



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**SPECIFIKA VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH VÝZTUŽÍ
V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH**

SPECIFICS OF UTILIZATION OF COMPOSITE REINFORCEMENTS IN CONCRETE
STRUCTURES

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. František Girgler, Ph.D.

BRNO 2021

Abstrakt

Práce je zaměřena do oblasti využití vnitřních FRP (*fibre reinforced polymer*) výztuží v betonových konstrukcích. V posledních dekádě dynamicky se zvyšující množství aplikací těchto materiálů v praxi s sebou přináší i potřebu standardizovat zkušební postupy, spolehlivě stanovit krátkodobé i dlouhodobé materiálové charakteristiky a sestavit výstižné návrhové algoritmy. Z tohoto důvodu je v textu pojednána problematika dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuží a vlivu interakce tahové a posouvající síly na únosnost. Tyto přímo ovlivňují spolehlivost návrhu konstrukce a limitují využití tohoto moderního materiálu ve stavební praxi. Prezentovány jsou též poznatky z vývoje unikátního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, který je navržen plně z kompozitních materiálů.

Abstract

The thesis deals with the use of internal FRP (*fibre reinforced polymer*) reinforcement in concrete structures. In recent decades, the dynamically increasing number of applications in practice yields to the necessity to standardize test procedures, reliably determine short-term and, especially, long-term material characteristics and derive accurate design algorithms. For this reason, the text deals with the issue of the long-term reliability of FRP reinforcements and the influence of the interaction of tensile and shear force on ultimate loading capacity. These directly affect the reliability of the design of the structure and restrain the use of this modern material in construction practice. The development of a unique load-bearing thermal insulation element for thermal bridge interruption, which is designed entirely from composite materials, is also presented.

Klíčová slova

FRP výztuž, degradace, dotvarování, experimentální analýza, kompozitní materiály, normálové napětí, pracovní diagram, prvek pro přerušení tepelného mostu, skleněná vlákna, smykové napětí, uhlíková vlákna, zatěžovací zkoušky, životnost konstrukce

Key words

FRP reinforcement, degradation, creep, experimental analysis, composite materials, normal stress, stress-strain diagram, load bearing thermal insulation element, glass fibres, shear stress, carbon fibres, load tests, service life of a structure

Bibliografická citace

Girgler, F. *Specifika využití kompozitních výztuží v betonových konstrukcích*. Habilitační práce, Brno, 2021, 163 s., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem kolegům z Ústavu betonových a zděných konstrukcí a Ústavu stavebního zkušebnictví, kteří se podíleli na přípravě a realizaci v práci uvedených či citovaných experimentů a výzkumných úkolů.

Jmenovitě děkuji prof. RNDr. Ing. Petrovi Štěpánkovi, CSc., dr. h. c., Ing. Vojtěchovi Kostihovi, Ph.D., Ing. Ondřeji Janušovi, doc. Ing. Petrovi Daňkovi, Ph.D. a doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. V neposlední řadě je mou povinností vyslovit též poděkování Ing. Janovi Prokešovi, Ph.D. z firmy PREFA KOMPOZITY, a.s.

Je mi také velkou ctí poděkovat vedení Ústavu betonových a zděných konstrukcí a firmám PREFA KOMPOZITY, a.s., Prefa Brno a.s. a BESTEX, spol. s r.o. za poskytnutí informací a umožnění aktivní spolupráce na řešených projektech a především za vytvoření podmínek pro dokončení této práce.

V práci prezentované výsledky vznikly při řešení projektů

- FR-TI4/159 *Light structures – progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů;*
- TA04010881 *Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitných vlastností;*
- FV10505 *Inteligentní kompozitní kotevní prvek;*
- TH03020067 *FRP výztuž se zvýšenou spolehlivostí a trvanlivostí při vysoko-cyklickém zatížení a*
- TN01000056 *Centrum pokročilých materiálů a efektivních budov (subprojekt TN01000056/05 Pokročilé konstrukční prvky na bázi dřeva a kompozitů pro objekty občanské výstavby).*

Bylo využito též poznatků z řešení interních projektů FAST-S-15-2899 *Využití progresivních FRP materiálů v odolných konstrukcích* a FAST-S-19-5963 *Využití moderních kompozitních materiálů ve vybraných aplikačních oblastech betonových konstrukcí.*

Chtěl bych tuto práci věnovat mé rodině, Janě a Marušce, bez jejichž pochopení by nevznikla.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že předložená práce s názvem *Specifika využití kompozitních výztuží v betonových konstrukcích* je mým původním dílem. Veškerá literatura a zdroje, z nichž jsem při vypracovávání práce čerpal, jsou v textu řádně citovány.

Prohlašuji, že jsem spoluautorem v textu představených certifikovaných metodik, spolupůvodcem patentu CZ 305718 a uvedených průmyslových vzorů. Jsem též spoluautorem experimentů a zkušebních postupů prezentovaných v této práci.

Výsledky a závěry vlastní vědecko-výzkumné činnosti uvedené v této práci byly získány při realizaci řady výzkumných úkolů, na jejichž řešení jsem se jako klíčový člen týmu podílel. Výsledky byly průběžně publikovány v českých i zahraničních časopisech, či sbornících českých a zahraničních konferencí. Texty a obrázky převzaté z jednotlivých publikací jsou řádně citovány. Není-li uvedeno jinak, prezentované fotografie pocházejí z archivu autora.

V Brně dne 7. 5. 2021

Ing. František Girgla, Ph.D.

1 Obsah

1	Obsah.....	6
2	Seznam použitých zkratk a symbolů	11
2.1	Seznam použitých zkratk.....	11
2.2	Latinská velká písmena	12
2.3	Latinská malá písmena	13
2.4	Řecká písmena.....	14
3	Úvod, účel a cíl práce	15
4	Stručný popis aktuálního stavu řešené problematiky.....	20
4.1	Materiálové složení, vlastnosti a problematika návrhu FRP výztuže v betonovém průřezu.....	21
4.2	Životnost a dlouhodobá spolehlivost FRP výztuže v betonových konstrukcích	25
4.2.1	Vliv dlouhodobě působícího zatížení (dotvarování výztuže).....	26
4.2.2	Vliv alkality, vlhkosti okolního prostředí a teploty.....	30
4.2.3	Degradace FRP výztuže ve skutečném prostředí betonové konstrukce – kombinovaný vliv působícího zatížení, alkality, vlhkosti a teploty	35
4.2.4	Degradace/časově závislé chování kontaktu beton – FRP výztuž.....	37
4.2.5	Stanovení návrhové dlouhodobé únosnosti FRP výztuže dle dostupných podkladů	39
4.2.6	Modely pro predikci dlouhodobého chování FRP výztuže – urychlené testy	47
4.3	Únosnost FRP výztuže při namáhání kombinací tahové a posouvající síly	51
4.3.1	Interakce tahové a posouvající síly – dostupné experimentální studie.....	52
4.3.2	Teoretické stanovení únosnosti FRP výztuže při kombinovaném působení tahové a posouvající síly	55
4.4	Experimentální stanovení klíčových vlastností kompozitní výztuže	57
4.4.1	Přehled zkušebních postupů pro stanovení krátkodobých mechanických vlastností FRP výztuží	58
4.4.2	Přehled zkušebních postupů pro stanovení dlouhodobých mechanických vlastností FRP výztuží.	59
5	Vlastní přínos, dopad na praxi.....	63
5.1	Dlouhodobá spolehlivost kompozitní výztuže, vliv degradace na mezní napětí v soudržnosti ..	64
5.1.1	Experimentální ověření degradace vláken v alkalickém roztoku	64
5.1.2	Degradační zkoušky FRP výztuží bez vlivu krycí vrstvy betonu.....	68
5.1.3	Vliv konfigurace experimentu na výsledek – degrační zkoušky GFRP výztuže s vlivem krycí vrstvy betonu	88
5.1.4	Alternativní zkušební metody pro určení míry degradace FRP výztuže	92
5.1.5	Vliv působení alkalického prostředí na soudržnost FRP výztuže	98
5.1.6	Zhodnocení dosažených výsledků v oblasti dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuže	102
5.2	Vliv interakce normálové a posouvající síly na únosnost FRP výztuže.....	103
5.2.1	Experimentální program.....	103
5.2.2	Chování GFRP výztuže při víceosém namáhání – výsledky a způsob porušení.....	106
5.2.3	Vyhodnocení výsledků, porovnání s teoretickou predikcí dle [16].....	108
5.2.4	Zhodnocení dosažených výsledků.....	112
5.3	Vývoj a aplikace speciálních prvků s využitím kompozitních materiálů – prvek pro přerušování tepelného mostu v betonové konstrukci	114
5.3.1	Stávající řešení dostupná na evropském trhu	115

5.3.2	Teoretický koncept řešení, základní (statické) chování plně kompozitního izolačního dílce....	116
5.3.3	Navržený experimentální program a klíčové výsledky.....	120
5.3.4	Zhodnocení dosažených výsledků	138
5.4	Certifikované metodiky zkoušení	139
5.4.1	Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek.....	139
5.4.2	Metodika stanovení únavových vlastností FRP výztuží	140
6	Diskuse dosažených výsledků a závěr	141
7	Seznam použité literatury	145
	Příloha A	155

Seznam obrázků

obr. 1:	FRP výztuž: vlevo snímky řezu FRP výztuže z elektronového mikroskopu; vpravo různé druhy FRP výztuží (zleva GFRP, C-GFRP a CFRP).....	20
obr. 2:	Idealizovaný příčný řez FRP výztuže se zobrazením hlavních os	23
obr. 3:	Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuž.....	24
obr. 4:	Závislost životnosti vzorku na hladině působícího napětí; vzorky: GFRP výztuž s VE maticí a ECR skleněnými vlákny	27
obr. 5:	Reziduální únosnost vzorků po expozici na vzduchu (bez vlivu slunečního svitu) po 3,5 letech (vlevo) a 17 letech (vpravo)	28
obr. 6:	Závislost životnosti GFRP výztuže na hladině dlouhodobě působícího zatížení vyjádřená v hodinách (v log měřítku).....	29
obr. 7:	Vlevo: referenční GFRP výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu; vpravo: GFRP výztuž uložená 365 dní v alkalickém roztoku při teplotě 40 °C [61]	31
obr. 8:	GFRP výztuž uložená v alkalickém roztoku; 20 °C (vlevo zvětšeno 50x; vpravo 200x).....	31
obr. 9:	Změna tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti (dole) tří různých typů GFRP výztuže v alkalickém roztoku v závislosti na čase expozice; převzato z [60]	32
obr. 10:	Vliv působení alkalického prostředí na tahovou pevnost (nahore) a interlaminární smykovou pevnost (dole) pro GFRP výztuž; převzato	34
obr. 11:	Vliv degradačních prostředí na interlaminární smykovou pevnost pro GFRP výztuž; a. až c. – „holé“ vzorky bez krycí vrstvy; d. až f. vzorky s betonovou krycí vrstvou	36
obr. 12:	Vliv hladiny působícího napětí, teploty a alkalického prostředí na životnost	36
obr. 13:	Průběh zatěžování dlouhodobého testu soudržnosti GFRP výztuže	39
obr. 14:	Závislost pokluzu výztuže na čase působícího zatížení, GFRP 8 mm, plně saturovaný beton o teplotě 60°C, předzatížené vzorky (posun v kontaktu 1 mm).....	39
obr. 15:	Návrhová dlouhodobá tahová pevnost stanovená dle vztahů (2) a (4) pro různé R_{10}	45
obr. 16:	Závislost hodnoty environmentálního redukčního součinitele $\eta_{env,t}$ a dlouhodobé návrhové tahové pevnosti $f_{t,d}^{LT}$ na hodnotě redukce pevnosti za dekádu R_{10} a velikosti exponentu n	46
obr. 17:	Difuze jontů z degradačního roztoku do tělesa výztuže	49
obr. 18:	Mechanismus působení podélné výztuže v místě trhliny	52
obr. 19:	Závislost mezi působícím smykovým a tahovým napětím získaným z testů CFRP předpínací výztuže	53
obr. 20:	Provedení zkoušky GFRP horninové kotvy v betonovém bloku	53
obr. 21:	Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti svorníku v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice (GFRP výztuž 10 a 14 mm); vlastní výzkum	54

obr. 22: Únosnost FRP laminátu; uvažovaná orientace os	55
obr. 23: Závislost únosnosti FRP kompozitu na změně úhlu výslednice působícího zatížení	56
obr. 24: Zatěžovací zkouška vzorků uhlíkových vláken	65
obr. 25: Vzorky pramenců AR vláken (expoze: 4 dny uloženo v roztoku o koncentraci 100%)	66
obr. 26: Vzorky pramenců C vláken (expoze: 4 dny uloženo v roztoku o koncentraci 1%)	66
obr. 27: Mezní síla při porušení vzorku; AR a C vlákna po 4 a 7 dnech expoze v roztoku různé koncentrace	66
obr. 28: Pokles tahové pevnosti pramenců AR vláken po 4 (tmavě modrá) a 7 (světle modrá) dnech expoze v alkalickém roztoku různé koncentrace (vodorovná osa)	67
obr. 29: Pokles tahové pevnosti pramenců uhlíkových vláken po 4 (černá) a 7 (šedá) dnech expoze v alkalickém roztoku různé koncentrace (vodorovná osa)	67
obr. 30: Výkresové schéma a reálné provedení zkušebního zařízení pro zkoušky s vlivem napětí	69
obr. 31: Zkušební zařízení s osazenými vzorky a instrumentací (zkoušky creepu)	70
obr. 32: Vlevo: uložení jedné ze sérií vzorků GFRP výztuže v alkalickém roztoku; vpravo: degradované vzorky GFRP-AR-VE po 650 dnech expoze prostředí při 60°C	71
obr. 33: Degradované vzorky GFRP-E-EP, 180 dní expoze v 60°C (plošně bez adhezni vrstvy) ...	72
obr. 34: Porušení vzorků GFRP výztuže po expozi v alkalickém roztoku	73
obr. 35: Závislost pevnosti v tahu FRP výztuže na délce expoze a teplotě prostředí	74
obr. 36: Závislost modulu pružnosti FRP výztuže na délce expoze a teplotě prostředí	74
obr. 37: Únosnost vzorku GFRP výztuže (ECR vlákna nahoře; AR vlákna dole) v závislosti na době expoze alkalickému prostředí (T=20°C)	76
obr. 38: Porovnání vzorků GFRP výztuže s ECR a AR vlákny; alkalické prostředí (T=20°C)	77
obr. 39: Závislost tahové pevnosti na logaritmu času (log), vzorky GFRP-E-VE	78
obr. 40: Vzorek GFRP výztuže s osazenou nádobkou s alkalickým roztokem; vlevo celkový pohled; vpravo detail nádobky s alkalickým roztokem před uzavřením	80
obr. 41: Dlouhodobá tahová zkouška FRP výztuží s VE pryskyřicí (vzorek GFRP-E-VE, 10 mm) s vlivem alkalického prostředí	81
obr. 42: Závislost životnosti GFRP výztuže na hladině působícího zatížení prvku při souběžném účinku alkalického roztoku (T=20°C)	82
obr. 43: Osazený GFRP horninový svorník při provádění trhací (pull-out) zkoušky	83
obr. 44: Dlouhodobé tahové zkoušky GFRP svorníku (horninového kotvy) při působení agresivního prostředí solného roztoku	84
obr. 45: Dlouhodobá zkouška GFRP svorníku s EP pryskyřicí s vlivem roztoku chloridů	85
obr. 46: Životnost GFRP svorníku v závislosti na hladině působícího zatížení při souběžném účinku chloridů	86
obr. 47: Zkušební tělesa pro degradační zkoušky alkalickým prostředím s krycí vrstvou	89
obr. 48: Zbytková únosnost vzhledem k referenční hodnotě (vyjádřeno v %), vzorky GFRP-E-VE (červená barva) a GFRP ^{NG} (oranžová)	91
obr. 49: Typický způsob porušení vzorků GFRP výztuže s betonovým válečkem	91
obr. 50: Schéma a základní princip zkoušky v čistém smyku	94
obr. 51: Konfigurace zkoušky v čistém smyku (vlevo) a typický způsob porušení (vpravo)	94
obr. 52: Konfigurace zkoušky v podélném (interlaminárním) smyku (vlevo)	95
obr. 53: Detail uložení vzorku při zkoušce a typický způsob porušení	95
obr. 54: Zkoušky únosnosti v čistém smyku: zbytková únosnost vzhledem k referenční hodnotě	97
obr. 55: Zkouška soudržnosti - pull-out test	99
obr. 56: Odlišné porušení vzorku GFRP.AR.VE d650 (nahoře) a GFRP.E.VE. d650 (dole)	101
obr. 57: Závislost pokluzu nezatíženého konce na napětí v soudržnosti GFRP výztuží	101

obr. 58: Stanovení odolnosti GFRP svorníku při působení víceosého namáhání	104
obr. 59: Způsob zatěžování vzorků GFRP výztuže při zkoušce N+V	106
obr. 60: Porušení vzorků GFRP výztuže PREFA ReBAR	107
obr. 61: Způsob porušení vzorků GFRP výztuže ComBAR	108
obr. 62: Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti GFRP výztuže v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice (ReBAR profil 10 a 14 mm; ComBAR profil 8 mm)	109
obr. 63: Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti při dvouosém namáhání v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice; výztuže PREFA ReBAR	110
obr. 64: Závislost smykové a normálové únosnosti GFRP výztuže	110
obr. 65: Obálka porušení při namáhání smykovou a normálovou silou a srovnání s teoretickou predikcí; GFRP výztuž PREFA ReBAR	111
obr. 66: Závislost smykové a normálové únosnosti GFRP výztuže včetně vynesení 5% a 95% kvantilu normálního rozdělení	112
obr. 67: Schöck Isokorb® XT-Combar se sklolaminátovou tahovou výztuží	115
obr. 68: Prvek pro přerušování tepelného mostu z FRP materiálů – patent CZ 305718	116
obr. 69: Statické schéma uvážené pro stanovení mezní ohybové a smykové únosnosti dílce	118
obr. 70: Závislost návrhové dlouhodobé ohybové a smykové únosnosti dílce na výšce H	119
obr. 71: Tepelně izolační dílec i-KORB; a) výroba funkčního vzorku 2015; b) vizualizace ideového řešení 2015; c) vzorek určený pro požární zkoušky (2019)	120
obr. 72: Dlouhodobá zkouška tlakového elementu	122
obr. 73: Dlouhodobá zkouška tlakového elementu – závislost: působící síla/stlačení/čas do kolapsu	123
obr. 74: Závislost životnosti prvku (času do porušení) na hladině působícího zatížení	124
obr. 75: Osazení prvku i-KORB v betonové konstrukci vzorku, řez (2019)	124
obr. 76: Výkres tvaru vzorku s osazeným tepelně-izolačním dílcem (vzorek 0,5 x 3,08m)	126
obr. 77: Uspořádání statické zatěžovací zkoušky, způsob ukotvení vzorku	126
obr. 78: Reálné provedení statické zatěžovací zkoušky	126
obr. 79: Typický průběh zatěžování v průběhu statické zatěžovací zkoušky	127
obr. 80: Statická zatěžovací zkouška: a) porušení vzorku; b) měřené deformace na konci konzoly; c) porušená tahová výztuž	127
obr. 81: Dlouhodobá zkouška: schéma umístění měřících čidel a hmoty; vzorek I.S1_LT	128
obr. 82: Umístění vzorků pro dlouhodobou zkoušku na standu	129
obr. 83: Dlouhodobá zkouška: záznam dlouhodobého měření na vzorku I.S1_LT za rok 2019	130
obr. 84: Vzorek i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S před zahájením zkoušky	130
obr. 85: Únavový test – závislost vnášené síly na počtu cyklů	131
obr. 86: Únavový test – závislost deformace na konci konzoly na počtu cyklů	131
obr. 87: Únavový test – závislost přetvoření na počtu cyklů: nahoře: tažená výztuž; uprostřed: tlačené ložisko; dole: smyková výztuž	132
obr. 88: Statická zkouška po provedení únavového testu	133
obr. 89: Výkres tvaru vzorku na požární zkoušku s vyznačenou polohou termočlánků (červeně)	135
obr. 90: Osazení vzorků v peci – průběh instalace	136
obr. 91: Vzorky v peci v průběhu požární zkoušky	136
obr. 92: Změna měřené deformace na konci konzoly v průběhu požární zkoušky	137
obr. 93: Vzorky den po zkoušce: vlevo spára bez vnějšího zásahu; vpravo po odstranění izolace	137

Seznam tabulek

tab. 1:	Typické krátkodobé vlastnosti FRP vnitřních výztuží (platí pro $V_f = 50$ až 75% ; střední hodnoty) a jejich srovnání s betonářskou ocelí	22
tab. 2:	Součinitel CE [1] pro odlišné teploty a vlhkosti (životnost 200 let)	33
tab. 3:	Stanovení dlouhodobé pevnosti dle různých návrhových podkladů	41
tab. 4:	Vyčíslení dlouhodobé pevnosti dle aktuálních návrhových podkladů; GFRP a CFRP výztuž, vnější (mokré) podmínky aplikace, životnost 100 let, průměrná teplota 10°C	41
tab. 5:	Součinitel expozice prostředí dle vztahu (4) pro různé hodnoty R10 a n	46
tab. 6:	Přehled zkušebních metod pro zkoušky krátkodobých vlastností FRP výztuží	59
tab. 7:	Přehled zkušebních metod pro zkoušky dlouhodobých (časově závislých) vlastností FRP výztuží	60
tab. 8:	Degradační zkoušky vláken v alkalickém prostředí – testované vzorky	65
tab. 9:	Degradační zkoušky GFRP výztuže bez vlivu působícího napětí v alkalickém prostředí - přehled	71
tab. 10:	Základní mechanické charakteristiky testované GFRP-E-VE výztuže	78
tab. 11:	Základní mechanické charakteristiky testované GFRP horninové kotvy	85
tab. 12:	Srovnání výsledků creep testů v alkalickém prostředí a roztoku chloridů	87
tab. 13:	Výsledky tahových zkoušek GFRP výztuže v alkalickém roztoku bez vlivu napětí s betonovou krycí vrstvou (1000 hodinová expozice)	90
tab. 14:	Srovnání výsledků metod TSS, ILSS a trhacích zkoušek: GFRP-E-VE; expozice 650 dní	96
tab. 15:	Základní mechanické charakteristiky testované GFRP výztuže s ECR a AR vlákny	99
tab. 16:	Výsledky pull-out testů dle [2]; GFRP výztuž s ECR a AR vlákny s vlivem	100
tab. 17:	Základní mechanické charakteristiky GFRP výztuže	105
tab. 18:	Ohybová a smyková únosnost izolačního dílce pro různé typy vyztužení a výšky průřezu	118
tab. 19:	Základní mechanické charakteristiky tlakového ložiska ve variantě T+V14	122
tab. 20:	Přehled doposud testovaných full-scale vzorků	125
tab. 21:	Dominantní (první tři) vlastní frekvence a útlum vzorků č. 8 a č. 14	134
tab. 22:	Požární zkouška PAVUS, vyhodnocení	137

2 Seznam použitých zkratk a symbolů

2.1 Seznam použitých zkratk

- ACI** - American Concrete Institute
- AF** - *acceleration factor*; míra urychlení zkoušky vlivem aplikované teploty; resp. hodnota posunu měřených veličin na časové ose s ohledem na aplikovanou teplotu; pozn: v citované literatuře značeno i TSF (*time shift factor*)
- AR** - alkali-rezistentní vlákna; vlákna se zvýšenou odolností vůči působení alkalického prostředí.
V rámci textu zprávy vždy uváděno ve spojení AR skleněná vlákna
- ASTM** - American Society for Testing and Materials
- BFRP** - kompozitní výztuž na bázi čedičových vláken (basalt fiber reinforced polymer)
- C** - uhlík
V rámci předkládané zprávy označuje uhlíková vlákna ve formě rovingu i jako součást kompozitu pultrudované výztuže
- CGFRP** - hybridní kompozitní výztuž na bázi skleněných a uhlíkových vláken (carbon-glass fiber reinforced polymer)
- CSA** - Canadian Standards Association
- CT** - počítačová tomografie
- DV** - destilovaná voda, tj. voda s neutrálním pH. S ohledem na prováděnou experimentální činnost je ověřována především absence iontů Ca^{2+} , K^+ a Na^+
- E (ECR)** - bezalkalická vápenato-hlinito-křemičitá skleněná vlákna; základní skleněná vlákna bez významné odolnosti v alkalickém prostředí
V rámci textu zprávy vždy uváděno ve spojení E skleněná vlákna
- EBR** - externaly bonded reinforcement; výztuž/výztužný element lepený na povrch zesilovaného prvku (např. CFRP lamela)
- EM** - elektronový mikroskop
- EP** - epoxidová pryskyřice
- fib** - International Federation for Structural Concrete
- FRP** - Vlákny vyztužený polymer (fiber reinforced polymer)
V případě užití označení v této práci je myšlena převážně vnitřní kompozitní výztuž vyráběná pultruzí na bázi výztužných vláken a polymerní matrice.
- GFRP** - kompozitní výztuž na bázi skleněných vláken (glass fiber reinforced polymer)
- GFRP-AR** - označení zkušebních vzorků: GFRP výztuž s vinylesterovou pryskyřicí a AR vlákny
- GFRP-E** - označení zkušebních vzorků: GFRP výztuž s vinylesterovou pryskyřicí a ECR vlákny

- GFRP-EP** - označení zkušebních vzorků: GFRP výztuž s epoxidovou pryskyřicí a ECR vlákny
- GFRP^{NG}** - označení zkušebních vzorků: GFRP výztuž se zvýšenou odolností s epoxidovou pryskyřicí a ECR vlákny
- ILSS** - zkouška v podélném (interlaminárním) smyku dle ASTM D 4475 [12]
- ISO** - International Organization for Standardization
- JSCE** - Japan Society of Civil Engineers
- LN** - přirozený logaritmus
- LOG** - dekadický logaritmus
- NSMR** - near surface mounted reinforcement; výztuž/výztužný element vlepený do drážky v krycí vrstvě zesilovaného prvku
- PD** - pracovní diagram; záznam závislosti vnášené síly a měřené deformace získané ze zatěžovací zkoušky vzorku
- PES** - polyesterová pryskyřice
- RH** - relativní vlhkost prostředí
- T/S** - poměr normálové a smykové únosnosti vzorku
- TEX** - hmotnost pramence rovingu o délce jeden kilometr v gramech
- TSF** - *time shift factor*; význam viz uvedené u AF
- TSS** - zkouška v příčném smyku realizovaná dle ASTM D7617 [18]
- VE** - vinylesterová pryskyřice
- V_f** - objemové množství vláken v průřezu FRP výztuže
- VFRP** - kompozitní výztuž na bázi PVA (polyvinyl alcohol) vláken (vinylon fiber reinforced polymer)
- ŽB** - železobeton

2.2 Latinská velká písmena

- A** - konstanta degradačního procesu pro daný materiál
- A_s** - průřezová plocha vzorku FRP výztuže o nominálním průměru d
- C** - koncentrace degradačního roztoku pro výpočet dle [120]
- C_E** - environmentální redukční součinitel zohledňující typ použitých vláken a prostředí, ve kterém se výztuž nachází; ACI 440.1R-15 [5]
- C_v** - redukční součinitel zohledňující vliv dutin; výpočet f_{LTs} dle [46]
- D** - koeficient difuze pro výpočet dle [120]
- E_a** - aktivační energie chemické reakce
- E_f** - modul pružnosti FRP materiálu
- F_{ILSS}** - mezní zatěžovací síla dosažená při zkoušce v podélném smyku při tříbodovém ohybu vzorku

F_{TSS}	- maximální dosažená (měřená) smyková síla v čistém střihu působící kolmo na směr pnutí vláken
G_f	- modul pružnosti ve smyku vláken
G_m	- modul pružnosti ve smyku matrice
R	- univerzální (molární) plynová konstanta
R_{10}	- pokles tahové pevnosti FRP výztuže za dekádu životnosti na logaritmickém měřítku; [46]
T	- teplota
T_g	- teplota skelného přechodu matrice (glass transition temperature)
T_{max}	- maximální očekávaná teplota prvku vyztuženého FRP výztuží dle [126]
T_{min}	- minimální očekávaná teplota prvku vyztuženého FRP výztuží dle [126]
T_{rep}	- teplota uvážená pro stanovení míry degradace FRP výztuže dle [126]
V_f	- objem vláken v průřezu v %
Y	- míra snížení sledované vlastnosti (tahové pevnosti) v %

2.3 Latinská malá písmena

d	- nominální průměr vzorku FRP výztuže
f_{fu}^*	- zaručená pevnost FRP výztuže v tahu stanovená dle ACI 440.1R-15 [5] (přibližně ekvivalent návrhové pevnosti dle [37])
$f_{fl,d}$	- krátkodobá návrhová tahová pevnost (0,1% kvantil) FRP výztuže ve směru vláken
$f_{fl,d}^{LT}$	- návrhová dlouhodobá hodnota tahové pevnosti výztuže pro požadovanou životnost konstrukce
$f_{fl,k}$	- krátkodobá charakteristická tahová pevnost (5% kvantil) FRP výztuže ve směru vláken
$f_{fl,k1000h}$	- charakteristická hodnota pevnosti výztuže vystavené agresivnímu prostředí a zatížené po dobu 1000 hodin; [46]
f_{fu}	- návrhová pevnost FRP výztuže v tahu určená dle vztahu $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$; ACI 440.1R-15 [5]
f_{Ll}	- tahová únosnost prvku v podélném směru; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
f_{LTs}	- smyková únosnost ve směru pootočeném o 45° od podélného směru vláken; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
f_{ms}	- únosnost matrice ve smyku
f_{Tl}	- smyková únosnost prvku v příčném směru; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
$f_{x(\theta)t}$	- krátkodobá únosnost FRP prutu při namáhání v obecném směru; výpočet dle [46]
k	- rychlostní konstanta degradace (1/čas)

- $l (L)$ - podélný směr – osa (ve směru vláken) tyčového kompozitu
- n - součinitel při výpočtu $\eta_{env,t}$ dle [46] zohledňuje vliv okolního prostředí a očekávanou životnost prvku
- n_d - součinitel při výpočtu $\eta_{env,t}$ dle [46] zohledňuje případnou rozdílnost průměru výztuže oproti testovanému vzorku
- n_{mo} - součinitel při výpočtu $\eta_{env,t}$ dle [46] zohledňuje vlhkost prostředí
- n_{SL} - součinitel při výpočtu $\eta_{env,t}$ dle [46] zohledňuje předpokládanou životnost konstrukce
- n_T - součinitel při výpočtu $\eta_{env,t}$ dle [46] zohledňuje teplotu prostředí
- $r (R)$ - příčný směr (kolmo na vlákna) tyčového kompozitu
- r_0 - poloměr testované FRP výztuže
- t - čas (expozice)
- x - hloubka poškozené/degradované zóny pro výpočet dle [120]

2.4 Řecká písmena

- γ_M - materiálový součinitel (v souladu s ČSN EN 1990 [37])
- $\gamma_{M,t}$ - materiálový součinitel pro FRP výztuž (v souladu s ČSN EN 1990 [37])
- ΔH - aktivační energie difuze pro výpočet dle [120]
- $\epsilon_{f,t,d}^{LT}$ - návrhová dlouhodobá hodnota mezního přetvoření výztuže v tahu pro požadovanou životnost konstrukce
- η_a - součinitel zohledňující vliv prostředí (vlhkosti) dle CNR-DT 203/2006 [121]
- $\eta_{env,t}$ - součinitel expozice prostředí; [46]
- θ - úhel odklonu výslednice při kombinovaném působení tahové a posouvající síly
- σ_L - napětí v kompozitu v podélném směru; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
- σ_T - napětí v kompozitu v příčném směru; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
- τ_{LT} - podélné smykové napětí; výpočet $f_{x(\theta)t}$ dle [46]
- τ_{max} - maximální napětí v soudržnosti (pull-out test dle ACI 440.3R-12 [6])
- τ_{TSS} - mezní napětí v čistém smyku (stříhu) dle normy ASTM D7617 [18]
- τ_{LSS} - mezní napětí v podélném smyku dle normy ASTM D4475 [12]

3 Úvod, účel a cíl práce

Na pracovišti Ústavu betonových a zděných konstrukcí, Fakulty stavební, VUT v Brně, probíhá dlouhodobý výzkum v oblasti aplikace moderních kompozitních materiálů pro zesilování a vyztužování betonových konstrukcí (včetně návrhu celo-kompozitních konstrukcí); celosvětově aktuální problematika návrhu odolných betonových konstrukcí s vnitřní nekovovou výztuží je řešena od roku 2005. Autor práce se jako klíčový člen týmu na řešení řady výzkumných projektů v této oblasti podílí od roku 2007. Předkládaná habilitační práce sumarizuje zásadní poznatky z výzkumu, který autor v oblasti návrhu a testování těchto moderních výztužných prvků realizoval.

Kompozitní materiály na bázi dlouhých anorganických případně organických vláken (FRP materiály) jsou díky velmi dobrému poměru únosnosti ke své váze využívány především v kosmickém, leteckém a automobilovém průmyslu, kde v současnosti představují základní stavební prvek lehkých, úsporných a výkonných dopravních prostředků. V současnosti ovšem nacházejí kompozity i širší uplatnění ve stavebnictví a to především jako náhrada ocelových válcovaných profilů, systémové prvky pro speciální aplikace, materiály pro zesilování konstrukcí či např. i zajišťování zemních těles, ale též i jako vnitřní výztuže pro vyztužování nově budovaných betonových konstrukcí v agresivních podmínkách.

V dalším textu, nebude-li výslovně uvedeno jinak, se vždy hovoří o vnitřní nekovové (FRP) výztuži určené pro vyztužování či zesilování betonových prvků, na jejímž vývoji a uvedení do české stavební praxe se autor od roku 2007 podílel.

Využití vnitřních FRP výztuží v betonovém stavitelství se v posledních desetiletích ve světě podstatně rozšiřuje, což lze dokumentovat např. i na počtu vědeckých článků na dané téma¹. S ohledem na odlišnou kompozici těchto materiálů oproti běžné oceli je zřejmé, že musí vykazovat i odlišné fyzikální a mechanické charakteristiky, které zásadním způsobem ovlivní návrh vyztuženého betonového prvku. Zvyšující se využití těchto materiálů v praxi tak s sebou přináší i potřebu normalizovat zkušební postupy, spolehlivě stanovit krátkodobé i dlouhodobé materiálové charakteristiky a především sestavit výstižné návrhové algoritmy.

¹ V databázi *Web of Science* bylo pro rok 2005 při zadání „*FRP reinforcement*“ nalezeno 111 relevantních výsledků – článků – zabývajících se danou problematikou. V roce 2020 byl již tento počet více než trojnásobný (382 vědeckých článků v databázi *WOS*).

Stále se zvyšující podíl využití kompozitních výztuží při návrhu betonových konstrukcí je dán především výhodnými fyzikálně mechanickými a chemickými vlastnostmi tohoto materiálu, které otevírají nové oblasti návrhu odolných prvků a předurčují jej pro využití v extrémně agresivních environmentálních podmínkách.

FRP výztuže mají oproti klasickým ocelovým výztužným vložkám především podstatně vyšší odolnost vůči agresivním chemikáliím (kyseliny, chloridy apod.). Jsou korozivzdorné, velmi lehké, nevodivé a netečné k působení magnetického pole (nestíní radiový signál, netečné vůči bludným proudům apod.). Mohou mít (s ohledem na zvolené složení) výrazně vyšší tahové pevnosti než klasické ocelové výztuže. Je zřejmé, že s ohledem na výše uvedené odpadá nutnost respektovat doporučení aktuálních normativních podkladů (především [40]) z hlediska trvanlivosti, tj. především stanovení tloušťky krycí vrstvy s ohledem na třídu prostředí. Uvedené výhody jsou již dnes dobře známy a jednotlivými výrobci těchto materiálů hojně propagovány.

Nutnou podmínkou rozvoje využití FRP výztuží je postupně se zvyšující znalost o jejich (dlouhodobém) chování a, především v posledním období, vznikající normativní dokumenty, které lze pro návrh těchto materiálů v praxi využít. Aktuální *fib* Model Code 2010 [47] již vnitřní kompozitní výztuž uvažuje, z hlediska možnosti aplikace a návrhu, jako rovnocennou alternativu k oceli.

Je vhodné zmínit směrnice a normativní dokumenty, které lze pro návrh jednoduchých převážně ohýbaných betonových prvků vyztužených kompozitní výztuží využít. Z relevantních, v současné době aktuálních, lze jmenovat především americkou směrnici ACI 440.1R-15: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars* [5]; kanadskou normu CSA S806-12 (R17): *Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers* [32] a publikaci *fib* Bulletin No. 40: *FRP Reinforcement in RC Structures* [46], která doplňuje aktuální *fib* Model Code 2010 [47]. Historicky významnou a v mnoha ohledech stále hojně užívanou směrnicí pro návrh (a též testování) konstrukcí vyztužených vnitřní FRP výztuží je doporučení Japan Society of Civil Engineers (JSCE): *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials* [73] z roku 1997.

Lze konstatovat, že díky dostupnosti návrhových vztahů a také již široké databázi experimentálních podkladů se základní (krátkodobý) návrh ohýbaných betonových prvků

vyztužených FRP výztuží stává rutinní záležitostí (konstatování je však platné pouze při znalosti/dostupnosti spolehlivých mechanických charakteristik FRP výztuže).

Kompozitní výztuže však mají, jako každý jiný konstrukční materiál, svá omezení a negativa, která míru jejich využití v reálných aplikačních oblastech snižují. Tyto skutečnosti však již nejsou, především u levných výrobků z Asie, dostatečně komunikovány a společně s nedostatečnou znalostí laické a často i odborné veřejnosti přispívají k nereálným nárokům na tento materiál, případně naopak ke značné nedůvěře k jeho využití.

Omezením pro návrh betonových prvků při využití především levnějších kompozitních výztuží ze skleněných vláken (GFRP výztuž) je jejich relativně nízký modul pružnosti (cca 3x až 4x nižší v porovnání s ocelí), který v důsledku může negativně ovlivnit výslednou tuhost konstrukce², resp. nároky na staticky nutnou plochu vyztužení průřezu; či vést k potřebě tyto prvky předpínat [59]. FRP materiály také vykazují vyšší citlivost a v důsledku nižší odolnost vůči působení vysokých teplot. Návrhu těchto prvků při požárních situacích, ale také i v případě dlouhodobého vystavení vyšším provozním teplotám, je třeba věnovat zvýšená pozornost.

Mezi podstatnou nevýhodu, která brání širšímu využití těchto materiálů v (nejen) české stavební praxi, patří především stále ještě omezená znalost jejich dlouhodobého chování a nedostatek zkušeností s provozem a údržbou konstrukcí, jež jsou z těchto materiálů budovány. Je známo, že vlastnosti FRP materiálů mohou být v čase negativně ovlivněny prostředím, ve kterém se nacházejí (např. degradace skleněných vláken alkalickými roztoky, působení vyšší teploty) a hladinou působícího zatížení (dotvarování výztuže).

Z nedostačené znalosti degradace těchto materiálů a jejich chování v dlouhodobém časovém měřítku však pramení značný konzervatismus návrhových přístupů, který se projevuje v hodnotách redukčních (materiálových) součinitelů. Přijatá návrhová omezení jsou tak často velmi přísná a pro spoustu kompozitních výztuží značně devalvující (toto konstatování především platí pro ve světě široce využívanou směrnici ACI 440.1R-15 [5]). Jednotlivé přístupy (modely) navíc vykazují velký rozptyl získaných hodnot, přičemž některé nemají přímou návaznost na skutečné chování výztuže. Tato skutečnost byla zásadní motivací pro výzkumné práce v oblasti dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuží, které byly v týmu, jehož byl

² Oproti tomu CFRP kompozity vyráběné z uhlíkových vláken mohou mít osovou tuhost shodnou i násobně vyšší než klasická ocel. Tyto jsou pak s výhodou využívány pro dodatečné zesilování jako externí lamely (EBR) či do drážek lepené výztužné pruty (NSMR).

autor klíčovým členem, realizovány od roku 2014. Pouze kvalitně navržené a realizované dlouhodobé zkoušky mohou pomoci tuto bariéru odstranit.

Taktéž zkušební postupy zabývající se stanovením dlouhodobých (i krátkodobých) charakteristik nejsou doposud sjednoceny a mohou dále prohlubovat nedůvěru v uváděné klíčové charakteristiky a tedy i spolehlivost navrženého řešení. K získání základních charakteristik FRP výztuží nemohou být (ve většině případů) využity standardní zkušební postupy určené pro běžnou betonářskou výztuž. Dnes je pro testování FRP výztuží využívána především norma ISO 10406-1:2015: *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids* [70], podle které je postupováno v ČR; kanadská norma CSA S807-19: *Specification for fibre-reinforced polymers* [33] a směrnice ACI 440.3R-12: *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures* [6] s navazujícími normami ASTM pro jednotlivé typy, většinou krátkodobých, zkoušek (např. [16], [19], [18]). Významným podkladem v oblasti testování je doporučení JSCE z roku 1997 [73]. Výše uvedený seznam není úplným výčtem dostupných norem. Existují i další platné především v zemi vzniku, např. [62], které však povětšinou vycházejí z výše jmenovaných podkladů [6] nebo [73].

Je zřejmé, že existuje řada zkušebních norem, které však vzájemně nejsou plně kompatibilní, resp. nabízí alternativní postupy založené na odlišných přístupech, což v důsledku vede k rozdílným hodnotám získaných mechanických charakteristik (viz též uvedené v odstavci 5.4, resp. 5.1). Úzce s problematikou návrhu zkoušek souvisí i v zahraničí doposud nepřilíš řešená oblast testování a návrhu FRP výztuží při souběžném působení normálové a posouvající síly, tj. vliv odklonu výslednice působící síly od střednice prutu na jeho únosnost/snížení mechanických charakteristik kompozitu.

V dalším textu jsou, z výše zmíněných důvodů, prezentovány aktuální poznatky a zásadní výsledky týkající se klíčových částí návrhu betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží, které autor práce získal při řešení řady vědeckovýzkumných projektů. Též jsou komplexně popsány nově navržené zkušební postupy a experimenty. Výsledky byly prezentovány v řadě publikací na konferencích a v odborných periodících.

Cílem práce je uvést nové poznatky v oblastech:

- degradace FRP výztuže a vliv vnějších podmínek (alkálie, teplota, vlhkost, dlouhodobě působící zatížení) na dlouhodobou únosnost a spolehlivost tohoto materiálu, a to včetně přístupu aktuálních platných návrhových podkladů ke

stanovení dlouhodobé únosnosti betonového prvku s FRP výztuží. Diskutována je i problematika volby experimentu, typu zkoušky a vlivu konfigurace na získané materiálové charakteristiky. Obdržené poznatky jsou prezentovány v odstavci 5.1;

- chování FRP výztuže v případě interakce působení normálové a posouvající síly, která nastává např. v místě smykové trhliny v betonovém nosníku, případně při aplikaci FRP výztužných prutů při zajištění horninových svahů apod. Jedná se o doposud ve světě nepřilíš probádanou oblast chování tyčového FRP kompozitu. Pro získání požadovaných mechanických charakteristik byl navržen vlastní unikátní zkušební postup – podrobněji je téma řešeno v odstavci 5.2;
- problematiku návrhu a využití FRP kompozitní výztuže ve speciálních aplikacích pozemních staveb. Jako příklad je v odstavci 5.3 uveden návrh, testování a implementace do výroby unikátního prvku pro přerušení tepelného mostu v monolitické betonové konstrukci, který byl navržen zcela bez kovových částí. Nedílnou součástí byla realizace široké sady experimentů ověřujících spolehlivost řešení a to včetně nejslabšího článku prvku – tlačeného celokompozitního ložiska.

Výše uvedené řešené oblasti v současnosti stále významně limitují využití tohoto moderního a perspektivního materiálu ve stavební praxi a přímo ovlivňují spolehlivost návrhu a věrohodnost experimentálně získaných dat. Nové vědecké poznatky jsou tedy více než žádoucí.

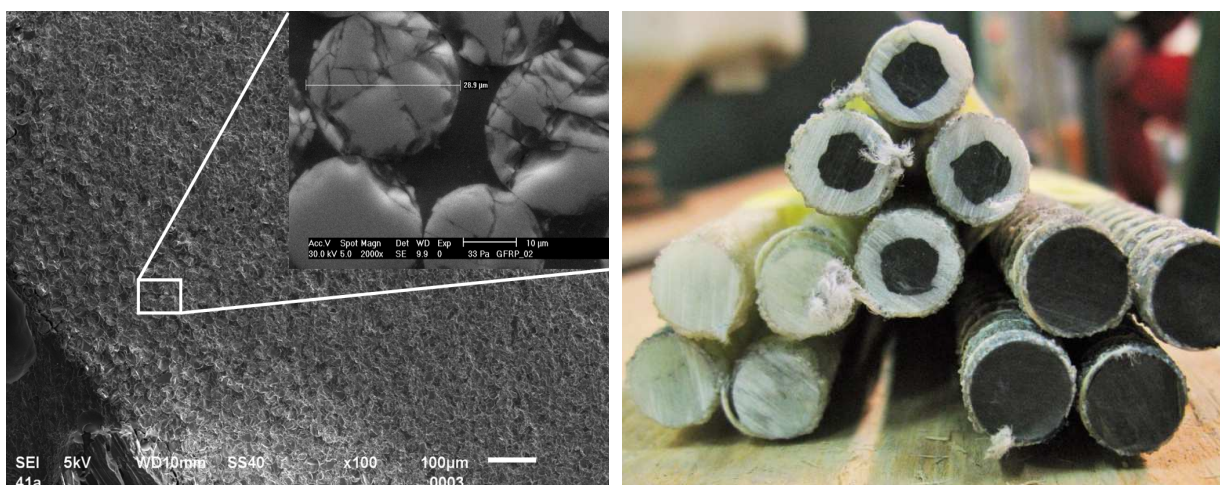
Ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. byly dosaženy unikátní výsledky a podstatným způsobem zvýšeny mechanické charakteristiky vyráběných kompozitních výztužných tyčí PREFA Rebar. Zásadním výstupem vývoje poslední dekády, který je široce využitelný v praxi, jsou též certifikované metodiky, které lze pro testování těchto materiálů využít (odstavec 5.4).

Z řady publikačních výstupů autora (viz zdroje uvedené v kapitole 7) vychází i následující text. Především s ohledem na dynamický vývoj v dané vědní oblasti je vhodné poznamenat, že popis stávající úrovně znalostí uvedený v kapitole 4 je aktuální k datu vzniku textu a informace mohou rychle zastarat. Není-li uvedeno jinak, prezentované fotografie pocházejí z archivu autora.

4 Stručný popis aktuálního stavu řešené problematiky

Rozhodnutí o využití kompozitních FRP výztuží v betonové konstrukci s sebou, oproti klasickému řešení, přináší značné odlišnosti při návrhu a realizaci konstrukce s přímým dopadem na její provoz.

Spojením nosných vláken a polymerní matrice v jednom produktu – FRP kompozitu – vzniká materiál s jedinečnými vlastnostmi, které jsou dány především typem a vzájemným poměrem obou složek (typický řez FRP výztuží s viditelnou strukturou je zřejmý z obr. 1). Lze dovést, že kompozice a odlišnosti ve vnitřní struktuře materiálu zcela zásadně ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného produktu, jeho časově závislé chování i citlivost na působení vnějších degračních činitelů.



obr. 1: FRP výztuž: vlevo snímky řezu FRP výztuže z elektronového mikroskopu; vpravo různé druhy FRP výztuží (zleva GFRP, C-GFRP a CFRP); foto PREFA KOMPOZITY, a.s.

Z tohoto důvodu, byť to není cílem předkládané práce, odstavec 4.1 velmi stručně sumarizuje základní odlišnosti při návrhu a specifika použití FRP výztuže oproti běžnému řešení železobetonu. Tato skutečnost je klíčová s ohledem na komplexní uchopení problematiky dlouhodobé spolehlivosti, resp. vlivu typu zkoušek na experimentálně získané výsledky, kdy tyto jsou pojednány v navazujících odstavcích.

4.1 Materiálové složení, vlastnosti a problematika návrhu FRP výztuže v betonovém průřezu

Existuje celá řada typů jednotlivých vláken lišících se chemickým složením, výrobou, cenou, odolností, mechanickými charakteristikami atd.; což má přímý dopad na výsledné chování kompozitu. V běžně dostupných FRP výztužích mají dominantní zastoupení především vlákna skleněná (GFRP výztuž) a uhlíková (CFRP výztuž). Je třeba však poznamenat, že v praktických aplikacích se lze setkat i s jinými druhy nosných vláken (čedičová, kevlarová, apod.). Podrobnosti o chemickém složení, výrobě a vlastnostech vláken lze nalézt v odborné literatuře (např. [111] nebo [21]).

