči 300 mm na neopískovaných trubkách a soudržnost s opískovaným povrchem bez otvorů.



Obr. 16 Uspořádání protlačovací zkoušky

Vzorky s opískovaným povrchem měl podstatně vyšší tuhost a dvojnásobnou únosnost, k porušení však došlo křehkým způsobem. Spřažení pomocí betonových hmoždinek naproti slabším výsledkům únosnosti vykázal vysokou úroveň duktility. Při ohybových zkouškách se proto zkoušely 2 typy panelů. Jeden pouze s povrchovou úpravou a druhý s povrchovou úpravou a vertikálními hmoždinkami. Tyto vzorky ovšem měly velice podobné výsledky s křehkým charakterem porušení. Výhoda hmoždinek nakonec byla prokázána při únavových zkouškách, kdy se vzorek s pouze opískovaným povrchem porušil už při 43 tisících cyklech, zatímco vzorek s kombinací opískovaného povrchu a hmoždinek se neporušil ani po 2 milionech cyklech, kdy byla

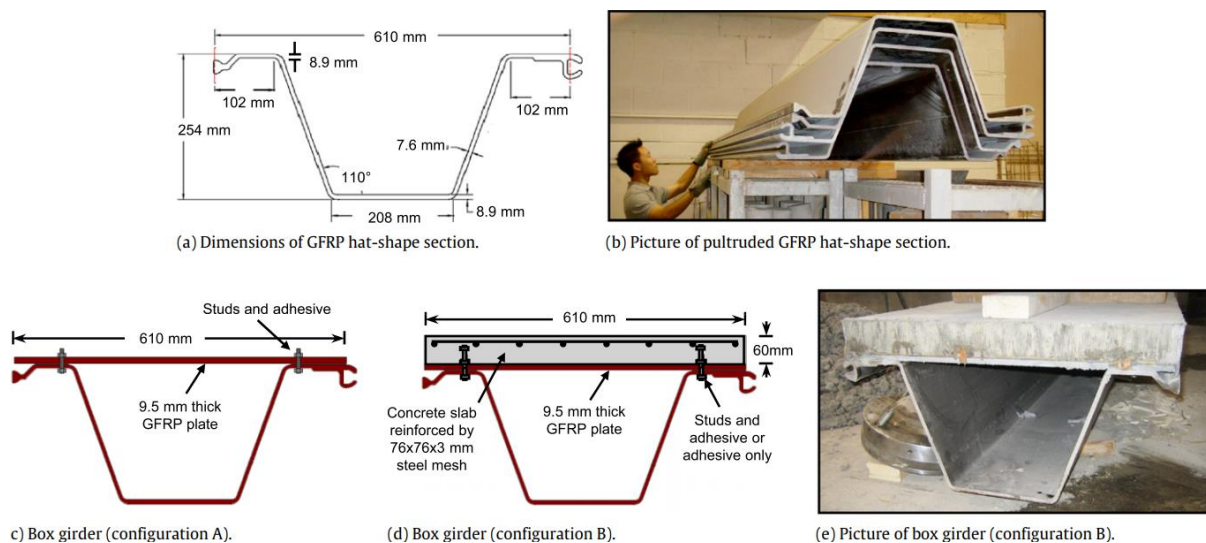
zkouška ukončena. Závěrem těchto výsledků je, že nejvhodnější systém spřažení je kombinace obou typů. Opískovaný povrch zajišťuje vysokou tuhost a únosnost, zatímco betonové hmoždinky zajišťují únavovou pevnost a odtržení betonové desky v normálovém směru.

3.8 2010, Kanada – Fam, Honickman [27]

GFRP boxový nosník byl vyroben metodou pultruze v Kanadě. Nosníky byly vyrobeny o délce 3,3 m. Nosník byl zkoušen bez betonové desky, dále pak s betonovou deskou tloušťky 60 mm spojenou s GFRP komorou pomocí lepeného spoje kombinovaného s ocelovými trny.

Samotný GFRP nosník bez betonové desky selhal vyboulením horní pásnice v tlaku. Nosník s kombinovaným spřažením pomocí trnů a lepeného spoje vykázal o 87 % větší ohybovou tuhost a 112 % větší tuhost než nosník bez betonové desky.

Nosník se spřažením pomocí smykových trnů a lepeného spoje prokázal o 50 % vyšší pevnost než nosník, který měl pouze lepený spoj. Tuhost však byla stejná v obou případech.



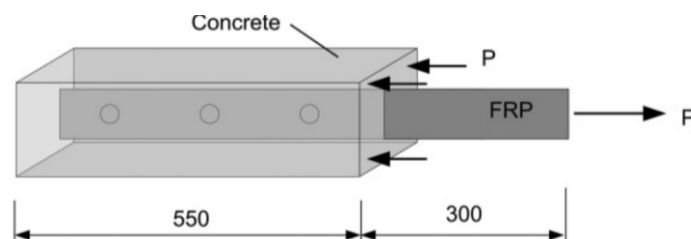
Obr. 17 Příčné řezy a foto představených nosníků

Nosník, který měl vyplněnou celou komoru betonem měl stejnou tuhost i únosnost jako vzorek s betonovou deskou v horních vláknech. Jeho hmotnost však byla dvojnásobná. Jeho použití je však vhodné v podporových oblastech a u spojitých nosníků v místě záporného ohybového momentu.

3.9 2012, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [28]

Pro objasnění tuhosti v závislosti na jednotlivých parametrech spřažení proto byla provedena série tahových zkoušek o 14 vzorcích. Pultrudované ploché tyče o průřezu

80x8 mm byly opatřeny různými počty a průměry otvorů. Před zabetonováním do betonového bloku byly nalubrikovány pro vynechání vlivu soudržnosti.

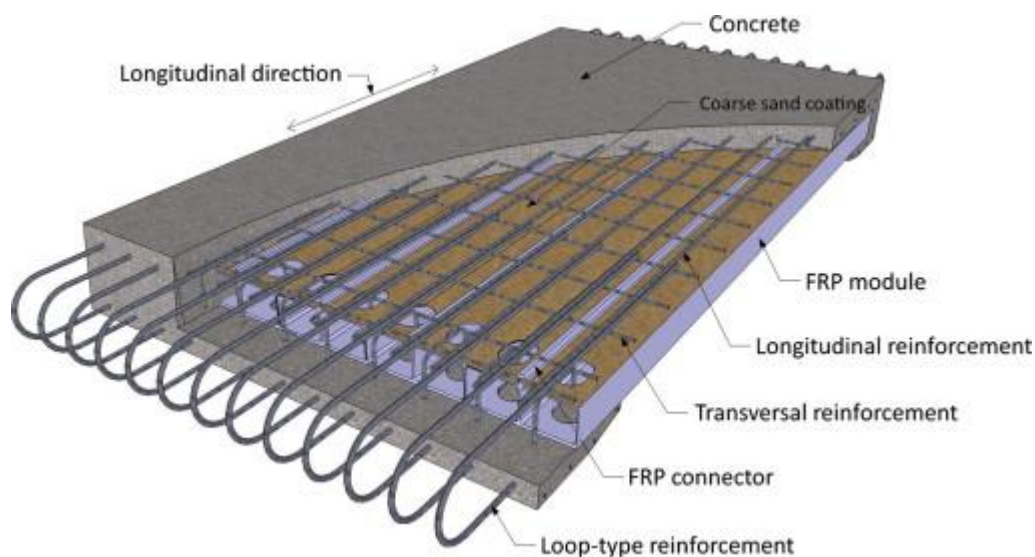


Obr. 18 Schéma zkoušky spřažení

Výsledkem experimentů jsou tyto závěry: Únosnost samotné betonové hmoždinky je přímo úměrná průměru otvoru. Maximální únosnost není přímo úměrná počtu hmoždinek, kvůli postupnému porušení jednotlivých hmoždinek, což je důsledek nerovnoměrného rozložení zatížení, kvůli nízkému modulu pružnosti FRP. Byly sestaveny vztahy pro výpočet tuhosti spřažení v závislosti na velikosti otvoru, jejich počtu a pevnosti betonu. Pomocí regresní analýzy byly stanoveny konstanty figurující v těchto vzorcích.

3.102012, Jižní Korea – Cho, Park, Kim, Cho, Kim [29]

Stejný tým provedl experimenty prefabrikovaného modulu mostovky pro zavěšený most. Panel sestává z pultrudovaných čtvercových trubek, jejichž vrchní povrch je opískovaný pro zvýšení soudržnosti s betonem. Na konci profilů je provedena perforace pro zvýšení podélné smykové únosnosti v místě maximální posouvající síly. Byly vyrobeny celkem 4 nosníky, které byly před samotným experimentem předepnuty různou silou.

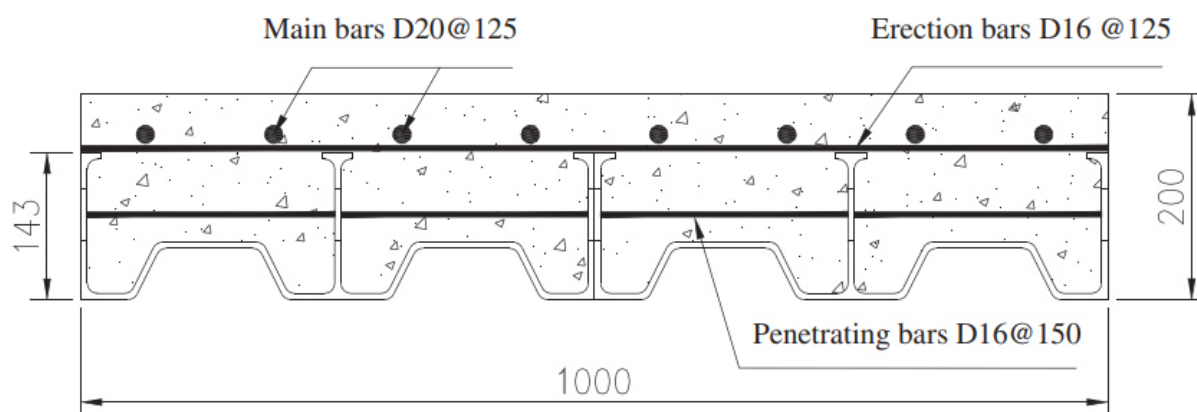


Obr. 19 Navržený mostkový panel pro zavěšené mosty

Vzory se porušovaly podélnými trhlinami v místě betonové hmoždinky způsobené podélným smykovým napětím v kombinaci s napětím od záporného momentu. Nosník dosahoval vysoké únosnosti, porušení bylo náhlé bez upozornění. Úroveň předpětí měla vliv pouze na velikost trhlin, nikoli na únosnost panelu.

3.11 2012 Čína, He, Liu, Chen, Dai [30]

Nový typ panelu byl navržen a vyzkoušen v Číně. GFRP pultrudovaný trapézový plech byl navržen se žebry ve tvaru T a slouží zároveň jako ztracené bednění pro spřaženou betonovou desku. V žebrech byly vyvrtány otvory, které zajišťují spřažení v základní verzi vzorku. V dalších vzorcích byl pro zlepšení spřažení přidány provlečená výztuž, opískování povrchu a jejich kombinace.



Experimental series of hybrid deck.

Test Specimen	Penetrating bars	GFRP–concrete interface
S-V-1	Without	Unbonded
S-V-2	Without	Sand coating
S-S-1	Penetrating steel bar	Unbonded
S-S-2	Penetrating steel bar	Sand coating
S-G-1	GFRP bar	Unbonded
S-G-2	GFRP bar	Sand coating

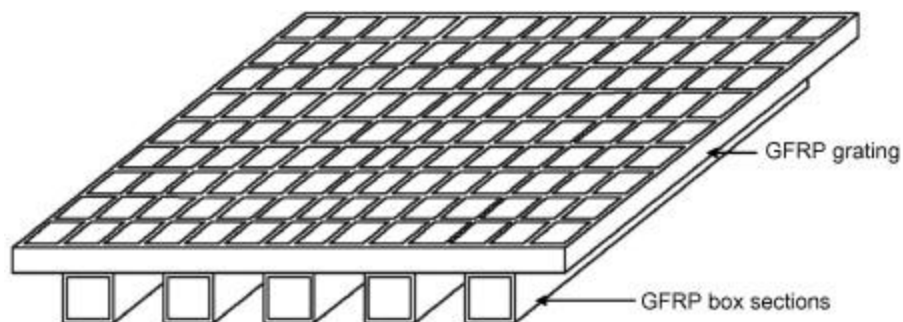
Note: S (First) – Static test; V – without penetrating bars; S (Second) – with penetrating steel bars; G – with penetrating GFRP bars; 1-Unbonded; 2-Sand coating; The steel bars installed on the top layer for S-V-1, S-V-2, S-S-1 and S-S-2, while the GFRP bars for S-G-1 and S-G-2.

Obr. 20 Příčný řez hybridního kompozitního panelu, popis spřažení jednotlivých vzorků

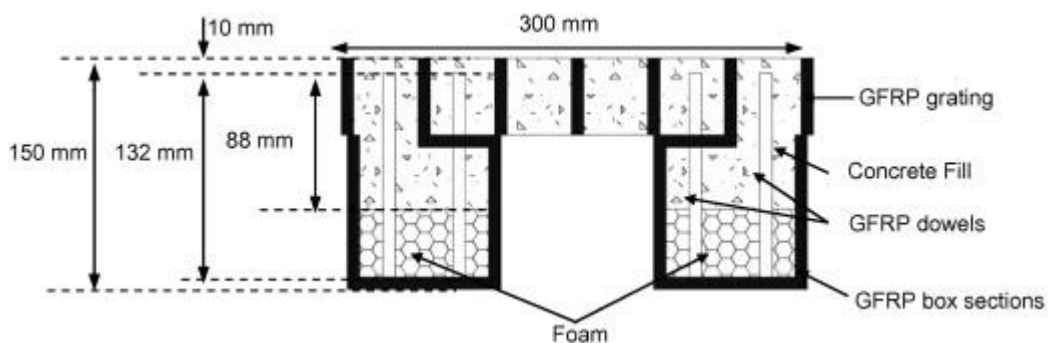
Vzorky byly zkoušeny jako prosté nosníky na rozpětí 3 m. Nejlepších výsledků dosáhly vzorky s opískovaným povrchem, zejména s ohledem na prokluz. Provlečená výztuž zvýšila maximální únosnost i tuhost. Lepší výsledky měla ocelová výztuž, avšak ne výrazně. Vzorky dosáhly požadované únosnosti z hlediska norem.

3.122013, Velká británie - Gai, Darby , Ibell, Evernden [31]

Zajímavý způsob spřažení pomocí betonových hmoždinek publikovali v roce 2013 Gai, Darby, Ibell a Evernden. Na pultrudovaný nosník uzavřeného čtvercového průřezu byl nalepen pororošt z FRP. Skrze oka pororoštu byly do nosníku vyvrtány otvory průměru 42 mm, do kterých byly uloženy kolíky z FRP o průměru 10 mm. Pororošt spolu s dutinou nosníku byl zalit betonovou směsí. Byly provedeny protlačovací zkoušky na dvou vzorcích. Nosník u druhého vzorku byl z poloviny vyplněn pěnou pro úsporu betonu a snížení vlastní tíhy výsledného nosníku.



Obr. 21 Koncept spřaženého panelu



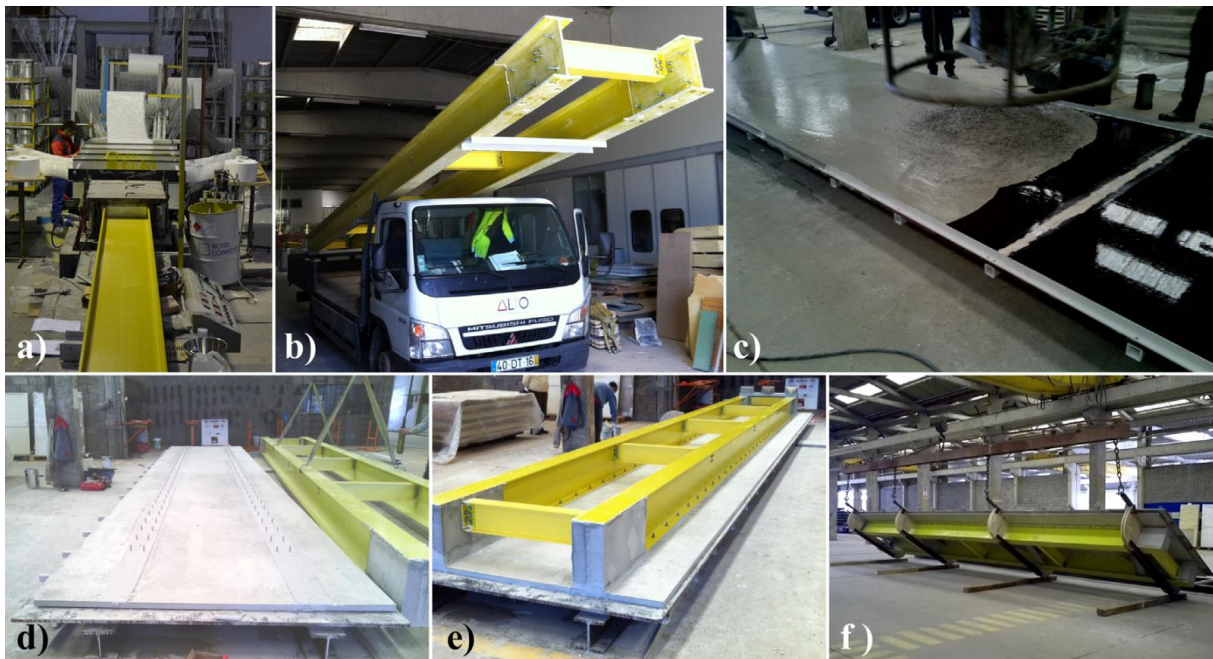
Obr. 22 Příčný řez vzorkem pro ohybovou zkoušku

Oba vzorky vykázaly podobnou tuhost i únosnost, proto se dále pokračovalo s vývojem nosníku, který byl z poloviny vyplněn pěnou. Byly vyzkoušeny další vzorky s vystřídáním uspořádáním spřažení. Vzorky s tímto typem spřažení se chovaly podobně jako předchozí vzorky, porušili se však při větší deformaci, což má pozitivní efekt na duktilitu nosníku. Ohybové zkoušky se proto prováděly už jen ve verzi spřažení s vystřídáním vzorem a s nosníkem vyplněným z poloviny pěnou. Bylo vyzkoušeno celkem 6 nosníků s různým počtem otvorů a s různým vyztužením pomocí FRP kolíků. Všechny nosníky prokázaly vysokou duktilitu a schopnost konstrukce varovat před úplným porušením. Se zvyšujícím se počtem hmoždinek se počáteční tuhost neměnila, ovšem únosnost výrazně narůstala.

3.132014, Portugalsko – Gonilha, Barros, Correia, Sena-Cruz, Branco, Ramos, Gonçalves, Alvim, Santos [32]

Tříletý výzkumný projekt Pontalumis se zabýval vývojem prostě podepřené lávky o rozpětí 11 m a šířky 2 m, která se skládá ze dvou GFRP I nosníků 400 x 200 (x15) mm² a 37,5 mm tlusté desky z materiálu označovaného jako SFRSCC (steel fibre reinforced self-compacting concrete).

Betonová deska je připojena k nosníkům pomocí lepeného spoje epoxidovým lepidlem o tloušťce 2 mm a nerezových šroubů M10. Nerezové šrouby byly vlepeny do betonové desky do předem vyvrtaných otvorů epoxidovým lepidlem. V podporových oblastech byly nosníky vybetonované kvůli ztrátě stability. Nejdříve byla odlita betonová deska, po vytvrzení do ní byly upevněny spojovací prostředky a na lepidlo uloženy FRP rošt. Po 9 dnech byla otočena o 180°.

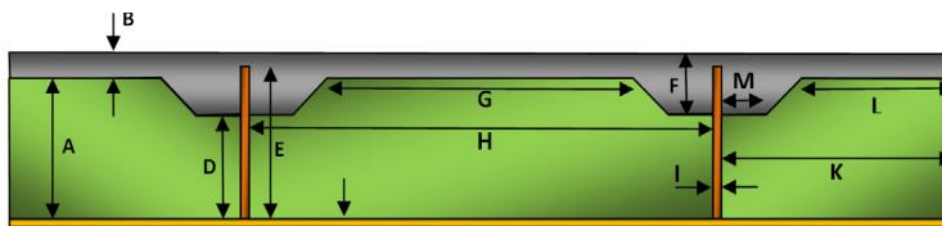


Obr. 23 Výroba prototypu (a) Výroba GFRP nosníků (b) převoz GFRP komponent (c) lití SFRSCC desky (d) aplikace epoxidového nátěru (e) umístění GFRP roštu (f) Otočení lávky do finální polohy

Statické testy provedené pro několik konfigurací zatížení osvědčily adekvátní statickou odezvu hybridní lávky, prokazující, že splňuje požadavky na průhyb pro mezní stav použitelnosti a mezní stavy únosnosti. Dynamické testy zatížením chodci ukázaly, že existuje velmi nízká pravděpodobnost nepohodlí chodců v důsledku vibrace konstrukce.

3.142016, Portugalsko, Mastali, Valente, Barros [33]

Kvůli nízké objemové hmotnosti FRP byl v Portugalsku navržen panel určený pro rekonstrukce starých zděných budov. Panel se skládá z kompozitní desky se žebry, která je spřažena pomocí perforace žebér s betonovou deskou tloušťky 20 mm zesílenou v místě žebér na 50 mm. Mezi FRP a betonovou deskou je jádro z polyuretanové pěny, která slouží jako ložná plocha pro lití betonové desky, jako izolace a jako podpora proti boulení kompozitu.



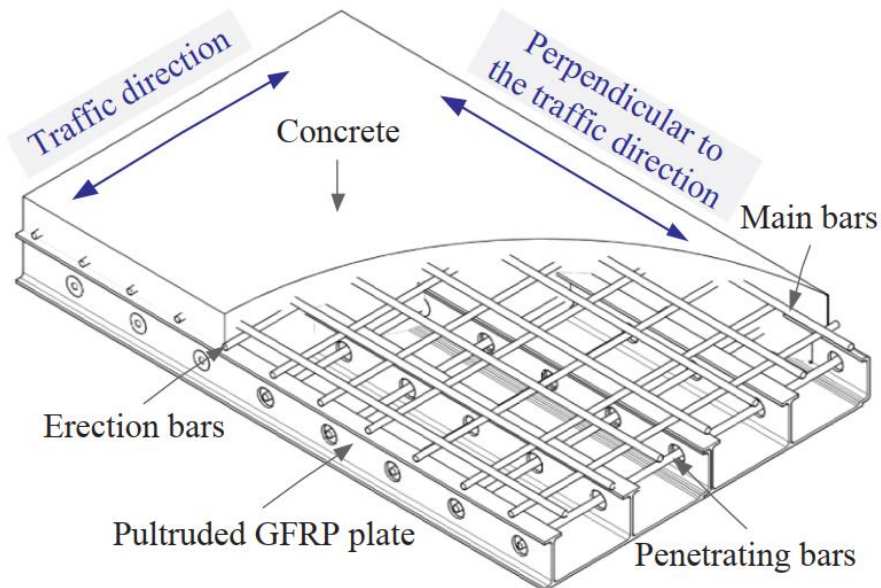
Name	Material name	Material type	Height or Width [mm]	
			Slab 1	Slab 2
A	Foam core	Polyurethane	149	115
B	DHCC	Reinforced mortar	20	20
C	GFRP skin	GFRP	3	5
D	Foam core	Polyurethane	119	85
E	GFRP rib	GFRP	160	130
F	DHCC	Reinforced mortar	50	50
G	Foam core	Polyurethane	260	260
H	Foam core	Polyurethane	400	400
I	GFRP rib	GFRP	6	4
K	Foam core	Polyurethane	200	200
L	Foam core	Polyurethane	130	130
M	Foam core	Polyurethane	40	40

Obr. 24 Navržený kompozitní panel s rozměry

Parametry panelu byly stanoveny na základě numerické parametrické studie. Jako nejdůležitější parametr se ukázala tloušťka kompozitního žebra. Spřažení pomocí perforace mělo dostatečnou tuhost i únosnost pro splnění mezních stavů.

3.152018, Čína, USA – Zuo, Mosallam, Xin, Liu, He [34]

Vývoj mostkovkového panelu publikoval Zuo a kolektiv. Bylo vyrobeno 6 mostkovkových panelů z GFRP o konstantní tloušťce kompozitu 6 mm s výztuhami ve tvaru T vzdálenými příčně 250 mm od sebe s výškou žebra 130 mm a nabetonovou deskou. Celková tloušťka vzorku byla 240 mm. spřažení bylo provedeno pomocí otvorů v žebrech $\varnothing 50$ mm po 200 mm. Celý povrch panelu ve styku s betonem byl natřen pryskyřicí a opískován.



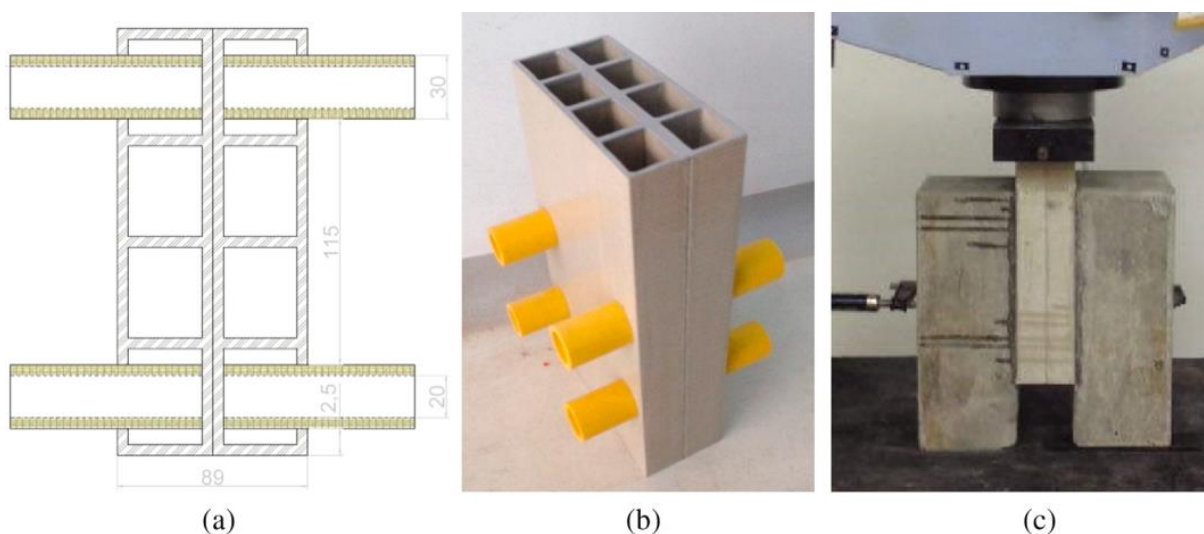
Obr. 25 Navržený mostkovkový kompozitní panel

Panel prokázal dostatečnou únosnost pro použití na mostech v příčném směru. Byly analyzovány 3 módy porušení. Diagonální smyková trhlinka v betonové desce, porušení celého panelu ohybovým momentem a podélná smyková trhlinka v žebře kompozitu. Nevýhodou tohoto panelu byla nízká duktilita. V ekonomické kalkulaci byl tento panel 4x dražší řešení než železobetonová mostovka z hlediska ceny materiálu. Autoři se však domnívají, že nižší náklady na sestavení bednění a lidskou práci spolu s vyšší trvanlivostí můžou vyšší ceny materiálu vyvážit.

3.162018, Malajsie, Austrálie – Kong, Yang, Lee [35]

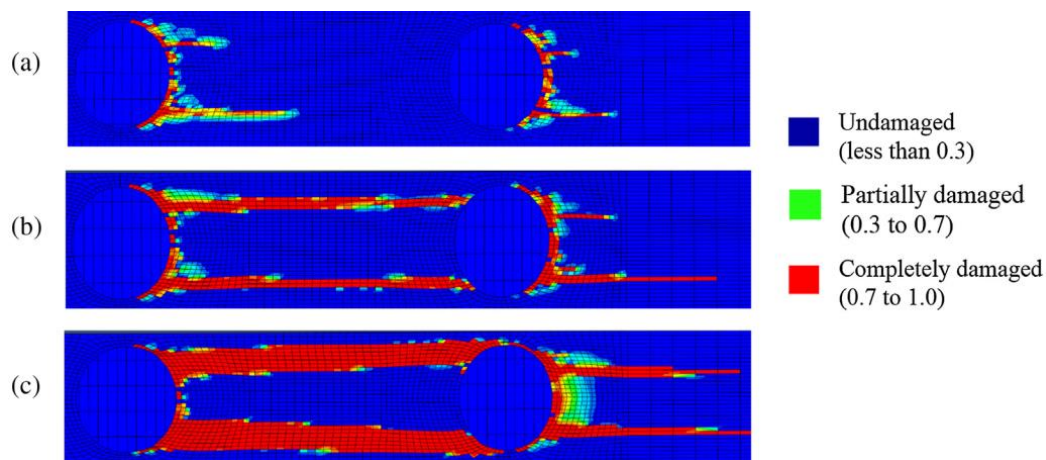
Zajímavý způsob spřažení publikovali Kong, Yang a Lee. Navrhli způsob spřažení pomocí kruhových GFRP trubek, které byly uloženy do vyvrtaných otvorů v komorovém GFRP panelu. Pultrudovaný komorový nosník rozměru 500 x 45 mm se třemi mezilehlými žebry. Tloušťky stěn byly 5 mm.

Byly použity 3 typy spřažení. GFRP trubky o průměru 38 mm, tloušťky 5 mm. Ocelové trubky průměru 38 mm a tloušťky 1 mm. Pro třetí typ vzorku byly předem vytvrzené betonové kvádry nalepeny epoxidovým lepidlem.



Obr. 26 a) náčrtek osmikomorového GFRP průřezu s GFRP trubkami fungující jako smykové trny b) foto vzorku bez betonové desky c) sestava při experimentu

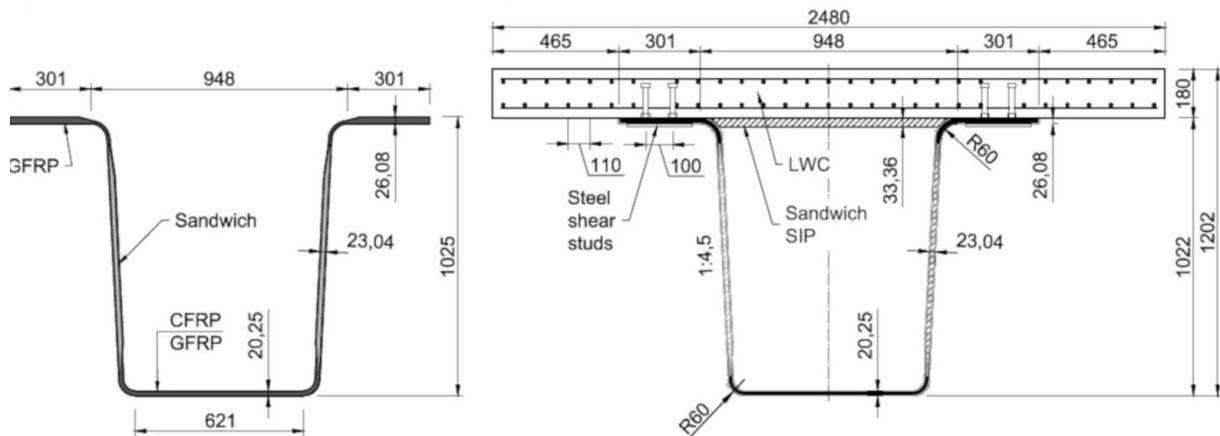
Vzorky s ocelovými trubkami měly téměř poloviční tuhost oproti GFRP trubkám. Vzorek s ocelovými trubkami však vykazoval větší duktilitu. Mód porušení byl za vzniku podélných smykových trhlin mezi otvory v GFRP panelu.



Obr. 27 a) Počínající smykové trhliny v GFRP komorového průřezu b) pokračování smykových trhlin v podélném směru c) Poškození kompozitu při maximálním zatížení

3.172019, Polsko – Siwowski, Rajchel [36]

V roce 2019 byl publikován článek o vývoji spráženého nosníku z FRP a lehkého betonu, který završil výstavbou mostu, v kterém tyto nosníky byly použity. Požadavky na mostní konstrukci byly: šířka mostu 10,5 m, prostý nosník o rozpětí 22 m se zatížitelností 40 tun.



Obr. 28 Příčný řez nosníku a) FRP skořepina b) hybridní FRP-LWC nosník

Nosník se skládá z FRP skořepiny, která má příčný řez ve tvaru U s lehce nakloněnými stojinami. Maximální šířka nosníku je 1550 mm a výška 1025 mm. Stojiny jsou vyztuženy skelnými vlákny, pásnice je vyztužena uhlíkovými i skelnými vlákny. Ve stěnách je v jádru použita PVC pěna.

Spřažení je realizováno pomocí galvanizovaných trnů navařených na ocelový plech, který je vlepen na spodní hranu horní pásnice. Pro horní desku byl použit lehký beton LWC35/38 vyztužený dvěma vrstvami GFRP výztuže průměru 12 mm

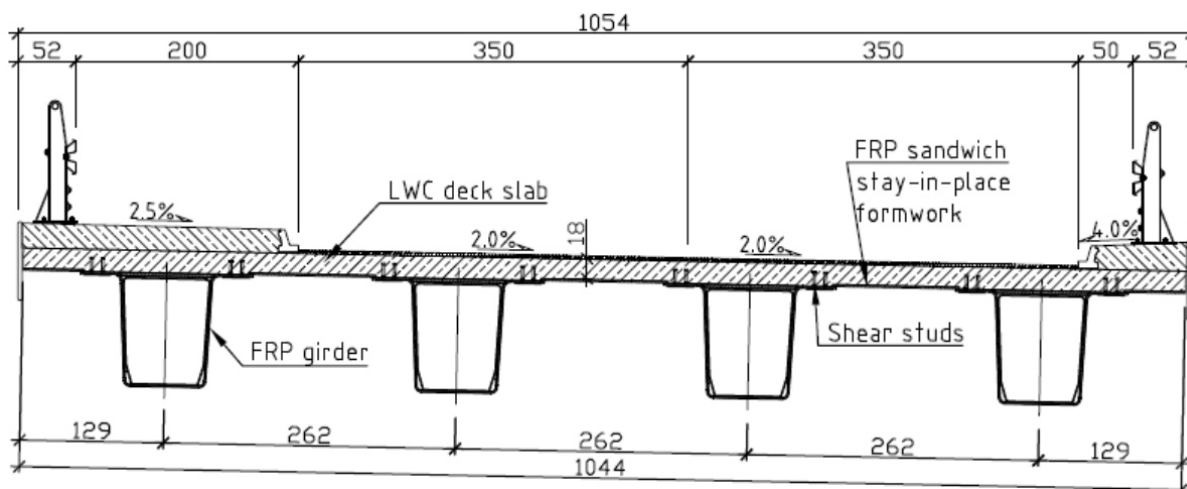
Nosník v plné velikosti byl v laboratoři vyzkoušen pro mezní stav použitelnosti odpovídající polské verzi eurokódu, následně byl zatížen tak, aby byly zjištěny vlastní frekvence a logaritmický dekrement útlumu. Poté byl nosník zatížen na mezní stav únosnosti a do porušení. Nosník unesl maximální ohybový moment 5922 kNm při kterém již došla kapacita zatěžovacích lisů.



Obr. 29 Spřahovací trn, uspořádání zatěžovací zkoušky

Po úspěšném experimentu začala v roce 2015 stavba mostu, blízko města Rzeszow přes řeku Ryjak.

Po zbudování opěr byly jeřábem osazeny mostní nosníky a následně zmonolitněny betonovou deskou na místě mostní konstrukce. Výstavba mostu trvala 6 měsíců. Následně proběhla statická i dynamická zatěžovací zkouška, který byla úspěšná, a tak mohl být most uveden do provozu.



Obr. 30 Příčné uspořádání realizovaného mostu

3.182020, Čína - Liu, Feng, Lu , Yang , Wu [37]

Pultrudovaný komorový GFRP nosník byl navržen, experimentálně ověřen a použit ve dvou realizacích v Číně. Nosník vznikl z předchozí generace nosníku, který neobsahoval vnitřní výztuhy a tloušťka jeho stěn byla 14 mm. Jelikož byl u tohoto nosníku problém se stabilitou stěn, byly v nové generaci tohoto nosníku přidány vnitřní ztužující žebra, které zajišťují stabilitu stojiny. Touto úpravou docílili zmenšení tloušťky stěn ze 14 mm na 10 mm a zároveň zvětšení únosnosti stěn v boulení o 212 %.



(a) B1 and B2: GFRP beams

(b) B3 and B4: hybrid GFRP-concrete beams

Obr. 31 Hybridní 3 komorový nosník

Spřažení je realizováno pomocí betonářské výztuže průměru 10 mm umístěnou v otvorech horní pásnice svisle a betonářské výztuže 6 mm procházející skrz stojiny nosníku a následnému nanesení epoxidové pryskyřice a opískování horního povrchu pásnice a bočních stran stojin vybíhajících nad úroveň horní pásnice ve styku s betonem. Nosník byl v rámci parametrické studie a numerické analýzy modelován s tloušťkami betonové desky 60, 90, 120, 150, 180 a 210 mm. Rozdíl v únosnosti při zvětšení tloušťky z 60 mm na 210 mm vedlo ke zvýšení ohybové únosnosti o 63 %. Oproti nosníku předchozí generace nosník vykázal zvětšení únosnosti o 183 %. Nosníky lze skládat vedle sebe a následně je spojit předpínacím táhlem ve spodní části průřezu. Nosníky byly použity na dvou lávkách v Číně v provincii Hebei.



Obr. 32 Lávka o délce 45 m (9+ 27 +9 m) v provincii Hebei v Číně



Obr. 33 Obr. 34 Lávka o délce 24 m (8+ 16 m) v provincii Hebei v Číně

4 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je vyvinout nový typ spřaženého nosníku z FRP a HPC. Dle provedených experimentů ve světě podává nejlepší výsledky spřažení lepený spoj, který se však porušuje náhle bez upozornění, nebo spřažení pomocí perforované lišty. Perforovaná lišta byla výhradně zkoušena u pultrudovaných profilů, které mají nízké vyztužení v příčném směru. To předurčovalo způsob porušení pomocí podélných trhlin ve stojině průřezu. Z důvodu absence pro výrobu vysokých pultrudovaných profilů vhodných pro mostní nosníky, která je zapříčiněná vysokými pořizovacími náklady na pořízení formy je pro výzkum v této disertační práci zvolen FRP materiál, který je vyroben metodou ruční laminace. Takto vyrobený materiál umožňuje vyrobit nosník libovolného průřezu, v příčném směru lze nosník dostatečně vyztužit a zvýšit tak únosnost spřahovací lišty.

5 Metody dosažení cílů disertační práce

Metody pro dosažení cílů disertační práce se dělí na experimentální a teoretickou část:

Experimentální část práce

V rámci experimentální části práce budou provedeny pilotní protlačovací zkoušky s různými parametry spřažení – velikostí otvoru a jejich roztečí. Výsledky experimentu budou analyzovány a vhodný typ spřažení pak bude použit při výrobě nosníku reálné velikosti, jehož únosnost bude ověřena zatěžovací zkouškou ve čtyřbodovém ohybu. Výsledky experimentální části budou porovnány s požadavky na výrobu lávky šířky 3 m a různých rozpětí.

Konkrétně se jedná o tyto činnosti:

- Provedení pilotních protlačovacích zkoušek s různou velikostí otvorů a roztečí
- Provedení zkoušky v ohybu na nosníku reálné velikosti s vhodným typem spřažení

Teoretická část práce

V teoretické části práce pak budou vyhodnoceny data naměřená při experimentech. Bude zanalyzován způsob porušení, únosnost a tuhost použitého spřažení. Bude nalezen vhodný materiálový model FRP, který bude použit pro tvorbu komplexního modelu protlačovacích zkoušek a kompozitního nosníku. Tyto modely budou použity pro popsání chování spřahovací lišty a kompozitního nosníku v ohybu.

Konkrétně se jedná o tyto činnosti:

- Stanovení únosnosti spřažení použitého při protlačovacích zkouškách
- Analýza vlivu parametrů spřažení z hlediska způsobu porušení, únosnosti a tuhosti
- Nalezení vhodného materiálového modelu pro FRP a jeho validace
- Provedení numerického modelu protlačovacích zkoušek a jeho validace
- Popsání chování FRP perforované lišty v betonu
- Stanovení únosnosti kompozitního nosníku
- Analýza nosníku z hlediska způsobu porušení, únosnosti a tuhosti
- Provedení numerického modelu kompozitního nosníku a jeho validace
- Popsání chování kompozitního nosníku v ohybu
- Analýza možnosti použití nosníku pro lávku různých rozpětí
- Doporučení pro praktický návrh a náměty pro další výzkum

6 Experimentální část

Experimentální část práce je rozdělena na tři části. První část má za cíl stanovení vlastností materiálů použitých na výrobu vzorků pro protlačovací zkoušku. Jedná se zejména o stanovení meze pevnosti a modulu pružnosti těchto materiálů:

- Ručně vyráběné FPR desky ze skelných vláken a polyesterové pryskyřice
- Pultrudované FRP výztuže se středem z uhlíkových vláken a se skelnými obvodovými vlákny
- HPC betonu

Druhá část se zaměřuje na ověření chování spřažené perforované FRP desky v betonu pomocí protlačovacích zkoušek. Byly vyzkoušeny 3 vzorky. Velikost a vzdálenost otvorů perforované lišty byla zvolena tak, aby vedla k objasnění vlivu jednotlivých parametrů pro tuhost a únosnost spřažení. V FRP desce proto byla provedena vždy dvojice otvorů o průměru:

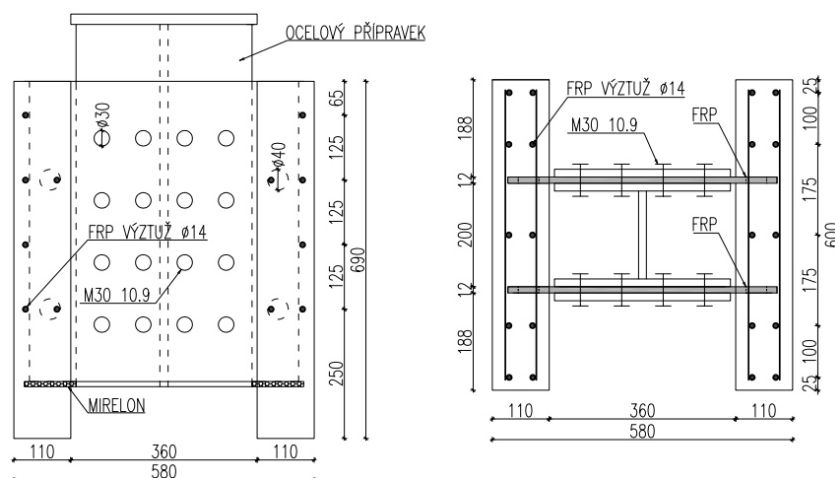
- Ø50 po 300 mm
- Ø50 po 250 mm
- Ø40 po 250 mm

Ve třetí části byl proveden experiment nosníku o průřezu reálné velikosti na rozpětí 3,8 m. Konstrukční výška nosníku byla 450 mm. Bylo použito spřažení pomocí otvorů Ø35 po 150 mm. Výsledky experimentů sloužily k validaci vytvořených numerických modelů v teoretické části práce.

6.1 Protlačovací zkoušky

V první etapě experimentů byly provedeny protlačovací zkoušky FRP desek spřažených pomocí perforace stojiny s betonovou deskou. V rámci experimentu byly provedeny materiálové zkoušky FRP a betonu. V průběhu protlačovacích zkoušek byly otestovány tři vzorky s FRP deskami tloušťky 12 mm, které byly zhotoveny metodou ruční laminace. Pro vnesení zatížení do FRP byl zhotoven zatěžovací přípravek – ocelový H profil, ke kterému byly FRP desky upevněny pomocí šroubů M30 10.9. U každého otvoru byly nainstalovány tenzometry pro vyhodnocení napětí v okolí otvorů. Betonová deska byla vyztužena kompozitní výztuží průměru 14 mm. Každým otvorem v FRP desce procházel vždy jeden prut výztuže.

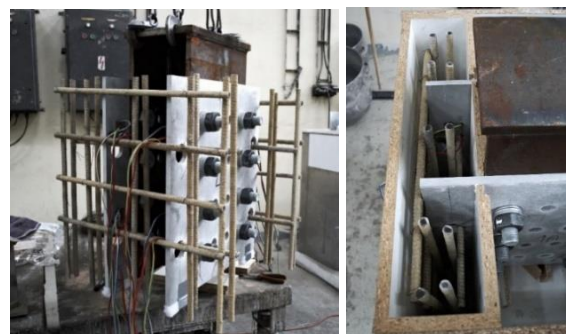
Před samotným uložením vzorků do bedněni byla dolní hrana lišty opatřena vrstvou mirelonových proužků o celkové tloušťce 30 mm tak, aby se smyková síla přenášela perforovanou lištou, nikoli jejím čelem. Zkušební vzorky byly vybetonované ve svislé poloze do bedněni z dřevotřísky s hladkým povrchem viz Obr. 36. Betonová směs byla průběžně hutněna na vibračních stolech. Spolu se třemi vzorky byla vybetonována i zkušební tělesa pro materiálové zkoušky.



Obr. 35 Schéma vzorku č.3

V 1. etapě zkoušek byly vyzkoušeny 3 typy spřažení o těchto parametrech:

- Vzorek č.1 - Otvory Ø50 po 300 mm
- Vzorek č.2 - Otvory Ø50 po 250 mm
- Vzorek č.3 - Otvory Ø40 po 250 mm



Obr. 36: Uspořádání výztuže (vlevo), vzorek před betonáží (vpravo)

6.1.1 Materiálové zkoušky

Před protlačovací zkouškou byly provedeny materiálové zkoušky FRP materiálu, současně s protlačovací zkouškou pak byly provedeny materiálové zkoušky betonu.

6.1.1.1 FRP materiál

Pro stanovení materiálových vlastností kompozitní FRP desky byla použita norma ASTM D 3039 [2]. Tato norma se zabývá zkoušením materiálových vlastností kompozitů v tahu. Stanovuje přípravu vzorků, způsob zkoušení a vyhodnocení výsledků.

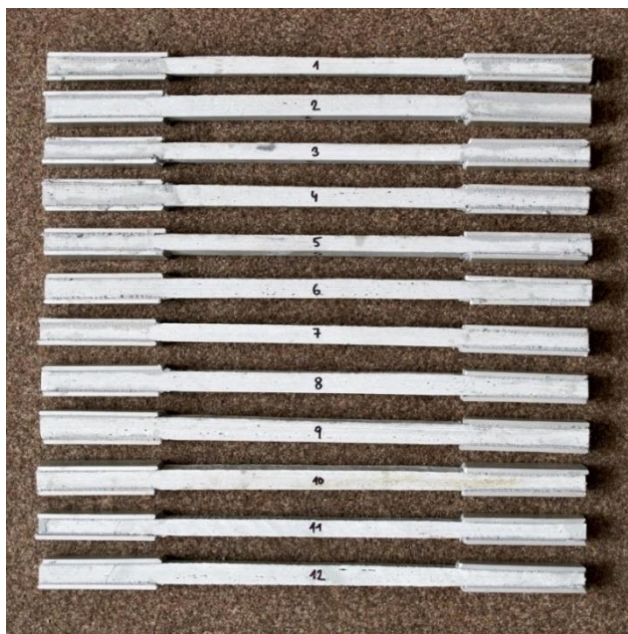
6.1.1.1.1 Příprava vzorků a jejich značení

Ve vzorcích pro protlačovací zkoušky bylo použito 6 ručně vyráběných FRP desek. Jako krajní vrstvy jsou zde použity skelné rohože. Tyto vrstvy mají stejné vlastnosti bez ohledu na směr namáhání, jelikož se jedná o nasekaná vlákna uspořádaná nahodile ve vrstvě rohože. Jako vnitřní vrstvy je zde použito šesti vrstev tkanin, které mají stejné vlastnosti v na sebe kolmém směru. Vlastnosti desky by proto měly mít stejné vlastnosti v příčném i podélném směru. Pro ověření tohoto předpokladu a vyloučení chyby ve výrobě byly z každé desky odebrány 2 vzorky, a to v podélném i příčném směru.

Norma ASTM D 3039 přesně nestanovuje rozměry vzorků, pouze je doporučuje. Z každé FRP desky bylo možné odebrat 20 mm. Prořez kotouče, na kterém byly vzorky řezány, odpovídal 3 mm. Proto je šířka vzorků 17 mm. Tloušťka vzorků odpovídá tloušťce desek, ze kterých byly vzorky odebírány. Vzorky se ve většině případů neporuší přetržením vzorku v jediném místě, ale spíše dochází k porušení vzorků vzájemnou delaminací jednotlivých vrstev výztuže, proto je doporučeno volit větší délku vzorků, tak aby se případné vady mohly projevit. Proto byla zvolena délka vzorků 350 mm.

Vzorky nelze upínat bez úpravy do čelistí lisu, jelikož by mohlo dojít k podrcení vzorku. Proto byly vzorky na koncích opatřeny duralovými plechy o rozměru 80x20x3 mm. Ty roznáší rovnoměrně tlakovou sílu od samosvorných čelistí lisu do vzorku. Všechny styčné plochy byly před samotným lepením zdrsňeny pilníkem a odmaštěny technickým benzínem. Pro lepený spoj byla použita epoxidová pryskyřice Sikadur 30

od firmy SIKA a.s.. Lepený spoj byl poté stažen truhlářskými svěrkami a byl vytvrzován 24 hodin při pokojové teplotě.



Obr. 37: Očíslované vzorky opatřeny roznášecími plechy

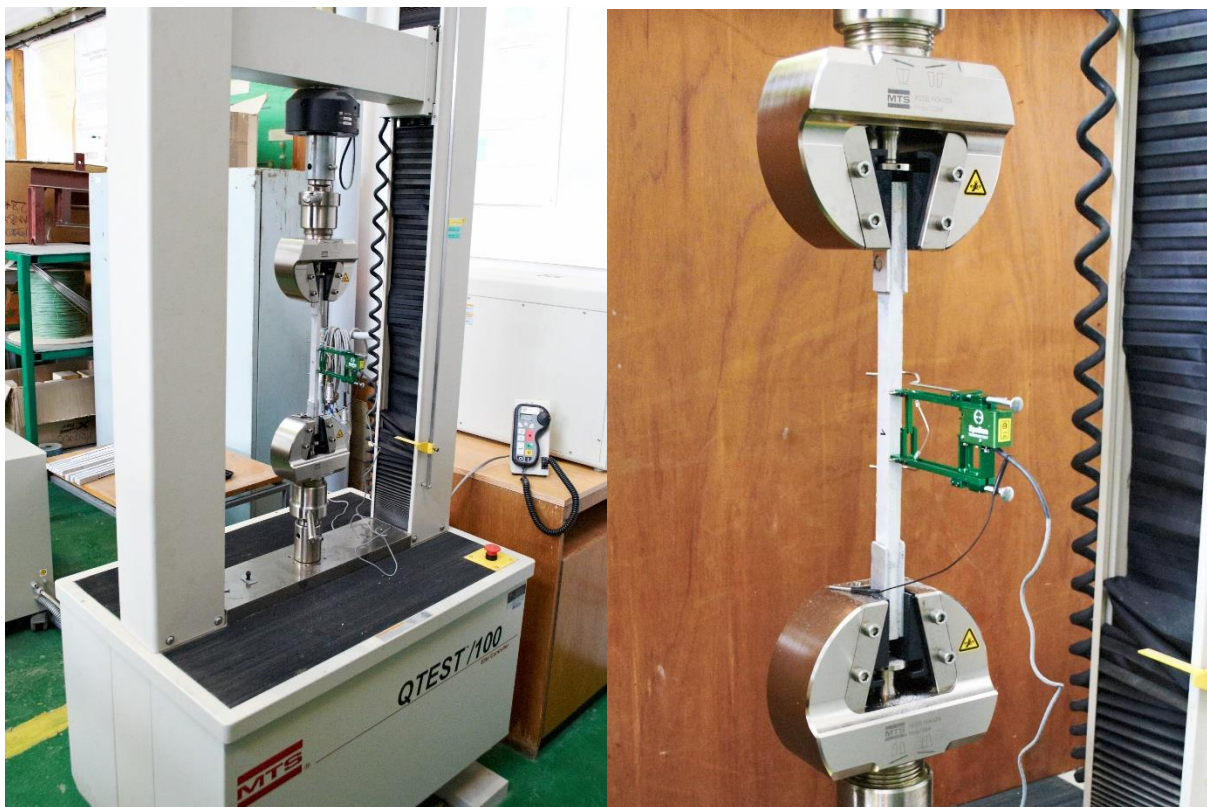
Každý vzorek byl vždy změřen ve třech příčných řezech, ze kterých byla stanovena průměrná účinná plocha vzorku. Změřené rozměry jednotlivých vzorků viz Tabulka 5.