Nosná vlákna tvoří základní nosný prvek kompozitu, který dominantně ovlivňuje charakteristiky – fyzikální a mechanické; krátkodobé i dlouhodobé – v podélném směru výztužného prutu. Volba vláken má přímý a zásadní dopad na časově závislé chování a odolnost výsledného produktu. Všechny uvedené typy vláken se při tahovém namáhání chovají lineárně pružně až do porušení.

Druhá základní složka kompozitu – matrice – zajišťuje tvar a celistvost kompozitu, váže k sobě jednotlivá nosná vlákna, přenáší tahové namáhání z betonu do vláken a také je chrání před vlivem okolního prostředí a mechanickým porušením. Společně s typem a množstvím použitých vláken určuje výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti FRP výztuže. Zcela zásadně ovlivňuje chování výsledného produktu při odklonění výslednice působících sil od hlavní podélné osy prutu. Při výrobě FRP výztuží jsou dominantně používány termosetické matrice na bázi organických (či anorganických) polymerů. Nejčastěji jsou využívány epoxidové, vinylesterové, případně polyesterové pryskyřice (viz např. [46]).

FRP výztuže jsou vyráběny pultruzí. V průběhu výrobního procesu musí dojít k dokonalému spojení nosných vláken a matrice. Při klasické pultruzi jsou nejdříve jednotlivá nosná vlákna srovnána (aby bylo zajištěno konstantní rozložení vláken po průřezu), následně je výztuž kontinuálně impregnována tekutou pryskyřicí a tvarována. V ohřívané části vytvrzovací formy, případně při průchodu pecí, je pryskyřice vytvrzena (při využití termosetické matrice jde o nevratný proces) a hotový profil je odtahován a řezán na potřebnou délku. Popsaný postup zmiňuje pouze základní části výroby, dále jsou obvykle doplněny technologické jednotky pro aplikaci požadované povrchové úpravy (například opískování, ovíjení) apod.

tab. 1: Typické krátkodobé vlastnosti FRP vnitřních výztuží (platí pro $V_f = 50$ až 75%; střední hodnoty) a jejich srovnání s betonářskou ocelí (zdroj: [46], [5] a vlastní výzkum [58])

Vlastnost	Materiál		
	Ocel	GFRP	CFRP
Modul v podélném směru [GPa]	200	35 až 60	100 až 580
Modul v příčném směru [GPa]	200	cca 8 až 9	cca 10 až 12
Tahová pevnost ve směru vláken [MPa]	300 až 600	450 až 1600	600 až 3500
Tlaková pevnost ve směru vláken [MPa]	300 až 600	cca 1/2 z tahové pevnosti	cca 1/2 z tahové pevnosti
Pevnost v čistém střihu [MPa]	200 až 400	cca 150	cca 175
Objemová hmotnost [kg/m ³]	7850	cca 2100	cca 1600
Součinitel teplotní roztažnosti (L) - podélný, (R) - příčný směr [10 ⁻⁶]	12	6 - 10 (L)	-1 - 0 (L)
		19 - 23 (R)	22 - 50 (R)
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	-	běžně 110 až 140°C	

Všechny výše uvedené základní složky – typ vláken a matrice, jejich vzájemný poměr a také způsob a kvalita výroby – determinují vlastnosti výsledného produktu. Je tak zřejmé, že musí existovat mnoho komerčně dostupných FRP výrobků určených pro aplikace jako výztuž do betonu. Při návrhu konstrukce vyztužené touto výztuží je proto obvykle nezbytné vycházet z aktuálních (příslušnými certifikačními orgány ověřených) charakteristik z technického listu výrobce [112], údaje nejsou standardizovány³. Základní (očekávané) krátkodobé mechanické charakteristiky FRP výztuže jsou pro přehlednost a úplnost uvedeny v tab. 1.

I přes výše uvedené lze definovat základní vlastnosti FRP výztuží, které vychází z jejich fyzikální podstaty a jsou platné bez ohledu na využití typy vláken či matrice [53]:

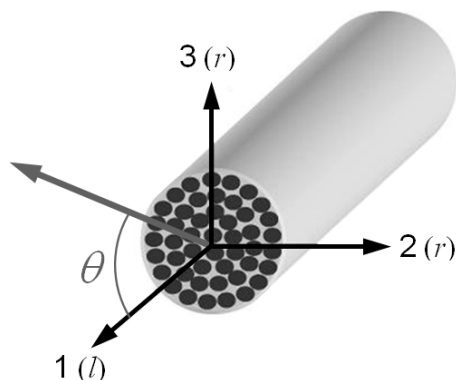
- fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitu determinuje především směsný poměr, vlastnosti a stáří dílčích součástí kompozitu (základní nosná vlákna, použitá matrice atp.). Zásadní je však též postup a kvalita výroby (např. rychlost tažení, teploty při vytvrzení; společně s okolními podmínkami – teplota, vlhkost atd.).

Na základě dlouhodobých zkušeností autora této práce z vývoje a testování FRP výztuží lze konstatovat, že platí přímá úměra mezi dosahovanými charakteristikami a kvalitou výroby;

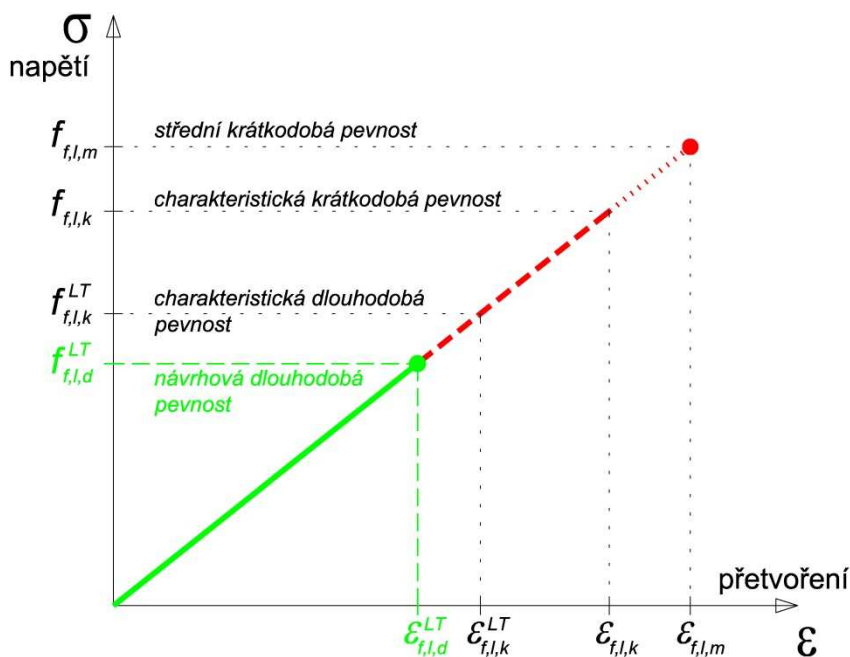
³ V zemích EU bylo dohodnuto, že vzhledem k velké variabilitě vyráběných FRP výztuží, bude navrhování na environmentální zatížení součástí stavebně-technického osvědčení výrobce a ne směrnice (norem). V budoucích návrhových směrnících tak bude pro každý typ FRP materiálu definovány pouze obecné a bezpečné charakteristické hodnoty [112].

- FRP výztuže vždy vykazují ortotropní chování, tj. materiálové charakteristiky kompozitu dosahují rozdílných hodnot ve směru orientace nosných vláken a ve směru kolmém na tato vlákna (viz obr. 2). Při odklonu výslednice od hlavního směru vláken dochází k podstatné redukci únosnosti a vlastnosti jsou dominantně řízeny maticí. Porušení prvku je pak dle typu/směru namáhání obvykle způsobeno přetržením vláken, jejich boulením, delaminací matrice a vláken, ustřížením průřezu prvku či (při obecném namáhání) kombinací těchto mechanismů porušení;
- vláknové kompozity vykazují při namáhání ve směru vláken lineárně elastické chování s křehkým lomem při dosažení mezního napětí. σ - ε diagram má tedy vždy lineární průběh až do porušení;
- kompozitní výztuže mají rozdílné (v čase proměnné) krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti; jejich reologické chování závisí na okolním prostředí (teplota, vlhkost) a hladině a typu aplikovaného zatížení, tj. nejen na typu použitých vláken a způsobu výroby. Je důležité při návrhu uvážit požadovanou životnost (délku expozice);
- z důvodu využití termosetických matic u běžných FRP výztuž nelze tyto po vytvrzení dále tvarovat, případné tvarové úpravy je třeba realizovat již při výrobě.

Z výše uvedeného je zřejmé, že kompozitní výztuže dosahují zcela odlišných vlastností při namáhání ve směru vláken a ve směru na ně kolmém (viz i uvedené v tab. 1). V podélném směru je tahová únosnost limitována dosažením mezního přetvoření nosných vláken (podélný směr l , viz obr. 2). V příčném směru naopak dochází k porušení matrice a vlákna jsou přestřižena. Při smykovém porušení je dosahováno přibližně o řád nižších mezních napětí (směr r na obr. 2). Podrobněji viz například [21] nebo [53].



obr. 2: Idealizovaný příčný řez FRP výztuže se zobrazením hlavních os; $1(l)$ – podélná osa; $2(r)$ a $3(r)$ – příčné osy; θ – úhel odklonu výslednice od podélné osy v rovině 1-3 (při dvou-osém namáhání);[46];



obr. 3: Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže [112]

FRP výztuž se při namáhání tahovou silou podél hlavní podélné osy prutu chová lineárně pružně až do porušení (v celém rozsahu platí Hookův zákon). Absence plastické větve diagramu je zcela zásadní odlišností oproti zažitým zvyklostem při návrhu železobetonového prvku (viz obr. 3). Duktilní chování průřezu, které je zajištěno vhodným návrhem plochy betonářské výztuže a její plastizací po dosažení meze kluzu, není v případě prvků vyztužených FRP výztuží dosažitelné. Křehké chování FRP výztuží při tahovém porušení vyžaduje přehodnocení zažitého přístupu k návrhu vyztuženého průřezu.

Při návrhu je třeba omezit přípustné napětí ve výztuži a to s ohledem na působení trvalého zatížení a podmínky prostředí. Návrhový diagram FRP výztuže v tahu tak musí zohlednit reologické jevy probíhající ve výztuži (tj. změnu vlastností v čase). Jedná se především o dotvarování výztuže a též (je-li to s ohledem na oblast aplikace relevantní) degradaci způsobenou okolním prostředím (podrobněji viz odstavec 4.2 a 5.1). Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže v tahu může být uvážen dle obr. 3 [112].

Při návrhu betonového prvku namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu může porušení nastat a) přetržením výztuže nebo b) drcením betonu. Teoretickým případem porušení je c) současné (balanční) porušení výztuže i betonu, kdy je mezní přetvoření dosaženo v obou materiálech současně. Způsob porušení je determinován realizovanou plochou FRP výztuže v posuzovaném průřezu. Pokud je skutečné vyztužení větší než vyztužení v balančním stavu, poruší se prvek drcením betonu v oblasti tlačných vláken.

V dostupných návrhových podkladech je uvedeno tlakové porušení betonu jako žádoucí (viz doporučení [32] nebo [46]). Díky nižšímu modulu pružnosti FRP výztuže (ve srovnání s ocelí) souběžně dochází v tažené oblasti k viditelnému rozvoji trhlin.

Požadavek zahraničních směrnic na tlakové porušení převážně ohýbaného průřezu je však diskutabilní s ohledem na postupné snižování tahové únosnosti FRP výztuže v čase (viz idealizovaný návrhový diagram na obr. 3). Je zřejmé, že v průběhu životnosti konstrukce může dojít ke změně způsobu porušení průřezu a kolaps nastane (nežádoucím) přetržením FRP výztuže. Tahové porušení je náhlé⁴, což může být zásadní především pro konstrukce bez možnosti redistribuovat vnitřní síly. V tomto případě je požadováno zajištění vyšší míry bezpečnosti (viz [5] a [32]). Podrobněji k návrhu průřezu viz například [51], případně [44] aj.

V reálných aplikacích je také často nezbytné uvážit souběžné namáhání výztuže tahem i smykem. Například v případě prvků s předpjatou FRP výztuží na správné interpretaci této interakce závisí schopnost spolehlivě určit mezní únosnost dílce, jehož chování je v porovnání s běžným řešením odlišné [85]. Několik zahraničních studií poukázalo na skutečnost, že při kombinaci namáhání tahovou a posouvající silou se v závislosti na poměru složek zatížení významně mění/snižuje únosnost kompozitu, chování je nelineární (viz např. [57] nebo [107]).

4.2 Životnost a dlouhodobá spolehlivost FRP výztuže v betonových konstrukcích

Z hlediska bezpečného návrhu kompozitních výztuží je důležité uvážit, že i přes svoji vynikající odolnost proti např. elektrochemické korozi není tento materiál vnějším degradačním vlivům zcela netečný a dochází, shodně s dalšími materiály, k jeho postupné degradaci. Míru degradace přímo ovlivňuje typ a množství použitých vláken, typ matrice, kvalita kontaktu či výrobní postup. V zahraničí provedené výzkumy i vlastní realizované experimentální práce poukazují na skutečnost, že citlivé na působení těchto činitelů jsou především GFRP výztuže, resp. skleněná vlákna, významně méně pak velmi odolné výztuže na bázi uhlíkových vláken (CFRP výztuže), viz např. [45], [54], [55], [67], [66], [76], nebo [130]. Nevhodné pro dlouhodobé aplikace jsou polyesterové matrice [111].

⁴ Tahové porušení nastává v případě, kdy je skutečná plocha vyztužení menší než balanční plocha vyztužení (velmi však závisí, ve kterém časovém okamžiku bude balanční stupeň vyztužení stanoven a jaké tahové pevnosti do výpočtu vstoupí – krátkodobé/dlouhodobé).

Pro výstižný popis časově závislého chování kompozitu je, kromě typu samotné výztuže, nutno uvážit i míru aplikovaného zatížení, jeho typ (stálé, nahodilé, cyklické, mimořádné), dále vliv vlhkosti, teploty a alkality okolního prostředí (zejména v případě GFRP výztuže) a především požadovanou životnost navrhované konstrukce [46], [53], [52] nebo např. [76] a [24]. S ohledem na zajištění vzájemného spolupůsobení mezi FRP výztuží a okolním betonem hraje významnou roli i kontakt mezi těmito materiály a jeho citlivost na působení degradačních činitelů – viz např. studie [72], [71] nebo [87], [101].

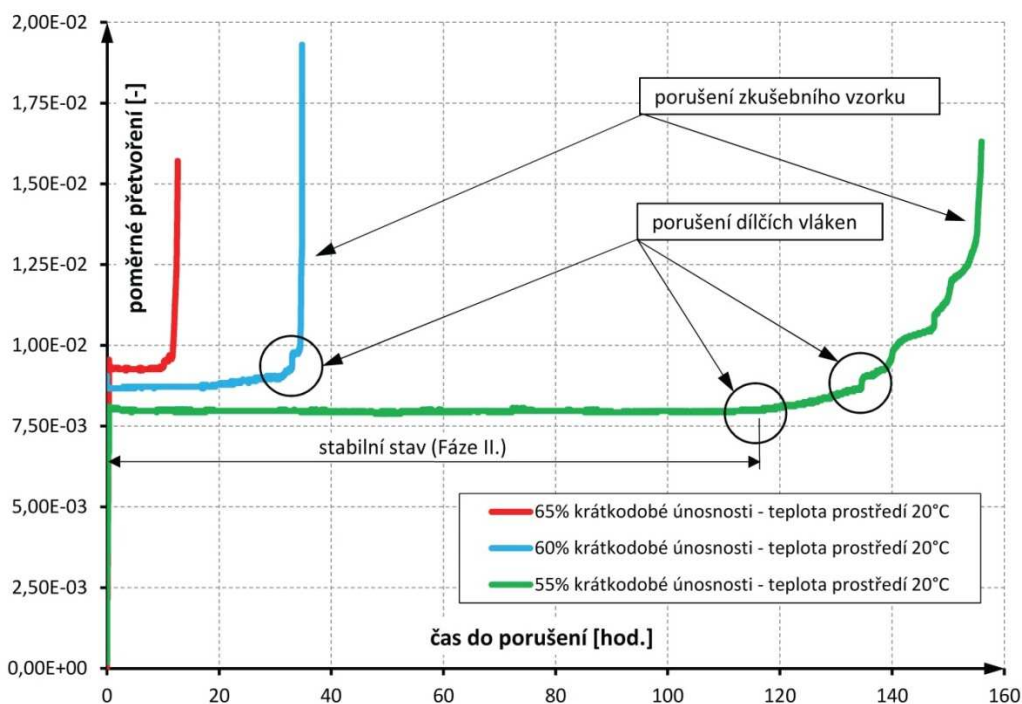
Z uvedeného je zřejmé, že hodnocení odolnosti FRP kompozitů v betonových konstrukcích je velmi komplexní úlohou.

4.2.1 Vliv dlouhodobě působícího zatížení (dotvarování výztuže)

FRP výztuže vystavené dlouhodobému působení zatížení budou (s ohledem na vlastnosti jednotlivých komponent) vykazovat nárůst deformace v čase – dochází k jejich dotvarování (tzv. „creep“ výztuže) – a při hladinách zatížení nižších, nežli je jejich krátkodobá tahová pevnost ve směru vláken, mohou náhle selhat. Pro definovanou hladinu dlouhodobě působícího zatížení tak musí být při návrhu zajištěno, že nedojde k náhlému porušení/přetržení výztuže před dosažením plánované životnosti konstrukce [46]. Toto chování je odlišné oproti běžné betonářské oceli [5]. Dotvarování vždy ovlivňují i okolní podmínky tj. např. přítomnost vlhkosti, alkálií aj. [46], [130], [45]. Především polymerní matrice jsou velmi náchylné k dotvarování [45], [76], [111]; vlákna (v závislosti na typu) naopak zvyšují odolnost výsledného kompozitu.

Průběh dotvarování v čase lze u kompozitních výztuží idealizovaně rozdělit do tří fází [46]. Po vnesení zatížení a tomu odpovídající okamžité elastické deformaci proběhne během krátkého časového intervalu po zatížení konstrukce časově závislá deformace s klesající intenzitou. Tato je způsobena redistribucí působícího zatížení z "měkké" matrice na nosná vlákna a je pro nízké hladiny přetvoření vratná [76]. Pro kompozitní materiály s vysokým podílem vláken je velikost přetvoření od dotvarování v této fázi nízká [46]. Druhá – stabilní – fáze je charakterizována velmi pozvolným nárůstem přetvoření po dlouhou dobu, kdy chování vzorku dominantně ovlivňují/řídí nosná vlákna. V této oblasti by se optimálně navržená FRP výztuž měla pohybovat po celou dobu její životnosti. V terciální fázi dochází k prudkému nárůstu deformace a postupnému porušování jednotlivých vláken a s tím související redistribuci sil v průřezu. Tento proces neodvratně vyústí v náhlé křehké selhání kompozitu.

Závislost přetvoření výztuže na aplikované hladině zatížení je dobře patrna z obr. 4, jenž zobrazuje typický záznam zkoušek vzorků GFRP výztuží. Zkoušky byly realizovány v průběhu let 2014 - 2017 v rámci řešení projektu TA04010881 „Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitečných vlastností“ [115].



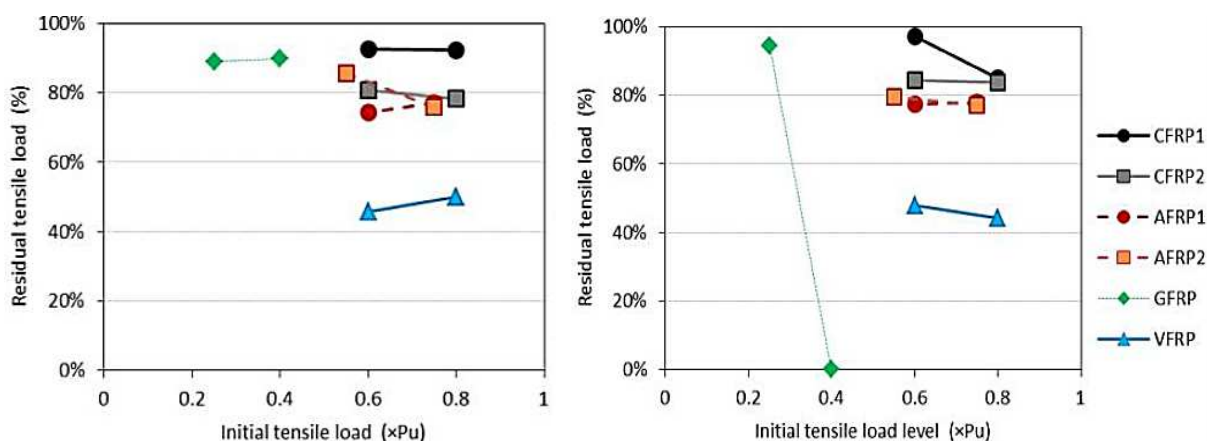
obr. 4: Závislost životnosti vzorku na hladině působícího napětí; vzorky: GFRP výztuž s VE matricí a ECR skleněnými vlákny

Z hlediska dlouhodobě bezpečného návrhu FRP výztuže je určení správné hladiny působícího zatížení zásadní. Vzorky zatížené pouze o cca 10 % nižší hladinou působícího zatížení vykazují řádově vyšší životnost; obr. 4. Je tak zřejmá nutnost definovat (a při návrhu uvážit) takové hodnoty dlouhodobě působícího zatížení (stanovit poměr dlouhodobě působícího zatížení k jednorázové únosnosti), aby po dobu plánované životnosti konstrukce nedošlo k náhlému/křehkému porušení výztuže dotvarováním.

Problematikou dotvarování FRP výztuže se doposud zabývala řada zahraničních studií. Sledováno bylo chování především GFRP výztuží, ale též CFRP či AFRP předpínacích lan; lze zmínit např. práce [30], [27], [130], [49]. Zkoušky dotvarování byly často prováděny (pro zvýšení přesnosti experimentu) v kombinaci s degradujícím médiem (voda, alkalický roztok, salinita; [29], [66], [130] nebo [87] a [100]). Většina prací však prezentuje poměrně krátkodobé záznamy, kdy testy byly realizovány v délkách stovek hodin až jednoho roku. Hodnoty pro životnost konstrukce 50 či 100 let jsou následně extrapolovány. Testy mohou být teplotně urychleny (podrobněji viz odstavec 4.2.2 a 4.2.6; [10], [43], [67], [103], [65], [42]).

Je vhodné poznamenat, že často užívaná americká směrnice ACI 440.1R-15 [5] při stanovení mezní přípustné hodnoty dlouhodobě působícího zatížení vychází z prací [129] a [109], případně [64], které byly realizovány v devadesátých letech na první generaci výztuží. Tyto teplotně urychlené testy měly délku cca 100 hodin, následně byly výsledky extrapolovány pro 50 let životnosti (výsledné hodnoty mezní přípustné hladiny dlouhodobě působícího zatížení pro GFRP, AFRP a CFRP dle [5] 0,29; 0,47 a 0,93). V případě [129] a [109] byly tyto testy provedeny na prutech velmi malých průměrů (studie [129] využila pruty průměru 6 mm, studie [109] pak pruty čtvercového průřezu o ploše pouze 4,4 mm²).

Velmi přínosnou dlouhodobou (experiment trvajícím 17 let) studii provedl (Sasaki, 2012); [106]. Autorovi není známa další studie s cílem popsat vliv dlouhodobě působícího zatížení s obdobným časovým rozsahem. Byly testovány různé typy výztužných vložek (CFRP, GFRP, AFRP a VFRP) na vzduchu (mořské podnebí) s vlivem/bez vlivu přímého slunečního svitu s různou hladinou působícího zatížení. Po 3,5, resp. 17 letech byly vzorky vyjmuty a testována jejich zbytková únosnost. U GFRP vzorků byly aplikovány dvě hladiny dlouhodobě působícího napětí: 25 a 40 % jejich krátkodobé únosnosti. Po 3,5 letech obě tyto skupiny vykazovaly obdobnou zbytkovou únosnost a přetvoření, avšak po 17 letech byl vzorek napnutý na 40 % porušen. Vzorek, který byl předepnut na 25 % mezní únosnosti, vykazoval stále velmi dobré mechanické charakteristiky a nejevil známky snížení reziduální únosnosti či poškození – viz obr. 5, zelené body.

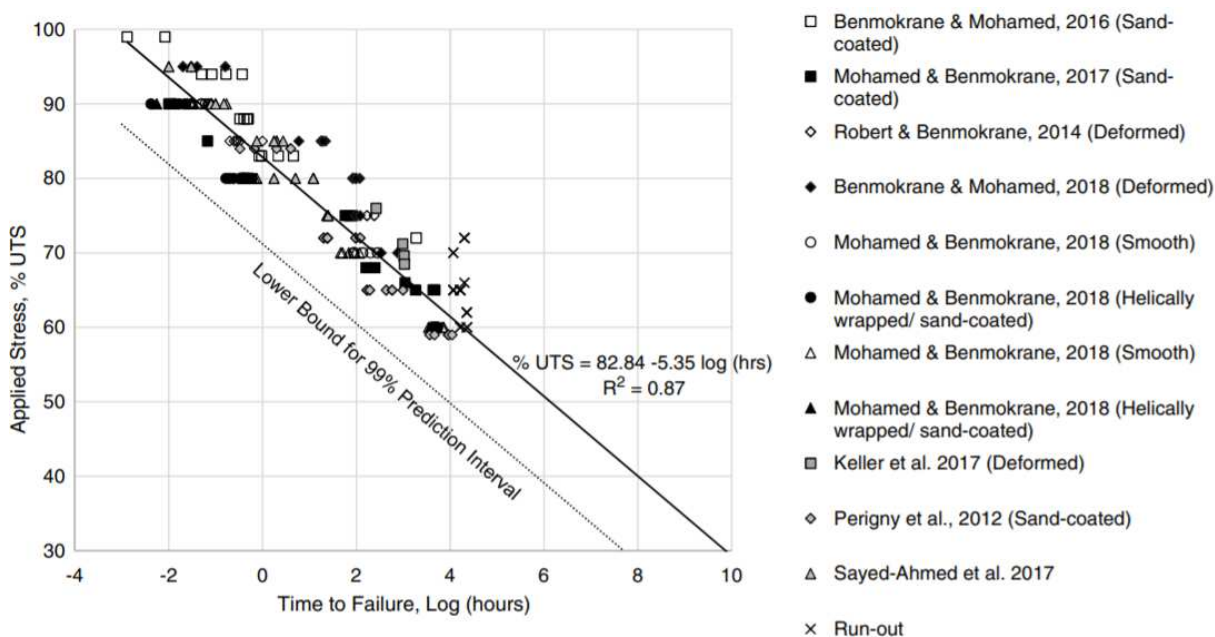


obr. 5: Reziduální únosnost vzorků po expozici na vzduchu (bez vlivu slunečního svitu) po 3,5 letech (vlevo) a 17 letech (vpravo); převzato [106]

Z uvedeného je zřejmé, že GFRP vzorky jsou velmi citlivé na náhlé porušení dotvarováním. Další typy výztužných prutů, byť byly napnuty na vyšší hladiny působícího napětí a z výsledků je patrna jejich citlivost na působící zatížení [106], po dobu experimentu

neselhaly. Z experimentu [106] je též zřejmá skutečnost, že není vhodné na životnost usuzovat pouze ze zbytkové únosnosti prutu po předem definované době působení dané hladiny zatížení. Tento závěr je zásadní, neboť většina výzkumných prací v minulých dekádách využívala právě metodiku stanovení reziduální únosnosti vzorku po definovaném čase expozice danému zatížení/prostředí. Na tomto principu jsou založeny též u nás nejčastěji užívané podklady pro realizaci dlouhodobých zkoušek [6], [32] a [70].

S ohledem na množství experimentálních dat je též významná práce [24], v rámci které autoři provedli vyhodnocení výsledků rozsáhlé databáze testů GFRP výztuží z E a ECR vláken. Matrice u všech vzorků byla shodná (vinylester). Ve studii byly zahrnuty vzorky od různých výrobců a s odlišnými povrchovými úpravami. Studie si kladla za cíl upozornit na již překonané hodnoty součinitelů omezujících dlouhodobě působící zatížení uvedené v ACI 440.1R-15 [5] – podrobněji o přístupu tohoto dokumentu viz odstavec 4.2.5⁵.



obr. 6: Závislost životnosti GFRP výztuže na hladině dlouhodobě působícího zatížení vyjádřená v hodinách (v log měřítku); převzato z [24]

Výsledná závislost životnosti GFRP výztuže (hodiny v log měřítku) na hladině dlouhodobě působícího zatížení je patrna z obr. 6 (převzato z [24]). Je dobře patrné, že střední hodnota přípustného napětí pro životnost 10^6 hodin (tj. 114 let) je cca 50 %. Autoři na základě výsledků studie doporučují změnit (zvýšit) v [5] uvedený limit pro přípustné dlouhodobě působící zatížení z $0,2 f_{fu}$ na $0,3 f_{fu}$.

⁵ Z tohoto důvodu byly ve studii hodnoceny pouze testy realizované bez vlivu degračního média a teplotního urychlení. Vliv prostředí je v rámci ACI 440.1R-15 uváděn odděleně součinitelem C_E .

Vliv na životnost vzorku má i orientace vláken, resp. způsob namáhání prutu. Hodnota dotvarování (s ohledem na vlastnosti matrice) významně roste při odklonu působící výslednice sil od podélné osy prutu, kdy únosnost závisí na odolnosti matrice. Tuto skutečnost je třeba zvážit především při návrhu spřahovacích trnů či zemních svorníků [114].

Využívané termosetické matrice (VE; EP; pro krátkodobé aplikace i PES) jsou v porovnání s termoplastickými maticemi odolnější, méně náchylné k dotvarování a vykazují lepší dlouhodobé chování [45], [111]. Negativně se však může projevit též nedokonalé vytvrzení matrice, kdy dochází k nízkému/neúplnému zasíťování polymeru s přímým negativním dopadem na odolnost/dlouhodobé chování výsledného produktu. Tato skutečnost byla ověřena při vlastních výzkumných pracích – vzorky vykazovaly zvýšenou citlivost při působení zatížení a vyšších teplot. Uvedené poznatky byly uvedeny např. v [118].

4.2.2 Vliv alkality, vlhkosti okolního prostředí a teploty

Podstatný vliv na výsledné hodnoty dlouhodobé tahové pevnosti má agresivita okolního prostředí, tj. v jakém prostředí se zatížená FRP výztuž nachází. Dominantní z tohoto hlediska je především vliv alkálií a také teploty, zmrazovacích cyklů a vlhkosti, např. [76] nebo [45].

Při hydrataci cementu v betonu vzniká hydroxid vápenatý a další hydratační produkty. V závislosti na složení betonu a druhu cementu se pH čerstvého betonu pohybuje v intervalu 10,5 až 13,5⁶. Toto alkalické, vysoce zásadité, prostředí betonu působí především na skleněná vlákna degraďačně, což se projevuje snížením jejich mechanických charakteristik [55] a v důsledku i snížením pevnosti v tahu výsledného kompozitu, např. [45], [81] nebo [76]. Bariéru pronikání alkalických iontů k nosným vláknům tvoří použitá matrice (především VE či EP pryskyřice), kdy tato vlastnost je především u GFRP výztuží klíčová. S ohledem na přítomnost pórů, kázů a mikrotrhlin v polymeru však zcela zabránit migraci roztoků s vysokou hodnotou pH a obsahem alkalických solí k vláknům nelze [112]. Pokud agresivní médium pronikne přes matrici k vláknům, způsobuje jejich křehnutí a snížení mezní tahové pevnosti (např. [27], [29] nebo [54] či [130]).

Uhlíková vlákna (CFRP výztuž) nejsou na působení alkálií citlivá a redukce únosnosti je řádově nižší [30], [23]. Alkálie rozpuštěné ve vodě však poškozují i rozhraní vlákno-pryskyřice, což vede ke zhoršení vlastností kompozitu v podélném směru (toto chování

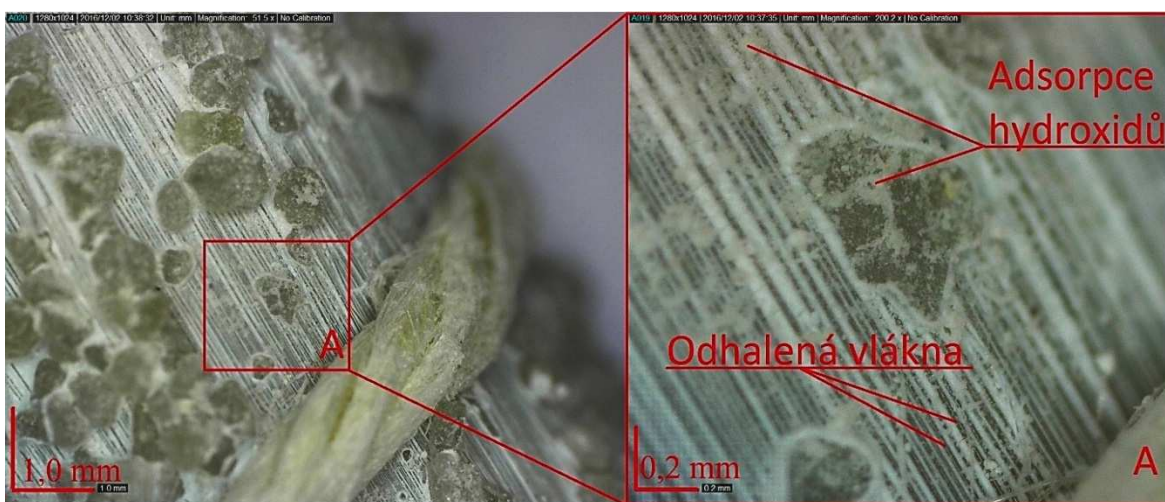
⁶ Nižší hodnoty pH a tím i podstatné snížení agresivity betonu vůči GFRP výztuži se dosáhne použitím cementů s částečnou náhradou portlandského slínku v cementu II. typu.

pravděpodobně způsobuje růst produktů hydratace na povrchu vláken, [76]). Z uvedeného vyplývá, že z hlediska degradace je zásadní přítomnost vody, tj. vlhkost daného prostředí.

Zřetelný rozdíl v povrchové struktuře degradovaných a referenčních vzorků uložených na vzduchu je patrný z obr. 7. Degradovaný povrch s odhalenými vlákny po expozici 365 dní ve vysoce alkalickém roztoku o teplotě 20 °C je zřejmý z obr. 8. Jedná se o fotografie vzorků GFRP výztuží ze sérií zkoušek, které byly realizovány v průběhu let 2014 – 2017 v rámci řešení projektu TA04010881 [115]. Zjištěné poznatky jsou blíže prezentovány v kapitole 5.1.



obr. 7: Vlevo: referenční GFRP výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu; vpravo: GFRP výztuž uložená 365 dní v alkalickém roztoku při teplotě 40 °C [115]



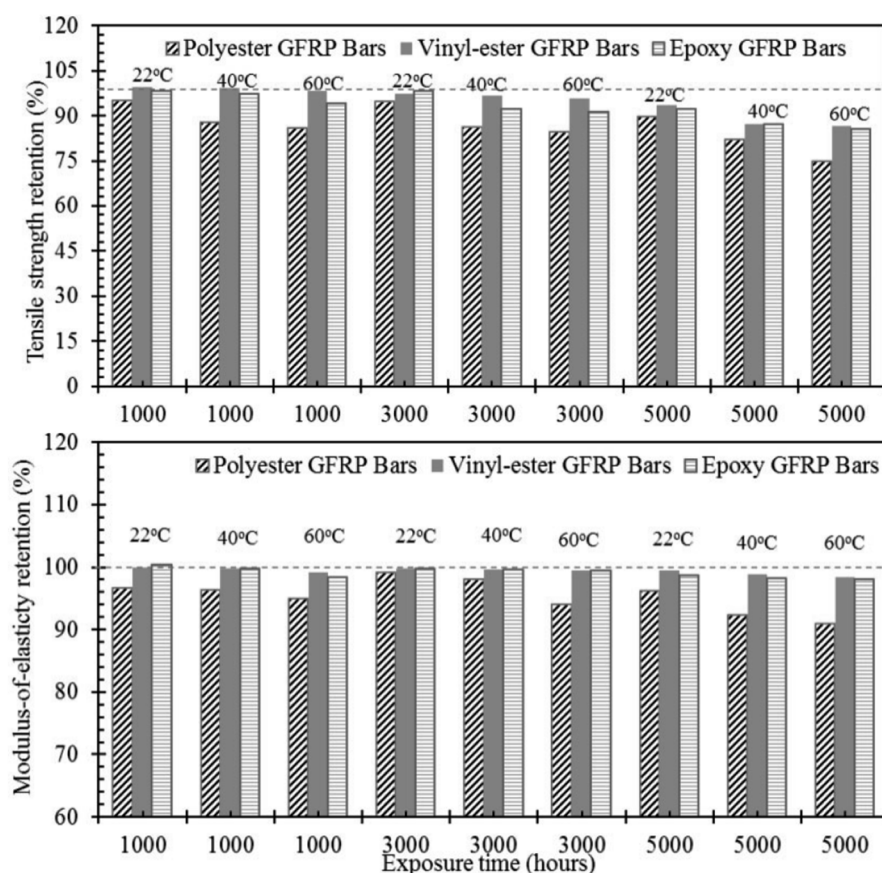
obr. 8: GFRP výztuž uložená v alkalickém roztoku; 20 °C (vlevo zvětšeno 50x; vpravo 200x), [115]

Míra degradace vzorku GFRP výztuže je silně závislá na okrajových podmínkách experimentu, [130], [66] nebo [102]. Dle [5] může redukce tahové únosnosti FRP výztuže variovat mezi 0 a 75 %! a to v závislosti na okrajových podmínkách a také kvalitě, typu a stáří výztuže a skutečnosti, zdali v průběhu testu působila zvýšená teplota [103].

Provedené (vlastní i zahraniční) výzkumy, např. [5], [45], [54], [10], [76] se shodují, že přítomnost agresivního média má podstatný vliv na redukci tahové pevnosti GFRP výztuže, avšak modul pružnosti není alkalickým prostředím zásadně ovlivněn. Výsledky získané pro VE i EP matrice oscilují kolem střední hodnoty odpovídající referenční hodnotě s malým variačním koeficientem, případně dochází k malému poklesu v jednotkách procent.

V rámci studie [10] bylo experimentálně ověřeno chování tří typů FRP výztuží s odlišnými matricemi (VE, EP a PES). Nezatížené vzorky byly uloženy v alkalickém roztoku o pH 12,8 a teplotě 22, 40 a 60°C. Zbytková únosnost byla ověřena po 1000, 3000 a 5000 hodinách. Výsledky jsou zřejmé z obr. 9. Je patrna redukce tahové únosnosti v závislosti na době expozice a téměř neměnná hodnota modulu pružnosti (platí pro VE a EP matrice); byla potvrzena nevhodnost využití PES matrice pro dlouhodobé aplikace v alkalickém prostředí.

Autoři také experimentálně ověřili platnost hodnot environmentálního součinitele C_E dle [5]; tj. $C_E = 0,7$ pro GFRP výztuž v betonu ve vnějším prostředí (vystavený vodě a zemině) a 0,8 pro konstrukce ve vnitřním prostředí. V [10] predikované hodnoty součinitele C_E pro různé prostředí a typy výztuží jsou uvedeny v tab. 2.



obr. 9: Změna tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti (dole) tří různých typů GFRP výztuže v alkalickém roztoku v závislosti na čase expozice; převzato z [10]

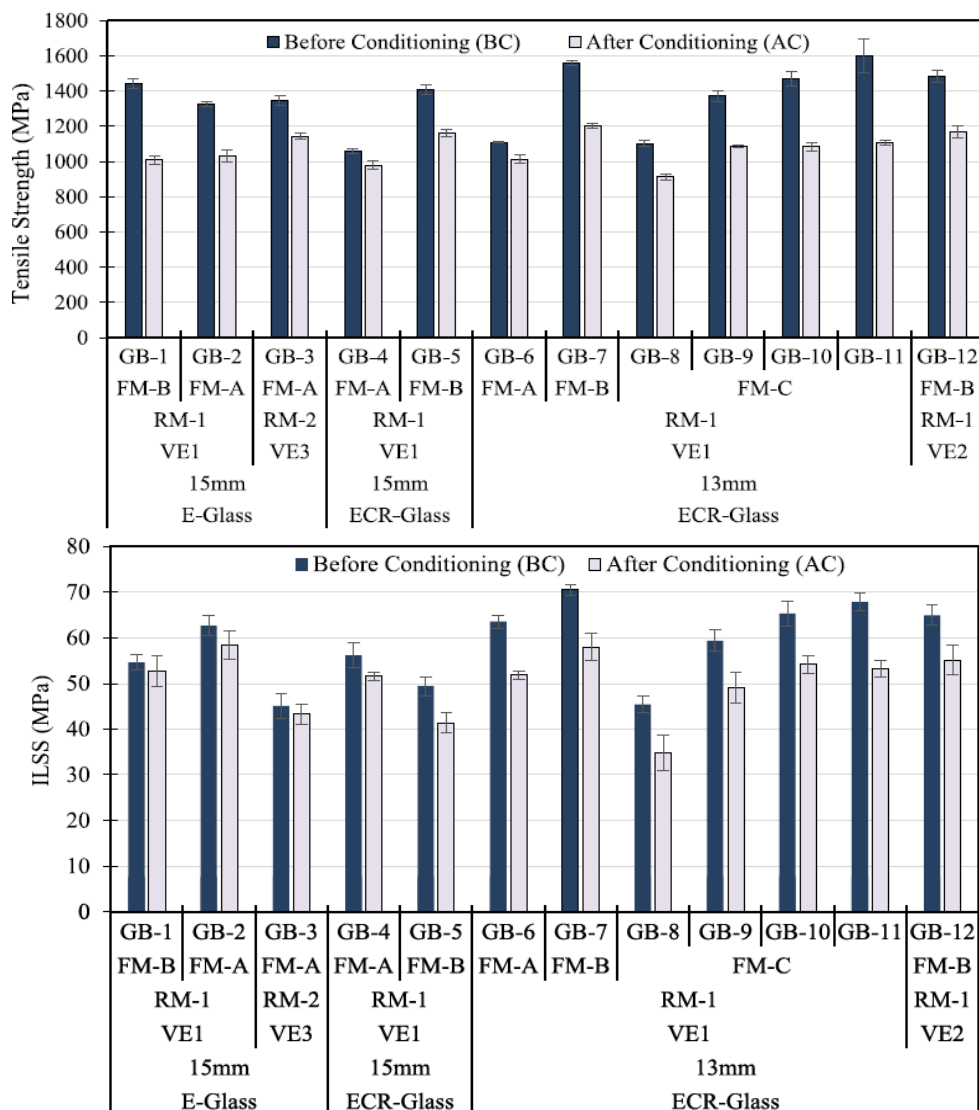
tab. 2: Součinitel C_E [5] pro odlišné teploty a vlhkosti (životnost 200 let); převzato z [10]

Type of bars	T (°C)	Environmental reduction factor (C_E)							
		100% RH	90% RH	80% RH	70% RH	60% RH	50% RH	40% RH	Less than 30% RH
Polyester GFRP	10	0.75	0.85	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	I
	30	0.71	0.83	0.88	0.91	0.94	0.96	0.98	I
Vinyl-ester GFRP	10	0.84	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98	0.99	I
	30	0.81	0.88	0.92	0.96	0.96	0.97	0.98	I
Epoxy GFRP	10	0.78	0.88	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	I
	30	0.75	0.85	0.89	0.93	0.95	0.97	0.98	I

GFRP: glass fiber-reinforced polymer; RH: relative humidity.

Rozsáhlá studie realizovaná na 24 typech FRP výztuží je prezentována v [25]. Cílem bylo ověřit platnost kritérií mezní redukce tahové únosnosti vlivem alkálií dle [33] a též vhodnost/vliv zvolené zkušební metody na kvantifikaci míry degradace vzorku. Testy prokázaly problematickou odolnost některých vzorků a též na podstatný vliv provedení kontaktní vrstvy mezi vláknem a maticí a složení matrice – viz obr. 10. Autoři též upozorňují na rozdílnost obdržných výsledků dle jednotlivých zkoušek. Jako vhodná pro ověření míry degradace se ukázala interlaminární smyková zkouška dle [13], která je velmi nenáročná na provedení i velikost vzorku (uvážena jako doplňková k tahové zkoušce dle [16]). Zkouška příčným smykem [18] byla klasifikována jako nevhodná, s nedostatečnou citlivostí.

[84] uvádí výsledky získané z dlouhodobého sledování reálných aplikací GFRP výztuže v betonových konstrukcích (mostní objekty, přístavní molo). U několika vybraných převážně mostních objektů v Kanadě (stáří objektů cca 5 až 8 let) byly zjištěné skutečnosti v rozporu se závěry o trvanlivosti GFRP výztuže zjištěné z urychlených zkoušek v koncentrovaných alkalických roztocích [84], [112]. Odebrané vzorky GFRP výztuží neprokázaly významnou redukci fyzikálních ani mechanických charakteristik [84]. Na základě těchto analýz bylo konstatováno, že obavy o trvanlivosti GFRP prvků v reálných aplikačních oblastech jsou neopodstatněné [112]. Autoři uvádějí, že důvodem může být menší pohyblivost OH^- iontů v betonu ve srovnání s roztoky užívanými při urychlených zkouškách. Na základě těchto výsledků došlo ke změně kanadské normy pro navrhování dálničních mostů [31], která povolila využití GFRP jako hlavní (i předepjaté) výztuže, [84] doporučuje jako maximální dlouhodobě působící zatížení 25 % - viz i [32], resp. [31]).



obr. 10: Vliv působení alkalického prostředí na tahovou pevnost (nahore) a interlaminární smykovou pevnost (dole) pro GFRP výztuž; převzato z [25]

Zvýšená teplota okolního prostředí působí jako akcelerační faktor probíhajících chemických dějů, čehož je s výhodou využíváno pro urychlení dlouhodobých testů, např. [67], [103], [87], [100], [11] nebo [10], [23]. Při návrhu je proto nezbytné uvážit, jaké reálné teplotě bude konstrukce v průběhu její životnosti vystavena (jsou předpokládány běžné podmínky aplikace, tj. teplota nedosahuje hodnot blízkých teplotě skelného přechodu matrice T_g).

Je třeba upozornit na skutečnost, že uvážení střední roční teploty při určení dlouhodobé tahové pevnosti dle [46] (s ohledem na nelineární závislost mezi působící teplotou a rychlostí degradace) může vést k podhodnocení míry degradace. Dle [126] je jako základní přiblížení doporučeno uvážit vztah

$$T_{rep} \approx T_{min} + 0,75 \cdot (T_{max} - T_{min}), \quad (1)$$

kde T_{rep} značí teplotu uváženou pro stanovení míry degradace (tj. přípustného zatížení prvku s ohledem na prostředí a požadovanou životnost) a T_{min} , resp. T_{max} , minimální/maximální očekávanou teplotu. Při návrhu je dle [126] vhodné rozlišit typ navrhovaného prvku, neboť např. GFRP výztuž v tenkém fasádním dílci bude vystavena vyšším teplotám (a tedy rychleji degradovat) než např. v případě základové konstrukce, tj. zohlednit expozici prvku s ohledem na oslunění a rovněž případně vzít v úvahu tloušťku prvku či velikost krycí vrstvy.