Tabulka 5: Značení a rozměry jednotlivých vzorků

	Deska	Směr	t_1	t_2	t_3	b_1	b_2	b_3	t	b	A
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	1A	podélný	11,4	11,4	11,9	17,0	16,9	16,9	11,6	16,9	195,9
2	1A	příčný	13,5	13,5	13,3	17,2	17,4	17,5	13,4	17,4	233,3
3	1B	podélný	11,3	11,2	11,1	16,7	16,8	17,0	11,2	16,8	188,5
4	1B	příčný	13,4	12,4	12,5	17,9	17,8	18,0	12,8	17,9	228,5
5	2A	podélný	11,0	10,6	11,0	17,0	16,9	17,0	10,9	17,0	184,4
6	2A	příčný	12,4	12,2	11,5	17,9	17,7	18,0	12,0	17,9	215,0
7	2B	podélný	11,4	11,5	11,8	17,0	17,0	17,1	11,6	17,0	197,0
8	2B	příčný	13,0	12,6	13,2	17,0	16,9	16,9	12,9	16,9	219,0
9	3A	podélný	14,5	14,5	14,3	16,9	16,9	17,0	14,4	16,9	244,4
10	3A	příčný	13,5	12,5	12,0	17,2	17,3	17,3	12,7	17,3	218,7
11	3B	podélný	11,2	10,7	11,0	16,2	16,0	16,2	11,0	16,1	176,9
12	3B	příčný	13,6	13,0	12,4	15,9	16,1	16,0	13,0	16,0	208,0

6.1.1.1.2 Průběh zkoušky

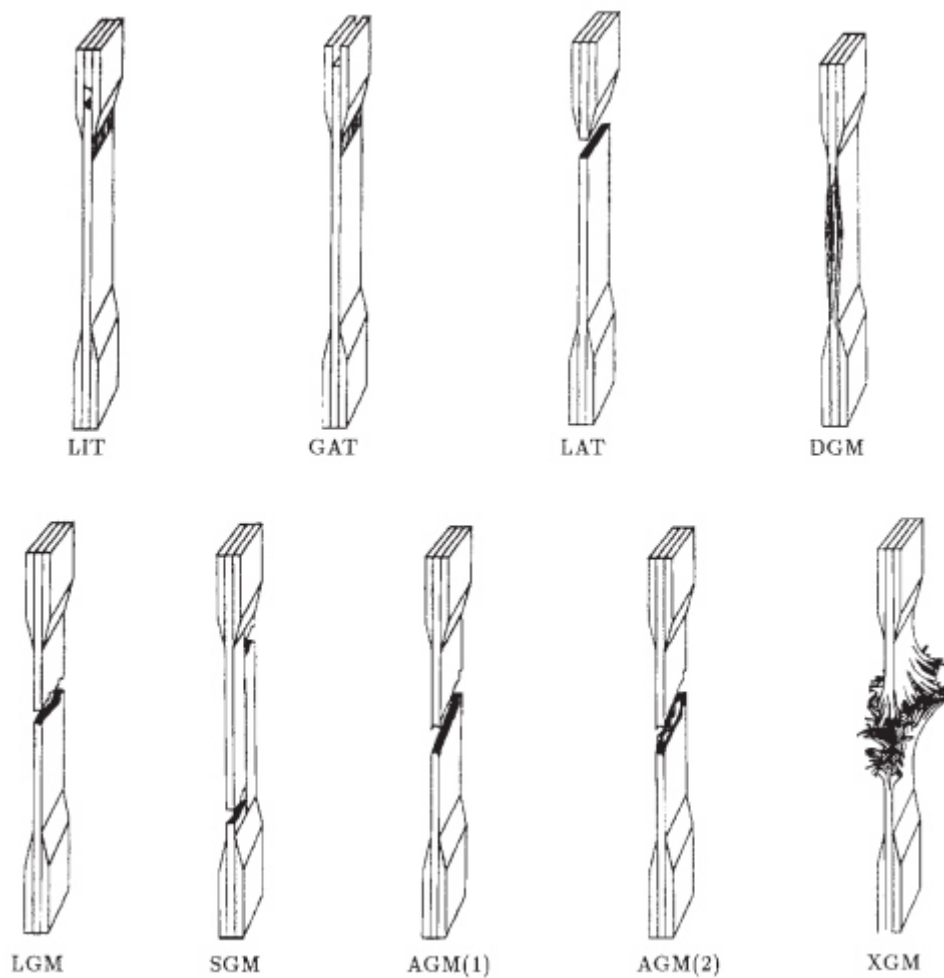
Tahové zkoušky byly provedeny na lisu MTS QTEST/100. Maximální tahová síla lisu je 100 kN. Zatěžování bylo řízeno posunem. Rychlost zatěžování stanovuje norma ASTM D 3039 na 2 mm/min. Pro vyhodnocení modulu pružnosti byl každý vzorek před tahovou zkouškou osazen axiálním extenzometrem Epsilon 3542 s roztečí opěrných bodů 50 mm. Lis a extenzometr byly propojeny s datovou záznamovou ústřednou umožňující kontinuální synchronní měření všech potřebných veličin. Čas, posun příčnicku, zatěžovací síla a protažení byly zaznamenávány s frekvencí ukládání dat 1 Hz.



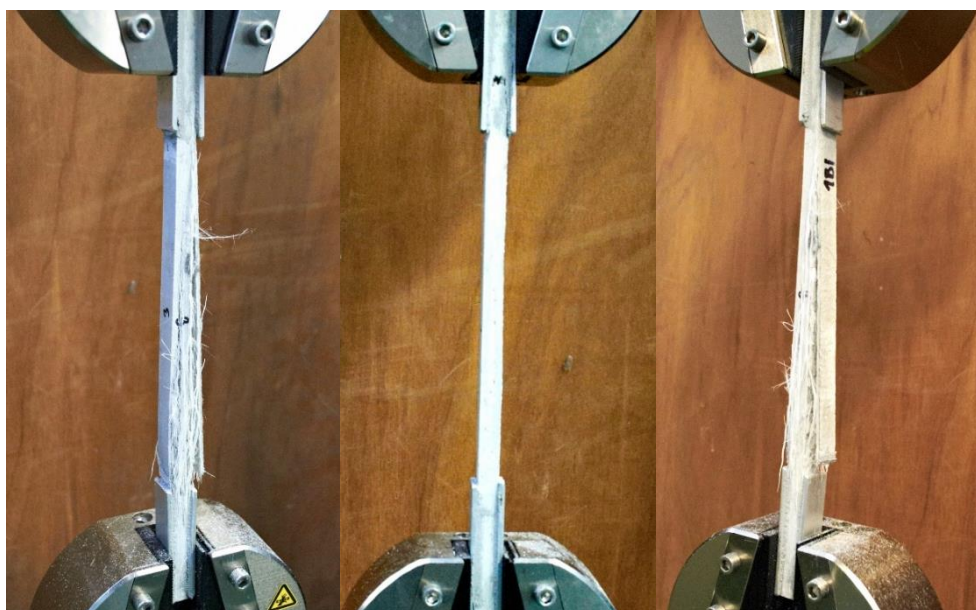
Obr. 38: Zkušební lis MTS QTEST/100 během experimentu

6.1.1.1.3 Vyhodnocení

Norma ASTM 3039 předepisuje určit nejenom maximální sílu, při které dojde k porušení, ale také způsob porušení. Způsob porušení je dán tří písmenným kódem, který určuje místo, typ a polohu porušení vzorku viz Obr. 39.



Obr. 39: Nejčastější způsoby porušení vzorku vláknitých kompozitů dle ASTM D 3039



Obr. 40: Typické způsoby porušení vzorků

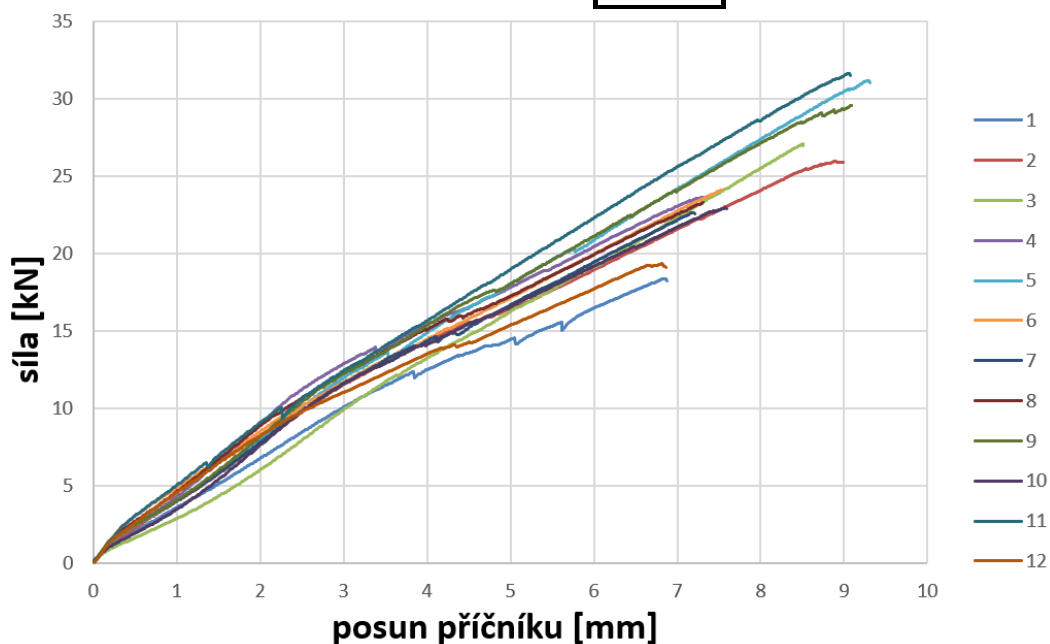
Na Obr. 39 jsou uvedeny nejčastější způsoby porušení, které se vyskytují u vláknitých kompozitů během tahových zkoušek. V případě vzorků s vysokým poměrem vyztužení

dojde jen zřídka k porušení vzorku prostým tahem. Ve většině případů dochází k delaminaci nebo ke smykovému porušení soudržnosti vrstev lamina.

Hodnoty napětí při porušení a jejich průměrné hodnoty viz Tabulka 6. V tabulce jsou také uvedeny způsoby porušení jednotlivých vzorků. Příklady porušení pro vybrané vzorky jsou na Obr. 40.

Tabulka 6: Vyhodnocení napětí pro jednotlivé vzorky a zatřídění způsobu porušení dle ASTM D 3039[1]

Vzorek	Deska	Směr	Fmax	σ	mód porušení
			[kN]	[MPa]	
1	1A	podélný	18,403	93,96	LIT
2	1A	příčný	25,985	111,38	AMM
3	1B	podélný	27,098	143,73	DAT
4	1B	příčný	23,724	103,81	LAB
5	2A	podélný	31,182	169,13	SMV
6	2A	příčný	24,120	112,19	LIB
7	2B	podélný	22,662	115,02	AIT
8	2B	příčný	23,278	106,29	SMV
9	3A	podélný	26,751	109,45	SMV
10	3A	příčný	22,967	105,01	SMV
11	3B	podélný	31,648	178,87	SMV
12	3B	příčný	19,344	93,00	LAT
			120,15		



Obr. 41: Pracovní diagram vzorků 1-12

6.1.1.2 Beton

Současně s protlačovacími zkouškami byly provedeny materiálové zkoušky na předepsaných tělesech. Celkem bylo vyrobeno 10 těles pro zjištění krychelné pevnosti a 3 tělesa pro zjištění tahové pevnosti za ohybu. Dvojice krychlí byla zkoušena při zkoušce prvního vzorku tedy po 28 dnech od betonáže. Zbylé vzorky byly zkoušeny zároveň při zkoušce zbylých dvou vzorků pro protlačovací zkoušky. Výsledky jsou zpracovány níže v tabulkách Průběhy pracovních diagramů nebyly při zkouškách měřeny, jelikož to použité zařízení neumožňovalo. Beton lze dle výsledků zkoušek zařadit do třídy betonu C70/85.

Tabulka 7: Krychelná pevnost zkušebních vzorků v tlaku po 28 dnech $f_{ck,cube,28}$

Označení vzorku	Rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Únosnost [kN]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	b ₁	b ₂			
1	150	149,9	8400	1950	86,7
2	151,2	151	8443	2020	88,5

Průměrná krychelná pevnost po 28 dnech: $f_{ck,cube,28} = 87,6 \text{ MPa}$

Tabulka 8: Krychelná pevnost zkušebních vzorků v tlaku po 88 dnech $f_{ck,cube,88}$

Označení vzorku	Rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Únosnost [kN]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	b ₁	b ₂			
3	150,6	151	8375	1990	87,5
4	150,9	151,3	8382	2000	87,6
5	150,1	149,5	8340	2110	94,0
6	150,6	150,5	8430	2100	92,7
7	149,3	149,8	8375	2120	94,8
8	148,9	150,8	8257	2100	93,5

Průměrná krychelná pevnost po 88 dnech: $f_{ck,cube,88} = 91,7 \text{ MPa}$

Tabulka 9: Pevnost zkušebních vzorků v tahu za ohybu po 88 dnech $f_{tk,88}$

Označení vzorku	Rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Únosnost [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	b ₁	b ₂			
1	100,9	99,8	9980	23,5	7,0
2	100,3	100,4	10015	20,8	6,2
3	100,4	100,2	10000	23,7	7,1

Průměrná pevnost v tahu za ohybu po 88 dnech: $f_{tk,88} = 6,8 \text{ MPa}$

6.1.2 Průběh protlačovací zkoušky

Jelikož pro protlačovací zkoušky FRP s betonem neexistuje norma, zkoušky byly provedeny dle přílohy B evropské normy EN 1994-1-1 [1]. Nejdříve se vzorek zatěžoval 25 cykly v rozmezí 5 % a 40 % odhadované únosnosti. V další fázi zatěžování se vzorek zatěžoval až do porušení. Vzájemný posun betonové desky a FRP desek byl zaznamenáván snímači dráhy ve čtyřech místech protlačovacího vzorku. Jednotlivé snímače dráhy a tenzometry viz Obr. 48 byly propojeny s datovou záznamovou ústřednou umožňující kontinuální synchronní záznam měření všech snímačů. Frekvence ukládání dat byla nastavena na 1 Hz. Záznamy měření ve formátu excel byly následně vyhodnoceny formou diagramů a tabulek.

Při zkoušce prvního vzorku se nepodařilo vzorek porušit, protože maximální tlaková síla lisu 1000 kN nebyla dostatečná. Proto byl další den vyzkoušen na lisu EDB 400 U s maximální zatěžovací silou 4000 kN ovšem se zatížením řízeným silou. Vzorek byl zatěžován v krocích po 100 kN do 1000 kN, následně v krocích po 50 kN. Mezi jednotlivými zatěžovacími kroky byla prodleva 30 sekund. Vzájemný posun betonové desky a FRP byl odečítán na úchylkoměru značky SOMET vždy po přitížení o další krok. Zbylé dva vzorky byly zkoušeny na lisu řízeným deformací s maximální tlakovou silou 2000 kN.



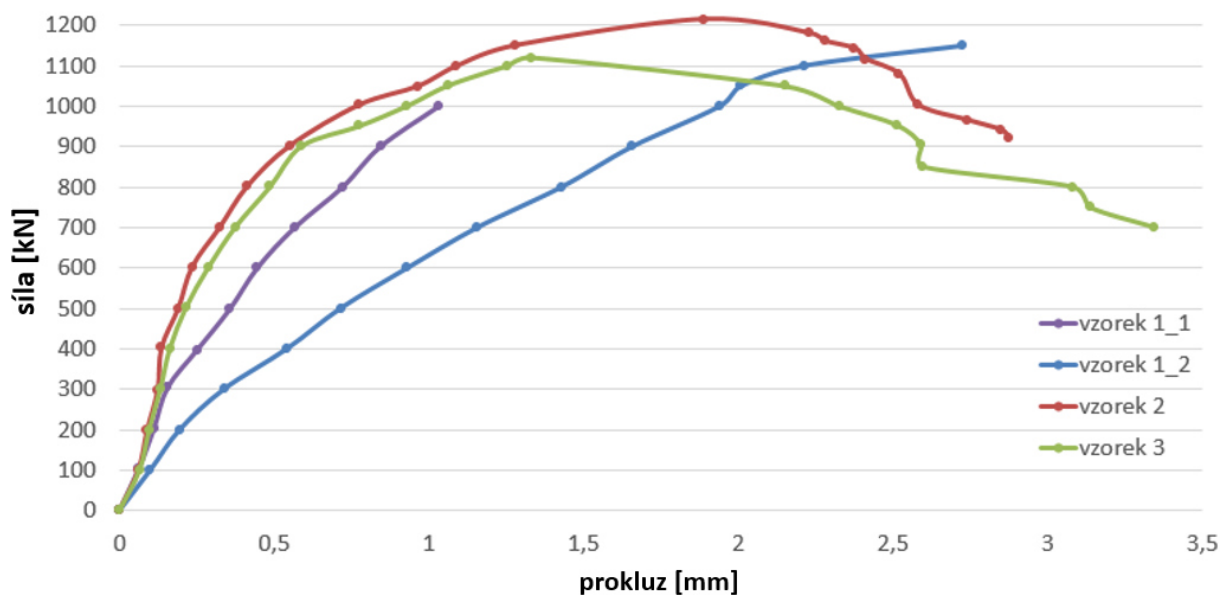
Obr. 42 Protlačovací vzorky během zatěžování

6.1.3 Vyhodnocení

Experiment ukázal, že mezi zkoušenými třemi vzorky nebyly významné rozdíly. Maximální dosažené síly byly mezi 1119–1214 kN s maximální odchylkou 8,5 %.

- Vzorek č.1 - Otvory Ø50 po 300 mm – $F_{\max} = 1150$ kN
- Vzorek č.2 - Otvory Ø50 po 250 mm – $F_{\max} = 1214$ kN
- Vzorek č.3 - Otvory Ø40 po 250 mm – $F_{\max} = 1119$ kN

Počáteční tuhost spřažení byla $2,43 \times 10^{-6}$ kN/m.



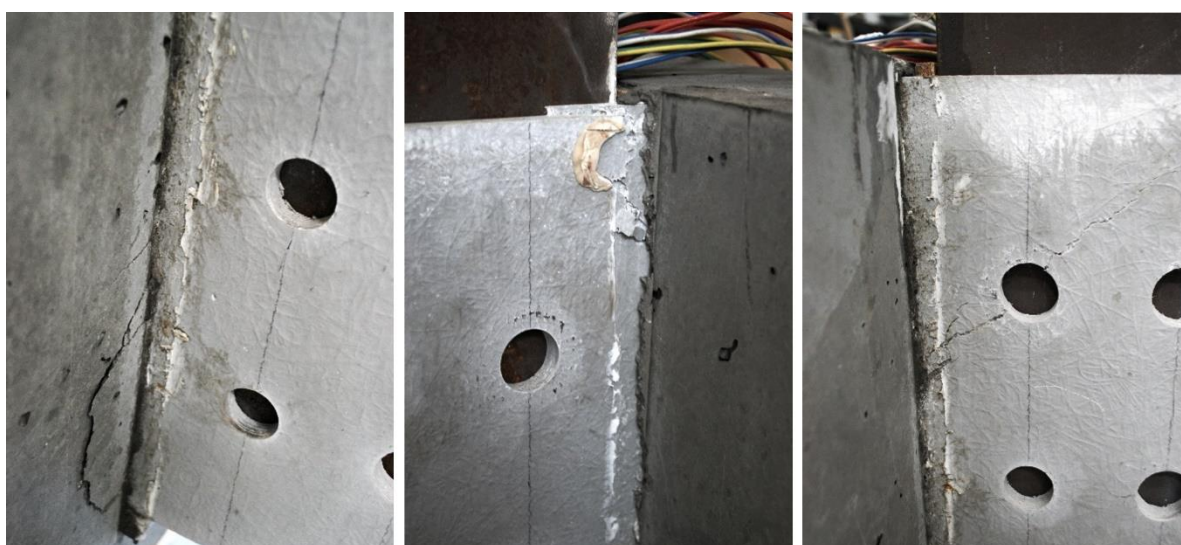
Obr. 43 Pracovní diagramy zkoušených vzorků

První vzorek byl zatěžován na zkušebním lisu s maximální kapacitou 1000 kN. Vzorek č. 1 se tak nepovedlo zatížit do porušení. Při jeho opakovaném zatěžování se zkušebním lisem s kapacitou 2000 kN lze vidět rozdíl v počáteční tuhosti, který je dán zejména ztrátou soudržnosti mezi FRP lištou a betonem.

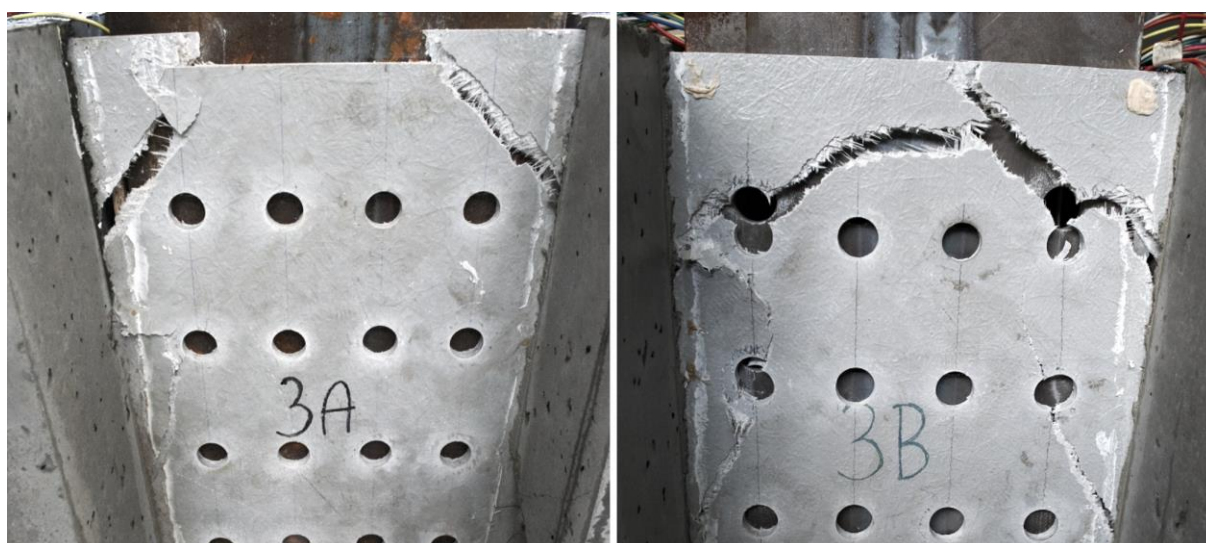
Při zatížení okolo 1000 kN bylo slyšet hlasité praskání skelných vláken. Jakmile bylo dosaženo maxima únosnosti, smykové trhliny se začaly šířit pod úhlem 45° od horního otvoru spřažení. Následně došlo k poklesu zatěžovací síly a s postupným nárůstem deformace se pak objevily trhliny i u dolních otvorů spřažení.



Obr. 44 Porušení vzorku č. 1



Obr. 45 Porušení vzorku č.2



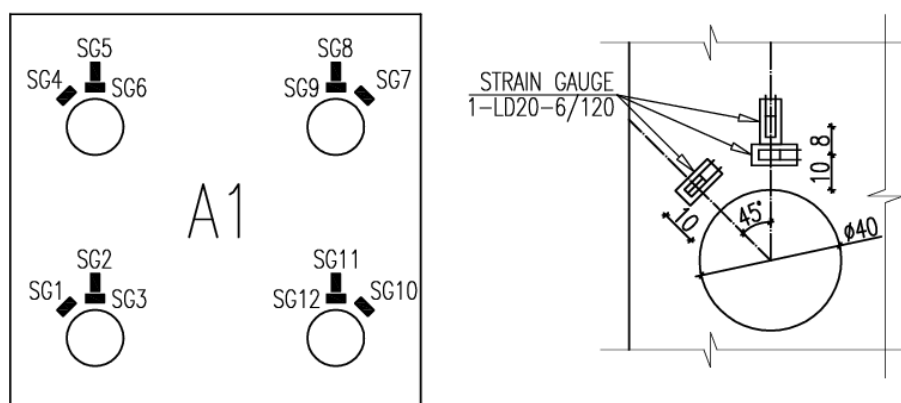
Obr. 46 Porušení vzorku č.3

Pro prozkoumání porušení spřažení byl vzorek č. 3 podélně rozříznut v místě stojiny. Na Obr. 47 je zobrazeno porušení spřahovací lišty. Horní otvor spřažení byl porušen kombinací tahové a smykové trhliny. Spodní otvor byl porušen tahovou trhlinou a delaminací FRP, výplň otvoru – betonová hmoždinka byla podrcená.

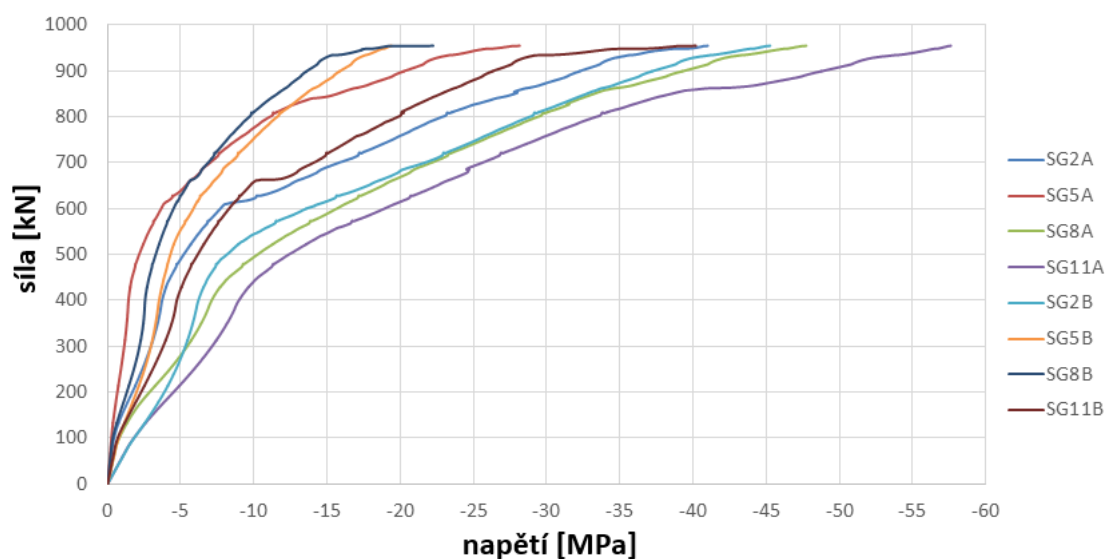


Obr. 47 Detail porušení spřahovací lišty – vzorek č. 3

Před betonáží desky byly na FRP desku nainstalovány tenzometry, celkem 12 kusů na každou desku. Rozmístění tenzometrů na zkoušené FRP desce je patrné z Obr. 48. V blízkosti každého otvoru spřažení byly nalepeny 3 tenzometry ve svislém směru, vodorovném směru a pod úhlem 45° , ve kterém byla očekávána tvorba trhlin. Byly použity tenzometry značky HBM 1-LD20-6/120 s dlouhým protažením.



Obr. 48 Umístění tenzometrů na FRP desce



Obr. 49 Průběh napětí na jednotlivých tenzometrech

Z rozložení napětí v jednotlivých hmoždinkách je zřejmé, že vzorky nebyly zatíženy symetricky, protože jedna deska je zatížena více než druhá.

Na Obr. 49 jsou zobrazeny průběhy napětí přepočteny pomocí průměrného modulu pružnosti FRP materiálu z přetvoření na tenzometrech, které byly umístěny ve svislém směru nad betonovou hmoždinkou. Z lineární části pracovního diagramu bylo vypočítáno rozložení zatížení mezi jednotlivé hmoždinky.

Pro stanovení pružné únosnosti jedné hmoždinky byla stanovena velikost napětí, kdy se poprvé objevilo nelineární chování.

Z této hodnoty byla vypočítána velikost efektivní působící síly na každou hmoždinku. Hodnoty jsou uvedeny viz Tabulka 10.

Tabulka 10: Napětí na svislých tenzometrech, vyhodnocení síly na jednotlivých hmoždinkách

	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	Rozložení (%)	Napětí (MPa)	Síla (kN)	Rozložení (%)	Napětí (MPa)	Síla (kN)	Rozložení (%)	Napětí (MPa)	Síla (kN)
SG2A	16.3	-12.23	116.4	13.4	-7.87	75.6	9.7	-10.46	82.1
SG5A	7.33	- 8.26	78.6	11.1	-8.34	80.0	4.3	- 4.96	38.7
SG8A	4.0	-6.03	57.4	8.9	-7.76	74.5	15.4	-8.49	66.6
SG11A	7.2	-7.71	73.4	9.0	-5.54	53.2	20.1	-11.54	90.5
SG2B	24.4	-11.38	108,3	11.7	-7.88	75.6	18.6	-10.9	85.5
SG5B	18.0	-6.94	66.0	9.9	-8.62	82.7	10.8	-8.27	64.9
SG8B	13.0	-6.99	66.5	15.5	-10.38	99.6	6.4	-6.31	49.5
SG11B	9.7	-10.29	98.0	20.5	-9.27	88.9	12.2	-6.31	49.5

U prvního vzorku je průměrná hodnota elastické únosnosti 83,1 kN, směrodatná odchylka 21,75 kN a 5 % kvantil 45,1 kN. U druhého vzorku je průměrná hodnota únosnosti 78,8 kN, směrodatná odchylka 13,35 kN a 5 % kvantil 55,5 kN. Pro třetí vzorek je průměrná hodnota únosnosti 69,3 kN, směrodatná odchylka 15,31 a 5% kvantil 42,5 kN. Vliv průměru otvorů tak nebyl během testů objasněn, protože všechny vzorky selhaly smykovou trhlinou nebo delaminací.

Z hlediska budoucího vývoje plynou tyto závěry:

- FRP desek vyráběné metodou ruční laminace mohou být dále vylepšeny přidáním vhodné tkaniny s vlákny pod úhlem 45 °.
- Návrh s více otvory s menšími rozestupy by měl vést k rovnoměrnějšímu rozložení napětí a ke zvýšení celkové únosnosti testovaných vzorků.
- Kvůli nízkému modulu pružnosti FRP může mít kompozitní nosník problémy s mezními stavy použitelnosti, zejména s průhybem. Chování spřažení by proto mělo být tuhé.
- Ke ztrátě soudržnosti mezi povrchem FRP a betonovou deskou došlo před dosažením maximálního zatížení. Aby se zvýšila počáteční tuhost spoje, lze na povrch FRP použít hrubý pískový povlak.
- Vzhledem k nerovnoměrnému rozložení působící síly je zřejmé, že pevnost kompozitního spojení mezi FRP a betonem má ještě větší únosnost, než byla stanovena provedenou zkouškou se dvěma deskami FRP. Kompozitní spojení se proto jeví jako dostatečné a budoucí výzkum se zaměří na únosnost spřažení na kompozitním nosníku v ohybu.

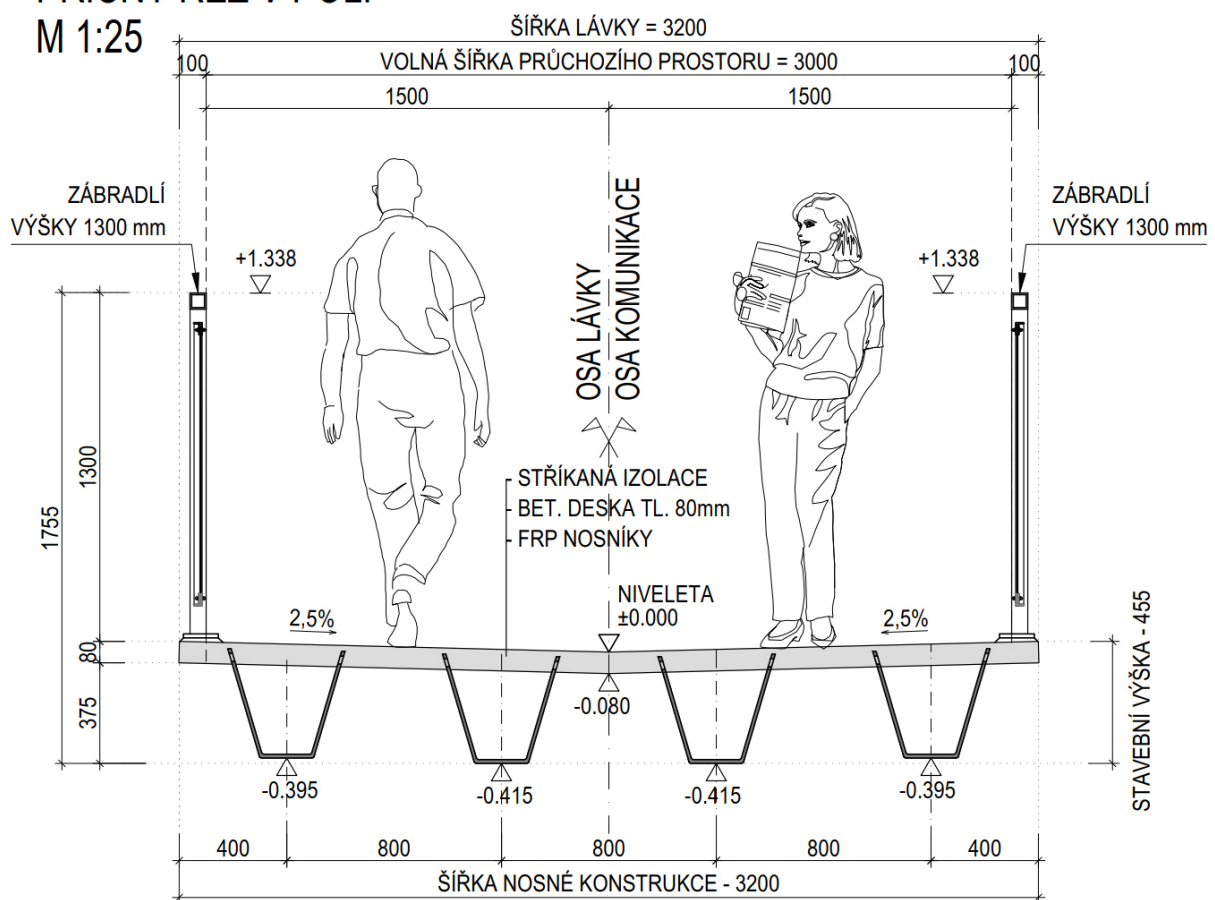
6.2 Návrh a zkouška kompozitního nosníku v ohybu

Protlačovací zkoušky prokázaly dostatečnou únosnost spřažení, proto byla pro další fázi experimentů naplánována zkouška v ohybu kompozitního nosníku takových dimenzí, který by mohl být použit pro výstavbu reálné lávky.

Předpokládá se použití přímo pochozí mostovky s bežešvou stříkanou izolací, stavební výška konstrukce je tak 455 mm, což je při rozpětí 12 m přibližně 1/25 rozpětí mostu. Deska mostovky je spřažená se čtyřmi korýtkovými nosníky, které mají vyztuženou spodní pásnici uhlíkovými vlákny o tloušťce 20 mm a stojiny vyztužené skelnými vlákny o tloušťce 8 mm.

PŘÍČNÝ ŘEZ V POLI

M 1:25



Obr. 50 Příčný řez navržené lávky

Předpokládaný způsob betonáže lávky je v inverzní poloze a následné uložení prefabrikovaného mostu pomocí jeřábů na spodní stavbu. Vzhledem k použitým materiálům, které nejsou náchylné na korozi lze předpokládat nízké náklady na údržbu mostu a vysokou životnost.

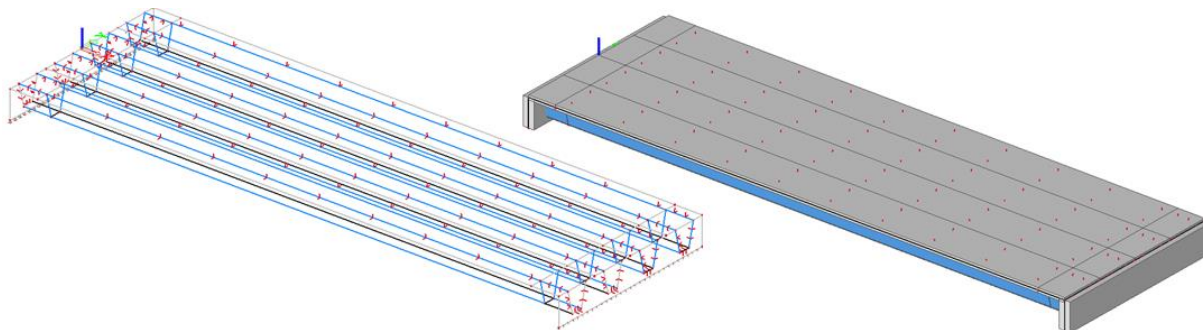
Pro určení dimenzí zkušebního vzorku bylo vypracováno několik předběžných výpočtů v tabulkovém procesoru a následně několik numerických modelů:

- Numerická analýza lávky Program Scia Engineer
- Numerická analýza nosníku – lineární Program Scia Engineer
- Numerická analýza nosníku – nelineární Program ATENA

Parametry jednotlivých modelů a jejich výsledky, vliv na dimenze zkoušeného nosníku jsou popsány v následujících kapitolách.

6.2.1 Numerická analýza lávky

Použití nosníku bylo navrženo a následně teoreticky ověřeno pro lávku o rozpětích 12, 16, 20 a 23 m na deskostěnových modelech v programu Scia Engineer. Lávka se skládá ze čtyř korýtkových nosníků spřažených s betonovou deskou o tloušťce 80 mm z HPC betonu třídy C80/95 vyztuženou kompozitní výztuží při obou površích. Na obou koncích mostu je podporový příčník pro uložení na ložiska. Na základě iterativního procesu byl zvolen FRP nosník korýtkového průřezu vyztužený skelnými a uhlíkovými vlákny v oblasti dolní pásnice nosníku. Kvalita betonu byla zvolena s ohledem na eliminaci vzniku a šířku trhlin v betonové desce, které jsou důležitým parametrem pro trvanlivost konstrukce.

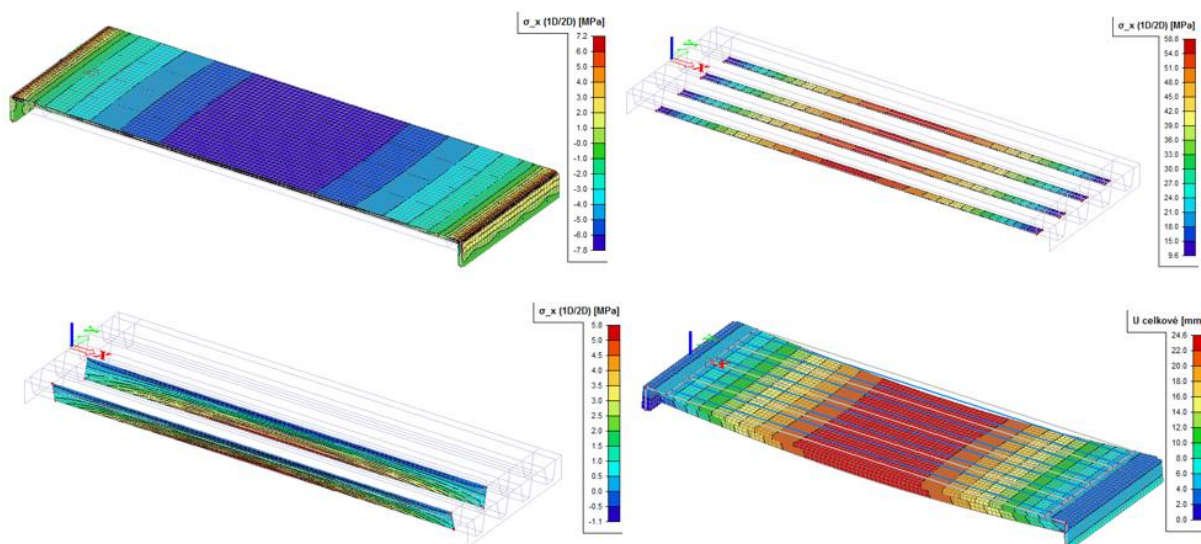


Obr. 51 Čárový a hmotový model lávky

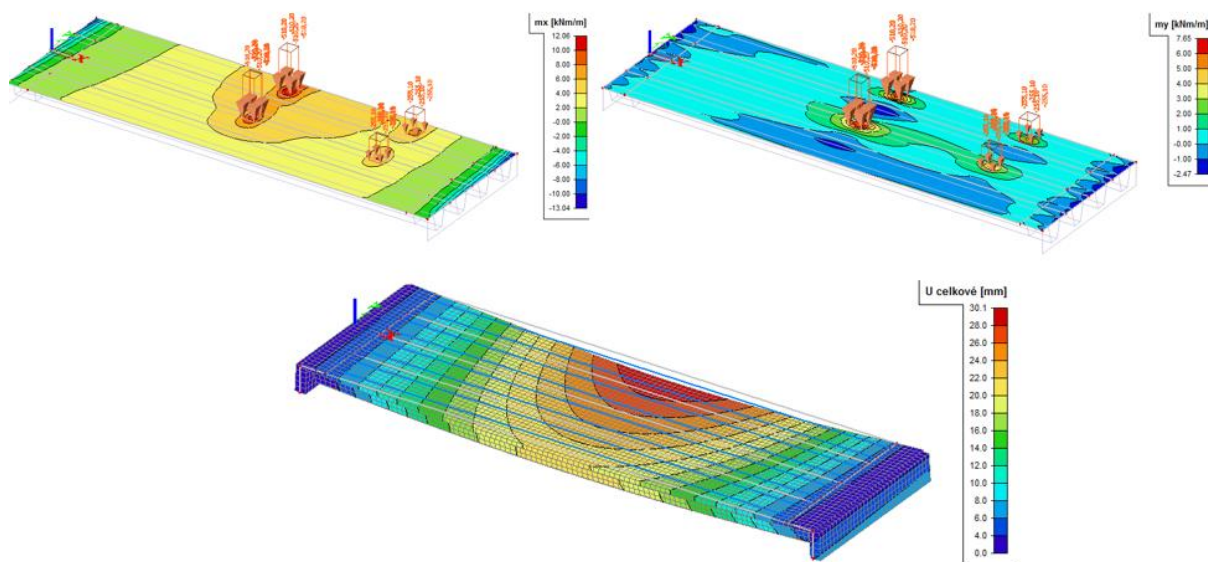
Lávka je podepřena na jedné straně podélně pevně na druhé straně podélně posuvně. V příčném směru jsou pevné podpory na obou koncích. Výpočetní síť je zvolena hustotou bodů po 0,1 m. Příčný roznos zatížení je zajištěn pomocí betonové desky. Bylo uvažováno se zatížením vlastní tíhou konstrukce, zatížením chodci 5 kN/m², které bylo redukováno vzhledem k rozpětí lávky. Pro zjednodušení je plošné zatížení zadáno na celou šířku mostu 3,2 m, proto se s ostatním stálým zatížením (zatížení od zábradlí 50 kg/m) v rámci studie nepočítá. Dále byla lávka zatížena obslužným vozidlem (soustava dvounáprav 80 a 40 kN), které bylo umístěno do nejnepříznivější

polohy na mostě. To má však vyšší účinek pro lávku 12 m o přibližně 15 %, při rozpětí 16 m má již větší účinek zatížení chodci.

V souladu s ČSN EN 1990 byly uvažovány součinitele $\gamma_G = \gamma_Q = 1,35$.



Obr. 52 Výsledky napěťové analýzy lávky – vlastní tíha + zatížení chodci



Obr. 53 Výsledky napěťové analýzy lávky – vlastní tíha + obslužné vozidlo

Z hlediska napětí v jednotlivých částech průřezu měly materiály nízké využití, o návrhu tak rozhodovaly především deformace, které určily množství uhlíkové tkaniny v dolních pásnicích. Výsledky analýzy jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 11: Parametrická studie lávky

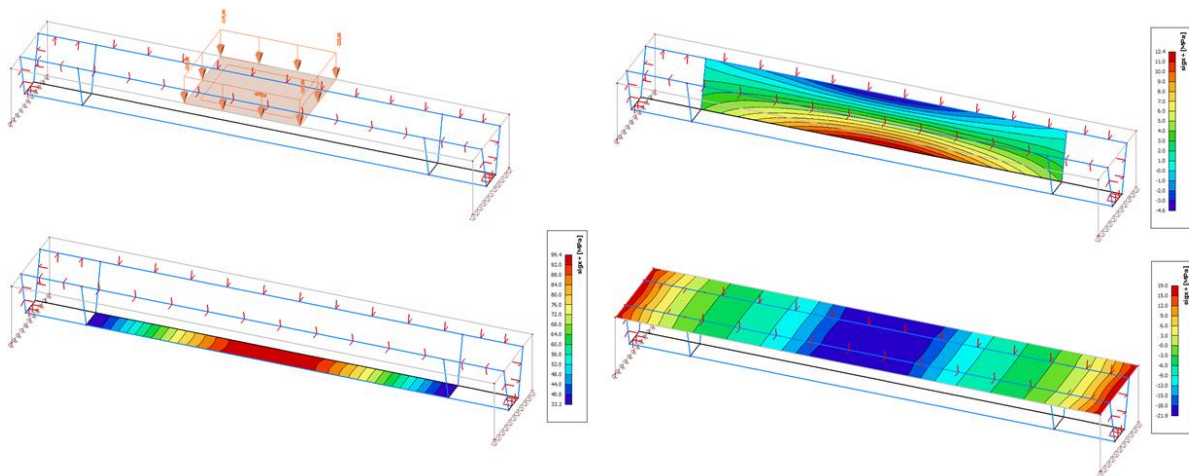
Parametrická studie lávky						
Rozpětí lávky	L	12	16	20	23	[m]
char celkem	M_{ek}	105.0	180.4	273.5	354.5	[kNm]
návrh	M_{ed}	141.8	243.5	369.2	478.6	[kNm]
návrh posouvající síla	V_{ed}	47.3	60.9	73.8	83.2	[kN]
průhyb od vl. tíhy	δ_g	17.4	53.5	128.9	224.1	[mm]
průhyb od proměnného	δ_q	38.3	111.5	256.1	431.1	[mm]
Poměr rozpětí a průhybu od chodců	L/δ_q	313.3	143.5	78.1	53.4	[-]
1. vlastní frekvence (1. ohybová)	f_1	4.19	2.4	1.55	1.18	[Hz]
2. vlastní frekvence (1. krouťící)	f_2	10.10	6.99	5.31	4.5	[Hz]
3. vlastní frekvence (2. ohybová)	f_3	15.02	8.98	5.93	4.55	[Hz]
4. vlastní frekvence (2. krouťící)	f_4	22.60	15.29	11.38	9.49	[Hz]
MSP - Mezní stav použitelnosti						
napětí v betonové desce	HPC	-10.2	-17.2	-25.9	-33.5	[MPa]
napětí ve stojně	GFRP	14.4	24.6	37.1	48.0	[MPa]
napětí v pásnici	CFRP	67.0	114.9	173.9	225.1	[MPa]
MSÚ - Mezní stav únosnosti						
napětí v betonové desce	HPC	-13.8	-23.2	-35.0	-45.2	[MPa]
napětí ve stojně	GFRP	19.4	33.2	50.1	64.8	[MPa]
napětí v pásnici	CFRP	90.5	155.1	234.8	303.9	[MPa]
Využití						
MSP - Mezní stav použitelnosti						
napětí v betonové desce	HPC	11.6%	19.6%	29.6%	38.2%	[%]
napětí ve stojně	GFRP	10.4%	17.7%	26.7%	34.6%	[%]
napětí v pásnici	CFRP	11.3%	19.4%	29.3%	37.9%	[%]
MSÚ - Mezní stav únosnosti						
napětí v betonové desce	HPC	23.6%	39.8%	59.9%	77.4%	[%]
napětí ve stojně	GFRP	21.0%	35.9%	54.1%	70.0%	[%]
napětí v pásnici	CFRP	22.9%	39.2%	59.3%	76.8%	[%]

Mezní stav použitelnosti z hlediska limitu průhybu $L/250$ splňuje lávka o rozpětí 12 m. Vlastní frekvence 4,19 Hz značí dostatečnou tuhost pro pohodu chodců. Pro větší rozpětí, ačkoli by z hlediska mezního stavu únosnosti nosníky vyhověly, již nosníky nevyhoví kvůli nízké tuhosti na průhyb.

6.2.2 Numerická analýza nosníku

V rámci přípravy experimentu ohybové zkoušky nosníku bylo zvažováno, zdali jít cestou výroby nosníku ve zmenšeném měřítku nebo připravit pro experiment výsek nosníku reálné velikosti. Vzhledem k řešení size efektu, zejména ohledně betonové desky a kameniva, bylo rozhodnuto provést ohybovou zkoušku na výseku nosníku v měřítku 1:1. Vzhledem k podmínkám, ve kterých měla proběhnout výroba, dobou zpracovatelnosti pryskyřice, maximální síle hydraulického lisu a skutečnosti, že v nosníku bude třeba vyvolat smykové účinky v oblasti spřažení, byla délka zkušební vzorku stanovena na 3,8 m.

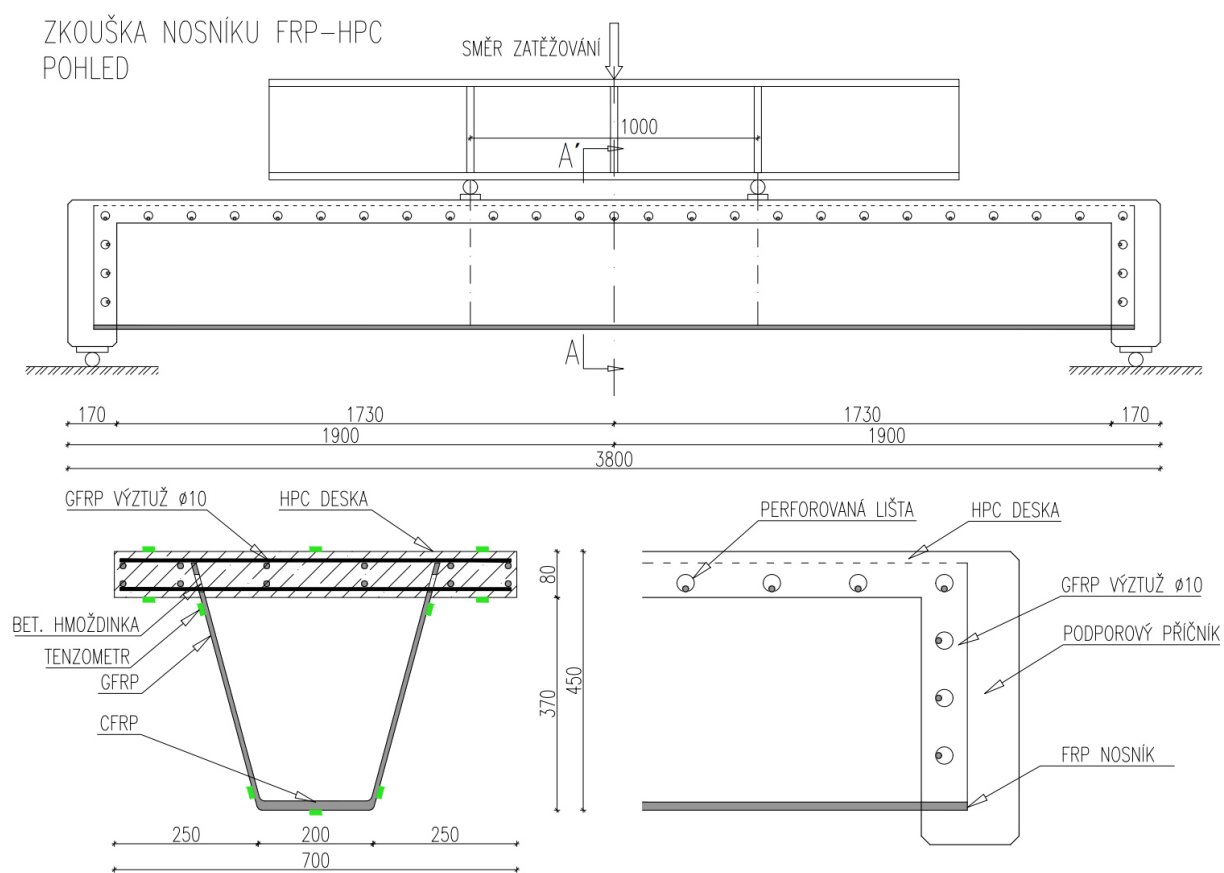
V programu Scia Engineer byl pro účely návrhu dimenzí nosníku a jeho vyztužení vytvořen numerický model. Model se skládá z deskostěnových prvků, na koncích nosníku je betonový příčník, spřažení jednotlivých komponent je provedeno jako tuhé.



Obr. 54 Výsledky napěťové analýzy nosníku

V rámci iterativního procesu byly stanoveny konečné dimenze pro výrobu nosníku včetně množství výztužných tkanin. Tyto parametry byly zvoleny tak, aby u jednotlivých částí průřezu (betonové desky, stojiny a dolní pásnice) bylo shodné využití a tím se dosáhlo maximálního využití všech použitých materiálů v průřezu a tím i maximální ohybové únosnosti. Přehled použitých výztužných tkanin pro experiment viz Tabulka 12.

Na základě provedených výpočtů byla v druhé etapě experimentů naplánována zkouška samotného spřaženého nosníku ve čtyřbodovém ohybu, jehož podélný a příčný řez je na Obr. 55. Délka nosníku je 3,8 m. Na koncích nosníku byly navrženy koncové příčnice, které mají zajistit stabilitu stěn v podporové oblasti. Celková výška nosníku je 450 mm, skládá se z korýtkového nosníku a betonové desky tloušťky 80 mm s kompozitní skelnou výztuží o průměru 10 mm. Korýtkový nosník je vyztužen skelnými vlákny, která jsou doplněna uhlíkovou jednosměrnou tkaninou v dolních vláknech. Pro výrobu je použita polyesterová pryskyřice. Tloušťka spodní pásnice je 20 mm a tloušťka stěn 8 mm.



Obr. 55 Podélný a příčný řez kompozitním nosníkem, rozmístění a označení tenzometrů při zkoušce

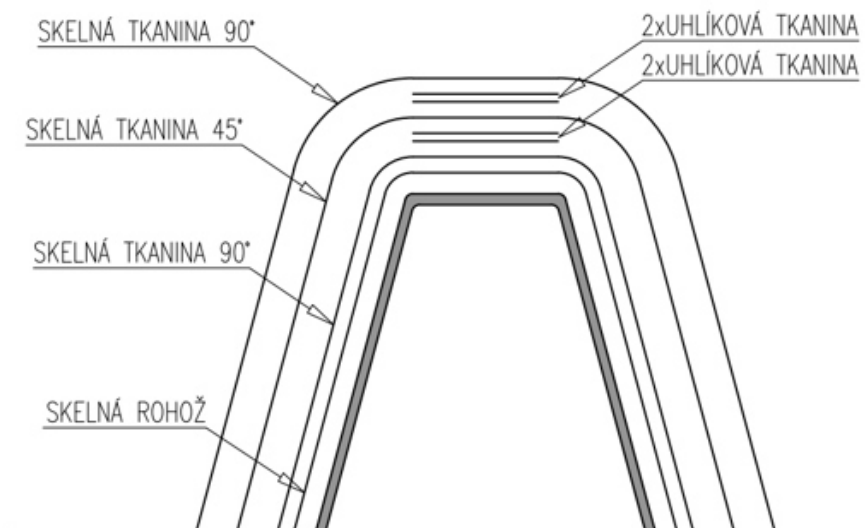
6.2.3 Výroba nosníku

Kompozitní nosník byl vyroben autorem disertační práce v experimentálním centru na Fakultě stavební metodou ruční laminace. Nosník byl laminován v obrácené poloze na formě z dřevovláknitých desek. Krajiní povrchy byly vyztuženy skelnou rohoží, které zabraňuje pronikání UV záření k vláknům v jádru průřezu a chrání tak nosná vlákna proti degradaci. V dalších vrstvách jsou již použita nosná vlákna – dvojice

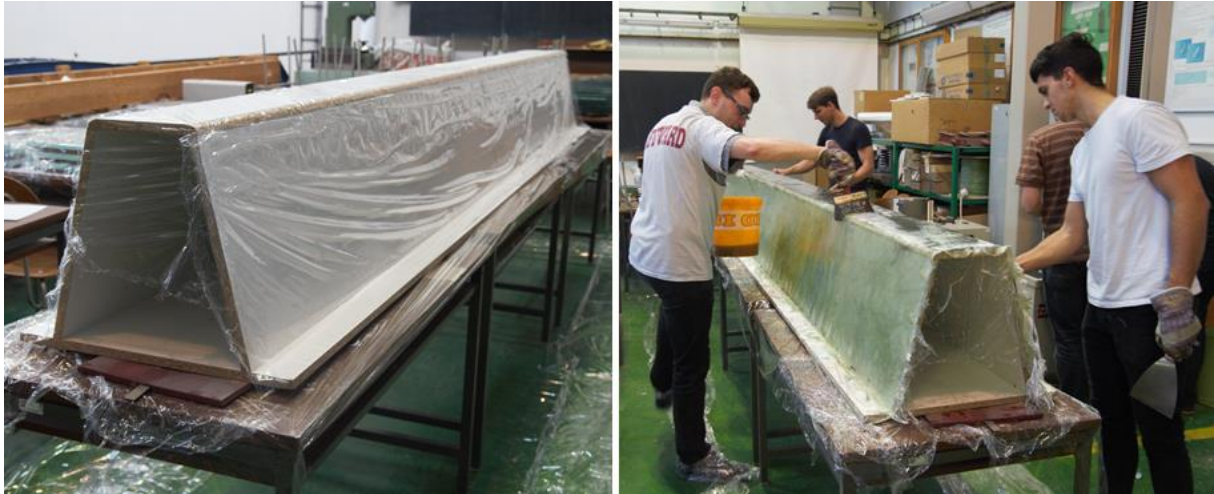
jednosměrných skelných tkanin, která mají vlákna v příčném a podélném směru nosníku. Pro zvýšení smykové únosnosti nosníku byly použity skelné tkaniny s úhlem vláken 45°. Ve spodních vláknech průřezu byla umístěna vždy dvojice jednosměrných uhlíkových tkanin. Mezi jednotlivými tkaninami byla aplikována polyesterová pryskyřice, do které bylo před použitím přidáno přesné množství tvrdidla tak, aby vytvrzování začalo po 2 hodinách. Jednotlivé tkaniny a vrstvy pryskyřice byly vždy upraveny pomocí speciálních válečků.

Tabulka 12 Přehled použitých vláken pro výrobu kompozitního nosníku

Materiál	Typ	Hmotnost	Orientace vláken	Pevnost	Modul pružnosti	Počet vrstev
[-]	[-]	[g/m ²]	[-]	[MPa]	[GPa]	[ks]
uhlíková	tkanina	400	jednosměrná	4137	242	22
skelná	tkanina	600	biaxiální +/-45 °	1000	70	6
skelná	tkanina	390	biaxiální +/-90 °	1000	70	6
skelná	rohož	600	všesměrná	1000	2	



Obr. 56 Výroba FRP nosníku – schéma vyztužení



Obr. 57 Výroba FRP nosníku – forma potažená fólií, nanášení pryskyřice



Obr. 58 Výroba FRP nosníku – eliminace vzduchových bublin pomocí válečku, vytvrzování pryskyřice

Nosník byl dále zkrácen na požadovanou délku. Části z ořezu nosníku byly použity pro materiálové zkoušky kompozitu. V horní části stojiny byly vyvrtány otvory průměru 35 mm po 150 mm.

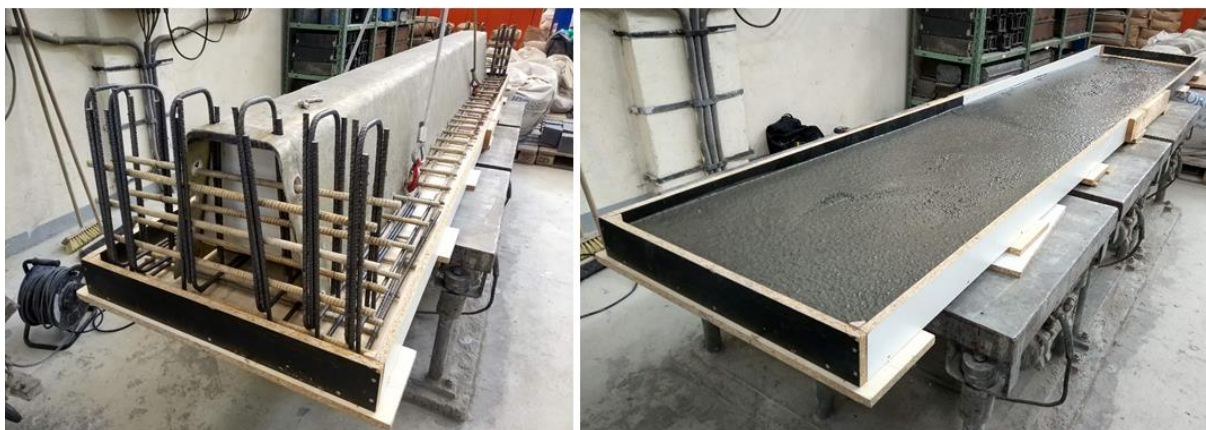


Obr. 59 Výroba FRP nosníku – ořezání hran, vyvrtání otvorů

Po vyztužení betonové desky a podporových příčníků byla nabetonována deska v inverzní poloze tak, že do bednění byla uložena zhruba polovina potřebné směsi, následně byl nosník vložen do bednění, dobetonován a zhutněn za pomoci vibračních strojů. Po betonáži byl beton ochráněn strečovou potravinářskou fólií. Okolo forem pro příčnky byl použit pružný těsnící tmel. Betonáž příčníků byla provedena následující den po betonáži desky.



Obr. 60 Nosník po vyvázání FRP výztuže, nosník po doplnění výztuže příčníků



Obr. 61 Kontrola formy, krytí, poslední úpravy výztuže; aplikace betonové směsi do formy



Obr. 62 Vnoření nosníku do betonové směsi, betonáž příčníků

6.2.4 Materiálové zkoušky nosníku

6.2.4.1 Beton

Současně se zkouškou nosníku v ohybu byly provedeny materiálové zkoušky na předepsaných tělesech. Tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN 12390-1 [3].

Celkem bylo vyrobeno:

- 6 těles – krychle o hraně 150 mm pro zjištění krychelné pevnosti
- 6 těles – krychle o hraně 100 mm pro zjištění krychelné pevnosti
- 6 těles pro zjištění tahové pevnosti za ohybu.

Trojice krychlí o hraně 150 mm byla zkoušena po 28 dnech po betonáži. Zbylé vzorky byly zkoušeny zároveň při zkoušce nosníku v ohybu. Průběhy pracovních diagramů nebyly při zkouškách vzhledem k použitému měřicímu zařízení zaznamenány. U třech vzorků – krychlí o hraně 100 mm bylo změřeno poměrné přetvoření, na základě kterého byla dopočítána hodnota modulu pružnosti betonu. Hodnoty modulu jsou pouze orientační, jelikož dle normy ČSN EN 12390-13 [4] by měla být použita tělesa s poměrem délky L a šířky d v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$.

Výsledky jsou zpracovány v následujících tabulkách:

Tabulka 13: Krychelná pevnost zkušebních vzorků ($b = 150$ mm) v tlaku po 28 dnech $f_{ck,cube,28}$

Označení vzorku	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Obj. hmot [kg/m ³]	Únosnost [kN]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	b_1				
1	148	8000	2402	1660	74,8
2	149	7910	2359	1680	75,2
3	149	8020	2392	1780	79,6

Průměrná krychelná pevnost po 28 dnech: $f_{ck,cube,28} = 76,5$ MPa

Tabulka 14: Pevnost zkušebních vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech $f_{tk,28}$

Označení vzorku	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Obj. hmot [kg/m ³]	Únosnost [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	b_1				
1	100	9810	2453	21,8	6,5
2	99,8	9760	2445	23	6,9
3	100	9715	2429	26	7,8

Průměrná pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech: $f_{tk,88} = 7,1$ MPa

Tabulka 15: Krychelná pevnost zkušebních vzorků (b = 150 mm) v tlaku po 64 dnech $f_{ck,cube,64}$

Označení vzorku	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Obj. hmot [kg/m ³]	Únosnost [kN]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	b ₁				
1	151,5	7900	2318	1820	80,1
2	150,3	7950	2351	1710	75,8
3	149,7	7900	2345	2400	106,9

Průměrná krychelná pevnost po 64 dnech: $f_{ck,cube,64} = 87,6$ MPa

Tabulka 16: Krychelná pevnost zkušebních vzorků (b = 100 mm) v tlaku po 64 dnech $f_{ck,cube,64}$

Označení vzorku	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Obj. hmot [kg/m ³]	Únosnost [kN]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	b ₁				
1	101	2400	2376	1190	117,8
2	100	2415	2415	1050	105,0
3	103	2460	2388	1070	103,9
4	102	2440	2392	1060	103,9
5	99,8	2410	2415	1050	105,2
6	101	2400	2376	1000	99,0

Průměrná krychelná pevnost po 64 dnech: $f_{ck,cube,64} = 105,8$ MPa

Tabulka 17: Pevnost zkušebních vzorků v tahu za ohybu po 64 dnech $f_{tk,64}$

Označení vzorku	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Obj. hmot [kg/m ³]	Únosnost [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
	b ₁				
1	100	9650	2413	28	8,4
2	100	9660	2415	29	8,7
3	100	9620	2405	27,2	8,2

Průměrná pevnost v tahu za ohybu po 64 dnech: $f_{tk,64} = 8,4$ MPa

Tabulka 18: Modul pružnosti zkušebních vzorků v tlaku po 64 dnech $E_{cm,64}$

Označení zkušebního vzorku	Modul pružnosti v GPa
Trm_15052018_1	44,00
Trm_15052018_2	44,50
Trm_15052018_3	44,00

Modul pružnosti zkušebních vzorků v tlaku po 64 dnech: $E_{cm,64} = 44,2$ MPa

6.2.4.2 FRP

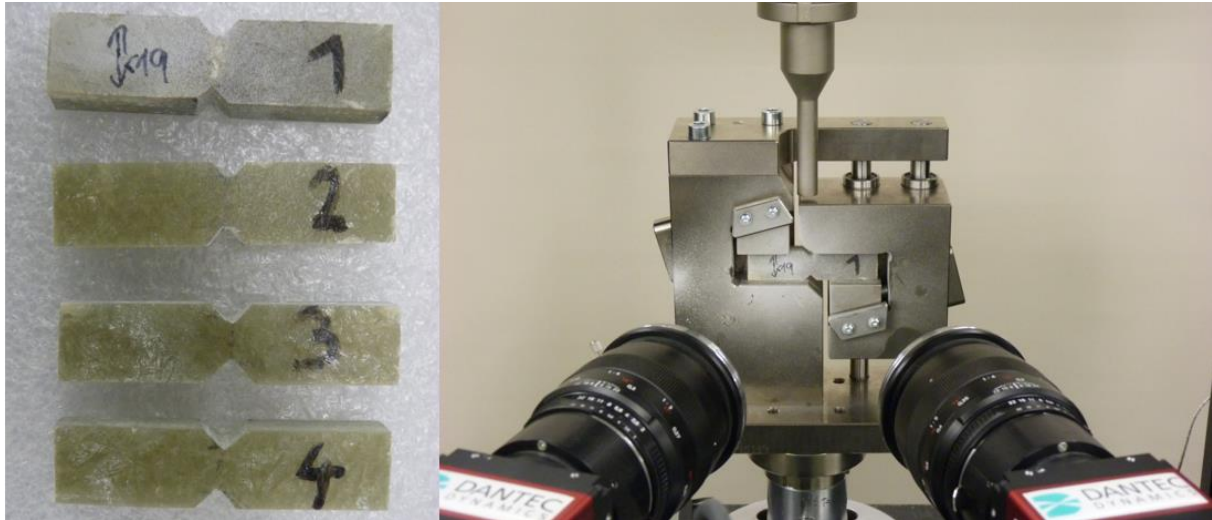
Z částí, které zbyly po ořezání nosníku na jeho finální rozměry, byly vyrobeny vzorky pro tahové a smykové zkoušky, a to s výjimkou dolní pásnice vyztuženou uhlíkovými vlákny. Vzorky, které by byly odebrány z dolní pásnice, nebylo možné na použitém zařízení přetřhnout, proto byly pro tento účel vyrobeny vzorky o tloušťce 4,5 mm, které byly vyrobeny se stejným vyztužením, pryskyřicí a stejnou technologií jako samotný nosník.

Materiálové zkoušky proběhly ve Vojenském a zkušebním leteckém ústavu.

Tabulka 19: Rozměry zkoušených vzorků:

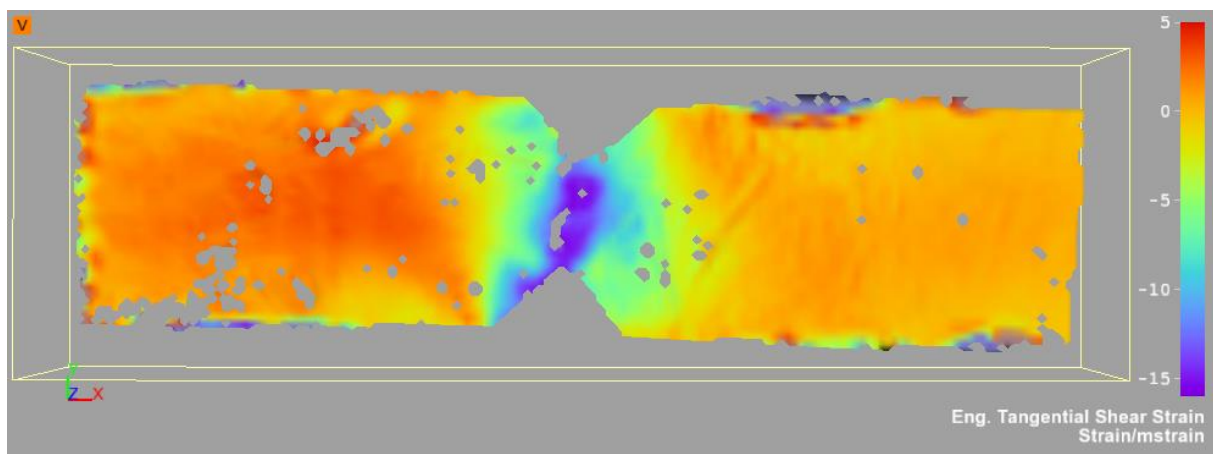
	směr vláken:	označení vzorku:	tloušťka [mm]				šířka [mm]				Plocha
			t ₁	t ₂	t ₃	t	b ₁	b ₂	b ₃	b	A [mm ²]
skelná vlákna	0°	TS_0_1	8,70	9,01	8,60	8,77	25,37	25,13	25,22	25,24	221,4
		TS_0_2	8,73	8,97	8,53	8,74	25,12	25,13	25,16	25,14	219,8
		TS_0_3	9,01	8,44	8,94	8,80	25,23	25,24	25,37	25,28	222,4
		TS_0_4	9,08	8,41	9,61	9,03	25,26	25,27	25,39	25,31	228,6
	45°	TS_45_1	8,44	8,54	8,59	8,52	25,33	25,19	25,21	25,24	215,2
		TS_45_2	9,07	8,70	8,32	8,70	25,37	25,20	25,34	25,30	220,1
		TS_45_3	8,42	8,28	8,59	8,43	25,03	25,00	25,08	25,04	211,1
		TS_45_4	8,24	8,07	8,66	8,32	25,29	25,07	25,15	25,17	209,5
	90°	TS_90_1	8,10	7,99	7,92	8,00	25,99	25,98	25,93	25,97	207,8
		TS_90_2	7,93	7,25	7,97	7,72	26,63	26,81	26,77	26,74	206,3
		TS_90_3	7,75	8,07	8,25	8,02	26,92	26,64	26,63	26,73	214,5
		TS_90_4	8,11	7,93	7,71	7,92	26,74	26,54	26,48	26,59	210,5
uhlíková vlákna	0°	TP_0_1	4,53	4,32	4,31	4,39	24,97	25,14	25,16	25,09	110,1
		TP_0_2	4,63	4,35	4,30	4,43	25,06	25,08	25,02	25,05	110,9
		TP_0_3	4,39	4,48	4,35	4,41	24,86	25,02	25,03	24,97	110,0
		TP_0_4	4,55	4,39	4,37	4,44	25,02	25,05	25,01	25,03	111,0
	90°	TP_90_1	4,45	4,50	4,42	4,46	20,30	20,20	20,30	20,27	90,3
		TP_90_2	4,74	4,19	4,52	4,48	19,99	20,33	20,11	20,14	90,3
		TP_90_3	4,43	4,27	4,09	4,26	20,10	20,12	20,06	20,09	85,7

Zkoušky pro získání smykových vlastností byly provedeny dle normy ASTM D5379M na zkušebním lisu INSTRON 55R1185 100 kN (UK141) se zařízením IOSIPESCU TEST (V-notched beam).



Obr. 63 Očíslované vzorky vlevo, detail zatěžovacího přípravku vpravo

Rychlost zatěžování byla zvolena 2.0 mm/min. Během zkoušek ve smyku byla použita metoda ESPI (Electronic speckle pattern interferometry), která spočívá ve snímání povrchu tělesa během zatěžování. Na základě zachycených snímků lze následně vizualizovat poměrná přetvoření.



Obr. 64 Zobrazení poměrného přetvoření při smykovém napětí 112 MPa

Zkoušky v tahu byly provedeny dle normy ASTM D3039M na zkušebním lisu Schenck 250 (+/- 250kN) za použití extenzometru Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25 mm).

Rychlost zatěžování byla zvolena 2.0 mm/min.



Obr. 65 Zkušební lis Schenck 250 (+/- 250kN) během experimentu



Obr. 66 Zkušební vzorky stojiny vlevo, zkušební vzorky uhlíkové pásnice vpravo

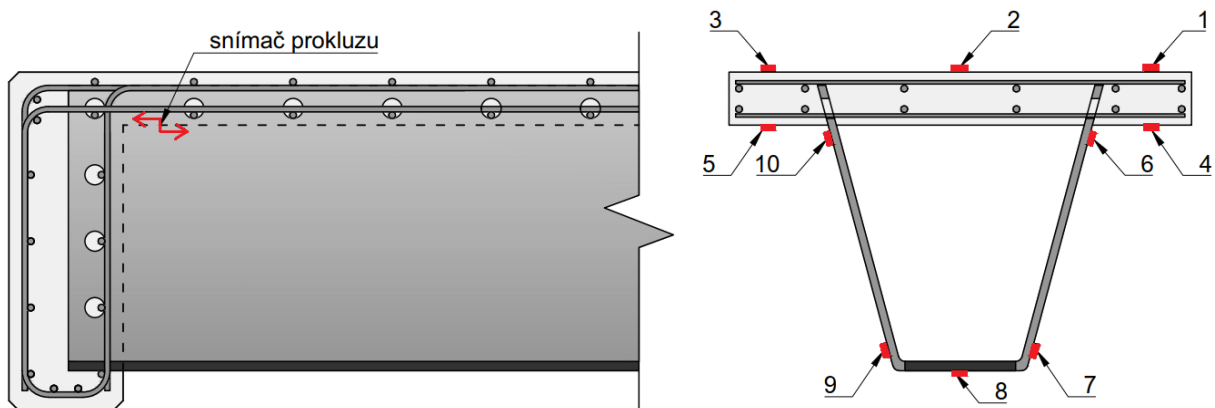
Výsledky materiálových zkoušek jsou uvedeny viz Tabulka 20.

Tabulka 20: Výsledky zkoušených vzorků:

	Směr vláken:	Označení vzorku:	Modul pružnosti	Poisson. číslo	Síla	Pevnost
			[GPa]	[-]	[kN]	[MPa]
skelná vlákna	0°	TS_0_1	12,695	0,39	30,786	139,08
		TS_0_2	12,539	0,42	31,608	143,854
		TS_0_3	12,465	0,35	32,093	144,263
		TS_0_4	-	-	29,276	128,097
		průměr:	12,566	0,39	30,941	138,82
	45°	TS_45_1	15,277	0,31	46,949	218,323
		TS_45_2	14,281	0,26	52,274	237,49
		TS_45_3	14,943	0,33	51,916	245,946
		TS_45_4	-	-	-	-
		průměr:	14,834	0,30	50,38	233,92
	90°	TS_90_1	12,965	0,30	32,431	156,098
		TS_90_2	12,57	0,29	32,634	158,084
		TS_90_3	12,289	0,43	30,824	143,787
		TS_90_4	-	-	-	-
		průměr:	12,608	0,34	31,963	152,66
	uhlíková vlákna	0°	TP_0_1	49,041	0,37	65,623
TP_0_2			51,164	0,33	65,038	586,076
TP_0_3			51,867	0,27	65,909	598,529
TP_0_4			-	-	-	-
průměr:			50,69	0,33	65,523	593,47
90°		TP_90_1	7,358	0,06	6,672	73,806
		TP_90_2	7,361	0,07	6,602	73,172
		TP_90_3	7,36	0,05	7,371	86,124
		průměr:	7,359	0,06	6,882	77,701

6.2.5 Průběh zkoušky

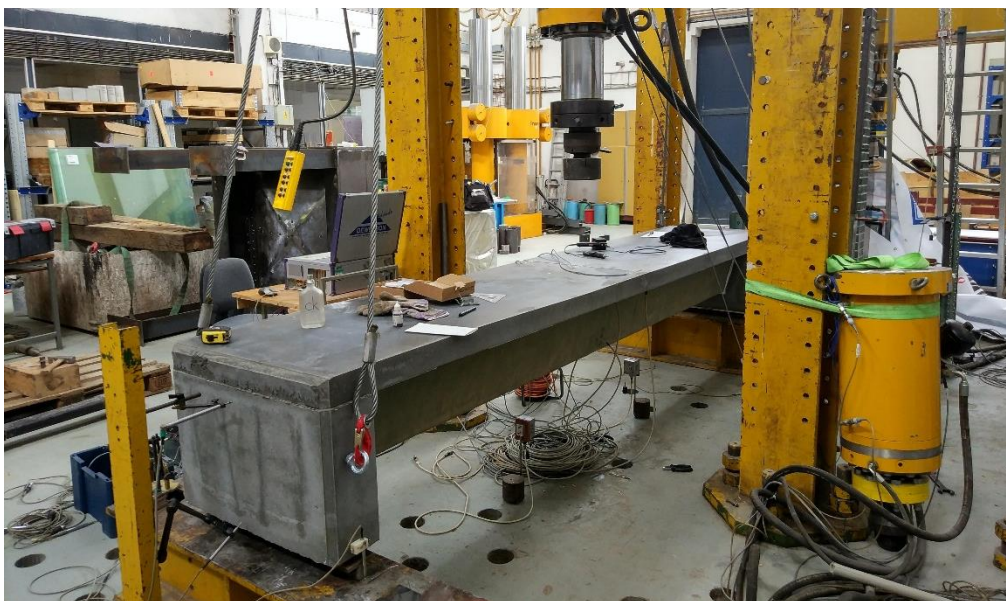
Zkouška nosníku proběhla vzhledem ke kapacitě experimentálního centra po 2 měsících od betonáže. Zkoušky nosníku v ohybu byly provedeny pomocí hydraulického lisu s maximální zatěžovací silou 1000 kN, který byl řízen deformací. V oblasti podpor byly mezi stojinami a betonovou deskou nainstalovány snímače prokluzu. V kritických místech byly nainstalované tenzometry HBM 1-LD20-6/120 s dlouhým protažením.



Obr. 67 Rozmístění snímačů prokluzu a tenzometrů na zkušebním nosníku

Zatěžování proběhlo ve čtyřech krocích, simulací zatěžovacích stavů na mostě:

- 1) MSP – lávka 12 m, zatížení chodci, 10 cyklů 40–160 kN
- 2) MSP – lávka 20 m, zatížení chodci, 10x cyklů 70–280 kN
- 3) MSÚ – lávka 20 m, zatížení chodci, 10x cyklů 100–380 kN
- 4) Kolaps lávky – zatěžování do porušení



Obr. 68 Zkušební nosník po odbednění



Obr. 69 Snímače dráhy (prokluz ve spřažení), průhyb nosníku, posun příčnicku, stlačení ložisek



Obr. 70 Rozmístění tenzometrů



Obr. 71 Způsob podepření nosníků, připravený nosník připravený k zatěžování



Obr. 72 Nosník po kolapsu, vyboulení stojiny nosníku



Obr. 73 Smykové trhliny v betonové desce, Inspekční otvor – viditelná delaminace stojiny

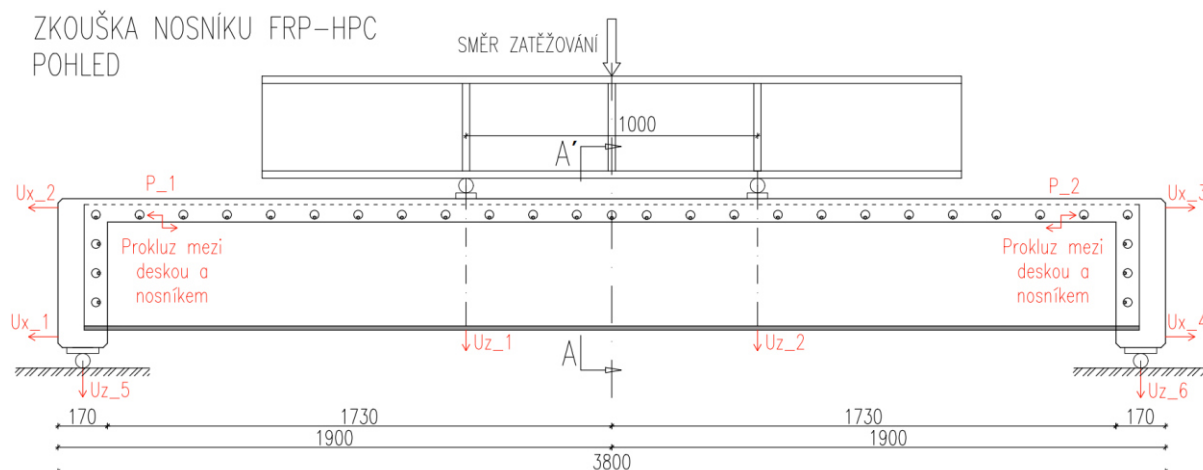
6.2.6 Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny průběhy měřených hodnot při experimentu.

Jedná se o tyto veličiny:

- Průběh zatěžování
- Závislost průhybu na zatěžovací síle
- Závislost prokluzu na zatěžovací síle
- Napětí v betonu
- Napětí ve stojinách
- Napětí v dolní pásnici

Rozmístění snímačů prokluzu, snímačů dráhy a tenzometrů:

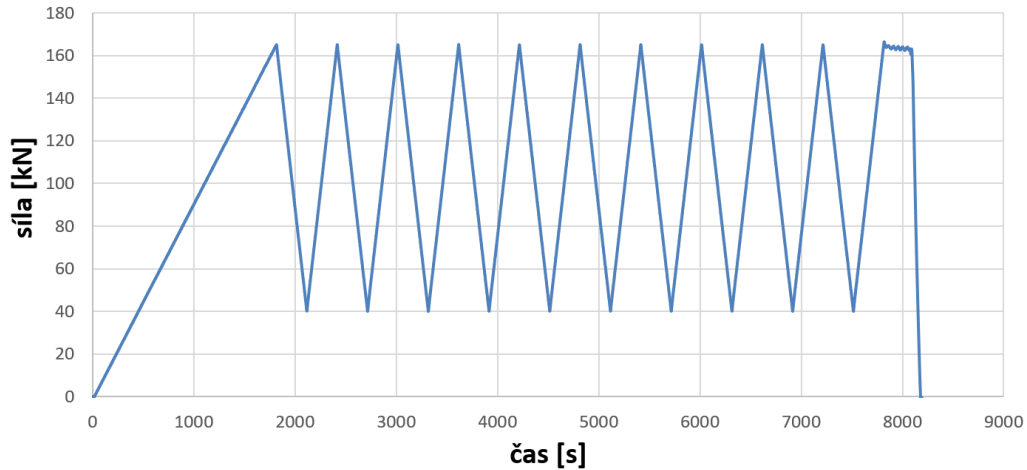


74 Rozmístění snímačů prokluzu a tenzometrů na zkušebním nosníku

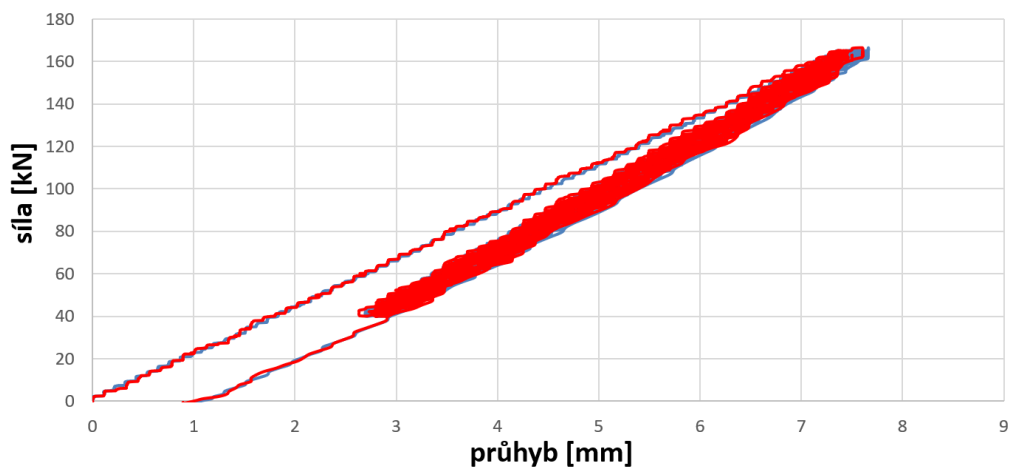
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následujících kapitolách. Pro výpočet napětí z přetvoření odečtených na tenzometrech jsou použity průměrné moduly pružnosti materiálů zjištěných při materiálových zkouškách. Výsledky jsou podrobně vyhodnoceny v kapitole 6.2.7.

6.2.6.1 1. fáze zatěžování

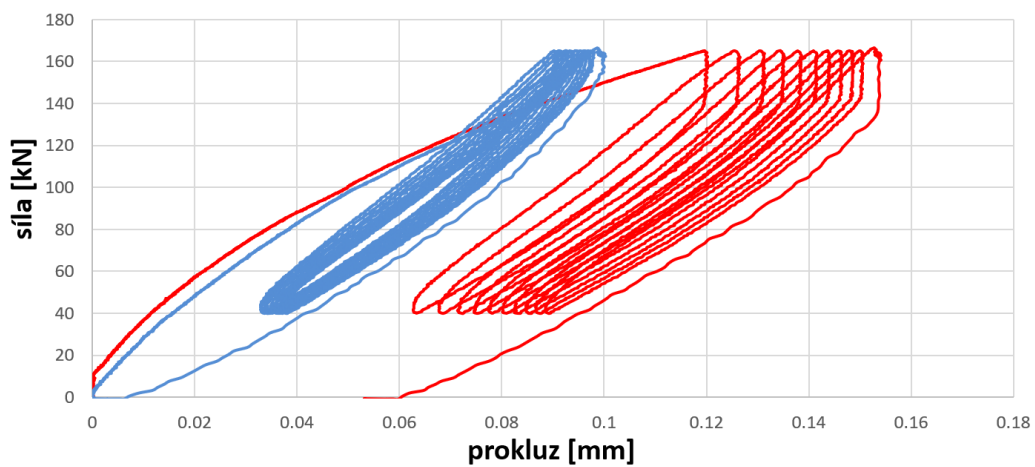
V první fázi zatěžování byl na nosníku simulován stav MSP pro lávku o rozpětí 12 m, která je zatížena chodci. Na nosníku proběhlo 10 cyklů mezi 40–160 kN. Nosník se choval pružně bez známek porušení. Průběhy deformací a napětí jsou uvedeny níže.



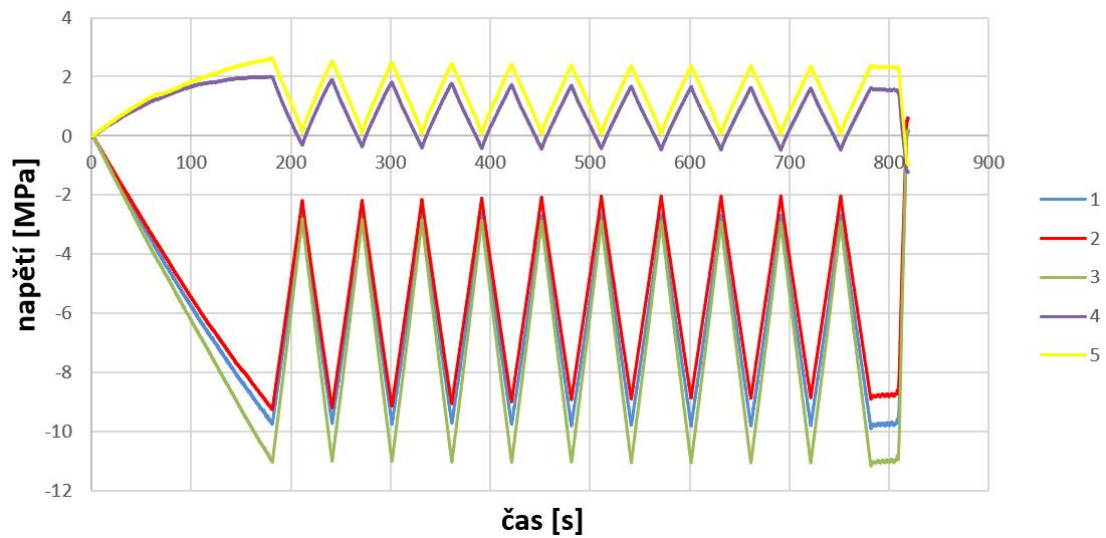
Obr. 75 1. fáze zatěžování: průběh zatěžování



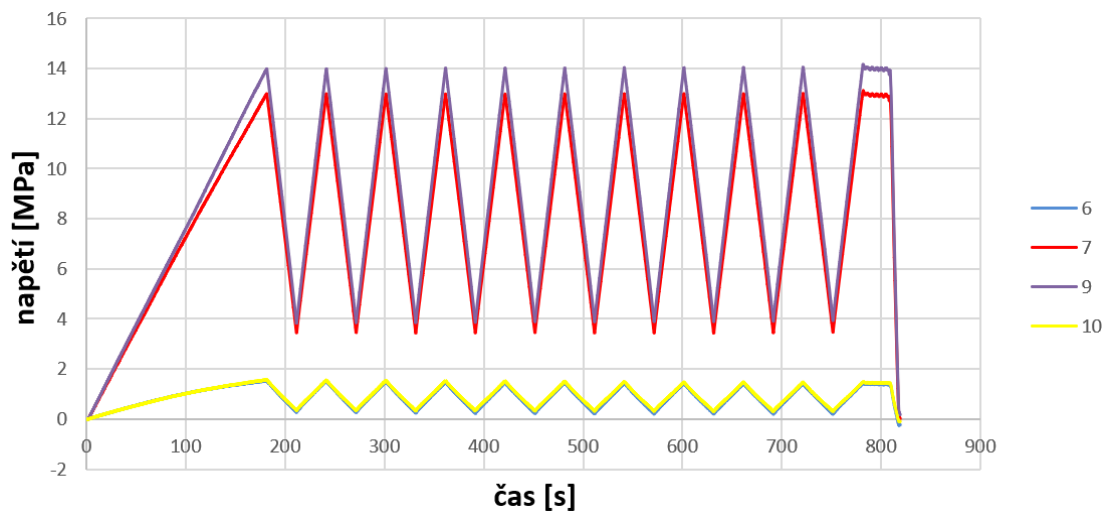
Obr. 76 1. fáze zatěžování: závislost přhybu na zatěžovací síle



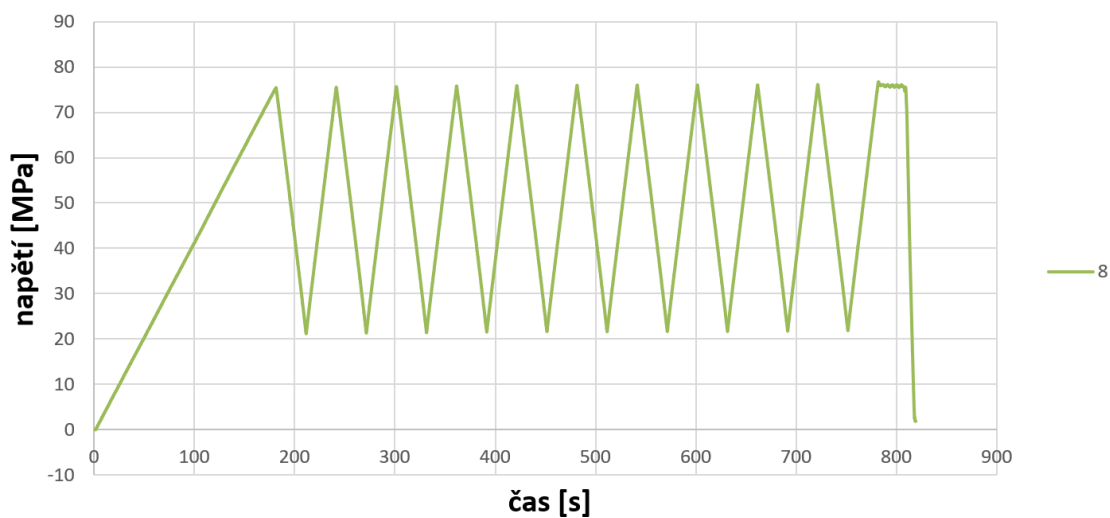
Obr. 77 1. fáze zatěžování: závislost prokluzu na zatěžovací síle



Obr. 78 1. fáze zatěžování: napětí v betonu



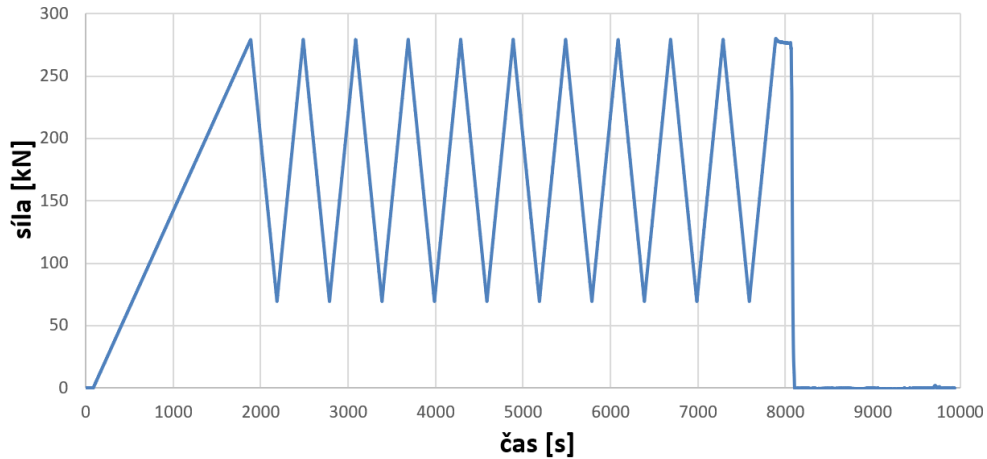
Obr. 79 1. fáze zatěžování: napětí ve stojinách



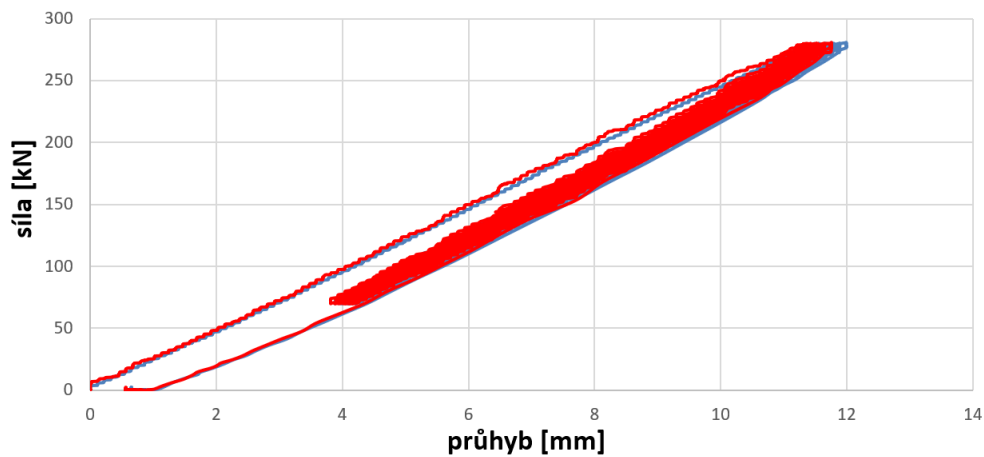
Obr. 80 1. fáze zatěžování: napětí v dolní pásnici

6.2.6.2 2. fáze zatěžování

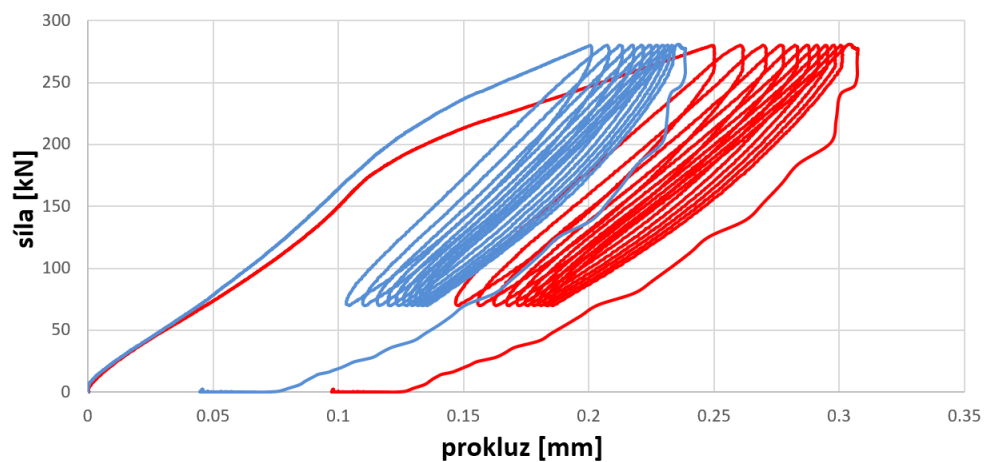
Ve druhé fázi zatěžování byl na nosníku simulován stav MSP pro lávku o rozpětí 20 m, která je zatížena chodci. Na nosníku proběhlo 10 cyklů mezi 70–280 kN. Nosník se choval pružně bez známek porušení. Průběhy deformací a napětí jsou uvedeny níže.



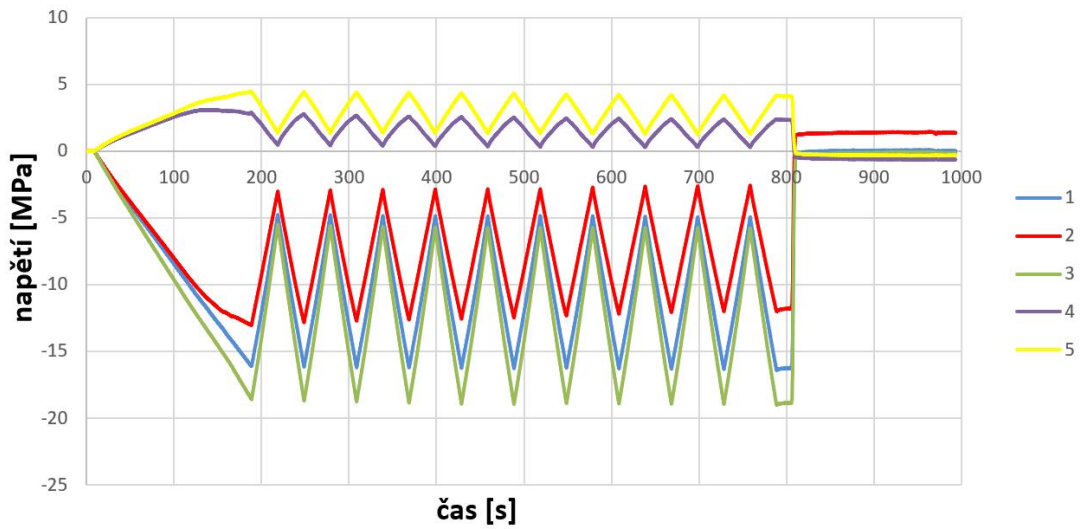
Obr. 81 2. fáze zatěžování: průběh zatěžování



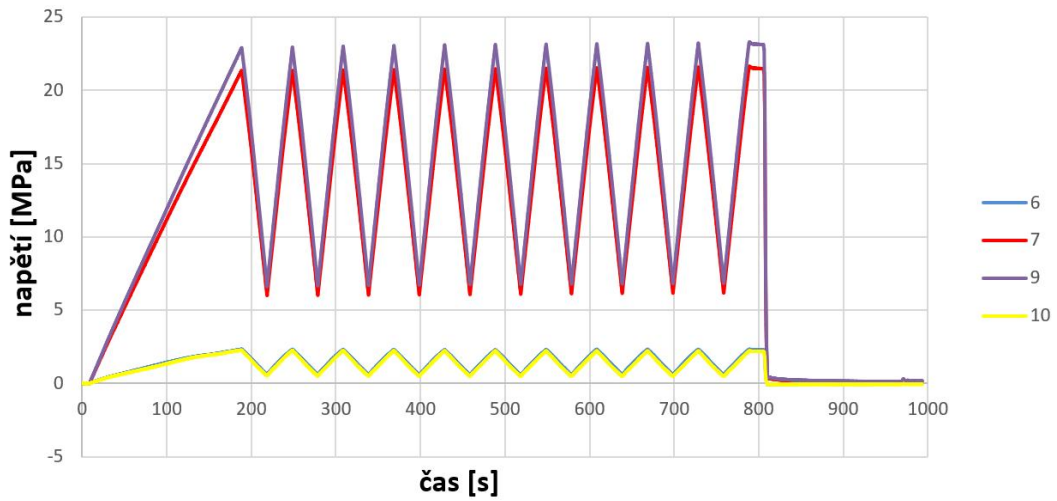
Obr. 82 2. fáze zatěžování: závislost průhybu na zatěžovací síle



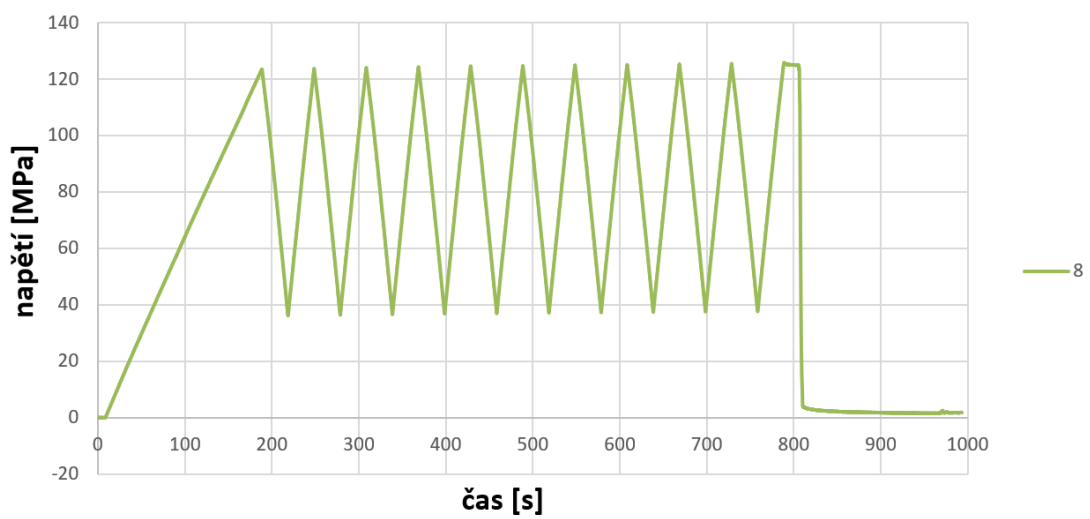
Obr. 83 2. fáze zatěžování: závislost prokluzu na zatěžovací síle



Obr. 84 2. fáze zatěžování: napětí v betonu



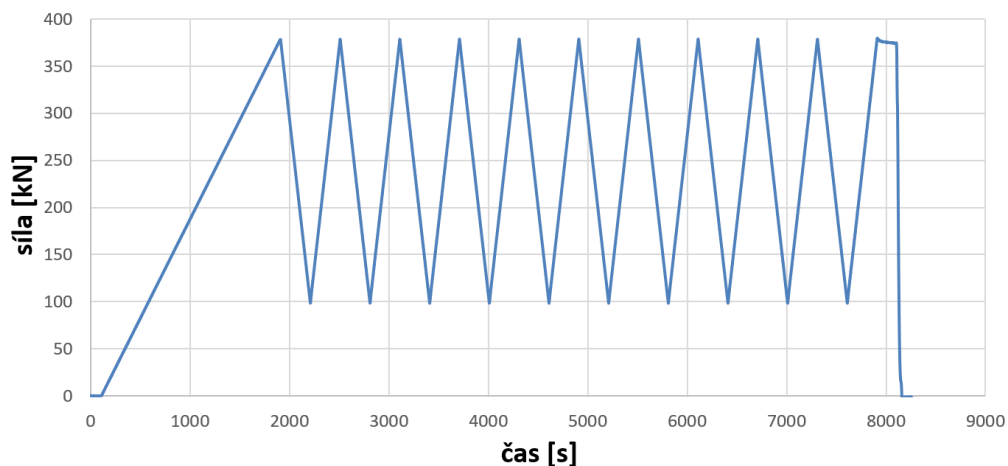
Obr. 85 2. fáze zatěžování: napětí ve stojinách



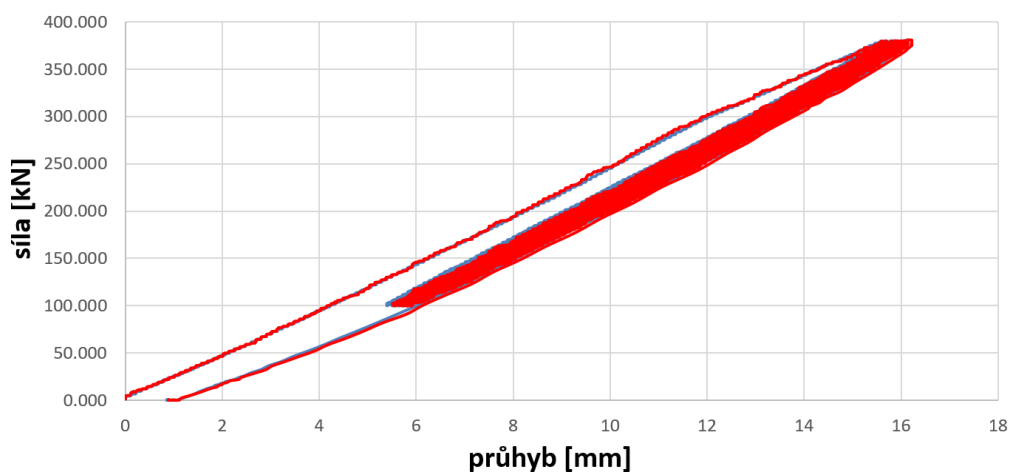
Obr. 86 2. fáze zatěžování: napětí v dolní pásnici

6.2.6.3 3. fáze zatěžování: lávka 20 m, zatížení chodci, 10x cyklů 100–380 kN

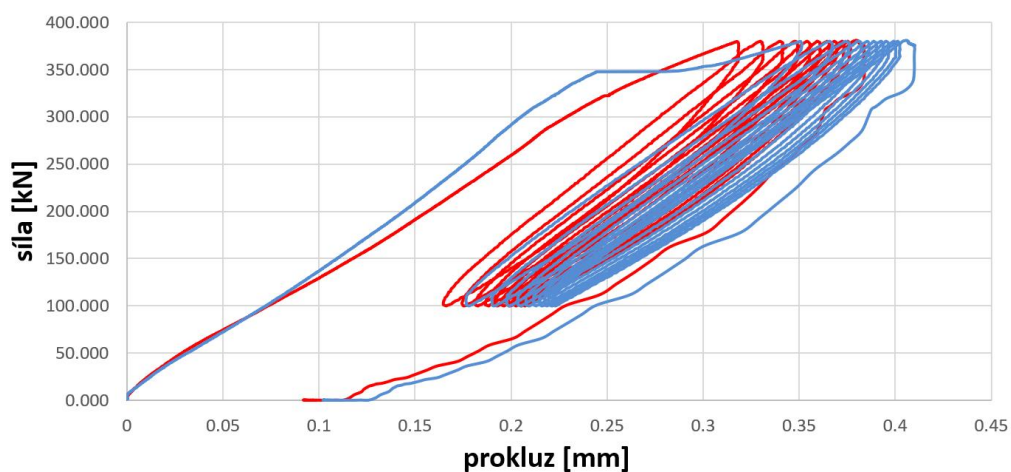
Ve třetí fázi zatěžování byl na nosníku simulován stav MSÚ pro lávku o rozpětí 20 m, která je zatížena chodci. Na nosníku proběhlo 10 cyklů mezi 100–380 kN. Nosník se choval pružně bez známek porušení. Průběhy deformací a napětí jsou uvedeny níže.