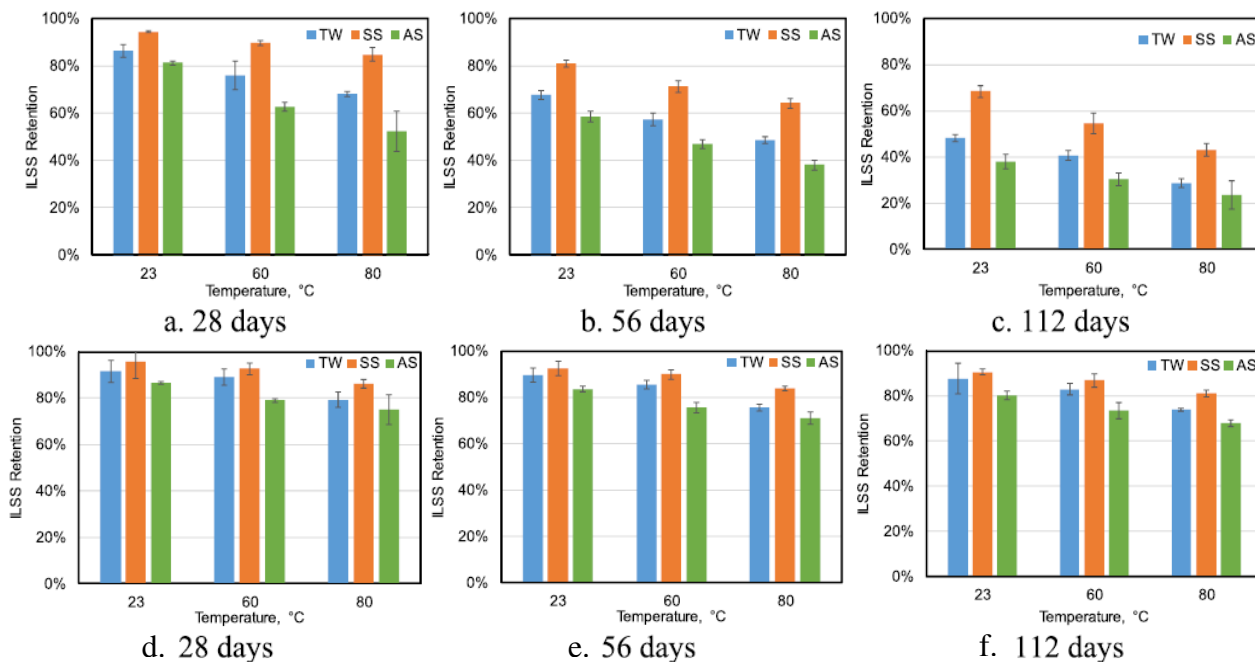
4.2.3 Degradace FRP výztuže ve skutečném prostředí betonové konstrukce – kombinovaný vliv působícího zatížení, alkality, vlhkosti a teploty

Je zřejmé, že při reálné aplikaci jsou kompozitní výztuže v betonové konstrukci vystaveny dlouhodobému působení zatížení při souběžném vlivu okolního prostředí (teplota, vlhkost, alkalita prostředí). Realistické (a tedy i výstižné) hodnoty je proto vhodné získat z kombinovaných dlouhodobých testů, které tyto vlivy zohlední a nikoliv z oddělených testů, jejichž výsledky jsou následně superponovány. Tento postup je doporučován i ve vybraných zahraničních studiích ([128], [127], [66] nebo [67]).

Zásadní se jeví též způsob, jakým je experimentálně simulováno prostředí skutečné betonové konstrukce. Zahraniční studie i vlastní výzkumné práce [115] poukazují na klíčový vliv přítomnosti betonové vrstvy. Např. (Manalo, 2020), [79] publikoval studii vlivu různých agresivních prostředí (voda; alkalický roztok; chloridy), teploty a betonové krycí vrstvy na pokles sledovaných mechanických charakteristik vzorků⁷. Závěry studie jednoznačně potvrdily nižší míru degradace vzorků s betonovou krycí vrstvou ve všech sledovaných prostředích – viz obr. 11. Ke shodným závěrům dospěli též autoři studie [132].

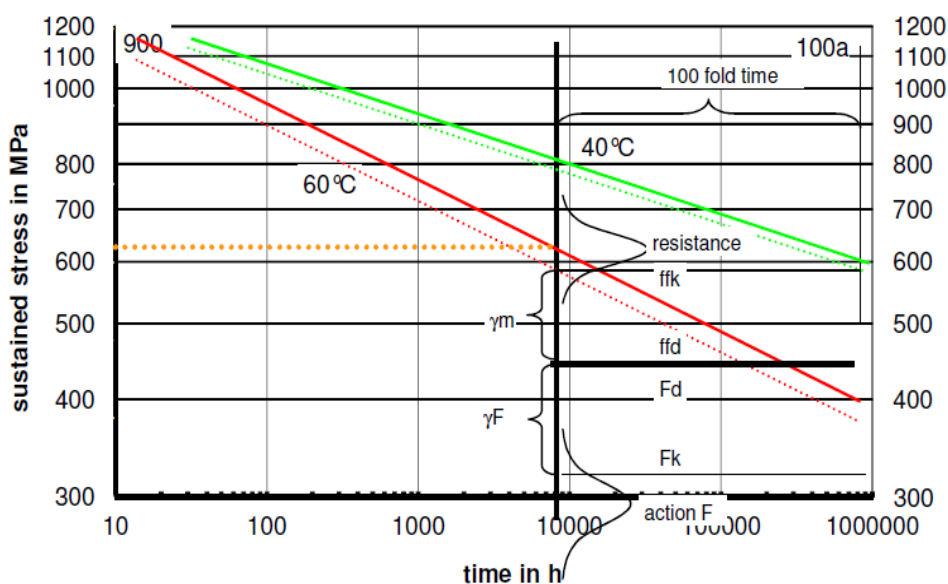
Závěry prezentované v [26] poukazují na skutečnost, že způsob porušení vzorku při dotvarování závisí na okolním prostředí a nejen na hladině působícího zatížení. Pokud je úroveň dlouhodobě působícího zatížení na vzorcích uložených v roztoku NaOH cca 20 až 30 % mezního jednorázového zatížení (platí pro GFRP výztuž), dochází k poškození vláken. V případě uložení ve vlhkém betonu dochází k poškození kontaktu mezi vlákny a maticí. Naopak vzorky vystavené vysokým hladinám působícího zatížení (přes 55 %) selhávaly porušením vláken i matrice.

⁷ Porovnání výsledků provedeno na základě experimentálně získané interlaminární smykové pevnosti na malých vzorcích.



obr. 11: Vliv degradačních prostředí na interlaminární smykovou pevnost pro GFRP výztuž; a. až c. – „holé“ vzorky bez krycí vrstvy; d. až f. vzorky s betonovou krycí vrstvou; převzato z [79]

Zohlednění všech aspektů, kterým je FRP výztuž v betonové konstrukci vystavena, má zásadní vliv na zjištěné dlouhodobé charakteristiky. Stanovení těchto charakteristik na základě komplexních experimentů a z nich získaných degradačních křivek umožňuje určení limitního dlouhodobě působícího zatížení na základě skutečně naměřených dat. Tato jsou následně statisticky vyhodnocena, přičemž je získána střední a charakteristická hodnota dlouhodobé tahové pevnosti (a variační koeficient obdržených výsledků) v souladu s [37].



obr. 12: Vliv hladiny působícího napětí, teploty a alkalického prostředí na životnost, převzato z [127] (f_{fk} – charakteristická dlouhodobá tahová pevnost; f_{fd} – návrhová dlouhodobá tahová pevnost)

Získaná závislost následně popisuje vliv aplikovaného napětí a prostředí (teplota, vlhkost, degradační médium) na životnost (tj. času do porušení výztuže). Tento přístup, jenž je z hlediska stanovení mezního dlouhodobě působícího zatížení nejvýstižnější, je v souladu s [37] a též uvedeným v [46] a [47]. Byl proto zvolen při vlastních výzkumných pracích [115]. Koncept je zřejmý z obr. 12 (převzato z [127]) pro výztuž ComBAR výrobce Schöck Bauteile GmbH. Prostedí betonu bylo simulováno alkalickým roztokem.

4.2.4 Degradace/časově závislé chování kontaktu beton – FRP výztuž

Jedním ze základních předpokladů návrhu vyztužené betonové konstrukce je kompatibilita přetvoření mezi betonem a FRP výztuží, která je zajištěna soudržností obou materiálů. Použití kompozitní výztuže (bez ohledu na typ a povrchovou úpravu) však vyžaduje modifikaci přístupu běžně používaného u ocelových žebírkových výztužných vložek, neboť mechanika přenosu sil z výztuže do okolního betonu je odlišná. Monotónní (krátkodobé) chování FRP výztuže v soudržnosti, resp. postup pro její stanovení, je dnes dobře popsáno a zakotveno v klíčových zkušebních a normách (např. [6], [70], [32], [46] aj.). Existuje řada typů zkoušek – pull-out testy (s centricky nebo excentricky uloženým prutem), prstencové pull-out testy (ring pull-out test), zkoušky soudržnosti při stykování výztuže přesahem (splice test) a nosníkové zkoušky – které lze pro stanovení potřebných charakteristik využít.

Jak bylo popsáno výše, důležitým faktorem potenciálně negativně ovlivňujícím dlouhodobou spolehlivost spolupůsobení obou materiálů je však alkalické prostředí betonu, které snižuje mechanické charakteristiky především GFRP výztuží.

Závěry z doposud provedených (ve světové literatuře dostupných) experimentů degradace kontaktu mezi GFRP výztuží a betonem jednoznačně míru snížení soudržnosti vlivem působení alkalického prostředí neurčují. Testované vzorky však byly často vystaveny degradačnímu prostředí jen po krátkou dobu (a bez vlivu působícího zatížení).

Ve studii [133] nebyl pozorován úbytek soudržnosti na vzorcích, které byly po zabetonování uloženy po dobu 90 dní v zásaditém roztoku při teplotě 20 °C. Shodný závěr je uveden v [20]. Redukce mezního napětí v soudržnosti na vzorcích, které byly holé uloženy do zásaditého roztoku po dobu 28 dní při teplotě 80 °C a poté zabetonovány, nebyla pozorována. Mechanické vlastnosti výztuží (tahová pevnost) však byly ovlivněny. Z výsledků je zřejmé, že zásadní vliv na obdržené výsledky má konfigurace experimentu.

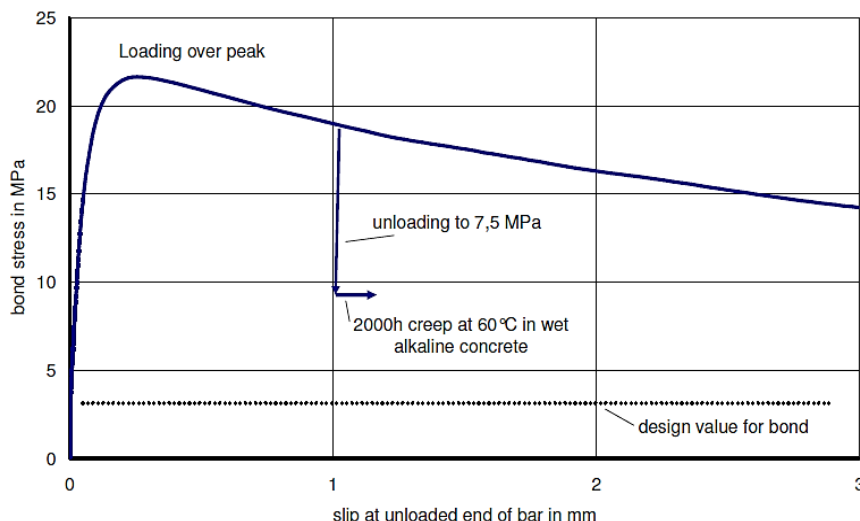
V rámci studie [87] byly testovány dva typy GFRP výztuží (E-sklo, VE matrice) s odlišnou povrchovou úpravou (opískování, helikální vyny) v konfiguraci pull-out testu dle [6], resp. [32]. Vzorky byly zabetonovány a ponořeny do 3 % slaného roztoku o teplotě 46 °C, při expozici degradačnímu prostředí nebyly zatíženy. Po 300 dnech expozice vzorky vykazovaly jen lehce nižší hodnoty mezního napětí v soudržnosti oproti referenčním. Došlo k poklesu mezního napětí maximálně o 6 %.

K odlišným závěrům došel autor této práce při testování vzorků GFRP výztuží s AR a E vlákny s opískovaným povrchem vystavených po dobu dvou let působení alkalického roztoku o teplotě 60 °C [71]. Redukce únosnosti kontaktu GFRP výztuží s E vlákny byla, dle očekávání, menší než 10 %, avšak u vzorků s AR vlákny došlo k redukci mezního napětí v soudržnosti o více než 40 % (viz i [115]). Uvedené výsledky jsou podrobněji uvedeny v odstavci 5.1.5. Z výsledků lze usuzovat, že zásadní vliv mohou mít použitá vlákna v průřezu FRP prutu.

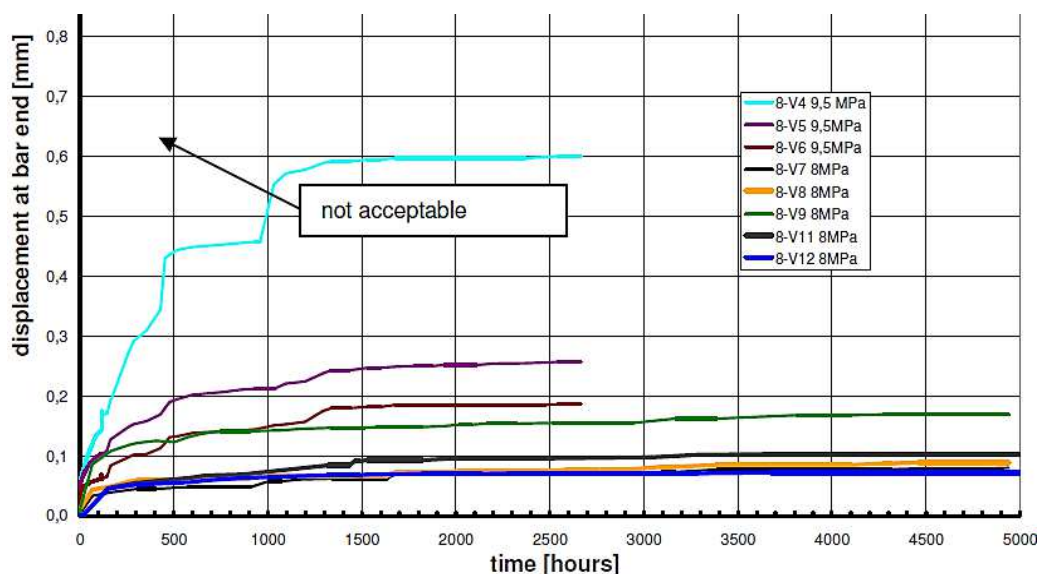
Existuje pouze limitovaný počet studií, které řeší chování kontaktu vnitřní FRP výztuže a okolního betonu při účinku dlouhodobě působícího zatížení – lze uvést například práce realizované na výztuži ComBAR německého výrobce Schöck Bauteile GmbH, [75] a [125].

Studie [75] měla za cíl ověřit chování kontaktu GFRP výztuže různých průměrů, který bude vystaven působení alkalického prostředí, zvýšené teploty a dlouhodobě aplikované hladiny působícího zatížení. Byl navržen zcela nový test, přičemž jako výchozí byla zvolena konfigurace tzv. pull-out testu dle [6], resp. [32]. Vzorky byly nejdříve předzatíženy (dosažen pokluz nezatíženého konce 1 mm), následně odlehčeny na hodnotu působícího napětí v soudržnosti cca 7,5 – 9,5 MPa s cílem tuto hodnotu držet minimálně 2000 hodin (viz obr. 13). Autoři po tuto dobu sledovali zvyšování pokluzu výztuže v kontaktu (tzv. creep kontaktu). Z výsledků je zřejmé, že pro napětí v soudržnosti nižší než 8 (7,5) MPa pro GFRP výztuže profilu 8 mm, resp. 16 mm a 9 MPa pro GFRP výztuže profilu 25 mm, nedocházelo ke zvyšování deformace a kontakt spolehlivě přenášel aplikované zatížení po dobu cca 5000 hodin, kdy byl test ukončen. Vyšší hladiny aplikovaného zatížení naopak vedly k pokluzu výztuže v kontaktu – viz obr. 14 pro GFRP výztuž profilu 8 mm.

Z výsledků autoři usuzují, že je zcela nezbytné omezit dlouhodobě působící hladinu napětí v kontaktu, resp. při návrhu FRP výztuže uvážit jako potenciálně limitující nejen creep/degradaci samotné výztuže, ale i mezní napětí v soudržnosti.



obr. 13: Průběh zatěžování dlouhodobého testu soudržnosti GFRP výztuže; převzato z [75]



obr. 14: Závislost pokluzu výztuže na čase působícího zatížení, GFRP 8 mm, plně saturovaný beton o teplotě 60°C, předzatížené vzorky (posun v kontaktu 1 mm); převzato z [75]

4.2.5 Stanovení návrhové dlouhodobé únosnosti FRP výztuže dle dostupných podkladů

Zjednodušeně lze celý problém stanovení dlouhodobé únosnosti kompozitu definovat jako potřebu určení vhodného součinitele redukujícího jednorázovou/okamžitou tahovou únosnost (viz odstavec 4.1, obr. 3), s ohledem na očekávané okrajové podmínky, kterým bude výztuž vystavena po dobu životnosti stavby. Při jeho určení by mělo být zohledněno především:

- způsob provedení a materiál navržené FRP výztuže (typ vláken – GFRP/CFRP, typ matrice, povrchová úprava aj.);
- požadovaná životnost (dočasná, trvalá aplikace);
- uvážení expozice (vnitřní/vnější prostředí, vlhkost, teplota, pH okolního prostředí);

- typ působícího zatížení (statické, dynamické, cyklické/únavové; poměr velikosti stálého/nahodilého zatížení);
- geometrie výztužného elementu (průměr výztuže, přímá nebo ohnutá FRP výztuž);
- případné další faktory ovlivňující chování kompozitu v čase (fáze výstavby, změny namáhání apod.).

V následujícím textu je uveden přístup ke stanovení dlouhodobé tahové pevnosti dle podkladů [3], [5], [32], [46], [47], [73] a [121], přičemž výčet není absolutní, prezentovány jsou pouze v současnosti nejčastěji používané/aktuální postupy. Jedná se o:

- ACI 440.1R-15 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [5];
- CSA S806-12 (17): Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers [32], resp. ISIS Canada - Reinforcing Concrete Structures with FRP [44];
- AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete (2nd Edition) z roku 2018 [3];
- *fib* Bulletin No. 40 – FRP Reinforcement in RC Structures [46] s přihlédnutím k *fib* Model Code 2010 [47];
- JSCE: Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials [73];
- CNR-DT 203/2006: Guide for the design and Construction of Concrete Structures reinforced with FRP Bars [121].

Omezení, především pro nejčastěji používanou GFRP výztuž, jsou v některých případech velmi přísná (především [5]), jednotlivé přístupy navíc vykazují značný rozptyl získaných hodnot, přičemž některé nemají přímou návaznost na skutečné chování výztuže. Stručné shrnutí redukčních součinitelů pro stanovení dlouhodobé tahové pevnosti dle výše zmíněných směrnic je provedeno v tab. 3.

Pro modelovou situaci vnější aplikace ve vlhkém prostředí⁸ a uvedené přístupy [5], [32], [46], [47], [73], [121] a [3] jsou pro názornost vyčísleny hodnoty redukce dlouhodobé návrhové tahové pevnosti FRP výztuže – viz tab. 4. Z uvedeného je patrný rozptyl výsledných hodnot, které lze na základě využití uvedených postupů odhadnout. Tyto oscilují mezi 14 až 30% referenční (krátkodobé) pevnosti pro GFRP výztuž, resp. 49,5 až 65% pro CFRP výztuž.

⁸ Běžné aplikace FRP výztuže odpovídající třídě prostředí XC3 či XC4 dle ČSN EN 206+A1. Hodnoty vyčísleny pro nejčastěji používané výztuže typu GFRP a CFRP a předpokládanou životnost stavby 100 let při průměrné roční teplotě 10 °C (cca průměrná roční teplota v ČR).

tab. 3: Stanovení dlouhodobé pevnosti dle různých návrhových podkladů; kde $f_{fl,k}$ značí krátkodobou charakteristickou tahovou pevnost (5% kvantil); $f_{fl,d}$ krátkodobou návrhovou tahovou pevnost (0,1% kvantil); η_a , $\eta_{env,t}$ resp. C_E redukční součinitele vlivem prostředí; $\gamma_{M,f}$ materiálový součinitel

Norma/směrnice	Prostředí	Typ výztuže		poznámka
		GFRP	CFRP	
ACI 440.1R-15	Suché	$0,2 \times C_E f_{fl,d}$ $C_E = 0,8$	$0,55 \times C_E f_{fl,d}$ $C_E = 1,0$	Jako výchozí uvážena tzv. zaručená tahová pevnost, tj. cca návrhová hodnota dle ČSN EN 1990 (0,1% kvantil)
	Vlhké	$0,2 \times C_E f_{fl,d}$ $C_E = 0,7$	$0,55 \times C_E f_{fl,d}$ $C_E = 0,9$	
CSA S806-12(17)	-	$0,25 \times f_{fl,d}$ (SLS) nebo 2‰ z dlouhodobě působícího zatížení	$0,65 \times f_{fl,d}$	$f_{fl,d}$ odpovídá cca návrhové hodnotě dle ČSN EN 1990 (0,1% kvantil); pro GFRP nutno uvážit omezení přetvoření 2‰ od dlouhodobě působících zatížení
AASHTO 2 nd 2018	-	$0,3 \times C_E f_{fl,d}$ $C_E = 0,7$	-	dtto ACI 440.R-15
fib MC 2010	-	$0,3 \times f_{fl,k} / \gamma_f$	$0,8 \times f_{fl,k} / \gamma_f$	$\gamma_{M,f} = 1,25$
fib Bulletin No.40	-	$f_{fl,k} / (\eta_{env,t} \gamma_f)$ $\eta_{env,t} \approx 1,1 \div 3,0$; $\gamma_f = 1,25$		Přesný postup viz [46]
CNR-DT 203/06	Suché	$0,3 \times \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,8$	$0,9 \times \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 1,0$	
	Vlhké	$0,3 \times \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,7$	$0,9 \times \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,9$	
JSCE	-	= 0,8 × charakteristická hodnota dlouhodobé pevnosti určené ze zkoušek		$\leq 0,7 \times f_{fl,k}$

tab. 4: Vyčíslení dlouhodobé pevnosti dle aktuálních návrhových podkladů (% z krátkodobé); GFRP a CFRP výztuž, vnější (mokrý) podmínky aplikace, životnost 100 let, průměrná teplota 10°C

Norma/směrnice	Prostředí	Typ výztuže		poznámka
		GFRP	CFRP	
ACI 440.1R-15	Suché	16	55	Jako výchozí (100 %) uvážena tzv. zaručená tahová pevnost, tj. cca návrhová hodnota dle EN 1990 (0,1 % kvantil)
	Vlhké	14	49,5	
CSA S806-12(17)	-	25	65	Výchozí hodnota (100 %) odpovídá cca návrhové hodnotě dle EN 1990 (0,1 % kvantil) pro GFRP nutno uvážit omezení přetvoření na 2‰ od dlouhodobě působících zatížení
AASHTO 2 nd 2018	Vlhké	21	-	postup dtto ACI 440.R-15
fib MC 2010	-	24	64	Jako výchozí (100%) uvážena charakteristická hodnota tahové pevnosti; $\gamma_{M,f} = 1,25$
fib Bulletin No.40	mokrý, R10=5%	-	56,5	Přesný postup viz [16]; jako výchozí (100%) uvážena charakteristická hodnota tahové pevnosti Uvážené prostředí: mokrý podmínky aplikace ($n_{Mo} = 1$); životnost 100 let ($n_{SL} = 3,0$); teplota průměrná $T = 10^\circ C$ ($n_T = 0$); $\gamma_{M,f} = 1,25$
	mokrý, R10=15%	30,1	-	
	mokrý, R10=25%	14,2	-	
CNR-DT 203/06	Suché	16	60	$\gamma_{M,f} = 1,50$
	Vlhké	14	54	
JSCE	-	= 0,8 × charakteristická hodnota dlouhodobé pevnosti určené ze zkoušek		$\leq 0,7 \times f_{fl,k}$

Nejnižší hodnoty jsou získány dle ACI 440.1R-15 [5]. Tato směrnice omezuje dlouhodobě působící tahové zatížení pro GFRP výztuž na 20 % zaručené (návrhové krátkodobé) pevnosti (hodnoty pro další typy výztuže viz [5], resp. tab. 3). Při zohlednění environmentálního součinitele C_E klesá maximální přípustná hodnota dlouhodobě působícího zatížení na 14 (vlhké), resp. 16 % (suché prostředí). Tyto hodnoty jsou určeny bez přímé návaznosti na oblast aplikace (pouze rozdělení na suché/mokrý prostředí) a požadovanou/předpokládanou životnost konstrukce (předpokládá se vyšší než 50 let). Limity byly stanoveny v devadesátých letech na základě urychlených degradačních zkoušek na první generaci GFRP výztuží ([129] a [109], případně [64]). Dle názoru autora této práce však tento postup plně nezohledňuje vlastnosti moderních GFRP výztuží, které dosahují vysokých krátkodobých tahových pevností a vykazují i dobré chování při dlouhodobém zatěžování, a též nové poznatky oboru. Tato skutečnost se plně projevuje v nesouladu [5] se zkušební ACI 440.3R-12 [6]⁹.

Norma CSA S806-12 (17) [32] připouští již vyšší využití FRP výztuže. Pro charakteristickou kombinaci zatížení je v [32] jako limitní definována hodnota pro GFRP 25 % z krátkodobé návrhové hodnoty tahové pevnosti; pro CFRP pak 65 % – viz tab. 3. Norma také omezuje mezní protažení GFRP výztuže od dlouhodobě¹⁰ působících zatížení a to hodnotou 2‰. Tato může být pro výztuže ze skleněných vláken s očekávaným modulem pružnosti cca 50 až 60 GPa v řadě aplikačních oblastí (s předpokládaným převládajícím stálým zatížením) limitující.

Nově vydaná příručka *American Association of State Highway and Transportation Officials* [3], která vychází z přístupu [5] a je určena pro návrh GFRP výztuže v mostních objektech, ve druhém vydání z roku 2018 zvyšuje přípustné dlouhodobě působící zatížení a to oproti [5] (a též předchozí verzi příručky AASHTO z roku 2009) o padesát procent na 0,3 násobek zaručené tahové pevnosti výztuže - viz tab. 3. Pro běžné GFRP výztuže ve vnějších podmínkách (typicky mostovky) je tedy limitní napětí na úrovni max. 21 % krátkodobé návrhové pevnosti. Uvedené zvýšení limitních hodnot reflektuje aktuální poznatky získané na posledních generacích GFRP výztuží, které prokázaly významně lepší odolnost při

⁹ Blíže je popsáno v odstavci 4.4.2.

Při respektování doporučení uvedených v ACI 440.3R-12 a ACI 440.1R-15 při návrhu GFRP výztuže může dojít k situaci, kdy dlouhodobé testy ověřující odolnost výztuže v daném prostředí budou provedeny na nižší hladině zatížení, než na které bude konstrukce provozována. Tato skutečnost nastává u GFRP výztuží poslední generace, které jsou dnes na trhu (modul pružnosti 50 až 60 GPa; krátkodobá tahová pevnost > 1000 MPa).

¹⁰ Jako dlouhodobě působící zatížení je uváženo veškeré působící stálé zatížení a 20 % z nahodilého zatížení (není-li stanoveno přesněji).

působení alkálií. Zvýšení přípustné hladiny působícího napětí bylo též zapříčiněno velmi dobrými výsledky získanými na vzorcích odebraných in-situ na reálných mostních objektech [84].

fib Model Code 2010 [47] kompozitní výztuž uvažuje (z hlediska návrhu) jako rovnocennou alternativu k oceli, což je zásadní posun oproti předchozímu *fib* Model Code 1990, z něhož vychází stávající generace návrhových norem ČSN EN. Zjednodušeně je v [47] jako limitní pro omezení hladiny dlouhodobě působícího zatížení uvedena hladina 30 % pro GFRP, resp. 80 % pro CFRP z charakteristické krátkodobé tahové únosnosti. Zároveň se však odkazuje na uvedené ve *fib* Bulletin no. 40 [46], který uvádí podrobný postup výpočtu této hodnoty.

Postup určení mezního dlouhodobě přípustného napětí uvedený v [46] zohledňuje vlivy jednotlivých degradačních činitelů (vlhkost, teplota či požadovaná délka životnosti konstrukce). Tím, na rozdíl od [5], [32] či [3], umožňuje stanovit hodnotu lépe odpovídající podmínkám, kterým bude výztuž po dobu své životnosti vystavena. Návrh, jenž vychází z degradačních zkoušek daného typu výztuže, tak ve svém důsledku dovoluje více využít potenciál FRP výztuže. Zřejmá je tato skutečnost z uvedeného v tab. 4, kdy na základě experimentálně stanovené hodnoty poklesu tahové pevnosti za dekádu životnosti na logaritmickém měřítku (hodnota R_{10}) je pro dva rozdílné případy GFRP výztuže (kvalitní GFRP výztuž s $R_{10} = \max. 15 \%$; méně kvalitní GFRP výztuž s $R_{10} = 25 \%$) vyčíslena mezní dlouhodobá tahová pevnost na úrovni 30,1, resp. 14,2 % krátkodobé pevnosti. Postup však klade zvýšené nároky na experimentální program a jeho robustnost, resp. množství údajů poskytovaných výrobcem.

S ohledem na komplexnost přístupu a variabilnost pro různé okrajové podmínky aplikace byl tento přístup využit i v rámci výzkumných činností autora realizovaných ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. při vývoji nové generace GFRP výztuže – viz uvedené v odstavci 5.1 [115]. Z tohoto důvodu je v odstavci 4.2.5.1 postup dle [46] podrobněji rozepsán.

4.2.5.1 Stanovení dlouhodobé únosnosti FRP výztuže dle *fib* Bulletin no. 40 [46]

Návrhová dlouhodobá hodnota tahové pevnosti výztuže $f_{fl,d}^{LT}$ pro požadovanou životnost konstrukce se dle [46] má stanovit jako charakteristická krátkodobá pevnost $f_{fl,ko}$ (určená v souladu s [37]) redukovaná součinitelem expozice prostředí $\eta_{env,t}$ a materiálovým součinitelem γ_f a to dle vztahu

$$f_{fL,d}^{LT} = \frac{f_{fL,k0}}{\eta_{env,t} \cdot \gamma_f} \quad (2)$$

Zásadní pro spolehlivé určení požadované dlouhodobé pevnosti je součinitel $\eta_{env,t}$. Tento může být při znalosti (experimentálně určené) charakteristické hodnoty pevnosti výztuže vystavené agresivnímu prostředí a zatížené po dobu 1000 hodin $f_{fL,k1000h}$ stanoven ze vztahu

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fL,k0}}{f_{fL,k1000h}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^n} \quad (3)$$

kde R_{10} značí pokles únosnosti vzorku za dekádu na logaritmičtém měřítku a exponent n zohledňuje vliv okolního prostředí (výpočet exponentu n je uveden v [46] a též v [51]). Je nezbytné upozornit na skutečnost, že při určení součinitele n je třeba brát zřetel na podmínky, při kterých byla hodnota R_{10} , resp. $f_{fL,k1000h}$ experimentálně získána. Zásadní je teplota, druh výztuže a typ alkalického prostředí (alkalický roztok, plně nasycený beton apod.). Pokud tyto nejsou při návrhu známy, měla by být uvážena konzervativní hodnota. Nekvalitní GFRP výztuže (technologie první generace těchto materiálů) vykazují obvykle pokles za dekádu cca 25 %, u GFRP výztuže poslední generace s vysokou kvalitou výroby a vstupních surovin je pak možno uvážit $R_{10} =$ cca 15 %. 5 % redukci únosnosti za dekádu je možno očekávat pouze u uhlíkových CFRP kompozitů (viz např. [126], [46]).

V případě, že není známa dlouhodobá únosnost FRP výztuže v tahu pro čas 1000 hodin $f_{fk1000h}$, může být dle [46] využit vztah

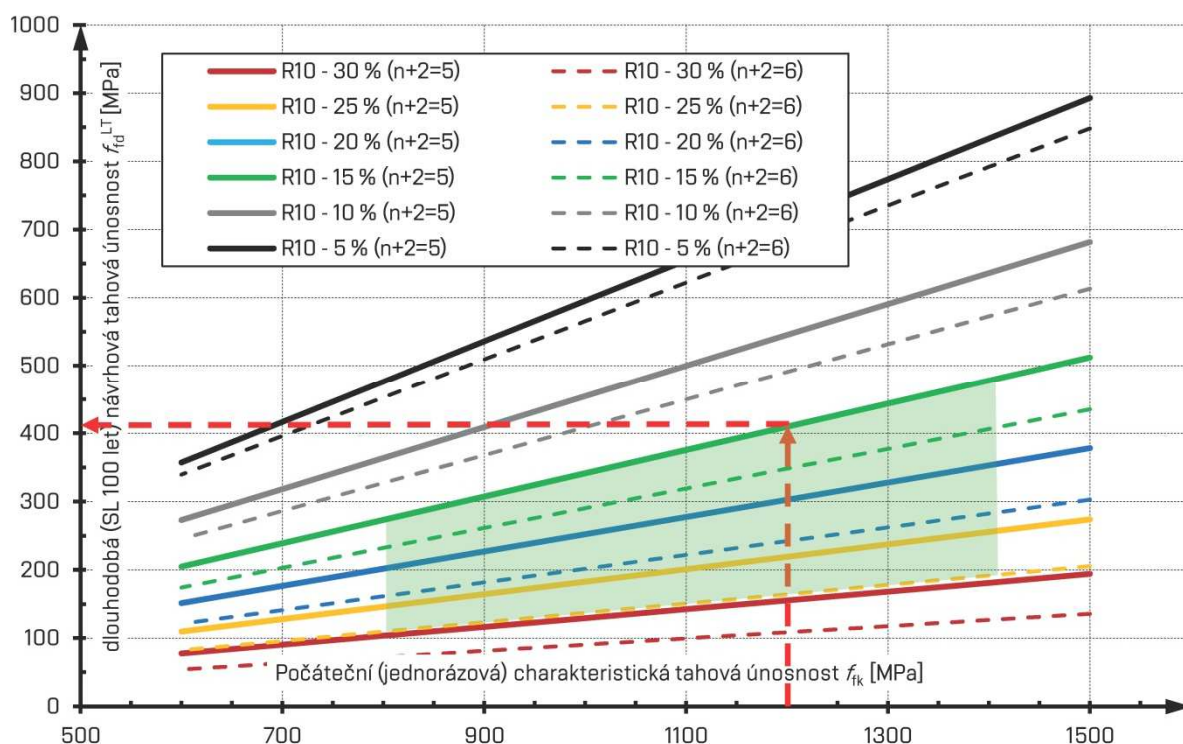
$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^{n+2}} \quad (4)$$

Vztah (4) ale vždy nemusí vést k výstižným (tedy ani bezpečným) hodnotám. Z hlediska optimálního návrhu GFRP výztuže je proto vhodné, aby výrobce byl schopen projektantovi hodnotu dlouhodobé (alespoň 1000 hodin teplotně neurychleného testu v alkalickém prostředí dle [70] či [6]) přímo měřené tahové pevnosti výztuže poskytnout. Testy by měly být vždy prováděny nezávislou institucí. Požadovaný interval cca tisíc hodin pro upřesnění predikce se jeví jako dostatečný s ohledem na spolehlivost získaného výsledku a zároveň se zdá být i rozumným kompromisem s ohledem na náročnost certifikačních zkoušek (viz i [46]). Studie [128] doporučuje jako vhodné prostředí pro dlouhodobé testy FRP výztuže plně nasycený beton, tj. provedení zkoušky dle modifikovaného postupu B.8 dle [6] (resp. [70]), kdy je zohledněn vliv působícího zatížení i alkálií (dle B.6-C; [6]).

4.2.5.2 Vliv změny vstupních parametrů na predikci dle *fib* Bulletin no. 40 [46]

Pro názornost a snazší aplikaci výše uvedeného postupu byla na základě vztahu (4), tj. bez znalosti skutečné hodnoty tahové pevnosti po 1000 hodinách expozice danému prostředí při současném působení zatížení, vyjádřena závislost mezi krátkodobou charakteristickou pevností $f_{t,k0}$ a dlouhodobou návrhovou tahovou pevností GFRP výztuže $f_{t,d}^{LT}$ a to pro různé (obvyklé) hodnoty R_{10} a počáteční tahové pevnosti $f_{t,k0}$ (viz obr. 15).

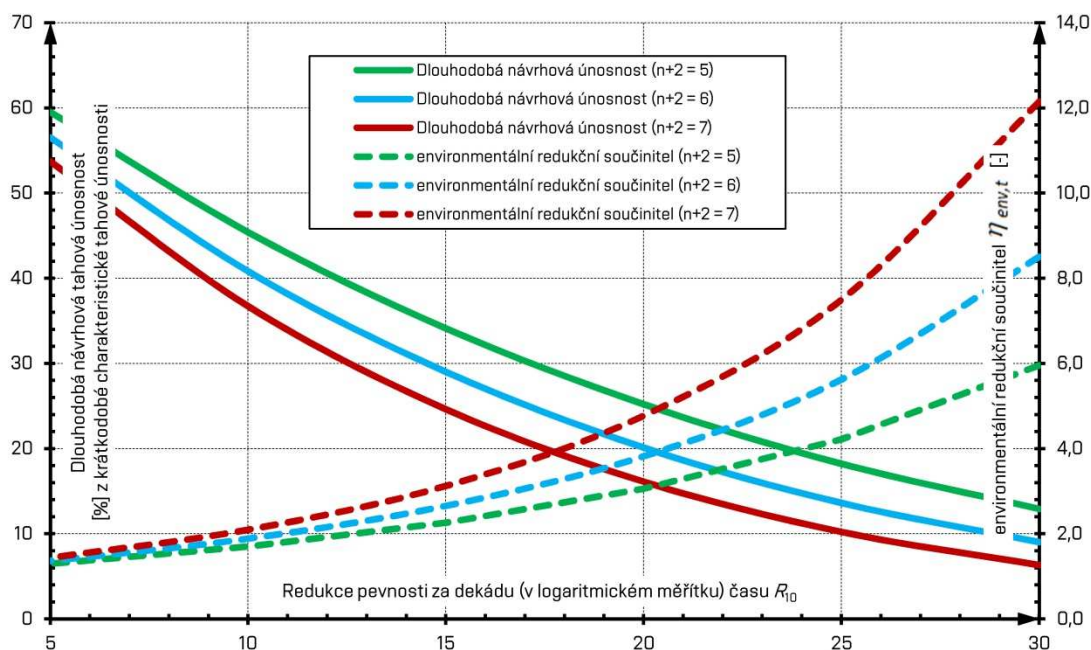
Z tab. 5 (zeleně podbarven očekávaný interval výskytu hodnot pro běžnou GFRP výztuž) a obr. 16 je pak zřejmá závislost hodnoty součinitele $\eta_{env,t}$ na hodnotě R_{10} , která (velmi zjednodušeně) poukazuje na kvalitu dané výztuže. Při stanovení návrhové hodnoty byl uvážěn materiálový součinitel γ_f v hodnotě 1,25 (v souladu s doporučením [47] a [46]). Exponent n byl do výpočtu zaveden v alternativních hodnotách 3, 4 a 5, kdy tento by měl být stanoven výpočtem s ohledem na požadovanou životnost, okolní teplotu a podmínky expozice (viz [46]).



obr. 15: Návrhová dlouhodobá tahová pevnost stanovená dle vztahů (2) a (4) pro různé R_{10} a $n=3$, resp. $n=4$ (pozn: zeleně podbarven očekávaný interval výskytu hodnot pro běžnou GFRP výztuž); [52]

tab. 5: Součinitel expozice prostředí dle vztahu (4) pro různé hodnoty R_{10} a n ; (pozn: dlouhodobá návrhová únosnost je určena jako % z počáteční charakteristické tahové pevnosti; zeleně podbarven očekávaný interval výskytu hodnot pro běžnou GFRP výztuž); [52]

součinitel expozice prostředí	redukce R_{10} [%]					
	(redukce R_{10} určena na základě zkoušek v alkalickém prostředí při souběžném působení zatížení)					
	30	25	20	15	10	5
$\eta_{env,t}$ ($n+2 = 5$)	5,95	4,21	3,05	2,25	1,69	1,29
Dlouhodobá návrhová únosnost [%]	13,4	18,9	26,2	35,4	47,2	61,9
$\eta_{env,t}$ ($n+2 = 6$)	8,50	5,62	3,81	2,65	1,88	1,36
Dlouhodobá návrhová únosnost [%]	9,4	14,2	20,9	30,1	42,5	58,8
$\eta_{env,t}$ ($n+2 = 7$)	12,14	7,49	4,77	3,12	2,09	1,43
Dlouhodobá návrhová únosnost [%]	6,5	10,6	16,7	25,6	38,2	55,8



obr. 16: Závislost hodnoty environmentálního redukčního součinitele $\eta_{env,t}$ a dlouhodobé návrhové tahové pevnosti $f_{j,i,d}^{LT}$ na hodnotě redukce pevnosti za dekádu R_{10} a velikosti exponentu n ; [52]

4.2.5.3 Zhodnocení dostupných podkladů s ohledem na výstižnost predikce

Poznatky získané celosvětově pro poslední generaci FRP výztuže se pozitivně promítají do nové řady dokumentů určených pro návrh GFRP – CSA S806-12 (17) [32]; AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete [3] a fib Model Code 2010 [47]. Je zcela zřejmý trend zvyšovat přípustné hladiny dlouhodobě působícího zatížení a dovolit tak vyšší využití FRP výztuže. Tento trend je nejvíce patrný především u GFRP výztuže, která je na působení dotvarování i alkálií velmi citlivá.

Dokladem tohoto může být i nové vydání kanadské normy CSA S807-19 [33] z roku 2019, která definuje požadavky na FRP výztuže. Ta, na základě aktuálních výzkumů, z nichž významné byly citovány výše v textu, nově zvyšuje minimální požadavky na GFRP výztuže a jejich odolnost proti působení alkáliím, resp. působení dlouhodobého zatížení a také minimální tahové pevnosti, resp. moduly pružnosti pro zařazení do definovaných tříd. Také poprvé definuje limity pro BFRP výztuž.

4.2.6 Modely pro predikci dlouhodobého chování FRP výztuže – urychlené testy

Pro bezpečný návrh FRP výztuže v betonových konstrukcích je zcela nezbytné korektně popsat její dlouhodobé chování. Avšak s ohledem na nutnost degradaci vyčíslit pro horizont životnosti konstrukce 50 – 100 let a absenci dlouhodobé historické zkušenosti (resp. experimentu) s využitím těchto materiálů je nezbytné na tuto usuzovat především na základě střednědobých testů¹¹. S ohledem na tuto skutečnost je velmi výhodné využít tzv. (teplotně) urychlené testy [42].

Pro stanovení míry degradace FRP výztuže pomocí urychlených testů je možno využít několik metod, které obecně využívají principu umístění výztuží do alkalických roztoků za současného působení zvýšené teploty (případně aplikované hladiny zatížení) kdy tato slouží jako tzv. akcelerační faktor (např. [43], [67], [103], [65], [42]; akcelerace testu teplotou je využita též např. v postupech prezentovaných v [6] a [32]). Teoretickým základem predikce dlouhodobých vlastností při působení zvýšené (akcelerující) teploty, případně zatížení, je předpoklad, že existuje přímá závislost mezi změnou sledovaných mechanických charakteristik kompozitu a změnou na úrovni chemického složení, případně mikrostruktury materiálu [65]. Působením akceleračních činitelů pak dochází ke zvýšení rychlosti chemické reakce a tím i k úměrnému zvýšení rychlosti degradace kompozitu.

Degradační modely pro predikci dlouhodobého chování FRP vnitřní výztuže lze obecně rozdělit do dvou základních skupin: a) modely založené na stanovení míry poklesu únosnosti po expozici vzorku (nejčastěji využívané, tzv. „strength-retention“ modely; viz odstavec 4.2.6.2.2) a b) na stanovení rychlosti/míry absorpce vlhkosti do těla výztuže (tzv. „moisture absorption“; odstavec 4.2.6.2.1) [110]. Nejčastěji užívané modely jsou založeny na principu popsaného tzv. Arrheniovou rovnicí – viz odstavec 4.2.6.1 [42].

¹¹ Jako střednědobé jsou pro účely tohoto textu uváženy testy v intervalu 10³ až 10⁴ hodin.

4.2.6.1 Arrheniova rovnice

Obvykle užívané modely pro stanovení „akceleračního faktoru“ (tj. míry urychlení testu) vycházejí z Arrheniovy rovnice. Z této lze odvodit, že zvýšení teploty okolního prostředí vede ke zvýšení rychlosti degradace [67]. Veškeré modely založené na této rovnici předpokládají, že jediným mechanismem ovlivňujícím rychlost degradace (tj. probíhající chemické reakce) je zvyšující se teplota a že tento mechanismus se v průběhu času nemění [23], [65]. Volba příliš vysoké teploty okolního prostředí však může vést k nereálné degradaci vzorku a tím i výraznému podhodnocení jeho životnosti [103]. Vždy je tedy nutno zohlednit limitující fyzikální vlastnosti testované FRP výztuže. Je doporučeno, aby pro korektní predikci dlouhodobého chování byly zvoleny tři různé úrovně teploty [23]. Na hodnotu výsledného akceleračního faktoru má vliv složení testované FRP výztuže, velikost vzorku, okrajové podmínky (teplota, vlhkost, typ roztoku) aj.

Arrheniova rovnice nabývá tvaru

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (13)$$

kde: k je rychlostní konstanta degradace (1/čas),
 A konstanta degradačního procesu pro daný materiál,
 E_a aktivační energie reakce,
 R univerzální (molární) plynová konstanta a
 T teplota v kelvinech.

Rovnice (13) může být upravena do tvaru

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}, \quad (14)$$

$$\ln\left(\frac{1}{k}\right) = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} - \ln(A). \quad (15)$$

Z rovnice je po úpravě zřejmé, že logaritmus času potřebného pro změnu materiálové vlastnosti je lineární funkcí $1/T$ s velikostí směrnice E_a/R [65].

Pro dvě odlišné teploty expozice může být na základě vztahu (13) vyjádřen tzv. akcelerační faktor (AF ; někdy nazývaný též TSF – *time shift factor*; [42], [43]), který vyjadřuje míru urychlení probíhajících procesů:

$$AF = \frac{k_1}{k_0} = \frac{A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT_1}\right)}{A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT_0}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right]. \quad (16)$$

Ve vztahu (16) značí index 0 hodnotu náležející nižší teplotě a index 1 teplotě vyšší.

4.2.6.2 Degradční modely pro predikci dlouhodobého chování

4.2.6.2.1 Modely založené na stanovení rychlosti absorpce vlhkosti do těla výztuže

V [120] je navržen model založený na absorpci vlhkosti do těla FRP výztuže. Tento vychází z předpokladu, že degradačním roztokem nasycená oblast je zcela poškozena a není schopna přenášet tahová napětí, naopak oblast nenasyčená je zcela nepoškozena a vlastnosti odpovídají počátečním. Princip metody je zřejmý z obr. 17. Hloubka poškozené/degradované zóny x lze dle [120] stanovit na základě vztahu

$$x = \sqrt{2 \cdot D \cdot C \cdot t}, \quad (17)$$

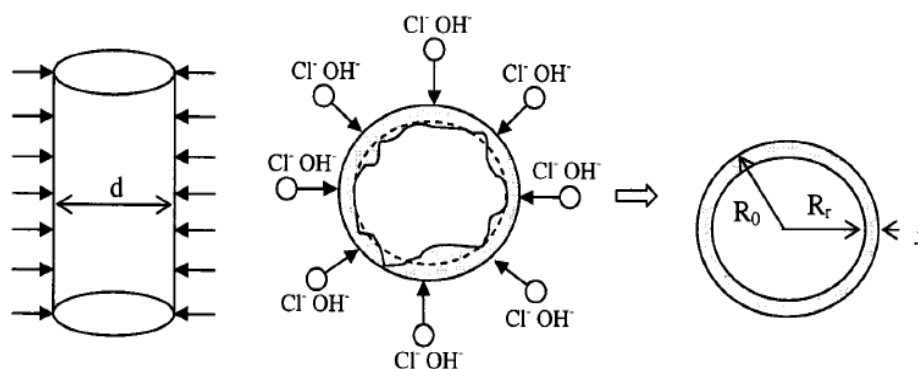
kde C značí koncentraci degradačního roztoku; t čas expozice a D koeficient difuze, který lze vyjádřit ve tvaru

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{R \cdot T}\right). \quad (18)$$

Ve vztahu (18) ΔH značí aktivační energii difuze. Výsledná míra snížení tahové pevnosti (sledované vlastnosti) v % lze vyčíslit na základě vztahu

$$Y = 100 \cdot \left(1 - \frac{x}{r_0}\right)^2 = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{2 \cdot D \cdot C \cdot t}}{r_0}\right)^2, \quad (19)$$

kde Y značí míru snížení sledované vlastnosti (tahové pevnosti) v % a r_0 je poloměr testované FRP výztuže.



obr. 17: Difuze jontů z degradačního roztoku do tělesa výztuže; převzato z [65]

Autoři ve článku [28] však uvádějí, že zavedené zjednodušující předpoklady mohou významně podhodnocovat skutečné chování výztuže. Navíc je obtížné získání materiálových koeficientů D a C , které musí být získány z oddělených testů. Vztah též nelze využít, pokud je degradačním médiem destilovaná voda, kde nabývá součinitel C nulové hodnoty.