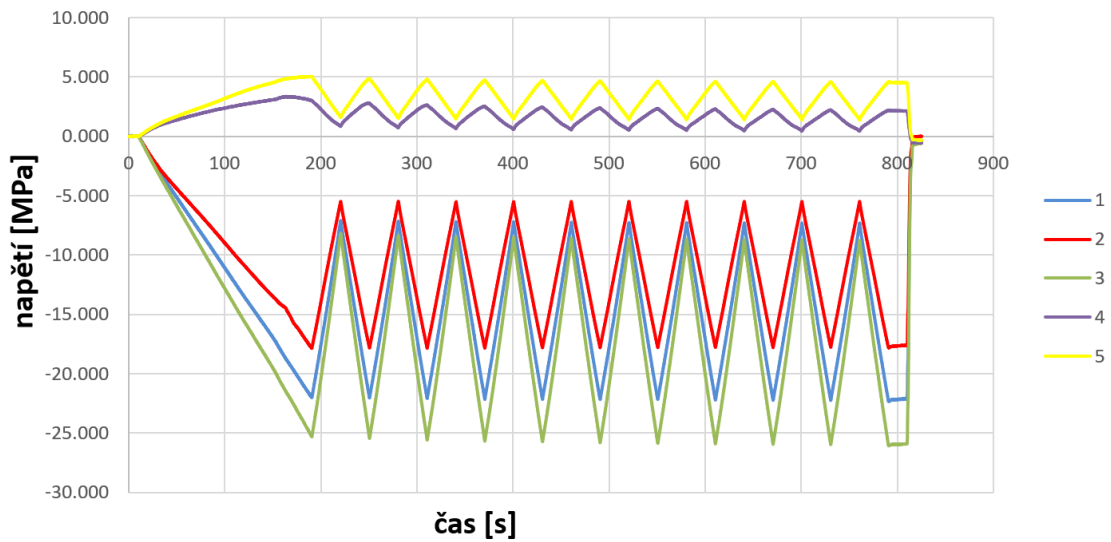
Obr. 87 3. fáze zatěžování: průběh zatěžování



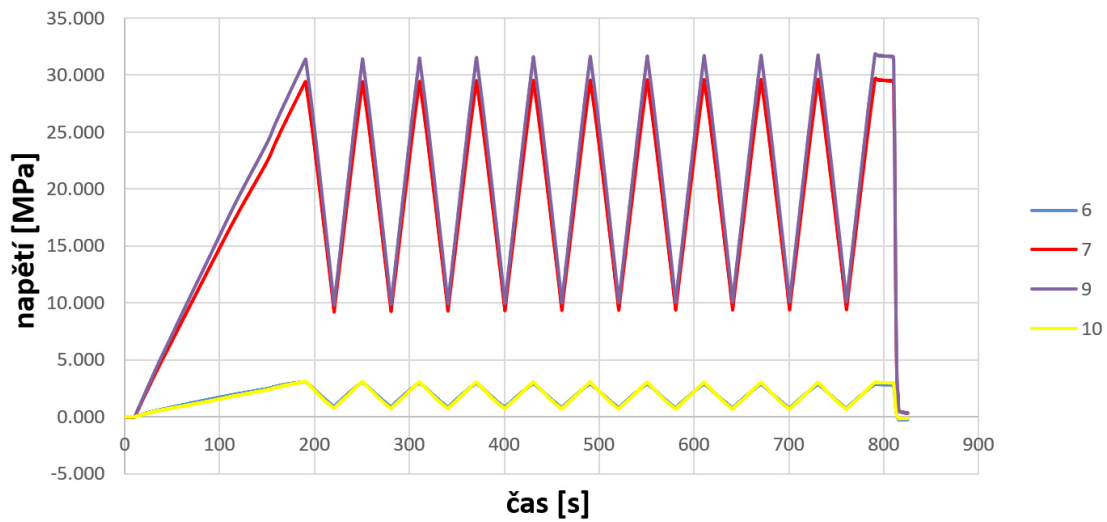
Obr. 88 3. fáze zatěžování: závislost průhybu na zatěžovací síle



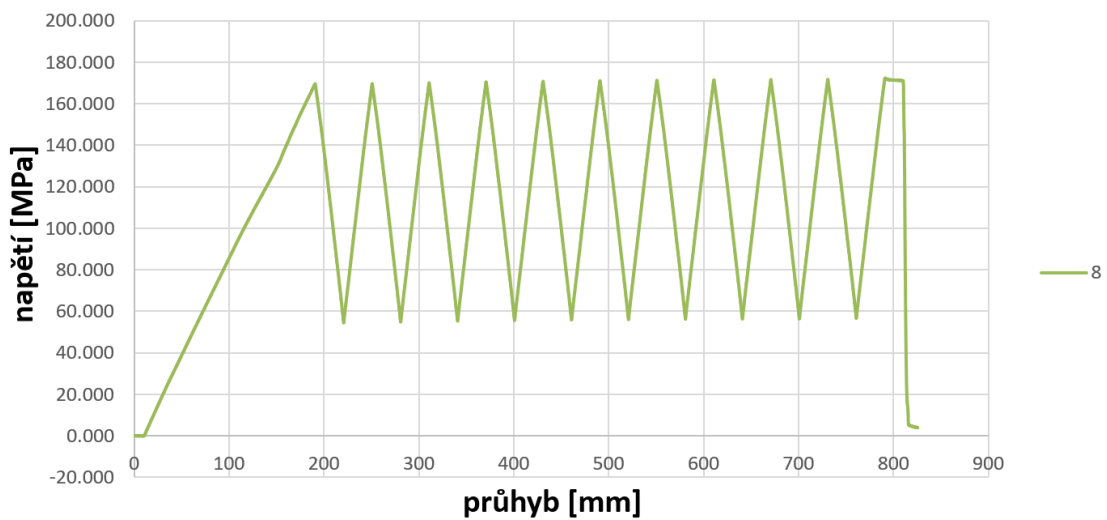
Obr. 89 3. fáze zatěžování: závislost prokluzu na zatěžovací síle



Obr. 90 3. fáze zatěžování: napětí v betonu



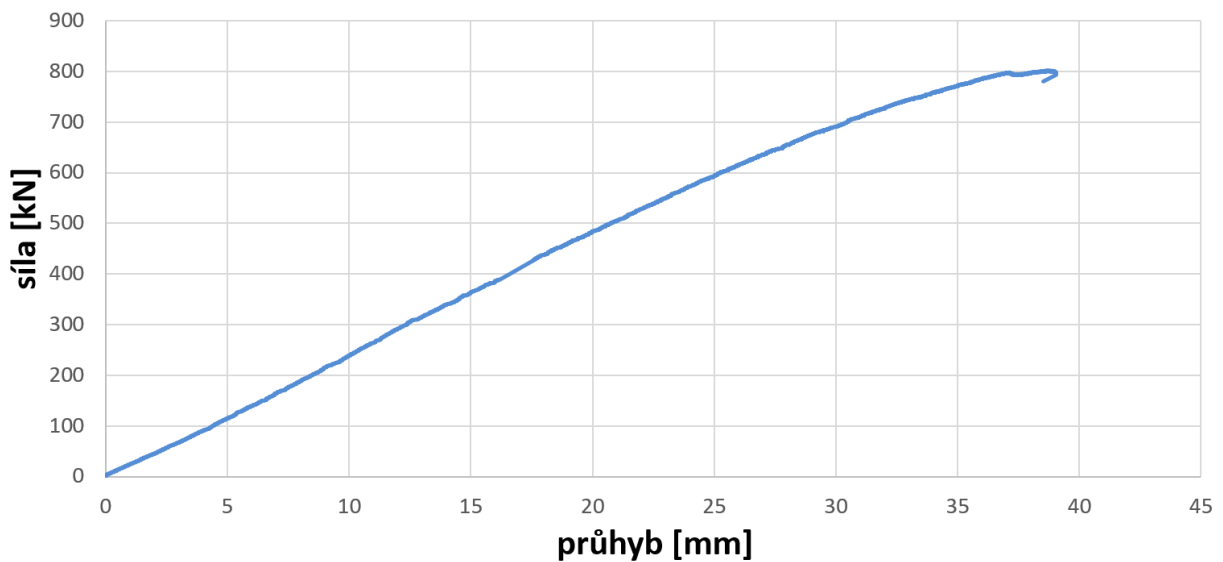
Obr. 91 3. fáze zatěžování: napětí ve stojinách



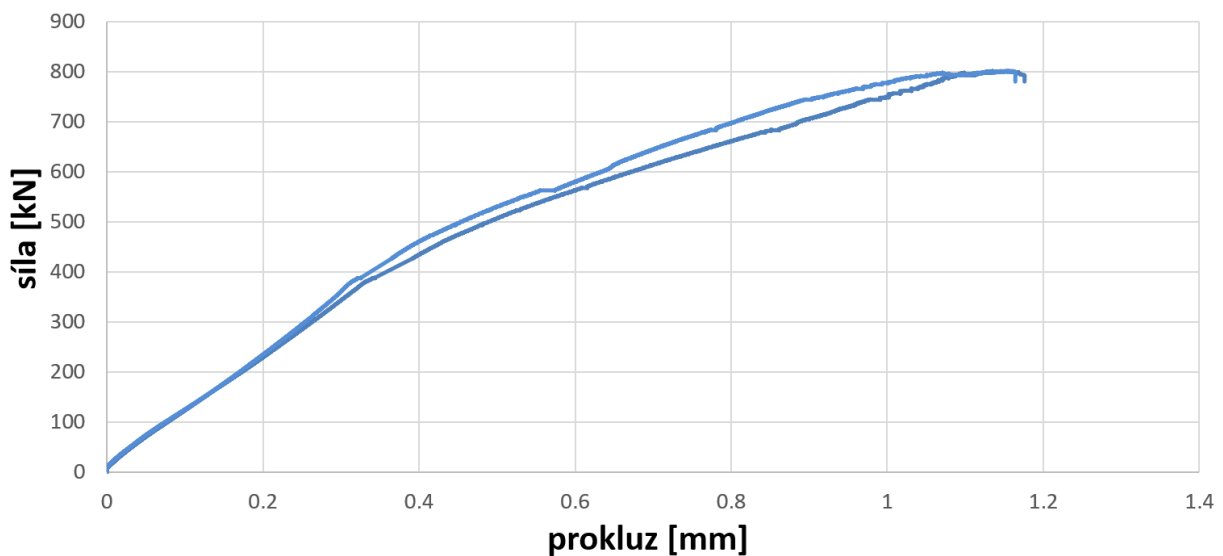
Obr. 92 3. fáze zatěžování: napětí v dolní pásnici

6.2.6.4 4. fáze zatěžování

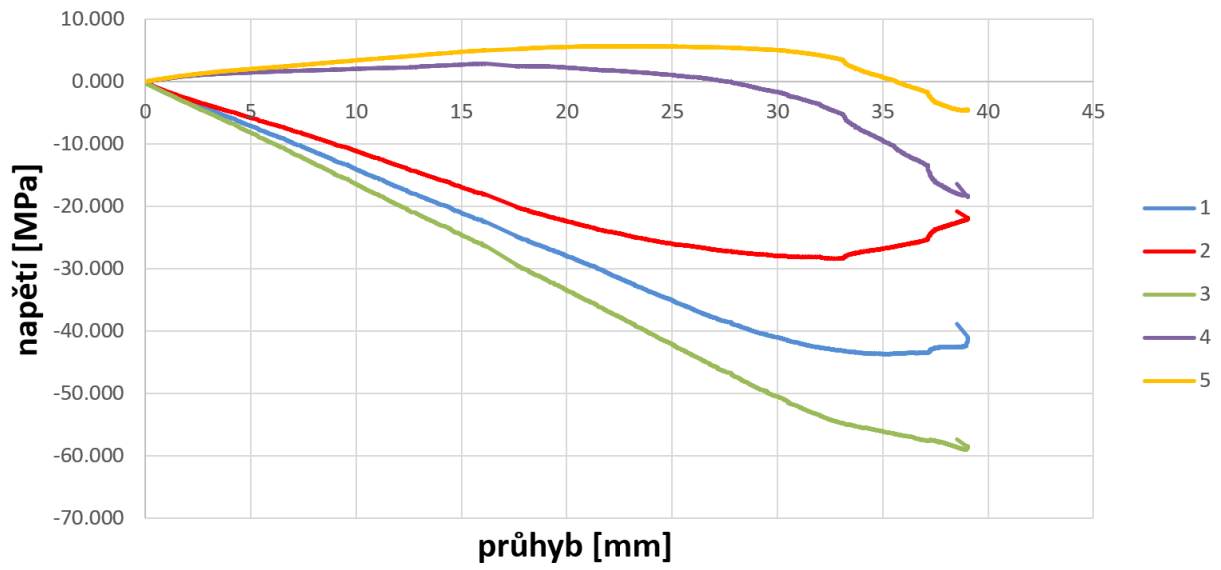
Ve čtvrté fázi zatěžování byl nosníku simulován zatěžován do porušení. Nosník se choval pružně přibližně do zatěžovací síly 500 kN, kdy se začal objevovat nelineární průběh napětí v horních vláknech betonové desky. Nosník zkolaboval při zatěžovací síle 800 kN. Průběhy deformací a napětí jsou uvedeny níže.



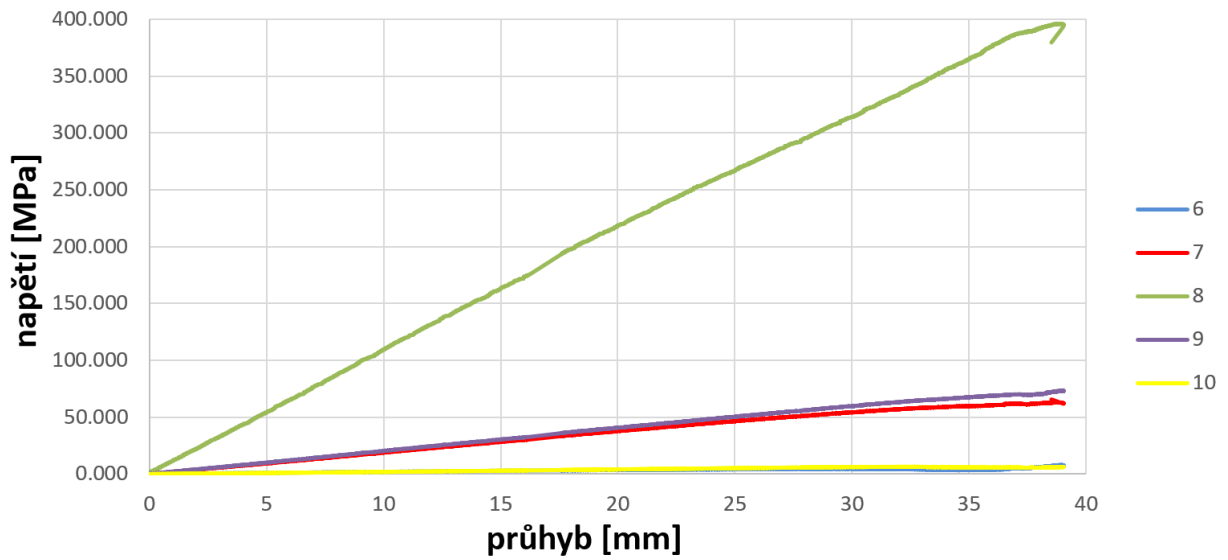
Obr. 93 4. fáze zatěžování: závislost průhybu na zatěžovací síle



Obr. 94 4. fáze zatěžování: závislost prokluzu na zatěžovací síle



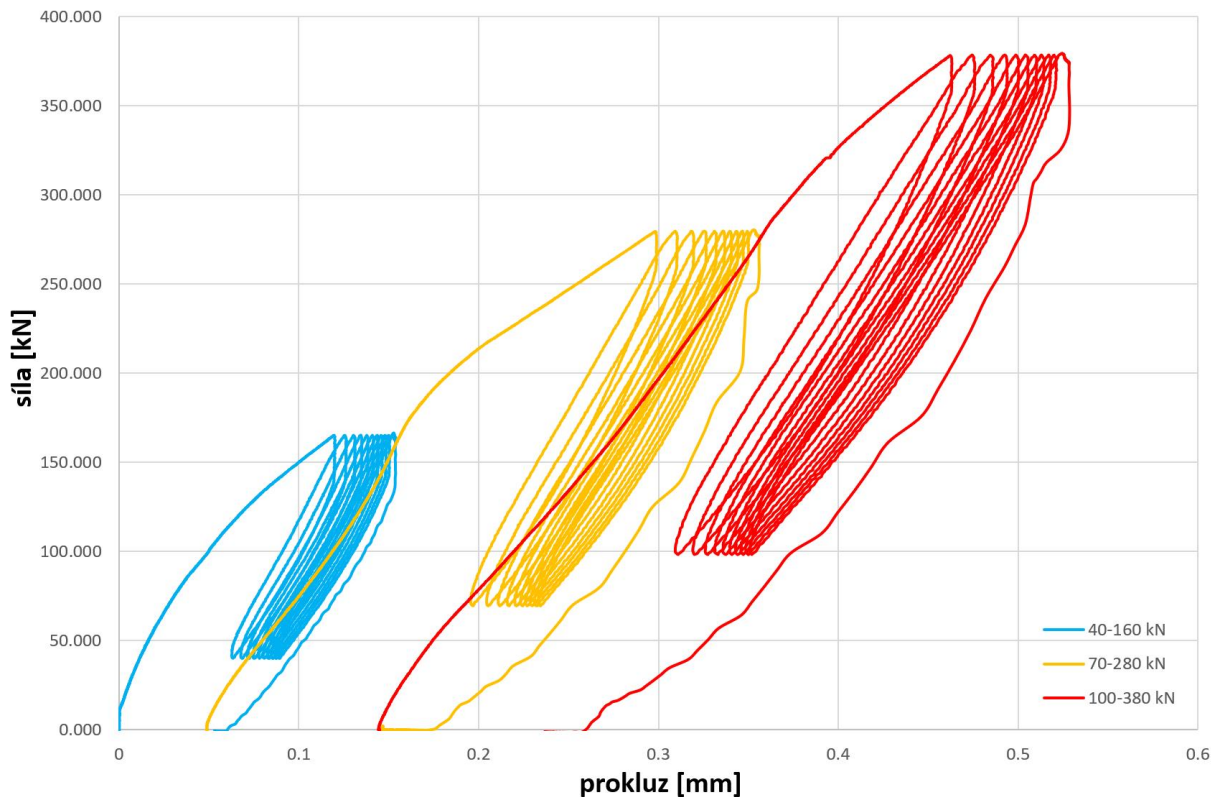
Obr. 95 4. fáze zatěžování: napětí v betonové desce



Obr. 96 4. fáze zatěžování: napětí v kompozitu

6.2.7 Vyhodnocení

Závislost prokluzu spřažení pro úvodní tři zatěžovací kroky je zobrazena v grafu, Obr. 97.



Obr. 97 Kumulace prokluzu ve spřažení během fází zatěžování

Ze zatěžovacího diagramu je patrné, že při cyklickém zatěžování docházelo ke kumulaci prokluzu mezi FRP nosníkem a betonovou deskou. Na deseti zatěžovacích cyklech v rámci jednoho kroku je však vidět, že velikost přírůstků se s každým dalším cyklem podstatně zmenšuje a konverguje k ustálené deformaci. Je pravděpodobné, že tento prokluz by se po určitém počtu cyklů ustálil a dále již nenarůstal.

Z grafu je dále patrné, že při přechodu do dalšího zatěžovacího kroku, kdy bylo zvýšeno zatížení, se tato zatěžovací křivka dělí na lineární a nelineární část. Do maximálního zatížení předchozího zatěžovacího kroku se spřažení chová lineárně, další přírůstek síly již způsobí nelineární chování, které již však dále s cyklováním nenarůstá.

Tyto popsané nelinearity lze odůvodnit výrobními nedokonalostmi během ruční laminace FRP nosníku bez výsledného vakuování. Mohlo tak v úvodních fázích dojít k dopnutí dílčích skelných či uhlíkových vláken v oblastech se vzduchovou bublinkou. Dále mohlo docházet k dotlačování GFRP stojiny v otvorech spřažení, které byly

vtřeny ruční vrtačkou a obsahovaly jisté otřepy. Tyto nevratné přírůstky v prokluzu nejsou vysokých hodnot a lze je přisoudit imperfkcím během výroby a lze očekávat, že se tyto prokluzu odehrají na začátku používání lávky a k dalšímu nárůstu již docházet nebude. Jako pozitivní výsledek lze označit, že se spřažení chová lineárně i při cyklování hodnotou zatížení od MSÚ.

Z dat naměřených na tenzometrech vyplývá, že neutrální osa se nachází v betonové desce v blízkosti jejímu spodnímu okraji. V dolní tažené pásnici vyztužené uhlíkovými vlákny bylo naměřeno na mezi kolapsu 396,7 MPa, což je 66,7 % průměrné meze pevnosti pásnice. Maximální dosažené napětí v betonové desce bylo 59,0 MPa, což je 67,3 % průměrné krychelné pevnosti. Maximální napětí ve stojině bylo 73,7 MPa, což je 67,3 % průměrné meze pevnosti stojiny. Lze tedy konstatovat, že pokud by bylo zabráněno ztrátě stability a vzorek se porušil překročením meze pevnosti některého z materiálů, byla by kapacita takto navrženého nosníku o třetinu vyšší.

Ke ztrátě stability ovšem došlo lokálně pod břemenem, což je zatížení, které se na lávkách zpravidla nevyskytuje, kolové tlaky mají řádově nižší hodnoty. V takové konstrukci by patrně k tomuto způsobu porušení nedošlo, stojina nosníku je díky poloze neutrální osy v celé výšce tažená. Nelineární přírůstky napětí se objevily v betonu na pravém dolním tenzometru při hodnotě 400 kN, což je zřejmě dáno geometrickými imperfkcemi. U ostatních tenzometrů bylo zaznamenáno nelineární chování materiálů až při hodnotě 600 kN.

Vzorek se porušil za hlasitého praskání skelných vláken pod působištěm zatížení delaminací stojin a jejich následným vyboulením. Bylo dosaženo maximální síly 800 kN při průhybu 37 mm.

7 Numerická analýza

Hlavním cílem numerické analýzy je vytvoření numerických modelů protlačovacího vzorku a nosníku o průřezu reálné velikosti, jenž by definovaly chování perforované lišty. Jelikož je FRP materiál složen z pryskyřice a vláken, která jsou v prvku rozmístěna s různou orientací a je tak velmi obtížné tento materiál věrně modelovat, byly v úvodu numerické analýzy provedeny numerické zkoušky, které simulovaly materiálové zkoušky FRP desek, jež byly použity při experimentu. Tato numerická analýza vedla k použití a validaci materiálového modelu betonu s rozetřenou výztuží,

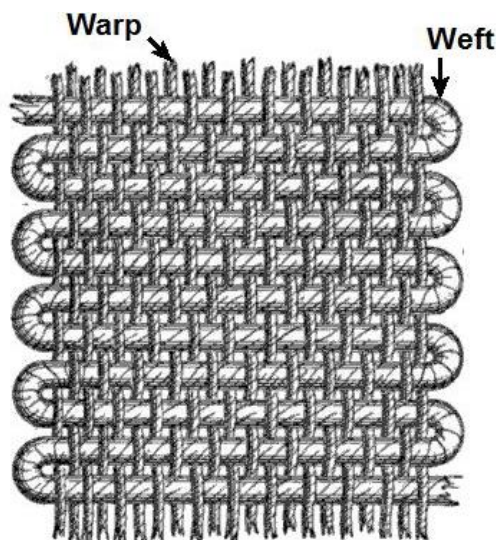
v němž pryskyřici zastupuje beton a rozetřenou výztuž vlákna. Na základě výsledků byl tento materiálový model vyhodnocen jako vhodný pro model protlačovacího vzorku. Následně byla provedena numerická analýza modelu spřaženého nosníku.

7.1 Materiálový model FRP

V této kapitole je popsán weft/warp efekt, který je zapříčiněn způsobem výroby tkanin a který ovlivňuje výsledné materiálové vlastnosti FRP. Dále je představena metoda rule of mixture, pomocí které lze na základě výpočtů predikovat materiálové vlastnosti FRP. Touto metodou jsou spočteny vlastnosti kompozitů použitých v experimentální části práce. Je představen materiálový model v programu ATENA. Vhodnost materiálových modelů je v závěru kapitoly následně porovnána a vyhodnocena vhodnost jejich použití.

7.1.1 WEFT/WARP efekt

Vzhledem ke způsobu tkaní skelných tkanin použitých při experimentu viz Obr. 98, je třeba zohlednit ve výpočtu skutečnost, že tkanina má v příčném směru vlákna přímá, v podélném směru jsou však vlákna vedena střídavě mezi vlákny příčnými, což způsobuje určité zvlnění vláken. Při zatížení aplikovaném na výrobek, kde jsou použity tyto tkaniny, jsou pak tyto vlákna deformována, nejen v podélném směru prvku, ale dochází i k lokálnímu dopínání vláken.



Obr. 98 Způsob pletení tkaniny [38]

Tento efekt je popsán v katalogových listech tkanin určených pro výrobu FRP.

Vzhledem k tomuto efektu je podélná pevnost skelných vláken ve výpočtu dále uvažována s pevností 900 MPa, zatímco pevnost příčných vláken 1000 MPa.

7.1.2 Rule of Mixture

Pomocí metody rule of mixture lze predikovat vlastnosti kompositu před samotnou výrobou na základě znalosti vlastností jednotlivých složek, vláken a pryskyřice. V rámci kapitoly je metoda nejdřív obecně popsána, následně jsou spočteny vlastnosti kompozitů použitých při experimentech. Tyto hodnoty jsou následně porovnány s vlastnostmi FRP stanovými materiálovými zkouškami.

Obecný popis metody:

Objemový podíl vláken V_f je definován jako:

$$V_f = v_f / v_c$$

Kde v_f je objem vláken a v_{com} je kompositu.

Objemový podíl matrice V_m je definován jako:

$$V_m = v_m / v_c$$

Kde v_m je objem vláken a v_c je kompositu.

Maximální napětí v kompositu σ_c je potom vyjádřeno:

$$\sigma_{com} = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f$$

Kde σ_m je maximální napětí v matrici a σ_f maximální napětí vláken.

Rovnice také může být také vyjádřena pomocí mezního protažení ε_i a modulu pružnosti E_i .

$$\varepsilon_{com} \cdot E_{com} = \varepsilon_m \cdot E_m \cdot V_m + \varepsilon_f \cdot E_f \cdot V_f$$

Protože mezní protažení ve směru vláken jsou stejná platí:

$$E_{com} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f$$

Pro použití s více typy vláken:

Prvním krokem je stanovení, která komponenta rozhoduje o únosnosti:

$$\varepsilon_{com} = \min \left(\frac{\sigma_{carbon}}{E_{carbon}}; \frac{\sigma_{glass}}{E_{glass}}; \frac{\sigma_{resin}}{E_{resin}} \right)$$

Modul pružnosti kompositu před selháním jakékoli složky pak je:

$$E_1 = E_{carbon} \cdot V_{carbon} + E_{glass} \cdot V_{glass} + E_{resin} \cdot V_{resin}$$

Napětí, při kterém se poruší první komponenta pak je:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_{com}$$

V případě, že se poruší skelná vlákna jako první, modul pružnosti klesne na tuto hodnotu:

$$E_2 = E_{carbon} \cdot V_{carbon} + E_{glass} \cdot V_{glass} + E_{resin} \cdot V_{resin}$$

Jelikož byly při výrobě kompozitu použity tkaniny s vlákny pod úhlem 45° bylo nutné v teoretických vztazích pro výpočet maximálního napětí, modulu pružnosti a únosnosti vzorků aplikovat tyto úpravy:

- Jelikož byla pro výrobu použita skelná rohož, která má vlákna uspořádána nahodile ve všech směrech, tato výztuž byla rovnoměrně rozpočtena do všech 4 základních směrů (0°, 90°, 45°, -45°).
- Do výpočtu je zaveden úhel α . Efektivní parametry komponent jsou ve výpočtu přenásobené hodnotou $\cos \alpha$. Při zatěžování v podélném směru, tak jsou ve výpočtu příčná vlákna vyřazeny z akce, vlákna pod úhlem 45° pak jsou násobeny hodnotou $\cos 45^\circ = 0,5$.

S těmito úpravami byly spočteny materiálové vlastnosti kompozitů použitých při experimentech. Podrobný výpočet materiálových vlastností je uveden v příloze 2.

Tabulka 21 Porovnání materiálových vlastností stojiny a dolní pásnice kompozitního nosníku s vlastnostmi stanovenými metodou rule of mixture

			Tahové zkoušky			Rule of mixtures		
			Síla	Modul	Pevnost	Síla	Modul	Pevnost
			F	E	σ	F	E	σ
			[kN]	[GPa]	[MPa]	[kN]	[GPa]	[MPa]
GFRP	0°	výsledky	30.9	12.6	138.8	35.8	14.4	162.2
		porovnání				115.8%	114.7%	116.8%
	45°	výsledky	50.4	14.8	233.9	35.6	14.9	167.7
		porovnání				70.7%	100.5%	71.7%
	90°	výsledky	32.0	12.6	152.7	32.0	15.8	178.2
		porovnání				100.0%	125.6%	116.7%
CFRP	0°	výsledky	65.5	50.7	593.5	65.4	34.7	592.4
		porovnání				99.8%	68.4%	99.8%
	90°	výsledky	6.9	7.4	77.7	6.1	6.2	69.4
		porovnání				88.8%	83.8%	89.3%

Tabulka 22 Porovnání materiálových vlastností FRP desek použitým při protlačovacích zkouškách s vlastnostmi stanovenými metodou rule of mixture

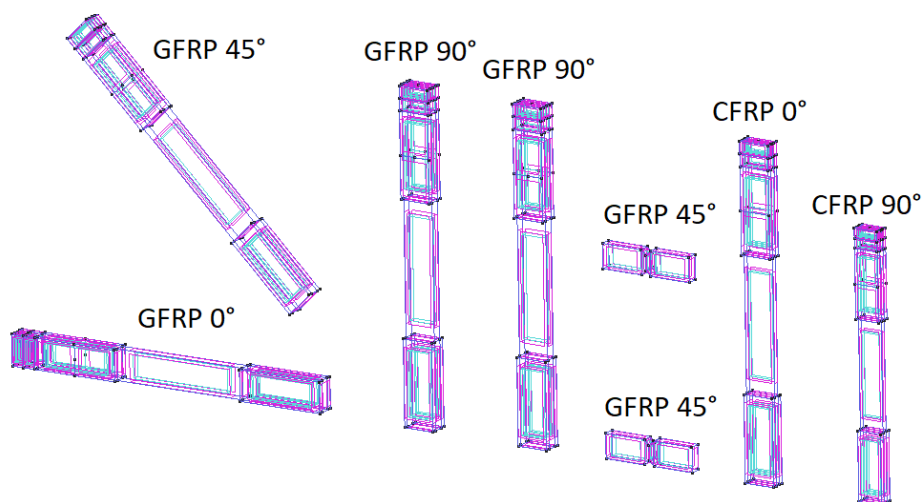
			Tahové zkoušky			Rule of mixtures		
			Síla	Modul	Pevnost	Síla	Modul	Pevnost
			F	E	σ	F	E	σ
			[kN]	[GPa]	[MPa]	[kN]	[GPa]	[MPa]
GFRP	0°	výsledky	30.9	120.0	8.5	30.6	124.4	9.7
		porovnání				98.8%	103.6%	113.8%

Výsledky stanovené metodou rule of mixture se z hlediska modulu pružnosti pohybují v rozmezí 68,4 % až 114,7 v porovnání s materiálovými zkouškami. Z hlediska

Pevnosti se pohybují v rozmezí 71,7 % až 116,8 %. Pomocí metody RoM (Rule of Mixture) lze tedy poměrně věrně predikovat materiálové vlastnosti kompozitu. Díky tomu lze předběžně navrhnout jednotlivé komponenty výsledného kompozitu tak, aby odpovídal potřebám statického výpočtu při návrhu prvků z FRP.

7.1.3 Materiál v programu ATENA

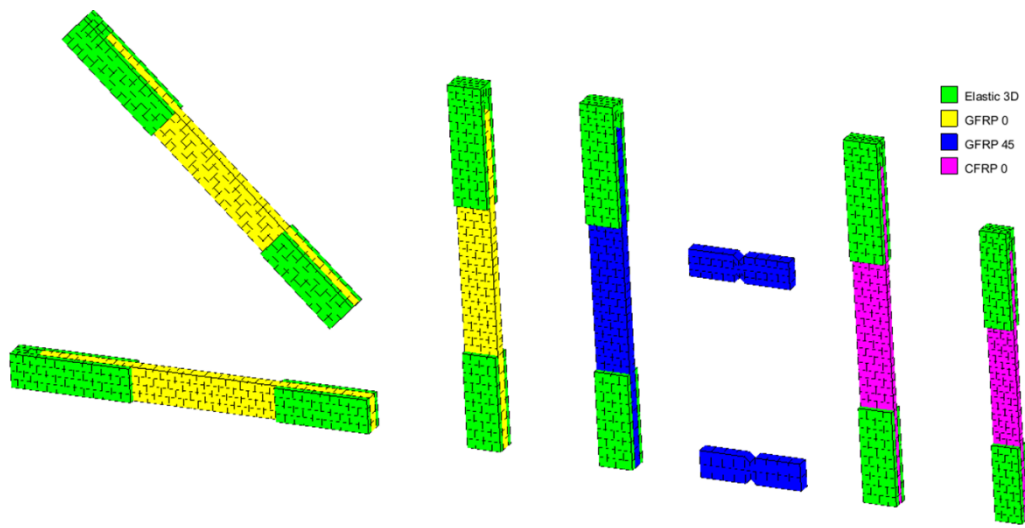
Pro zadání materiálu v programu ATENA byl použit materiálový model betonu s rozetřenou výztuží (concrete with smeared reinforcement) [39]. Jedná se o materiálový model, při kterém není potřeba modelovat každou jednotlivou výztuž. U materiálu FRP, kdy výztuž tvoří jednotlivá vlákna, by tento postup byl prakticky nemožný. Pro zadání tohoto materiálu je zadáno vyztužení v jednotlivých směrech na základě poměru plochy výztuže a plochy betonu $\rho = A_s/A_c$, v tomto případě plocha skelných vláken a plocha matrice. Pro použití tohoto materiálového modelu pro model nosníku v ohybu, je tento model validován pomocí modelu tahových a smykových zkoušek. Vzorky, které byly použity pro materiálové zkoušky nosníku, byly namodelovány přesně podle jejich geometrie včetně přílozek, které byly pro zjednodušení modelovány jako tuhé pomocí materiálu elastic 3D. Síť byla zvolena tak, aby krok sítě odpovídal tloušťce zkoušeného prvku. Vzorek pro zkoušku ve smyku byl modelován 2x s různou jemností sítě, na Obr. 102 jsou pak zobrazeny výsledky v grafech.



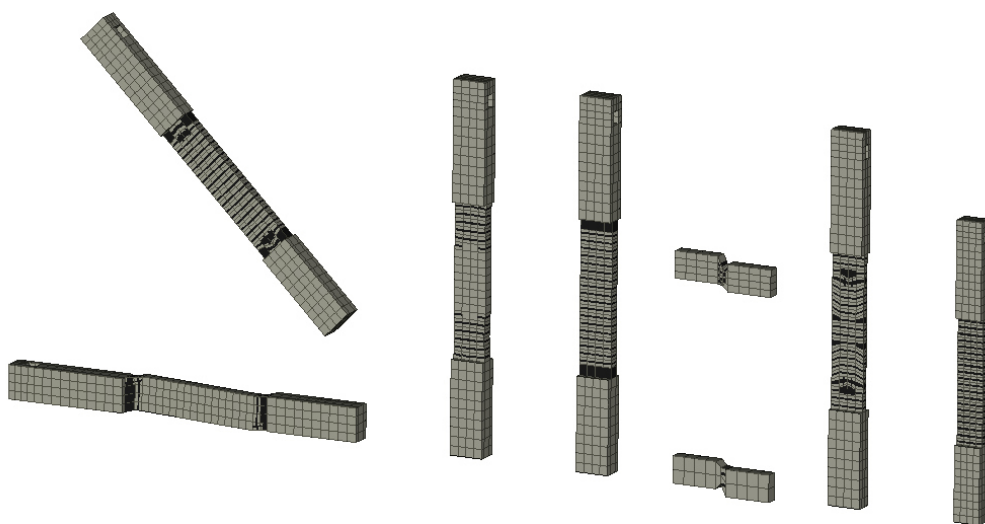
Obr. 99 Zadaná geometrie vzorků pro simulaci materiálových zkoušek

Vzorky byly na jedné straně tuze podepřeny, na druhém konci bylo zadáno zatěžování deformací. Vzorky byly zatěžovány do porušení.

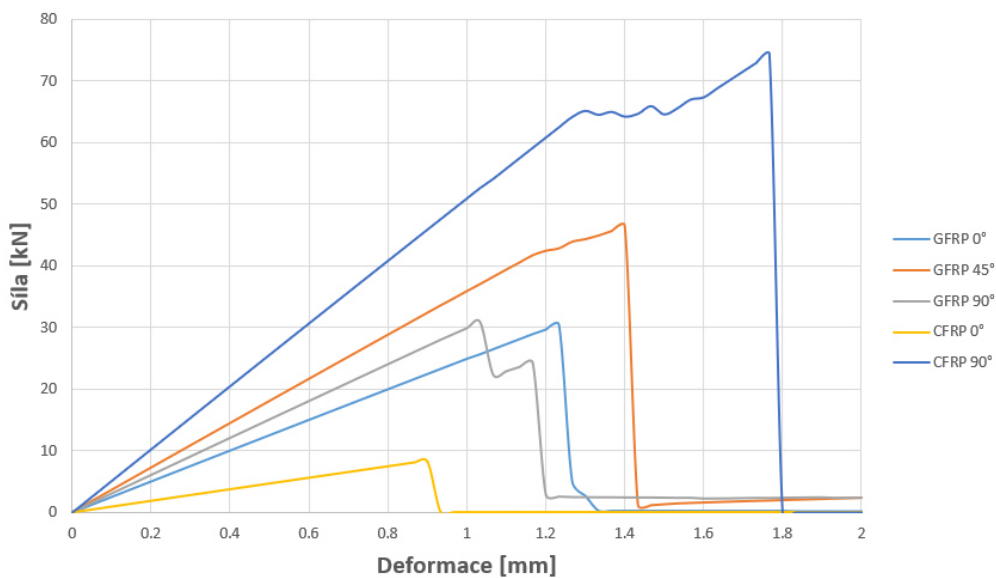
Na Obr. 100 je zobrazena výpočetní síť a zadání materiálu. Nastavení materiálových vlastností a vstupních dat zadaných v programu ATENA je uvedeno v příloze 3.



Obr. 100 Nastavená síť, zadané materiály



Obr. 101 Výsledky simulace tahové a smykové zkoušky – poškozené vzorky



Obr. 102 Výsledky simulace tahové zkoušky GFRP stojiny a CFRP pásnice

7.1.4 Porovnání materiálových modelů

Níže je uvedeno srovnání materiálových vlastností, které byly získány z tahových zkoušek, pomocí metody rule of mixture a simulací v programu ATENA Science.

Tabulka 23: Porovnání vlastností FRP: tahové zkoušky, Rule of mixture, ATENA Science

			Tahové zkoušky			Rule of mixtures			ATENA Science		
			Síla	Modul	Pevnost	Síla	Modul	Pevnost	Síla	Modul	Pevnost
			F	E	σ	F	E	σ	F	E	σ
			[kN]	[GPa]	[MPa]	[kN]	[GPa]	[MPa]	[kN]	[GPa]	[MPa]
GFRP	0°	výsledky	30.9	12.6	138.8	35.8	14.4	162.2	30.4	14.1	152.0
		porovnání				115.8%	114.7%	116.8%	98.3%	112.0%	109.5%
	45°	výsledky	50.4	14.8	233.9	35.6	14.9	167.7	46.6	19.8	233.0
		porovnání				70.7%	100.5%	71.7%	92.5%	133.5%	99.6%
	90°	výsledky	32.0	12.6	152.7	32.0	15.8	178.2	28.7	14.1	143.5
		porovnání				100.0%	125.6%	116.7%	89.8%	111.7%	94.0%
CFRP	0°	výsledky	65.5	50.7	593.5	65.4	34.7	592.4	74.2	40.8	674.5
		porovnání				99.8%	68.4%	99.8%	113.2%	80.5%	113.7%
	90°	výsledky	6.9	7.4	77.7	6.1	6.2	69.4	8.2	9.4	93.2
		porovnání				88.8%	83.8%	89.3%	119.2%	127.4%	119.9%

Obě metody nabízí poměrně dobrou shodu s daty získanými pomocí materiálových zkoušek. Autor se domnívá, že rozdíly jsou zapříčiněny způsobem výroby metodou ruční laminace bez vakuování. Oproti výrobě metodou pultruze při ruční laminaci nejsou vlákna napnutá. Výrobou bez následného vakuování můžou v matrici zůstat vzduchové bubliny. Tyto imperfekce jsou příčinou dopínání vláken v průběhu zatěžování, které má nepříznivý vliv zejména na modul pružnosti, ale také na výslednou pevnost.

Výsledky numerické simulace odpovídají výsledku, naměřeném při zkouškách FRP ve smyku. Výsledky byly v rozsahu maximální síly při porušení vzorku 8,78 – 11,3 kN [10.4.3].

Z porovnání plyne, že metoda rule of mixture i numerická analýza s využitím materiálového modelu rozetřené výztuže jsou vhodné pro predikci vlastností FRP na základě znalosti materiálových vlastností jednotlivých komponent, tedy pryskyřice a vláken.

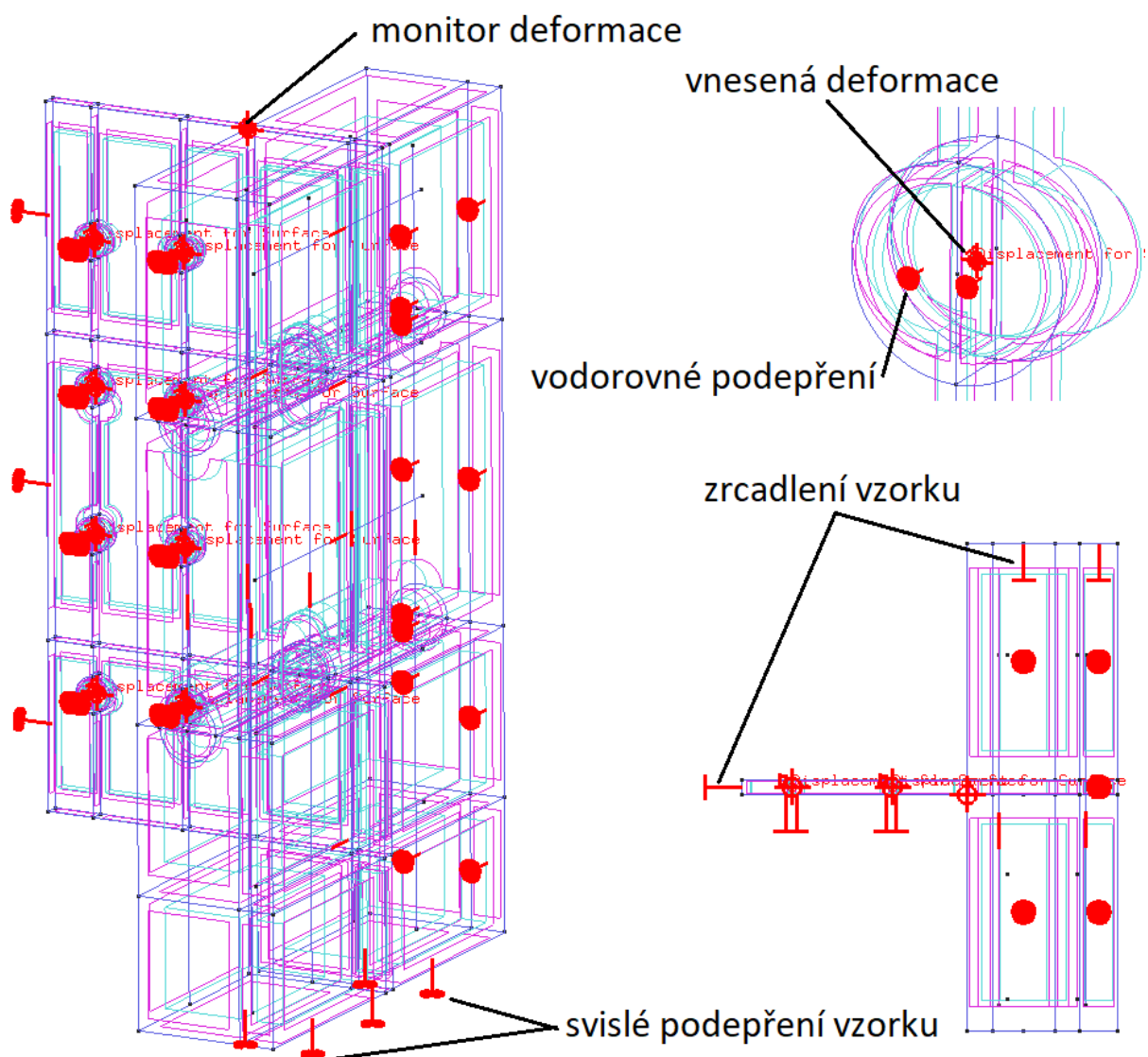
Materiálový model v programu ATENA science lze použít ke tvorbě komplexního modelu, v případě použití pro účely této disertační práce pro tvorbu modelu protlačovacího vzorku a vzorku nosníku zkoušeného v ohybu.

7.2 Model vzorku protlačovacích zkoušek

Pro numerickou analýzu byl vybrán vzorek č. 3 z protlačovacích zkoušek, který má sprážením pomocí otvorů $\varnothing 50$ po 300 mm. V rámci zjednodušení modelování a výpočetního času je využito symetrie a je modelována čtvrtina vzorku.

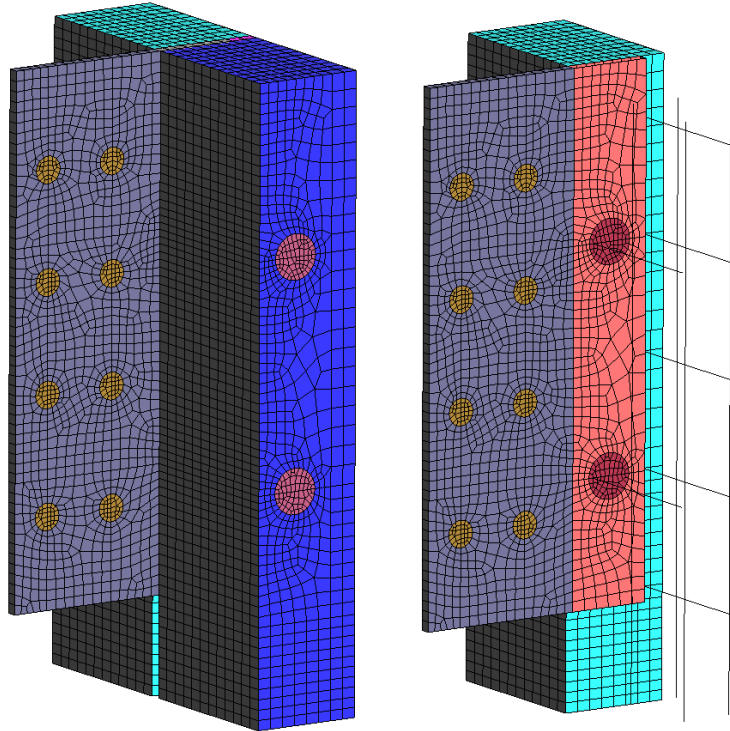
Vzorek je podepřen svisle v rovině betonové desky, která byla podepřena při experimentu. Dále jsou v modelu vodorovné podpory, které simulují podepřením ocelovým pomocným přípravkem a vodorovné podpory v místě zrcadlení konstrukce vzorku.

7.2.1 Geometrie vzorku

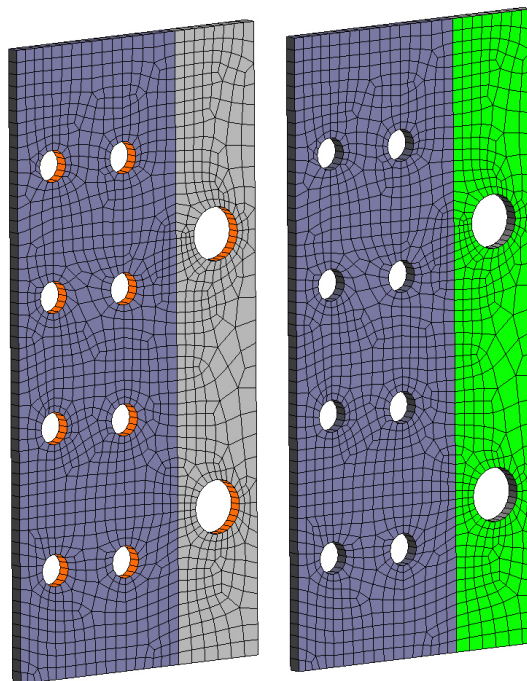


Obr. 103 Model nosníku – zadání ploch a objemů, okrajové podmínky

Zatížení je vnášeno pomocí ocelových šroubů, tak jako při experimentu. Pro betonové hmoždinky a šrouby, které jsou v kontaktu s FRP deskou, jsou namodelovány kontakty typu interface, které fungují pouze v tlaku. Na bocích FRP lišty, které jsou v kontaktu s betonem, jsou kontakty typu interface s nastavenou soudržností a třením.



Obr. 104 Model vzorku z protlačovacích zkoušek – zobrazení výpočetní sítě



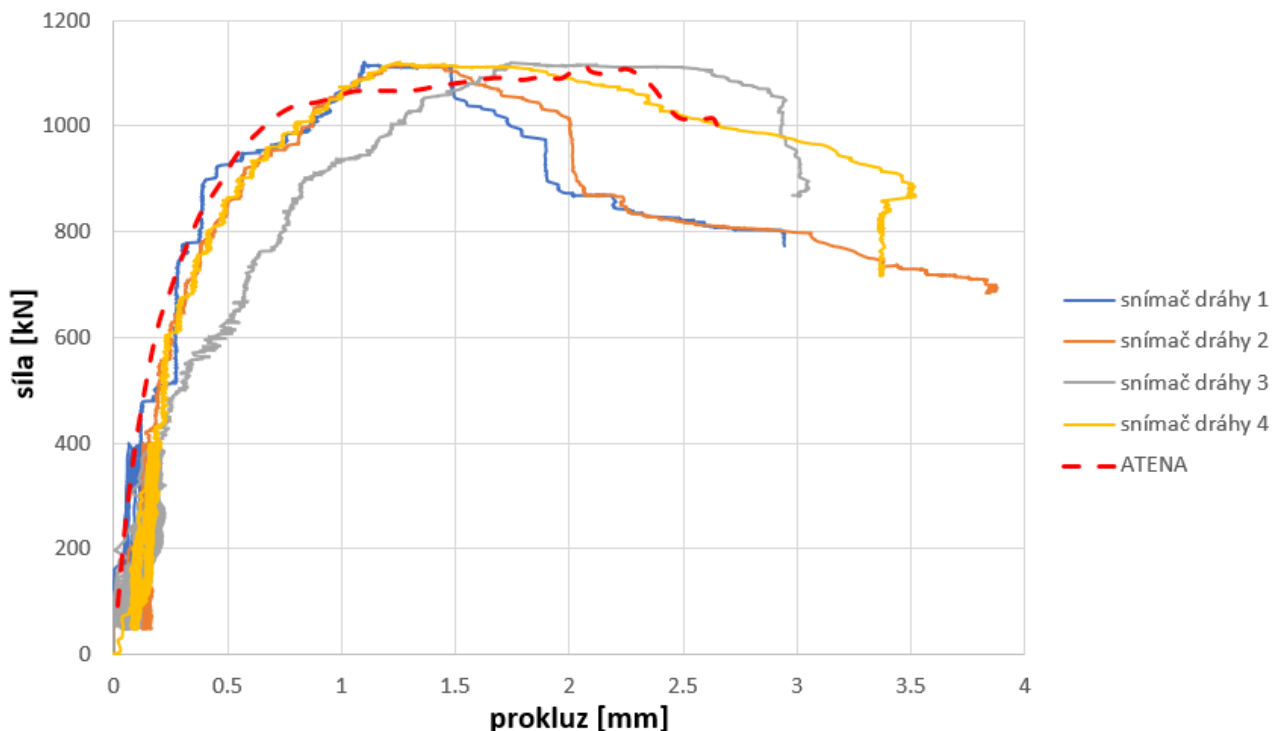
Obr. 105 Model vzorku z protlačovacích zkoušek – kontakty typu interface funkční pouze v tlaku (oranžově), kontakty typu interface s nastavenou soudržností a třením

1.1.1 Typy použitých prvků, materiály

Beton a FRP byly modelovány pomocí Hexahedra elementů. Výztuž byla modelována pomocí elementů 1D Reinforcement. Vlastnosti betonu byly získány z materiálových zkoušek betonu. Betonářská výztuž má výchozí vlastnosti pro výztuž B500B. Pro FRP je použit materiálový model betonu s rozetřenou výztuží. Zadání materiálu a vstupních dat v programu ATENA je uvedeno v příloze č. 3.

7.2.2 Výsledky

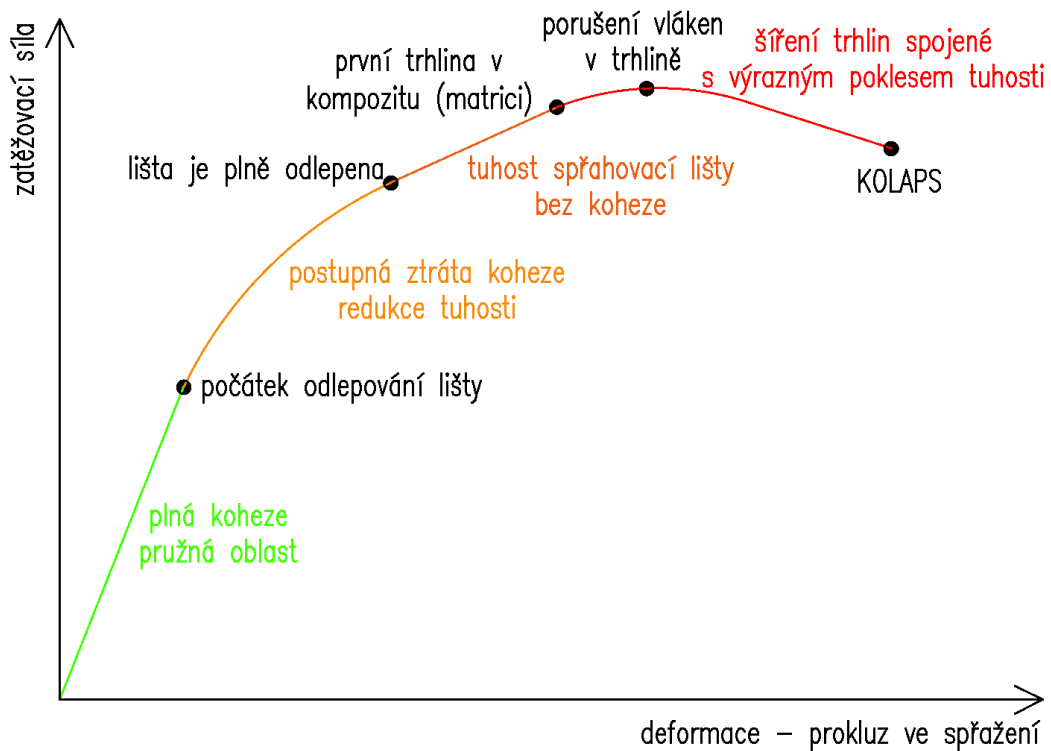
Numerický model protlačovacího vzorku dosáhl maximální únosnosti 1112 kN. Při experimentu vzorek dosáhl únosnosti 1150 kN, což je oproti numerickému modelu o 3,4 % více. Na Obr. 106 je zobrazen graf závislosti zatěžovací síly na prokluzu na jednotlivých spřahovacích lištách, které bylo odečteno při experimentu pomocí snímačů dráhy, a výsledky z numerického modelování v programu ATENA.



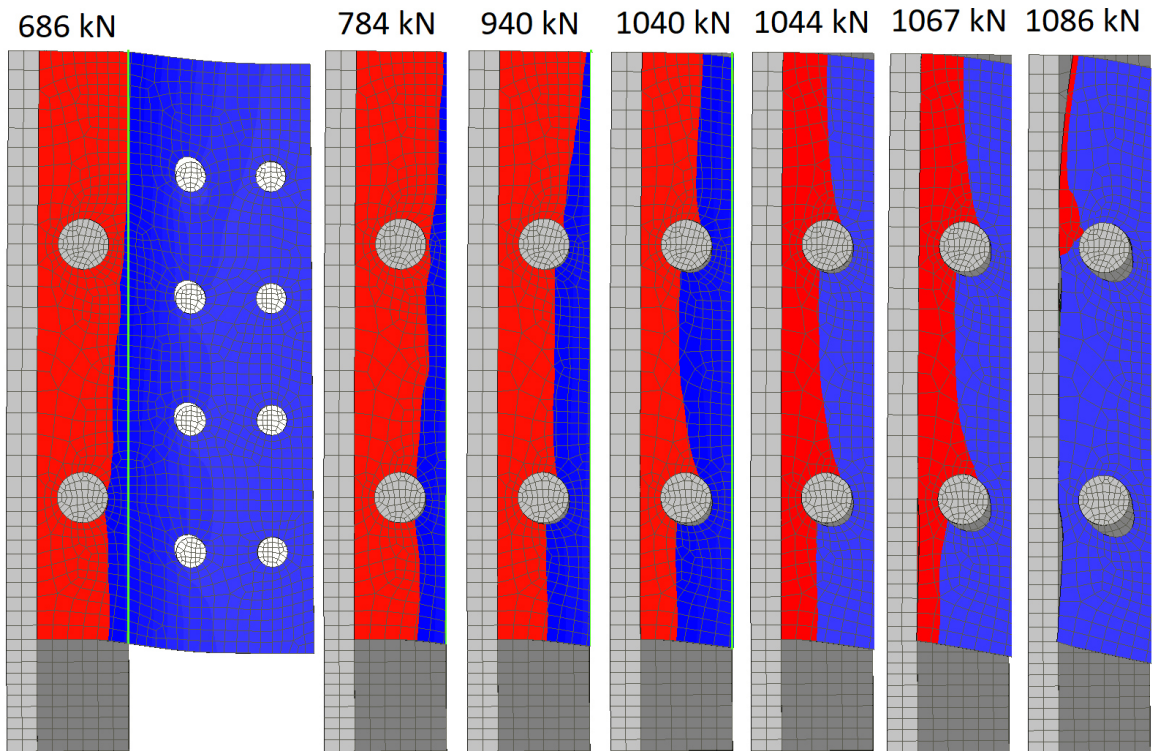
Obr. 106 Graf závislosti zatěžovací síly a prokluzu, srovnání experimentu a modelu

Dle grafu numerický model věrně popisuje chování perforované lišty v betonové desce. Do ztráty soudržnosti mezi FRP lištou a betonem se vzorek chová lineárně pružně. Jakmile FRP lišta začne ztrácet soudržnost, postupně spřažení začne ztrácet tuhost, při odtížení se však vzorek bude chovat lineárně pružně, avšak se sníženou tuhostí. Jakmile dojde k úplné ztrátě soudržnosti FRP s betonem v celé kontaktní ploše, vzorek se opět chová lineárně pružně, v interakci funguje pouze betonová hmoždinka v otvoru v FRP liště. Při dalším nárůstu zatížení se začnou objevovat první trhliny v matici

FRP, nastává slyšitelné porušení vláken, tento jev je spojen s výrazným poklesem tuhosti. S přibývajícím zatížením dochází k šíření a rozevírání trhlin, které vede ke kolapsu.



Obr. 107 Teoretické chování perforované lišty

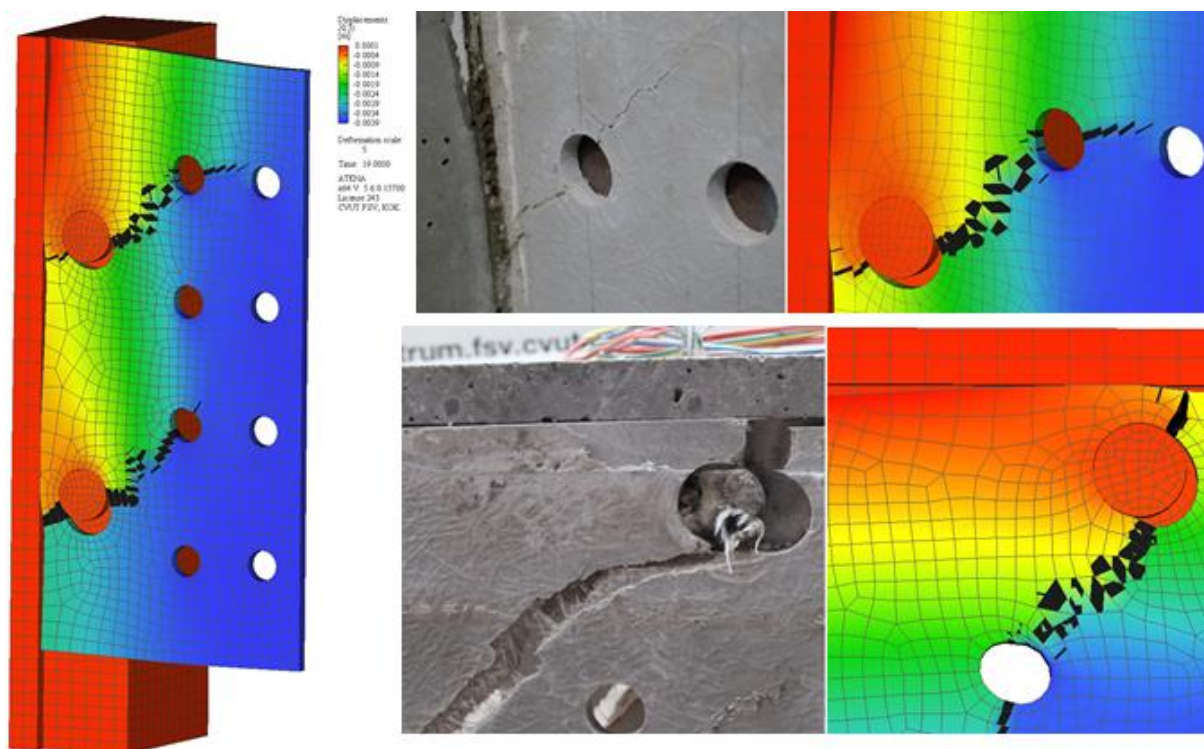


Obr. 108 Postupné ztráta soudržnosti spřahující FRP lišty od betonové desky (oblast s plnou soudržností červeně, oblast bez soudržnosti modře)

Z Obr. 108 je patrná postupná ztráta soudržnosti FRP lišty od betonové desky. Ke ztrátě soudržnosti začalo docházet okolo zatížení 500 kN. S narůstající silou docházelo k postupnému zapojování betonových hmoždinek do akce až při síle 1086 kN došlo k téměř úplné ztrátě soudržnosti spřahovací lišty.

Oproti grafu teoretického chování spřahovací lišty na Obr. 107 pak při experimentu došlo k vývoji první trhliny v kompozitu ještě před ztrátou soudržnosti celé spřahovací lišty.

Při narůstajícím zatížení docházelo k rozvoji trhlin v matici kompozitu, která vedla ke ztrátě tuhosti spřažení. Po rozevření vzniklých trhlin se za hlasitého praskání skelných vláken šířila smyková trhlina ve směru 45°, jelikož byla FRP deska vyztužena podélnými a příčnými vlákny. Při zvětšující se deformaci již klesá zatěžovací síla, a to až do bodu kdy nastane úplný kolaps. Při úplném kolapsu došlo k tahovému přetržení části kompozitu, který se nachází za betonovou hmoždinkou. Porušení vzorku při experimentu je s výsledky numerického modelování porovnáno na Obr. 109.



Obr. 109 Model vzorku z numerické analýzy po kolapsu, detaily ve srovnání s experimenty

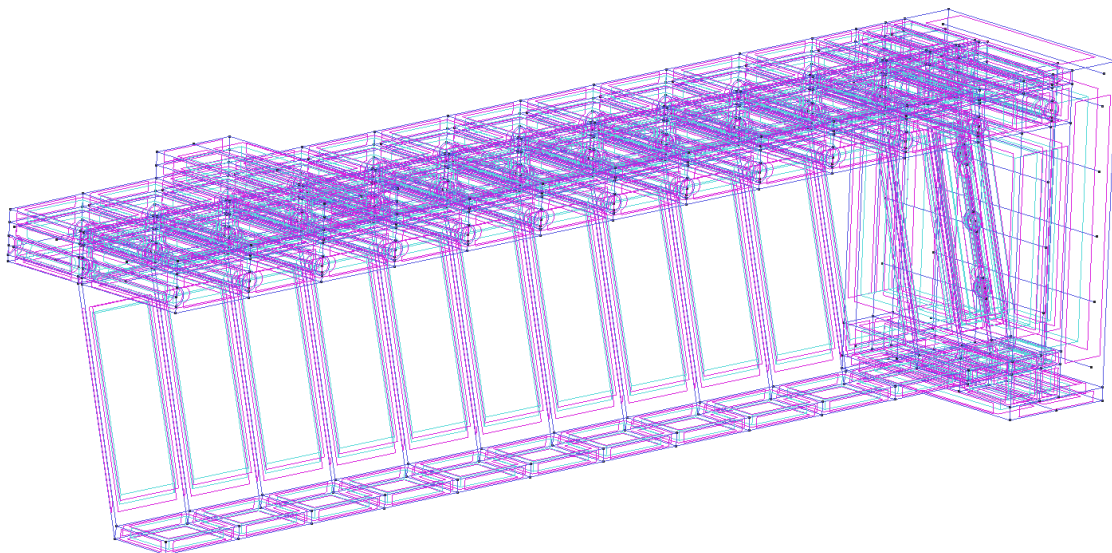
Numerický model protlačovacího vzorku věrně popisuje chování vzorku při experimentu, což potvrzuje, že materiálový model kompozitu s rozetřenou výztuží je plně použitelný pro modelování komplexních úloh ve vývoji nejen FRP spřahovací lišty, ale FRP v obecném měřítku.

7.3 Model kompozitního nosníku

V rámci numerického modelování této práce byl vytvořen numerický model v programu ATENA, který je v souladu s rozměry uvedenými v kapitole 6.2.3. Model využívá, stejně jako u modelu protlačovacích zkoušek, materiálový model kompozitu s rozetřenou výztuží. Před samotnou výrobou nosníku a experimentem byl vytvořen model, který nezahrnoval geometrické imperfekce, které vznikly během výroby, a to zejména vyboulení stojiny nosníku. Tento model byl vytvořen pro predikci chování nosníku během experimentu. Vzorek byl navržen tak, aby se porušoval pro účely vývoje spřahovací lišty ve spřažení, rozvojem trhlin od perforované lišty. Tomuto modelu je věnována kapitola 7.3.1., ve které jsou zároveň popsány jednotlivé parametry modelu. Kapitola 7.3.3 pak popisuje úpravy modelu, které spočívají v doplnění imperfekcí vzniklých při výrobě nosníku, a to vyboulení stojiny, které rozhodlo o způsobu porušení.

7.3.1 Model nosníku bez imperfekcí, predikce před experimentem

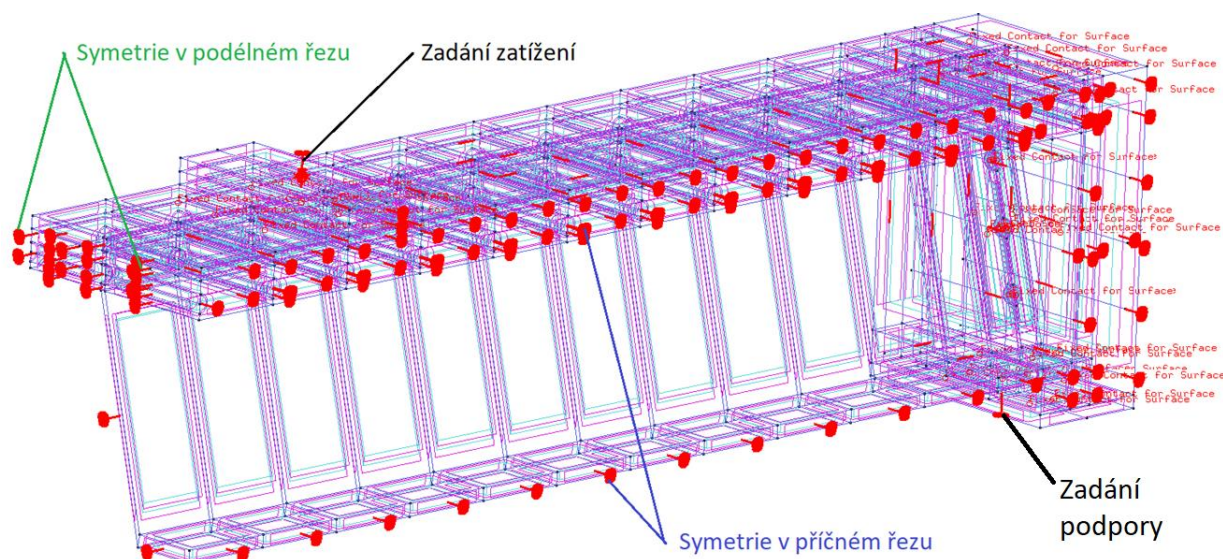
Z důvodu zjednodušení numerického modelu a časové náročnosti je využito symetrie zkoušeného nosníku a je modelována čtvrtina vzorku. Tvar modelované čtvrtiny je na Obr. 110.



Obr. 110 Model nosníku – zadání ploch a objemů

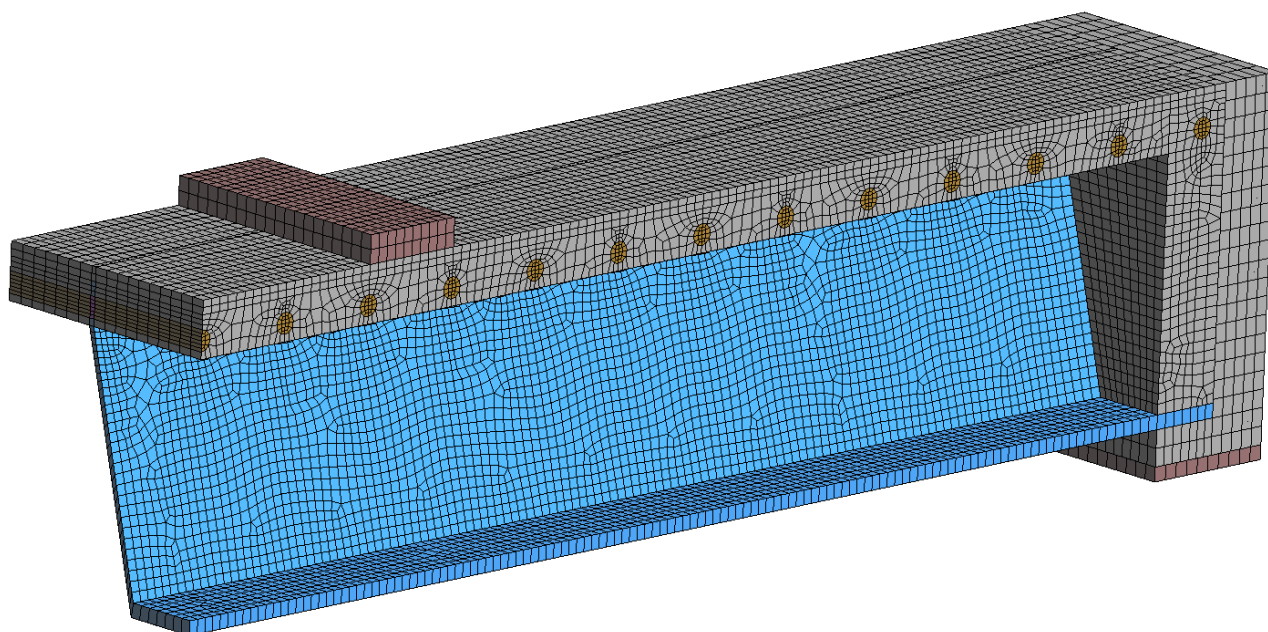
Tam, kde je využito symetrie vzorku, jsou umístěny plošné podpory kolmé na rovinu dané symetrie. Pod příčnickem je modelována fiktivní tuhá deska, ta je podepřena svisle v linii, která se nachází v její ose. Tímto způsobem je simulováno podepření pomocí ocelových válečků s navařeným plechem, které bylo použito při experimentu.

Zatížení je vnášeno přes tuhou desku a gumovou podložku omezující lokální napětí v betonové desce. Okrajové podmínky jsou patrné z Obr. 111.



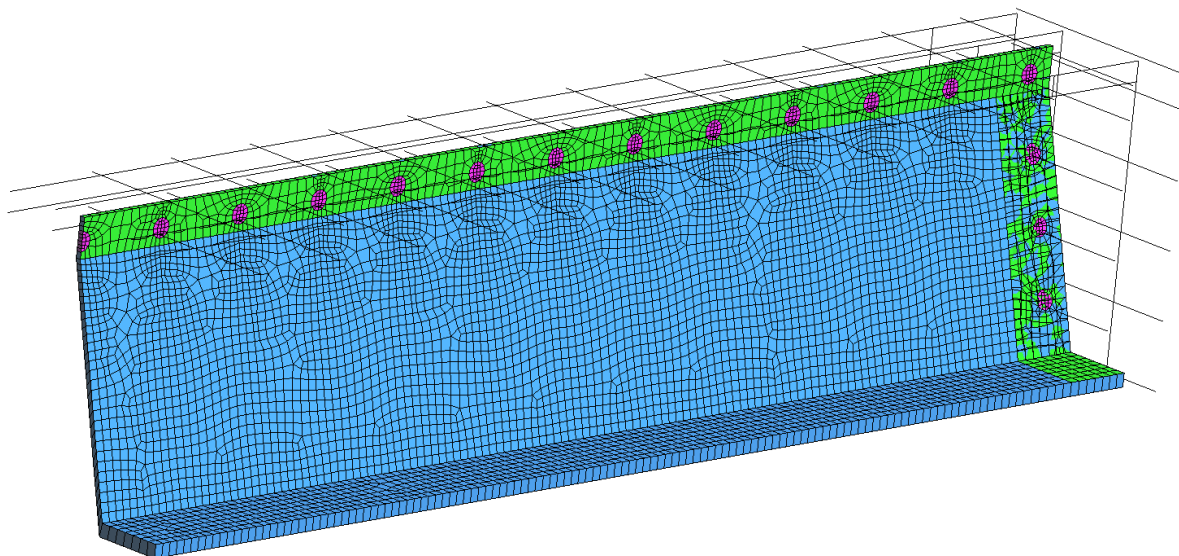
Obr. 111 Model nosníku – okrajové podmínky

Pro betonovou desku a FRP, které byly modelovány 3D prvky, byla navolena výpočetní síť z prvků typu hexahedra čili pomocí šestistěnů. Pro kompozitní a betonářskou výztuž byla navolena výpočetní síť pro lineární prvky. Základní velikost hrany elementu byla zvolena s ohledem na tloušťku stěn stojiny a spodní pásnice 15 mm. Na méně významných částech nosníku (příčník) byla použita strukturovaná síť pro zadání hrubší sítě. Po generaci sítě model obsahoval 43454 uzlů, 32125 hexahedra elementů a 56 lineárních elementů. Vygenerovaná síť je patrná z Obr. 112.



Obr. 112 Model nosníku – výpočetní síť

Zadání kontaktů typu interface, které se nachází mezi betonem a FRP, je zadáno se stejnými parametry jako při protlačovacích zkouškách. Spolu s výztuží je zadání kontaktů patrné z Obr. 113.

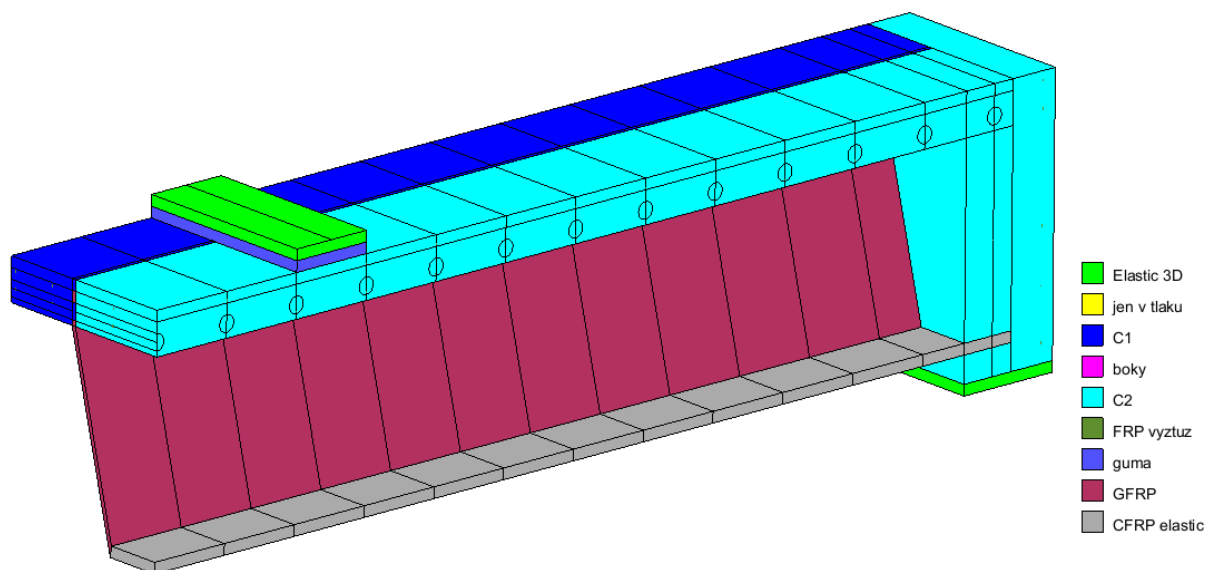


Obr. 113 Zadání kontaktů typu interface mezi FRP a betonem, zadání výztuže

7.3.1.1 Typy použitých prvků, materiály

Beton a FRP byly modelovány pomocí Hexahedra elementů. Výztuž byla modelována pomocí elementů 1D Reinforcement. Vlastnosti betonu byly získány z materiálových zkoušek betonu. Betonářská výztuž má výchozí vlastnosti pro výztuž B500B. Pro FRP je použit materiálový model betonu s rozetřenou výztuží. Zadání materiálových vlastností a vstupních dat v programu ATENA je uvedeno v příloze č. 3.

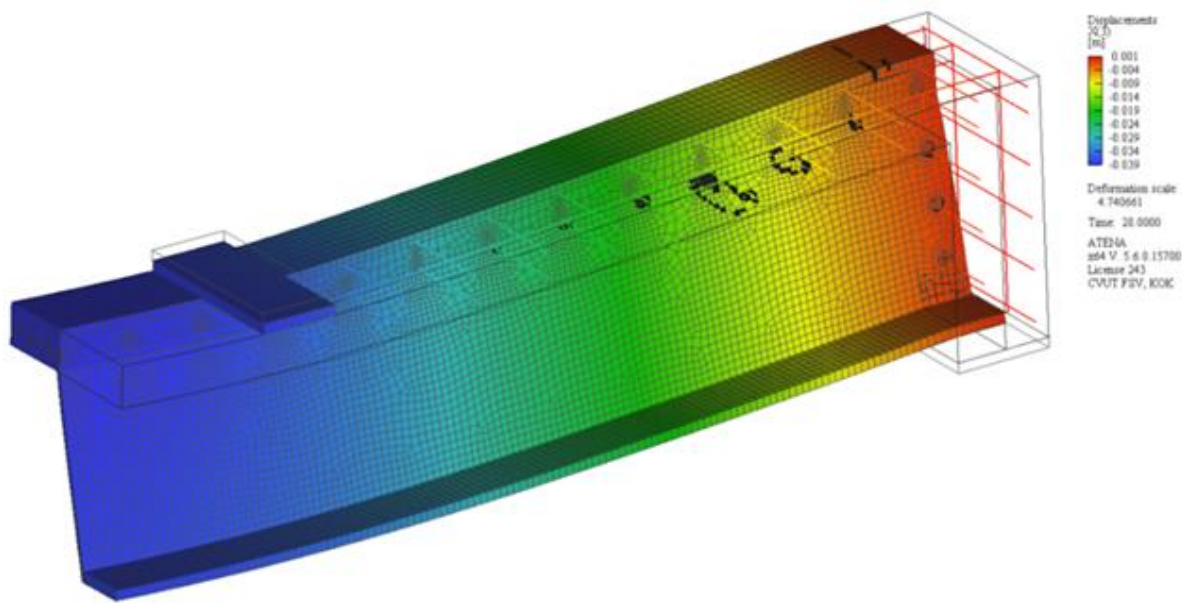
Na Obr. 114 je znázorněno zadání materiálů. Rozdělení betonu na C1 a C2 má význam jen pro skrývání hladin při vyhodnocování v postprocesoru.



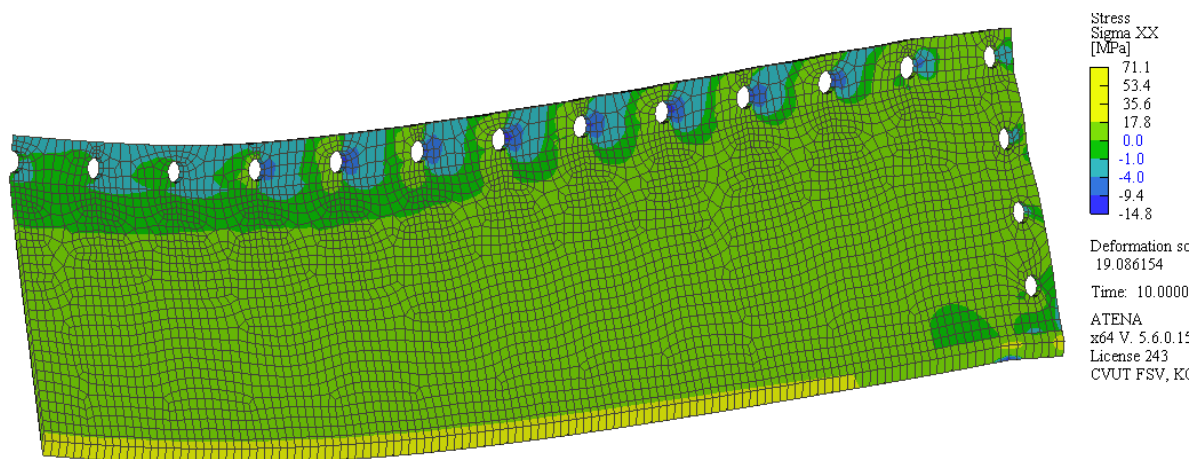
Obr. 114 Model nosníku – zadání materiálů

7.3.2 Výsledky

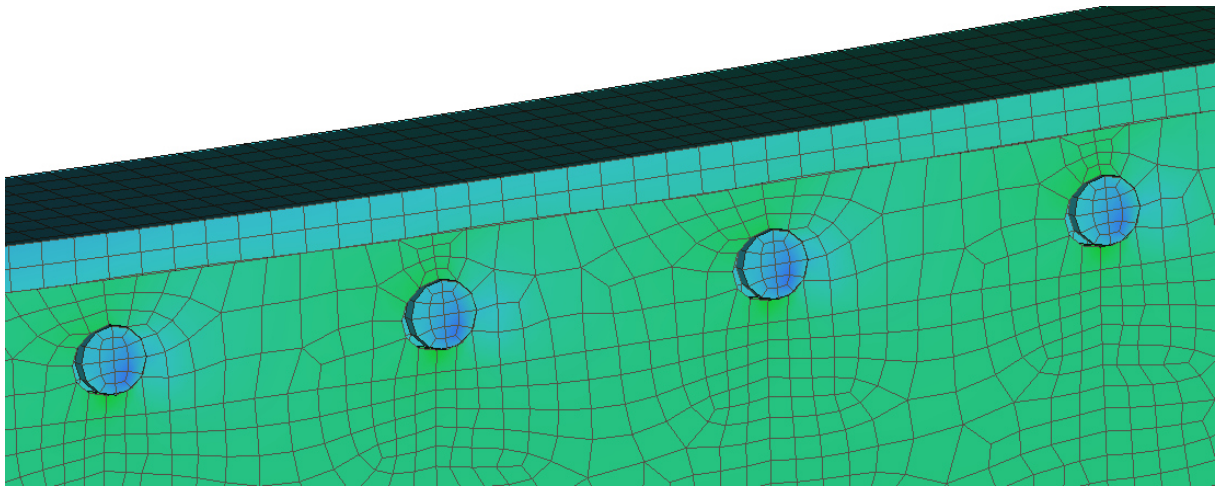
Před provedením experimentu zkoušky nosníku v ohybu byl dopočítán numerický model nosníku, který neobsahoval imperfekce. V numerické simulaci vzorek dosáhl maximální zatěžovací síly 776,2 kN. Porušení nastalo podobně jako při protlačovacích zkouškách, a to vznikem a šířením trhlin ve stojině FRP nosníku v místě spřahovacích otvorů blízko podpory.



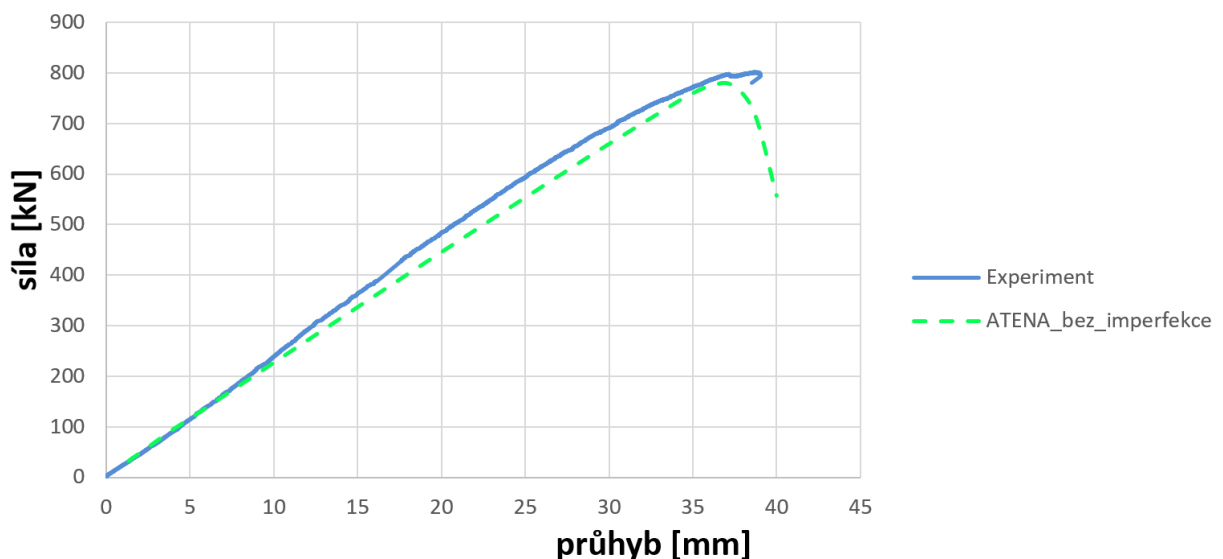
Obr. 115 Model nosníku bez imperfekcí – poškození trhlinami ve stojině



Obr. 116 Model nosníku bez imperfekcí – napětí v podélném směru u otvorů spřažení



Obr. 117 Detail deformace v místě spřažení, betonové hmoždinky jsou v kontaktu pouze v tlaku

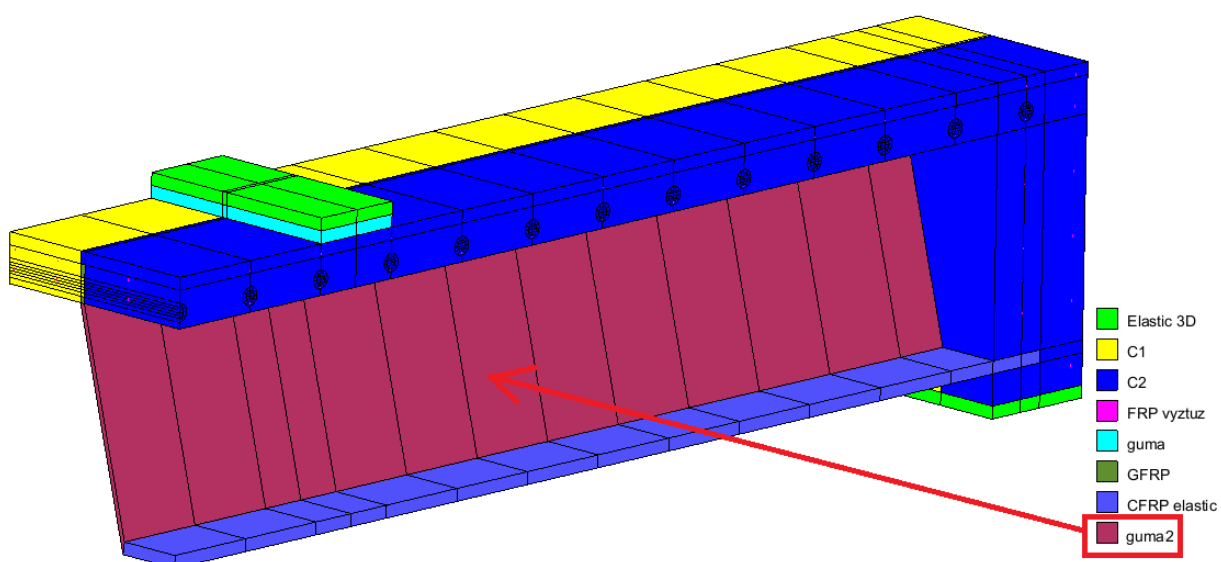


Obr. 118 Graf závislosti průhybu na zatěžovací síle – porovnání s experimentem

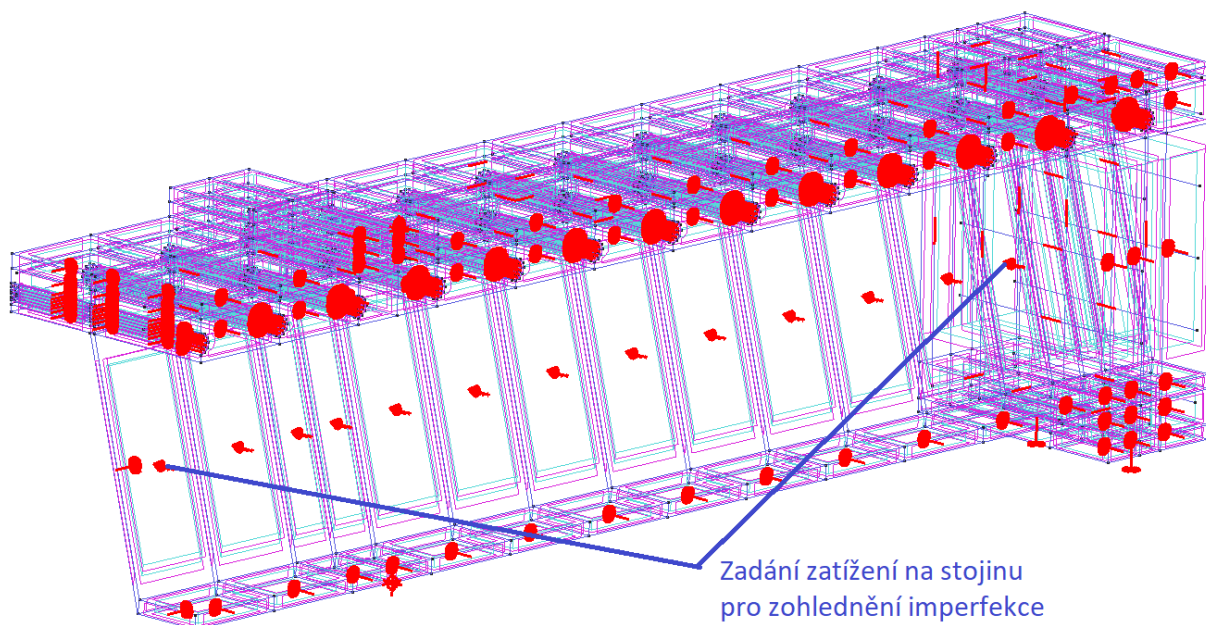
Maximální dosažená síla při experimentu byla 801,6 kN, což je o 3,3 % více, než byla predikce numerického modelu provedená před experimentem. Predikovaná tuhost byla mírně nižší než při experimentu. Numerický model se porušoval trhlinami v oblasti spřažení, vzorek při experimentu však selhal ztrátou stability stojiny nosníku, což bylo dáno geometrickou imperfekcí stojiny vzniklou při jeho výrobě. V dalším modelování se proto upřela pozornost k modelaci této imperfekce a objasnění tohoto vlivu na únosnost nosníku.

7.3.3 Model nosníku s imperfekcemi

V modelu s imperfekcemi je oproti modelu bez imperfekcí přidán nulový interval. V tomto intervalu je stojně průřezu přiřazen materiál s modulem pružnosti 1 MPa. Na stojně je zadáno zatížení, které stojnu zdeformuje právě o 9 mm, což je imperfekce naměřená po výrobě nosníku. V dalším intervalu je pak nosník zatěžován shodně jako model bez imperfekcí.



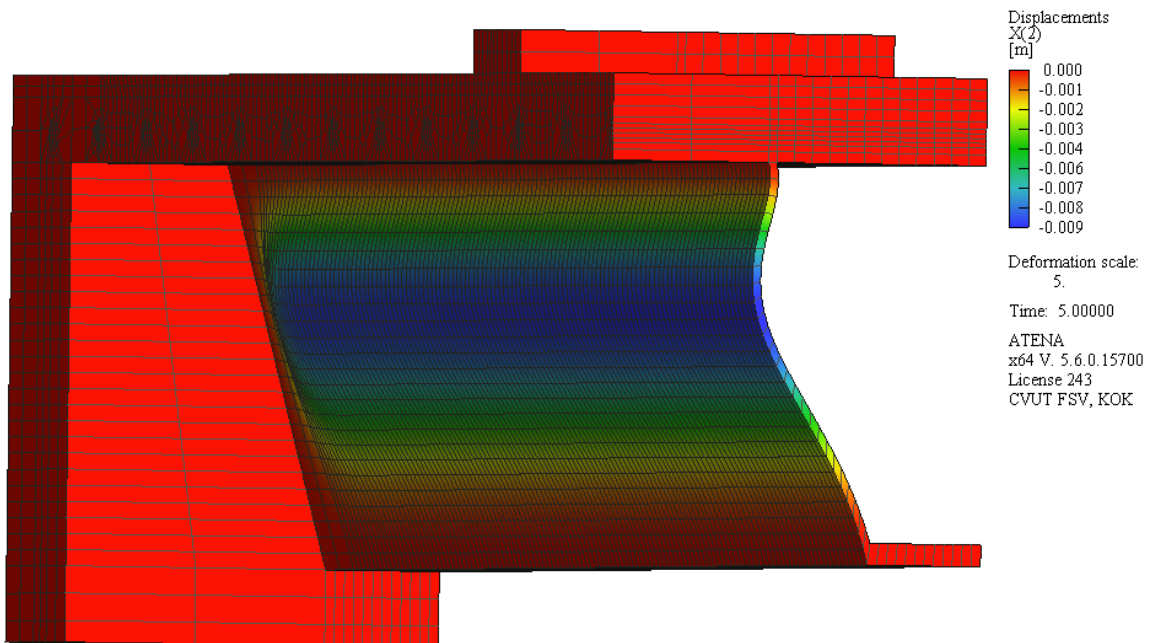
Obr. 119 Model nosníku s imperfekcemi – zadání materiálů pro nulový interval



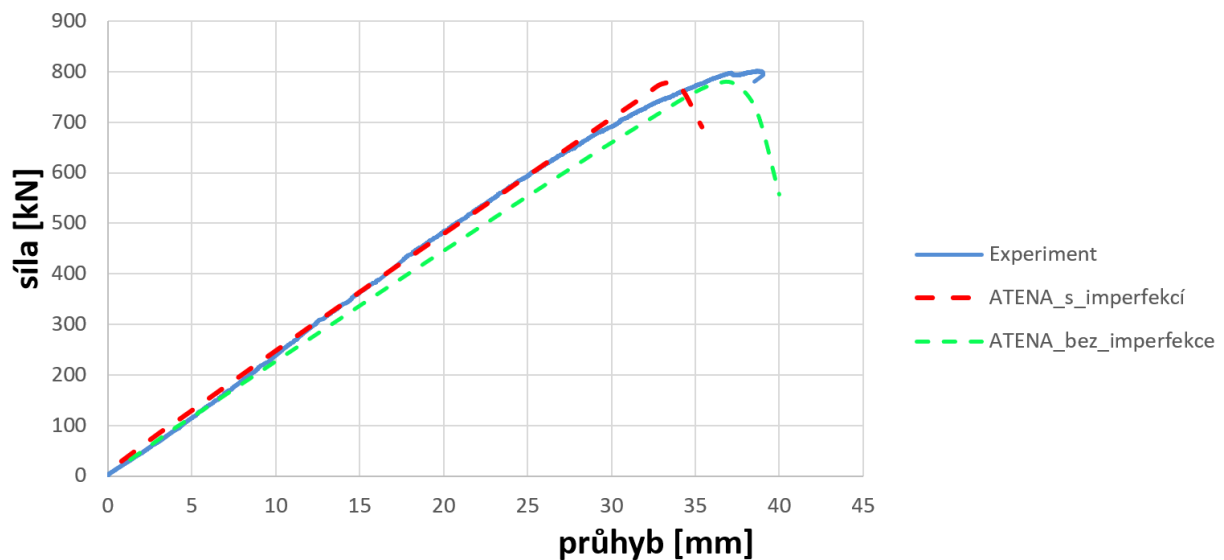
Obr. 120 Model nosníku s imperfekcemi – zadání zatížení pro nulový interval

Vzhledem k nízkému prokluzu ve spřažení během experimentu, zjednodušení výpočtu a faktu, že ke kolapsu došlo vyboulením stojny je v modelu vytvořen tuhý kontakt mezi FRP a betonem. Výpočetní síť byla upravena tak, aby v místě stojny tvořila

pravidelný rastr. V místě betonového příčnicku, ve kterém se během experimentu neobjevily žádné známky poškození, je naopak výpočetní síť záměrně řidší. Vygenerovaná síť spolu s deformací po nultém intervalu je na Obr. 121.

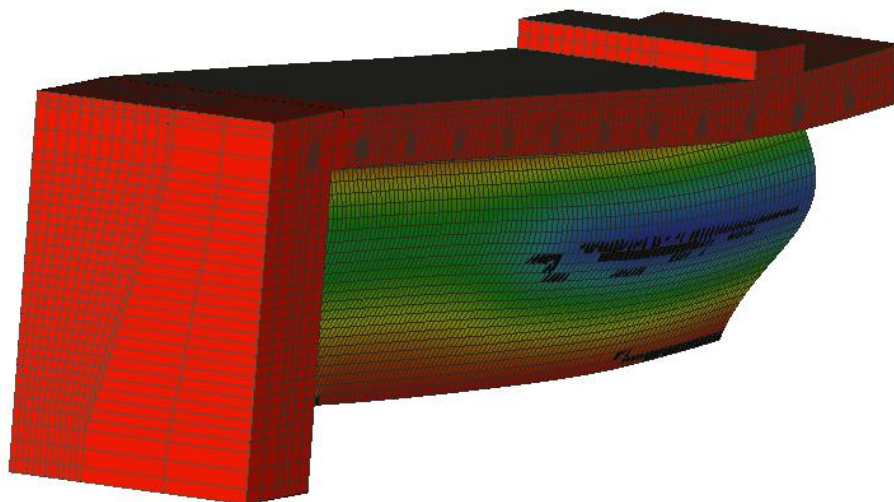


Obr. 121 Imperfekce stojiny po nultém intervalu



Obr. 122 Graf závislosti síly a průhybu nosníku uprostřed rozpětí

Zanedbáním tuhosti ve spřažení se docílilo shody v tuhosti numerického modelu a vzorku při experimentu. Maximální dosažená síla byla 776,4 kN. Vzorek se porušil shodným způsobem, jako při experimentu viz Obr. 123.