4.2.6.2.2 *Modely založené na určení zbytkové únosnosti („strength retention“)*

V zahraniční literatuře je prezentováno několik modelů pro predikci dlouhodobého chování FRP výztuže založené na určení zbytkové únosnosti vzorku po expozici danému prostředí, kdy tyto využívají principu popsaného Arrheniovou rovnicí (odstavec 4.2.6.1).

Ve studii [22] byl navržen vztah pro stanovení dlouhodobé životnosti FRP materiálu ve tvaru

$$Y = a \cdot \log(t) + b, \quad (20)$$

kde Y značí míru snížení sledované vlastnosti (tahové pevnosti) v % v lineárním měřítku, t je čas vystavení danému prostředí (životnost) uvážený v logaritmickém měřítku a a , resp. b jsou konstanty. Při použití lineární regrese musí být dosaženo indexu spolehlivosti $R^2 \geq 0,80$ [22], [11]. Model byl poprvé použit pro predikci chování/degradace betonu s rozptýlenými skleněnými vlákny, v současnosti je to i velmi rozšířený model pro FRP výztuže [42]. Tento přístup má však i svá omezení. Jde pouze o reprezentaci údajů získaných ze zkoušek, přičemž neřeší fyzikální podstatu mechanismu degradace. Vztah také není vhodný pro časy blízké nule. Některé dostupné práce poukazují na skutečnost, že byl-li tento model aplikován na výsledky dlouhodobých testů GFRP výztuží pro různé teploty, vykreslené přímky nebyly rovnoběžné, což naznačovalo, že se degradační mechanismus s dobou expozice změnil. To je ale v rozporu se základním předpokladem pro využití vztahu (13), tj. zachování konzistentního mechanismu degradace [42].

V rámci studie [110] byl z tohoto důvodu vztah (20) upraven a pro vykreslení experimentálně získaných dat uvážena i míra redukce (retence) sledované charakteristiky – reziduální tahové pevnosti – v logaritmickém měřítku. Model dle [110] lze zapsat ve tvaru

$$\log Y = a \cdot \log(t) + b. \quad (21)$$

V práci [110] navržený postup stanovení dlouhodobé tahové pevnosti FRP výztuže je využit i v rámci doporučení *fib* Bulletin no. 40 [46].

Existuje i několik dalších přístupů, které lze pro predikci dlouhodobého chování kompozitní výztuže využít. Jedná se například o model [63], který byl nově navržen pro zohlednění skutečného chování FRP výztuže v reálných podmínkách a podstatnému zpřesnění redukčního environmentálního součinitele C_E uváženého v [5]. Navržený přístup dovoluje zohlednit vliv projektované životnosti konstrukce, teploty a relativní vlhkosti prostředí; přístup vychází z práce [43].

Srovnání různých modelů a výstižnosti jejich predikce pro CFRP předpínací lana je uvedeno např. v článku [11]. Pilotní srovnání teplotně urychlených experimentů s dlouhodobě měřenými daty na první generaci vláknových kompozitů lze nalézt např. v [78].

4.3 Únosnost FRP výztuže při namáhání kombinací tahové a posouvající síly

Jak bylo stručně zmíněno v odstavci 4.1, kompozitní výztuže, které jsou vyráběny z dlouhých nosných vláken vzájemně pojených polymerní matricí, dosahují zcela odlišných vlastností při namáhání ve směru vláken a ve směru na ně kolmém. V podélném směru je tahová únosnost limitována dosažením mezního přetvoření nosných vláken, přičemž dochází k jejich křehkému porušení, naopak při působení příčného namáhání je únosnost limitována vlastnostmi matrice; vlákna se na přenosu smykových sil přímo nepodílejí [46], [124]. Některé provedené experimenty však poukazují na pozitivní vliv vláken jako filleru – vyšší smykové únosnosti je dosaženo při použití vláken s vyšší tuhostí [77]¹². Významné, s ohledem na porušení prvku, též může být smykové namáhání v rovině průřezu (interlaminární/podélný smyk), tj. oddělení jednotlivých vrstev kompozitu rovnoběžně s vlákny. Únosnost je v tomto případě namáhání dominantně řízena kvalitou kontaktu vláken a matrice; [46], [6], [123].

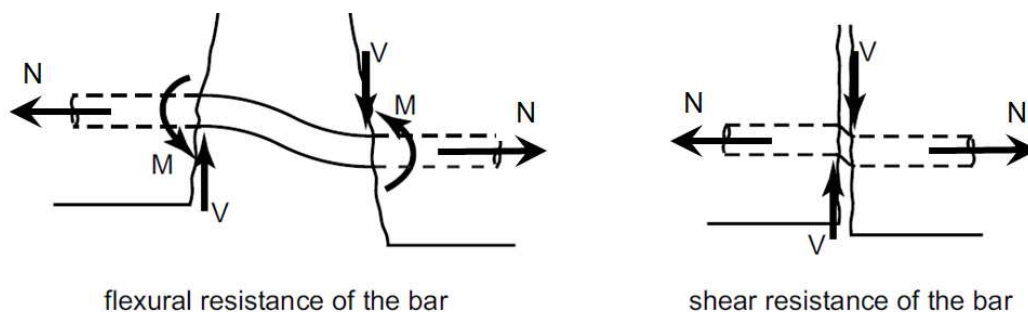
V reálných aplikacích je často nezbytné uvážit kombinované namáhání výztuže tahem i smykem (příčným, případně podélným). Kombinace tahového a smykového namáhání nastává v případě řešení tvarovaných FRP prutů – nejčastěji třmíneků, kdy k této interakci dochází v místě ohybu prutu (kombinace působení tahu a příčného i podélného smyku). V této oblasti byla provedena celá řada experimentů a teoretických studií realizovaných na betonových nosnících, kdy bylo sledováno integrální chování celého systému, případně na jednotlivých třmíncích s cílem stanovit míru redukce tahové únosnosti prutu v místě ohybu; např. [8], [82], [69] a [68], či [99]. Tyto studie však neměly za cíl kvantifikovat velikost působícího smykového napětí a jeho vliv na změnu tahové únosnosti prutu¹³.

Namáhání FRP výztuže kombinací tahového napětí a příčného smyku (stříhu) je nutno řešit v oblasti, kde výztuž prochází trhlinou (viz obr. 18). Tento typ namáhání je též relevantní

¹² Vlákna však při tomto typu namáhání způsobují také koncentrace napětí v matrici.

¹³ Řešena je obvykle otázka vlivu jednotlivých parametrů výztuže v místě ohybu (vliv geometrie - poloměr ohybu, průměr prutu; vliv povrchové úpravy, zkušební metody aj.) na míru snížení tahové únosnosti výztužného elementu; resp. na chování celého betonového nosníku.

například pro kotevní prvky (horninové kotvy, fasádní kotvy apod.). Například v případě prvků s předpjatou FRP výztuží na správné interpretaci tohoto chování závisí schopnost spolehlivě určit mezní únosnost dílce v oblasti podpory. Chování nosníků s podélnou FRP výztuží je v porovnání s běžným řešením odlišné – viz např. studie [86] realizovaná na prvcích vyztužených předepjatou CFRP výztuží, nebo např. [4] či [80], kdy cílem bylo kvantifikovat chování jednosměrně pnutých desek/trámů s podélnou GFRP výztuží v případě smykového porušení. Tyto experimenty (a celá řada dalších) však byly realizovány na celých betonových vzorcích s cílem posoudit komplexní chování vzorku a vliv využití FRP výztuže na celkovou/globální únosnost. Nebyla experimentálně řešena závislost mezi velikostí působícího smykového a tahového napětí, která je však např. pro návrh kotev velmi důležitá.



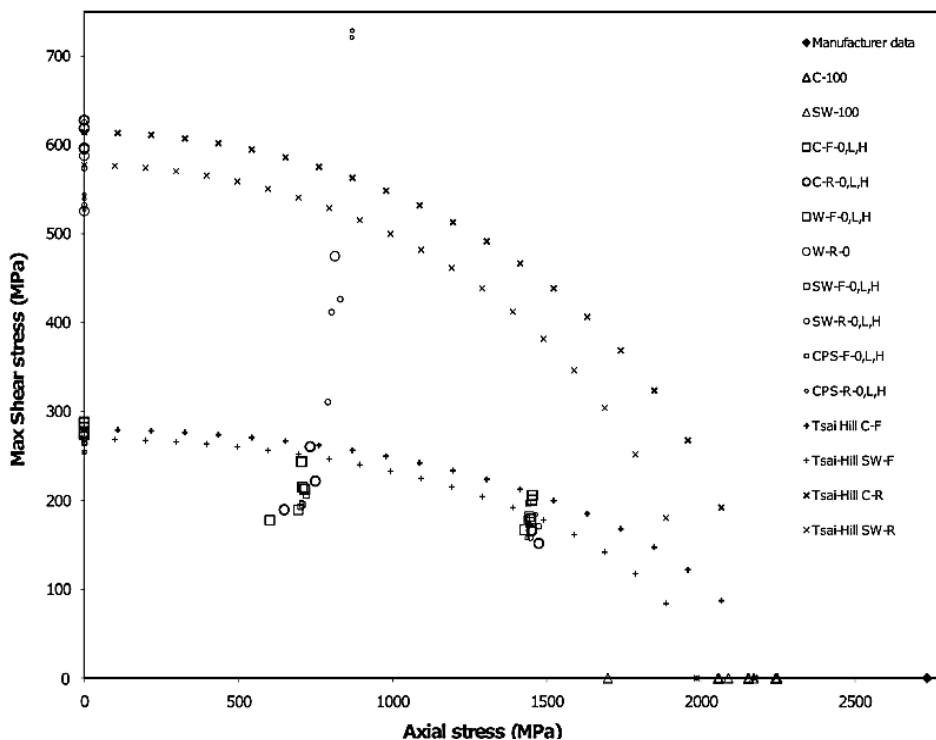
obr. 18: Mechanismus působení podélné výztuže v místě trhliny (převzato úpravou z [46])

4.3.1 Interakce tahové a posouvající síly – dostupné experimentální studie

V oblasti interakce tahové a posouvající síly (a vlivu této interakce na únosnost kompozitu) bylo doposud realizováno pouze omezené množství experimentálních studií; např. [108], [50], případně [122]. Bylo prokázáno, že při kombinaci namáhání normálovou (tahovou) a posouvající silou se v závislosti na poměru složek zatížení (a tedy odklonu výslednice působící síly od podélné osy prutu) významně mění únosnost kompozitu, tj. působící tahová složka napětí významně ovlivňuje smykovou odolnost prutu (a naopak).

Studie [108] realizovaná na CFRP předpínacích výztužích poukazuje na značný vliv tvaru vzorku (testovány ploché a kruhové průřezy strun) a velikosti působící normálové síly – uvedené je dobře patrné z obr. 19. Vzorky byly nejdříve předepnuty na požadovanou hladinu předpínací síly (voleny dvě hladiny na úrovni cca 30 a 60 % mezního tahového napětí) a následně stanovena jejich smyková únosnost. Tato byla při aplikaci definované hladiny tahové síly vždy nižší než referenční únosnost v čistém střihu bez vlivu působící tahové síly (vyjma dvojice kruhových vzorků na hladině předpětí 30 %). U plochých strun se zjištěné mezní smykové napětí pohybovalo mezi 61 – 70 % referenčního (hladina předpětí 60%), resp.

65 – 80 % při hladině 30 %. U kruhových profilů bylo stanoveno smykové napětí na úrovni 26 – 34 % (hladina předpětí 60 %), resp. 66 – 135 % referenční hodnoty (hladina 30 %). Byl pozorován vliv velikosti působícího zatížení na způsob porušení vzorku a také významný rozptyl výsledků především v případě kruhových průřezů.



obr. 19: Závislost mezi působícím smykovým a tahovým napětím získaná z testů CFRP předpínací výztuže; převzato z [108]

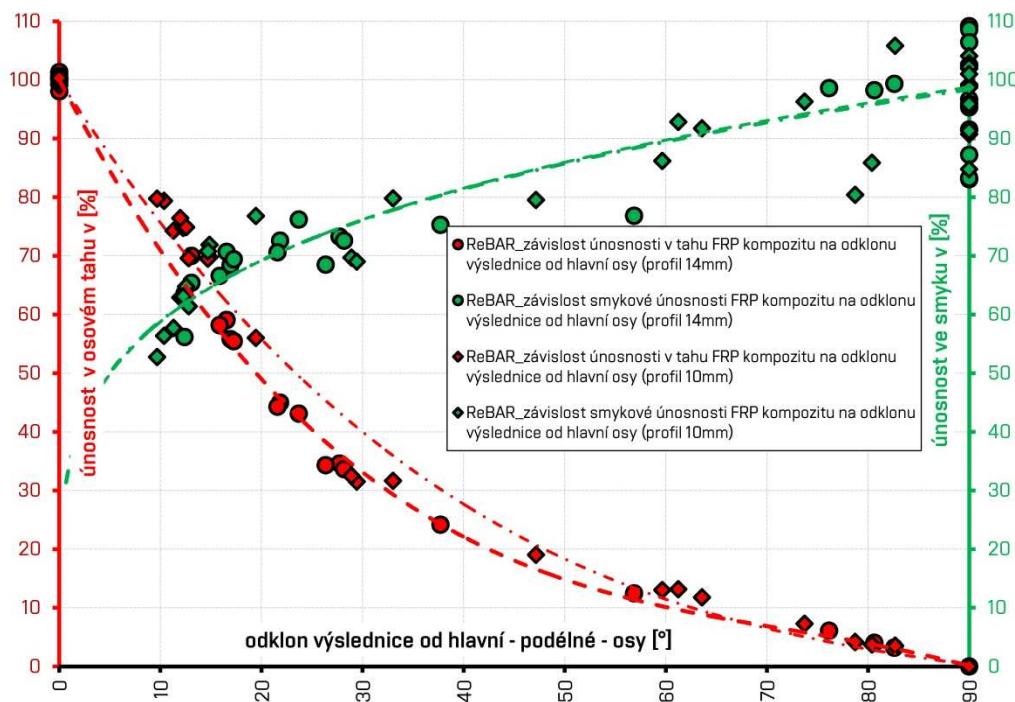


obr. 20: Provedení zkoušky GFRP horninové kotvy v betonovém bloku, převzato z [50]

Oproti tomu autoři studie [50], která byla realizována pro potřeby ověření únosnosti horninových GFRP kotev, uvádí závěr, že při působení tahové síly v kotvě dochází ke zvýšení smykové únosnosti vzorku. Testovány však byly vzorky s odlišnou konfigurací (zabetonované kompozitní kotvy průměru 22 mm v trojici betonových bloků, kde střední blok o rozměrech 150 x 150 x 300 mm byl protlačěn a dva krajní 150 x 150 x 150 mm sloužily jako opory; viz obr. 20) a poměrně nízkým tahovým zatížením (do 10 % mezní krátkodobé tahové pevnosti).

Autoři uvádějí, že nárůst smykové únosnosti byl (oproti referenčnímu nezabetonovanému vzorku kotvy) o 31 % (36 %) pro hladinu předpětí cca 10 % z mezní tahové únosnosti v závislosti na typu použitého betonu. Pro nižší hladiny působící předpínací síly byl nárůst vyšší [50].

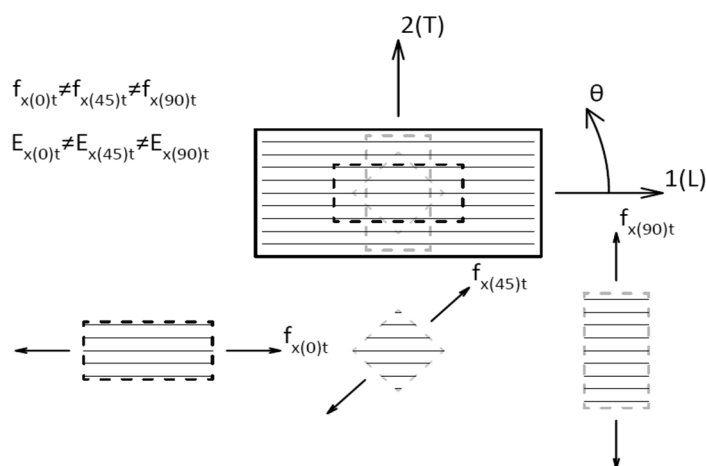
Poznatky autora této práce z vlastního výzkumu, který byl realizován při řešení projektu FV10505 [118] – viz obr. 21; [57], však potvrzují závěry studie [108] a jsou v rozporu s uvedeným v [50]. V rámci rozsáhlého experimentálního programu bylo zjištěno, že při aplikaci tahové síly dochází k postupnému snižování mezní smykové únosnosti výztuže – podrobněji viz uvedené v odstavci 5.2. Autor této práce se domnívá, že obdržené výsledky uvedené v [50] jsou významně ovlivněny konfigurací testu a nadhodnoceny příspěvkem tření, případně nerovnostmi, ve spáře mezi betonovými bloky a nevypovídají o skutečném chování FRP výztuže.



obr. 21: Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti svorníku v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice (GFRP výztuž 10 a 14 mm); vlastní výzkum [57]

4.3.2 Teoretické stanovení únosnosti FRP výztuže při kombinovaném působení tahové a posouvající síly

Při namáhání FRP kompozitu silou působící v ose pootočené o úhel θ vůči ose prutu rovnoběžné s orientací vláken (osa 1(L), viz obr. 2 a obr. 22) je možno aktuální mezní únosnost kompozitu stanovit experimentálně či teoretickým výpočtem dle dostupných vztahů. Únosnost kompozitu variuje v závislosti na velikosti úhlu θ , který se může obecně pohybovat v intervalu $\langle 0; 90^\circ \rangle$ a to v závislosti na vzájemném poměru působící normálové (tahové) a posouvající síly. Mezi v současnosti nepoužívanější kritéria porušení při kombinaci tahového a smykového namáhání, které lze využít pro kompozitní materiály, patří především přístup „Tsai-Hill“ [105], „Tsai-Wu“ [104], „Hashin“ [131], „Puck“ [2] a tzv. "Maximum stress a Maximum strain" kritérium. Tyto jsou však určeny pro výpočet únosnosti plošných vícevrstvých laminátů, pro které byly odvozeny, nikoliv pro prutové FRP výztuže.



obr. 22: Únosnost FRP laminátu; uvažovaná orientace os, [117]

fib Bulletin No. 40 [46] pro výpočet únosnosti FRP prutu při namáhání v obecném směru $f_{x(\theta)t}$ uvádí vztah (22). Tento lze zapsat ve tvaru

$$f_{x(\theta)t} = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^4}{f_{Lt}^2} + \frac{s^4}{f_{Tt}^2} + c^2 s^2 \left(\frac{1}{f_{Lts}^2} - \frac{1}{f_{Lt}^2} \right)}}, \quad (22)$$

kde: $f_{Lt, \text{ resp. } Tt}$ tahová (smyková) únosnost prvku v podélném, resp. příčném směru a
 f_{Lts} je smyková únosnost ve směru pootočeném o 45° od směru vláken;
 $c = \cos \theta$; $s = \sin \theta$.

Vstupní charakteristiky vztahu (22) – tahovou i smykovou pevnost – je možné jednoznačně určit pomocí příslušných zatěžovacích zkoušek. Pro prutovou FRP výztuž je však

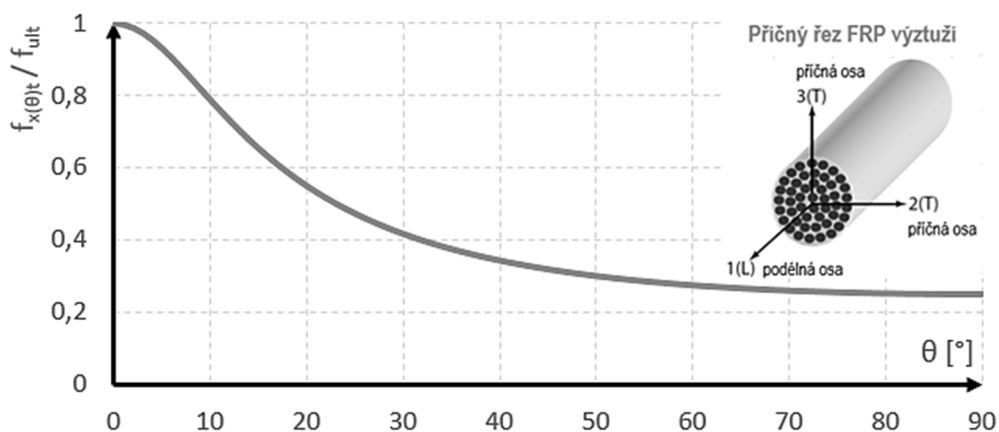
problematické určit hodnotu únosnosti kompozitu ve směru pootočeném o 45° od podélného směru vláken f_{LTs} . V případě plošného laminátu je tato určena dle ASTM D 7078 [15], pro prutové prvky však není možné tento způsob zatěžování realizovat. V [46] je uveden vztah pro výpočet smykové pevnosti f_{LTs} ve tvaru:

$$f_{LTs} = \left[1 + (V_f - V_f^{1/2}) \left(1 - \frac{G_m}{G_f} \right) \right] f_{ms} C_v, \quad (23)$$

kde: V_f je procentuální objem vláken v průřezu,
 G_m modul pružnosti ve smyku matrice,
 G_f modul pružnosti ve smyku vláken,
 f_{ms} únosnost matrice ve smyku a
 C_v je redukční součinitel zohledňující vliv vzduchových pórů v laminátu.

Pro typické kvalitní FRP výztužné prvky s podílem vzduchových pórů ve struktuře kompozitu $V_v \leq 1,0 \%$ lze redukci vlivem dutin zanedbat a součinitel C_v uvažovat v hodnotě 1,0 [46].

Závislost únosnosti na odklonu výslednice působících sil od střednice prutu stanovenou dle vztahu (22) je možno vyjádřit graficky – viz obr. 23. Modelová závislost je sestavena pro typickou GFRP výztuž při předpokladu poměru tahové a smykové pevnosti cca 0,25.



obr. 23: Závislost únosnosti FRP kompozitu na změně úhlu výslednice působícího zatížení

Vztah (22) vychází z kritéria porušení Tsai-Hill [105]. Při zjednodušení pouze na dvojosou napjatost (rotační symetrie prutu) lze kritérium zapsat ve tvaru

$$\frac{\sigma_L^2}{f_{Lt}^2} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{f_{Lt}^2} + \frac{\sigma_T^2}{f_{Tt}^2} + \frac{\tau_{LT}^2}{f_{LTs}^2} < 1, \quad (24)$$

kde σ_L , resp. σ_T značí působící napětí v podélném, resp. příčném směru laminátu a τ_{LT} podélné smykové napětí. Další je shodné s uvedeným u vztahu (22).

Při namáhání v obecném směru lze hledanou únosnost kompozitu $f_{x(\theta)t}$ stanovit [48]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & (c^2 - s^2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{x(\theta)t} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

kde použité značení platí v souladu s uvedeným v rovnici (22). Ze soustavy rovnic (25) je zřejmé, že

$$\sigma_L = c^2 f_{x(\theta)t} \quad (26)$$

$$\sigma_T = s^2 f_{x(\theta)t} \quad (27)$$

$$\tau_{LT} = cs f_{x(\theta)t}. \quad (28)$$

Dosazením (26) až (28) do (24) obdržíme

$$f_{x(\theta)t}^2 \left(\frac{c^4}{f_{Lt}^2} - \frac{c^2 s^2}{f_{Lt}^2} + \frac{s^4}{f_{Tt}^2} + \frac{c^2 s^2}{f_{Lts}^2} \right) \leq 1, \quad (29)$$

kdy vyjádřením $f_{x(\theta)t}$ je získán vztah (22) uvedený v [46] pro stanovení únosnosti FRP prutu. Z uvedeného je zřejmé, že vztah v [46] pro návrh FRP výztuže do betonu vychází z teorie (a souvisejících experimentů) určených pro návrh FRP laminátu a nemusí tak plně vystihovat skutečné chování prutu, resp. je třeba jeho experimentálního ověření. V současné době není navíc k dispozici robustní databáze relevantních zahraničních experimentálních studií v této oblasti. Správný popis kombinovaného působení tahového a smykového napětí v prutu však může být pro některé aplikace zcela zásadní/limitující. Uvedené skutečnosti tak byly důvodem pro realizaci vlastního rozsáhlého experimentálního programu s cílem ověřit platnost predikce i pro FRP výztuž. Tento je blíže popsán v odstavci 5.2.

4.4 Experimentální stanovení klíčových vlastností kompozitní výztuže

Díky specifickým fyzikálním a mechanickým vlastnostem FRP výztuže je třeba k jejich stanovení využívat odlišné zkušební postupy, než jaké jsou běžné pro klasické ocelové výztuže. Z tohoto důvodu text odstavce 4.4 velmi stručně shrnuje zkušební postupy, které je možno pro určení základních krátkodobých a dlouhodobých materiálových charakteristik FRP kompozitu využít.

S ohledem na zaměření této práce je důraz kladen především dlouhodobé testy a též testy potřebné pro určení únosnosti FRP výztuže při souběžném namáhání tahovou a smykovou silou. Základní testy zde nejsou podrobněji popsány, neboť jejich provedení shledává autor dnes již jako rutinní, normalizované [70].

Zkoušky FRP výztuže by měly být v ČR prováděny v souladu s platnou normou ISO 10406-1 *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids* z roku 2015 [70]. V ní uvedené postupy však nejsou vždy dostatečné, resp. je vhodné (s ohledem na komplexnost řešeného problému a specifika, která vyvstávají např. při řešení dlouhodobé únosnosti a kombinovaného namáhání) v ní uvedené doplnit o poznatky z dalších dostupných směrnic a doporučení. Jedná se především o:

- ACI 440.3R-12: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures [6] s přihlédnutím k dnes již neplatnému vydání ACI 440.3R-4 z roku 2004 [7];
- CSA S806-12 (17): Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers [32] a
- CSA S807-19: Specification for fibre-reinforced polymers z roku 2019 [33].

Všechny výše citované podklady předpokládají testování prutové výztuže převážně kruhového průřezu¹⁴ vyráběné pultruzí z termosetických matric a skelných, uhlíkových, případně aramidových či čedičových vláken, jejichž procentní zastoupení (objemově) je v intervalu 50 % až 75%¹⁵.

4.4.1 Přehled zkušebních postupů pro stanovení krátkodobých mechanických vlastností FRP výztuží

Přehled zkušebních postupů pro určení krátkodobých mechanických charakteristik je uveden v tab. 6 a lze jej nalézt též v [112]. Většina uvedených zkušebních postupů vychází z poznatků prezentovaných již v roce 1997 v doporučení JSCE: *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials* [73]. Postupy dle [73] zde proto nejsou citovány, neboť jsou (většinou včetně zohlednění nových poznatků) zapracovány do směrnic ACI či norem ASTM, CSA a ISO.

Z uvedeného v tab. 6 je zřejmé, že dostupné zkušební postupy nejsou v mnoha klíčových oblastech shodné a mohou vést k odlišným výsledkům, případně neobsahují dostatečné informace pro zkoušky pultrudovaných FRP výztužných elementů (např. stanovení tlakové

¹⁴ Dle uvedených zkušebních postupů je možné testovat též splétaná (ohebná) lana složená z jednotlivých kompozitních strun menšího průměru. Výsledný pramenec však musí mít opět přibližně kruhový průřez.

¹⁵ Produkty s podílem nosných vláken mimo tento interval mohou vykazovat významně odlišné chování, než jaké předpokládají citované směrnice. Uvedené zkušební postupy (především definované rychlosti a časy zatěžování) pro jiné hodnoty již nemusí být platné/vhodné.

únosnosti či interlaminární smykové únosnosti). Některé postupy nejsou standardizovány vůbec (např. postup pro stanovení vlastností FRP výztuže při interakci namáhání tahovou a posouvající silou). Tyto skutečnosti byly hlavní motivací pro přípravu dvojice certifikovaných metodik ke zkoušení vlastností FRP výztuží – viz odstavec 5.4.

tab. 6: Přehled zkušebních metod pro zkoušky krátkodobých vlastností FRP výztuží

Ověřovaná vlastnost	Zkušební metoda	Poznámka
Tahová pevnost, modul pružnosti, mezní protažení (ve směru vláken)	ASTM D7205 [16] ISO 10406-1 ([10]; kap 6) CSA S806 – 12 ([32], příloha C) GOST 31938 - 12 ([62], příloha B)	Zkušební postupy jsou v zásadě shodné, drobné odlišnosti jsou v zatěžování a požadavku na volnou délku vzorku.
Smyk (příčný, tj. stříh)	ASTM D7617 [18] ISO 10406-1 ([10]; kap 13) GOST 31938 - 12 ([62], příloha G) CSA S806 – 12 ([32], příloha L)	Zkušební postupy jsou v zásadě shodné (odlišnost v počtu vzorků)
Interlaminární smyk (podélný)	ASTM D 4475 [12]	-
Soudržnost	ACI 440.3R-12 ([6]; B3) ISO 10406-1 ([10]; kap 7) ASTM D7913 [19] GOST 31938 - 12 ([62], příloha D) CSA S806 – 12 ([32], kap G)	Podstatné odlišnosti mezi ACI (resp. ASTM) a ISO (rozdílná konfigurace vzorků, počet vzorků). GOST uvádí i odlišný způsob testování (nosník). Odlišnosti v rychlosti a způsobu zatěžování.
Ohyby výztuže (snížení tahové pevnosti v místě ohybu)	ACI 440.3R-12 (B5, případně B11/B12) CSA S806 – 12 ([32], příloha D) CSA S807 – 19 ([33], příloha E)	Celkem uvedeny tři možnosti konfigurace testu s odlišnými výsledky. Shodný doporučený počet vzorků.
Pevnost v tlaku a modul pružnosti v tlaku	ASTM D695 [14] GOST 31938 - 12 ([62], příloha C)	ASTM není určena přesně pro GFRP výztuž.
Kombinace N+V	postup není standardizován	Zcela nová/originální zkouška

4.4.2 Přehled zkušebních postupů pro stanovení dlouhodobých mechanických vlastností FRP výztuží

Dostupné zkušební postupy pro určení dlouhodobých (časově závislých) mechanických charakteristik jsou sumarizovány v tab. 7. Shodně s odstavcem 4.4.1 jsou uvedeny v současnosti platné postupy využívané v EU, USA a Kanadě. Všechny dostupné podklady uvádí pouze dlouhodobé zkoušky ve směru vláken při uvážení působícího tahového zatížení. Dlouhodobé zkoušky v tlaku či soudržnosti nejsou standardizovány, existuje pouze omezené množství zahraničních studií, které danou problematiku řešily (vlastní výzkum viz 5.3.3.1).

tab. 7: Přehled zkušebních metod pro zkoušky dlouhodobých (časově závislých) vlastností FRP výztuží

Ověřovaná vlastnost	Zkušební metoda	Poznámka
Dlouhodobé mezní napětí v tahu (Creep rupture)	ASTM D7337 [17], zkouška vychází z [7] ISO 10406-1 ([10]; kap 12) CSA S806 – 12 ([32], příloha H)	Zkušební postupy jsou v zásadě shodné (odlišnost v počtu vzorků, ASTM/CSA přesněji definuje hladiny napětí). Pozor na odlišení creep a creep rupture (viz [33]); minimální požadavky definuje CSA S807 – 19 [33]
Odolnost proti působení alkalického prostředí (bez zatížení)	ACI 440.3R-12 ([6]; B6 - postup A) ISO 10406-1 ([10]; kap 11) CSA S806 – 12 ([32], příloha M) GOST 31938 - 12 ([62], příloha F)	ACI/CSA výrazně podrobněji definuje zkušební podmínky, odlišný/ delší čas expozice (až 6 měsíců), odlišný roztok. Minimální požadavky definuje CSA S807 – 19 [33] GOST umožňuje testovat i soudržnost (bez dlouhodobě působící hladiny zatížení)
Odolnost proti působení alkalického prostředí (se zatížením)	ACI 440.3R-12 ([6]; B6 - postup B a C) CSA S806 – 12 ([32], příloha M)	ISO [10] pouze zmiňuje, že lze zkoušet i s napětím, nedefinuje podmínky. Zkoušky bez/s vlivem povrchové vrstvy betonu. CSA oproti ACI doporučuje vyšší hladinu působícího zatížení. Obě předepisují pevně danou hladinu zatížení a čas expozice, nepožadují dosažení kolapsu vzorku.
Tahová únavová životnost	ACI 440.3R-12 ([6]; B7) ISO 10406-1 ([10]; kap 10) CSA S806 – 12 ([32], příloha J)	Únavové zkoušky prováděné na prutových vzorcích opatřených ocelovými kotevními koncovkami. Liší se počet požadovaných vzorků v jedné sadě a také počet sad.
Soudržnost při únavovém zatížení	postup není standardizován	Neexistují závazná doporučení. Možné zkušební postupy byly představeny např. ve studiích [83] nebo [74]
Soudržnost při působení alkálií (s/bez zatížení)	postup není standardizován	Neexistují závazná doporučení. Test bez vlivu zatížení zmiňuje GOST 31938 - 12 ([62], příloha F)
Relaxace	ACI 440.3R-12 ([6]; B9) ISO 10406-1 ([10]; kap 9) CSA S806 – 12 ([32], příloha I)	Zkušební postupy jsou v zásadě shodné (odlišnost je v počtu vzorků)
Pevnost v tlaku a modul pružnosti v tlaku	postup není standardizován	Zkušební postup není normalizován.

V přístupu citovaných směrnic existují podstatné rozdíly a v některých případech i zjevné rozpory. Zkoušky FRP výztuže by v ČR měly být prováděny v souladu s normou ISO 10406-1 (2015) [70]. V případě ověření dlouhodobých vlastností tato (shodně s [6] a [32]) odděluje zkoušky odolnosti výztuže v alkalickém prostředí a testy dotvarování (creepu) výztuže.

V případě testů v alkalickém prostředí jsou definovány podmínky na pH a teplotu roztoku (pH vyšší než 13; teplota 60 °C), délku trvání zkoušky (jeden měsíc), avšak není specifikován požadavek na souběžné působení tahového napětí ve vzorku. Je pouze uvedeno, že (je-li třeba) by měl být vzorek v průběhu zkoušky zatížen např. na „hodnotu odpovídající navrženému zatížení FRP výztuže“ (viz [70]; článek 11.2.4). Tato vágní formulace je dle názoru autora této práce nedostatečná. Určení souběžně působícího napětí ve výztuži by nemělo být ponecháno na uvážení zkušebny či projektanta. Toto řešení může dále prohloubit nejistotu při návrhu FRP materiálů.

Další rozpor může u GFRP výztuží nastat při využití ACI 440.1R-15 [5] a související zkušební ACI 440.3R-12 [6]. Při návrhu je dle [5] omezena hodnota dlouhodobě působícího tahového zatížení pro GFRP výztuž na 14 % (resp. 16 %) zaručené (návrhové krátkodobé) pevnosti; viz tab. 4. Hodnoty jsou pevné, jsou určeny bez přímé návaznosti na zamýšlenou oblast aplikace (pouze rozdělení mokré a suché prostředí) a požadovanou/předpokládanou životnost konstrukce. Při využití postupu B nebo C popsaného v části B.6 směrnice [6] (zkoušky v alkalickém prostředí – roztok či plně nasycený beton o teplotě 60°C – s vlivem působícího zatížení) je doporučeno testovat vzorky s aplikovaným zatížením vyvolující přetvoření 2‰ po dobu maximálně 6 měsíců. Následně má být zjištěna zbytková tahová únosnost. Při uvážení typických charakteristik v současnosti na trhu dostupných GFRP výztuží poslední generace (modul pružnosti > 50 GPa; krátkodobá tahová pevnost > 1000 MPa) je dle názoru autora předpoklad mezního dlouhodobého přetvoření 2‰ nedostatečný, neboť není v souladu s uvedenými limity dle [5]¹⁶. Díky zvolené nízké hodnotě zatížení je navíc velmi pravděpodobné, že po dobu testu nedojde k poškození jednotlivých vláken a zbytková únosnost vzorku bude blízká počáteční [128].

Norma CSA 806-12 [32] limituje mezní protažení GFRP výztuže od dlouhodobě působících zatížení max. 2‰ (jako limit je v [32] uvážena též hodnota 25 % z krátkodobé návrhové hodnoty tahové pevnosti). Norma CSA 807-19 [33], která definuje požadavky na testování FRP výztuží, požaduje při degračních dlouhodobých testech zajistit protažení testovaného vzorku 3‰ po celou dobu zkoušky (3 měsíce) a následně stanovit zbytkovou únosnost. Je zřejmé, že předpisy [32] a [33] jsou v tomto případě (na rozdíl od přístupu ACI) kompatibilní. Uvedený postup díky pevně definovaným hodnotám přetvoření ovšem neumožňuje vyšší

¹⁶ Při uvážení minimálních 14% bude výztuž dlouhodobě navržena cca na 140 MPa, testována je však pouze na hladině 100 MPa.

využití výztuží, což je limitující především u FRP výztuží s vysokými počátečními (krátkodobými) únosnostmi.

Z uvedeného je dobře patrné, že ke stanovení degradace FRP výztuže dle ACI i CSA jsou využity testy založené na stanovení zbytkové únosnosti prutu po definované době expozice danému prostředí při aplikované konstantní hladině působícího zatížení/přetvoření. Zkoušky stanovující dotvarování (creep) výztuže a odolnost vůči alkáliím jsou odděleny (byť oba přístupy při této zkoušce umožňují zahrnout vliv působícího zatížení). S ohledem na skutečné působení výztužných prutů v konstrukci je tento přístup diskutabilní a nemusí poskytovat reálný obraz o očekávaném chování prvku [106], [128].

5 Vlastní přínos, dopad na praxi

V návaznosti na cíle práce, které byly stručně formulovány v úvodu, jsou v kapitole prezentovány vlastní poznatky ze tří klíčových oblastí vývoje, testování a aplikace FRP materiálů, kterým se autor práce v posledních letech intenzivně věnoval. Jedná se o témata:

- dlouhodobá spolehlivost a degradace FRP výztuže a kontaktu výztuž/beton (odstavec 5.1). Vliv vnějších podmínek (např. alkálie, teplota, vlhkost, dlouhodobě působící zatížení) na její dlouhodobou únosnost a spolehlivost a to včetně problematiky volby experimentu a vlivu zvolené konfigurace testu na sledované materiálové charakteristiky. Autor práce se ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. podílel na vývoji nové generace odolné GFRP výztuže, která byla výsledkem řešení projektu TA04010881 „*Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitných vlastností*“ [115];
- chování FRP výztuže v případě interakce působení normálové a posouvající síly (viz 5.2). Byla navržena unikátní zkouška vycházející z metody ASTM D7617 (testování příčného smyku FRP výztuží), jež byla pro tyto účely významně upravena. Problematika byla rozsáhle pojednána při řešení projektu FV 10505 „*Inteligentní kompozitní kotevní prvek*“ [118];
- využití FRP kompozitní výztuže ve speciálních aplikacích (viz 5.3), především při vývoji a aplikaci prvků pro přerušování tepelného mostu v monolitických konstrukcích. Stručně je popsán vývoj unikátního nosného tepelněizolačního prvku, který byl realizován ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. Patent pod číslem 305718, jehož je autor spolupůvodcem, byl udělen v lednu 2016.

S ohledem na omezený rozsah textu jsou pro každý z výše zmíněných bodů uvedeny pouze stručné informace k popisu problematiky/experimentu a klíčové výsledky. Podrobnější informace lze najít v odkazovaných článcích a výzkumných zprávách.

Dále jsou v odstavci 5.4 stručně zmíněny i dvě certifikované metodiky, které při řešení problematiky vývoje, testování a návrhu FRP výztuže vznikly. Jejich cílem bylo sjednotit v některých případech velmi protichůdné požadavky využívaných zkušebních norem pro testování mechanických charakteristik FRP výztuže a také sumarizovat vlastní poznatky získané v průběhu přípravy desítek unikátních experimentů. Vytvořené certifikované metodiky jsou v současnosti cenným podkladem při vývoji a testování FRP materiálů a slouží též při popularizaci tohoto oboru na VUT.

5.1 Dlouhodobá spolehlivost kompozitní výztuže, vliv degradace na mezní napětí v soudržnosti

V rámci rozsáhlého experimentálního programu realizovaného mezi lety 2014 a 2019 při řešení projektů TA4010881 [115] a FV10505 [118] byla provedena řada dlouhodobých degradačních testů výztuže vyvíjené společně s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. Testovány byly stovky vzorků GFRP výztuží (resp. GFRP horninových kotev [118]) vyrobených z vinylesterové (VE) a epoxidové (EP) pryskyřice a E/ECR, resp. AR vláken (povrchová úprava opískováním, případně žebírky). Cílem prací bylo především:

- navrhnout vhodný dlouhodobý experimentální program pro testování časově závislého chování kompozitních výztuží, který by vycházel z relevantních zahraničních podkladů a zároveň byl v souladu s přístupem ČSN EN 1990 [37]; ověřit možnosti využití relevantních zkušebních metod pro kvantifikaci míry degradace vzorku (viz odstavec 5.1.2 a 5.1.4);
- ověřit dlouhodobé chování/degradaci GFRP kompozitu (resp. klíčové komponenty systému – vláken; odstavec 5.1.1) pomocí teplotně urychlených testů při souběžném působení zatížení (urychlené zkoušky bez a s vlivem tahového napětí; odstavec 5.1.2) a stanovit vliv krycí vrstvy betonu (5.1.3);
- kvantifikovat míru poškození kontaktu výztuže a okolního betonu při vystavení degradačnímu prostředí (5.1.5).

5.1.1 Experimentální ověření degradace vláken v alkalickém roztoku

Cílem dílčího experimentu realizovaného při řešení projektu TA0401881 bylo kvantifikovat vliv alkalického roztoku o různé koncentraci na tahovou únosnost klíčového komponentu FRP výztuže – vláken (testována AR a C vlákna; viz tab. 8). Sledován byl pokles tahové únosnosti vzorků uložených po definovanou dobu v roztoku dané koncentrace. Obdržené poznatky jsou v textu prezentovány pouze velmi stručně, v plném rozsahu je lze nalézt v [55], resp. [116].

Celkem bylo připraveno 140 vzorků AR a shodný počet vzorků C vláken, které byly exponovány degradačnímu prostředí¹⁷ a následně podrobeny tahové zkoušce (tvar a způsob osazení vzorků ve zkušebním zařízení je patrný z obr. 24; provedení zkoušky dle [35]). Pro

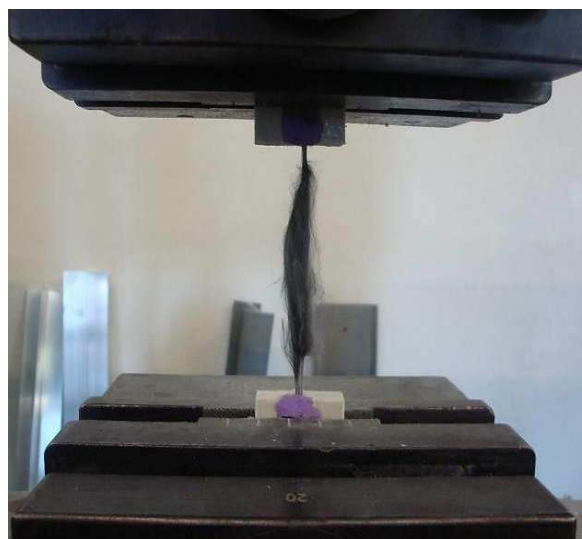
¹⁷ Alkalický roztok simulující prostředí betonu byl připraven dle požadavků ACI [6]. Výsledný roztok měl pH 12,77.

posouzení vlivu alkalického prostředí na míru degradace vlákna bylo připraveno šest různých koncentrací roztoku (0 % - vodní prostředí bez rozpuštěných iontů, 1 %, 2,5 %, 10 %, 25 %, 100 %). Doby expozice vláken byly uváženy v souladu s [35] a [36], přičemž test byl teplotně urychlen uložením vzorků v klimatizované komoře při konstantní teplotě 80°C. Získané výsledky byly vztaženy k referenční hodnotě získané na vzorcích bez expozice (uloženy v laboratoři na vzduchu při teplotě 21 °C a 50 % RH).

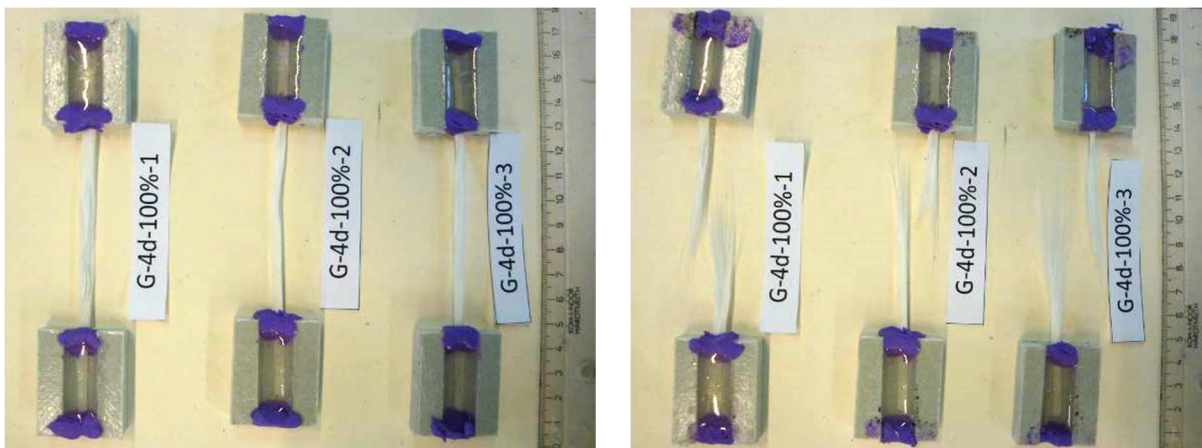
tab. 8: Degradací zkoušky vláken v alkalickém prostředí – testované vzorky

Označení vzorků	Typ vláken	Gramáž TEX	Průřezová plocha [mm ²]	Modul pružnosti [GPa]	poznámka
AR vlákna	AR (ARcoteX™ 2400, výrobce Saint-Gobain Vetrotex)	2400	0,89	230	Expoziční časy: 96 a 168 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 80 °C
C vlákna	C (T700SC-24000, výrobce TORAYCA)	1120	0,92	85	Expoziční časy: 96 a 168 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 80 °C

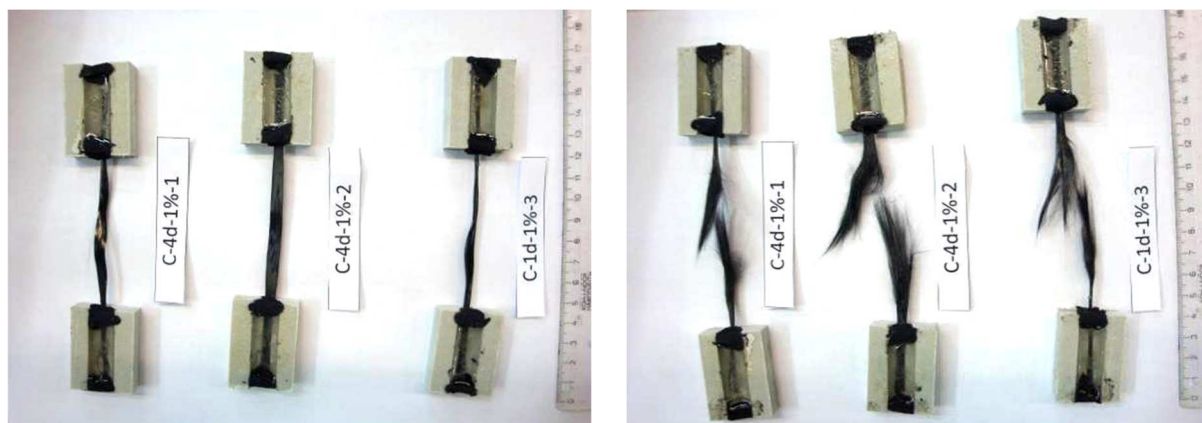
Na základě získaných výsledků bylo provedeno vyhodnocení vlivu alkalického prostředí o různé koncentraci na tahovou pevnost vláken – byla určena tzv. retence (tj. únosnost vzorku po expozici vztažená k počáteční/referenční hodnotě). Z obr. 25, resp. obr. 26 je patrný způsob porušení vzorků. Na obr. 27 jsou dále uvedeny střední hodnoty mezní působící síly při porušení; na obr. 28 (skleněná vlákna) a obr. 29 (uhlíková vlákna) je zobrazena relativní únosnost vztažená k referenční hodnotě.