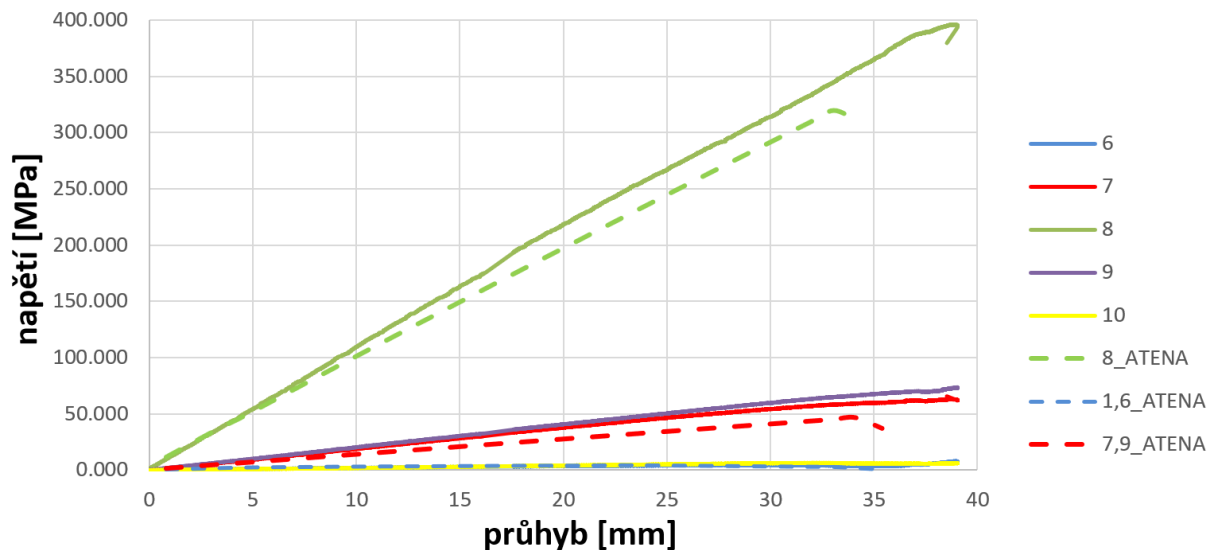


Obr. 123 Poškození během numerické simulace

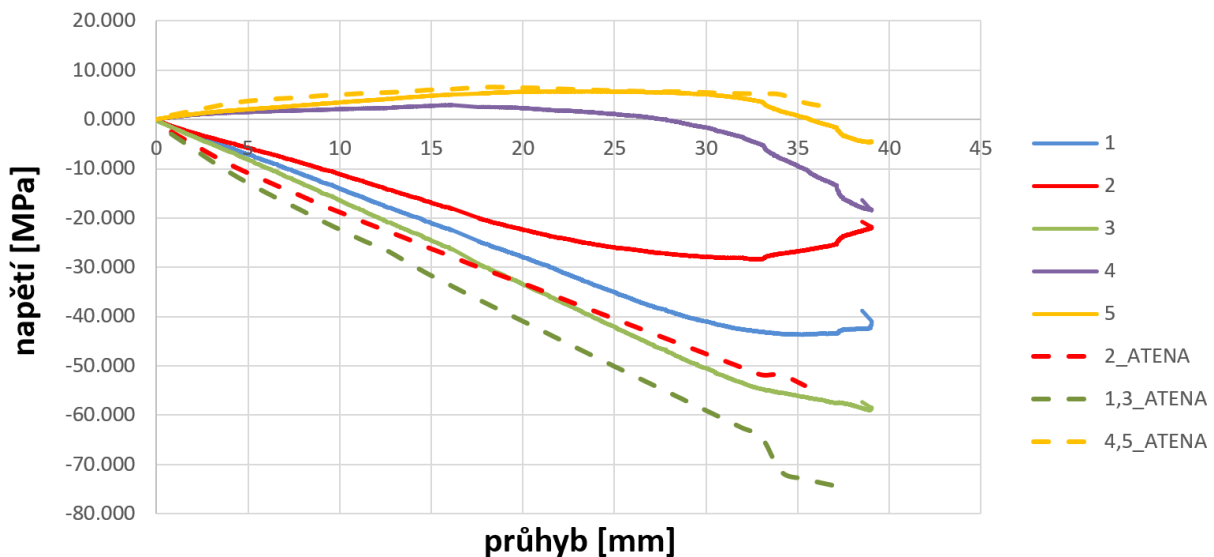


Obr. 124 Poškození během experimentu

Velice důležité se ukázalo zahrnutí geometrických excentricit do výpočtu. Nosník byl díky způsobu výroby metodou ruční laminace vyroben s počáteční deformací stojiny, která byla vyrobena vyboulená 9 mm uprostřed její výšky. Tato imperfekce měla nejenom vliv na tuhost nosníku, ale zároveň byla i rozhodujícím faktorem, který definoval způsob porušení nosníku.



Obr. 125 Graf napětí v CFRP a GFRP v závislosti na průhybu



Obr. 126 Graf napětí v CFRP a GFRP v závislosti na průhybu

FRP je heterogenní materiál složený z pryskyřice a vláken. Množství a orientace vláken v různých směrech činí z FRP materiál, který lze velmi obtížně modelovat. Pro numerický model nosníku byl použit materiálový model rozetřené výztuže. Ten dokáže věrně nasimulovat chování kompozitu, jelikož umožňuje zadání vlastností jednotlivých komponent, z kterých je FRP prvek vyroben. Na základě výsledků z numerického modelu a porovnání s naměřenými hodnotami během experimentu lze konstatovat dobrou shodu ve výsledcích při použití materiálového modelu rozetřené výztuže.

8 Závěr

Předkládaná disertační práce se zabývá spřažením FRP s betonem pomocí perforovaných otvorů. Práce je rozdělena na 3 hlavní části. V první z nich byl shrnut současný stav problematiky. V experimentální části práce bylo vyzkoušeno spřažení při protlačovacích zkouškách a na nosníku reálného průřezu. V teoretické části práce pak byly vytvořeny numerické modely, které byly validovány s výsledky experimentů a sloužily k popisu chování perforované lišty. Vytyčené cíle práce tím byly splněny.

Níže jsou v jednotlivých kapitolách shrnuty poznatky z experimentální a numerické části práce. Jsou uvedena doporučení pro praktický návrh a další výzkum, v poslední kapitole pak shrnutí přínosu práce k řešené problematice.

8.1 Experimentální výzkum

Byly provedeny protlačovací zkoušky třech vzorků s různou roztečí a velikostí spřahovacího otvoru. Vzorky se porušily trhlinami a delaminací FRP lišty. Vliv rozteče a velikosti spřahovacího otvoru však nebyl prokázán, jelikož všechny tři vzorky vykázaly podobnou únosnost. Spřažení je proto vhodné navrhovat s menšími otvory po krátké rozteči, dojde tak k rozložení smykové síly mezi více otvorů.

Pro další aplikací lze dosáhnout vyšší únosnosti použitím vhodného vyztužení spřahovací lišty, a to pomocí vláken, která budou v FRP desce umístěna kolmo k teoretické rovině trhliny, a to pod úhlem 45° .

Vzhledem k nízké hodnotě prokluzu při kolapsu vzorku a absence prvku, který by mohl plastifikovat, je nutné navrhovat spřažení FRP s betonem dle teorie pružnosti. Vzorky přesto prokázaly vysokou únosnost vhodnou pro použití ve stavebních konstrukcích.

Na základě dostatečné únosnosti z protlačovacích zkoušek byla naplánována zkouška nosníku v ohybu. Předpokládané porušení na základě numerické modelace bylo poškození trhlinami v FRP v místě maximální smykové síly v oblasti spřažení blízko u podpory. Vzhledem k imperfkcím stojiny nosníku však došlo k jejímu kolapsu před dosažením poškození ve spřažení. Vzhledem k dosaženým hodnotám zatížení lze však konstatovat, že vzorek prokázal dostatečně vysokou únosnost a tuhost pro použití v konstrukci mostu malého rozpětí.

8.2 Numerická analýza

V rámci numerické analýzy proběhla validace materiálového modelu pro FRP a to na vzorcích, které byly použity pro materiálové zkoušky. Výsledky byly porovnány s metodou Rule of mixture, kterou lze použít pro předběžný návrh materiálových vlastností kompozitu.

Validovaný materiálový model byl následně použit při modelaci protlačovací zkoušky a zkoušky nosníku v ohybu.

Model protlačovacích zkoušky byl validován na základě výsledků z experimentu. Odchylka maximální únosnosti numerického modelu a vzorku při experimentu byla vynikajících 3,4 %. Vznik a šíření trhlin odpovídá reálnému poškození vzorku. Byla popsána postupná ztráta soudržnosti mezi FRP a betonem. Na základě výsledku numerického modelu bylo popsáno chování spřahovací lišty. Model lze dále použít při dalším vývoji pro modelování perforované lišty při protlačovacích zkouškách i pro model celého nosníku, případně celé mostní konstrukce.

Zkušenosti a poznatky byly dále využity při modelování zkoušky kompozitního nosníku v ohybu. Pomocí modelace imperfekce na FRP stojině bylo dosaženo shody numerického modelu a vzorku při experimentu. Odchylka od experimentu činila 3,3 %. Byly vyhodnoceny a porovnány napětí, které byly odečteny na tenzometrech během experimentu. Lze konstatovat, že byl vytvořen validovaný numerický model.

8.3 Doporučení pro praktický návrh

FRP je nehomogenní materiál, jehož vlastnosti v různých směrech zaleží na způsobu vyztužení, orientaci a množství vláken, typu použité pryskyřice a způsobu výroby. Popsat chování spřahovací lišty pomocí analytických vzorců je proto extrémně náročný úkol.

I přesto, že by tyto vzorce měl projektant k dispozici, jeho prostor pro návrh by byl tak velký, jak velká by byla nabídka prodejců vyrábějící pultrudované profily. Nemohl by navrhnout nosník, který na trhu není k dispozici.

Cestou pro praktické využití je proto ověření konkrétních profilů na základě experimentů, které pak bude výrobce nabízet jako výrobek s konkrétními vlastnostmi. Projektant pak ve statickém výpočtu použije tyto tabulkové hodnoty únosností, deformací, prokluzů atp. a na základě jednoduchého výpočetního modelu, který bude respektovat příčný roznos konstrukce bude schopený navrhnout nosnou konstrukci

mostu. Návrh nosníků tak bude probíhat podobně jako u typizovaných tyčových předpjatých prefabrikátů.

Samotné FRP nosníky je vhodné navrhovat s dolní pásnicí z uhlíkových vláken. Horní pásnici, stojinu a spřahovací lištu pak z vláken skelných z ekonomických důvodů. Pultrudované profily mají většinu vláken v podélném směru. Je třeba věnovat pozornost vyztužení perforované lišty tak, aby v ní byla obsažena i vlákna pod úhlem 45 stupňů, což lze zajistit aplikováním vhodné tkaniny při výrobě.

Otvory ve spřahovací liště je vhodné volit spíše menšího průměru po krátké rozteči otvorů. Povrch spřahovací lišty je vhodné dodatečně opatřit nátěrem pryskyřice a provést pískování jejího povrchu. Tato konstrukční úprava pomůže oddálit ztrátu soudržnosti mezi lištou a betonem a snížit tak prokluz ve spřažení. Jelikož jsou pro nosníky limitujícím faktorem mezní stav použitelnosti přispěje to k ekonomičnosti návrhu.

Jelikož mosty konstruované jako FRP profil spřažený s betonem budou vykazovat vysokou životnost, je zároveň vhodné vynechat použití mostních ložisek a závěrů, které mají zhruba třetinovou životnost oproti projektované 100leté životnosti mostu. Spřažené kompozitní mosty je proto vhodné navrhovat zejména jako integrované. Mimo odstranění citlivých detailů z hlediska životnosti mostu má tento konstrukční systém výhodu i z hlediska tuhosti a celkové robustnosti konstrukce.

8.4 Náměty pro další výzkum

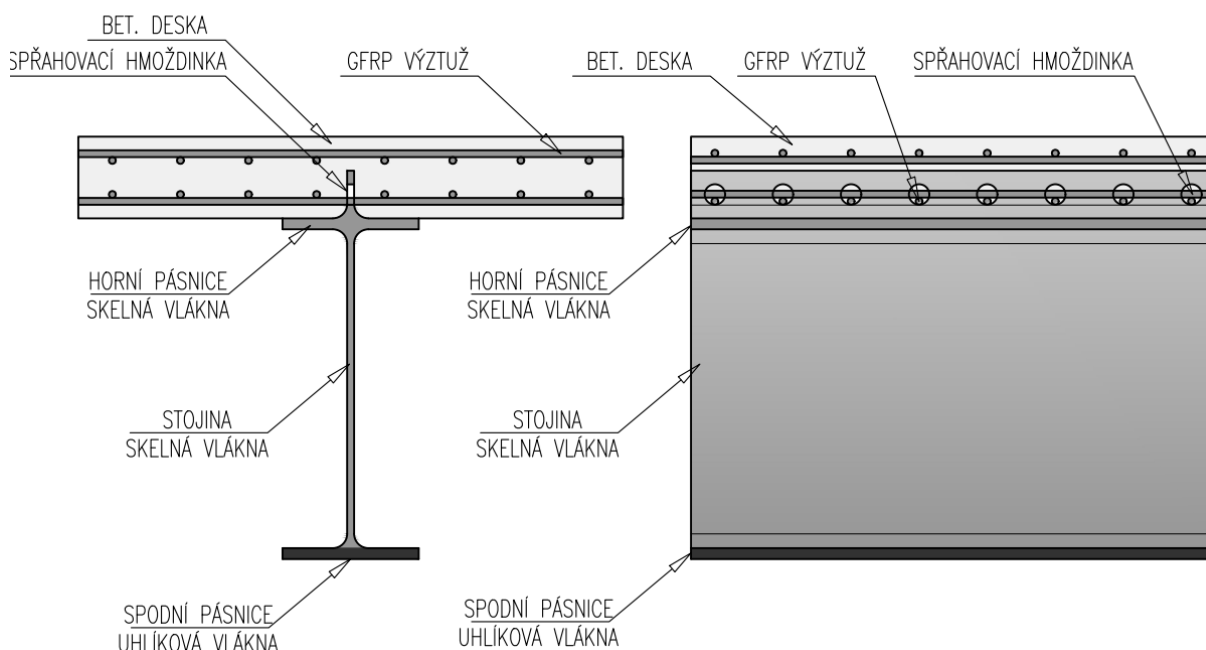
Experimentální i numerický výzkum prokázal dostatečnou únosnost spřahovacích prvků pomocí perforace stojiny. Výzkum byl prováděn na nosníku vyrobeném metodou ruční laminace, jelikož v době, kdy byl experiment prováděn, nebyl na trhu dostatečně vysoký profil vyrobený metodou pultruze. Tato metoda však má mnohé nedostatky např. omezená výrobní délka, proměnlivá kvalita, nižší modul pružnosti a v neposlední řadě je nákladná díky lidské práci. Další výzkum by se proto měl zaměřit na vývoj spřažených profilů vyrobených metodou pultruze. V následujících kapitolách jsou představeny možné varianty použití těchto profilů pro praktické využití.

8.4.1 Nosník se spřahovací lištou

První typ vychází z konvenčního řešení spřažení ocelových nosníků s přivařenou spřahovací lištou, které se již v praxi používá pro ocelobetonové konstrukce.

PŘÍČNÝ ŘEZ:

PODÉLNÝ ŘEZ:



Obr. 127 Pultrudovaný nosník se spřahovací lištou

Tento průřez v době psaní této práce výrobci nenabízejí. Tento nosník by vzhledem k vysokým nákladům bylo nutné vyvíjet spolu s výrobcem pultrudovaných profilů, který by si nechal vhodnou formu pro tento účel vyrobit. Nosník by sestával ze dolní uhlíkové pásnice, horní pásnice vyztuženou skelnými vlákny a stojiny, která by dále plynule pokračovala nad horní pásnici. Po vyvrtání otvorů do této části stojiny by tvořila spřahovací lištu.

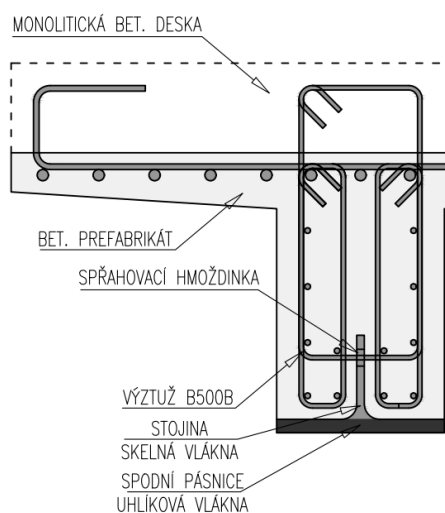
Takto vyrobený profil by mohl být dimenzován pro betonáž bez podepření a ve finální poloze, což minimalizuje náklady na podpěrné konstrukce a montážní práce s jeřáby. Vzhledem k použití prutů výztuže, které jsou rovné, lze použít kompozitní výztuž, která vyžaduje krytí výztuže betonem pouze z hlediska soudržnosti, což vede k úspoře betonu a snížení vlastní tíhy konstrukce.

Vzhledem k nízké vlastní tíze mostu sestaveného s těchto nosníků s nižším modulem pružnosti bude nutné prověřit dynamické chování mostu. Tyto mosty bude vhodné konstruovat jako integrované, což zvýší tuhost konstrukce. Stabilitě stojiny by měla náležet zvýšená pozornost, zejména pokud by toto řešení bylo použito pro spojitě nosníky či integrované mosty.

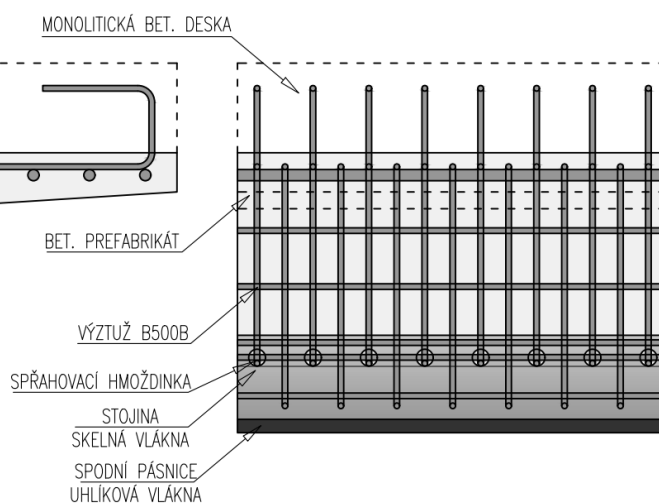
8.4.2 Tyčový prefabrikát s uhlíkovou pásnicí

Druhým typem možného požití pro praxi, které předkládá autor práce, je použití poloviny profilu nosníku jako spodní pásnice u tyčových prefabrikátů, které jsou následně zmonolitněny betonovou deskou. Toto řešení nazvané PreCoBeam se v poslední době používá u progresivních ocelobetonových konstrukcí s použitím válcovaných H profilů [40]

PŘÍČNÝ ŘEZ:



PODÉLNÝ ŘEZ:



Obr. 128 Použití pultrudovaných profilů jako nosníky typu PreCoBeam

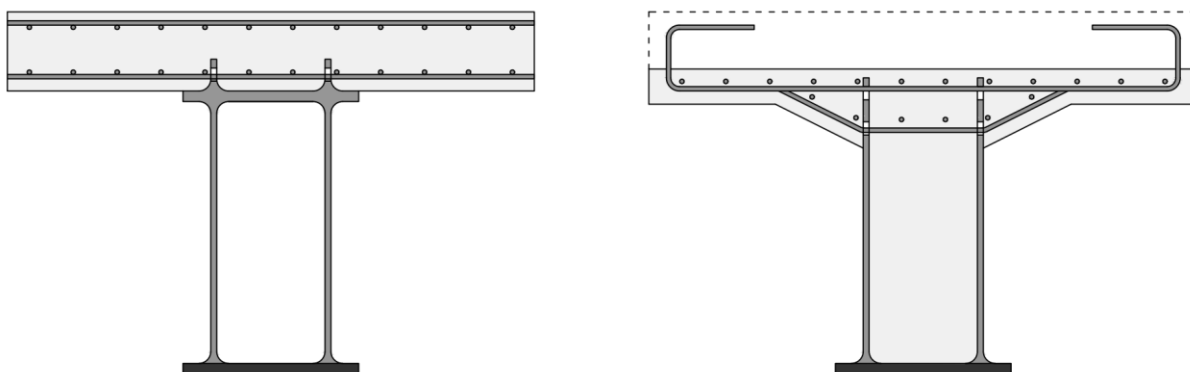
Výhodou tohoto řešení je z hlediska výroby zejména použití konvenčních, nízkých forem pro výrobu pultrudovaných profilů. Výrobci těchto profilů jsou schopni tyto profily vyrobit bez dodatečných nákladů na vývoj a výrobu těchto forem, pouhým nastavením výrobní linky pro použití s uhlíkovými vlákny v dolní pásnici.

Z konstrukčního hlediska je toto použití výhodné zejména proto, že odpadají problémy se stabilitou stěny. Jelikož se beton nachází i v dolních vláknech, je toto řešení vhodné i pro mosty, které jsou vystaveny záporným ohybovým momentům, jako jsou spojitě nosníky a integrované mosty. Smykové síly jsou přenášeny pomocí třmínků. Jelikož jsou v tomto případě použity třmínky, které vyžadují ohyby, předpokládá se použití běžné ocelové betonářské výztuže. Výsledná konstrukce bude masivní, nebude tak trpět výraznými deformacemi či nízkou tuhostí z hlediska dynamiky.

Vzhledem k minimalizaci problémů z hlediska výroby nosníků, problémům se stabilitou stojiny a její únosností na smyk a nízkou tuhostí, jedná se, dle názoru autora, o konstrukci, která může prorazit v komerčním využití a rozšíření tohoto materiálu pro stavební konstrukce a zejména pro mosty.

8.4.3 Komorové nosníky

Další variantou použití perforované lišty je pro nosníky komorových průřezů. Přinášejí zejména výhodu ve zvýšené únosnosti ve smyku díky zdvojení stojin. Ve variantě s prefabrikovanou deskou tvoří stojiny bednění. Na obrázku Obr. 129 jsou uvedeny varianty spřažených komorových nosníků v přímém spřažení s betonovou deskou a s prefabrikovanou betonovou deskou.



Obr. 129 Použití pultrudovaných komorových profilů spřažených s betonovou deskou

Tyto varianty však pouze rozvíjejí předchozí dvě a jsou zde uvedeny zejména pro úplnost. Vzhledem ke složitosti jejich výroby je v dalším vývoji pravděpodobnější použití předchozích variant.

8.5 Přínos k řešené problematice

Předkládaná disertační práce je dle autora přínosná v těchto bodech:

- Byly provedeny experimenty spřahovacích lišt u třech vzorků při protlačovacích zkouškách, které prokázaly dostatečnou únosnost pro aplikaci na reálné konstrukci.
- Byl proveden experiment nosníku v ohybu v reálném měřítku, který prokázal dostatečnou únosnost pro most malého rozpětí.
- Byly vytvořeny modely, které byly validovány podle výsledků z experimentů, včetně materiálového modelu FRP vyztuženého vláknou.
- Na základě výsledků z experimentů a numerické modelace bylo popsáno teoretické chování perforované FRP lišty.
- Vytvořený model nosníku lze převzít pro další výzkum lokální stability FRP desek.
- Vytvořené modely lze převzít pro další vývoj spřahovací lišty. Možnosti použití jsou uvedeny v následující kapitole.

9 Seznam použité literatury

9.1 Normy

- [1] EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [2] ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Society for Testing and Materials, 2002
- [3] ČSN EN 12390-1, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy
- [4] ČSN EN 12390-13, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku

9.2 Literatura

- [5] Jančář, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů; Ústav chemie materiálů, FCH VUT v Brně: Brno, 2003.
- [6] Katalog výrobků, 2017. Prefa kompozity. https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/Katalog-v%C3%BDrobk%C5%AF-2017_m.pdf.
- [7] Fiberline Composites A/S – Design manual – Revised, 2002
- [8] Jiang, X. Mechanical Behaviour and Durability of FRP-to-steel Adhesively-bonded Joints. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 2013.
- [9] Bisby, L.A. ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction, 2006
- [10] <https://gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/chemicka-odolnost.pdf>
- [11] International Federation for Structural concrete (fib): FRP reinforcement in RC structures, 2007
- [12] Schmit, K. Fiberglass reinforced plastic (frp) piping systems designing process / facilities piping systems with frp a comparison to traditional metallic materials. Specialty Plastics, Inc., 1998.
- [13] Park, K.; Hwang, Y.; Lee, Y.; Jung, J. Experimental study on durability comparison of the GFRP decks by resin types. KSCE Journal of Civil Engineering 2007, 11 (5), 231–267.
- [14] Cusson, R., Xi, Y., The Behavior of Fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates. Denver: Colorado Department of Transportation, 2002.
- [15] Deskovic, N.; Triantafillou, T.; Meier, U. Innovative design of FRP combined with concrete: Short-term behaviour.. Journal of Structural Engineering 1995, 121 (7), 1079–89.

- [16] Canning, L.; Hollaway, L.; Thorne, A. An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam. *Construction and Building Materials* 1999, 13 (8), 417–26.
- [17] Hullat, J.; Hollaway, L.; Thorne, A. Short term testing of hybrid T beam made of new prepreg material. *Journal of Composites for Construction*. *Journal of Composites for Construction* 2003, 7 (2), 135–44.
- [18] Fam, A.; Skutezky, T. Composite T-beams using reduced-scale rectangular FRP tubes and concrete slabs. *Journal of Composites for Construction* 2006, 10 (2), 172–81.
- [19] Correia, J.; Branco, F.; Ferreira, J. GFRP–concrete hybrid cross-sections for floors of buildings. *Engineering Structures* 2009, 31 (6), 1331–43.
- [20] Nguyen, H.; Mutsuyoshi, H.; Zatar, W. Hybrid FRP-UHPFRC composite girders: Part 1 – experimental and numerical approach. *Composite Structures* 2015, 125, 631–52.
- [21] Neagoe, C.; Gil, L.; Pérez, M. Experimental study of GFRP-concrete hybrid beams with low degree of shear connection. *Construction and Building Materials* 2015, 101, 141–151.
- [22] Zou, X.; Feng, P.; Wang, J. Perforated FRP ribs for shear connecting of FRP-concrete hybrid beams/decks. *Composite Structures* 2016, 152, 267–276.
- [23] Koaik, A.; Bel, S.; Jurkiewicz, B. Experimental tests and analytical model of concrete GFRP hybrid beams under flexure. *Composite Structures* 2017, 180, 192–210.
- [24] Zou, X.; Feng, P.; Wang, J.; Wu, Y.; Feng, Y. FRP stay-in-place form and shear key connection for FRP-concrete hybrid beams/decks. *Composite Structures* 2018, 192, 489–99.
- [25] Etim, O.; Gand, A.; Saidani, M.; Fom, P.; Ganjian, E.; Okon, E. Shear characterisation of pultruded superstructural FRP-concrete push-outs. *Structures* 2020, 23, 254–66.
- [26] Cho, K.; Park, S.; Kim, S.; Cho, J.; Kim, B. Shear connection system and performance evaluation of FRP-concrete composite deck. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2010, 14 (6), 855–65.
- [27] Fam, A.; Honickman, H. Built-up hybrid composite box girders fabricated and tested in flexure. *Engineering Structures* 2010, 32 (4), 1028–37.
- [28] Cho, J.; Park, S.; Cho, K.; Kim, S.; Kim, B. Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2012, 39 (12), 1311–1320.
- [29] Cho, K.; Park, S.; Kim, S.; Cho, J.; Kim, B. Behavioral characteristics of precast composite deck subjected to combined axial and flexural loads. *Composites Part B: Engineering* 2012, 44, 679–685.

- [30] He, J.; Liu, Y.; Chen, A.; Dai, L. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck. *Construction and Building Materials* 2012, 26 (1), 49–64.
- [31] Gai, X.; Darby, A.; Ibell, T.; Evernden, M. Experimental investigation into a ductile FRP stay-in-place formwork system for concrete slabs. *Construction and Building Materials* 2013, 49, 1013–1023.
- [32] Gonilha, J.; Correia, J.; Correia, F. Structural behaviour of a GFRP-concrete hybrid footbridge prototype: Experimental tests and numerical and analytical simulations. *Engineering Structures* 2014, 60, 11–22.
- [33] Mastali, M.; Valente, I.; Barros, J.; Gonçalves, D. Development of innovative hybrid sandwich panel slabs: experimental results. *Composite Structures* 2015, 133, 476–98.
- [34] Zuo, Y.; Mosallam, A.; Xin, H.; Liu, Y.; He, J. Flexural performance of a hybrid GFRP-concrete bridge deck with composite T-shaped perforated rib connectors. *Composite Structures* 2018, 194, 263–78.
- [35] Kong, S.; Yang, X.; Lee, Z. Mechanical performance and numerical simulation of GFRP-concrete composite panel with circular hollow connectors and epoxy adhesion. *Construction and Building Materials* 2018, 184, 643–54.
- [36] Siwowski, T.; Rajchel, M.; Kaleta, D. Development, testing and construction of the hybrid FRP composite–concrete road bridge. *IABSE Symposium* 2017, 109 (38), 1816–23.
- [37] Liu, T.; Feng, P.; Lu, X.; Yang, J.; Wu, Y. Flexural behavior of novel hybrid multicell GFRP-concrete beam. *Composite Structures* 2020, 250, 112606.
- [38] Barlow, A. *The History and Principles of Weaving: By Hand and by Power*; S. Low, Marston, Searle & Rivington, London.: London, 1878.
- [39] Červenka, V.; Jendele, L.; Červenka, J. ATENA Program Documentation, Part 1, 2020. Červenka Consulting. https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf.
- [40] Stacewicz, M.; Hukowicz, A.; Windorpski, H.; Kolakowski, T.; Kosecki, W; Lorenc, W Innovative composite structure of the new viaduct along road no. 22 over railway line next to Elbląg, Wrocław University of Technology, 2018

10 Přílohy

10.1 Příloha č.1: Katalogové listy materiálů použitých při experimentech

10.1.1 Pryskyřice



Havel Composites CZ s.r.o.
Svédlice 67
783 54 Práslavice; Olomoucký kraj; CZ
IČ: 25907379
Telefphone: International: +420 585 129 021
E-mail: info@havel-composites.com
www.havel-composites.com

LAMINATING RESIN

HAVELPOL 1

Instruction for use, technical specifications

Characteristics	
Approval:	-
Application:	is pre-accelerated polyester resin for general use.
Operational temperature:	+10°C to + 30 °C
Processing:	At temperatures between 18 °C - 30 °C All usual processing methods
Special properties:	Standard laminating resin Pot life from approx. 10 min. to 30 min.

Laminating curing systems for curing at room temperatures

Was specifically created for non-critical Applications, was formulated in such a way that it occurred at a rapid curing. Lamination can be performed using manual application or spraying. The preparation HAVELPOL1 is available in colour and information contained in this sheet also applies to this resin. The preparation can not be colour-customized to specific requirements.

The temperature of the composition HAVELPOL 1 before use should reach a temperature workshop (18-20 ° C). Product mix well by hand or using a slow stirrer to avoid aeration, and then wait to restore thixotrophy. To initiate the curing reaction only necessary to add a catalyst.

The recommended catalyst is a peroxide K1 Butanox M50 or M30, which should be added to the resin in an amount of 1 to 2%. The catalyst is required for this resin was thoroughly incorporated, if possible using a slowly rotating stirrer.

Application

The systems are suitable for the production of parts with reinforced fiberglass, whose features are high flexibility, toughness and adhesion to most material.

Pot life varies from about 10 min to 30 min. Thanks its excellent adhesive attribute, these systems can also be used as an adhesive for wood. Fillers (eg metal powder, dust, cotton flakes, etc.) can be blended to achieve special properties of the system.

Elongation 1% is preferred for use as laminating resins. Strength shear resistance and peel is lower than our special resins.

Specification of Laminating resin Havelpol 1

		Laminating resin Havelpol 1
Density	g/cm ³ / 25 °C	1,2
Viscosity	mPas / 25 °C	thixotropic
VOC content	-	40%
Stability in darkness at 20°C		3 months
Colour		Not transparent

Properties of cured resin

		Havelpol 1
Hardness Barcoal		24
Water absorption during 24h at 23°C		38 mg
Ultimate tensile strength		35 MPa
Tensile modulus		2200 MPa
Elongation at break		1%
Heat treatment		24 hours at 20°C than 3-5 hours at 80°C

Storage

The resin can be stored for at least 3 month in the carefully sealed containers at temperatures +20°C to +25°C. Temperature should not be over +30°C.

If resin create gel, do not use gel parts. Use only "liquid" resin.

Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment (gloves, eyeglasses, respirator).

Mixture ratios

		Havelpol 1:katalyst
Parts by weight		100 : 1-3
Parts by volume		100 : 1-3

The specified mixture ratios must be observed as exactly as possible. Adding more or less hardener will effect a faster or slower reaction. The mixture of resin and

katalyst must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container. The optimal processing temperature is in the range between 20 and 25°C. Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10°C will halve the pot life. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the hardened product.

Warning

Do not mix large quantities, especially if highly reactive systems are used. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will be warmed up very fast because of the reaction heat (exothermic resin – katalyst reaction). This can cause temperatures > 200°C which causes smoke intensive burning of the mixture.

Prepared by: Ing. Richard Moravec

10.1.2 Skelná vlákna



CristexCompositeMaterials

DATASHEET: 33-E-390-013-100-100

Description E GLASS 390G 2/2 TWILL

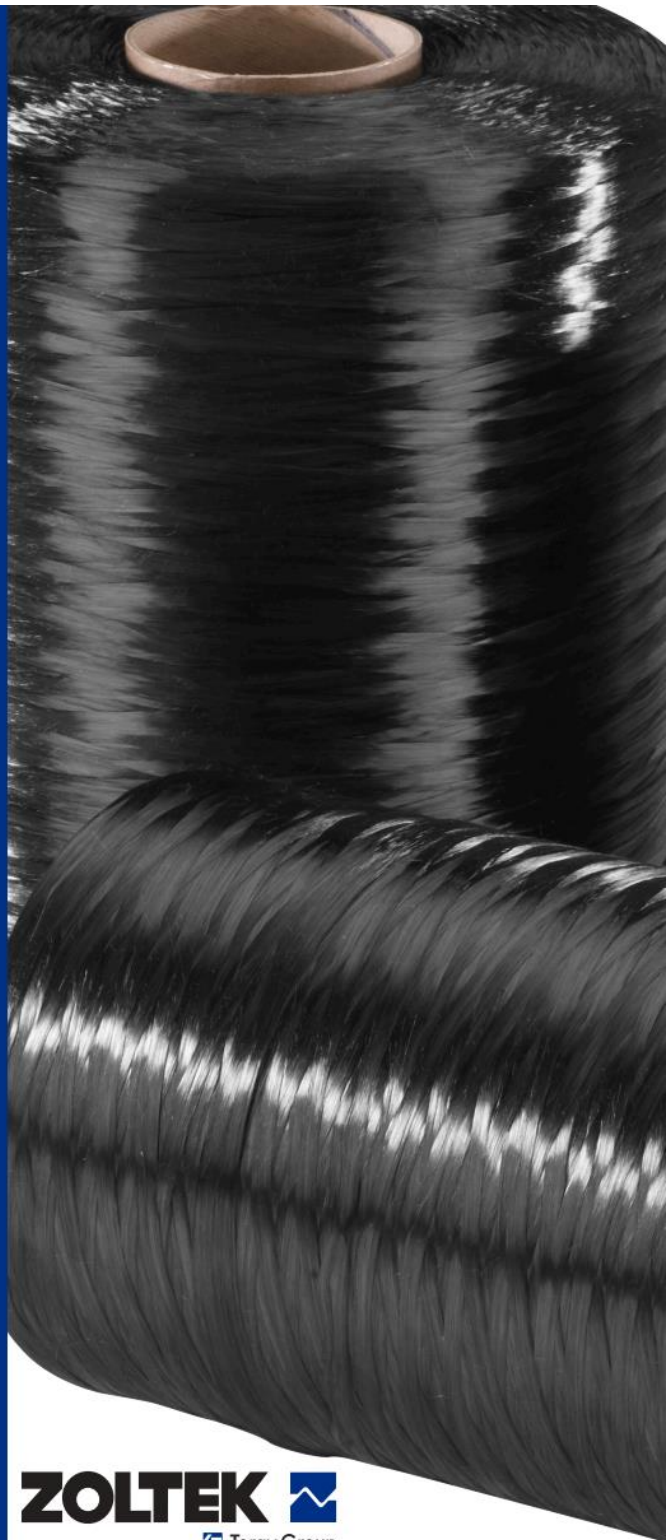
E Glass 390g is a medium weight twill weave glass fibre fabric treated with a multifunctional finish suitable for hand lay ups with polyester, epoxy, vinyl ester resin systems, this material has a soft handle.

Base Fabric		Technical Data		Tolerance	Test Methods
Yarn	Warp Weft	EC9 -68 (x5) EC9 -272		$\pm 5\%$	DIN EN 12654
Thread Count	Warp Weft	6.0 6.5	per 1 cm per 1 cm	$\pm 5\%$	DIN EN 1049
Tensile Strength (typical)	Warp Weft	1000 900	N/cm N/cm		DIN EN 12654
Weight		390	g/m ²	$\pm 5\%$	DIN EN 12127
Weave		2 x 2 Twill			DIN ISO 9354
Finished Fabric					
Coating		Volan treated after heat cleaning			
Weight		390	g/m ²	$\pm 10\%$	DIN EN 12127
Thickness (typical)		0.35	mm	$\pm 10\%$	DIN ISO 4603/E
Tensile Strength (typical)	Warp Weft	TBD TBD	N/cm N/cm	.	DIN ISO 4606
Organic content (typical)		<1%			

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

10.1.3 Uhlíková vlákna

ZOLTEK PX35 COMMERCIAL CARBON FIBER



ZOLTEK 
Toray Group

CONTINUOUS TOW



ZOLTEK PX35 Continuous Tow is the premier commercial carbon fiber on the market. It is a 50,000 filament fiber manufactured from polyacrylonitrile (PAN) precursor, and is available with a range of sizings for optimal processing and compatibility with a variety of resin systems. ZOLTEK employs a quality system focused on spool-to-spool consistency yielding low coefficients of variation.

- DNV-GL Approved
- Processing Support Available
- Spool to Spool Consistency

MATERIAL OVERVIEW	SI	US
Tensile Strength	4,137 MPa	600 ksi
Tensile Modulus	242 GPa	35 msi
Elongation	1.5%	
Electrical Resistivity	0.00155 ohm-cm	0.00061 ohm-in
Density	1.81 g/cc	0.065 lb/in ³
Fiber Diameter	7.2 microns	0.283 mils
Carbon Content	95%	

The properties listed herein do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.



UNIDIRECTIONAL FABRIC



ZOLTEK PX35 Stitch-Bonded Unidirectional Carbon Fabrics are produced from our ZOLTEK PX35 50K Continuous Tow Carbon Fiber. Unique fiber spreading techniques are utilized to obtain a wide range of UD fabric weights for a varied set of composite part applications. Quick composite part build-up is cost effectively achieved with our diverse weight range of low-cost carbon fabric products.

- Ideal for Rapid Build-Up of Part Thickness
- DNV-GL Approved

MATERIAL OVERVIEW	SI	US
Tensile Strength	1400 MPa	203 ksi
Tensile Modulus	119 GPa	17.2 msi
Compressive Strength	980 MPa	142 ksi
Compressive Modulus	118 GPa	17.5 msi
Flexural Strength	1290 MPa	187 ksi
Flexural Modulus	112 GPa	16.2 msi

The properties listed herein do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.



Technical Datasheet

ZOLTEK™ PX35 Uni-Directional Fabrics



Stitch-Bonded Uni-Directional Carbon Fabrics

DESCRIPTION

ZOLTEK PX35 Stitch-Bonded Uni-Directional Carbon Fabrics are produced from our ZOLTEK PX35 50K Continuous Tow Carbon Fiber. Unique fiber spreading techniques are utilized to obtain a wide range of UD fabric weights for a varied set of composite part applications. Quick composite part build-up is cost effectively achieved with our diverse weight range of low-cost carbon fabric products.



MATERIAL OVERVIEW	UD150	UD200	UD300	UD400	UD500	UD600	UD900V
0° Carbon ZOLTEK PX35 50K	158	200	309	403	500	600	865
90° Glass 34 dtex	10	10	10	10	10	10	–
Polyester Veil	–	–	–	–	–	–	30
Polyester Stitch 76 dtex	6	6	6	6	6	6	5
Total Fabric Weight	182 g/m ² 5.37 oz/yd ²	224 g/m ² 6.61 oz/yd ²	333 g/m ² 9.82 oz/yd ²	419 g/m ² 12.36 oz/yd ²	516 g/m ² 15.22 oz/yd ²	624 g/m ² 18.40 oz/yd ²	900 g/m ² 26.54 oz/yd ²

Average Values Shown

*Epoxy resin binder available upon customer request.

FABRIC CONSTRUCTION	UD150	UD200	UD300	UD400	UD500	UD600	UD900V
Stitch Length	A variety of stitch lengths are available to meet application requirements.						
Stitch Pattern	A variety of stitch patterns are available to meet application requirements.						
Cured Thickness/Ply	.21 mm	.25 mm	.37 mm	.46 mm	.57 mm	.69 mm	1.00 mm
Roll Width	30 cm - 61 cm - 122 cm						122 cm
Roll Length	100 m				50 m		30 m

Average Values Shown

The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.

ZOLTEK™ PX35

10.1.4 Lepidlo Sikadur -30

Technický list
Vydání 05/2013
Identifikační č.:
02 04 01 04 001 0 000001
Sikadur®-30

Sikadur®-30

Lepidlo pro lepení externí výztuže, pro systémy Sika®
CarboDur®

Construction

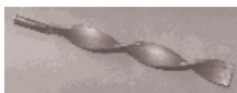
Popis výrobku	Sikadur®-30 je 2komponentní tixotropní lepicí hmota, na bázi kombinace epoxidových pryskyřic a speciálních plniv, navrženo pro aplikace za normálních teplot +8 °C až +35 °C
Použití	Lepidlo pro lepení systému zesilování, zvláště v oblasti konstrukčního zesilování: <ul style="list-style-type: none">■ Sika® CarboDur® lamel na beton, cihelné zdivo a dřevo (bližší informace naleznete v technických listech systému Sika® CarboDur® a v Metodické příručce pro systémy Sika® CarboDur®)■ ocelových lamel na beton
Vlastnosti / výhody	<ul style="list-style-type: none">■ snadná zpracovatelnost, jednoduchý poměr míchání■ bez použití základního nátěru■ vysoká odolnost proti tečení■ velmi dobrá přilnavost na beton, zdivo, kámen, ocel, litinu, hliník, dřevo a na Sika® CarboDur® lamely■ vytvrzuje i při vysoké relativní vlhkosti vzduchu■ vysoká mechanická pevnost■ tixotropní: nestéká, vhodné pro svislé aplikace a pro aplikace nad hlavou■ vytvrzuje bez smršťování■ jednotlivé komponenty jsou barevně odlišeny, dobrá kontrolovatelnost homogenity■ vysoké počáteční a konečné pevnosti■ vysoká odolnost proti otěru a rázům■ nepropustné pro vodu a vodní páru
Zkušební zprávy	Testy Deutsches Institut für Bautechnik Z-36.12-29, 2006: General construction authorisation for Sika® CarboDur®. IBMB, TU Braunschweig, test report No. 1871/0054, 1994: Approval for Sikadur®-30 Epoxy adhesive. IBMB, TU Braunschweig, test report No. 1734/6434, 1995: Testing for Sikadur®-41 Epoxy mortar in combination with Sikadur®-30 Epoxy adhesive for bonding of steel plates. Vyhovuje požadavkům EN 1504-4: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 4: Konstrukční spojování.
Údaje o výrobku	



Barva	Komponent A: bílá Komponent B: černá Směs A+B: světle šedá																	
Balení	6 kg (A+B): předem nadávkované množství, paleta 480 kg (80 x 6 kg) Nenadávkované množství (14 kbelíků na paletě) Komponent A: 30 kg kbelík Komponent B: 10 kg kbelík																	
Skladování																		
Podmínky skladování / Trvanlivost	24 měsíců od data výroby v originálním, nepoškozeném a uzavřeném balení v suchu a při teplotách +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením.																	
Technické údaje																		
Chemická báze	Epoxidová pryskyřice.																	
Objemová hmotnost	1,65 kg/l ± 0,1 kg/l (směs komponentů A+B) (při teplotě +23 °C)																	
Stékvost	Na svislých površích nedochází ke stékání při tloušťce vrstvy lepidla do 3-5 mm při teplotě +35 °C. (dle FIP)																	
Stlačitelnost	4 000 mm ² (při +15 °C a 15 kg) (dle FIP)																	
Tloušťka vrstvy	30 mm max. Při použití většího množství lepidla nejdříve spotřebujte veškeré lepidlo, teprve potom můžete ve stejné nádobě namíchat další. Jinak může dojít ke zkrácení doby zpracovatelnosti.																	
Objemové změny	Smrštění: 0,04 % (dle FIP)																	
Koeficient teplotní roztažnosti	2,5 x 10 ⁻⁵ na °C (-20 °C až +40 °C)																	
Tepečná stabilita	Teplota skelného přechodu TG (dle FIP)																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Doba zrání</th> <th>Teplota zrání</th> <th>TG</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7 dní</td> <td>+45 °C</td> <td>+62 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Doba zrání	Teplota zrání	TG	7 dní	+45 °C	+62 °C											
Doba zrání	Teplota zrání	TG																
7 dní	+45 °C	+62 °C																
	Heat Deflection Temperature (HDT) – teplotní deformace ASTM-D 648																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Doba zrání</th> <th>Teplota zrání</th> <th>HDT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3 hodiny</td> <td>+80 °C</td> <td>+53 °C</td> </tr> <tr> <td>6 hodin</td> <td>+60 °C</td> <td>+53 °C</td> </tr> <tr> <td>7 dní</td> <td>+35 °C</td> <td>+53 °C</td> </tr> <tr> <td>7 dní</td> <td>+10 °C</td> <td>+36 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Doba zrání	Teplota zrání	HDT	3 hodiny	+80 °C	+53 °C	6 hodin	+60 °C	+53 °C	7 dní	+35 °C	+53 °C	7 dní	+10 °C	+36 °C		
Doba zrání	Teplota zrání	HDT																
3 hodiny	+80 °C	+53 °C																
6 hodin	+60 °C	+53 °C																
7 dní	+35 °C	+53 °C																
7 dní	+10 °C	+36 °C																
Provozní teplota	-40 °C do +45 °C (při teplotě zrání +23 °C a vyšší)																	
Mechanické / Fyzikální vlastnosti																		
Pevnost v tlaku	(EN 196)																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Doba zrání</th> <th colspan="2">Teplota při zrání</th> </tr> <tr> <th>+10 °C</th> <th>+35 °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12 hodin</td> <td>-</td> <td>80 – 90 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>1 den</td> <td>50 – 60 N/mm²</td> <td>85 – 95 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>3 dny</td> <td>65 – 75 N/mm²</td> <td>85 – 95 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>7 dní</td> <td>70 – 80 N/mm²</td> <td>85 – 95 N/mm²</td> </tr> </tbody> </table>	Doba zrání	Teplota při zrání		+10 °C	+35 °C	12 hodin	-	80 – 90 N/mm ²	1 den	50 – 60 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²	3 dny	65 – 75 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²	7 dní	70 – 80 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²
Doba zrání	Teplota při zrání																	
	+10 °C	+35 °C																
12 hodin	-	80 – 90 N/mm ²																
1 den	50 – 60 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²																
3 dny	65 – 75 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²																
7 dní	70 – 80 N/mm ²	85 – 95 N/mm ²																

Pevnost ve smyku	Porušení v betonu (cca 15 N/mm ²)		(FIP 5.15)
		Teplota při zrání	
	Doba zrání	+15 °C	+35 °C
	1 den	3 - 5 N/mm ²	15 - 18 N/mm ²
	3 dny	13 - 16 N/mm ²	16 - 19 N/mm ²
	7 dní	14 - 17 N/mm ²	16 - 19 N/mm ²
	18 N/mm ² (při teplotě +23 °C)		(DIN 53283)
Pevnost v tahu			(DIN 53455)
		Teplota při zrání	
	Doba zrání	+15 °C	+35 °C
	1 den	18 - 21 N/mm ²	23 - 28 N/mm ²
	3 dny	21 - 24 N/mm ²	25 - 30 N/mm ²
	7 dní	24 - 27 N/mm ²	26 - 31 N/mm ²
Přidržnost	Na oceli: > 21 N/mm ² (průměrná hodnota > 30 N/mm ²) - na důkladně připraveném povrchu		(DIN EN 24624)
	Na betonu: > 4 N/mm ² (porušení v betonu > 4 N/mm ²).		
Modul pružnosti	V tlaku: 9600 N/mm ² (při teplotě +23 °C) V tahu: 11200 N/mm ² (při teplotě +23 °C)		(ASTM D695) (ISO 527)
Informace o systému			
Skladba systému	Sika® CarboDur® systém: Aplikační podrobnosti naleznete v technických listech výrobků Sika® CarboDur® a v Metodických příručkách pro systémy Sika® CarboDur®.		
Aplikační podrobnosti			
Kvalita podkladu	Viz. technické listy Sika® CarboDur® lamely a Sika® CarboDur® BC Rods.		
Příprava podkladu	Viz. metodické příručky pro systémy Sika® CarboDur®.		
Aplikační podmínky / Omezení			
Teplota podkladu	+8 °C min. / +35 °C max.		
Teplota okolí	+8 °C min. / +35 °C max.		
Teplota materiálu	Sikadur®-30 může být aplikován v rozmezí teplot +8 °C až +35 °C.		
Vlhkost podkladu	Max. 4 %. Aplikujete-li lepidlo Sikadur®-30 na matově zavlhký podklad, je nutné lepidlo Sikadur®-30 důkladně nanášet (vetřít) do podkladu.		
Rosný bod	Pozor na kondenzaci! Teplota podkladu během aplikace musí být minimálně o 3 °C vyšší než je teplota rosného bodu.		
Aplikace			
Poměr míchání	Komponent A : komponent B = 3 : 1 (hmotnostně nebo objemově)		

Míchání



Předem nadávkované množství:

Míchejte komponenty A+B dohromady minimálně 3 minuty elektrickým míchadlem (při nízkých otáčkách, max. 300 ot./min.) tak dlouho, až má hmota jednotnou konzistenci a nejsou patrné žádné barevné šmouhy. Vyvarujte se provzdušnění během míchání. Následně přemístěte celý obsah směsi do čisté nádoby a ještě jednou promíchejte nízkou rychlostí, aby došlo k odstranění vzduchu ze směsi. Namíchejte pouze takové množství, které jste schopni spotřebovat před zatumutím (v době zpracovatelnosti).

Nenadávkované množství:

Nejprve důkladně promíchejte každý komponent zvlášť. Nadávkujte jednotlivé složky ve správném poměru do přiměřené velké nádoby a následně míchejte elektrickým míchadlem při nízké rychlosti dokud nebude mít hmota jednotnou konzistenci a bude bez barevných šmouh.

Způsob aplikace / Nářadí

Více informací naleznete v technických listech výrobků Sika® CarboDur® a v Metodických příručkách pro systémy Sika® CarboDur®.

Čištění nářadí

Očistěte veškeré použité nářadí ihned po ukončení práce pomocí Sika® Colma Cleaner.

Vytvrzený materiál lze odstranit pouze mechanicky.

Doba zpracovatelnosti

Teplota	+8 °C	+20 °C	+35 °C
Zpracovatelnost	~ 120 minut	~ 90 minut	~ 20 minut
Otevřená doba	~ 150 minut	~ 110 minut	~ 50 minut

Doba zpracovatelnosti začíná smícháním obou komponentů (pryskyřice a tvrdidla). Při nižších teplotách dochází k prodloužení doby zpracovatelnosti, naopak při vyšších teplotách dochází ke zkrácení doby zpracovatelnosti. K dosažení delší doby zpracovatelnosti za vyšších teplot, míchejte menší množství materiálu nebo ochlaďte jednotlivé komponenty před mícháním. (ne méně než +5 °C).

Platnost hodnot

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.

Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu
- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci.
- Fólie je možné recyklovat.

Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplné informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.

CE značení

CE	
0921	
Sika Schweiz AG Tueffenwies 16-22 CH - 8048 Zürich 1001	
08	
0921-CPD-2054	
EN 1504-4	
Výrobky pro konstrukční lepení externích přílozek na povrch betonové konstrukce za účelem zesílení.	
Soudržnost:	≥ 14 N/mm ²
Pevnost v šikmém smyku: 50°	≥ 50 N/mm ²
60°	≥ 60 N/mm ²
70°	≥ 70 N/mm ²
Pevnost ve smyku:	≥ 12 N/mm ²
Pevnost v tlaku:	≥ 30 N/mm ²
Smrštění / roztažnost:	≤ 0,1 %
Doba zpracovatelnosti:	85 min. při +23 °C
Citlivost na vodu:	vyhovuje
Modul pružnosti v tlaku:	≥ 2000 N/mm ²
Koeficient teplotní roztažnosti:	≤ 100 * 10 ⁻⁶
Teplota skelného přechodu:	≥ +40 °C
Reakce na oheň:	třída E
Trvanlivost:	vyhovuje
Uvolňování nebezpečných látek: (vyhovuje 5.4)	vyhovuje



Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

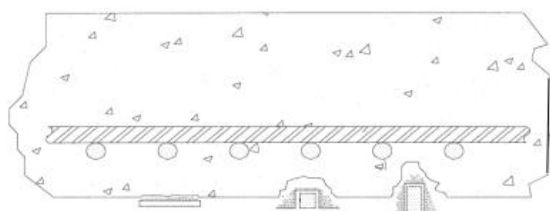
tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
http://www.sika.cz





KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE

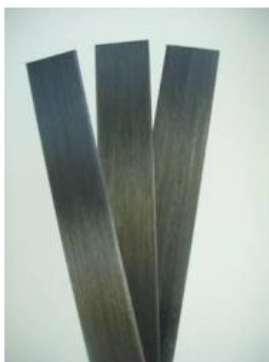
PREFA Rebar PREFACARB



Typy kompozitních výztuží:

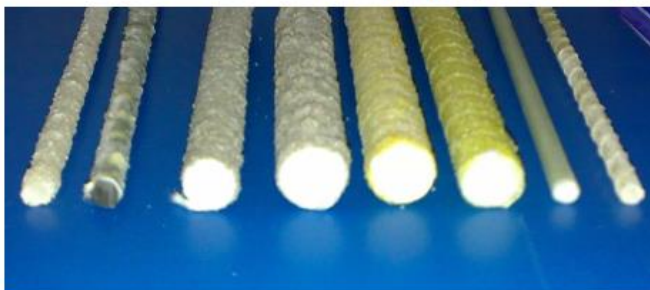
- a) uvnitř prvku - vnitřní výztuž **PREFAREBAR**,
- b) na spodním povrchu vlevo - dodatečně lepená výztuž **PREFACARB**
- c) na spodním povrchu uprostřed a vpravo - výztuž **PREFAREBAR** umístěná v blízkosti povrch

V kompozitních materiálech (FRP) se kombinují různé materiály, obvykle jde vláknovou výztuž dodávající jim potřebné mechanické vlastnosti a pojivovou složku – pryskyřici. Lze je s výhodou použít jako po mocnou nebo hlavní výztuž stavebních konstrukcí. Přičemž FRP jsou používány v tažené části konstrukcí, kde jsou efektivně využívány jejich výborné mechanické vlastnosti. Kompozitní prvek lze aplikovat na konstrukci ve třech oblastech:



Vnější nekovová výztuž - Externí výztuž se využívá pro dodatečné zesilování konstrukcí namáhaných normálovou silou, ohybovým resp. kroutícím momentem nebo kombinací uvedených namáhání. Je běžně realizována dodatečně lepenými lamelami nebo tkaninami. Další informace jsou uvedeny v technickém listu materiálu PREFACARB.

Výztuž umístěná v blízkosti povrchu - Tato výztuž je vhodná nejen pro dodatečné zesilování konstrukcí, ale i pro nové hybridní prvky. Výhodou vytvoření hybridní (kompozitní) konstrukce pomocí této výztuže je oproti klasické betonové konstrukci s lepenými lamelami nebo tkaninami je větší obvod styčné plochy mezi betonem a zesilujícím prvkem a větší hloubka kotvení pod povrchem betonu, čímž se dosáhne přenosu většího zatížení.



Vnitřní výztuž - Pro vyztužování nových konstrukcí lze použít vnitřní výztuž z kompozitů na bázi skleněných, nebo uhlíkových vláken. Najde své uplatnění zejména v chemickém průmyslu, energetice (energokanály a potrubní kanály, kolektory), v konstrukcích trvale vystavených kontaktu se zemínou, kanálech a sanitární městské infrastruktuře.

Kompozitní výztuže lze s výhodou použít při zesilování těchto typů konstrukcí:

Betonové konstrukce - výztuž ze skleněných nebo uhlíkových vláken ve tvaru tyčí se používá shodně jako běžná ocelová výztuž. Pro dodatečné zesilování se používá vnější lepená výztuž ve tvaru lamel nebo tyčová výztuž lepená do drážek.

Zdivo - kompozitní výztuž omezuje rozvoj již existujících trhlin a zamezuje tvorbě nových trhlin, zvyšuje nosnost těchto konstrukcí, schopnost přenášet tahová napětí a tuhost konstrukce. Používá se pro ně tyčová výztuž uložená v drážkách v blízkosti povrchu.

Dřevěné konstrukce - kompozitní výztuž zvyšuje nosnost dřevěných konstrukcí a jejich rigiditu. Používá se výztuž ve tvaru tyčí nebo lamel. Na rozdíl od vyztužování betonu je běžné použití výztuže ze skleněných vláken.

Základní charakteristiky a výhody:

Chemická odolnost – Kompozitní výztuže odolávají díky svému složení i agresivnímu prostředí v chemických provozech a čistírnách odpadních vod. Jsou netečné k chloridům a velice slabě ovlivňovány pH

Korozní odolnost - Kompozitní výztuže nepodléhají korozi. Není proto nutné krytí výztuže. Čímž lze dosáhnout materiálové úspory vyprojektováním subtilnějšího prvku.

Tepelná nevodivost - Kompozitní materiály jsou tepelně nevodivé. Nedochozí tak k tvorbě tepelných mostů

Elektrická nevodivost - Kompozitní materiály jsou elektricky nevodivé. Nedochozí tak ke korozi způsobené bludnými proudy.

Elektromagnetická transparentnost – Použití kompozitního materiálu na stavbu konstrukcí, které neomezují přenos elektromagnetických signálů – mobilní telefony, televize, rádio, internet. Je vhodné pro aplikace blízko kabelů s vysokým napětím a blízko transformátorů napětí.

PREFA REBAR

Materiálové vlastnosti PREFA REBAR





PREFA Rebar je standardně vyráběn z vinylesterové pryskyřice a alkalirezistentní skleněné vláknové výztuže. Na přání zákazníka je možné dodávat i výztuže pro dočasnou funkci (manipulační výztuž) z polyesterové pryskyřice a standardní skleněné vláknové výztuže. Další možná kombinace je epoxidová pryskyřice zpravidla s uhlíkovými vlákny. Výztuž lze vyrábět v zakázkových průměrech a délkách. Průměr lze volit z rozsahu 5 až 22 mm. Lze je vyrábět v několika pevnostních třídách.

Kompozitní výztuže PREFA REBAR je možné předpínat.

Soudržnost s betonem je zajištěna vrstvou křemičitého písku na povrchu výztuže.

Jmenovitý průměr [mm]	Průměr včetně adhezni vrstvy [mm]	Průřez [mm ²]	Hmotnost [g/bm]
5	7	19,6	40
6	8	28,3	60
8	10	50,3	105
10	12	78,5	165
12	14	113,1	240
14	16	153,9	320
16	18	201,1	420
18	20	254,5	530
20	22	314,1	660
22	24	380,0	800

Obecné vlastnosti kompozitních výztuží

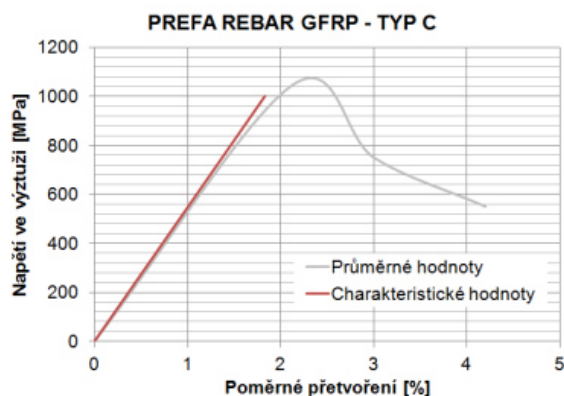
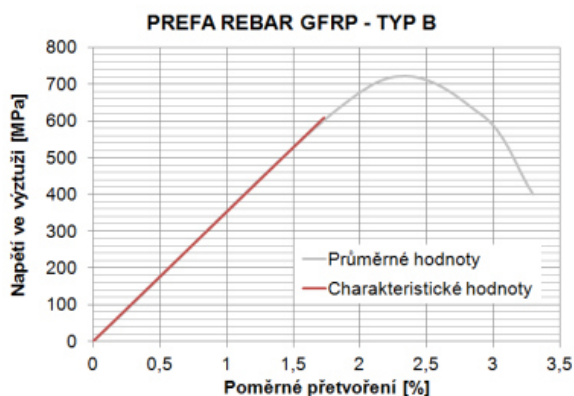
Vlastnost	Jednotky	Označení PREFA REBAR			
		GFRP typ A	GFRP typ B	GFRP typ C	CFRP
					
Typ vláken		E sklo	AR sklo	AR sklo + HS uhlík	HS uhlík
Pryskyřice		polyesterová		vinylesterová	
Použití		krátkodobé		dlouhodobé	
Povrchová úprava		ovíjení s pískováním			
Pevnost v tahu ^{*)}	[MPa]	696		1050	1869
Modul pružnosti E ^{*)}	[GPa]	36		67	94
Mezní přetvoření ^{*)}	[%]	2,08		2,14	2,02
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,1			1,7
Průměr výztuže	[mm]	5 až 22		12 až 22	5 až 22
Teplotní roztažnost - podélný směr	[K ⁻¹]	6×10 ⁻⁶			0
Teplotní roztažnost - příčný směr	[K ⁻¹]	3×10 ⁻⁵			3×10 ⁻⁵

^{*)} Uvedeny jsou střední hodnoty měřených veličin.

Materiálové vlastnosti kompozitních výztuží – hodnoty pro návrh konstrukcí

Vlastnost	Jednotky	Označení PREFA REBAR		
		GFRP typ A a B	GFRP typ C	CFRP
Pevnost v tahu				
– střední hodnota	[MPa]	696	1050	1869
– charakteristická hodnota (EC)		609	1002	1706
– charakteristická hodnota (ACI)		538	964	1572
Modul pružnosti				
– střední hodnota	[GPa]	36	67	94
Mezní přetvoření				
– střední hodnota	[%]	2,08	2,14	2,02
– charakteristická hodnota (EC)		1,73	1,83	1,61
– charakteristická hodnota (ACI)		1,44	1,58	1,27

Pozn.: Charakteristická hodnota dle postupů odpovídajících EC (ČSN EN 1990) je určena pro 5% kvantil normálního rozložení měřené veličiny; hodnota dle postupů odpovídajících ACI (ACI 440.3R-04) je určena jako střední hodnota mínus trojnásobek směrodatné odchylky měřené veličiny.



Pracovní diagramy výztuže PREFA REBAR GFRP – typ A a B vlevo a typ C vpravo

Další varianty a úpravy přímých kompozitních výztuží

Kompozitní výztuže PREFA REBAR GFRP lze dodávat:

- tvarované (tvar L, Π , \square)
- úprava pro předpinání
- spojené do sítí



obr síť



obr mříž

VŠEOBECNÉ TECHNICKÉ PODMÍNKY KOMPOZITNÍCH VÝZTUŽÍ

PREFA REBAR

1. Popis a typy kompozitních výztuží

Kompozitní výztuže se vyrábějí v několika základních provedeních, které jsou určeny jejich příslušnou aplikací. Nosnou funkci mají skleněná nebo uhlíková vlákna, 100% těchto vláken je uloženo v podélném směru. Vlákna mohou být skleněná (typ AR nebo E), uhlíková nebo i jiná (např. čedičová). Obsah vláken je v rozmezí 75-80% (bráno hmotnostně). Pojivem je vinylesterová, polyesterová nebo epoxidová pryskyřice. Na povrchu výztuže je nad spirálovým ovinutím zajišťujícím tvar výztuže vrstva křemičitého písku zalitá v pryskyřici. Kompozitní výztuže je možné ohýbat pouze v nevytvrzeném stavu. Není možné tvarování na stavbě.

Kompozitní výztuže jsou rozděleny do těchto typů:

PREFA REBAR GFRP A ... výztuž z polyesterové pryskyřice a běžných skleněných vláken typu E.
Výztuž je určena pro krátkodobé aplikace nebo pro nealkalická pojiva bez portlandského cementu.

PREFA REBAR GFRP B ... výztuž z vinylesterové pryskyřice a alkalirezistentních skleněných vláken.
Výztuž je určena pro dlouhodobé aplikace a je vhodná pro pojiva na bázi portlandského cementu.

PREFA REBAR GFRP C ... výztuž ze speciální vinylesterové pryskyřice a alkalirezistentních skleněných a vysoce pevnostních uhlíkových vláken. Výztuž je určena pro dlouhodobé aplikace a je vhodná pro pojiva na bázi portlandského cementu.

PREFA REBAR CFRP ... výztuž ze speciální vinylesterové pryskyřice a vysoce pevnostních uhlíkových vláken. Výztuž je určena pro dlouhodobé aplikace a je vhodná pro pojiva na bázi portlandského cementu s požadavkem na vyšší modul pružnosti

Další charakteristiky:

Jmenovitý průměr ... Průměr jádra výztuže. Dostupné jmenovité průměry jsou v rozsahu 5 až 22 mm.

Celkový průměr ... Průměr včetně vrstvy křemičitého písku na povrchu výztuže. Zpravidla o 2mm větší než jmenovitý průměr

Rádus ohybů ... Poloměr ohybu tyčí u tvarovaných výztuží. Pokud není uvedeno jinak je 50± 5 mm.

Kruhovitost průřezu ... ± 10%

Soudržnost s betonem ... 18,0 MPa

Měrná hmotnost ... 2,1 g/cm³

2. Výrobní dokumentace

Kompozitní výztuže jsou vyráběné podle výrobní dokumentace, kterou dodá kupující, nebo podle dokumentace, kterou zajistí prodávající dle předaných požadavků kupujícího.

Výrobní dokumentace dodaná kupujícím musí obsahovat u přímých výztuží:

- Délku výztuže,
- Jmenovitý průměr výztuže
- Typ výztuže

Výrobní dokumentace dodaná kupujícím musí obsahovat u ohýbaných tvarů:

- Výkres ohnutého tvaru výztuže,
- Jmenovitý průměr výztuže
- Typ výztuže

3. Kvalita výrobků

Kontrola jakosti výrobků je průběžně zajišťována v souladu se směrnicemi pro systém řízení jakosti podle ČSN ISO 9001 a ČSN ISO 14001. Výroba kompozitních výztuží se řídí podle normy ČSN EN 13706-1 až -3. Doklad o jakosti je pro odběratele uveden na dodacích listech. V souladu s ustanovením zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky předá kupující po realizaci dodávek prohlášení o shodě.

4. Rozměrové tolerance stavebních dílců

Jsou uvedeny ve výrobní dokumentaci a v podnikových normách s firmy PREFA KOMPOZITY, a.s.:

název prvku	délka [mm]	jmenovitý průměr [mm]	celkový průměr [mm]	šířka [mm]	Výška [mm]
PREFA Rebar Přímé pruty	± 5	± 0,3	± 2	----	----
PREFA Rebar Ohýbané výztuže		± 0,3	± 2	± 10	± 10

5. Povrch výztuží

Běžný povrch kompozitních výztuží je opatřený vrstvou křemičitého písku zalitého v pryskyřici, nejsou v něm trhlinky nebo vlákna nesmočená v pryskyřici. Jsou přípustné plochy bez křemičitého písku nebo kapky pryskyřice, celková plocha těchto míst by neměla přesáhnout 10% celkového povrchu výztuže. V místě ohybů kompozitní výztuže dochází vždy k zploštění průřezu, rovněž je na vnitřním povrchu plocha hladká (křemičitý písek je zatlačen do povrchu). Výše uvedené odchylky nemohou být reklamovány. Výztuže jsou standardně vyráběny v přírodním zbarvení nebo v barvě světle šedé. Na přání kupujícího mohou být výztuže vyrobeny i v jiných barevných odstínech.

10.2 Příloha č.2: Výsledky materiálových vlastností spočtených metodou Rule of mixture

10.2.1 FRP desky použité při protlačovacích zkouškách

Tabulka 24: Vlastnosti FRP spočítané metodou Rule of mixture

		sklo	sklo	sklo	sklo	sklo	polyester			
		0°	90°	+ 45°	- 45°	rohož				
Objemová hmotnost	ρ	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	1.20		[g/cm ³]	
Mez pevnosti	σ	900	900	1000	900	1000	45		[MPa]	
Modul pružnosti	E	70	70	70	70	70	2.2		[GPa]	
Mezní protažení	ϵ_i	0.0129	0.0129	0.0143	0.0129	0.0143	0.0205		[-]	
Mezní protažení min	ϵ_{min}	0.0129							[-]	
GFRP 0°								Suma		
Počet vrstev	n	7	7	0	0	7		21	[ks]	
Gramáž tkaniny/rohože		300	300	300	300	400			[g/m ²]	
Gramáž celkem		0.210	0.210	0.000	0.000	0.280			[g/cm ²]	
Tloušťka vrstvy	t_i	0.840	0.840	0.000	0.000	1.120	9.490	12.29	[mm]	
Procento vyztužení	V_i	6.8%	6.8%	0.0%	0.0%	9.1%	77.2%	100%	[%]	
Přepočtené vyztužení	$V_{mod,i}$	9.1%	9.1%	2.3%	2.3%		77.2%	100%	[%]	
As/Ac		11.8%	11.8%	3.0%	3.0%				[%]	
Cosinus úhlu	α_j	1.000	0.000	0.500	0.500		1.000		[-]	
Modul pružnosti	E	6.4	0.0	0.8	0.8		1.7	9.7	[GPa]	
Mez pevnosti	σ								124.4	[MPa]
Maximální síla	F								30.6	[kN]

10.2.2 FRP použité při výrobě nosníku

10.2.2.1 Spodní pásnice nosníku

Tabulka 25: Vlastnosti FRP spočítané metodou Rule of mixture

		CFRP 0°						Suma	
Počet vrstev	n	6	3	3	0	0	0	6	[ks]
Gramáž tkaniny/rohože		158	195	205	300	300	600		[g/m ²]
Gramáž celkem		0.095	0.059	0.062	0.000	0.000	0.000		[g/cm ²]
Tloušťka vrstvy	t _i	0.524	0.234	0.246	0.000	0.000	0.000	3.410	4.41 [mm]
Procento vyztužení		11.9%	5.3%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	77.3%	100% [%]
Přepočtené vyztužení		11.9%	5.3%	5.6%				77.3%	100% [%]
As/Ac		15.4%	6.9%	7.2%					[%]
Cosinus úhlu	α _i	1.000	1.000	0.000	0.500	0.500		1.000	[-]
Modul pružnosti	E	28.7	4.2	0.0	0.0	0.0		1.7	34.7 [GPa]
Mez pevnosti	σ							592.4	[MPa]
Maximální síla	F							65.4	[kN]
		CFRP 90°						Suma	
Počet vrstev	n	6	3	3	0	0	0	6	[ks]
Gramáž tkaniny/rohože		158	195	205	300	300	600		[g/m ²]
Gramáž celkem		0.095	0.059	0.062	0.000	0.000	0.000		[g/cm ²]
Tloušťka vrstvy	t _i	0.524	0.234	0.246	0.000	0.000	0.000	3.397	4.40 [mm]
Procento vyztužení	V _i	11.9%	5.3%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	77.2%	100% [%]
Přepočtené vyztužení	V _{mod,i}	11.9%	5.3%	5.6%				77.2%	100% [%]
As/Ac		15.4%	6.9%	7.2%					[%]
Cosinus úhlu	α _i	0.000	0.000	1.000	0.500	0.500		1.000	
Modul pružnosti	E	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0		1.7	6.2 [GPa]
Mez pevnosti	σ							69.4	[MPa]
Maximální síla	F							6.1	[kN]

10.2.2.2 Stojina nosníku

Tabulka 26: Vlastnosti FRP spočítané metodou Rule of mixture

		uhlík	sklo	sklo	sklo	sklo	sklo	polyester			
		0°	0°	90°	+ 45°	- 45°	rohož				
Objemová hmotnost	ρ	1.81	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	1.20		[g/cm ³]	
Mez pevnosti	σ	4137	900	900	1000	900	1000	35		[MPa]	
Modul pružnosti	E	242	80	80	80	80	80	2.2		[GPa]	
Mezní protažení	ϵ_i	0.0171	0.0113	0.0113	0.0125	0.0113	0.0125	0.0159		[-]	
Mezní protažení min.	ϵ_{min}	0.0113									[MPa]
GFRP 0°									Suma		
Počet vrstev	n		6	6	6	6	2		26	[ks]	
Gramáž tkaniny/rohože			195	195	300	300	600			[g/m ²]	
Gramáž celkem			0.117	0.117	0.180	0.180	0.120			[g/cm ²]	
Tloušťka vrstvy	t_i		0.468	0.468	0.720	0.720	0.480	5.980	8.84	[mm]	
Procento vyztužení	V_i		5.3%	5.3%	8.1%	8.1%	5.4%	67.7%	100%	[%]	
Přepočtené vyztužení	$V_{mod,i}$		6.7%	6.7%	9.5%	9.5%		67.7%	100%	[%]	
As/Ac			9.8%	9.8%	14.0%	14.0%				[%]	
Cosinus úhlu			1.000	0.000	0.500	0.500		1.000		[-]	
Modul pružnosti	E		5.3	0.0	3.8	3.8		1.5	14.4	[GPa]	
Mez pevnosti	σ									162.2	[MPa]
Maximální síla	F									35.8	[kN]
GFRP 45°									Suma		
Počet vrstev	n		6	6	6	6	2		26	[ks]	
Gramáž tkaniny/rohože			195	195	300	300	600			[g/m ²]	
Gramáž celkem			0.117	0.117	0.180	0.180	0.120			[g/cm ²]	
Tloušťka vrstvy	t_i		0.468	0.468	0.720	0.720	0.480	5.637	8.49	[mm]	
Procento vyztužení	V_i		5.5%	5.5%	8.5%	8.5%	5.7%	66.4%	100%	[%]	
Přepočtené vyztužení	$V_{mod,i}$		6.9%	6.9%	9.9%	9.9%		66.4%	100%	[%]	
As/Ac			10.4%	10.4%	14.9%	14.9%				[%]	
Cosinus úhlu	α_j		0.500	0.500	0.000	1.000		1.000		[-]	
Modul pružnosti	E		2.8	2.8	0.0	7.9		1.5	14.9	[GPa]	
Mez pevnosti	σ									167.7	[MPa]
Maximální síla	F									35.6	[kN]
GFRP 90°									Suma		
Počet vrstev	n		6	6	6	6	2		26	[ks]	
Gramáž tkaniny/rohože			195	195	300	300	600			[g/m ²]	
Gramáž celkem			0.117	0.117	0.180	0.180	0.120			[g/cm ²]	
Tloušťka vrstvy	t_i		0.468	0.468	0.720	0.720	0.480	5.059	7.92	[mm]	
Procento vyztužení	V_i		5.9%	5.9%	9.1%	9.1%	6.1%	63.9%	100%	[%]	
Přepočtené vyztužení	$V_{mod,i}$		7.4%	7.4%	10.6%	10.6%		63.9%	100%	[%]	
As/Ac			11.6%	11.6%	16.6%	16.6%				[%]	
Cosinus úhlu	α_j		0.000	1.000	0.500	0.500		1.000		[-]	
Modul pružnosti	E		0.0	5.9	4.2	4.2		1.4	15.8	[GPa]	
Mez pevnosti	σ									178.2	[MPa]
Maximální síla	F									35.3	[kN]

10.3 Příloha č 3: Vstupní data v programu ATENA

10.3.1 Model materiálových zkoušek

Zadání materiálu matrice:

Base Material Prototype: CC3DNonLinCementitious2
Young s Modulud-E: 2500 MPa
Poisson s ratio-MU: 0,35
Tension strength-FT: 35MPa
Compresion strength-FT: -35MPa

Zadání materiálu výztuže:

Reinf 01 Young s Modulus-E: 80000 MPa
Reinf 01 eps2: 0.0129

Smeared reinforcement 01: reprezentuje svislá vlákna

Reinforcing ratio: 0,116; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (0,0,1)

Smeared reinforcement 02: reprezentuje vodorovná vlákna

Reinforcing ratio: 0,116; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,0)

Smeared reinforcement 03: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°

Reinforcing ratio: 0,166; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,1)

Smeared reinforcement 04: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°

Reinforcing ratio: 0,166; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (-1,0,1)

10.3.2 Model protlačovacích zkoušek

Beton:

Prvky: Solid

Element Type: Hexahedra

Material

prototype:CC3DNonLinCementitious2

Young modulus: 42000 MPa

Poisson Ratio: 0.2

Tension Strenth-FT: 6,8 MPa

Compresion Strenth-FC: -92 MPa

Betonářská výztuž:

Prvky: 1D Reinforcement

Material prototype:

CCReinforcement

GFRP výztuž průměru 14 mm s uhlíkovým středem

Area: 0,0001539

Young modulus-E: 49,80 GPa

Yield Strenth YS: 1170,39 MPa

eps2: 0.0235 [-]

Max Bond Strenth: 54,33 MPa

GFRP:

Solid prvky
Element Type: Hexahedra
Material prototype: CCCombinedMaterial

Pryskyřice:

Young modulus: 2200 MPa
Poisson Ratio: 0.35
Tension Strenth-FT: 35 MPa
Compresion Strenth-FC: -71 MPa

Vlákna:

Young modulus-E: 70000 MPa
Yield Strenght YS: 1000 MPa
eps2: 0.0143 [-]

Smearred reinforcement 01: reprezentuje svislá vlákna

Reinforcing ratio: 0,118; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (0,0,1)

Smearred reinforcement 02: reprezentuje vodorovná vlákna

Reinforcing ratio: 0,118; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,0)

Smearred reinforcement 03: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°

Reinforcing ratio: 0,03; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,1)

Smearred reinforcement 04: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°

Reinforcing ratio: 0,03; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (-1,0,1)

10.3.3 Model nosníku

Beton:

Prvky: Solid
Element Type: Hexahedra
Material prototype: CC3DNonLinCementitious2
Young modulus: 42000 MPa
Poisson Ratio: 0.2 [-]
Tension Strenth-FT: 6,8 MPa
Compresion Strenth-FC: -80 MPa

Betonářská výztuž:

Prvky: 1D Reinforcement
Material prototype: CCReinforcement

GFRP výztuž průměru 14 mm s uhlíkovým středem

Area: 0,0001539
Young modulus-E: 49,80 GPa
Yield Strenth YS: 1170,39 MPa
eps2: 0.0235 [-]
Max Bond Strenth: 54,33 MPa

GFRP výztuž průměru 10 mm

Area: 0,0000785 m²
Young modulus-E: 36,0 GPa
Yield Strength YS: 696,0 MPa
eps2: 0.0193 [-]
Max Bond Strength: 18,0 MPa

CFRP pásnice:

Prvky: Solid
Element Type: Hexahedra
Material prototype: CC3DElastIsotropic
Young modulus: 50690 MPa
Poissons ratio: 0,3 [-]

GFRP stojina:

Solid prvky
Element Type: Hexahedra
Material prototype: CCCombinedMaterial
Young modulus: 2200 MPa
Poisson Ratio: 0.35
Tension Strength-FT: 35 MPa
Compression Strength-FC: -71 MPa

Smeared reinforcement 01: reprezentuje svislá vlákna

Reinforcing ratio: 0,098; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (0,0,1)

Smeared reinforcement 02: reprezentuje vodorovná vlákna

Reinforcing ratio: 0,098; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,0)

Smeared reinforcement 03: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°


Reinforcing ratio: 0,14; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (1,0,1)

Smeared reinforcement 04: reprezentuje vlákna pod úhlem 45°

Reinforcing ratio: 0,14; Reinforcing direction: (X,Y,Z) = (-1,0,1)

10.4 Příloha č.4: Protokoly o zkouškách

10.4.1 Protokol – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

	České vysoké učení technické v Praze Fakulta stavební K 210 - Experimentální centrum
---	--

BETON - Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Datum zkoušky: 18.07.2018

Počet zkušebních těles: 3

Měření a vyhodnocení provedl: Radek Litoš

Měřicí ústředna: HBM Centipede 100 v.č. 034320001, inv.č.: I1- 8547

Použité snímače: Induktivní snímače HBM v.č. D1 1612 a D1 1611

Tabulka výsledků:

Označení zkušebního vzorku	Modul pružnosti v GPa
Trm_15052018_1	44,00
Trm_15052018_2	44,50
Trm_15052018_3	44,00

Jméno vzorku: Trm_15052018_1																
Hrana vzorku (axb): 100 100 mm																
Základna snímačů: 200 mm																
Síla (kN)	Napětí (MPa)	ϵ D1 1612 (-)	ϵ D1 1611 (-)	Průměrné hodnota přetvoření (-)	Rozdíl ϵ D1 1612 (-) od průměru (%)	Rozdíl ϵ D1 1611 (-) od průměru (%)	Centrace									
5	0,50	0,000015	0,000014	0,000014	3,2	3,3	OK									
5	0,50	0,000014	0,000013	0,000013	2,1	2,1	OK									
280	28,00	0,000640	0,000604	0,000622	2,8	2,9	OK									
280	28,00	0,000648	0,000611	0,000629	2,8	2,9	OK									
5	0,50	0,000022	0,000027	0,000024	10,2	9,3	OK									
5	0,50	0,000018	0,000024	0,000021	13,6	12,0	OK									
280	28,00	0,000647	0,000617	0,000632	2,3	2,3	OK									
280	28,00	0,000656	0,000627	0,000641	2,2	2,3	OK									
5	0,50	0,000025	0,000034	0,000030	16,4	14,1	OK									
5	0,50	0,000023	0,000031	0,000027	16,4	14,1	OK									
280	28,00	0,000649	0,000626	0,000638	1,8	1,9	OK									
280	28,00	0,000658	0,000634	0,000646	1,8	1,8	OK									
5	0,50	0,000030	0,000042	0,000036	17,2	14,7	OK									
5	0,50	0,000026	0,000038	0,000032	18,7	15,8	OK									
<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">E:</td> <td>44420</td> <td>MPa</td> <td>44777</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>44,42</td> <td>GPa</td> <td>44,8</td> <td>GPa</td> </tr> </table>								E:	44420	MPa	44777	MPa	44,42	GPa	44,8	GPa
E:	44420	MPa	44777	MPa												
	44,42	GPa	44,8	GPa												

Jméno vzorku: Trm_15052018_2																
Hrana vzorku (axb): 100 100 mm																
Základna snímačů: 200 mm																
Síla (kN)	Napětí (MPa)	ϵ D1 1612 (-)	ϵ D1 1611 (-)	Průměrné hodnota přetvoření (-)	Rozdíl ϵ D1 1612 (-) od průměru (%)	Rozdíl ϵ D1 1611 (-) od průměru (%)	Centrace									
5	0,5	0,000015	0,000015	0,000015	1,4	1,4	OK									
5	0,5	0,000014	0,000013	0,000014	1,9	1,9	OK									
280	28	0,000571	0,000660	0,000616	7,3	6,8	OK									
280	28	0,000575	0,000664	0,000620	7,2	6,7	OK									
5	0,5	0,000023	0,000026	0,000025	7,2	6,8	OK									
5	0,5	0,000020	0,000022	0,000021	6,8	6,3	OK									
280	28	0,000571	0,000673	0,000622	8,2	7,6	OK									
280	28	0,000573	0,000675	0,000624	8,2	7,6	OK									
5	0,5	0,000024	0,000030	0,000027	11,4	10,2	OK									
5	0,5	0,000021	0,000026	0,000024	12,6	11,2	OK									
280	28	0,000568	0,000681	0,000624	9,0	8,3	OK									
280	28	0,000571	0,000683	0,000627	9,0	8,3	OK									
5	0,5	0,000025	0,000034	0,000030	14,8	12,9	OK									
5	0,5	0,000021	0,000029	0,000025	14,8	12,9	OK									
<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">E:</td> <td>45575</td> <td>MPa</td> <td>45705</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>45,58</td> <td>GPa</td> <td>45,7</td> <td>GPa</td> </tr> </table>								E:	45575	MPa	45705	MPa	45,58	GPa	45,7	GPa
E:	45575	MPa	45705	MPa												
	45,58	GPa	45,7	GPa												

Jméno vzorku: Trm_15052018_3																
Hrana vzorku (axb): 100 100 mm																
Základna snímačů: 200 mm																
Síla (kN)	Napětí (MPa)	ϵ D1 1612 (-)	ϵ D1 1611 (-)	Průměrné hodnota přetvoření (-)	Rozdíl ϵ D1 1612 (-) od průměru (%)	Rozdíl ϵ D1 1611 (-) od průměru (%)	Centrace									
5	0,5	0,000011	0,000013	0,000012	9,4	8,6	OK									
5	0,5	0,000009	0,000012	0,000011	12,4	11,0	OK									
280	28	0,000644	0,000616	0,000630	2,1	2,2	OK									
280	28	0,000649	0,000624	0,000636	1,9	2,0	OK									
5	0,5	0,000024	0,000025	0,000024	2,3	2,3	OK									
5	0,5	0,000020	0,000020	0,000020	2,1	2,1	OK									
280	28	0,000656	0,000625	0,000641	2,4	2,5	OK									
280	28	0,000661	0,000630	0,000646	2,3	2,3	OK									
5	0,5	0,000029	0,000029	0,000029	0,0	0,0	OK									
5	0,5	0,000023	0,000024	0,000024	3,3	3,2	OK									
280	28	0,000660	0,000625	0,000643	2,6	2,7	OK									
280	28	0,000662	0,000628	0,000645	2,5	2,6	OK									
5	0,5	0,000031	0,000031	0,000031	1,0	1,0	OK									
5	0,5	0,000026	0,000026	0,000026	1,5	1,5	OK									
<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">E:</td> <td>44261</td> <td>MPa</td> <td>44433</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>44,26</td> <td>GPa</td> <td>44,4</td> <td>GPa</td> </tr> </table>								E:	44261	MPa	44433	MPa	44,26	GPa	44,4	GPa
E:	44261	MPa	44433	MPa												
	44,26	GPa	44,4	GPa												

10.4.2 Protokoly o zkouškách kompozitní GFRP výztuže



TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p. Technical and Test Institute for Construction Prague

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Certifikační orgán, Inspekční orgán, Kvalifikační orgán
Accredited Test Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Certification Body, Inspection Body, Qualification Body

Autorizovaná osoba 204 podle rozhodnutí ÚNMZ č. 11/2013

Pobočka 0600 – Brno

PROTOKOL

o výsledku certifikace výrobku

podle § 5 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. České republiky

č. 060-038506

výrobek:

Kompozitní výztuž Prefa REBAR

typ / varianta:

výztuž pro betonové konstrukce, typ C

žadatel:

PREFA KOMPOZITY, a.s.

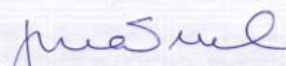
IČ: 26949881
adresa: Kulkova 4231/10, 615 00 Brno
výrobce: PREFA KOMPOZITY, a.s.
IČ: 26949881
adresa: Kulkova 4231/10, 615 00 Brno
výrobna: PREFA KOMPOZITY, a.s.
adresa: Havránkova 11, 619 62 Brno
zakázka: Z060130240

Počet stran protokolu včetně strany titulní: 5

Počet stran příloh: 17

Osoba odpovědná za obsah tohoto protokolu:




Ing. Pavel Juránek, Ph.D.
vedoucí posuzovatel

Brno 12. prosince 2013

Upozornění: Bez písemného souhlasu vedoucího autorizované osoby 204 se tento protokol nesmí reprodukovat jinak, než celý.

Technický a zkušební ústav stavební Praha, s. p., Pobočka 0600-Brno, Hněvkovského 77, 617 00 Brno, Česká republika
Tel.: +420 543 420 852 ředitel, +420 543 420 833 operátor, Fax: +420 543 211 591, e-mail: prochazka@tzus.cz, www.tzus.cz
Bankovní spojení (Bank): KB Praha 1 Czech Republic, č.ú.: 1501-931/0100, IČ: 00015679, DIČ: CZ00015679

1. Všeobecné údaje

1.1. Údaje o žadateli

- PREFA KOMPOZITY, a.s., Kulkova 4231/10, 615 00 Brno

1.2. Údaje o výrobku

Kompozitní výztuž Prefa REBAR - typ C

Jedná se o vnitřní tyčovou výztuž pro betonové konstrukce na bázi kombinace skleněných a uhlíkových vláken, pojených pryskyřicí. Výztuž se používá obdobně jako běžná ocelová výztuž, nelze ji ale ohýbat a svařovat. Používá se zejména v konstrukcích vystavených chemicky agresivnímu prostředí, tj. v chemickém průmyslu, energetice, v konstrukcích trvale vystavených kontaktu se zeminou, posypovými solemi, v kanalizaci a sanitární městské infrastruktuře.

Základní charakteristika kompozitu:

- Chemická a korozní odolnost – kompozitní výztuž odolává díky svému složení vnějšímu agresivnímu prostředí v chemických provozech a čistírnách odpadních vod. Je netečná k chloridům a je velmi slabě ovlivňována okolním pH.
- Elektrická nevodivost - kompozitní materiál je elektricky nevodivý, nevytváří vodivé prostředí pro bludné proudy.
- Tepelná nevodivost - kompozitní materiál má tepelnou vodivost nižší než ocel.
- Elektromagnetická transparentnost - kompozitní materiál neomezuje přenos elektromagnetických signálů.

Kompozitní výztuže Prefa REBAR jsou standardně vyráběny z vinylesterové pryskyřice, alkalirezistentní skleněné vláknové výztuže a uhlíkových vláken. Výztuž lze volit v rozsahu průměru 5 až 22 mm. Jmenovitý průměr tyče je deklarován o 2 mm menší než je průměr tyče včetně adhezní vrstvy. Soudržnost s betonem je zajištěna adhezní vrstvou křemičitého písku na povrchu výztuže.

Jmenovitý průměr [mm]	Průměr včetně adhezní vrstvy [mm]	Plocha průřezu [mm ²]	Hmotnost [g/m]
5	7	19,6	40
6	8	28,3	60
8	10	50,3	105
10	12	78,5	165
12	14	113,1	240
14	16	153,9	320
16	18	201,1	420
18	20	254,5	530
20	22	314,1	660
22	24	380,0	800

Kotevní délka tyče se uvažuje hodnotou 30-ti násobku jmenovitého průměru. Pro návrh konstrukce s kompozitní výztuží lze využít např. předpis ACI 440.1R-06 s tím, že hodnota součinitele spolehlivosti konstrukce γ_M podle ČSN EN 1990, čl. 6.3.5, nebude nižší než 3,5. Při návrhu dílců nebo konstrukcí s kompozitní výztuží se vždy musí posoudit i mezní stavy použitelnosti.

S použitím výztuže se uvažuje do betonových konstrukcí a dílců, při jejichž selhání nedojde ke zřícení stavby nebo její podstatné části, jako jsou např. prvky pro oplocení, odvodňovací žlaby, prvky pro zárubní stěny, obkladové prvky apod., které jsou vystavené účinkům statického zatížení. Výztuž není určena do konstrukcí namáhaných dynamicky a na únavu.

Kompozitní výztuž není určena pro dílce a konstrukce namáhané zvýšenými a vysokými teplotami a dílce a konstrukce s požadavkem na požární odolnost.



Kvazistálé zatížení podle ČSN EN 1990, čl. 4.1.3, nemá překračovat úroveň 25 % návrhového zatížení uvažovaného na mezi únosnosti konstrukčního prvku, která byla stanovena z návrhové hodnoty okamžité pevnosti kompozitní výztuže.

Výrobek je zaříděn dle přílohy č. 2 Nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. České republiky do skupiny pod číslem 01_02. Způsob posouzení odpovídá § 5 NV číslo 163/2002 Sb. ve znění NV číslo 312/2005 Sb.

1.3. Seznam podkladů předaných žadatelem pro certifikaci výrobku

- Žádost o výkon činnosti autorizované osoby 204 ze dne 23.10.2013 – evidenční číslo Z060130240
- Technické podklady – Kompozitní výztuže Prefa REBAR
- Protokol o zkoušce, vystavený VUT v Brně, Fakultou stavební, ze dne 7.11.2013.

Na základě prohlášení žadatele neexistuje žádný důvod k prověřování vlivů stavebních produktů ve vestavěném stavu, zda jsou splněny požadavky ochrany zdraví a životního prostředí.

1.4. Seznam ostatních podkladů použitých při certifikaci výrobku

- Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky v platném znění
- Nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění NV č. 312/2005 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky
- ČSN EN ISO 15630-1 Ocel pro výztuž a předpínání do betonu - Zkušební metody - Část 1: Tyče, válcovaný drát a drát pro výztuž do betonu
- ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
- ČSN 42 5512 Tyče kruhové pro výztuž do betonu z oceli značky 10 216
- ČSN 73 1328 Stanovení soudržnosti oceli s betonem
- ČSN EN 1990 Eurokód. Zásady navrhování konstrukcí
- ISO 12491 Statistical methods for quality control of building materials and components
- ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars
- ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures

1.5. Technická specifikace, technické předpisy vztahující se na certifikaci výrobku

Stavební technické osvědčení č. 060-038505 vystavené AO 204 – TZÚS Praha s.p., pobočkou Brno ze dne 6. prosince 2013, platnost do 31.12.2015

1.6. Informace o předchozí certifikaci výrobku

Jedná se o první certifikaci výrobku.

2. Výsledek přezkoumání podkladů předložených žadatelem

Podklady předané žadatelem, podle § 5 odst. 2 písmeno a) NV 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb., byly přezkoumány. Podklady odpovídají požadavkům NV-SV.

3. Posouzení výrobku

Technické požadavky

Technické požadavky na výrobek jsou stanoveny ve stavebním technickém osvědčení č. 060-038505, vystaveném AO 204 – TZÚS Praha s.p., pobočkou Brno ze dne 6. prosince 2013.



3.1. Soupis protokolů o zkouškách a posouzeních:

TZÚS – AO 204

- Protokol č. 060-038504 o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, jmenovitý průměr 14 mm, ze dne 28.11.2013, TZÚS Praha, s.p., pobočka Brno
- Protokol č. 060-038581 o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, jmenovitý průměr 18 mm, ze dne 28.11.2013, TZÚS Praha, s.p., pobočka Brno

externími zkušebnami

- Protokol o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, ze dne 7.11.2013, VUT v Brně, Fakulta stavební

3.2. Vyhodnocení výsledků zkoušek a posouzení výrobku

Poř. číslo	Vlastnost	Požadovaná úroveň	Dosažená úroveň	Vyhodnocení
1	Charakteristická pevnost v tahu	D: min. 800 MPa	pro jmenovitý průměr 14 mm – 858 MPa pro jmenovitý průměr 18 mm – 926 MPa	Vyhovuje
2	Modul pružnosti v tahu	D: min. 40 GPa	pro jmenovitý průměr 14 mm – 44,5 GPa pro jmenovitý průměr 18 mm – 45,5 GPa	Vyhovuje
3	Rozměrová a tvarová přesnost - délková hmotnost	D: g/m +10 %, -5 % 40 pro jmenovitý ø 5 mm 60 pro jmenovitý ø 6 mm 105 pro jmenovitý ø 8 mm 165 pro jmenovitý ø 10 mm 240 pro jmenovitý ø 12 mm 320 pro jmenovitý ø 14 mm 420 pro jmenovitý ø 16 mm 530 pro jmenovitý ø 18 mm 660 pro jmenovitý ø 20 mm 800 pro jmenovitý ø 22 mm	viz protokoly o zkoušce č. 060-038504 viz protokoly o zkoušce č. 060-038581	Vyhovuje
4	Rozměrová a tvarová přesnost - geometrie povrchu	D: dle deklarace průřezu, průměrná hodnota průměru průřezu včetně adhezní vrstvy: +1 mm, -0,5 mm	viz protokoly o zkoušce č. 060-038504 viz protokoly o zkoušce č. 060-038581	Vyhovuje
5	Odolnost vůči alkalickému prostředí	P: v případě deklarace - po 90 dnech uložení v roztoku o složení 1 g NaOH, 4 g KOH, 0,5 g Ca (OH)2 na 1 litr destilované vody při teplotě 23±2 °C pokles charakteristické pevnosti v tahu max. 20 %	výrobce nedeklaruje	Vyhovuje

Poznámka: Vlastnosti pod č. 1 a 2 se stanoví výpočtem za použití jmenovitého průřezu výztuže

Charakteristická hodnota pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu byla stanovena podle ISO 12491 ze zkoušek jako 5 % kvantil na hladině významnosti 0,90, koeficient kvantilu charakteristické pevnosti 2,57 (pro počet vzorků n=10)



4. Posouzení systému řízení výroby

4.1. Požadavek technické specifikace, technického předpisu na systém řízení výroby:

Požadavky na systém řízení výroby u výrobce jsou uvedeny v příloze č. 3 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb.

4.2. Výsledek posouzení systému řízení výroby:

Konstatujeme, že systém řízení výroby u výrobce zaručuje, že výrobky uváděné na trh budou vyhovovat technické specifikaci tak, jak je obsažena ve stavebním technickém osvědčení č. 060-038505 ze dne 6. prosince 2013, vydaném Autorizovanou osobou 204 - TZÚS Praha s.p., pobočkou Brno.

Systém řízení výroby u výrobce odpovídá technické dokumentaci a zabezpečuje, aby výrobky uváděné na trh odpovídaly technické specifikaci.

5. Závěr

Bylo zjištěno, že vzorek výrobku odpovídá ve sledovaných vlastnostech požadavkům technické specifikace a technických předpisů (s odkazem na provedené zkoušky a posouzení). Systém řízení výroby odpovídá technické dokumentaci a je zajištěno jeho řádné fungování.

Výrobek splňuje požadavky § 5 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb.

Zjištění a závěry uvedené v tomto protokolu platí za předpokladu, že nedojde ke změně skutečností, za kterých bylo posouzení shody provedeno a pokud tato změna může ovlivnit vlastnosti výrobků (např. změna technických předpisů, technické specifikace, výrobní technologie, vstupních surovin a výrobního zařízení).

Technická dokumentace výrobku musí být v souladu s ustanovením § 5 odst. 4 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. doplňována zprávami o dohledu prováděnými jednou za dvanáct měsíců.

6. Přílohy

- 6.1. Protokol č. 060-038504 o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, jmenovitý průměr 14 mm, ze dne 28.11.2013, TZÚS Praha, s.p., pobočka Brno
- 6.2. Protokol č. 060-038581 o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, jmenovitý průměr 18 mm, ze dne 28.11.2013, TZÚS Praha, s.p., pobočka Brno
- 6.3. Protokol o zkoušce kompozitní výztuže PREFA Rebar, typ C, ze dne 7.11.2013, VUT v Brně, Fakulta stavební





Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p.
Technical and Test Institute for Construction Prague

Autorizovaná osoba • Oznámený subjekt • Akreditovaná zkušební laboratoř • Certifikační orgán • Inspekční orgán • Kvalifikační orgán
 Authorized Body • Notified Body • Accredited Test Laboratory • Certification Body • Inspection Body • Qualification Body

1. Předmět zkoušky Pobočka: Brno
 Zkušební laboratoř: Brno

Výtisk číslo: 1

Protokol o zkoušce

Protokol číslo: **060-038504** ze dne: 28.11.2013
 Zakázka číslo: **Z 060130240** ze dne: 31.10.2013

Výrobek:	Kompozitní výztuže PREFA Rebar
Typ:	typ C, jmenovitý průměr 14 mm
Žadatel / zákazník:	Prefa Kompozity, a.s.
Adresa:	Kulkova 10/4231, 615 00 Brno
Výrobce:	Prefa Kompozity, a.s.
Adresa:	Kulkova 10/4231, 615 00 Brno
Evidenční číslo vzorku.	965/13/1 – 20

Osoba odpovědná za obsah tohoto protokolu – vedoucí zkušební laboratoře:



Malíková
Ing. Jarmila Malíková

Tento protokol byl vyhotoven ve dvou stejnopisech. První originál náleží zákazníkovi, druhý je archivován spolu s další dokumentací v TZÚS.
 Tento protokol může být reprodukován jedině celý, jinak s písemným souhlasem vedoucího zkušební laboratoře.
 Výsledky zkoušek a měření uvedená v tomto protokolu se týkají jen zkoušených předmětů.

1/4

Technický a zkušební ústav stavební Praha, s. p. Technical and Test Institute for Construction Prague
 Pobočka Brno Branch Brno
 Hněvkovského 77 Hněvkovského 77
 617 00 Brno - Komárov 617 00 Brno - Komárov
 Česká republika Czech Republic

☎: 543420833 operator
 ☎: 543420840 vedoucí AZL
 Fax: +420543211591
 ✉ e-mail: malikova@tzus.cz



Protokol o zkoušce: 060-038504
Pobočka: Brno
Zkušební laboratoř: Brno

1. Předmět zkoušky

Předmětem zkoušek jsou kompozitní výztuže **PREFA Rebar typu C a jmenovitého průměru 14 mm**, které se používají pro vyztužení betonových konstrukcí.

Jedná se o vnitřní tyčovou výztuž pro betonové konstrukce na bázi kombinace skleněných a uhlíkových vláken, spojených pryskyřicí. Výztuž se používá obdobně jako běžná ocelová výztuž, nelze ji ale ohýbat a svařovat. Používá se zejména v konstrukcích vystavených chemicky agresivnímu prostředí, tj. v chemickém průmyslu, energetice, v konstrukcích trvale vystavených kontaktu se zemínou, posypovými solemi, v kanalizaci a sanitární městské infrastruktuře.

Kompozitní výztuže Prefa REBAR jsou standardně vyráběny z vinylesterové pryskyřice, alkalirezistentní skleněné vláknové výztuže a uhlíkových vláken. Výztuž lze volit v rozsahu průměru 5 až 22 mm. Jmenovitý průměr tyče je deklarován o 2 mm menší než je průměr tyče včetně adhezni vrstvy. Soudržnost s betonem je zajištěna adhezni vrstvou křemičitého pisku na povrchu výztuže.

2. Odběr vzorku

Datum dodání do ZL: 13.11.2013
Převzal: Tomáš Kalivoda
Způsob uskladnění: malá hala AZL

3. Použité zkušební postupy

Zkoušky byly provedeny podle následujících zkušebních předpisů a postupů:

Pevnost v tahu	Metodika podle: ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
Modul pružnosti v tahu	Metodika podle: ČSN ISO 6784 Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
Jmenovitá hmotnost na metr	Metodika podle: ČSN EN ISO 15630-1 Ocel pro výztuž a předpínání do betonu – Zkušební metody – Část 1: Tyče, válcovaný drát a drát pro výztuž do betonu, dle popisu postupu v odstavci 5.1
Geometrické parametry	Metodika podle: ČSN EN ISO 15630-1 Ocel pro výztuž a předpínání do betonu – Zkušební metody – Část 1: Tyče, válcovaný drát a drát pro výztuž do betonu, dle popisu postupu v odstavci 5.2

4. Zkušební zařízení a jeho metrologická návaznost

Ke zkouškám byla použita tato měřidla a zkušební zařízení:

- Lis / trhačka TIRAtest 2300 o maximálním rozsahu 100 kN
- Průtahoměr, TIRAtest 2300, 0 – 4 mm, 0,001 mm
- Lis / trhačka ZD 100 o maximálním rozsahu 500 kN
- Posuvné měřítko digitální o maximálním rozsahu 150 mm
- Posuvné měřítko digitální o maximálním rozsahu 600 mm

metrologické číslo 3.07.1253
metrologické číslo 4.01.1313
metrologické číslo 3.07.0113
metrologické číslo 4.01.1260
metrologické číslo 4.01.1261

Metrologická návaznost použitých měřidel a zkušebních zařízení je doložena v Metrologickém řádu ZL. Všechna použitá měřidla byla v době použití řádně ověřena a zkalibrována.