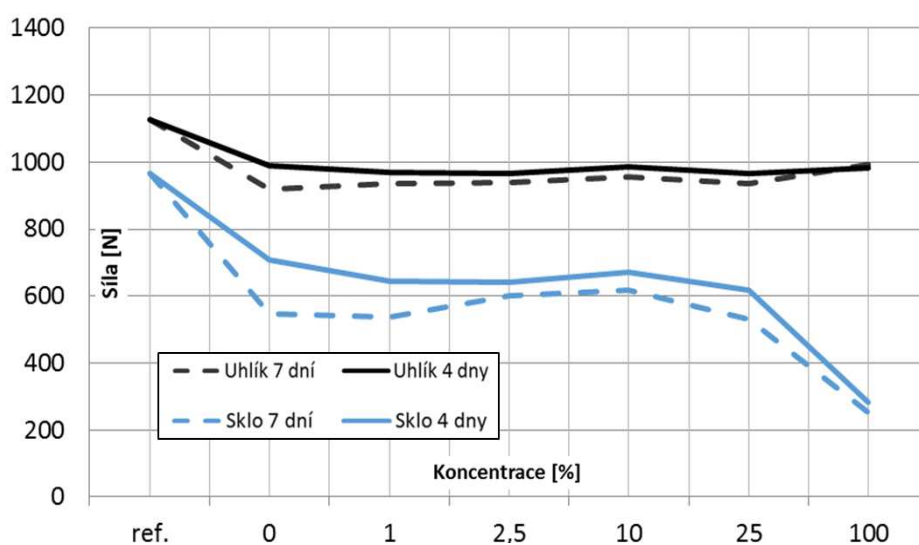
obr. 24: Zatěžovací zkouška vzorků uhlíkových vláken; vlevo detail upnutí vzorků do zatěžovacího zařízení; vpravo porušený vzorek po provedení zkoušky



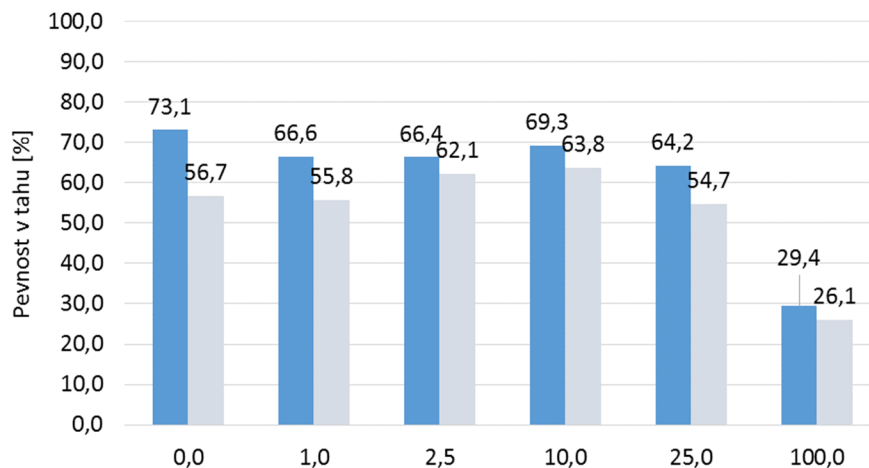
obr. 25: Vzorky pramenců AR vláken (expoziční: 4 dny uloženo v roztoku o koncentraci 100%); vlevo před zatěžovací zkouškou; vpravo po provedení zatěžovací zkoušky



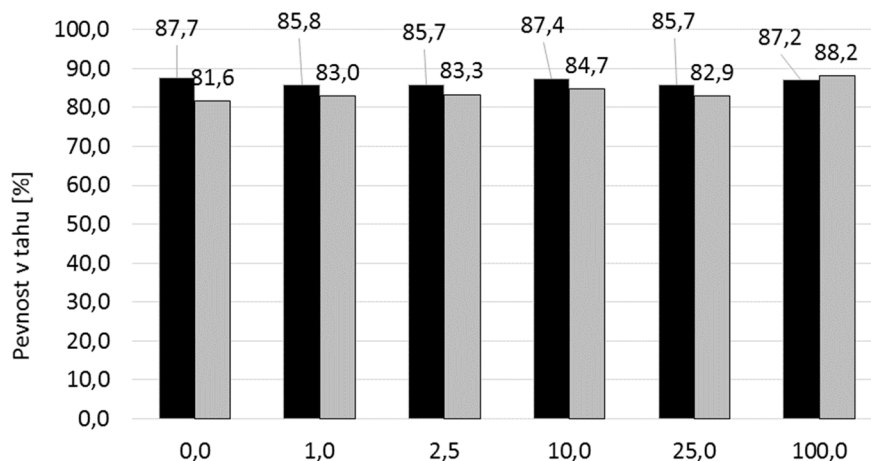
obr. 26: Vzorky pramenců C vláken (expoziční: 4 dny uloženo v roztoku o koncentraci 1%); vlevo před zatěžovací zkouškou; vpravo po provedení zatěžovací zkoušky



obr. 27: Mezní síla při porušení vzorku; AR a C vlákna po 4 a 7 dnech expoziční v roztoku různé koncentrace



obr. 28: Pokles tahové pevnosti pramenců AR vláken po 4 (tmavě modrá) a 7 (světle modrá) dnech expozice v alkalickém roztoku různé koncentrace (vodorovná osa)



obr. 29: Pokles tahové pevnosti pramenců uhlíkových vláken po 4 (černá) a 7 (šedá) dnech expozice v alkalickém roztoku různé koncentrace (vodorovná osa)

V průběhu experimentu bylo získáno množství poznatků o chování vláken v alkalickém prostředí. I přes vysoce agresivní podmínky (teplota 80°C, pH > 12), plně v souladu se závěry zahraničních studií (např. [76]), byla uhlíková vlákna vůči působení vysokého pH zcela netečná, naproti tomu skleněná vlákna reagovala velmi citlivě především na vyšší koncentrace roztoku. Byla však pozorována vysoká citlivost C i AR vzorků na přítomnost vodního prostředí. Tento poznatek byl nový (prezentováno v [55]).

Při uložení AR vláken v alkalickém roztoku o koncentraci 0 až 25 % byl pozorovaný pokles tahové pevnosti přibližně srovnatelný. Při koncentraci 25 % byl již plně zastoupen vliv iontů Ca²⁺ (roztok plně nasycen), ovšem pouze cca čtvrtinově vliv dalších iontů (K⁺ a Na⁺). Bylo tak možno vyslovit hypotézu, že u nízkých koncentrací roztoku má výraznější dopad na pozorované snížení únosnosti vliv vodního prostředí než přítomnost iontů vápníku, neboť změna jejich koncentrace nehrála podstatnou roli.

Nejvýraznější redukce únosnosti byla dosažena při uložení skleněných AR vláken do 100 % roztoku dle [6], a to na 29 %, resp. 26 % referenční hodnoty po 4, resp. 7 dnech uložení. Z experimentu bylo zřejmé, že úbytek únosnosti závisí především na koncentraci iontů draslíku a sodíku. Degradace při stoprocentní koncentraci roztoku probíhá rychleji, nebyl již pozorován významný rozdíl (oproti dalším testovaným koncentracím) mezi hodnotou zbytkové únosnosti pro čtyřdenní a sedmidenní expozici.

Zbytkové tahové pevnosti uhlíkových vláken při uložení v alkalických roztocích o všech uvážených koncentracích nezávisle na čase expozice dosahovaly 81 % až 88 % referenční hodnoty; [55].

5.1.2 Degradační zkoušky FRP výztuží bez vlivu krycí vrstvy betonu

V průběhu řešení výzkumných projektů TA4010881 a FV10505 byla provedena velmi rozsáhlá experimentální studie, jejíž cílem bylo ověřit chování GFRP výztuží na bázi VE a EP matrice při působení degradačního prostředí alkálií, případně roztoků chloridů, a zatížení. Zkušební program byl navržen s cílem kvantifikovat míru vlivu jednotlivých degradačních činitelů – prostředí; teploty a působícího tahového napětí, resp. jejich vzájemné interakce.

Z výše uvedeného důvodu byly testy realizovány za různých okrajových podmínek a konfigurace experimentu (podrobněji viz odstavec 5.1.2.2). Bylo zcela nezbytné navrhnout speciální zkušební zařízení pro urychlené degradační zkoušky s vlivem napětí (viz 5.1.2.1). Experimentálně bylo též ověřeno dlouhodobé chování výztuže vystavené pouze působení tahového zatížení (tzv. „creep test“; 5.1.2.3). Celkem bylo realizováno v různých konfiguracích více než tři sta vzorků s časem přímé expozice od jednotek hodin až po dva roky.

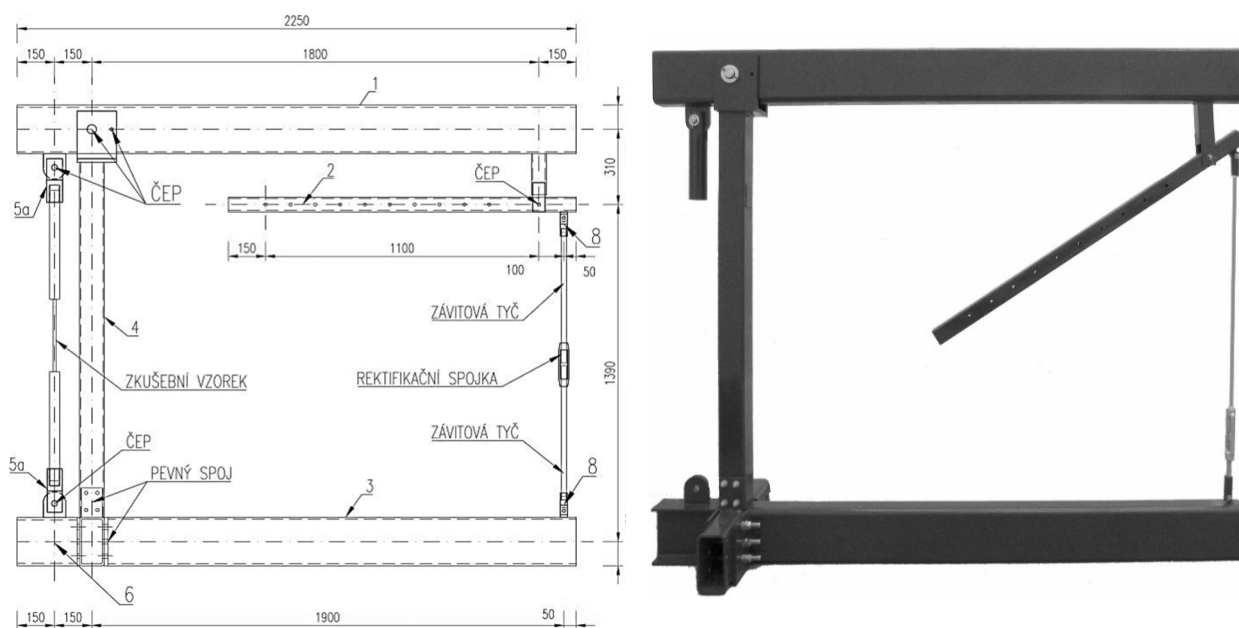
Z provedených testů byly získány velmi cenné poznatky, které umožnily stanovit závislost klíčových mechanických charakteristik testované GFRP výztuže na působícím agresivním prostředí (alkálie, chloridy), napětí a teplotě. Výsledkem řešení byly nejen publikované články, které jsou v textu citovány, ale především zásadně zlepšené mechanické charakteristiky kompozitní výztuže na bázi skleněných vláken vyvíjené ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s.

5.1.2.1 Zkušební zařízení pro urychlené degrační zkoušky s vlivem napětí

Pro realizaci experimentální činnosti v plánovaném rozsahu bylo zcela nezbytné navrhnout vhodný zkušební postup, který by vycházel z poznatků směrnic [6], [32], resp. [70]; relevantních studií [65] a [87] a zároveň byl plně v souladu s přístupem ČSN EN 1990 [37]. Bylo proto navrženo speciální zkušební zařízení pro dlouhodobé zkoušky výztuží s možností vzorky dlouhodobě zatížit konstantní hladinou působícího napětí (průmyslové vzory chránící vyvinutá zkušební zařízení byly uděleny pod číslem 003492313-0001 a 003491976-0001).

Navržené zkušební zařízení využívající základního fyzikálního principu páky (viz obr. 30) splnilo nároky z hlediska konstrukční jednoduchosti a bezpečnosti při provádění testů. Zařízení bylo navrženo i s ohledem na snadnou modifikovatelnost a manipulovatelnost, ale též nezbytnost kontinuálního záznamu působící síly, přetvoření a okolních podmínek (teplota, vlhkost). Sestava zkušebního zařízení pro dlouhodobé tahové zkoušky je zřejmá z obr. 30 a obr. 31 (včetně osazených vzorků a instrumentace).

Zcela nezbytné bylo zajistit, aby velikost zatížení po celou dobu provádění zkoušky významně nekolísala, což bylo s ohledem na typ a především časovou náročnost zkoušky zásadní. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zatěžování pomocí aplikované hmoty. Při konstrukčním uspořádání dle obr. 30 bylo možno při vloženém zatížení 120 kg vyvinout ve vzorku tahovou sílu až cca 180 kN, což je pro většinu typů GFRP výztuží zcela postačující.



obr. 30: Výkresové schéma a reálné provedení zkušebního zařízení pro zkoušky s vlivem napětí (konfigurace pro tahové zkoušky; průmyslový vzor č. 003492313-0001)

Díky modulárnímu řešení bylo možno realizovat velmi jednoduchou přestavbu pro provedení dlouhodobých zkoušek soudržnosti, kdy výměnou dvojice dílů bylo možno zajistit nezbytné okrajové podmínky pro tyto testy. V roce 2019 bylo na shodném zařízení zahájeno dlouhodobé testování kompozitních tlakových ložisek (viz i odstavec 5.3.3.1). Při přípravě těchto typově odlišných zkoušek byla pouze provedena dílčí úprava zařízení (vlození reverzního prvku, viz 5.3.3.1). I tato skutečnost byla dokladem vhodnosti konceptu modulárního řešení navrženého zkušebního zařízení.

Vyvinuté zařízení je celkem v šesti kusech doposud využíváno v laboratořích VUT v Brně a to nejen při výzkumné, ale i hospodářské činnosti.



obr. 31: Zkušební zařízení s osazenými vzorky a instrumentací (zkoušky creepu)

5.1.2.2 Teplotně urychlené degradační zkoušky FRP výztuží za běžných a zvýšených teplot v alkalickém roztoku bez vlivu působícího napětí

V rámci provedených experimentů byla zjišťována míra degradace GFRP výztuže při vystavení vysoce alkalickému roztoku (bez vlivu zatížení), který simuluje prostředí betonu, v němž se výztuž v průběhu své životnosti nachází. Cílem bylo kvantifikovat míru degradace v definovaných expozičních časech. Přehled testovaných typů vzorků je zřejmý z tab. 9.

tab. 9: Degradací zkoušky GFRP výztuže v alkalickém prostředí bez vlivu působícího napětí - přehled

Označení série vzorků	vlákna	matrice	povrchová úprava	expozice
GFRP-E-VE	ECR	VE	krycí/adhezní vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovínem	Expoziční časy: 1000 hodin, 2160, 4320, 8760 a 15600 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 20, 40 a 60 °C
GFRP-AR-VE	AR	VE	krycí/adhezní vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovínem	Expoziční časy: 1000 hodin, 2160, 4320 a 15600 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 20, 40 a 60 °C
GFRP-E-EP	ECR	EP	krycí/adhezní vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s kevlarovým ovínem	Expoziční časy: 1000 hodin a 4320 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 20, 40 a 60 °C
GFRP^{NG}	ECR	EP	krycí/adhezní vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s nylonovým ovínem	Expoziční časy: 1000 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 20, 40 a 60 °C



obr. 32: Vlevo: uložení jedné ze sérií vzorků GFRP výztuže v alkalickém roztoku; vpravo: degradované vzorky GFRP-AR-VE po 650 dnech expozice prostředí při 60°C

Celkem bylo testováno více než 175 ks vzorků GFRP výztuže na bázi VE pryskyřice (E-CR sklo a AR sklo) a 70 vzorků výztuže GFRP-E-EP a GFRP^{NG} (E-CR sklo a EP pryskyřice). Každá série (tj. zkouška pro definovanou teplotu, čas a typ vláken) obsahovala, s ohledem na statistické vyhodnocení získaných výsledků, 6 ks vzorků. Všechny byly po požadovaný expoziční čas uloženy do alkalického roztoku připraveného dle [6] temperovaného na teplotu

20 °C, 40 °C a 60 °C (způsob uložení vzorků v roztoku je zřejmý z obr. 32). Následně byly vyjmuty, očištěny a bylo provedeno optické zkoumání případné degradace povrchu. Vzorky opatřené koncovkami byly poté dle [58] (s přihlédnutím k [16], [32] a [70]) podrobeny tahové zkoušce. Tato zde není podrobněji popsána, neboť se dnes již jedná o rutinní typ zkoušky. Prezentovány jsou pouze zásadní zjištěné skutečnosti.

5.1.2.2.1 Vliv alkalického prostředí na kvalitu povrchové úpravy vzorků

Dlouhodobá expozice vzorků alkalickému roztoku o pH téměř 13 a teplotě 60 °C po 650 dní se projevila negativně na kvalitě povrchové vrstvy (viz obr. 7 a obr. 8 v odstavci 4.2.2). V závislosti na typu vzorku docházelo k lokálnímu narušení soudržnosti mezi povrchovou vrstvou křemičitého písku s tělem kompozitu. I po očištění byla stále zřetelně patrná vysrážená vrstva především hydroxidu a uhličitánu vápenatého. Degradace povrchu po vyjmutí z lázně je patrna z obr. 32 (výztuž GFRP-AR-VE¹⁸, 650 dní expozice, roztok 60 °C). U nižších testovaných teplot nebyla degradace povrchu tak výrazná, vždy však byla patrná vysrážená vrstva vápenatých solí.

U jedné ze sérií testovaných vzorků GFRP-E-EP však došlo k velmi významné, pro vzorky exponované 180 dní teplotě 60 °C velmi netypické, plošné ztrátě adhezní vrstvy (viz obr. 33). Došlo i k lokálnímu narušení ovinu kevlarovými vlákny. Toto chování bylo (v nižší míře) patrné i u vzorků s expozicí pouhých 1000 hodin. Pozorovaná degradace je s ohledem na potřebu zajištění dlouhodobé spolehlivosti kontaktu beton/výztuž alarmující!



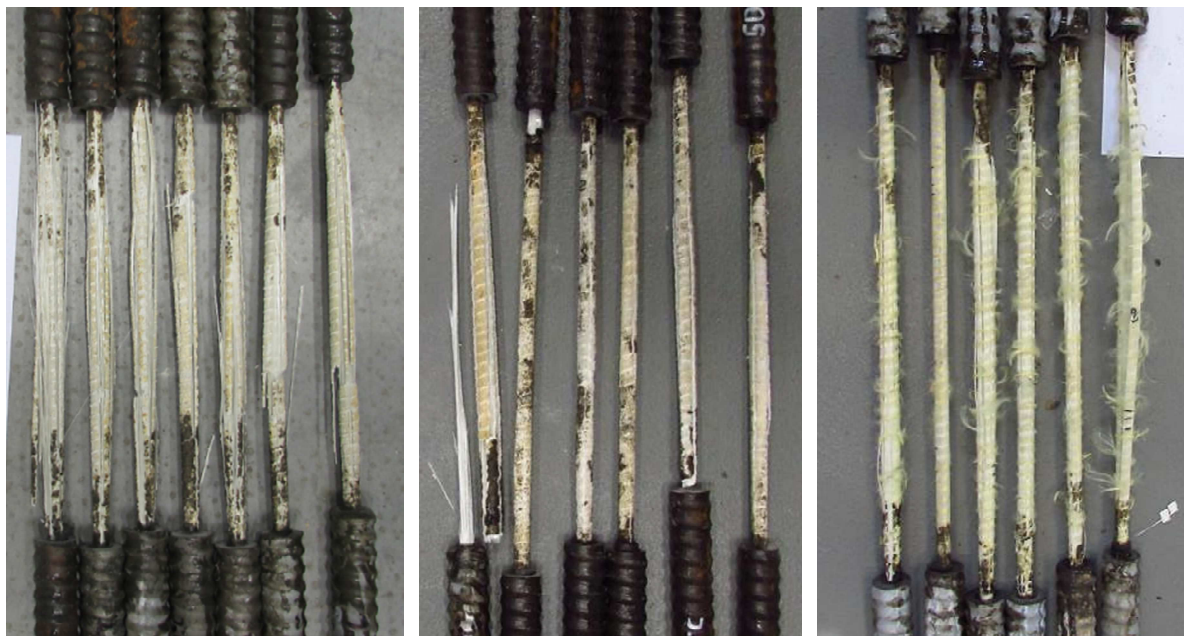
obr. 33: Degradované vzorky GFRP-E-EP, 180 dní expozice v 60°C (plošně bez adhezní vrstvy)

¹⁸ Tato výztuž je zde pro ilustraci zobrazena především s ohledem na výsledky provedených pull-out testů uvedených v odstavci 5.1.5, kdy tato vykazovala významně nižší hodnoty soudržnosti než další testované vzorky.

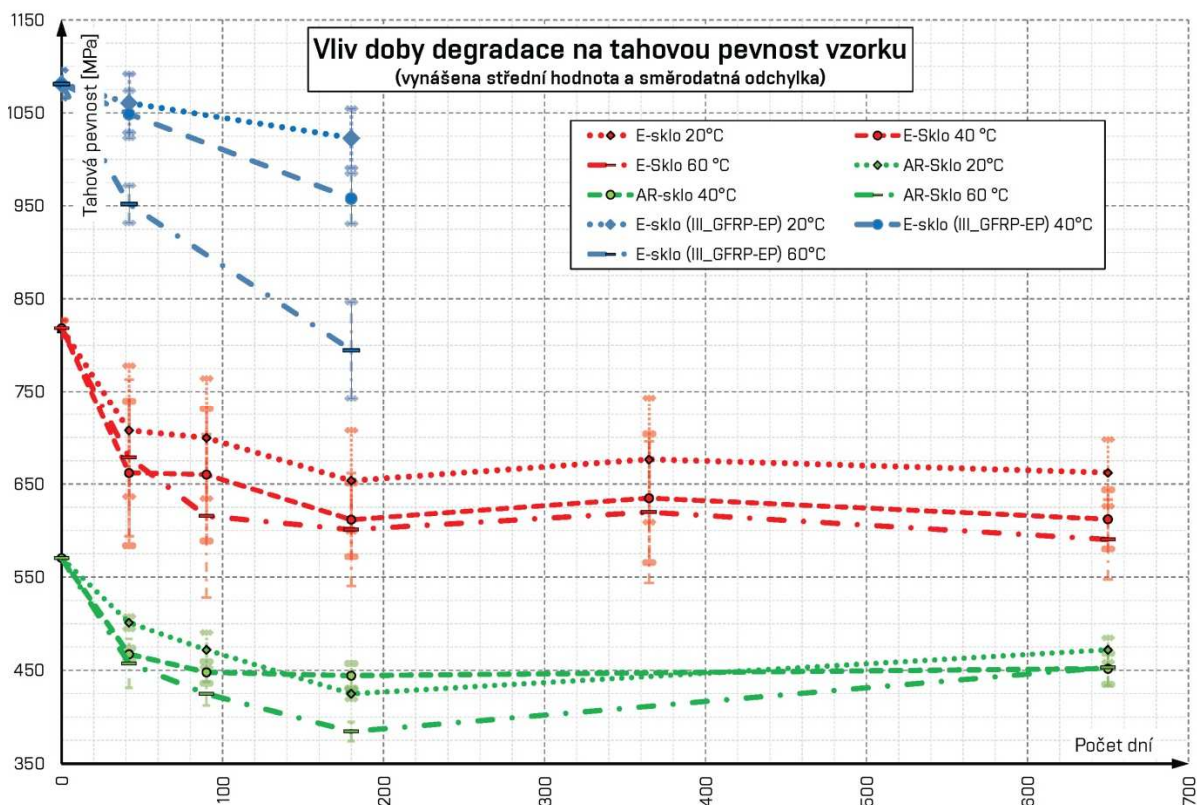
Na základě provedených analýz bylo možno vyslovit závěr, že na míru degradace kontaktu má zcela zásadní vliv postup a kvalita výroby, resp. aplikovaná teplota pro urychlení experimentu. Vzorky, díky nedostatečnému vytvrzení matrice při výrobě, vykazovaly nízké hodnoty T_g , které byly blízké zvolené akcelerační teplotě. V důsledku tak při experimentu nedocházelo pouze k urychlení (tj. akceleraci) testu, ale k nadměrné degradaci vzorků, viz např. [103]. Tyto skutečnosti jsou zásadní též s ohledem na experimentální ověření dlouhodobé spolehlivosti kontaktu mezi výztuží a betonem [54], [72], [71] a [115].

5.1.2.2.2 Výsledky získané z tahových zkoušek vzorků po expozici agresivnímu prostředí

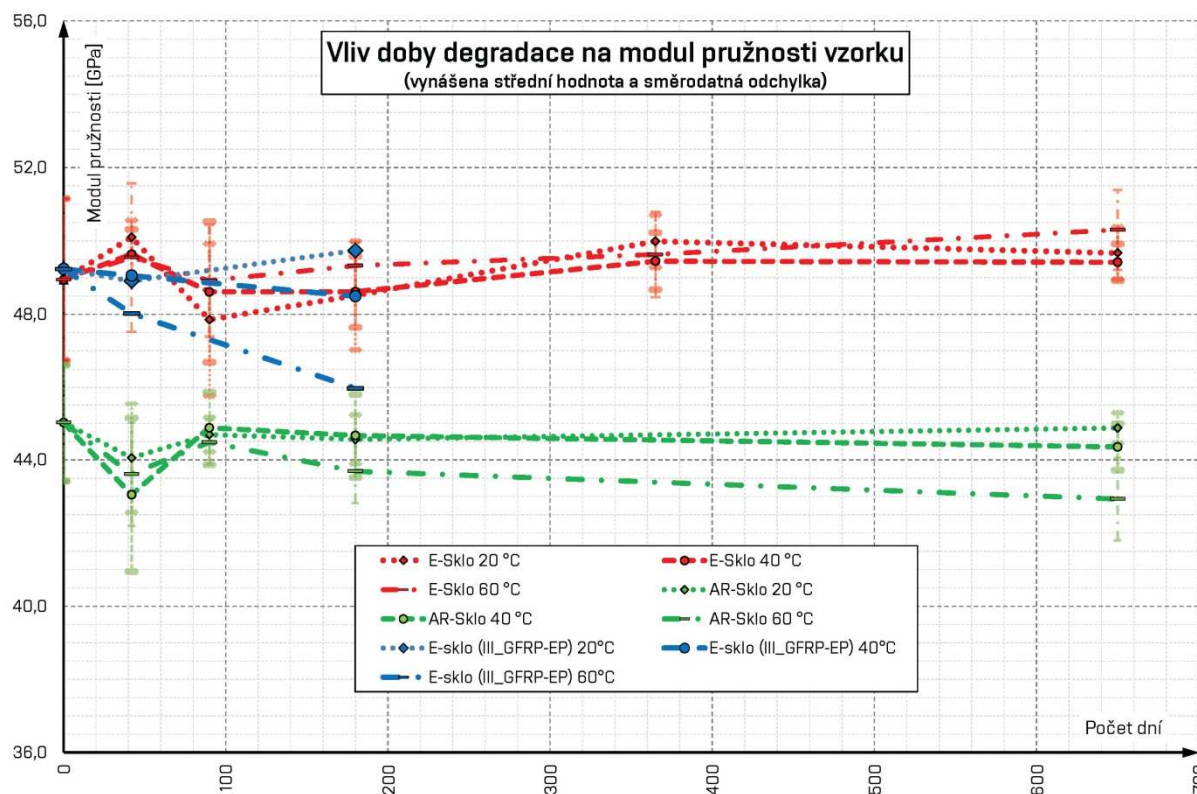
Podrobný popis výsledků získaných na vzorcích výztuží bez vlivu krycí vrstvy a působícího napětí lze nalézt v [115] a [54]; data nezbytná pro sestavení prezentovaných závislostí jsou uvedena též v Příloze A, tab. A 1. Graficky jsou získané výsledky prezentovány na obr. 35 (střední hodnoty tahových pevností včetně naznačené směrodatné odchylky; zelená – GFRP-AR-VE, červená – GFRP-E-VE, modrá – GFRP-E-EP), resp. na obr. 36 (moduly pružnosti vzorků včetně směrodatné odchylky). Typický způsob porušení vzorků je zřejmý z obr. 34 – (vlevo GFRP-E-VE, expozice po dobu 650 dní v alkalickém roztoku o teplotě 60°C; uprostřed GFRP-AR-VE, shodná délka expozice; vpravo GFRP-E-EP, 180 dní expozice v roztoku o teplotě 60°C). Velmi dobře jsou patrné odlišné způsoby porušení jednotlivých typů.



obr. 34: Porušení vzorků GFRP výztuže po expozici v alkalickém roztoku; vlevo GFRP-E-VE, 60°C, 650 dní; uprostřed GFRP-AR-VE, 60°C, 650 dní; vpravo GFRP-E-EP, 60°C, 180 dní



obr. 35: Závislost pevnosti v tahu FRP výztuže na délce expozice a teplotě prostředí: I. GFRP-E-VE (červená barva), typu II. GFRP-AR-VE (zelená) a III. GFRP-E-EP (modrá)



obr. 36: Závislost modulu pružnosti FRP výztuže na délce expozice a teplotě prostředí: I. GFRP-E-VE (červená barva), typu II. GFRP-AR-VE (zelená) a III. GFRP-E-EP (modrá)

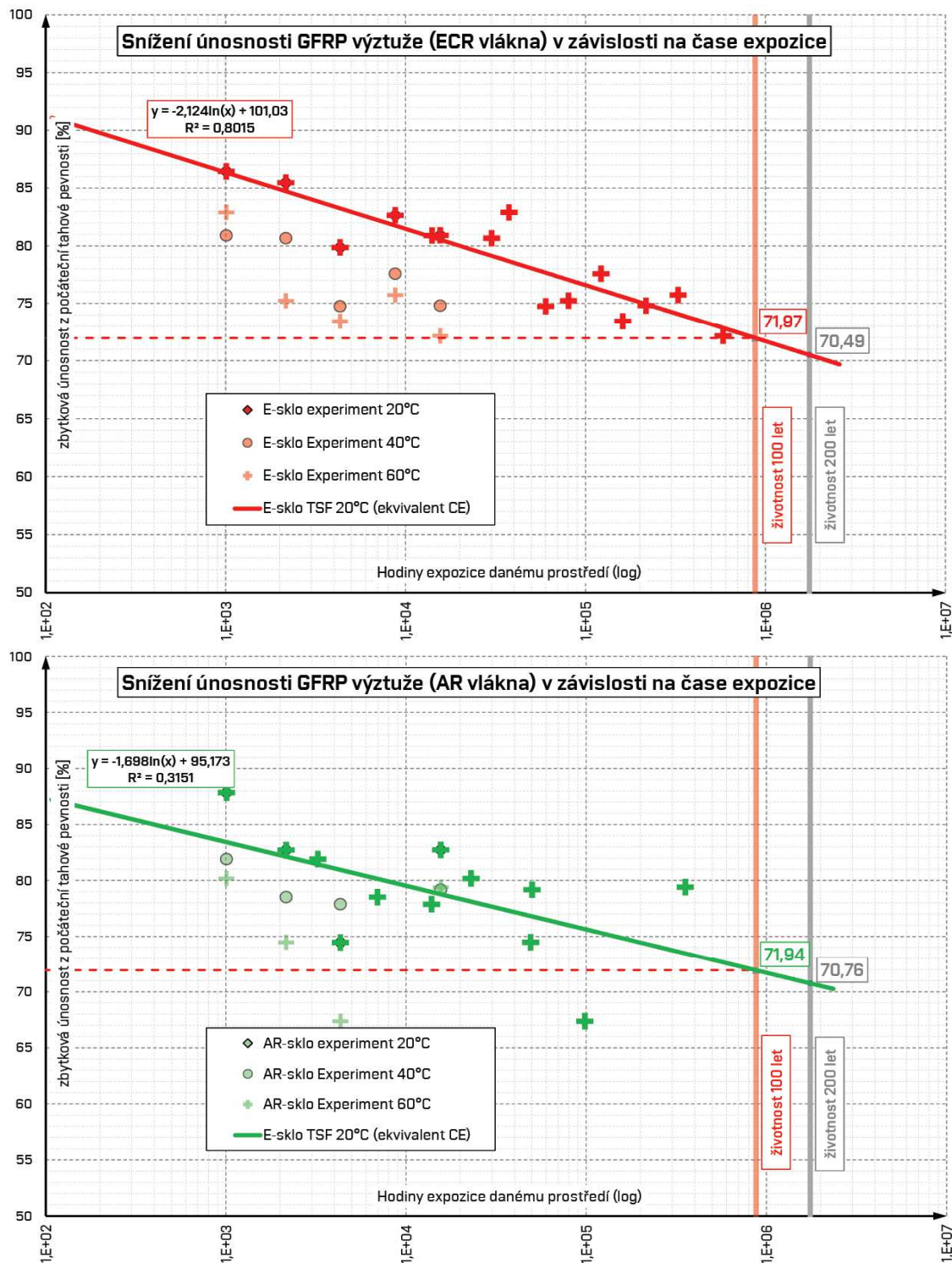
Bez závislosti na typu testované GFRP výztuže (různá vlákna a matrice) byl patrný negativní vliv alkalického roztoku na experimentálně stanovené tahové pevnosti. Se zvyšující se teplotou alkalického prostředí pevnost v tahu GFRP výztuží klesá (viz obr. 35, resp. tab. A 1), toto chování bylo očekávané a v souladu s výsledky zahraničních studií ([65], [66], [10] nebo [25]). Je též zřejmé, že dominantní část degradace proběhla cca v prvních 180 dnech expozice. CSA S807-19 [33] doporučuje délku expozice 3000 hodin; tento časový interval je na základě obdržených výsledků možno považovat pro některé typy výztuží potenciálně za nedostatečný.

Pro testované GFRP výztuže je na obr. 37 provedeno vyhodnocení experimentálně získaných dat pro životnost 100 let a teplotu okolního prostředí 20 °C (proveden dopočet hodnoty urychlení teplotou, tj. AF). Při degradaci pouze alkalickým roztokem (bez působení zatížení) je předpoklad snížení únosnosti za toto období cca 28 % pro oba typy výztuží. Byla tak potvrzena hodnota environmentálního součinitele $C_E = 0,7$ (mokrý prostředí) dle [5]. Obdržený výsledek (pro GFRP výztuže na bázi ECR vláken) je v dobré shodě se závěry studie [10] (viz i 4.2.2).

Z grafu na obr. 38 lze usuzovat, že výztuže s AR vlákny vykazují nižší míru poklesu pevnosti za jednotku času, avšak vyšší citlivost na vodní uložení (vyšší pokles v počátečních fázích experimentu). Je však třeba podotknout, že zvolený model (dle vztahu (20); [22]) vykazuje dostatečnou spolehlivost pouze pro vzorky s E-CR vlákny (index spolehlivosti $R^2 = 0,80$; index korelace 0,89), pro vzorky s AR vlákny je přesnost nedostatečná ($R^2 = 0,32$; $R = 0,57$) a uvedené závěry pro tyto výztuže je třeba chápat pouze jako informativní.

V souladu s výsledky získanými na samotných vláknech bylo pozorováno, že zásadní roli hraje přítomnost vodního prostředí. Je pravděpodobné, že významný pokles tahové pevnosti v prvních okamžicích experimentu nastane i při uložení vzorku pouze do vodní lázně s neutrálním pH (toto konstatování však nebylo ověřeno přímým experimentem).

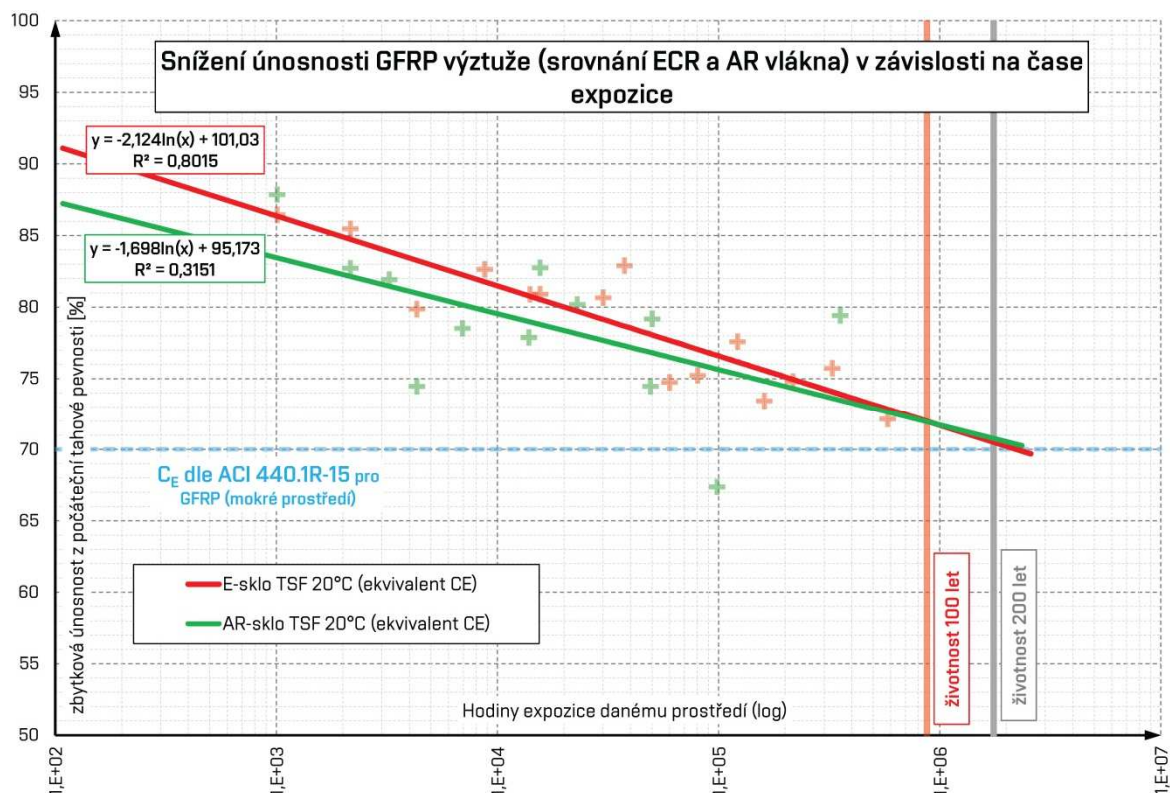
Na začátku řešení experimentu byl předpoklad o vyšší odolnosti kompozitních výztuží z AR vláken při expozici alkáliím, tento však nebyl potvrzen (naopak docházelo k významné degradaci povrchové vrstvy, které se projevila při realizace testů soudržnosti – viz odstavec 5.1.5). Na základě zjištěných skutečností bylo upuštěno od dalšího využití AR vláken při výrobě GFRP výztuže [115].



obr. 37: Únosnost vzorku GFRP výtuzi (ECR vlákna nahoře; AR vlákna dole) v závislosti na době expozice alkalickému prostředí ($T=20^\circ\text{C}$)

Testované vzorky (vyjma jedné série špatně provedených vzorků GFRP-E-EP) v průběhu sledovaného období nevykazovaly významnou změnu hodnoty modulu pružnosti. Bylo pozorováno, že výtuzi s nižším T_g při urychlení testu teplotou blízkou této hodnotě degradují významně rychleji a již nelze hovořit o urychlení; tato skutečnost byla pozorována i v [103].

Všechny dosažené výsledky získané v rámci degračních testů vykazují (v porovnání s referenčními vzorky) též významně vyšší rozptyl. Tento poznatek je významný s ohledem na stanovení bezpečných materiálových součinitelů při návrhu výztuže.



obr. 38: Porovnání vzorků GFRP výztuže s ECR a AR vlákny; alkalické prostředí ($T=20^{\circ}\text{C}$)

5.1.2.3 Dlouhodobé chování FRP výztuží při působení zatížení bez vlivu alkálií - creep

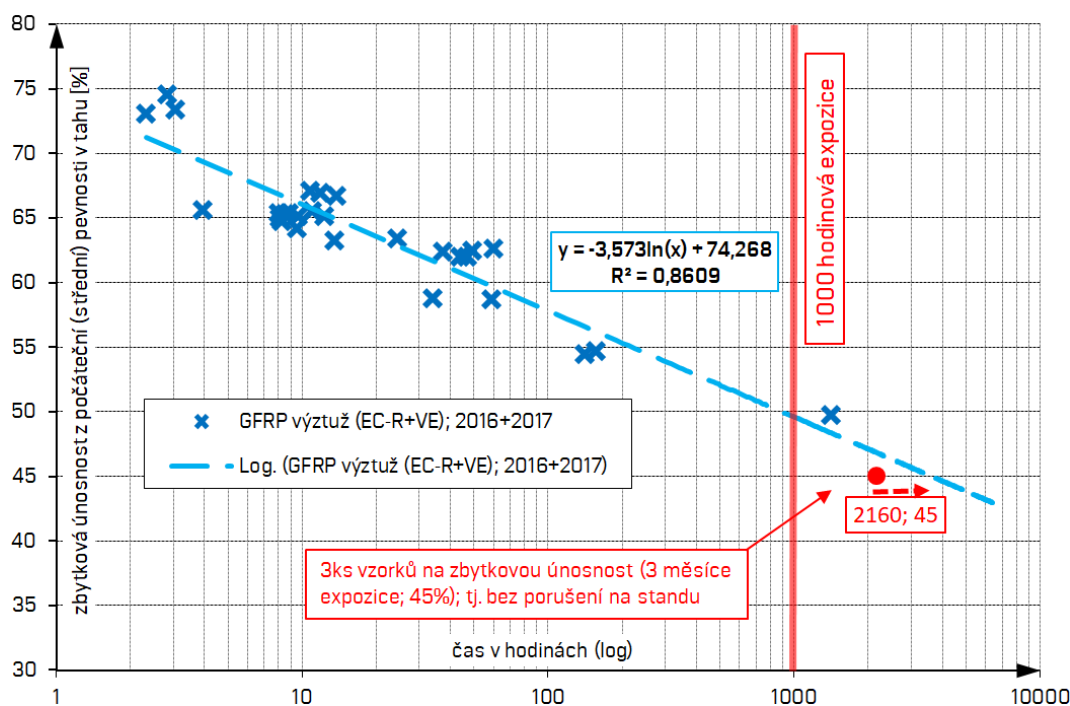
S ohledem na potřebu odlišit příspěvek jednotlivých degračních činitelů byly též realizovány zkoušky vlivu pouze působícího zatížení na životnost GFRP výztuže (tzv. creep rupture test dle [32], resp. [33]). Testy byly provedeny bez vlivu okolního alkalického prostředí (degradace) a také urychlení teplotou. Cílem bylo popsat chování zatíženého vzorku FRP výztuže a stanovit dobu, po kterou je vzorek bezpečně schopen tomuto působícímu zatížení odolávat, ovšem bez interakce s okolním – alkalickým – prostředím. Zkoušky s vlivem působícího zatížení v kombinaci s účinkem alkálií/chloridů jsou stručně popsány v odstavci 5.1.2.4 a 5.1.2.5.

Předmětem testování byly vzorky GFRP výztuží průměru 10 mm s ECR vlákny a VE matricí o střední tahové pevnosti cca 820 MPa a modulu pružnosti 49 GPa (viz tab. 10). Celkem bylo v této konfiguraci ověřeno chování více než 30 vzorků.

tab. 10: Základní mechanické charakteristiky testované GFRP-E-VE výztuže

Označení sady	Tahová pevnost (střední hodnota) [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Modul pružnosti (střední hodnota) [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
GFRP-E-VE	818,4	8,6	48,9	2,2

Zkoušky byly realizovány na vyvinutém zařízení, které bylo velmi stručně popsáno v odstavci 5.1.2.1 (foto zkušebního zařízení s osazenými vzorky a instrumentací – viz obr. 31). Kontinuálně byl prováděn záznam působící síly, přetvoření vzorku, okolní teploty a relativní vlhkosti prostředí a též zaznamenáván čas působení zatížení. Princip zkoušky je popsán v [115], kde lze nalézt i úplný výčet obdržených výsledků. Tyto jsou v grafické formě zobrazeny na obr. 39; zdrojová data v příloze A, tab. A 2.



obr. 39: Závislost tahové pevnosti na logaritmu času (log), vzorky GFRP-E-VE

Nejdelší přímo měřený čas přesahoval 2100 hodin, bylo tedy možno výsledky extrapolovat pro předpokládanou životnost až 100 let. Jako vhodný (výstižnější) model byl zvolen vztah (20) dle [22] popsáný v odstavci 4.2.6.2, který dává v porovnání s (21) [110] konzervativní výsledky. Přesnost zvoleného modelu [22] je, i přes zohlednění nahodilosti výroby díky zařazení vzorků z různých výrobních sérií, plně dostatečná (index spolehlivosti $R^2 = 0,86$; index korelace 0,93).

Z výsledků je velmi dobře patrné, že při snižující se intenzitě působícího dlouhodobého zatížení dochází k prodloužení životnosti vzorku (tj. času do přetržení) přibližně lineárně při uvážení logaritmického zobrazení časové osy. Toto zjištění je plně v souladu s aktuálními zahraničními poznatky (viz uvedené v 4.2.1). Při srovnání s uvedeným na obr. 37 je evidentní, že zvolená působící hladina zatížení má významně vyšší vliv na životnost vzorku než účinek alkalického prostředí. Tento poznatek je důležitý s ohledem na koncepci experimentálního programu. Je zcela zřejmá potřeba realizace zkoušek kombinujících vliv degradačního média a aplikované hladiny dlouhodobě působícího zatížení [115].

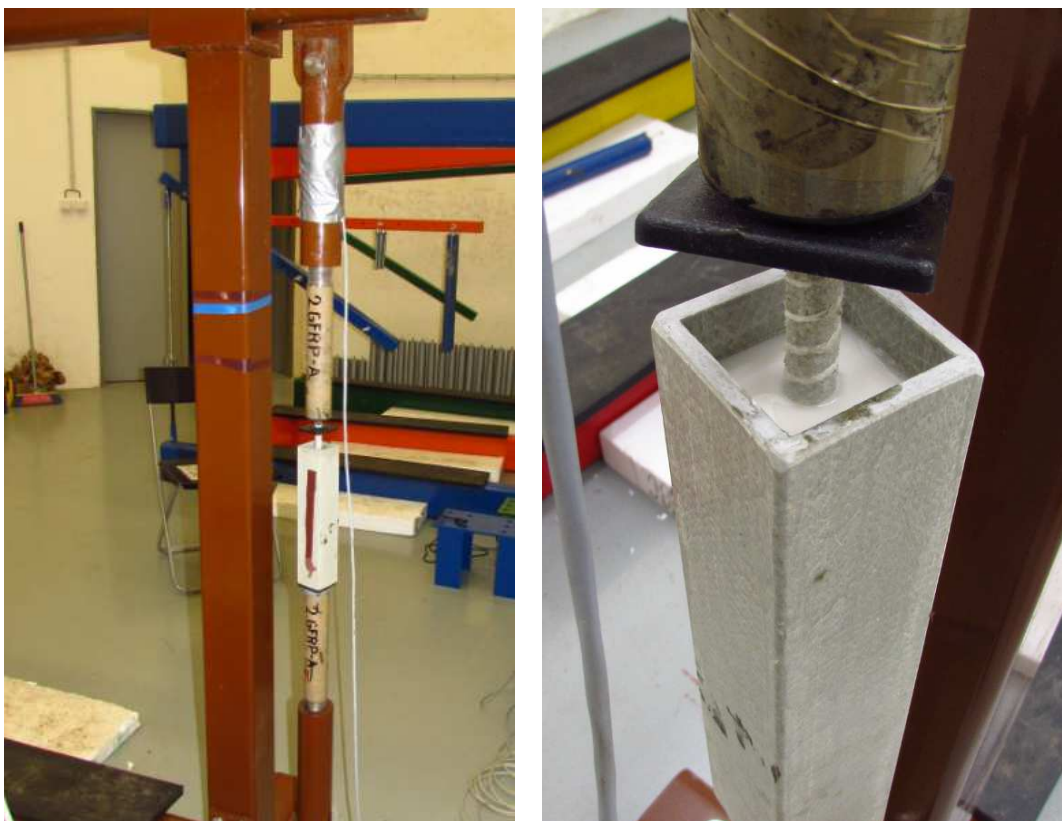
5.1.2.4 Experimentální verifikace dlouhodobého chování GFRP výztuží při souběžném působení zatížení a alkálií

Pro výstižný popis dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuže se jeví jako zásadní zkoušky vzorků vystavených kombinovanému účinku definované hladiny působícího zatížení, alkalického prostředí (např. ve formě roztoku [6]) a teploty, kdy cílem je stanovit čas do kolapsu vzorku za daných okrajových podmínek.

Pro provedení těchto teplotně urychlených testů, které teoreticky vycházely z prací [87] a [65], však dostupné normativní podklady [6], [32], [70] nedefinují jasná pravidla. Především systém zkoušení zakotvený v severoamerických směrnících vychází z opačného principu – stanovení zbytkové únosnosti po definované době expozice¹⁹. Dle názoru autora této práce však není tento způsob s ohledem na skutečný popis dlouhodobé životnosti zcela vhodný (viz uvedené v odstavci 4.2; případně v [128] nebo [126]), resp. vyžaduje velmi obezřetné stanovení limitů pro vyhodnocení těchto testů (v dané oblasti došlo k významným změnám např. při zavedení nového vydání normy CSA S807-19 [33]).

Testovány byly vzorky GFRP výztuže s ECR vlákny a VE matricí o průměru 10 mm (vlastnosti viz tab. 10). Také tvar zkušebních vzorků a jejich osazení do zkušebního zařízení bylo provedeno (pro možnost vzájemného srovnání) shodně s experimentem popsáním v odstavci 5.1.2.3. Střední část vzorku mezi koncovkami však byla navíc osazena nádobkou s alkalickým roztokem připraveným dle [6], který byl v průběhu testu temperován na požadovanou teplotu. pH výsledného roztoku se pohybovalo v rozmezí 12,6 – 13. Vzorek osazený ve zkušebním zařízení je patrný z obr. 40.

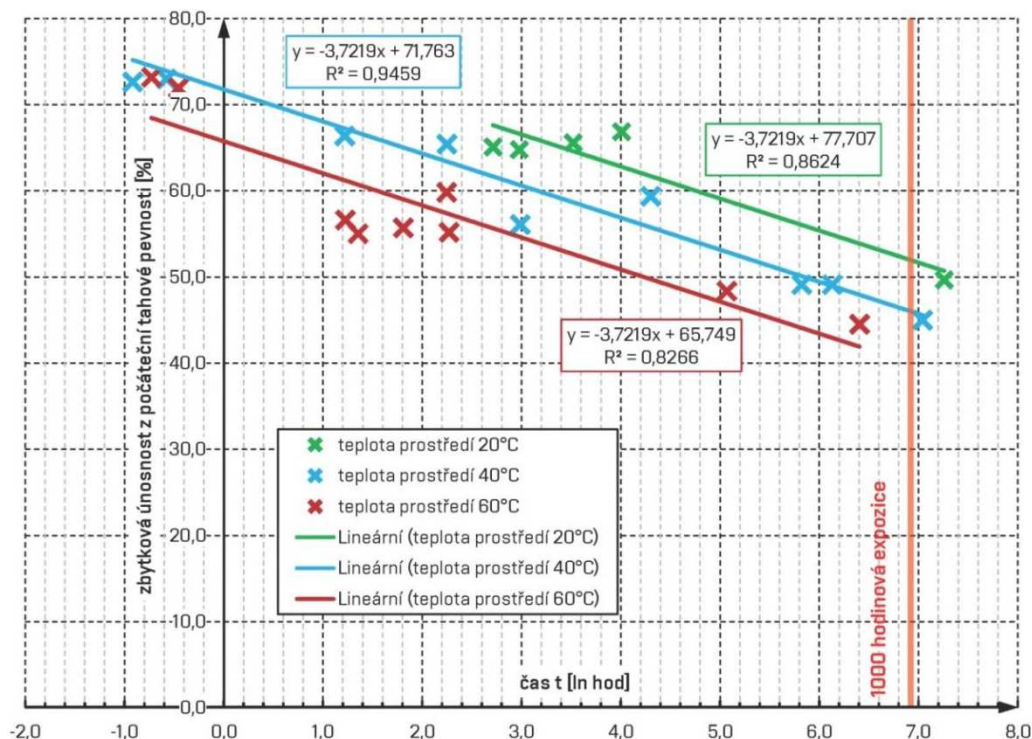
¹⁹ Princip stanovení tzv. retence vzorku, tj. zbytkové únosnosti vzorku po definovaném expozičním čase v daném prostředí a působení zatížení.



obr. 40: Vzorek GFRP výztuže s osazenou nádobkou s alkalickým roztokem; vlevo celkový pohled; vpravo detail nádoby s alkalickým roztokem před uzavřením

Bylo provedeno a vyhodnoceno celkem 35 dlouhodobých testů vzorků GFRP výztuže s celkovou délkou trvání přesahující 4500 hodin. Vzorky byly rozděleny do tří skupin dle působící teploty (20 °C, 40 °C a 60 °C). Vliv teploty na rychlost chemických reakcí, tj. princip urychlení testu, byl stručně popsán již v odstavci 4.2.6.

Přehled vzorků včetně definovaných okrajových podmínek experimentu a získaných výsledků, z nichž byly odvozeny níže prezentované závěry, je uveden v příloze A v tab. A 3, resp. v [115]. Grafické zobrazení získaných závislostí teploty, hladiny působícího zatížení a času do porušení vzorku je provedeno na obr. 41 (působící napětí je vyjádřeno v závislosti na logaritmu (\ln) času). Z grafu je patrná závislost obou sledovaných veličin a také zcela zřejmý účinek teploty, která probíhající chemické děje urychluje. Graf obsahuje rovnice regresních křivek pro jednotlivé testované teploty s uvedením indexu spolehlivosti R^2 . Nejnižší hodnota $R^2 = 0,83$ (index korelace 0,91) značí ještě stále dostatečnou přesnost a tedy vhodnost zvolené aproximace a možnost využití modelů uvedených v odstavci 4.2.6.2.2.



obr. 41: Dlouhodobá tahová zkouška FRP výztuží s VE pryskyřicí (vzorek GFRP-E-VE, 10 mm) s vlivem alkalického prostředí – čas uveden v logaritmickém měřítku (ln)

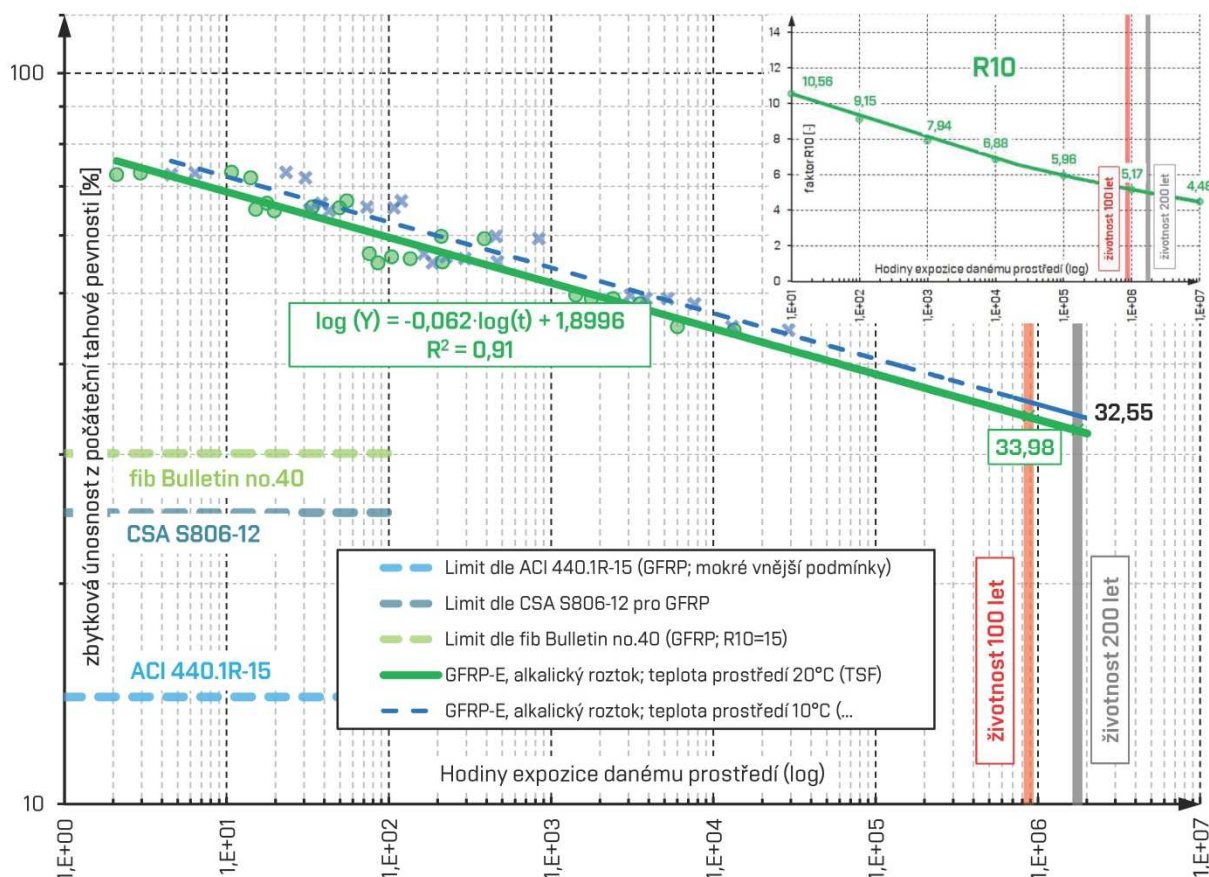
Ze získaných výsledků je velmi dobře patrné, že při snižující se intenzitě působícího zatížení dochází k prodloužení času do porušení vzorku přibližně lineárně při uvážení logaritmického zobrazení časové osy. Tento závěr je platný pro všechny testované teploty. Je zřejmý též účinek působící teploty alkalického roztoku, neboť dochází ke zřetelnému urychlení degradace, která se zvyšuje exponenciálně s rostoucí teplotou. Jako 100 % je uvážena mezní únosnost stanovená z krátkodobé zatěžovací zkoušky, viz tab. 10.

Na základě obdržených výsledků bylo možno určit dlouhodobou únosnost (zatížitelnost) testované výztuže. Též byla potvrzena platnost předpokladu možnosti urychlení dlouhodobých testů pomocí teploty. Při uvážení uvedeného v 4.2.6.1 byl stanoven AF pro zohlednění urychlení testu působící teplotou. Jako vztažná byla uvážena laboratorní teplota 20 °C²⁰. Výsledná získaná závislost mezi časem (životností prvku) a hladinou působícího zatížení při souběžném účinku alkalického prostředí (pH ≥ 12,5) je prezentována na obr. 42.

S ohledem na měřené expoziční časy (nejdelší expoziční čas testovaného vzorku odpovídá cca 13 400 hodinám) byl pro vyhodnocení uvážěn model dle vztahu (21); [110], který (v porovnání s [22]) vykazoval pro testovanou sadu vzorků vyšší index spolehlivosti. Získaná

²⁰ AF umožňující posun měřených hodnot při expozici roztoku o teplotě 40°C je roven 5,24 (tj. 1,66 v LN měřítku), při expozici roztoku o teplotě 60°C pak AF = 22,17 (tj. cca 3,1 v LN měřítku).

závislost byla extrapolována pro předpokládanou životnost konstrukce cca 100 let. Mezní zatížení (při uvážení středních hodnot sledovaných veličin; platí pro zkoumanou výztuž GFRP-E a uvážené podmínky degradace) pro dosažení této požadované životnosti je cca 34 %. To je ve srovnání se závěry studie [24] či [127] méně. Pokles únosnosti výztuže vlivem okolního prostředí a působícího zatížení za jednu časovou dekádu (platí pro konzervativní model (20) dle [22]) v procentech – tj. faktor R_{10} – je cca 8,3 %.



obr. 42: Závislost životnosti GFRP výztuže na hladině působícího zatížení prvku při souběžném účinku alkalického roztoku ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Pro úplnost byla do grafu vynesena i očekávaná závislost pro expozici v prostředí o teplotě 10°C (modře), která je blízká střední roční teplotě v ČR. Avšak, jak bylo uvedeno v 4.2.2, uvážení střední roční teploty při návrhu (s ohledem typ řešeného prvku) může vést k podhodnocení míry degradace [126]. Z obr. 42 je též zřejmé srovnání experimentálně zjištěné hodnoty dlouhodobé únosnosti testované GFRP výztuže s doporučeními platných návrhových podkladů [5], [32] a [46] (při uvážení odpovídajícího prostředí; hodnoty uvedeny též v tab. 4). Je patrné, že především doporučení [5] je značně konzervativní a významně podhodnocuje hodnotu dlouhodobé únosnosti FRP výztuže.

5.1.2.5 Experimentální verifikace dlouhodobého chování GFRP horninových kotev při souběžném působení zatížení a chloridů

V rámci řešení výzkumného projektu FV10505 byla ověřena dlouhodobá odolnost vyvíjené kompozitní horninové kotvy (svorníku) na bázi skleněných vláken. Produkt vznikl ve spolupráci se společností PREFA KOMPOZITY, a.s. a STRIX Chomutov, a.s., kdy tato definovala požadavky na vlastnosti a především určila podmínky, kterým bude v průběhu své životnosti prvek vystaven. Zásadní byla nutnost dlouhodobě přenášet tahové zatížení²¹ a potenciální možnost souběžného působení chloridů v případě instalace v blízkosti komunikací. Aplikace vyvíjeného produktu je patrna z obr. 43 (realizována trhací zkouška svorníku in-situ). Autor této práce se na řešení a vývoji prvku podílel jako klíčový člen řešitelského týmu.



obr. 43: Osazený GFRP horninový svorník při provádění trhací (pull-out) zkoušky; [114]

Provedený experiment si kladl za cíl stanovit dlouhodobou odolnost/životnost navrženého řešení a zároveň definovat přípustnou hladinu předpínací síly, kterou bude kotva schopna dlouhodobě bezpečně přenášet. Bylo tedy nutno realizovat zkoušku kombinující účinek tahové síly (creep výztuže) a degradace chloridy. Konfigurace experimentu byla navržena totožná s uvedeným v 5.1.2.4, obdržené výsledky je tedy možno (s jistými omezeními, viz dále) navzájem porovnat.

²¹ Při instalaci je do prvku vnesena nízká hladina předpínací síly.

Zkoušky byly realizovány na vzorcích GFRP svorníků $\text{Ø}10$ mm vyrobených z ECR vláken a epoxidové pryskyřice (základní mechanické charakteristiky určené z provedených tahových zkoušek dle [58] a [70] jsou uvedeny v tab. 11). Degradací médium představoval 3 % solný roztok (hmotnostně). Jako urychlující faktor byla uvažována teplota $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, referenční pak $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modelované vysoce degradační prostředí bylo, s ohledem na předpokládanou aplikační oblast (očekávalo se pouze možné působení odstříkujícího solného roztoku s přilehlé komunikace, nikoliv plné nasycení), voleno velmi konzervativně, avšak plně v souladu s požadavky aplikačního garanta vyvíjeného produktu²².

Pro ověření dlouhodobého chování svorníku vystaveného kombinovanému působení solného roztoku a napětí byly zvoleny čtyři základní úrovně zatížení (40 – 70 % krátkodobé tahové pevnosti vzorku). Celkem bylo testováno 24 vzorků GFRP svorníků s různými okrajovými podmínkami a časy expozice od desítek minut po více jak tisíc hodin. U vzorků s hladinami působícího zatížení nižšími než 30 % jednorázové/okamžité únosnosti nedošlo po dobu zatěžování (přes 1000 hodin) k jejich porušení. Provedení zatěžovací zkoušky, které bylo totožné s uvedeným v 5.1.2.4, je včetně detailu úpravy zkušebního vzorku patrné z obr. 44.



obr. 44: Dlouhodobé tahové zkoušky GFRP svorníku (horninového kotvy) při působení agresivního prostředí solného roztoku

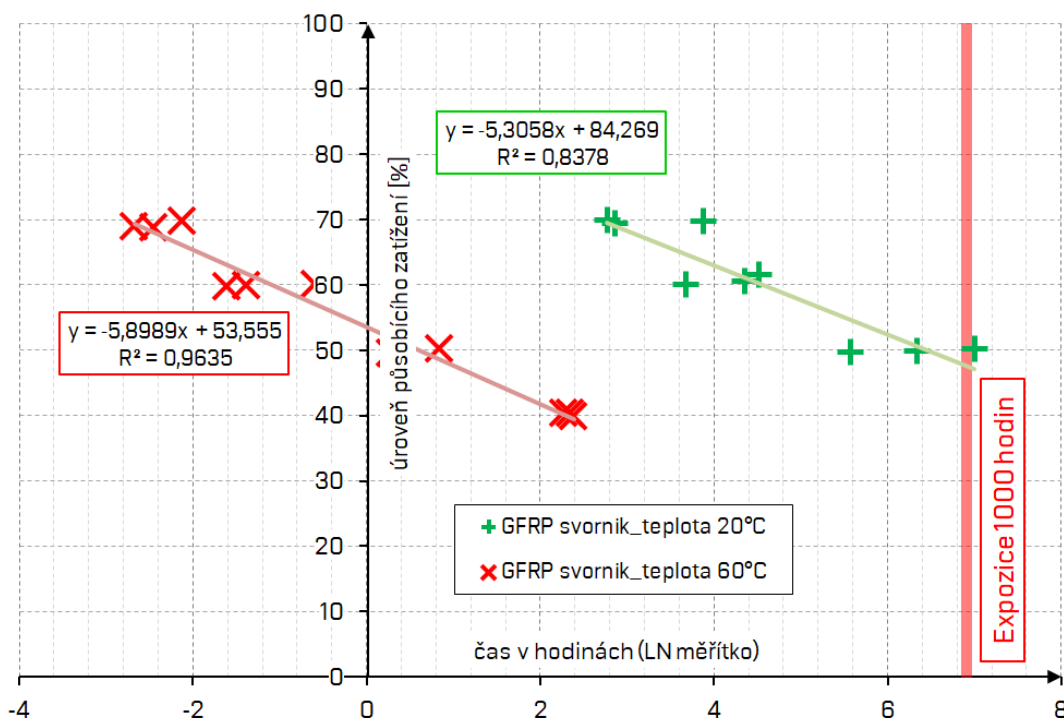
²² Okrajové podmínky testu odpovídaly spíše zkouškám pro aplikace v mořské vodě.

tab. 11: Základní mechanické charakteristiky testované GFRP horninové kotvy

Označení sady	Tahová pevnost (střední hodnota) [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Modul pružnosti (střední hodnota) [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
svorník GFRP NaCl	704,7	13,95	47,8	1,6

5.1.2.5.1 Výsledky obdržené z dlouhodobých zkoušek GFRP svorníku s vlivem zatížení a působení chloridů

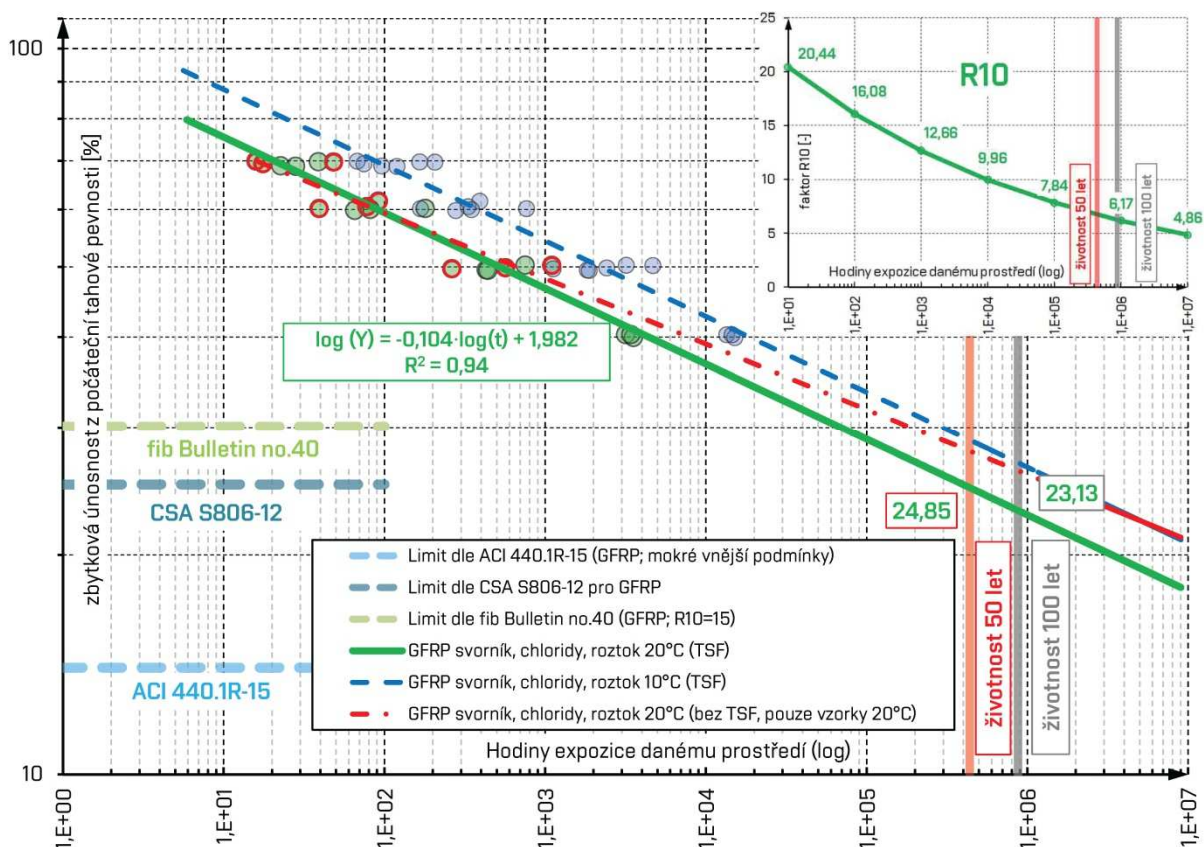
Obdržené výsledky, které byly následně využity pro stanovení prezentované dlouhodobé únosnosti GFRP svorníku s vlivem působení degradačního prostředí, jsou uvedeny v příloze A; tab. A 4. Výsledná závislost hladiny působícího zatížení a teploty na logaritmu času je zobrazena na obr. 45 (jako 100 % je uvážena mezní únosnost z krátkodobé zkoušky). Je zcela zřejmý faktor působící teploty roztoku. Došlo ke zřetelnému urychlení degradace, která se zvyšuje exponenciálně s rostoucí teplotou. Z obdržného AF (5,79 v LN měřítku) je zřejmá zvýšená citlivost testované výztuže na prostředí, jemuž byla vystavena.



obr. 45: Dlouhodobá zkouška GFRP svorníku s EP pryskyřicí (10 mm) s vlivem roztoku chloridů – čas v logaritmickém měřítku (ln)

Z grafu na obr. 45 jsou zřejmé rovnice regresních křivek pro jednotlivé testované teploty. Zvolená aproximace vykazuje dostatečnou přesnost ($R^2 = 0,84$) a umožňuje pro predikci dlouhodobého chování využití modelů uvedených v odstavci 4.2.6.2.2.

Na základě stanoveného AF a za využití degradačního modelu dle vztahu (21) [110] byla sestavena závislosti mezi hladinou působícího zatížení a časem expozice degradačnímu prostředí o teplotě 20°C. Následně byla získaná závislost extrapolována pro požadovanou životnost konstrukce 100 let. Mezní přípustné aplikované zatížení pro dosažení této požadované životnosti (při uvážení středních hodnot sledovaných veličin a teploty expozice 20°C) je 23,1 % krátkodobé únosnosti kompozitu – viz obr. 46. Při využití degradačního modelu [22] by byla dosažena významně nižší hodnota. Tato však nebyla uvážena, neboť model dle [22] vykazoval nižší shodu s přímo měřenými výsledky. Do grafu byla pro úplnost vynesena i očekávaná závislost pro expozici v prostředí o teplotě 10 °C (modře), které je blízké střední roční teplotě v ČR a pro aplikace v hornině ji lze uvážit.



obr. 46: Životnost GFRP svorníku v závislosti na hladině působícího zatížení při souběžném účinku chloridů

Pokles dlouhodobé únosnosti svorníku za jednu dekádu (platí pro konzervativní model (20) dle [22]) – tj. faktor R_{10} – nabývá hodnoty 13,2, to je významně více než v případě výsledku výztuže v alkalickém prostředí – viz uvedené v odstavci 5.1.2.4. V této souvislosti je třeba poukázat na zvýšenou míru degradace vzorků při vystavení teplotě prostředí 60°C. Z vyhodnocení obdržných výsledků bylo zřejmé, že tato teplota působila na materiál

svorníku vysoce degradačně a její využití jako akceleračního faktoru bylo sporné. Je pravděpodobné, že zmíněné chování bylo způsobeno méně kvalitním vytvrzením materiálu svorníku (shodně s popsáním v 5.1.2.2). Z tohoto důvodu byla do grafu doplněna i závislost získaná pouze ze vzorků temperovaných na 20 °C, kdy výsledná hodnota je o cca 10 % vyšší (25,1 %). Značný vliv solného roztoku (v kombinaci s působícím zatížením) na dlouhodobou únosnost GFRP svorníku je však zcela jasně patrný i u těchto vzorků.

Na obr. 46 je též uvedeno srovnání s mezními přípustnými hodnotami stanovenými dle platných návrhových podkladů [5], [32] a [46]. Je zřejmé, že hodnota dle [5] opět podhodnocuje skutečné chování testovaných vzorků. Naopak limit dle normy [32] téměř přesně odpovídá experimentálně získanému výsledku; postup dle [46] však již výslednou hodnotu nadhodnotil.

5.1.2.5.2 *Srovnání výsledků degradace vzorků GFRP výztuží v alkáliích a roztoku chloridů*

Pro realizaci experimentu popsaného v odstavci 5.1.2.4 a 5.1.2.5 a následné vyhodnocení byly využity shodné postupy a degradační modely. Nabízí se tak možnost získané výsledky vzájemně porovnat. Je však třeba uvést, že v obou experimentech byly testovány mírně odlišné kompozice GFRP materiálu – viz tab. 12, které však na získané hodnoty mají zásadní vliv a možnosti srovnání limitují.

V případě zkoušek v alkalickém prostředí byly testovány GFRP výztuže s ECR vlákny a VE maticí; chloridům byly vystaveny vzorky horninových svorníků se shodnými vlákny, avšak EP pryskyřicí. Oba typy GFRP materiálů vykazovaly mírně odlišné klíčové mechanické charakteristiky, kdy vyšších tahových pevností (cca o 16 %) dosahovaly vzorky GFRP-E-VE (viz tab. 10, resp. tab. 11). Srovnání je tedy nutno chápat pouze jako orientační.

tab. 12: Srovnání výsledků creep testů v alkalickém prostředí a roztoku chloridů

Označení sady	vlákna	matrice	povrchová úprava	Mezní zatížení (100 let)	Faktor R ₁₀
GFRP-E-VE	ECR	VE	krycí/adhezní vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovínem	33,98 %	8,3
svorník GFRP NaCl	ECR	EP	krycí/adhezní vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s nylonovým ovínem	23,13 %	13,2

Z uvedených výsledků je velmi dobře patrné, že vyšší míra degradace, tj. nižší hodnoty přípustného dlouhodobě působícího zatížení, byly dosaženy pro vzorky umístěné v roztoku

chloridů. Tento výsledek nebyl očekáván, viz i uvedené např. v [79], nebo [65], kdy byly testovány obdobné podmínky expozice. Provedený následný rozbor poukázal na významný vliv výroby na obdržené výsledky, kdy GFRP svorník byl hůře vytvrzen. Tato skutečnost se negativně projevila v odolnosti materiálu při expozici danému prostředí [117].

Významná pro posouzení dlouhodobého chování je též hodnota faktoru R10, který velmi zjednodušeně poukazuje na kvalitu testované výztuže a její odolnost v daném prostředí. I tato poukazuje na významně vyšší citlivost GFRP svorníku na působení roztoku chloridů, resp. jeho nižší kvalitu. Testované vzorky též dosahovaly mírně nižších výsledných hodnot v porovnání s výsledky špičkových dostupných produktů, viz [24] či [127].

I přes výše vyslovené pochybnosti o nižší kvalitě výroby GFRP svorníku je třeba poukázat na skutečnost, že oba testované produkty pro požadovanou životnost 100 let překročily limitní hodnoty definované v ACI 440.1R-15 [5]. Dle tohoto podkladu by bylo nutno redukovat napětí od dlouhodobě působícího zatížení na 14 %. Je však třeba uvést, že experimentálně stanovené hodnoty jsou uvedeny ve středních hodnotách.

Zkoušky prokázaly vhodnost navrženého způsobu testování – tj. souběžného účinku působícího tahového napětí a degradačního média. Při srovnání s výsledky uvedenými v odstavcích 5.1.2.2 a 5.1.2.3, tj. oddělených zkoušek degradace v roztoku a zkoušek dotvarování výztuže, je zřejmé, že pouze kombinované testy dokáží poskytnout spolehlivou predikci dlouhodobého chování daného typu kompozitu. Tyto závěry jsou plně v souladu s moderním přístupem k návrhu, který je popsán např. v [75] či [127] a je využit i ve *fib Bulletin no.40* [46]. Autor této práce uvedené závěry prezentoval např. v [52].

5.1.3 Vliv konfigurace experimentu na výsledek – degradační zkoušky GFRP výztuže s vlivem krycí vrstvy betonu

Dostupné zkušební podklady [6], resp. [32] umožňují testovat vzorky v konfiguraci „holé výztuže“, která je přímo exponována danému degradačnímu médiu, ovšem také s betonovou krycí vrstvou. Je tedy účelné stanovit míru ovlivnění výsledku (tj. velikost degradace vzorku) uváženými okrajovými podmínkami testu. Byl proto navržen experiment s cílem zjistit, zdali dojde v reálném prostředí betonové konstrukce ke zpomalení pronikání alkálií do těla výztuže a tím i ke snížení míry redukce sledovaných charakteristik. Zahraniční studie poukazovaly na skutečnost, že tento vliv bude významný, avšak míra ovlivnění je v závislosti na využití metodě, agresivním prostředí a typu testovaných vzorků různá [79], [132] nebo např. [65].

Byly vyhotoveny vzorky GFRP výztuže opatřené betonovou krycí vrstvou. Tyto byly následně umístěny do alkalického roztoku o teplotě 20, 40 a 60 °C s cílem zajistit jejich 100 % nasycení. Prostředí, konfigurace testu a další okrajové podmínky byly, pro možnost vzájemného srovnání, shodné s uvedeným v odstavci 5.1.2.2. Testovány byly vzorky GFRP výztuže s VE a EP pryskyřicí o průměru 10 mm (vzorky GFRP-E a GFRP^{NG}). Vzorky byly centricky osazeny do „válečku“ vyhotoveného z jemnozrnného samozhutitelného betonu pevnosti cca 30 MPa o průměru 30 mm a délce 300 mm, viz. obr. 47 [115], který simuloval skutečné prostředí plně nasyceného betonu. V definovaném časovém intervalu 1000 hodin (uváženo v souladu s [46]) byly vzorky podrobeny jednorázové tahové zkoušce.



obr. 47: Zkušební tělesa pro degradační zkoušky alkalickým prostředím s krycí vrstvou; vlevo: výroba; uprostřed: uložení vzorků v temperovaném alkalickém roztoku; vpravo: vzorek po vyjmutí z lázně

Před umístěním těles do alkalického prostředí byly vzorky GFRP výztuže vně betonových těles opatřeny epoxidovým nátěrem, který zabraňuje pronikání alkálií v nežádoucích místech vzorku, tj. mimo betonovou krycí vrstvu. Celkem bylo vyrobeno 24 ks zkušebních těles pro degradační zkoušky výztuže s vlivem krycí vrstvy: 12 ks ke každému typu testované matrice,

kteřé byly rovnoměrně rozděleny do lázní o požadované teplotě. Po uplynutí expoziční doby byly všechny vzorky vyjmuty a vizuálně zkontrolovány. Nebyly patrné změny jejich vzhledu. Nebyla též zaznamenána patrná porušení a nespojitosti v místě kontaktu GFRP výztuže a betonu.

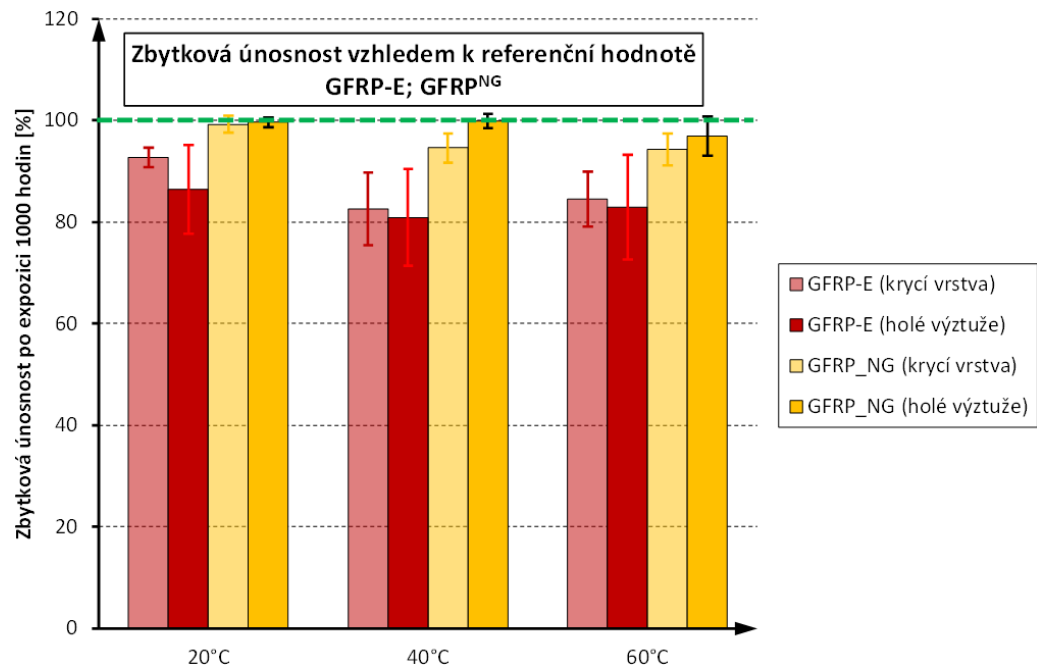
Tahová zkouška byla realizována v konfiguraci dle odstavce 5.1.2.2; [58], [70]. V průběhu experimentu však z důvodu přítomnosti krycí vrstvy nebylo sledováno přetvoření vzorku²³. Výsledné/zjištěné střední tahové pevnosti a směrodatné odchylky jsou uvedeny v tab. 13 (jako referenční jsou uváženy hodnoty určené na holých nedegradovaných výztužích). Výsledky jsou ve formě procentuální hodnoty zbytkové únosnosti rovněž zobrazeny na obr. 48.

Do vyhodnocení jsou zahrnuty pouze vzorky, které se porušily žádoucím způsobem, tj. došlo k přetržení výztuže v místě betonového válečku. Tento byl již při nízkých hladinách působícího zatížení porušen příčnými trhlinami a neovlivňoval tak získané výsledky tahové pevnosti výztuže. Typický způsob porušení je patrný z obr. 49 (vlevo betonový váleček porušený příčnými trhlinami v průběhu zatěžování, vpravo porušení výztuže).

tab. 13: Výsledky tahových zkoušek GFRP výztuže v alkalickém roztoku bez vlivu napětí s betonovou krycí vrstvou (1000 hodinová expozice)

Vzorek/testovaná série	Teplota alkalického roztoku [°C]	Degradace [dny]	střední tahová pevnost [MPa]	změna vůči ref. hodnotě [%]	směrodatná odchylka [MPa]	variální koeficient	modul pružnosti - střední hodnota [GPa]	poznámka k uložení
GFRP-E-VE	referenční	-	818.4	100.0	8.6	0.01	48.9	bez uložení
	20°C	42	758.8	92.7	15.2	0.02	-	alkalický roztok + krycí vrstva
	40°C		675.4	82.5	58.6	0.09		
	60°C		691.8	84.5	44.5	0.06		
	20°C	42	707.5	86.4	70.8	0.10	50.1	alkalický roztok (holé výztuže)
	40°C		662.0	80.9	78.0	0.12	49.6	
60°C	678.4		82.9	84.5	0.12	49.5		
GFRP ^{NG} (EP)	referenční	-	1018.8	100.0	5.2	0.01	52.2	bez uložení
	20°C	42	1011.3	99.3	16.8	0.02	-	alkalický roztok + krycí vrstva
	40°C		963.5	94.6	29.4	0.03	-	
	60°C		960.7	94.3	31.6	0.03	-	
	20°C	42	1015.3	99.7	9.3	0.01	52.5	alkalický roztok (holé výztuže)
	40°C		1017.7	99.9	13.6	0.01	-	
60°C	987.5		96.9	39.1	0.04	-		

²³ Nebylo realizováno měření přímo na vzorku. Byl měřen pouze posun lisu, který je však negativně ovlivněn posunem vzorku v koncovech. Nebyl tak zaznamenán vliv prostředí na změnu modulu pružnosti výztuže. S ohledem na předchozí zjištění však modul pružnosti není alkalickým prostředím zásadně ovlivněn.



obr. 48: Zbytková únosnost vzhledem k referenční hodnotě (vyjádřeno v %), vzorky GFRP-E-VE (červená barva) a GFRP^{NG} (žlutá)



obr. 49: Typický způsob porušení vzorků GFRP výztuže s betonovým válečkem; 1000 hodin expozice

Z vyhodnocení provedených vzorků s krycí vrstvou a jejich srovnání s referenčními hodnotami (viz obr. 48) je zřejmé, že přítomnost betonové krycí vrstvy ovlivňuje (snižuje) výslednou degradaci. Pozitivní vliv byl zřejmý u vzorků s větším impaktem agresivního prostředí, tj. méně kvalitních výztuží (vzorky GFRP-E). Při uvážení krycí vrstvy docházelo ke snížení redukce tahové pevnosti a též rozptylu získaných výsledků. Snížení redukce dlouhodobé únosnosti bylo cca o 2 až 5% (dle teploty). Tento rozdíl je významný, neboť je předpoklad, že při delších expozičních časech tento bude dále narůstat. Uvedené závěry jsou v souladu i s publikovaným v zahraničních studiích, např. [79].

Naopak u vzorků, u kterých nebyl pokles hodnot tahové pevnosti stanovených na holých (přímo ponořených) výztužích téměř patrný (pohyboval se na úrovni rozptylu stanovených hodnot), je vliv betonové krycí vrstvy nevýznamný, v rámci statistické chyby. Z uvedeného srovnání je též zřejmý vliv odlišné kompozice výztuže a způsobu výroby, kdy vzorky GFRP^{NG} dosahovaly již při krátkodobých testech významně vyšších fyzikálně-mechanických charakteristik – viz i uvedené v tab. 13.

5.1.4 Alternativní zkušební metody pro určení míry degradace FRP výztuže

Z hlediska nákladů na provedení degračních zkoušek je zásadní otázka, zdali je možno realizovat tyto rozsáhlé dlouhodobé testy, a tedy kvantifikovat míru degradace vzorku, za pomoci jednoduchých, snadno opakovatelných, testů, kdy by nemusely být vzorky opatřovány např. nákladnými ocelovými koncovkami. Zjednodušené testy mohou být určeny ke kvantitativnímu hodnocení míry degradace a není nezbytné, aby zcela nahradily tahové zkoušky, které poskytují požadované mechanické charakteristiky. Mohou však významně zredukovat jejich objem. Získané hodnoty mohou sloužit též jako referenční pro budoucí sledování homogenity výroby. Možnosti využití těchto typů zkoušek jsou zřejmé např. i ze studií [25], [79], ale i [9] či [132].

Jako alternativní mechanické testy (kromě optických a chemických analýz na úrovni mikrostruktury materiálu) se jeví vhodné využití:

- a) zkoušky v příčném smyku (TSS) realizované dle normy ISO 10406-1:2015 [70], resp. ASTM D7617 [18]. Při zkoušce je stanoveno mezní smykové napětí pro čisté stříhové namáhání průřezu FRP výztuže. Při určení mezního napětí je vycházeno z předpokladu, že v příčném řezu výztuže (ve smykové rovině) nevznikají normálová napětí a v posuzovaném řezu existuje stav čistého (prostého) smyku. O únosnosti tak

rozhoduje převážně matrice a test by měl, dle předpokladu, zachytit a kvantifikovat míru její degradace (viz i uvedené v odstavci 4.3).

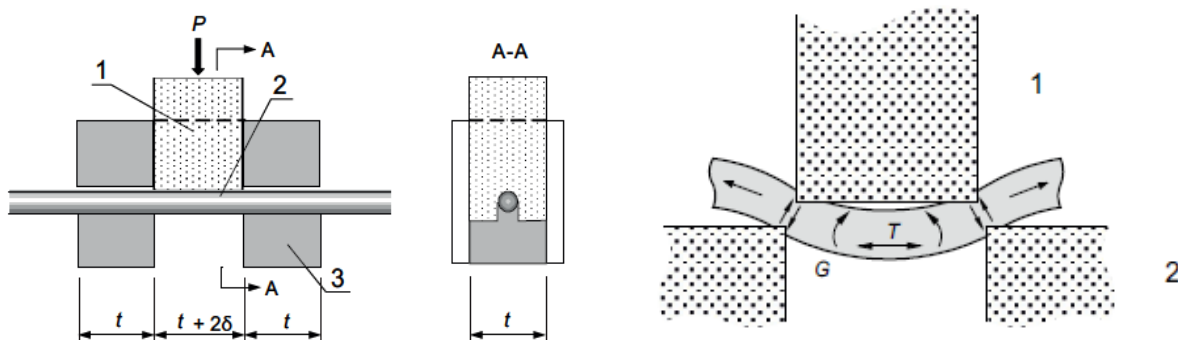
- b) zkoušky v podélném – interlaminárním – smyku (ILSS) dle americké normy ASTM D 4475 [12]. Konfigurace zatěžovací zkoušky ILSS je navržena jako tříbodový ohyb s velmi krátkým rozponem vzorku mezi podporami (dle [12] v rozmezí 3-6 průměrů zkušebního vzorku). Poměr „průměr vzorku/vzdálenost podpor“ musí být vždy volen s ohledem na žádoucí porušení vzorku, tj. trhlinou rovnoběžnou se směrem nosných vláken (kolmo na směr zatížení) vznikající na rozhraní vlákna a matrice. Test je proto vhodný především z hlediska možnosti ověřit odolnost matrice, resp. kontaktu vlákno/matrice, který je s ohledem na dlouhodobou spolehlivost kompozitu zásadní.

V rámci provedených experimentálních studií byly ověřeny obě výše zmíněné metody. Pro možnost srovnání byly zkoušky TSS i ILSS realizovány na shodných vzorcích – degradovaných výztužích GFRP-E-VE průměru 10 mm po 650 dnech expozice alkalickému roztoku o teplotě 20, 40 a 60 °C (materiálové charakteristiky byly uvedeny v tab. 10). Popis testovaného typu GFRP výztuže a okrajových podmínek expozice viz 5.1.2.2. Testováno bylo 6 ks vzorků v každé sadě pro ověření metody TSS, v případě ILSS pak jedna sada obsahovala čtyři vzorky (celkem 40 ks vzorků).

5.1.4.1 Zkouška v příčném smyku (TSS)

Zkouška je realizována dle metodiky [58] a norem [18] a [70]. Zkušební postup slouží ke stanovení odolnosti průřezu výztuže při působení kolmého zatížení. Příčná únosnost vzorku je determinována především vlastnostmi matrice (pouze v menší míře se projevuje vliv vláken), je tak možno využití tohoto zkušebního postupu právě pro zachycení míry degradace této složky kompozitu.

V rámci zkoušky je nutno zajistit porušení vzorku stříhem (tj. smykovým namáháním v jedné rovině kolmé na střednici vzorku). Je zcela nezbytné vyloučit nežádoucí ohybové namáhání, které by negativně ovlivnilo/zkreslilo výsledky. Porušení vzorku musí nastat v řezu v místě smykové roviny bez známek výraznější delaminace vláken vzorku a bez vzniku ozubu na stříhové rovině (vytažení skupiny vláken ze stříhové roviny). Základní princip je zřejmý z obr. 50 (převzato z [70]).



obr. 50: Schéma a základní princip zkoušky v čistém smyku; převzato z [70]

Mezní napětí v čistém smyku (stříhu) τ_{TSS} pak může být stanoveno dle vztahu

$$\tau_{TSS} = \frac{F_{TSS}}{2 \cdot A_s}, \quad (30)$$

kde A_s je průřezová plocha vzorku o nominálním průměru d ; F_{TSS} maximální dosažená (měřená) síla působící kolmo na směr pnutí vláken.



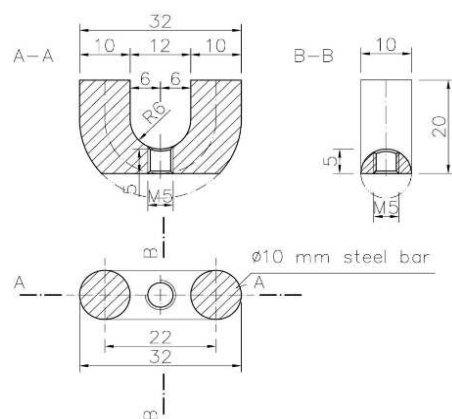
obr. 51: Konfigurace zkoušky v čistém smyku (vlevo) a typický způsob porušení (vpravo)

Reálné provedení zkoušky je patrné z obr. 51. Zobrazeno je též typické porušení vzorků kompozitní výztuže (vzorky GFRP-E-VE exponované alkalickému prostředí o teplotě 60 °C po dobu 650 dnů). Obdržené výsledky jsou (společně s výsledky ILSS a tahovými zkouškami) přehledně sumarizovány v tab. 14. Z obdržených výsledků je dobře patrný vliv agresivního

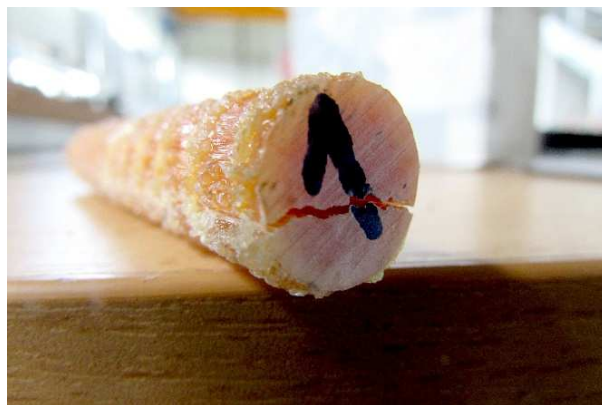
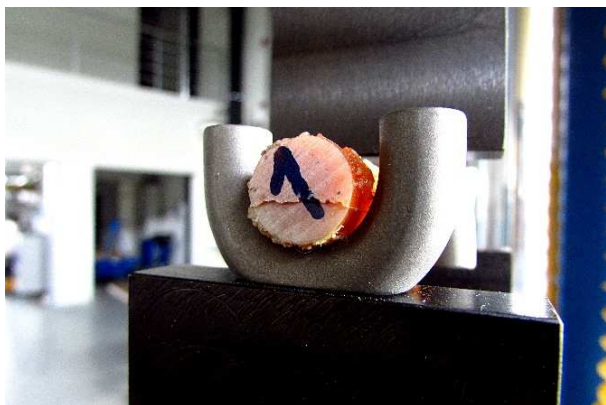
prostředí na snížení sledované veličiny – napětí v čistém smyku. Zřetelná je též vyšší míra redukce pevnosti pro vzorky umístěné v roztoku o vyšší teplotě. Pokles hodnoty sledované veličiny je v porovnání s referenční hodnotou až cca 10 %. Je zřejmé, že pevnost v příčném smyku je vlivem působení agresivního prostředí ovlivněna.