Protokol o zkoušce: 060-038504
Pobočka: Brno
Zkušební laboratoř: Brno

5. Údaje o průběhu zkoušení

Zkoušky byly provedeny v souladu s výše uvedenými zkušebními postupy.

5.1 Jmenovitá hmotnost na metr

Na náhodně vybraných zkušebních tělesech se změří délka a hmotnost s přesností nejméně $\pm 0,5\%$. Poté je skutečná hmotnost na metr zkušebního tělesa odvozena z jeho hmotnosti a jeho délky výpočtem.

5.2 Geometrické parametry

Na náhodně vybraných zkušebních tělesech se změří průměr na 3 zvolených místech, poté se zkušební těleso otočí o 90° a opět se změří průměr na 3 zvolených místech. Výsledkem měření je pak průměr včetně adhezni vrstvy, jež je aritmetickým průměrem 6 měření.

6. Výsledky zkoušek

6.1 Pevnost v tahu – jmenovitá plocha průřezu zkušebních těles $153,9 \text{ mm}^2$, jmenovitý průměr 14 mm

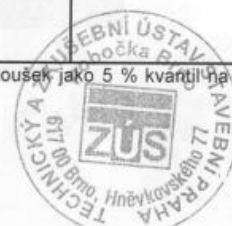
Evidenční číslo vzorku	Maximální dosažená síla [kN]	Pevnost v tahu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Charakteristická hodn. pevnosti v tahu [MPa]
965/13/1	155	1007	1076	84,7	858
965/13/2	175	1137			
965/13/3	178	1157			
965/13/4	150	975			
965/13/5	144	936			
965/13/6	158	1027			
965/13/7	164	1066			
965/13/8	180	1170			
965/13/9	175	1137			
965/13/10	176	1144			

Poznámka: Charakteristická hodnota pevnosti byla stanovena podle ISO 12491 ze zkoušek jako 5 % kvantil na hladině významnosti 0,90, koeficient kvantilu charakteristické pevnosti 2,57

6.2 Modul pružnosti v tahu - jmenovitá plocha průřezu zkušebních těles $153,9 \text{ mm}^2$, jmenovitý p. 14 mm

Evidenční číslo vzorku	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Charakteristická hodnota modulu pružnosti [GPa]
965/13/11	61,1	69,2	9,6	44,5
965/13/12	68,5			
965/13/13	60,2			
965/13/14	79,5			
965/13/15	68,6			
965/13/16	58,5			
965/13/17	74,5			
965/13/18	83,4			
965/13/19	57,9			
965/13/20	79,4			

Poznámka: Charakteristická hodnota modulu pružnosti byla stanovena podle ISO 12491 ze zkoušek jako 5 % kvantil na hladině významnosti 0,90, koeficient kvantilu charakteristické pevnosti 2,57



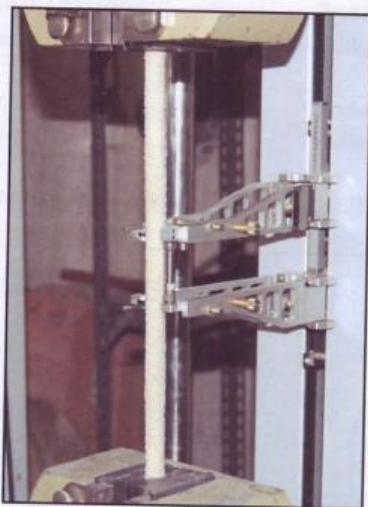
6.3 Jmenovitá hmotnost na metr zkušebního tělesa - jmenovitý průměr 14 mm

Evidenční číslo vzorku	Délka [mm]	Průměrná délka [mm]	Hmotnost [g]	Hmotnost na běžný metr [g/bm]
965/13/11	300,2 300,5	300,4	98,4	327,6
965/13/12	287,9 287,5	287,7	93,4	324,6
965/13/13	282,9 282,7	282,8	91,8	324,6
965/13/14	311,2 311,5	311,4	102,0	327,6
965/13/15	296,7 296,5	296,6	96,2	324,3
965/13/16	307,2 307,4	307,3	100,2	326,1

6.4 Geometrické parametry – jmenovitý průměr 14 mm

Evidenční číslo vzorku	Průměr včetně adhezni vrstvy [mm]	Průměrná hodnota průměru včetně adhezni vrstvy [mm]
965/13/11	15,73 15,50 16,32 15,92 16,18 16,57	16,0
965/13/12	14,90 15,52 15,70 16,11 16,49 15,87	15,8
965/13/13	14,73 14,87 14,99 16,87 15,79 16,35	15,6
965/13/14	14,91 14,85 15,55 16,97 16,28 16,73	15,9
965/13/15	14,87 15,53 15,96 16,24 16,55 16,99	16,0
965/13/16	15,54 15,72 15,21 16,43 16,78 16,29	15,9

7. Fotodokumentace



Uspořádání zkoušky modul pružnosti v tahu a zkoušky pevnosti v tahu



Ukázka porušení zkušebního tělesa po provedení zkoušky pevnosti v tahu

Zkoušky provedl dne : 13. – 22. 11. 2013

Tomáš Kalivoda

4/4



Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p.
Technical and Test Institute for Construction Prague

Autorizovaná osoba • Oznámený subjekt • Akreditovaná zkušební laboratoř • Certifikační orgán • Inspekční orgán • Kvalifikační orgán
 Authorized Body • Notified Body • Accredited Test Laboratory • Certification Body • Inspection Body • Qualification Body

Pobočka: Brno
 Zkušební laboratoř: Brno

Výtisk číslo: 1

Protokol o zkoušce

Protokol číslo:	060-038581	ze dne:	28.11.2013
Zakázka číslo:	Z 060130240	ze dne:	31.10.2013

Výrobek:	Kompozitní výztuže PREFA Rebar
Typ:	typ C, jmenovitý průměr 18 mm
Žadatel / zákazník:	Prefa Kompozity, a.s.
Adresa:	Kulkova 10/4231, 615 00 Brno
Výrobce:	Prefa Kompozity, a.s.
Adresa:	Kulkova 10/4231, 615 00 Brno
Evidenční číslo vzorku.	965/13/21 – 40

Osoba odpovědná za obsah tohoto protokolu – vedoucí zkušební laboratoře:



Jarmila Malíková
Ing. Jarmila Malíková

Tento protokol byl vyhotoven ve dvou stejnopisech. První originál náleží zákazníkovi, druhý je archivován spolu s další dokumentací v TZÚS.
 Tento protokol může být reprodukován jedině celý, jinak s písemným souhlasem vedoucího zkušební laboratoře.
 Výsledky zkoušek a měření uvedená v tomto protokolu se týkají jen zkoušených předmětů.

1/5

Technický a zkušební ústav stavební Praha, s. p.	Technical and Test Institute for Construction Prague
Pobočka Brno	Branch Brno
Hněvkovského 77	Hněvkovského 77
617 00 Brno - Komárov	617 00 Brno - Komárov
Česká republika	Czech Republic

☎: 543420833 operator
 ☎: 543420840 vedoucí AZL
 Fax: +420543211591
 ✉ e-mail: malikova@tzus.cz



Protokol o zkoušce: 060-038581
Pobočka: Brno
Zkušební laboratoř: Brno

1. Předmět zkoušky

Předmětem zkoušek jsou kompozitní výztuže **PREFA Rebar typu C a jmenovitého průměru 18 mm**, které se používají pro vyztužení betonových konstrukcí.

Jedná se o vnitřní tyčovou výztuž pro betonové konstrukce na bázi kombinace skleněných a uhlíkových vláken, pojených pryskyřicí. Výztuž se používá obdobně jako běžná ocelová výztuž, nelze ji ale ohýbat a svařovat. Používá se zejména v konstrukcích vystavených chemicky agresivnímu prostředí, tj. v chemickém průmyslu, energetice, v konstrukcích trvale vystavených kontaktu se zemínou, posypovými solemi, v kanalizaci a sanitární městské infrastruktuře.

Kompozitní výztuže Prefa REBAR jsou standardně vyráběny z vinylesterové pryskyřice, alkalirezistentní skleněné vláknové výztuže a uhlíkových vláken. Výztuž lze volit v rozsahu průměru 5 až 22 mm. Jmenovitý průměr tyče je deklarován o 2 mm menší než je průměr tyče včetně adhezni vrstvy. Soudržnost s betonem je zajištěna adhezni vrstvou křemičitého písku na povrchu výztuže.

2. Odběr vzorku

Datum dodání do ZL: 13.11.2013
Převzal: Tomáš Kalivoda
Způsob uskladnění: malá hala AZL

3. Použité zkušební postupy

Zkoušky byly provedeny podle následujících zkušebních předpisů a postupů:

Pevnost v tahu	Metodika podle: ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
Modul pružnosti v tahu	Metodika podle: ČSN ISO 6784 Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
Jmenovitá hmotnost na metr	Metodika podle: ČSN EN ISO 15630-1 Ocel pro výztuž a předpinání do betonu – Zkušební metody – Část 1: Tyče, válcovaný drát a drát pro výztuž do betonu, dle popisu postupu v odstavci 5.1
Geometrické parametry	Metodika podle: ČSN EN ISO 15630-1 Ocel pro výztuž a předpinání do betonu – Zkušební metody – Část 1: Tyče, válcovaný drát a drát pro výztuž do betonu, dle popisu postupu v odstavci 5.2

4. Zkušební zařízení a jeho metrologická návaznost

Ke zkouškám byla použita tato měřidla a zkušební zařízení:

- Lis / trhačka TIRAtest 2300 o maximálním rozsahu 100 kN
- Průtahoměr, TIRAtest 2300, 0 – 4 mm, 0,001 mm
- Lis / trhačka ZD 100 o maximálním rozsahu 500 kN
- Posuvné měřítko digitální o maximálním rozsahu 150 mm
- Posuvné měřítko digitální o maximálním rozsahu 600 mm

metrologické číslo 3.07.1253
metrologické číslo 4.01.1313
metrologické číslo 3.07.0113
metrologické číslo 4.01.1260
metrologické číslo 4.01.1261

Metrologická návaznost použitých měřidel a zkušebních zařízení je doložena v Metrologickém řádu ZL. Všechna použitá měřidla byla v době použití řádně ověřena a zkalibrována.





Protokol o zkoušce: 060-038581
Pobočka: Brno
Zkušební laboratoř: Brno

5. Údaje o průběhu zkoušení

Zkoušky byly provedeny v souladu s výše uvedenými zkušebními postupy.

5.1 Jmenovitá hmotnost na metr

Na náhodně vybraných zkušebních tělesech se změří délka a hmotnost s přesností nejméně $\pm 0,5\%$. Poté je skutečná hmotnost na metr zkušebního tělesa odvozena z jeho hmotnosti a jeho délky výpočtem.

5.2 Geometrické parametry

Na náhodně vybraných zkušebních tělesech se změří průměr na 3 zvolených místech, poté se zkušební těleso otočí o 90° a opět se změří průměr na 3 zvolených místech. Výsledkem měření je pak průměr včetně adhezni vrstvy, jež je aritmetickým průměrem 6 měření.

6. Výsledky zkoušek

6.1 Pevnost v tahu – jmenovitá plocha průřezu zkušebních těles $254,5 \text{ mm}^2$, jmenovitý průměr 18 mm

Evidenční číslo vzorku	Maximální dosažená síla [kN]	Pevnost v tahu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Charakteristická hodn. pevnosti v tahu [MPa]
965/13/21	272	1069	1052	49,0	926
965/13/22	280	1100			
965/13/23	269	1057			
965/13/24	266	1045			
965/13/25	275	1081			
965/13/26	282	1108			
965/13/27	245	963			
965/13/28	263	1033			
965/13/29	271	1065			
965/13/30	255	1002			

Poznámka: Charakteristická hodnota pevnosti byla stanovena podle ISO 12491 ze zkoušek jako 5 % kvantil na hladině významnosti 0,90, koeficient kvantilu charakteristické pevnosti 2,57

6.2 Modul pružnosti v tahu - jmenovitá plocha průřezu zkušebních těles $254,5 \text{ mm}^2$, jmenovitý p. 18 mm

Evidenční číslo vzorku	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Charakteristická hodnota modulu pružnosti [GPa]
965/13/31	63,0	67,4	8,5	45,5
965/13/32	61,3			
965/13/33	65,5			
965/13/34	75,7			
965/13/35	65,0			
965/13/36	73,5			
965/13/37	85,7			
965/13/38	65,8			
965/13/39	61,3			
965/13/40	57,2			

Poznámka: Charakteristická hodnota modulu pružnosti byla stanovena podle ISO 12491 ze zkoušek jako 5 % kvantil na hladině významnosti 0,90, koeficient kvantilu charakteristické pevnosti 2,57





Protokol o zkoušce:

060-038581

Pobočka:

Brno

Zkušební laboratoř:

Brno

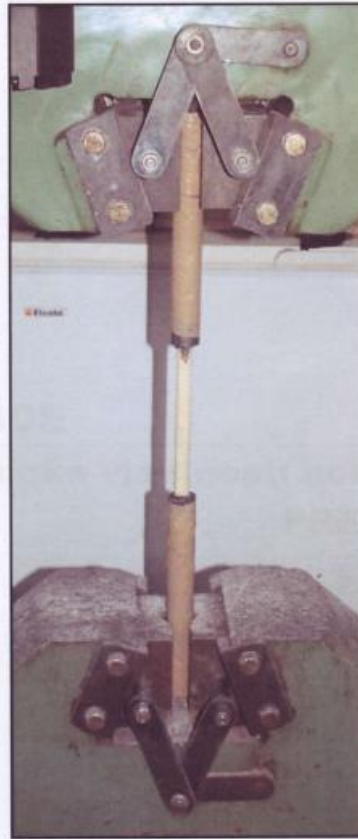
6.3 Jmenovitá hmotnost na metr zkušební tělesa - jmenovitý průměr 18 mm

Evidenční číslo vzorku	Délka [mm]	Průměrná délka [mm]	Hmotnost [g]	Hmotnost na běžný metr [g/bm]
965/13/31	500,1 500,3	500,2	263,9	527,6
965/13/32	500,2 500,3	500,3	263,0	525,7
965/13/33	500,0 500,1	500,1	262,3	524,5
965/13/34	500,1 500,2	500,2	263,0	525,8
965/13/35	499,6 499,8	499,7	260,9	522,1
965/13/36	500,0 500,1	500,1	266,2	532,3
965/13/37	500,2 500,1	500,2	262,0	523,8
965/13/38	497,9 498,1	498,0	263,4	528,9

6.4 Geometrické parametry - jmenovitý průměr 18 mm

Evidenční číslo vzorku	Průměr včetně adhezni vrstvy [mm]	Průměrná hodnota průměru včetně adhezni vrstvy [mm]
965/13/31	18,81 19,19 19,01 20,62 20,50 19,66	19,6
965/13/32	18,65 18,69 18,98 20,02 20,72 20,05	19,5
965/13/33	18,66 18,93 18,51 20,19 20,50 20,08	19,5
965/13/34	18,62 19,07 18,83 19,65 20,72 19,87	19,5
965/13/35	18,21 18,69 18,57 20,35 20,63 20,44	19,5
965/13/36	18,81 18,55 18,89 20,94 21,06 20,82	19,9
965/13/37	18,84 19,32 19,59 19,92 20,52 20,08	19,7
965/13/38	18,31 18,88 18,20 21,28 21,34 21,50	19,9

7. Fotodokumentace



Uspořádání zkoušky modul pružnosti v tahu a zkoušky pevnosti v tahu



Ukázka porušení zkušebního tělesa po provedení zkoušky pevnosti v tahu

Zkoušky provedl dne : 13. – 22. 11. 2013

Tomáš Kalivoda

Kalivoda T.

Objednatel: **PREFA KOMPOZITY, a.s.**
Kulkova 10/4231, 615 00 Brno

PROTOKOL O ZKOUŠCE

Mechanické vlastnosti kompozitní výztuže PREFA REBAR typ C

Vypracoval: prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Ing. David Horák, Ph.D.
Ing. Petr Daněk, Ph.D.

Datum: 07. 11. 2013

Počet stran: 8



1. ÚVOD

Objednatel dodal ke zjištění mechanických vlastností výztuže do betonu vzorky kompozitní výztuže o průměru 14 mm vyrobené na bázi skleněných vláken kombinovaných s jádrem z uhlíkových vláken, vzájemně spojených epoxidovou pryskyřicí (dále jen GFRP).

Požadavkem objednatele bylo zjištění fyzikálně mechanických vlastností dané výztuže, konkrétně pevnost v tahu, Youngův modul pružnosti a soudržnost výztuže s betonem.

V rámci zkoušení byly provedeny následující laboratorní zkoušky:

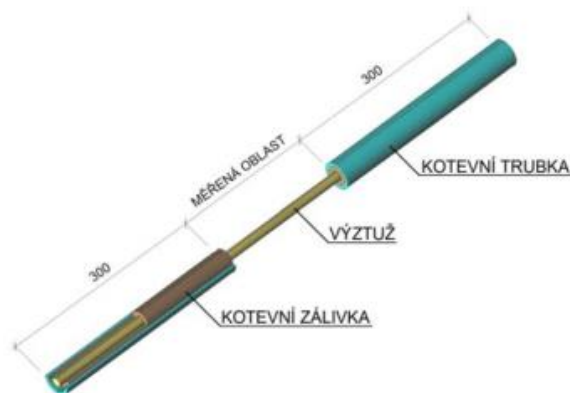
- zkouška soudržnosti s betonem (celkem 4 vzorky),
- tahová zkouška pevnosti výztuže (celkem 6 vzorků).

2. METODIKA ZKOUŠENÍ

2.1. TAHOVÁ ZKOUŠKA

Tahová zkouška výztuže včetně jejího vyhodnocení byla provedena (s ohledem na neexistenci platné ČSN normy pro kompozitní výztuže) dle normy ACI 440.3R-04.

Zkušební vzorek výztuže byl opatřen koncovkami tvořenými ocelovou tlustostěnnou trubkou s vyvrtanými otvory. Uchycení do ocelových koncovek bylo provedeno zalitím epoxidovou zálivkou. Ocelové koncovky umožnily uchycení do hydraulických čelistí zkušebního lisu bez rizika rozdrčení GFRP výztuže.



Obr. 1 Schéma vzorku

Střední část vzorku byla následně osazena indukčnostními snímači dráhy, pomocí kterých bylo měřeno přetvoření (protažení) střední části zkušebního vzorku. Základna pro měření přetvoření výztuže se pohybovala kolem 100 mm. Současně byl prováděn odečet působící tahové síly. Frekvence odečítání měřených hodnot byla 5 Hz.



Obr. 2 Zkušební vzorek osazený snímači

Zatížení bylo do výztuže vnášeno rovnoměrně až do úplného porušení vzorků. Rychlost zatěžování byla cca 20 kN/min, délka jedné zkoušky se pohybovala mezi 2 až 3 minutami.

Vyhodnocení základních fyzikálních vlastností výztuže bylo provedeno s užitím následujících vztahů pro pevnost výztuže:

$$f_{fu} = \frac{F_u}{A}, \quad (2.1)$$

kde f_{fu} ... mezní napětí v tahu [MPa],
 F_u ... tahová síla při přetržení výztuže [N],
 A ... plocha průřezu výztuže [mm²].

Pro výpočet modulu pružnosti byl použit vztah:

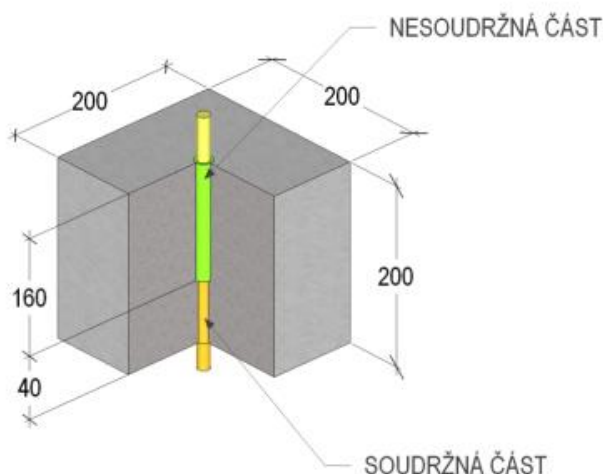
$$E_f = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A}, \quad (2.2)$$

kde E_f ... modul pružnosti v tahu [MPa],
 F_1 a ε_1 ... tahová síla [N] při cca 50% maximálního zatížení výztuže a odpovídající poměrné přetvoření výztuže,
 F_2 a ε_2 ... tahová síla [N] při cca 20% maximálního zatížení výztuže a odpovídající poměrné přetvoření výztuže,
 A ... plocha průřezu výztuže [mm²].

2.2. SOUDRŽNOST VÝZTUŽE S BETONEM

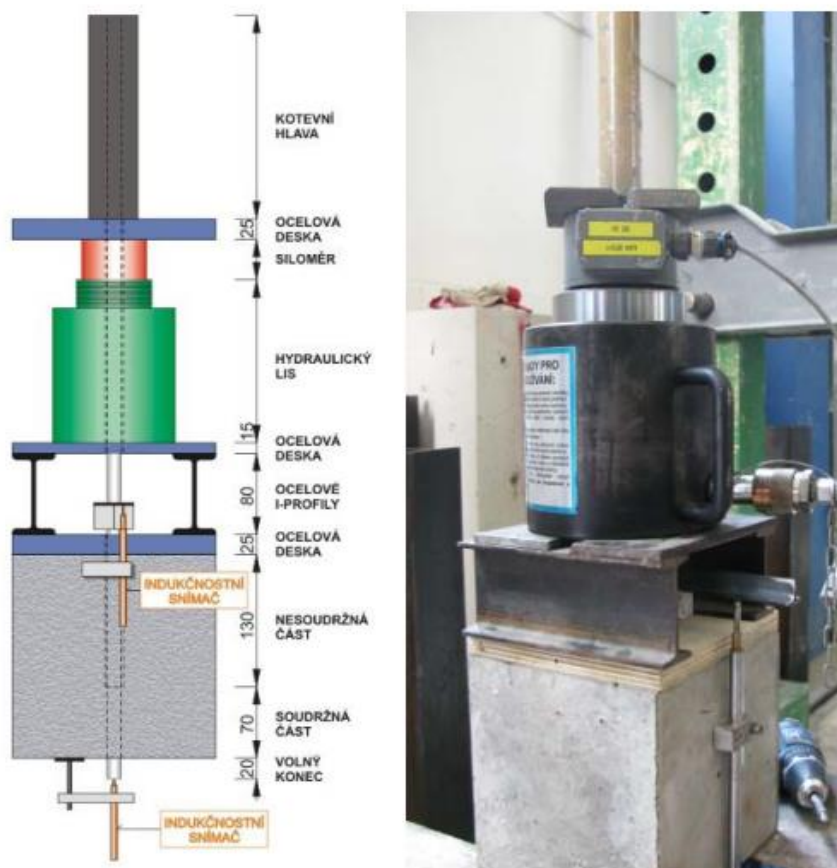
Tahová zkouška výztuže včetně jejího vyhodnocení byla provedena (s ohledem na neexistenci platné ČSN normy pro kompozitní výztuže) dle normy ACI 440.3R-04.

Zkušební vzorek výztuže byl zabetonován do betonové krychle o rozměrech 200×200×200 mm bez jakékoliv výztuže. Zkoušená výztuž byla zabetonována tak, aby délka soudržné části odpovídala pětinasobku průměru výztuže, tj. $5 \times 8 = 40$ mm. Konec výztuže namáhaný tahovou silou byl opatřen ocelovou koncovkou stejnou jako v případě tahové zkoušky.



Obr. 3 Tvar zkušebního vzorku

Síla do výztuže byla vnášena hydraulickým dutým válcem plynule až do porušení zkušebního vzorku. Rychlost zatěžování byla upravována tak, aby k porušení vzorku došlo během 2-3 minut. Síla byla do výztuže vnášena přes ocelovou koncovku, která byla použita při tahových zkouškách výztuže. Během experimentu byla na zkušebních tělesech měřena působící tahová síla ve výztuži (přímé měření siloměrem), posunutí horní části výztuže těsně nad povrchem betonového tělesa a posunutí spodního volného konce za soudržnou částí. Pro vyhodnocení pak byly použity tyto naměřené posuny výztuže opravené o vliv protažení volné části prutu (na Obr. 3 zeleně vyznačená nesoudržná část). Posuny byly měřeny indukčnostními snímači dráhy frekvencí 10 Hz.



Obr. 4 Zkušební sestava

Průměrné napětí v soudržnosti bylo vypočítáno ze vztahu

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l_e} , \quad (2.3)$$

kde τ ... smykové napětí v soudržnosti [MPa],
 F ... tahová síla [N],
 C_b ... obvod výztuže [mm],
 l_e ... kotevní délka [mm].

Napětí v soudržnosti bylo počítáno vždy pro čtyři hodnoty v průběhu zkoušky, a to pro posun nezatiženého konce výztuže 0,05 mm, 0,10 mm, 0,25 mm a pro maximální působící sílu.

3. PODKLADY A NORMY

Normy:

- ACI 440.3R-04 *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*
- ČSN 73 1328 *Stanovení soudržnosti oceli s betonem*
- ČSN EN 1990 *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*
- ČSN ISO 13822 *Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí*

4. VYHODNOCENÍ

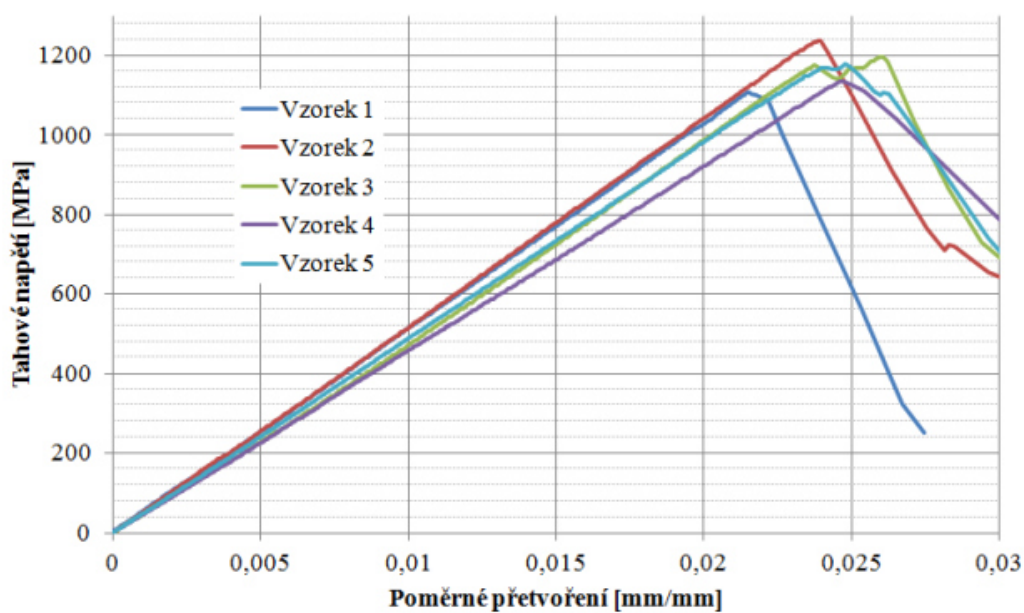
4.1. PEVNOST VÝZTUŽE A MODUL PRUŽNOSTI

Všechny vzorky se porušily přetržením ve střední sledované oblasti.

Tabulka 1 Fyzikálně mechanické vlastnosti zkoušené výztuže

	Změřená hodnota	Průměrná hodnota	Sm. odchylka	Charakteristická hodnota ^{*)}
Pevnost v tahu f_{tu} [MPa]	1106,48	1170,39	46,11	1094,6
	1237,44			
	1196,71			
	1134,19			
	1177,13			
Modul pružnosti E_f [GPa]	51,72	49,80	2,11	46,3
	52,29			
	49,24			
	46,37			
	49,36			

^{*)} Charakteristická hodnota dle postupů odpovídajících EC je určena pro 5% kvantil normálního rozložení měřené veličiny.



Obr. 5 Deformační diagram zkoušené výztuže naměřený v průběhu zkoušky



Obr. 6 Porušení vzorku při tahové zkoušce

4.2. SOUDRŽNOST VÝZTUŽE S BETONEM

Soudržnost kompozitní výztuže s betonem není závislá na pevnosti betonu. Přesto byly provedeny zkoušky pevnosti betonu v tlaku zkušebních krychlí.

Tabulka 2 Hodnoty napětí v soudržnosti změřené během zkoušky

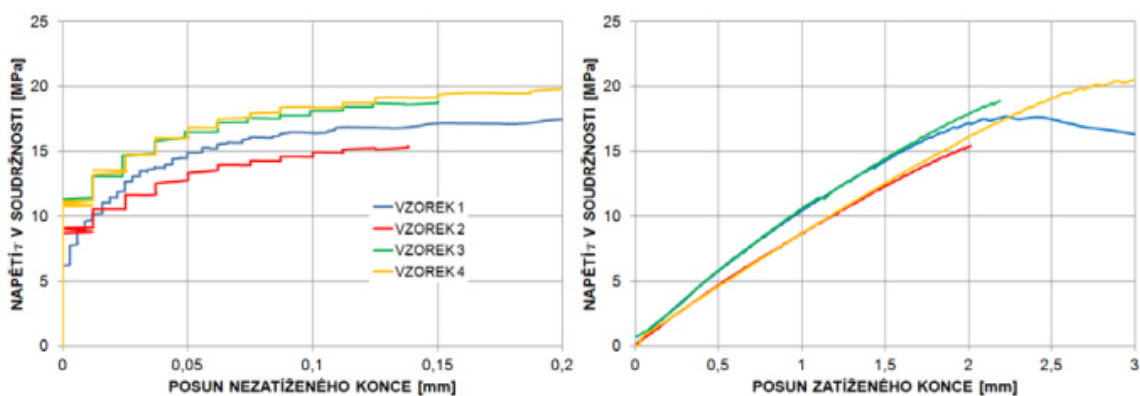
Číslo vzorku	Změřená hodnota [MPa]	Průměrná hodnota [MPa]	Sm. odchylka
1	56,144	54,33	1,753
2	54,820		
3	54,700		
4	53,044		
5	51,167		
6	56,092		

U dvou zkoušených vzorků došlo k vytržení z ocelové koncovky nalepené na výztuži (tzn. nebyla změřena maximální únosnosti soudržnosti výztuže s betonem), u ostatních vzorků došlo k porušení vytržením výztuže z betonu. Celkové vyhodnocení soudržnosti GFRP výztuže s betonem je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 3 Hodnoty napětí v soudržnosti změřené během zkoušky

Číslo vzorku	Napětí v soudržnosti pro daný posun volného konce výztuže [MPa]			Max. napětí v soudržnosti τ_{max} [MPa]	Max. posun s_{max} [mm]
	0,05 mm	0,10 mm	0,25 mm		
5	17,650	18,730	*)	*)	*)
6	14,220	16,620	*)	*)	*)
1	14,470	16,420	17,338	17,652	0,306
2	12,745	14,538	14,922	15,411	0,138
3	16,486	18,099	18,513	18,884	0,306
4	16,016	18,413	20,093	20,631	0,662
Průměr	15,265	17,137	17,717	18,144	0,353
Sm. odchylka	1,624	1,451	1,886	1,900	0,191

*) Hodnoty nebyly změřeny, došlo k selhání uchycení vzorku výztuže ke zkušebnímu zařízení.



Obr. 7 Celkový průběh zkoušky



Obr. 8 Detail soudržné části výztuže po vytržení z betonu

10.4.3 Zkoušky smykové pevnosti stojiny nosníku

VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

IOSIPESCU TEST (V-notched beam)

Tensile Machine: Instron 55R1185 100 kN (UK141), calibration report: ML-283/16, 284/16; valid from 11/2016 to 11/2018

Material: GFRP, Set: IOS, Test method: ASTM D5379M

Crosshead speed: 2.0 mm/min, Test date: 25.1.2018

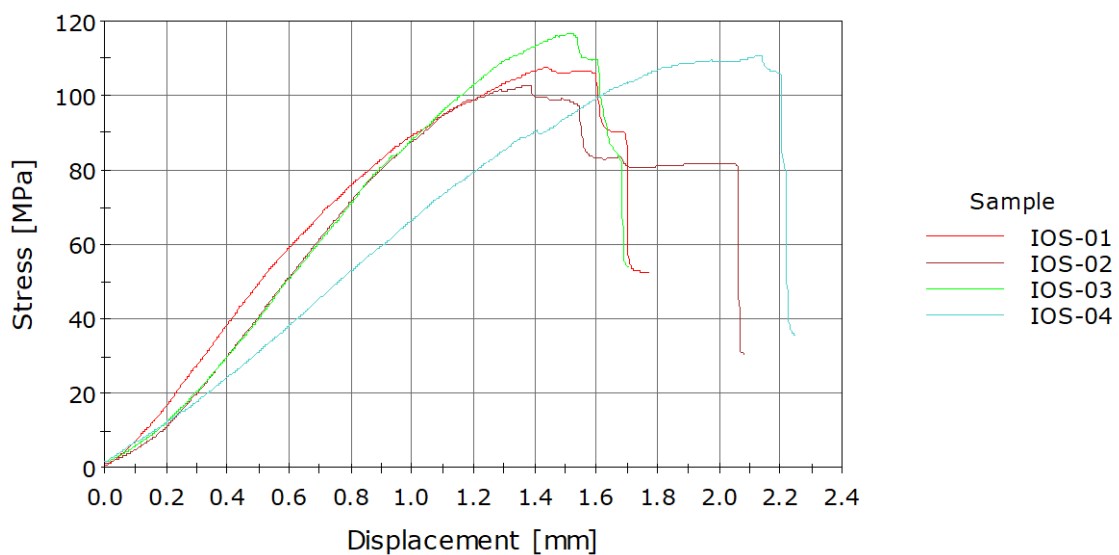
Operator name: R. Hron, Temperature: 23.2 °C, Humidity: 26.2 %R.H.

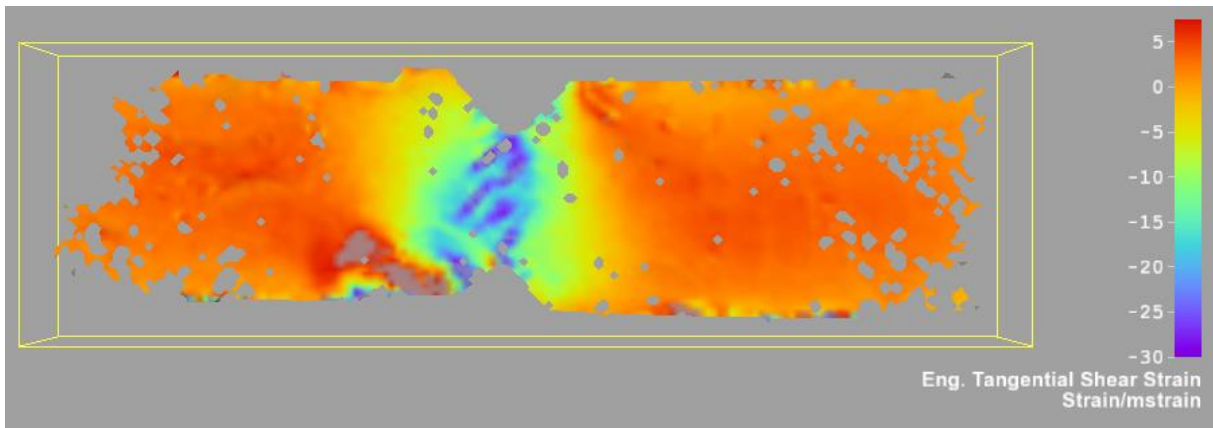
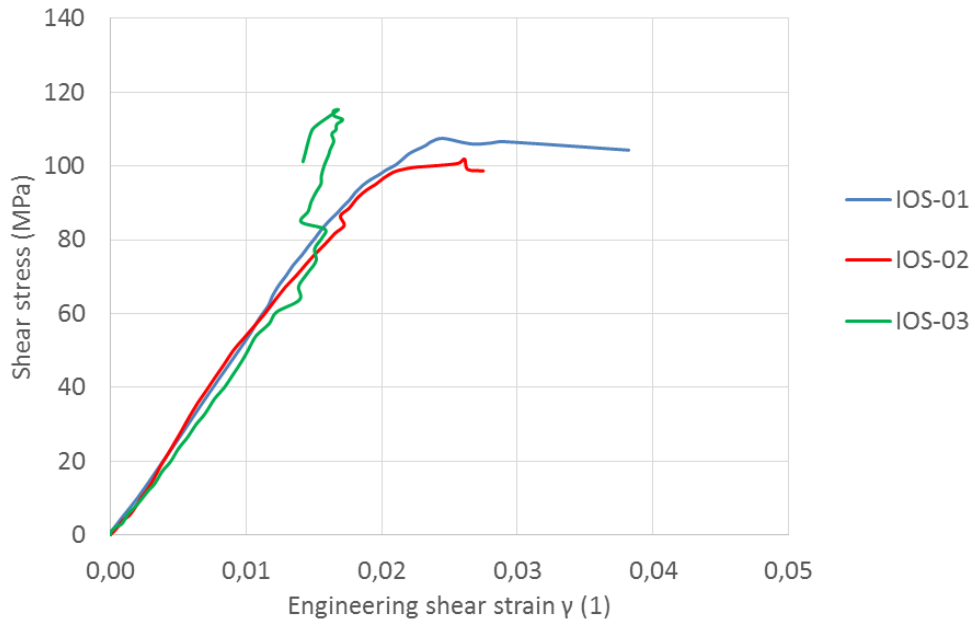
	Sample	Failure	Width [mm]	Thickness [mm]	Max. Load [kN]	Shear Strength [MPa]	Shear modulus [GPa]
1	IOS-01	M(hv)GN	11.33	9.26	11.30	107.69	5.359
2	IOS-02	M(hv)GN	11.32	9.30	10.83	102.87	6.185
3	IOS-03	M(hv)GN	8.30	9.05	8.78	116.85	4.922
4	IOS-04	M(hv)GN	9.58	9.07	9.62	110.72	*
Mean			10.13	9.17	10.13	109.53	5.49
S.D.			1.47	0.13	1.15	5.85	0.64
C.V.			14.54	1.40	11.32	5.34	11.7
Min.			8.30	9.05	8.78	102.87	4.922
Max.			11.33	9.30	11.30	116.85	6.185

note: shear modulus measured using DIC system Dantec Q-400

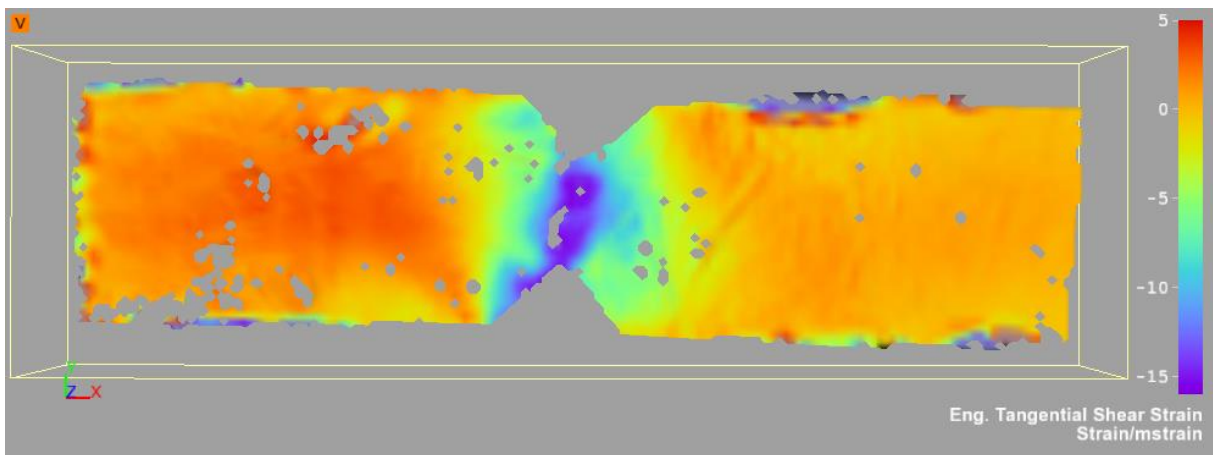
* sample IOS-4 had asymmetric notches that caused significant shear modulus deviation

CFRP Iosipescu





Sample IOS-01 shear strain field for 105 MPa.



Sample IOS-04 shear strain field for 112 MPa.

10.4.4 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 0°

VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

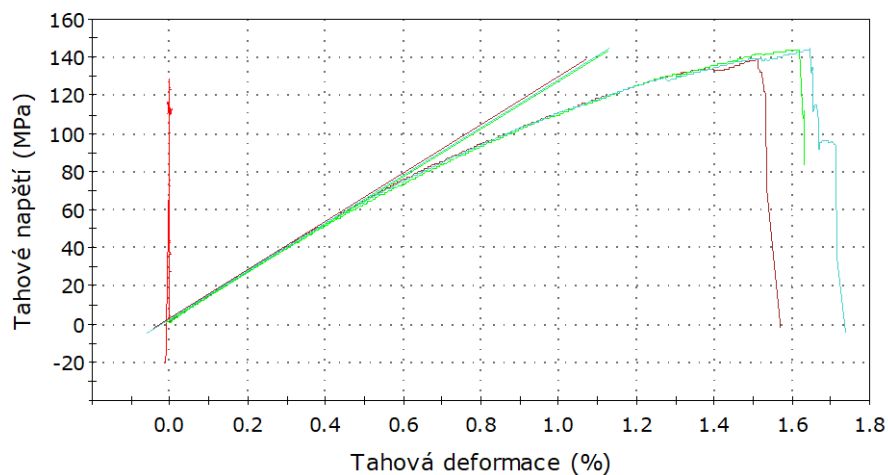
Tensile test

Zkušební stroj: Schenck 250 (+/- 250kN)
 Extenzometr: Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25mm)
 Materiál: GFRP
 Dávka: Tension 0
 Zkoušeno dle: ASTM D3039M
 Rychlost zatěžování: 2,0 mm/min
 Zkoušeno dne: 25.1.2018
 Zkoušel: M.Kakos

	Vzorek	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	E Modul (GPa)	Poissonovo číslo (1)	Max. F (kN)	Pevnost (MPa)
1	TS-0-1	25,240	8,770	12,695	0,39482	30,786	139,080
2	TS-0-2	25,140	8,740	12,539	0,41907	31,608	143,854
3	TS-0-3	25,280	8,800	12,465	0,34936	32,093	144,263
4	TS-0-4	25,310	9,030	-----	-----	29,276	128,097
Mean		25,242	8,835	12,566	0,38775	30,941	138,824
S.D.		0,074	0,132	0,118	0,035	1,234	7,528
C.V.		0,294	1,497	0,937	9,127	3,988	5,423
Min.		25,140	8,740	12,465	0,34936	29,276	128,097
Max.		25,310	9,030	12,695	0,41907	32,093	144,263

*extensometr was removed after 0.3% strain.

Tension 0 TS



10.4.5 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 45°

VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

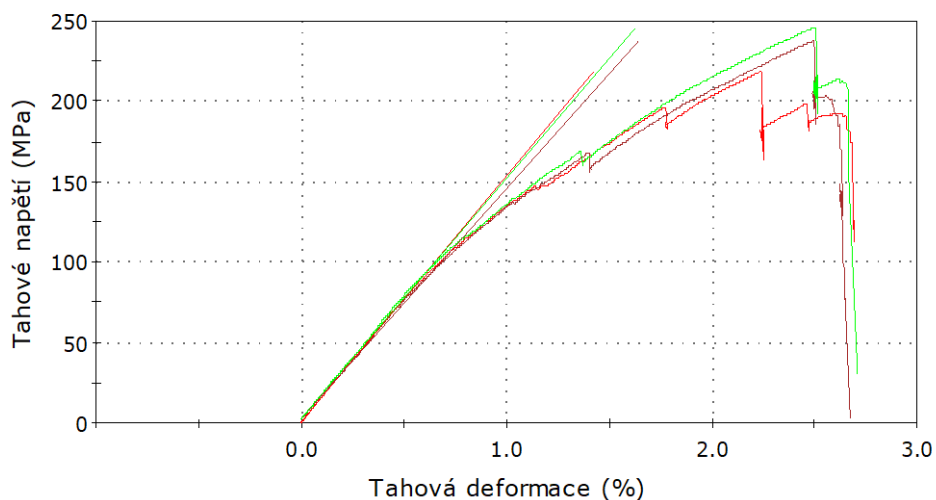
Tensile test

Zkušební stroj: Schenck 250 (+/- 250kN)
Extenzometr: Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25mm)
Materiál: GFRP
Dávka: Tension 45
Zkoušeno dle: ASTM D3039M
Rychlost zatěžování: 2,0 mm/min
Zkoušeno dne: 25.1.2018
Zkoušel: M.Kakos

	Vzorek	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	E Modul (GPa)	Poissonovo číslo ()	Max. F (kN)	Pevnost (MPa)
1	TS-45-1	25,240	8,520	15,277	0,31080	46,949	218,323
2	TS-45-2	25,300	8,700	14,281	0,25997	52,274	237,490
3	TS-45-3	25,040	8,430	14,943	0,32503	51,916	245,946
Mean		25,193	8,550	14,834	0,29860	50,380	233,920
S.D.		0,136	0,137	0,507	0,034	2,976	14,153
C.V.		0,540	1,608	3,416	11,454	5,908	6,050
Min.		25,040	8,430	14,281	0,25997	46,949	218,323
Max.		25,300	8,700	15,277	0,32503	52,274	245,946

*extensometr was removed after 0.3% strain.

Tension 45 TS



10.4.6 Tahová zkouška pevnosti stojiny nosníku ve směru 90°

VZLU - Czech Aerospace Research Centre Laboratories - Strength of Structures Division MTN Group

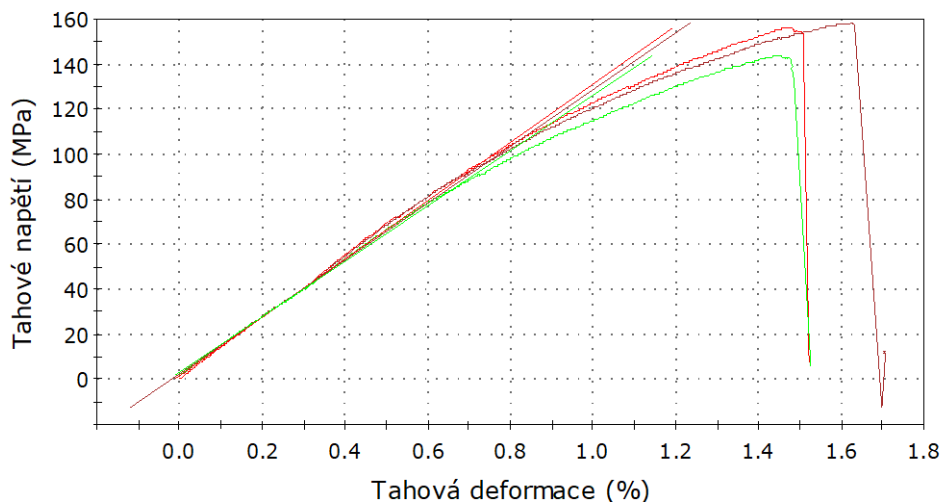
Tensile test

Zkušební stroj: Schenck 250 (+/- 250kN)
Extenzometr: Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25 mm)
Materiál: GFRP
Dávka: Tension 90
Zkoušeno dle: ASTM D3039M
Rychlost zatěžování: 2,0 mm/min
Zkoušeno dne: 25.1.2018
Zkoušel: M.Kakos

	Vzorek	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	E Modul (GPa)	Poissonovo číslo (1)	Max. F (kN)	Pevnost (MPa)
1	TS-90-1	25,970	8,000	12,965	0,30050	32,431	156,098
2	TS-90-2	26,740	7,720	12,570	0,28507	32,634	158,084
3	TS-90-3	26,730	8,020	12,289	0,43092	30,824	143,787
Mean		26,480	7,913	12,608	0,33883	31,963	152,656
S.D.		0,442	0,168	0,340	0,080	0,991	7,745
C.V.		1,668	2,120	2,694	23,649	3,102	5,074
Min.		25,970	7,720	12,289	0,28507	30,824	143,787
Max.		26,740	8,020	12,965	0,43092	32,634	158,084

*extensometr was removed after 0.3% strain.

Tension 90 TS



10.4.7 Tahová zkouška pevnosti pásnice nosníku ve směru 0°

**VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group**

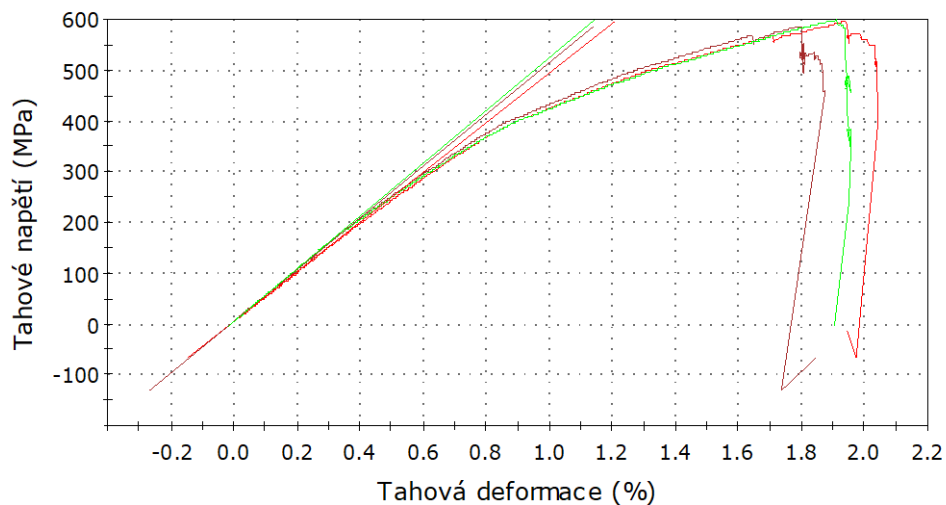
Tensile test

Zkušební stroj: Schenck 250 (+/- 250kN)
 Extenzometr: Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25mm)
 Materiál: CFRP
 Dávka: Tension 0
 Zkoušeno dle: ASTM D3039M
 Rychlost zatěžování: 2,0 mm/min
 Zkoušeno dne: 25.1.2018
 Zkoušel: M.Kakos

	Vzorek	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	E Modul (GPa)	Poissonovo číslo (1)	Max. F (kN)	Pevnost (MPa)
1	TP-0-1	25,090	4,390	49,041	0,36981	65,623	595,790
2	TP-0-2	25,050	4,430	51,164	0,33395	65,038	586,076
3	TP-0-3	24,970	4,410	51,867	0,27232	65,909	598,529
Mean		25,037	4,410	50,690	0,32536	65,523	593,465
S.D.		0,061	0,020	1,471	0,049	0,444	6,544
C.V.		0,244	0,454	2,903	15,155	0,678	1,103
Min.		24,970	4,390	49,041	0,27232	65,038	586,076
Max.		25,090	4,430	51,867	0,36981	65,909	598,529

*extensometr was removed after 0.3% strain.

Tensile 0 CFRP



10.4.8 Tahová zkouška pevnosti pásnice nosníku ve směru 90°

VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

Tensile test

Zkušební stroj: Schenck 250 (+/- 250kN)
Extenzometr: Instron I3560-BIA-025M-010-ST (25mm)
Materiál: CFRP
Dávka: Tension 90
Zkoušeno dle: ASTM D3039M
Rychlost zatěžování: 2,0 mm/min
Zkoušeno dne: 25.1.2018
Zkoušel: M.Kakos

	Vzorek	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	E Modul (GPa)	Poissonovo číslo (1)	Max. F (kN)	Pevnost (MPa)
1	TP-90-1	20,270	4,460	7,358	0,05962	6,672	73,806
2	TP-90-2	20,140	4,480	7,361	0,06997	6,602	73,172
3	TP-90-3	20,090	4,260	7,360	0,05434	7,371	86,124
Mean		20,167	4,400	7,359	0,06131	6,882	77,701
S.D.		0,093	0,122	0,002	0,008	0,425	7,302
C.V.		0,461	2,765	0,023	12,969	6,175	9,397
Min.		20,090	4,260	7,358	0,05434	6,602	73,172
Max.		20,270	4,480	7,361	0,06997	7,371	86,124

*extensometr was removed after 0.3% strain.

Tensile 90 CFRP