5.1.4.2 Zkouška v podélném – interlaminárním – smyku (ILSS)

Konfigurace zatěžovací zkoušky vychází z normy ASTM D 4475 [12], kde je uveden i doporučený tvar zkušebního zařízení a požadavky na způsob testování. V [12] navržený tvar přípravku byl, oproti doporučení, mírně upraven a to především s ohledem na potřebu variovaní vzdáleností podpor a též testování různých průměrů. Princip zkoušky a požadovaný stav napjatosti ve vzorku však nebyly touto úpravou ovlivněny. Postup uvedený v [12] umožňuje volbu rozpětí podpor v rozmezí 3-6 průměrů zkušební vzorku, což zásadně ovlivňuje výsledek. Jako rozpětí vhodné pro realizovaný experiment byla uvážena vzdálenost podpor 5d (50 mm). Konfigurace zkoušky a testovací zařízení je patrné na obr. 52.



obr. 52: Konfigurace zkoušky v podélném (interlaminárním) smyku (vlevo); výrobní výkres jedné z podpor pro nominální průměr výztuže 10 mm (vpravo)



obr. 53: Detail uložení vzorku při zkoušce a typický způsob porušení

Výpočet pevnosti v podélném smyku τ_{ILSS} je realizován dle vztahu [12]

$$\tau_{ILSS} = 0,849 \cdot F_{ILSS} / d^2, \quad (31)$$

kde F_{ILSS} je mezní zatěžovací síla při tříbodovém ohybu a d je průměr vzorku.

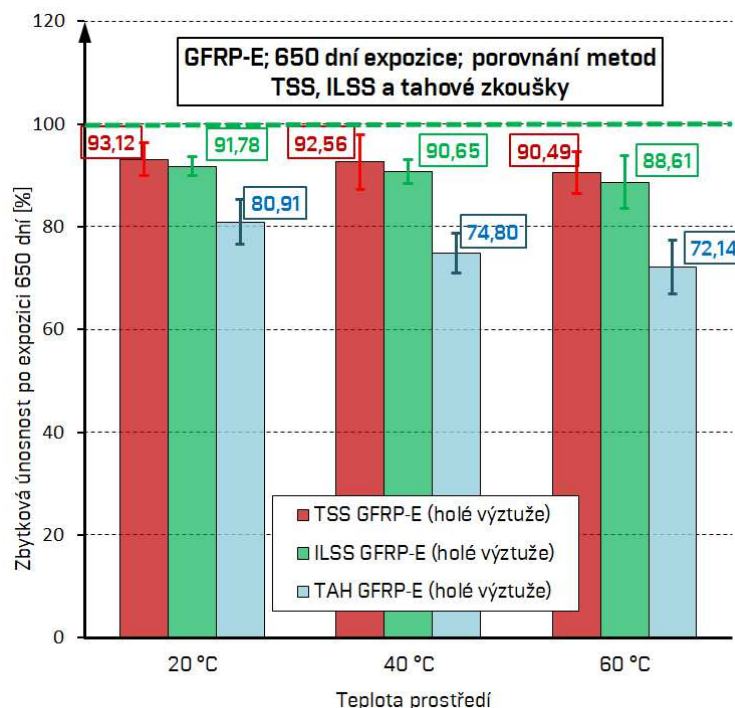
Veškeré, při zkoušce testované, vzorky se porušily žádoucím způsobem, tj. došlo ke vzniku vodorovné trhliny rovnoběžné se směrem nosných vláken (podélné usmýknutí) – viz obr. 53. Získané výsledky jsou uvedeny v tab. 14. Pozorován byl opět přímý vliv působení agresivního prostředí na sledovanou charakteristiku. Redukce interlaminární smykové únosnosti je pro exponované vzorky až cca 12 %.

5.1.4.3 Srovnání dosažených výsledků a zhodnocení vhodnosti využití metody

Srovnání obdržných výsledků je provedeno v tab. 14 a na obr. 54. Z uvedeného je zřejmé, že obě testované metody zaznamenaly pokles sledované veličiny při dlouhodobé expozici vzorku agresivnímu prostředí. Mírně citlivější se jeví metoda ILSS, u které je sledována degradace kontaktu vlákno/matrice. Pokles tahové únosnosti získané přímo z tahových zkoušek (tab. 14, sloupec 9) je však v porovnání s výsledky zjednodušených testů (sloupec 4 a 7) významně vyšší. Lze tak konstatovat, že testy nejsou srovnatelně citlivé (v porovnání s touto referenční metodou), avšak mají obdobný trend. Uvedené je dobře patrné na obr. 54.

tab. 14: Srovnání výsledků metod TSS, ILSS a trhacích zkoušek: GFRP-E-VE; expozice 650 dní

TESTOVANÝ VZOREK	PŘÍČNÝ SMYK (TSS)			PODÉLNÝ SMYK (ILSS)			TAHOVÁ PEVNOST	
	TSS (síla na stříh) F_{max} [kN]	TSS (střední hodnota napětí) τ_{max} [MPa]	změna vůči referenční hodnotě [%]	ILSS (síla při porušení) F_{max} [kN]	ILSS (střední hodnota napětí) τ_{max} [MPa]	změna vůči referenční hodnotě [%]	TAHOVÉ ZKOUŠKY Střední tahová pevnost [MPa]	změna vůči referenční hodnotě [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
GFRP-E-VE ECR vlákna, pryskyřice VE, Ø10 mm – ref.	10.29	131.02	100.00	6,34	54,01	100.00	818.4	100.00
GFRP-E-VE ECR vlákna, pryskyřice VE, Ø10 mm - 20 °C	9.58	122.01	93.12	5,84	49,57	91,78	662.1	80.91
GFRP-E-VE ECR vlákna, pryskyřice VE, Ø10 mm - 40 °C	9.52	121.27	92.56	5,77	48,96	90,65	612.2	74.80
GFRP-E-VE ECR vlákna, pryskyřice VE, Ø10 mm - 60 °C	9.31	118.55	90.49	5,64	47,86	88,61	590.4	72.14



obr. 54: Zkoušky únosnosti v čistém smyku: zbytková únosnost vzhledem k referenční hodnotě (vyjádřeno v %), vzorky GFRP-E; střih (červená barva), tah (světle modrá); expozice 650 dní

Při uvážení náročnosti jednotlivých testovaných metod je možno doporučit pro další využití především ILSS zkoušku. Tato je zcela nenáročná na instrumentaci, velikost vzorků a v důsledku má velmi nízkou časovou náročnost. Při využití tohoto typu testu je možno realizovat rozsáhlé studie vlivu různých typů degradačních prostředí na FRP výztuž a to bez vysokých nároků na materiál a čas zkušebny. Vhodnost metody byla ověřena i např. ve studii [25], kde je poukázáno i na její citlivost při změně kompozice materiálu.

Je zřejmé, že z doposud obdržovaných výsledků zkoušek TSS a ILSS nelze přímo usuzovat na změnu klíčových mechanických charakteristik – tahové pevnosti. Vhodné je však zjednodušené testy využít jako doplňkové např. pro ověření citlivosti dané výztuže na různé okrajové podmínky; sledování kvality a homogenity výroby aj. Aby bylo možno širěji využít tuto metodu i pro predikci míry degradace vzorku, bylo by nutno provést rozsáhlý experimentální program a testovat různé okrajové podmínky. Je to jeden z budoucích cílů výzkumu.

5.1.5 Vliv působení alkalického prostředí na soudržnost FRP výztuže

Jak bylo zmíněno v odstavci 4.2.4, jedním ze zásadních poznatků z vývoje nové GFRP výztuže bylo zjištění, v jaké míře dlouhodobou spolehlivost řešení může ovlivnit kvalita provedení a odolnost (tj. citlivost na působení degradačních činitelů) kontaktu mezi výztuží a betonem. Závěry zahraničních studií v této oblasti nejsou jednoznačné a silně varíují především v závislosti na typu testovaného materiálu (viz 4.2.4).

Soudržnost kompozitní výztuže s betonem je závislá především na chemické adhezi, tření (vlivem drsnosti povrchu FRP výztuže) a mechanickém zaklínění (zejména u výztuže se žebírky). Ve významně menší míře pak na hydrostatickém tlaku působícím na FRP výztuž smršťováním betonu. S ohledem na povahu testovaných FRP výztuží, jejichž povrch byl opískován, bylo očekáváno křehké (neduktilní) chování kontaktu způsobené vysokou hodnotou adheze, po jejímž překonání je hlavní složkou přenosu sil pouze tření. Soudržnost výztuže by měla být jen málo závislá na pevnosti betonu [1].

Doposud provedené testy soudržnosti těchto typů výztuží poukázaly na skutečnost, že selhání kontaktu nastává nejčastěji na rozhraní jádra prutu a opískování [72], [71] nebo [115]. Soudržnost je tedy zcela zásadně ovlivněna kvalitou kontaktu vlákno/matrice, resp. provedením povrchové vrstvy a tedy může být významně zasažena účinkem působení degradačního média. Z tohoto důvodu byl proveden experiment, jenž měl za cíl toto chování popsat a kvantifikovat míru redukce napětí v soudržnosti u vzorků FRP výztuží dlouhodobě uložených v alkalickém roztoku.

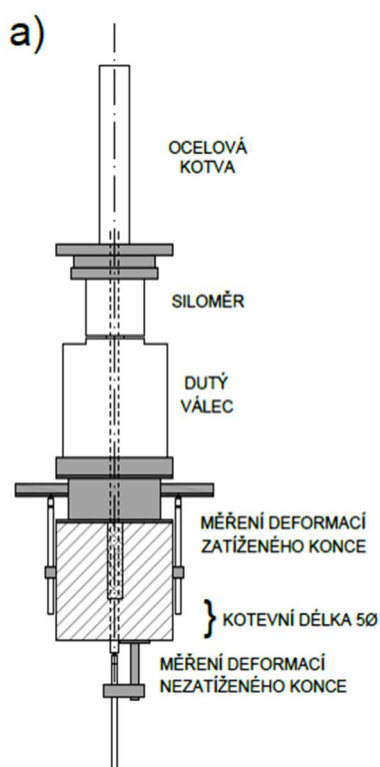
Testována byla GFRP výztuž s VE matricí a lněným ovínem nominálního průměru 10 mm uložená cca 2 roky v alkalické lázni (vzorky GFRP-E-VE a GFRP-AR-VE; viz tab. 9) při teplotě 60 °C – základní mechanické charakteristiky jsou uvedeny v tab. 15. Vzorky byly ošetřovány shodně s uvedeným v odstavci 5.1.2.2. V průběhu expozice degradačnímu prostředí u nich nedošlo k významnému (viditelnému) narušení soudržnosti povrchové vrstvy křemičitého písku s výztuží (viz obr. 32).

Hodnota mezního napětí v soudržnosti byla stanovena pomocí tzv. pull-out zkoušek, které byly realizovány dle [6] a metodiky [58]. Tento test je dnes již rutinní, proto zde nebude jeho princip podrobněji popsán, uvedeny jsou pouze získané výsledky a zásadní skutečnosti. Testované vzorky byly zabetonovány v krychli o hraně 200 mm z betonu o střední tlakové pevnosti 55 MPa. Délka se zajištěnou soudržností byla uvážena jako pětinašobek průměru

testovaného prutu, zbývající část byla separována. Betonáž vzorků probíhala ve svislé poloze. Relativní posun výztuže byl v průběhu zkoušky měřen indukčnostními snímači dráhy, kdy dva zaznamenávaly posun zatíženého konce a jeden pak posun nezatíženého konce. Provedení zkoušky je zřejmé z obr. 55.

tab. 15: Základní mechanické charakteristiky testované GFRP výztuže s ECR a AR vlákny (d650 v názvu značí expozici vzorku degradačnímu prostředí po dobu 650 dní)

Označení vzorku	Tahová pevnost (střední hodnota) [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Modul pružnosti (střední hodnota) [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
GFRP-E-VE	818,4	8,6	48,9	2,2
GFRP-E-VE-d650	590,4	42,8	50,3	1,1
GFRP-AR-VE	570,5	-	45,0	-
GFRP-AR-VE-d650	453,0	19,4	42,9	1,1



obr. 55: Zkouška soudržnosti - pull-out test dle [6], [58]; provedení a konfigurace zkoušky (vlevo schéma; vpravo reálné provedení)

Získané výsledky jsou sumarizovány v tab. 16; viz též [72], [71]. Maximální napětí v soudržnosti τ_{\max} bylo stanoveno s uvažováním konstantního rozdělení napětí po délce se zajištěnou soudržností [6], [58].

tab. 16: Výsledky pull-out testů dle [6]; GFRP výztuž s ECR a AR vlákny s vlivem

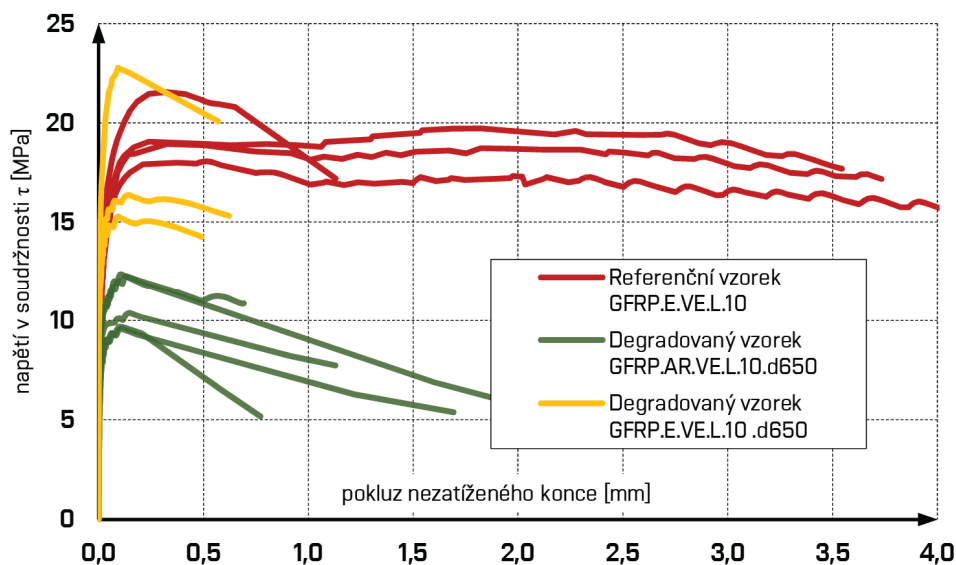
Označení	Napětí v soudržnosti τ_{\max} [MPa]		Pokluz nezatíženého konce S_f [mm]		Pokluz zatíženého konce S_i [mm]		Mechanismus porušení
	2	3	4	5	6	7	
GFRP.E.VE.10	18,93	19,40 ± 1,50	0,328	0,352 ± 0,118	1,436	1,572 ± 0,142	Pull-out
	18,06		0,517		1,619		Pull-out
	21,56		0,323		1,750		Pull-out
	19,05		0,238		1,481		Pull-out
GFRP.E.VE.d650	22,78	18,14 ± 4,05	0,092	0,109 ± 0,030	1,434	1,299 ± 0,143	Pull-out
	15,29		0,092		1,149		Pull-out
	16,36		0,144		1,316		Pull-out
GFRP.AR.VE.d650	10,38	10,86 ± 1,37	0,144	0,118 ± 0,018	1,092	0,996 ± 0,060	Pull-out
	9,58		0,106		0,995		Pull-out
	9,68		0,101		0,957		Pull-out
	12,37		0,107		0,936		Pull-out
	12,27		0,129		1,000		Pull-out

Na obr. 57 je provedeno srovnání chování degradovaných a referenčních vzorků s AR a ECR vlákny a VE maticí, které byly vystaveny shodnému degradačnímu prostředí po dobu 650 dní. I když vizuální kontrola vzorků po vyjmutí z lázně neindikovala rozdílnou degradaci, došlo ke zcela rozdílné míře ovlivnění. Snížení únosnosti kontaktu GFRP.E.VE.d650 s ECR vlákny bylo při zohlednění rozptylu výsledků nevýznamné, nižší než 10 %. U vzorků GFRP.AR.VE.d650 s AR vlákny však došlo k velmi významné redukci mezního napětí v soudržnosti. Redukce byla vyšší než 40 %. V případě těchto vzorků došlo také k odlišnému typu porušení – nenastalo pouze oddělení povrchové vrstvy od jádra průřezu, ale bylo pozorováno poškození již v průřezu výztuže. Společně s povrchovou úpravou byla oddělena i některá krajní vlákna (viz obr. 56). Pozorovaný mechanismus porušení byl neobvyklý, alarmující, [71]. Jednoznačný závěr by měl být podložen podrobnějším zkoumáním fyzikálních a chemických dějů probíhajících ve struktuře výztuže.

Z obdržných výsledků však bylo možno konstatovat, že kontakt výztuže s ECR vlákny (na rozdíl od FRP výztuže s AR vlákny) vykazoval i po dvouleté expozici vysoce agresivnímu prostředí o teplotě 60 °C (což při zohlednění AF odpovídá ekvivalentu 32 let expozice při běžných podmínkách) dobré vlastnosti a nebyl zásadně ovlivněn [71].



obr. 56: Odlišné porušení vzorku GFRP.AR.VE d650 (nahore) a GFRP.E.VE. d650 (dole)



obr. 57: Závislost pokluzu nezatiženého konce na napětí v soudržnosti GFRP výztuží s VE matricí

Provedené experimenty prokázaly závislost dlouhodobého chování v soudržnosti na kompozici výztužného prutu. Tento závěr je podpořen i výsledky zahraničních studií [87], [133] či [20], kdy pro GFRP výztuže s ECR vlákny nebyla pozorována významná degradace kontaktu. Výše uvedená zjištění byla pro výrobce, firmu PREFA KOMPOZITY, a.s., zásadní. V důsledku významnou měrou přispěla k ukončení výroby GFRP výztuží s AR vlákny.

5.1.6 Zhodnocení dosažených výsledků v oblasti dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuže

Při vývoji kompozitní GFRP výztuže, která je výsledkem dlouholeté spolupráce mezi VUT v Brně a firmou PREFA KOMPOZITY, a.s., byl realizován velmi široký experimentální program s cílem ověřit vliv podmínek expozice a zatížení na životnost kompozitu. V odstavci 5.1 uvedené poznatky byly získány především při řešení výzkumných projektů TA04010881 a FV 10505, kdy výsledkem vývoje byla zcela nová generace odolné GFRP výztuže, na jejímž vzniku se autor této práce podílel.

Získané výsledky umožnily kvantifikovat vliv jednotlivých činitelů (negativně) ovlivňujících dlouhodobou únosnost (G)FRP výztuže – působící hladiny zatížení, degradačního prostředí a teploty (odstavec 5.1.2). Testy navíc poukázaly na zásadní vliv přítomnosti krycí vrstvy a metodiky testování na obdržené výsledky a to především pro výztuže s horšími dlouhodobými vlastnostmi (viz uvedené závěry v odstavci 5.1.3). V neposlední řadě byla experimentálně prokázána přílišná konzervativnost stanovení mezního přípustného dlouhodobě působícího zatížení dle přístupu ACI 440.1R-15 [5], kdy pro žádné z testovaných okrajových podmínek nebylo dosaženo takto nízké hodnoty.

Je vhodné zmínit, že některé z navržených zkušebních postupů byly v ČR použity vůbec poprvé. V této souvislosti bylo nezbytné navrhnout a sestavit speciální testovací zařízení pro realizaci těchto unikátních zkoušek, viz 5.1.2.1. Jedním ze zásadních poznatků bylo též zjištění, v jaké míře dlouhodobou spolehlivost řešení může ovlivnit kvalita provedení výztuže a též odolnost kontaktu mezi výztuží a betonem.

Zjištěné závěry byly publikovány na prestižních zahraničních konferencích a časopisech a jsou součástí řady výzkumných zpráv.

5.2 Vliv interakce normálové a posouvající síly na únosnost FRP výztuže

Jak již bylo uvedeno v odstavci 4.1 a 4.3, kompozitní výztuže vyráběné z dlouhých nosných vláken dosahují zcela odlišných vlastností při namáhání ve směru vláken a ve směru na ně kolmém. V podélném směru je tahová únosnost limitována mezním přetvořením nosných vláken, přičemž dochází k jejich křehkému porušení (podélný směr l , viz obr. 2). V příčném směru dochází k porušení matrice a vlákna jsou přestřižena ve směru kolmém k jejich orientaci (směr r na obr. 2). Při porušení smykem je dosahováno přibližně o řád nižších mezních napětí.

Z tohoto důvodu je účelné navrhovat vyztužení s ohledem na maximalizaci využití potenciálu FRP materiálu, tj. prut v konstrukci orientovat ve směru hlavních tahových napětí. Případný odklon výslednice působící síly od podélné osy prutu způsobuje významné snížení únosnosti. V reálných aplikacích je ovšem často nezbytné uvážit souběžné namáhání výztuže tahem i smykem.

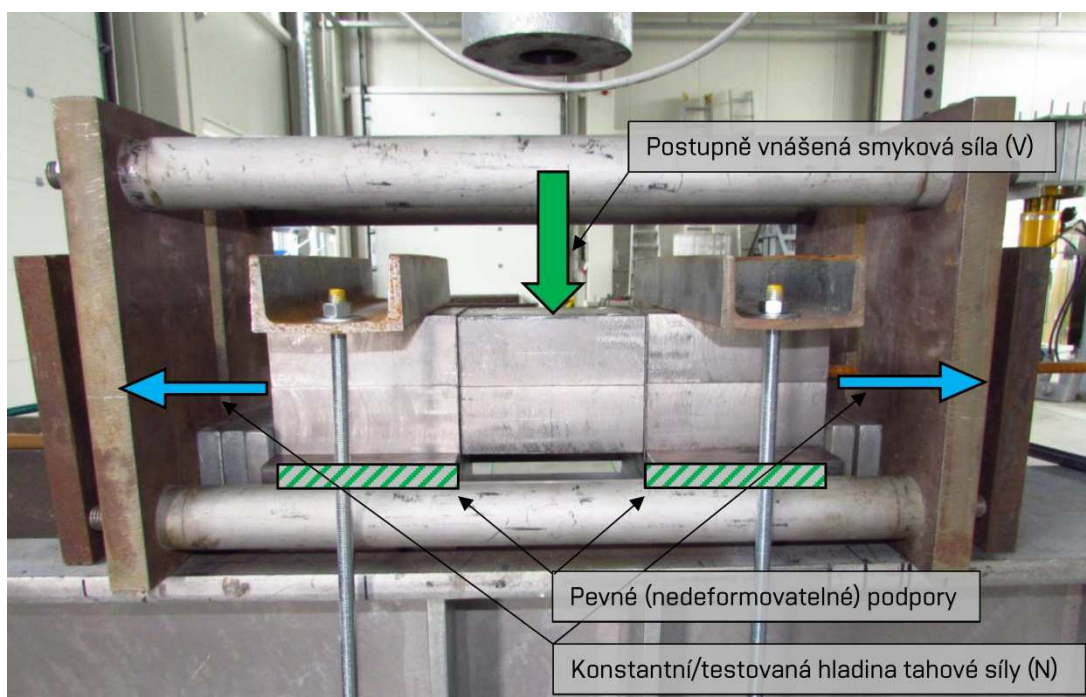
Obě základní mechanické charakteristiky – tahovou pevnost a pevnost v příčném smyku – lze snadno experimentálně ověřit, přičemž postupy jsou zakotveny v několika zkušebních normách (např. [18] nebo [70]). Autor této práce však neví o normovaném zkušebním postupu, který by umožnil experimentálně stanovit obálku porušení FRP prutu při kombinaci působení těchto namáhání. Také dostupné zahraniční studie se, až na několik výjimek, nezabývaly stanovením této závislosti – viz uvedené v odstavci 4.3. Z toho důvodu bylo při vývoji horninového svorníku [118], který je tomuto typu namáhání při aplikaci vystaven, přikročeno k realizaci rozsáhlé experimentální studie, jež měla za cíl toto chování kvantifikovat. Uvedené výsledky byly získány při řešení výzkumného projektu FV 10505 „*Inteligentní kompozitní kotevní prvek*“ [118], který byl řešen v letech 2016 – 2019.

5.2.1 Experimentální program

Cílem realizovaného experimentálního programu bylo popsat chování GFRP výztuže/svorníku při účinku tahové a posouvající síly a zároveň potvrdit platnost vztahu (22), který je pro tyto účely ve *fib* Bulletin No. 40 [46] uveden, avšak odvozen byl na vzorcích plošného laminátu. V rámci navrženého experimentu byla testována GFRP výztuž PREFA ReBAR vyrobená ze skelných vláken typu ECR (přibližně 80 % hmotnostně) vzájemně spojenými epoxidovou matricí, výrobce PREFA KOMPOZITY a.s. a též výztuž ComBAR (výrobce Schöck Bauteile GmbH), která je složena z vláken ECR a VE pryskyřice. Text

prezentuje výsledky získané na vzorcích výztuže průměru 10 a 14 mm (ReBAR) a 8 mm (ComBAR).

Pro realizaci experimentu bylo nezbytné navrhnout vhodný zkušební postup a sestavit zkušební zařízení pro tyto zkoušky. Při návrhu bylo vycházeno ze studie [50] a principu zkoušky TSS [70]. Princip byl však upraven a to s ohledem na minimalizaci tření mezi jednotlivými částmi zkušebního zařízení a možnost vnesení osově síly. Konfigurace experimentu s idealizovaným zobrazením působících sil je patrna z obr. 58; [118].



obr. 58: Stanovení odolnosti GFRP svorníku při působení víceosého namáhání – konfigurace zkoušky

Vzorek byl při zkoušce vložen do trojice ocelových navzájem dělených bloků s vyměnitelným jádrem (v závislosti na průměru prutu testované FRP výztuže). Tyto byly umístěny uvnitř předpínacího rámu, který zajišťoval vnesení požadované konstantní hladiny působící osově síly. Dva krajní bloky sloužily pro stabilizaci prutu a byly proto uloženy na pevném podkladu a stabilizovány přítlakem (svislé působící síla vnášená prostřednictvím hydraulického válce). Prostřední blok bez podepření byl zatěžován svislou silou (protlačěn skrz testovanou výztuž). Na hraně jednotlivých ocelových bloků tak docházelo ke smykovému namáhání zkoušené FRP výztuže (viz schéma na obr. 50). Toto řešení zajistilo vnesení konstantní hladiny normálového (osového) napětí do vzorku a umožnilo jeho následné postupné (plynulé) zatěžování příčnou (posouvající) silou až do porušení.

Postup zatěžování byl rozdělen do tří kroků – v prvním byl aplikován přítlak, který stabilizoval krajní bloky; ve druhém kroku byl vzorek zatížen požadovanou hladinou osové tahové síly a teprve následně byla vnesena posouvající síla, kdy vzorek byl zatěžován až do porušení. V průběhu zkoušky byl (kromě velikosti tahové i posouvající síly) monitorován posun středního protlačovaného ocelového bloku a to pomocí indukčních snímačů dráhy. Způsob zatěžování vzorků je zřejmý z obr. 59.

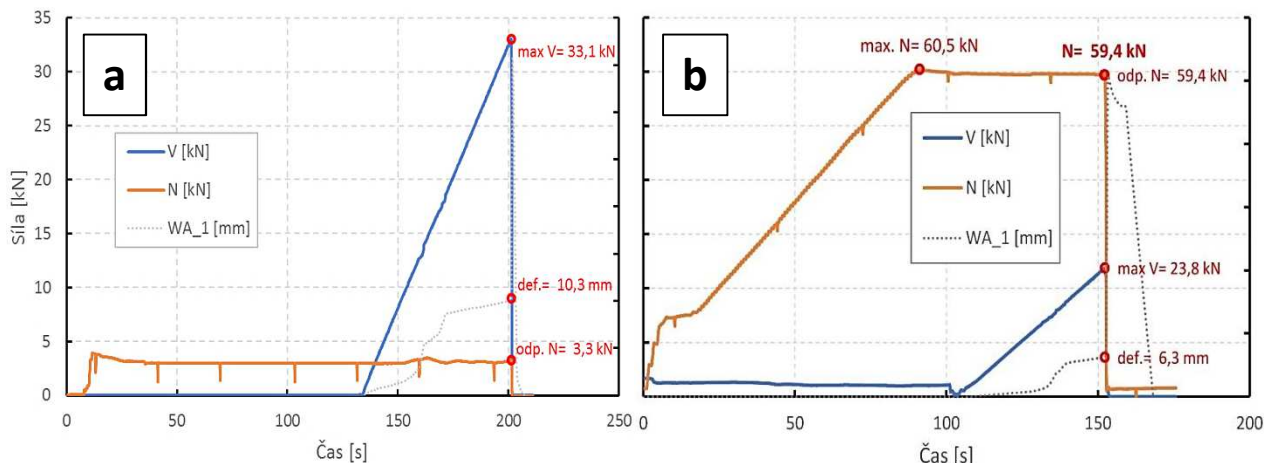
Základní mechanické charakteristiky testované GFRP výztuže získané z jednorázových zkoušek provedených dle [58], [70] a [18] jsou sumarizovány v tab. 17. Pro komplexnost experimentálního programu byly do ověření zahrnuty výztuže různých průměrů, kompozice a povrchové úpravy. Vzorky byly také vybrány s ohledem na pokrytí širokého intervalu vykazovaných mechanických charakteristik (tahová pevnost v intervalu 870 – 1550 MPa; pevnost v příčném smyku 215 – 250 MPa). Důležitý se jeví též poměr normálové a smykové únosnosti vzorku (poměr T/S) – viz tab. 17; sloupec 7.

tab. 17: Základní mechanické charakteristiky GFRP výztuže

Vzorek	Deklarovaný průměr [mm]	Průměr vč. povrchové úpravy [mm]	Střední tahová pevnost ± sm. odchylka [MPa]	Střední modul pružnosti ± sm. odchylka [GPa]	Střední pevnost v příčném smyku ± sm. odchylka [MPa]	Poměr T/S [-]
1	2	3	4	5	6	7
GFRP Ø10.S	10	11,03	1018,8 ± 5,2	52,2 ± 0,3	251,6 ± 15,4	4,05
GFRP Ø14.S	14	14,27	871,2 ± 10,3	43,3 ± 1,3	216,2 ± 27,1	4,03
GFRP Ø8.R	8	9,2	1364,6 ± 33,2	58,8 ± 2,6	312,0 ± 15,6	4,37

Celkem bylo v průběhu řešení experimentu odzkoušeno s různými okrajovými podmínkami 87 vzorků GFRP výztuže PREFA ReBAR a 26 vzorků výztuže ComBAR, přičemž 30 vzorků pro každý profil výztuže PREFA ReBAR a 18 vzorků výztuže ComBAR bylo testováno v konfiguraci testu N+V dle uvedeného na obr. 58. Společně se vzorky v základních konfiguracích (tahové a smykové zkoušky) vytvořily dostatečně robustní základnu pro vyhodnocení závislosti odklonu výslednice působící síly na únosnost vzorku a ověření platnosti teoretické predikce dle dostupných návrhových vztahů.

Sady zkušebních vzorků na dané hladině zatížení tahovou silou byly tvořeny vždy 3 ks (vyjma základních testů). V závislosti na aktuálních výsledcích pak bylo rozhodnuto doplnit data o další úrovně tahové síly, kdy tyto „doplňkové hladiny“ byly ověřeny pouze na jednom zkušebním vzorku.



obr. 59: Způsob zatěžování vzorků GFRP výztuže při zkoušce N+V; a) – hladina normálové síly cca 5% z krátkodobé únosnosti; b) – hladina normálové síly 75%

5.2.2 Chování GFRP výztuže při víceosém namáhání – výsledky a způsob porušení

Při zkouškách bylo získáno značné množství údajů, které jsou zde prezentovány pouze velmi stručně. Výsledky, ze kterých jsou v následujícím textu formulovány klíčové závěry, jsou pro úplnost sumarizovány v příloze A (tab. A 5 až tab. A 7) této práce.

S ohledem na specifickou kompozici (G)FRP materiálu dochází v závislosti na dominantním způsobu namáhání k odlišným způsobům porušení. Při prostém tahu je mezní únosnosti dosaženo při křehkém porušení nosných vláken, která se v důsledku dosažení mezního přetvoření přetrhnou při souběžné rozsáhlé delaminaci kompozitu. Při čistém stříhu dochází naopak k porušení matrice, kdy vlákna jsou přestřížena ve směru kolmém k jejich orientaci.

Lze obecně formulovat, že v případě zatížení FRP výztuže kombinací tahové a posouvající síly dochází v závislosti na intenzitě působící osově síly a jejím odklonu od osy prutu k:

- smykovému porušení v jednom řezu (nízká úroveň působící tahové síly; převládá smykové chování prutu; nosná vlákna jsou přestřížena);
- smykovému porušení, jež je doprovázeno výskytem podélných trhlin indikujících delaminaci vláken a matrice. K tomuto typu porušení dochází při vyšších úrovních působící tahové síly;
- tahovému (křehkému) porušení vláken, které nastává při téměř centrickém namáhání.

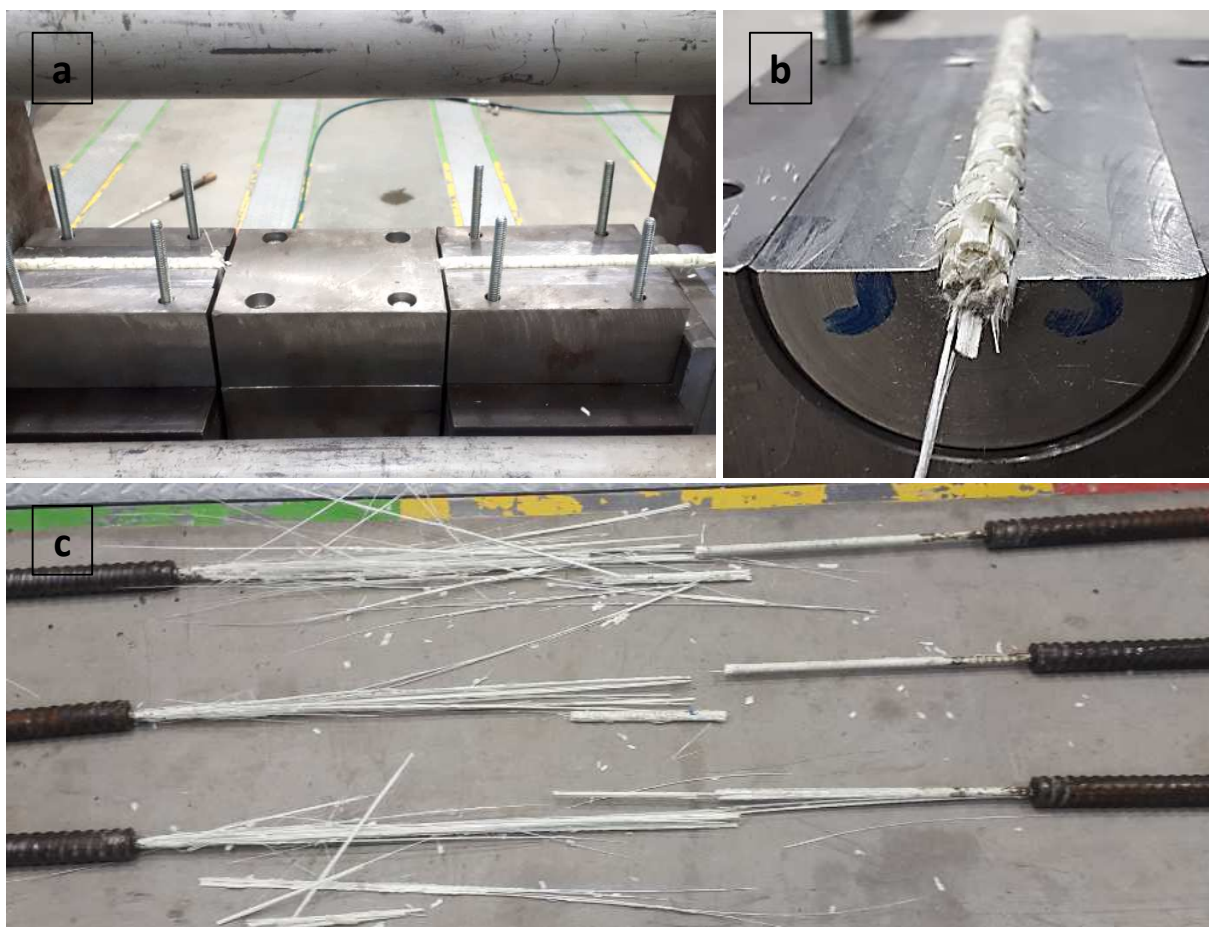
Výše uvedené odlišné způsoby porušení jsou pro výztuž PREFA ReBAR dobře patrné z obr. 60 (a) a b) základní způsoby namáhání čistým smykem a osovou tahovou silou; c) a d) porušení vzorků při kombinovaném namáhání N+V).



obr. 60: Porušení vzorků GFRP výztuže PREFA ReBAR : a) namáhání čistým smykem; b) čistý tah; c) namáhání $N+V$ - nízká hladina tahové síly; d) namáhání $N+V$ - vyšší hladina tahové síly

Odlišné porušení bylo patrné u vzorků PREFA ReBAR a ComBAR, které vykazovaly mírně vyšší poměr T/S (tab. 17; sloupec 7). U vzorků ComBAR byla ve významně vyšší míře pozorována delaminace prutu, a to i pro hladiny s velmi nízkou působící normálovou silou, kdy i pro tyto docházelo k delaminaci jednotlivých částí. Uvedené je dobře patrné z obr. 61b.

Z obdržených výsledků je patrné, že kompozice prutu (a pravděpodobně poměr T/S) má na způsob porušení významný vliv. Toto konstatování by však bylo dobré ověřit i pro další typy FRP výztuží s vyšším poměrem T/S (například CFRP kompozit).

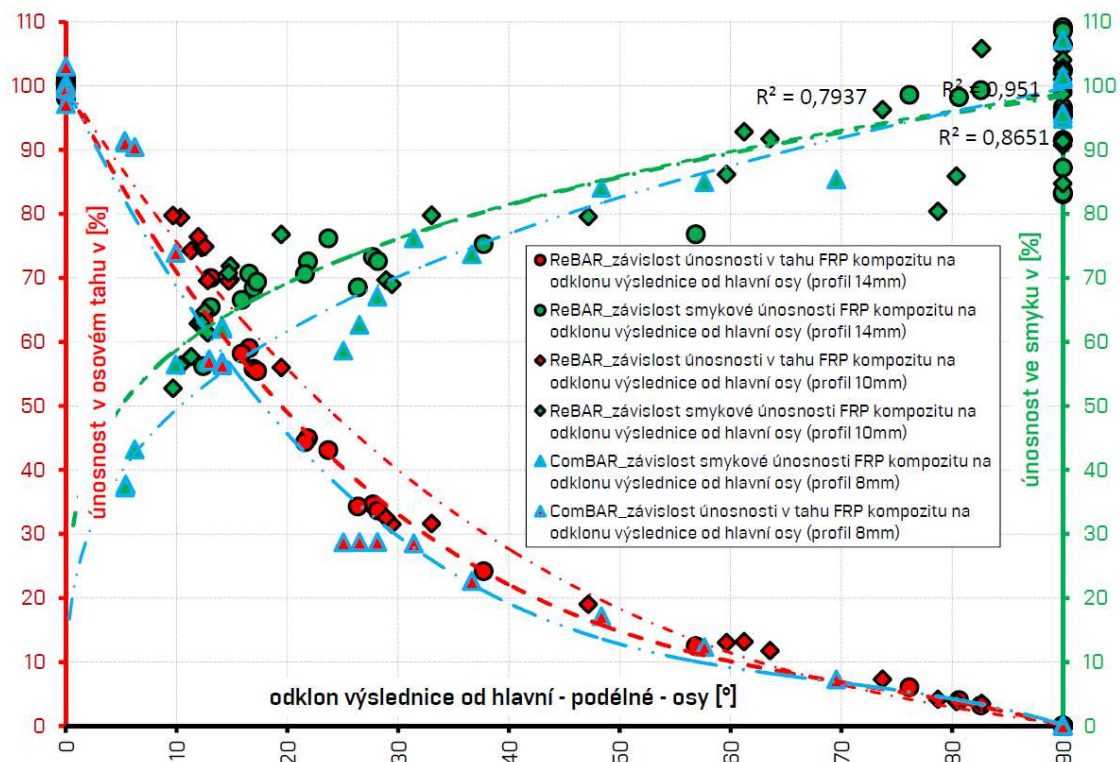


obr. 61: Způsob porušení vzorků GFRP výztuže ComBAR – a) a b) N+V- nízká hladina působící tahové síly; c) N+V – vysoká hladina působící tahové síly

5.2.3 Vyhodnocení výsledků, porovnání s teoretickou predikcí dle [46]

Pokles normálové/tahové a smykové únosnosti vzorků PREFA ReBAR v závislosti na odklonu výslednice od hlavní podélné osy byl již prezentován na obr. 21 uvedeném v odstavci 4.3. Na obr. 62 je provedeno srovnání chování všech testovaných typů výztuží, tj. včetně výztuže ComBAR (modré body).

Z uvedeného je velmi dobře viditelná významná redukce normálové únosnosti již při malých úhlech θ . Pro úhel odklonu 10° byla experimentálně zjištěna redukce tahové únosnosti v intervalu od 31 % (ComBAR) do cca 25 % (ReBAR profil 10 mm). Smyková únosnost vzorku takto výrazně ovlivněna není. Při odklonu o 10° od svislé roviny dochází k redukci o cca 5 % (ve střední hodnotě; některé vzorky však vykazovaly redukci až 20 %). Z výsledků lze také pozorovat odlišnosti v chování testovaných typů výztuží s mírně odlišnou kompozicí a poměrem T/S (viz uvedené v tab. 17).

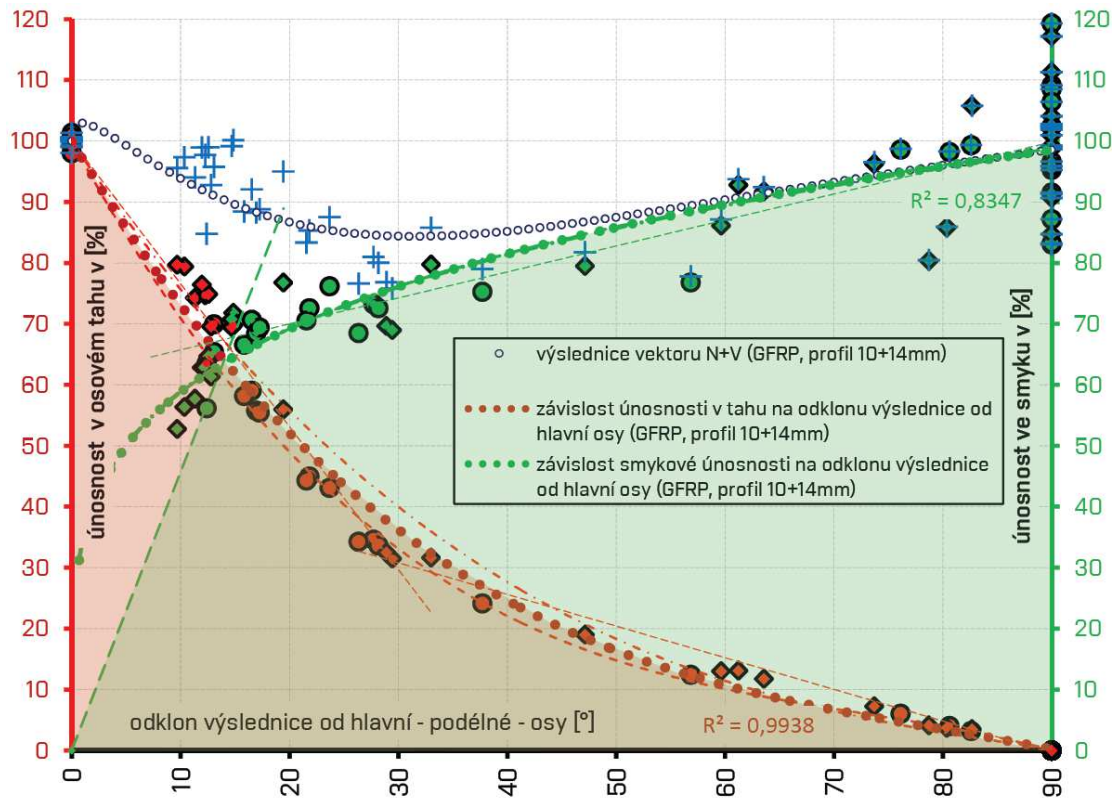


obr. 62: Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti GFRP výztuže v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice (ReBAR profil 10 a 14 mm; ComBAR profil 8 mm)

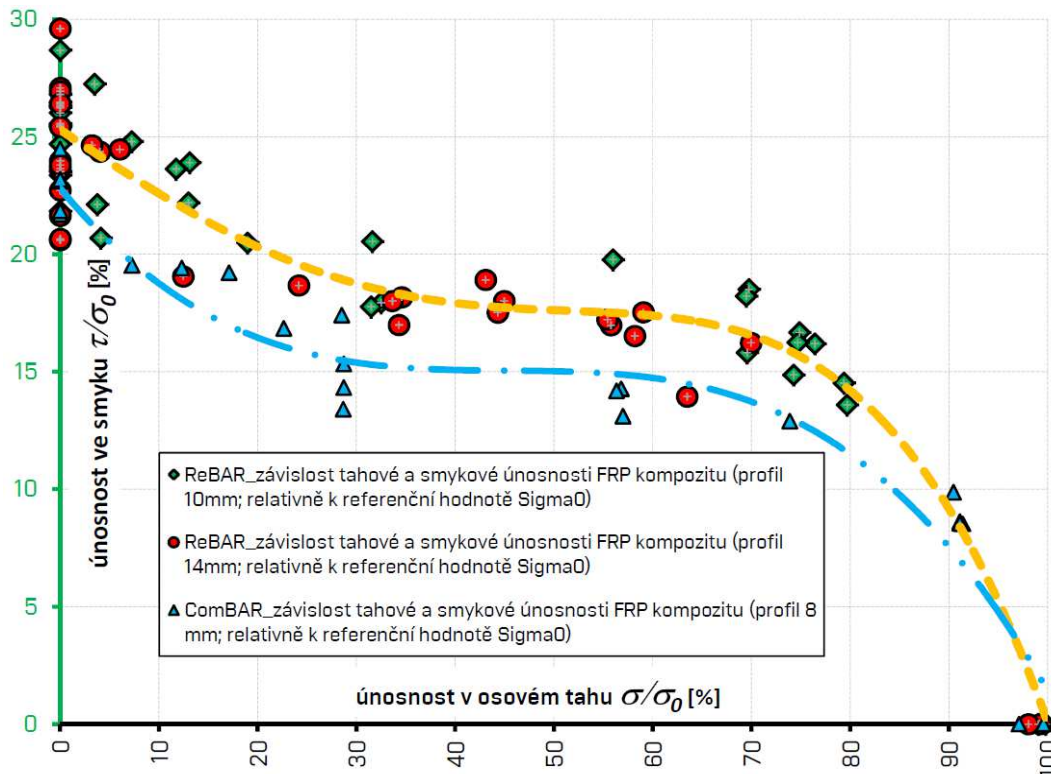
Pro výztuže PREFE ReBAR bylo pro úplnost provedeno vyčíslení vektorového součtu experimentálně stanovené únosnosti v obou hlavních směrech – výsledky jsou patrné z obr. 63 (modré křížky). Je zřejmé, že nejnižších hodnot je dosaženo v oblasti odklonu výslednice $\theta \approx 20 - 40^\circ$.

Na obr. 64 je vynesena závislost smykové a normálové únosnosti normalizované k počáteční/krátkodobé tahové únosnosti vzorku; tj. obálky porušení FRP prutu při kombinaci působení tahové a posouvající síly. U obou typů výztuží je zřejmé obdobné chování (závislost), avšak projevuje se vliv odlišného poměru T/S, který zvýrazňuje rozdíl především v oblasti smykového namáhání²⁴. U výztuže ComBAR dochází k významnějšímu snížení smykové únosnosti při zvyšujícím se odklonu výslednice (střední hodnoty - modrá křivka na obr. 62). Naopak nebyl pozorován významný rozdíl v odezvě výztuží různých průměrů a tahových únosností od shodného výrobce se shodným poměrem T/S.

²⁴ Jako 100% tahové pevnosti uvážena vždy krátkodobá tahová pevnost vzorku.



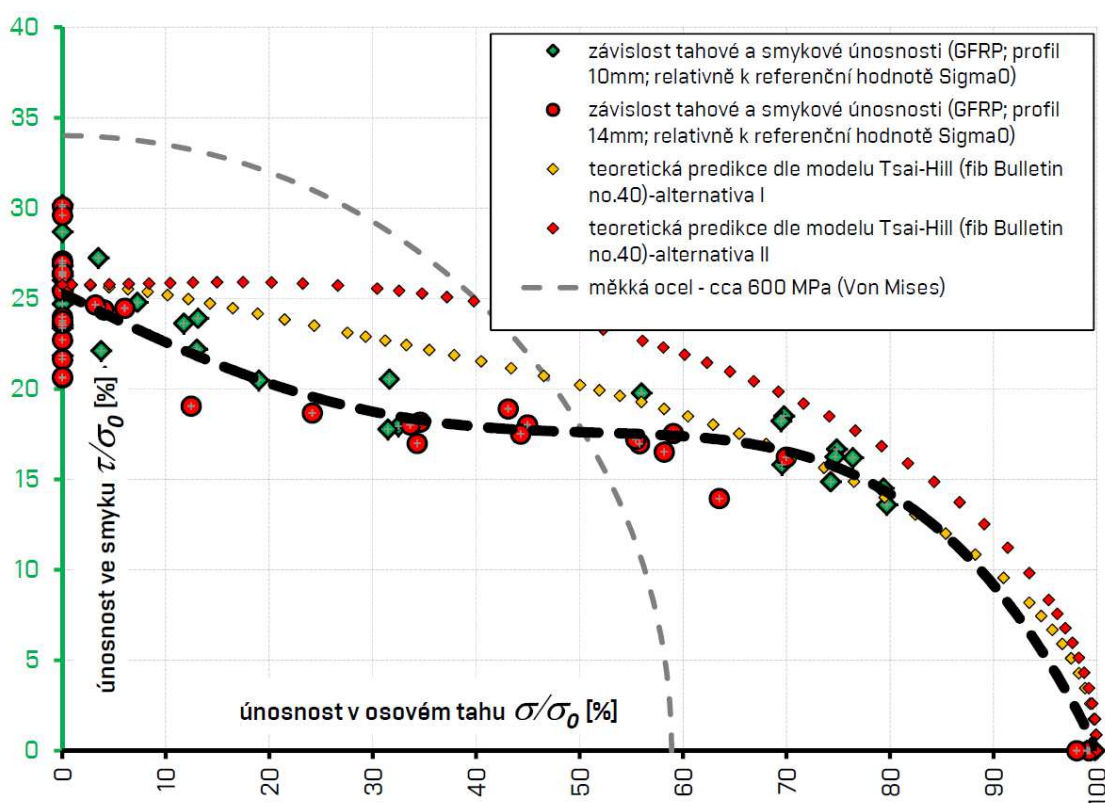
obr. 63: Pokles smykové, resp. tahové, únosnosti při dvoousém namáhání v závislosti na změně úhlu odklonu výslednice; výztuže PREFA ReBAR



obr. 64: Závislost smykové a normálové únosnosti GFRP výztuže (normalizováno k tahové únosnosti)

Výsledné, experimentálně získané hodnoty pro výztuže PREFA ReBAR, byly srovnány s teoretickou predikcí dle vztahu (22) uvedeného v [46]. Na obr. 65 je zobrazeno kritérium porušení stanovené dle vztahu (22) a to při uvážení středních mechanických charakteristik testované výztuže. Predikce v alternativě I. uvažuje $f_{LTs} = 0,85 \times f_{Ti}$; v alternativě II. je pak $f_{LTs} = f_{Ti}$. Černá čárkovaná křivka značí experimentálně získanou obálku odolnosti FRP prutu (střední hodnoty). Pro úplnost je uvedeno i srovnání s kritériem porušení Von Miseses používaným pro běžnou ocel (vyčísleno pro ocel s 600 MPa; normalizováno k tahové pevnosti FRP cca 1 GPa).

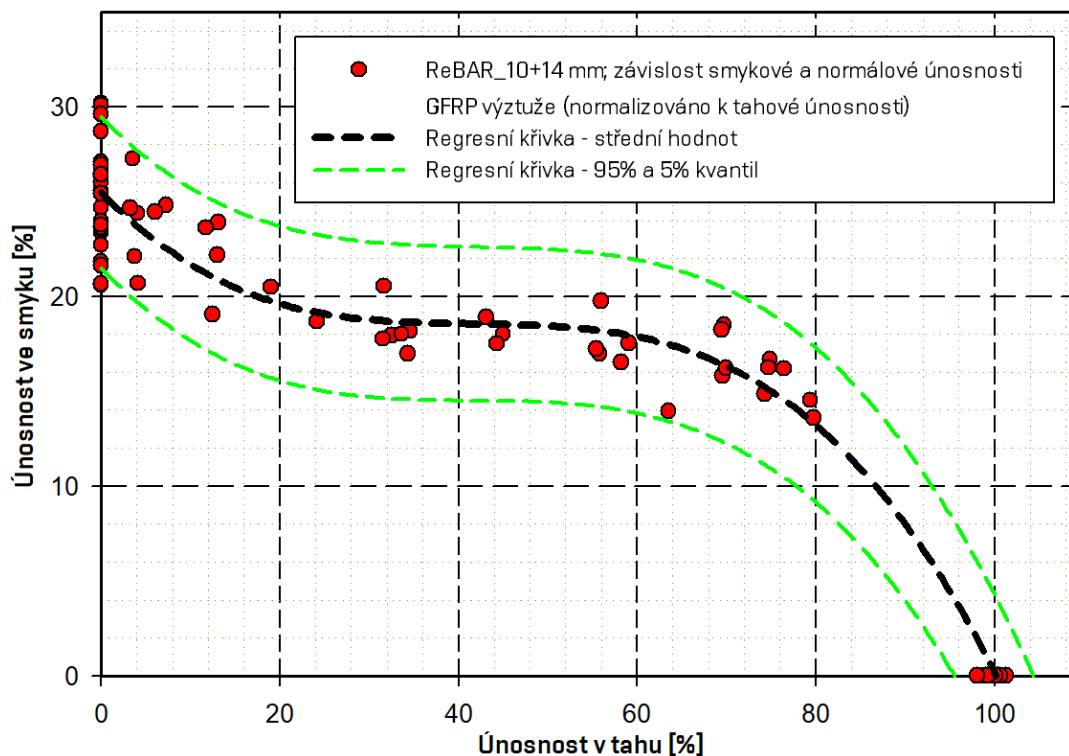
Z výsledků je velmi dobře patrna menší výstižnost vztahu (22) především v případě stanovení únosnosti vzorku v oblasti tahových napětí nižších než cca 60 % σ_0 (alternativa II, obr. 65). V případě uvážení dalšího snížení hodnoty f_{LTs} , která je z hlediska přesnosti predikce významná, vztah (22) naopak podhodnotí únosnost v oblasti téměř centricky namáhaného prutu (tj. $\theta < 15^\circ$). Uvedené závěry jsou platné pro výztuže s poměrem $\tau_0/\sigma_0 \approx 0,25$.



obr. 65: Obálka porušení při namáhání smykovou a normálovou silou a srovnání s teoretickou predikcí; GFRP výztuž PREFA ReBAR

Výsledky prezentované na obr. 62 až obr. 65 byly získány při uvážení středních hodnot sledovaných veličin. Z hlediska návrhu je vhodné dále definovat požadovanou spolehlivost, tj.

stanovit na základě statistického vyhodnocení charakteristické a návrhové hodnoty sledovaných veličin. Ilustrativně je dané zobrazeno na obr. 66 - zelené křivky zobrazují 5 a 95 % kvantil očekávaného výskytu hledané veličiny, tj. značí polohu charakteristických hodnot v souladu s [37].



obr. 66: Závislost smykové a normálové únosnosti GFRP výztuže (normalizováno k tahové únosnosti) včetně vynesení 5% a 95% kvantilu normálního rozdělení – zelené křivky (PREFA ReBAR)

5.2.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Vliv interakce normálové a smykové síly na únosnost FRP výztuže (a především sestavení obálky porušení) není v odborné literatuře dostatečně popsán. Neexistují také normami definované zkušební postupy. Dostupné je pouze omezené množství relevantních prací, které se danou problematikou zabývají (viz uvedené v odstavci 4.3). Jedná se však o velmi důležitý aspekt návrhu kompozitních výztuží, neboť souběžné působení tahové a posouvající síly vede ke snížení únosnosti prutu.

Stávající návrhové podklady [46], resp. vztahy v nich uvedené, jsou založeny na teoriích odvozených pro plošné lamináty. Experimentálně však bylo prokázáno, že jejich využití nemusí vést ke konzervativnímu výsledku. Navíc využití [46] požaduje znalost smykové únosnosti materiálu ve směru pootočeném o 45° od hlavního podélného směru vláken. Stanovit tuto hodnotu pro prutovou pultrudovanou výztuž je však velmi problematické.

Díky provedenému rozsáhlému experimentálnímu programu byla získána robustní databáze hodnot, která umožnila sestavit závislost smykového a normálového napětí pro GFRP výztuž. Byl ověřen vliv kompozice výztuže, velikosti průměru i odlišných mechanických charakteristik. Z experimentálně získaných výsledků je dobře patrné, že i při malém odklonu výslednice působícího zatížení od podélné – hlavní – osy výztuže dochází k významnému poklesu tahové únosnosti – o cca 30% při úhlu odklonu $\theta \approx 10^\circ$. Míra redukce tahové únosnosti vzorku se však postupně snižuje. Významná změna v chování nastává při dosažení odklonu výslednice od hlavní podélné osy prutu cca 30° (tahová únosnost vzorku přibližně 30 %; smyková cca 70 %; hodnoty mírně varíují v závislosti na typu výztuže).

Výsledky též poukázaly na skutečnost, že v závislosti na intenzitě působící osově tahové síly dochází k odlišnému způsobu porušení vzorku. Nebyl zaznamenán vliv průměru výztuže, avšak výsledky poukazují na nutnost uvážit při řešení odlišný poměr tahové a smykové únosnosti vzorků (T/S). Pro výztuže s vyšší hodnotou tohoto koeficientu (viz uvedené v tab. 17) byla získána nižší (relativně) odolnost především v oblasti převládajícího smykového namáhání. Této problematice bude vhodné se dále věnovat a výsledky potvrdit též např. pro CFRP výztuž, která má významně vyšší hodnotu tohoto poměru.

5.3 Vývoj a aplikace speciálních prvků s využitím kompozitních materiálů – prvek pro přerušení tepelného mostu v betonové konstrukci

S postupným rozšiřováním know-how o návrhu a dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží se zvyšuje i množství aplikací tohoto materiálu v konstrukcích. Jedná se především o prvky, ve kterých dochází k rychlé degradaci – korozi – klasické výztuže. Z vhodných aplikačních oblastí lze uvést například využití v místech, kde dochází ke kondenzaci vlhkosti a k významnému střídání teplot. Při uvážení skutečnosti, že tyto materiály jsou velmi lehké a mají v porovnání s klasickým řešením vynikající tepelně izolační schopnosti (řádově nižší součinitel prostupu tepla ve srovnání s běžnou ocelovou výztuží), se jako ideální aplikace jeví například prvky pro přerušení tepelného mostu. Tyto jsou běžně instalovány v kondenzační zóně tepelné obálky budovy. Standardní řešení tohoto detailu je založeno na využití nerezových či povlakových výztužných vložek – viz uvedené v 5.3.1.

Tyto prvky vynášející balkonové nosníky jsou staticky i environmentálně značně namáhané. Je třeba řešit i účinek mimořádných zatížení, např. požáru a také komfort uživatele, kdy je nezbytné zajistit dostatečnou tuhost konstrukce, zabránit nadlimitním průhybům a kmitání.

Ve spolupráci s výrobcem kompozitních materiálů, firmou PREFA KOMPOZITY, a.s., byl proveden návrh modulárního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, jenž je vyroben plně z kompozitních materiálů (obchodní název i-KORB). Teoretické řešení, na němž se autor této práce jako klíčový člen týmu podílel, bylo v roce 2016 patentováno (CZ 305718; [61]). Uvedené skutečnosti byly z hlediska návrhu prvku výzvou. V průběhu pěti let vývoje byla realizována celá řada experimentů, full-scale testů a dílčích studií, které pomohly odstranit nedostatky a v důsledku ukázaly na vhodnost a spolehlivost navrženého řešení.

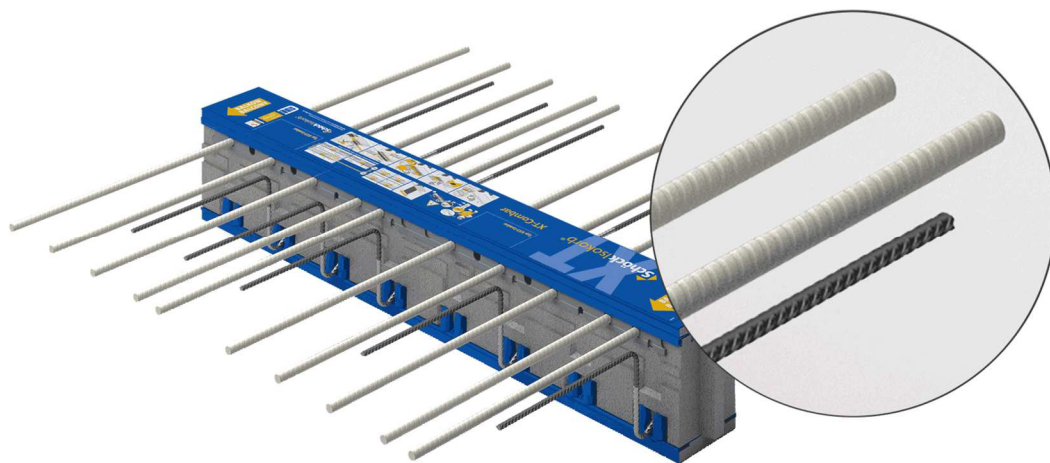
V odstavci 5.3.2 je velmi stručně představen základní koncept navrženého/patentovaného řešení a sumarizovány navržené a provedené experimentální činnosti a klíčové dosažené výsledky (odstavec 5.3.3). Nebylo cílem autora této práce zde podrobně popsat veškeré provedené zkoušky, ale komplexně poukázat na šíři řešené problematiky a v důsledku možnost využití kompozitní výztuže při vývoji speciálních stavebních elementů. Text také neřeší problematiku tepelných mostů v obálce budov z pohledu tepelně-technického.

Prezentované výsledky v tomto odstavci byly získány za podpory projektů FR-TI4/159 Light structures – progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů a TN01000056 - *Centrum pokročilých materiálů a efektivních budov* (subprojekt TN01000056/05 - *Pokročilé*

konstrukční prvky na bázi dřeva a kompozitů pro objekty občanské výstavby). Na pracovišti PREFA KOMPOZITY, a.s. bylo uvedení výrobku na trh podpořeno projektem OPPIK CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0005058.

5.3.1 Stávající řešení dostupná na evropském trhu

V místě přechodu železobetonové desky z interiéru do exteriéru dochází; pokud tato oblast není speciálně upravena či celý balkonový prvek izolován; ke značným tepelným ztrátám a vzniku kondenzačních oblastí v místech vnitřního povrchu konstrukce. Řešením je vložení systémového prvku pro přerušení tepelného mostu, který velmi významně sníží prostup tepla konstrukcí a zároveň zajistí staticky funkční provázání vnější (konzolované) a vnitřní části monolitické ŽB konstrukce. Při návrhu prvku pro přerušení tepelného mostu je zcela nezbytné využít materiály, které jsou odolné vůči korozi, neboť výztužné pruty prochází kondenzační zónou obvodové stěny. Z tohoto důvodu jsou v těchto aplikačních oblastech běžně navrhovány materiály na bázi austenitických ocelí [95], [93], [97], [91] nebo [90], případně je běžná konstrukční ocel chráněna ochranným povlakem [89] nebo plastovou chráničkou umístěnou v izolačním materiálu [94]. Pouze jeden výrobce v současnosti nabízí izolační prvek využívající GFRP výztuž v tažené zóně [92]. Smyková (zakřivená) výztuž je však řešena z nerezové oceli – viz obr. 67.



obr. 67: Schöck Isokorb® XT-Combar se sklolaminátovou tahovou výztuží [92]

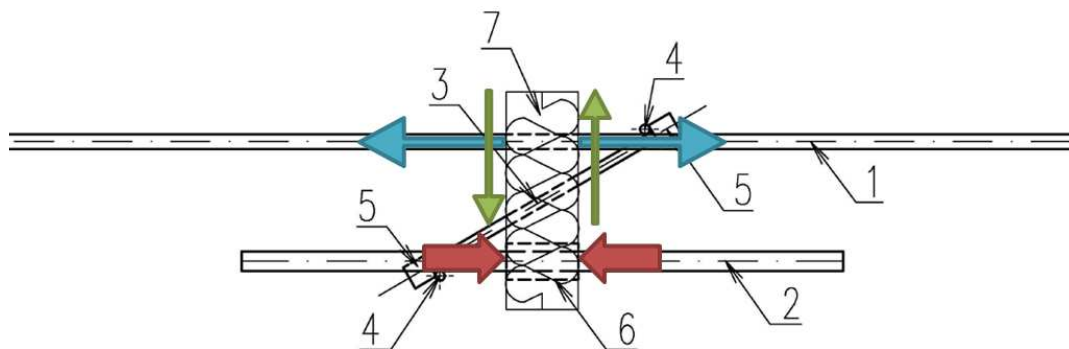
Nevýhodou kompozitní výztuže je problematické řešení ohybů (výztuž s EP či VE matricí nelze po vytvrzení dále tvarovat) a dále nutnost zajistit dostatečnou požární odolnost prvku, neboť na teplotní namáhání je FRP výztuž citlivá. Tlačené elementy jsou obvykle řešeny formou ocelových či vláknocementových elementů, které však mají vyšší tepelnou vodivost. Žádný z výrobců nenabízí plně kompozitní řešení elementu pro přerušení tepelného mostu.

5.3.2 Teoretický koncept řešení, základní (statické) chování plně kompozitního izolačního dílce

Technické řešení sestavy elementů pro zajištění úplného přerušení tepelného mostu – tedy celého prvku/dílce (viz obr. 68) – je předmětem patentu CZ 305718, jehož majitelem je VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, CZ a PREFA KOMPOZITY, a.s., Brno, CZ.

Základní statické chování izolačního dílce je zřejmé z obr. 68. Dílec obsahuje následující – staticky funkční – výztužné prvky:

- taženou (G)FRP výztuž (označení na obr. 68 jako (1); tahové namáhání značeno modrou šipkou);
- smykovou (C)FRP výztuž (3) a
- tlakové kompozitní ložisko ((6); namáhání značeno červenou šipkou).



obr. 68: Prvek pro přerušení tepelného mostu z FRP materiálů – patent CZ 305718; červená šipka – tlak; modrá šipka – tah; zelená šipka - smyk

Návrh systémového prvku byl uvážěn jako modulární (skladebný půdorysný rozměr 330 nebo 250 mm). Z tohoto důvodu je možno výše uvedené (nosné) části variabilně kombinovat a modifikovat (různý počet a průměr nosných prutů) s cílem dosáhnout požadované únosnosti a tuhosti. V základním zamýšleném provedení tepelně izolační dílec i-KORB obsahuje (viz obr. 68) přímý tažený prvek (1) - výztuž - umístěnou v horní části segmentu, smykový prvek (3) - výztuž - procházející šikmo skrz tepelně izolační část segmentu, kompozitní tlakové ložisko (6) vložené v dolní části segmentu a tepelnou izolaci (7) zajišťující přerušení tepelného mostu. Vše je sestaveno do jednoho dílce z důvodu zajištění snadné manipulovatelnosti a provádění konstrukce. Pro zajištění dostatečné požární odolnosti (dle požadavku aplikace) může/musí být přidána ochranná vrstva z kalciumsilikátových desek.

5.3.2.1 Předpoklady pro návrh izolačního dílce i-KORB

Při návrhu izolačního dílce byly uváženy tyto základní požadavky/předpoklady (podrobně viz [60]):

- veškeré nosné prvky izolačního dílce jsou provedeny z FRP materiálu;
- počet tahových, smykových i tlačných elementů je variabilní, je požadováno modulární řešení;
- mezní stav, tj. mezní únosnost prvku i-KORB, nastane při dosažení mezního poměrného přetvoření alespoň v jednom nosném elementu izolačního dílce (tlačný prvek, tažený prvek, smykový prvek) či při dosažení mezní únosnosti kontaktu/kotvení;
- při návrhu izolačního dílce i-KORB není pro návrh limitující únosnost okolního betonu, tj. při zabudování prvku do konstrukce rozhoduje o únosnosti izolačního dílce únosnost/soudržnost FRP výztužných elementů (není tedy předpokládáno porušení v betonu; tato skutečnost musí být návrhem a osazením prvku do konstrukce zajištěna);
- napětí v tažené, tlačné i smykové FRP výztuži je uvažováno lineárně pružné až do porušení a lze jej popsat příslušným pracovním diagramem (obr. 3). Návrhové veličiny materiálových charakteristik FRP výztuže musí být uváženy s přihlédnutím k očekávané degradaci působícím prostředím (vlhkost, teplota atd.) a omezení z hlediska působení trvalého zatížení (viz uvedené v odstavci 4.1);
- musí být možné zajistit požární ochranu dílce pro dosažení odolnosti alespoň R30.

Na základě provedené studie [60] bylo doporučeno využití tažené GFRP výztuže (minimální dlouhodobé přípustné napětí s ohledem na dotvarování prvku – životnost 100 let, působící prostředí a požadovanou tuhost konstrukce – $f_{fl,d}^{LT} = 150$ MPa; odpovídající přetvoření $\varepsilon_{fl,d}^{LT} =$ cca 3,0 ‰; $E_f = 50$ GPa); CFRP materiálu jako smykové výztuže (minimální dlouhodobé přípustné napětí $f_{fl,d}^{LT} = 1000$ MPa; odpovídající přetvoření $\varepsilon_{fl,d}^{LT} =$ cca 7 ‰; $E_f = 150$ GPa) a kompozitního ložiska ze speciální záměsi polymeru a krátkých skleněných vláken (minimální dlouhodobé přípustné napětí $f_{fl,d}^{LT} = 30$ MPa; odpovídající přetvoření $\varepsilon_{fl,d}^{LT} =$ cca 3,5 ‰; $E_f = 12,5$ GPa). Uvedené hodnoty byly s ohledem na skutečné chování dílce konzervativní (přijaté však především s ohledem na v době návrhu omezené znalosti dlouhodobého chování tlačného ložiska). Míra konzervativnosti návrhu realizovaného na počátku vývoje je zřejmá z provedených experimentů pospaných v odstavci 5.3.3.

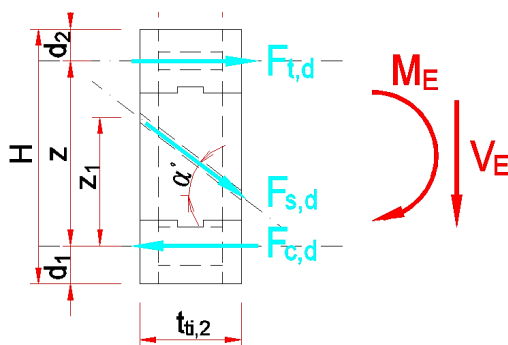
5.3.2.2 Stanovení teoretické únosnosti

S ohledem na definované cíle byla provedena parametrická studie vlivu materiálového řešení, vyztužení a výšky izolačního dílce i-KORB na výslednou ohybovou a smykovou únosnost [60]. Celkem bylo řešeno pět variant vyztužení při variování výšky v intervalu 160 mm (minimální realizovatelná výška s ohledem na provedení konstrukčních detailů) až 300 mm.

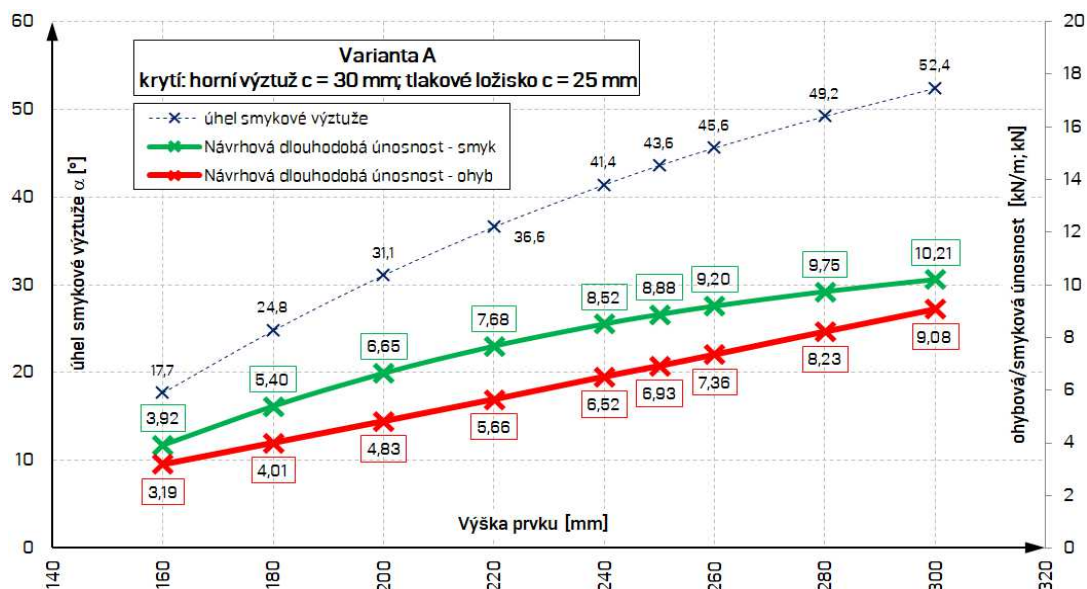
Mezní únosnost izolačního dílce v ohybu a ve smyku byla stanovena na základě uváženého statického schématu, který je patrný z obr. 69. Výsledkem provedené parametrické studie byly zatěžovací údaje stanovené vždy pro jeden kus izolačního dílce šířky 250 (330) mm, obdržené hodnoty jsou stručně sumarizovány v tab. 18, závislost únosnosti na výšce pro Variantu A je pro ilustraci uvedena na obr. 70. Prezentovány jsou očekávané dlouhodobé hodnoty únosnosti při uvážení životnosti prvku 100 let. Podrobněji viz [60].

tab. 18: Ohybová a smyková únosnost izolačního dílce pro různé typy vyztužení a výšky průřezu

Ohybová a smyková únosnost 1 ks i-KORBu (návrhová dlouhodobá pro životnost cca 50 let)										
	Varianta A		Varianta B		Varianta C		Varianta D		Varianta A - vyšší krytí	
smykové vyztužení	2 ks $\phi 6$ CFRP						2 ks $\phi 8$ CFRP		2 ks $\phi 6$ CFRP	
krytí	krytí horní výztuž 20 mm, dolní tlakové ložisko 15 mm								krytí horní výztuž 30 mm, dolní tlakové ložisko 25 mm	
ohybové vyztužení	tahová výzt. 2 $\phi 14$ GFRP tlakové lož. 2 $\phi 30$ GFRP		tahová výzt. 3 $\phi 14$ GFRP tlakové lož. 3 $\phi 30$ GFRP		tahová výzt. 3 $\phi 18$ GFRP tlakové lož. 3 $\phi 30$ GFRP		tahová výzt. 2 $\phi 14$ GFRP tlakové lož. 2 $\phi 30$ GFRP		tahová výzt. 2 $\phi 14$ GFRP tlakové lož. 2 $\phi 30$ GFRP	
výška prvku H	V_{Rd}^{LT}	M_{Rd}^{LT}	V_{Rd}^{LT}	M_{Rd}^{LT}	V_{Rd}^{LT}	M_{Rd}^{LT}	V_{Rd}^{LT}	M_{Rd}^{LT}	V_{Rd}^{LT}	M_{Rd}^{LT}
160	5,44	3,93	5,44	6,11	5,44	6,11	7,26	3,78	3,92	3,19
180	6,83	4,75	6,83	7,37	6,83	7,37	9,10	4,59	5,40	4,01
200	7,75	5,59	7,75	8,64	7,75	8,64	10,34	5,42	6,65	4,83
220	8,62	6,43	8,62	9,92	8,62	9,92	11,49	6,25	7,68	5,66
240	9,27	7,27	9,27	11,20	9,27	11,20	12,35	7,08	8,52	6,52
250	9,57	7,70	9,57	11,85	9,57	11,85	12,76	7,51	8,88	6,93
260	9,87	8,14	9,87	12,50	9,87	12,50	13,16	7,95	9,20	7,36
280	10,29	8,99	10,29	13,79	10,29	13,79	13,72	8,79	9,75	8,23
300	10,55	9,85	10,55	15,08	10,55	15,08	14,07	9,64	10,21	9,08



obr. 69: Statické schéma uvážené pro stanovení mezní ohybové a smykové únosnosti dílce



obr. 70: Závislost návrhové dlouhodobé ohybové a smykové únosnosti dílce na výšce H (hodnoty pro jeden izolační dílec)

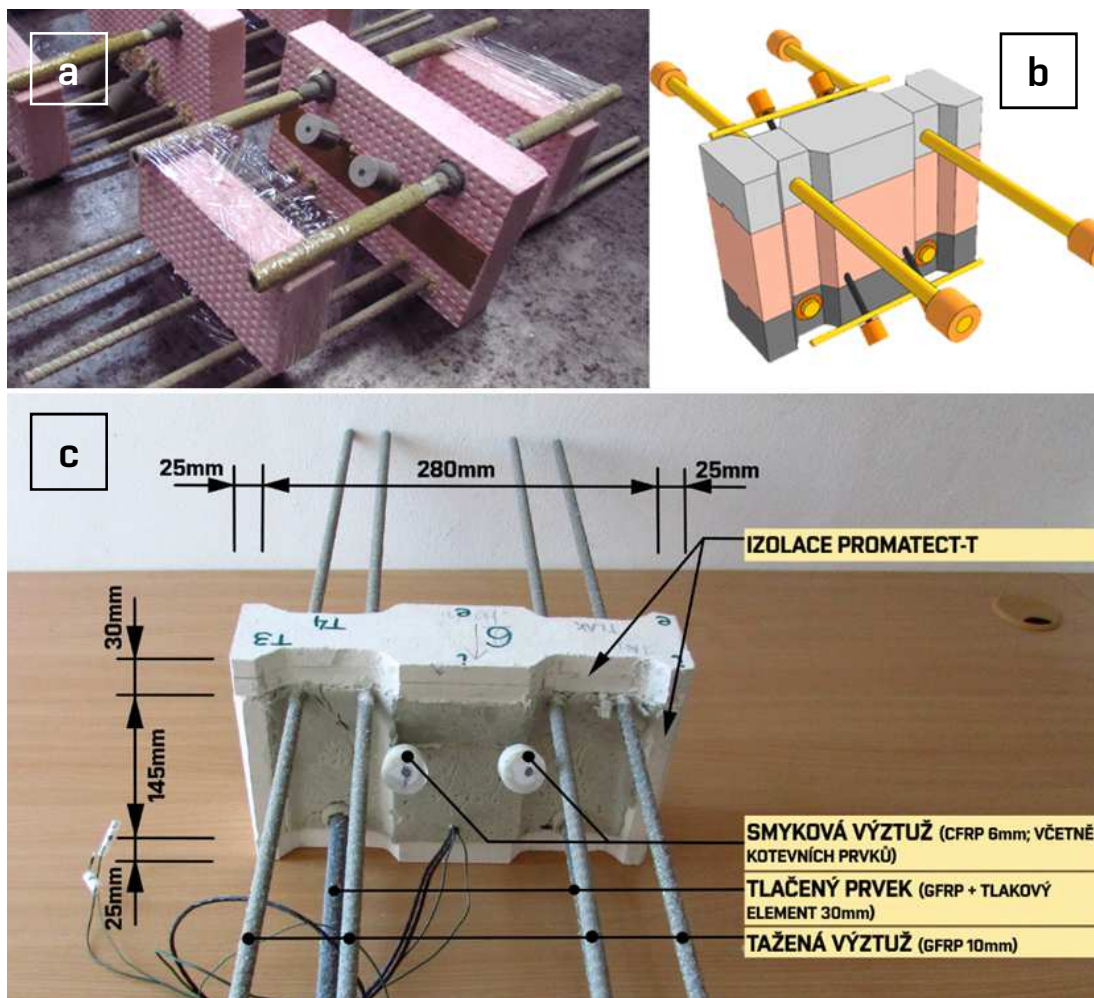
O dlouhodobé únosnosti izolačního dílce i-KORB rozhoduje především únosnost/spolehlivost tlačeneho elementu – tlakového ložiska. Výstižný popis jeho chování je proto klíčový pro bezpečný návrh řešení²⁵. Žádoucí (navržený) způsob porušení dílce je přetržení tahové výztuže. Smyková únosnost prvku je, z důvodu velmi omezeného prostoru v kotevni oblasti, determinována především schopností bezpečně zakotvit přenášené složky sil.

5.3.2.3 Realizované řešení

Sestava tepelně izolačního dílce doznala od původního ideového/patentovaného řešení do realizace významných změn. První vzorky i vizualizace z počátku vývoje a také finální realizované řešení, které podstoupilo např. požární zkoušky (dosaženo požární odolnosti $R > 120$ minut; [88]), je zřejmé z obr. 71.

Finální, do výrobního portfolia firmy PREFA KOMPOZITY, a.s. zařazené, řešení izolačního dílce i-KORB v modulu 330 mm (viz obr. 71c) je provedeno z prutové kompozitní GFRP a CFRP výztuže (v každém dílci 4x tahový prvek; 2x tlakové kompozitní ložisko $\varnothing 30$ s vnitřní nosnou GFRP výztuží; 2x CFRP smykový prvek; dimenze dle statického výpočtu) a opatřeno ochrannou protipožární vrstvou z materiálu PROMATECT®-T (výrobce Promat) tloušťky dle požadované požární odolnosti. Tělo izolačního dílce je vyplněno protipožární pěnou PROMAFOAM®-C (výrobce Promat).

²⁵ S ohledem na požadovanou bezpečnost návrhu bylo toto zjištění při návrhu zohledněno nízkým přípustným namáháním elementu a také širokým experimentálním ověřením jeho dlouhodobého chování.



obr. 71: Tepelně izolační dílec i-KORB; a) výroba funkčního vzorku 2015; b) vizualizace ideového řešení 2015; c) vzorek určený pro požární zkoušky (2019)

5.3.3 Navržený experimentální program a klíčové výsledky

Návrh experimentálního programu vycházel z vytyčeného cíle: dosáhnout spolehlivého, odolného a ekonomického návrhu dílce. S ohledem na namáhání jednotlivých dílčích částí systémového prvku i-KORB tak bylo nutno stanovit nejen základní fyzikální a mechanické charakteristiky FRP materiálu, ale především ověřit a výstižně popsat dlouhodobé chování jednotlivých komponent (pro klíčový tlačný element je experiment popsán v odstavci 5.3.3.1, dlouhodobé chování GFRP výztuže v tahu bylo uvedeno v předchozích kapitolách). Nezbytné bylo též ověřit chování dílce v reálné betonové konstrukci.

Bylo tak nutno navrhnout široký experimentální program s ohledem na popis:

- krátkodobého chování – určit jednorázovou únosnost (ohyb, smyk), tuhost dílce;
- dlouhodobého chování při působení konstantní hladiny zatížení - vzorky umístěné v exteriéru, vystavené účinkům povětrnosti;

- odezvy konstrukce na působící cyklické/únavové zatížení;
- zajištění požadované požární odolnosti celého řešení (požadavek na minimálně R30);
- tepelné vodivosti segmentu; tj. v závislosti na množství a fyzikálních vlastnostech jednotlivých výztužných prvků stanovit tepelnou vodivost/tepelný odpor celého elementu i-KORBu. Tato část zde není prezentována, neboť se netýká statického chování prvku.

Je zřejmé, že uvedené charakteristiky musely být spolehlivě určeny pro celou plánovanou dobu životnosti prvku [37], tj. uvedené mechanické (případně i fyzikální) charakteristiky bylo třeba určit v závislosti na čase dlouhodobými zkouškami. Zároveň bylo výrobcem a spolupůvodcem řešení firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. požadováno testování dlouhodobých a požárních vlastností na full-scale vzorcích celého balkonového segmentu včetně betonových částí vyráběných na stavbě. Tyto skutečnosti byly určující pro návrh rozsáhlého experimentálního programu.

V dalším textu jsou uvedeny pouze klíčové výsledky řešení. Nejsou popsány základní/rutinní testy (například krátkodobé statické testy dílčích komponent systému).

5.3.3.1 Dlouhodobé zkoušky tlakových elementů

V průběhu řešení projektu TN01000056/05 byly realizovány experimenty s cílem ověřit dlouhodobé chování vyvíjeného řešení tlakového elementu (krátkodobé vlastnosti viz tab. 19 [98]). Tyto zkoušky nejsou standardizovány. Při návrhu experimentu však bylo uváženo doporučení směrnice [6] a normy [70] pro realizaci dlouhodobých zkoušek v tahu. Sledován byl vliv hladiny působícího zatížení na životnost tlačенého ložiska (tzv. zkoušky „creepu“; viz uvedené v 4.2.1 a 5.1.2.3). S ohledem na cílenou aplikační oblast (kondenzační zóna konstrukce) byly testy realizovány při 100 % vlhkosti okolního prostředí. Nebylo však uváženo působení roztoků (např. alkalických), neboť se nepředpokládá přímá expozice prvku tomuto prostředí. Test též nebyl teplotně urychlen, výsledky jsou platné pro laboratorní teplotu cca 18,3 °C (uvedena průměrná hodnota).

Pro potřeby testu bylo nezbytné provést úpravy vyvinutého zkušebního zařízení (vložen nový reverzní modul), které bylo popsáno v odstavci 5.1.2.1. Provedení testu včetně osazeného vzorku a instrumentace je zřejmé z obr. 72.

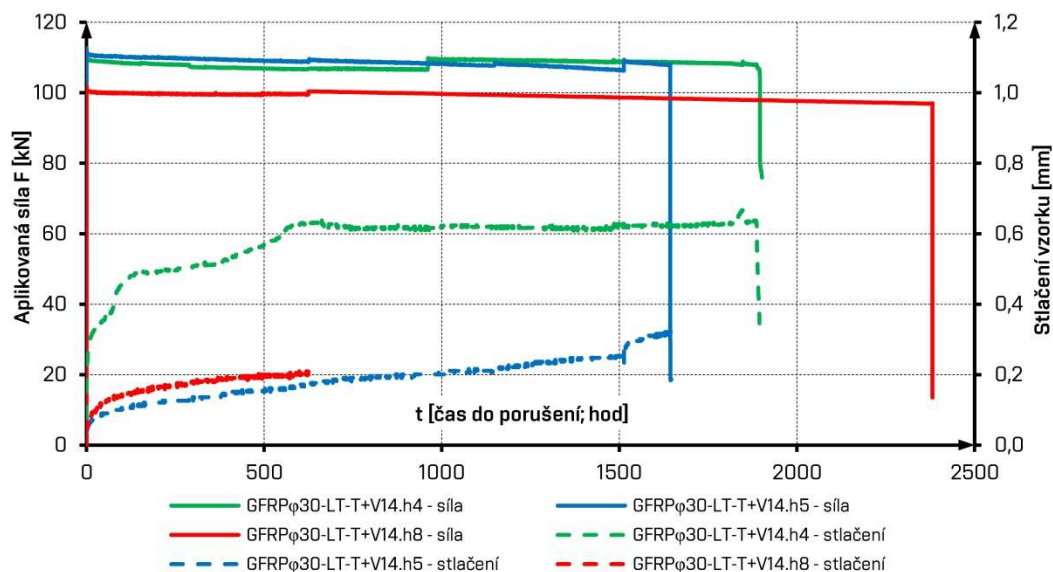


obr. 72: Dlouhodobá zkouška tlakového elementu; vlevo: zkušební zařízení s osazeným vzorkem; vpravo: porušení vzorků

tab. 19: Základní mechanické charakteristiky tlakového ložiska ve variantě T+V14 [98]

označení a popis vzorku	průměr [mm]	výška [mm]	tlaková pevnost			modul pružnosti v tlaku		
			střední hodnota [MPa]	směrodatná odchylka [MPa]	variační koeficient	střední hodnota [GPa]	směrodatná odchylka [GPa]	variační koeficient
GFRP30-ST-T+V14.X vnější obal tvořený skleněnou tkaninou se znatelnou orientací nosných vláken + jádro z GFRP výztuže Ø14	30	60	247,38	13,11	0,05	13,84	1,35	0,10
charakteristická hodnota pevnosti v tlaku [MPa] (dle ČSN EN 1990, přílohy D; 5% kvantil normálního rozdělení)	220,00							
návrhová hodnota pevnosti v tlaku [MPa] (dle ČSN EN 1990, přílohy D; 0,1% kvantil normálního rozdělení)	180,00							
parciální součinitel pevnosti v tlaku $\gamma_{f,c}$	1,30							
Modul pružnosti v tlaku [GPa] (střední hodnota; 50% kvantil)	13,80							

U všech vzorků byla v průběhu zkoušky zaznamenávána působící síla a měřeno jejich stlačení. Na obr. 73 jsou pro ilustraci vykresleny typické měřené průběhy závislosti aplikované síly a stlačení vzorku na čase. Z uvedeného je dobře patrný nárůst deformace vzorku především v počátku zatěžování, který se postupně ustaluje. Výraznější změna přetvoření bezprostředně před kolapsem nebyla u většiny vzorků pozorována, porušení bylo náhlé, křehké.

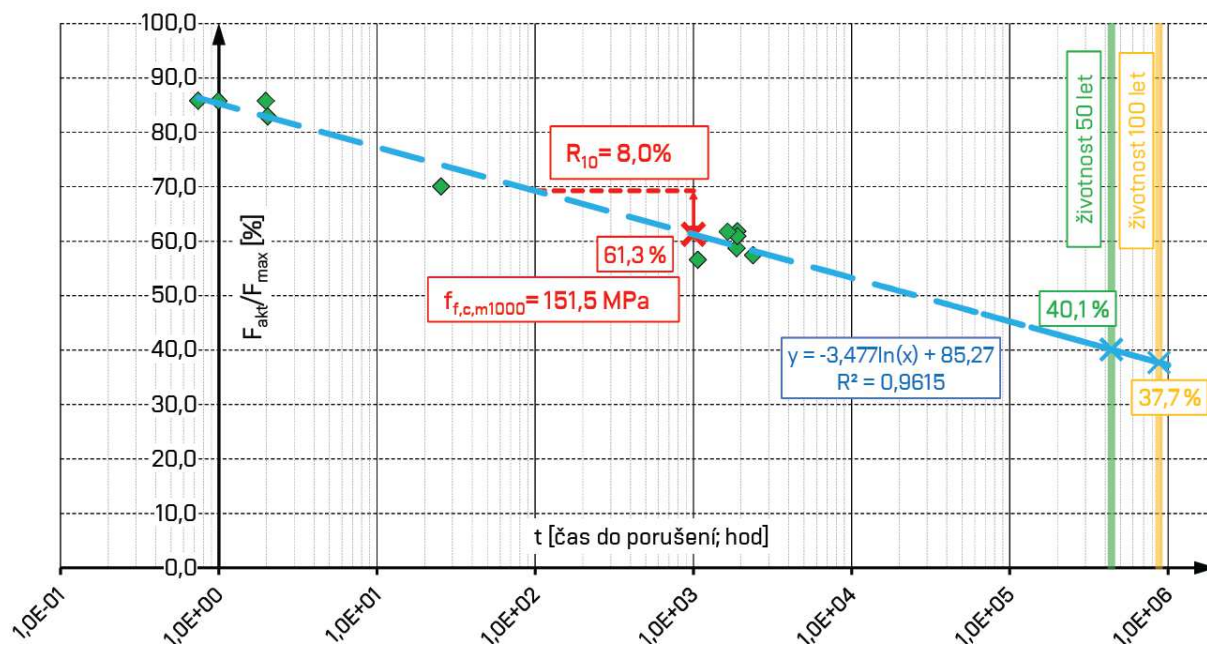


obr. 73: Dlouhodobá zkouška tlakového elementu – závislost: působící síla/stlačení/čas do kolapsu

Způsob porušení vzorků při dlouhodobé zkoušce je patrný z obr. 72. K porušení docházelo vždy obdobným způsobem, a to značným (nerovnoměrným) otláčením styčné plochy ložiska, které bylo doprovázeno porušením/přetržením vláken tkaniny. Kompletní výsledky lze nalézt v [98], klíčová data potřebná pro sestavení uvedených závislostí jsou prezentována v Příloze A, tab. A 8.

Na obr. 74 je zobrazena závislost aplikované hladiny působícího tlakového zatížení na čase kolapsu vzorku. Pro vynesení závislosti byl uvažován degrační model dle [22]. Tento byl zvolen především z důvodu dobré shody a konzervativnosti predikce, neboť nebyly realizovány přímo měřené či teplotně urychlené vzorky s dobou expozice vyšší než cca 2×10^3 hodin. Výsledky je proložena regresní křivka s velmi dobrou shodou (index spolehlivosti $R^2=0,96$; index korelace 0,98). Pokles únosnosti/zatížitelnosti za dekádu na logaritmickém měřítku R_{10} je cca 8,0 %.

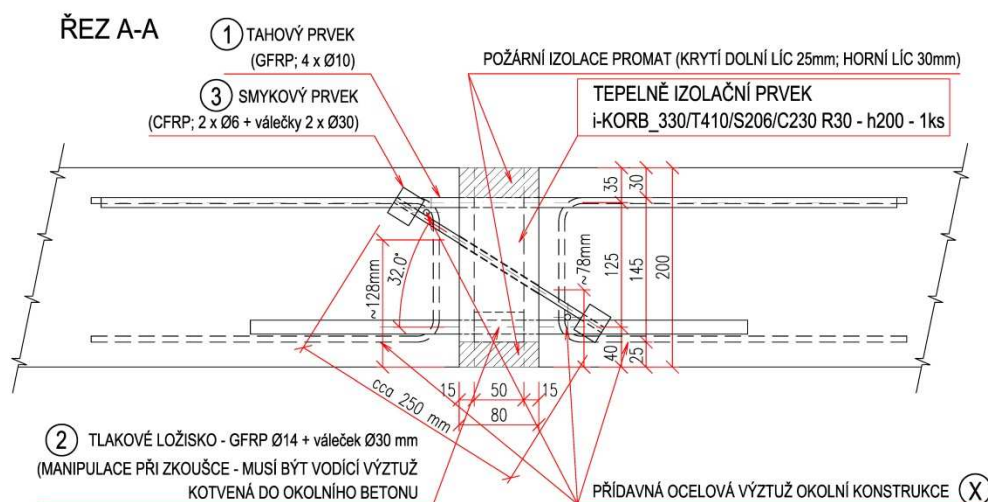
Výsledky ukazují na dobré dlouhodobé vlastnosti vyvíjeného prvku tlakového ložiska a tím i správnost zvolené materiálové kompozice. Na základě provedeného vyhodnocení byla stanovena mezní zatížitelnost ložiska (střední hodnoty) pro životnost 100 let na úrovni cca 38% krátkodobé tlakové únosnosti (mezní napětí 93 MPa). Tato hodnota je cca 3x vyšší než požadovaná při počátečním návrhu dílce – viz uvedené v 5.3.2.1.



obr. 74: Závislost životnosti prvku (času do porušení) na hladině působícího zatížení (teplota 20°C; vlhkost 100%) při vyloučení vzorků s krátkými časy do porušení (nižší než 10 minut)

5.3.3.2 Full-scale testy dílce osazeného v betonové konstrukci

Od počátku vývoje (rok 2015) bylo vyrobeno celkem 20 (+2) velkorozměrových vzorků s cílem ověřit skutečné chování vyvíjeného tepelněizolačního dílce. Realizovány byly nejen krátkodobé statické testy, ale především dlouhodobé zkoušky (zkouška stále probíhá; vzorky doposud na standu v areálu PREFA Brno, a.s.); zkoušky únavy a modální analýza a v neposlední řadě také požární zkoušky. Osazení prvku i-KORB v betonové konstrukci (včetně navazující výztuže) je zřejmé z obr. 75. Stručný přehled všech doposud testovaných vzorků lze nalézt v tab. 20.



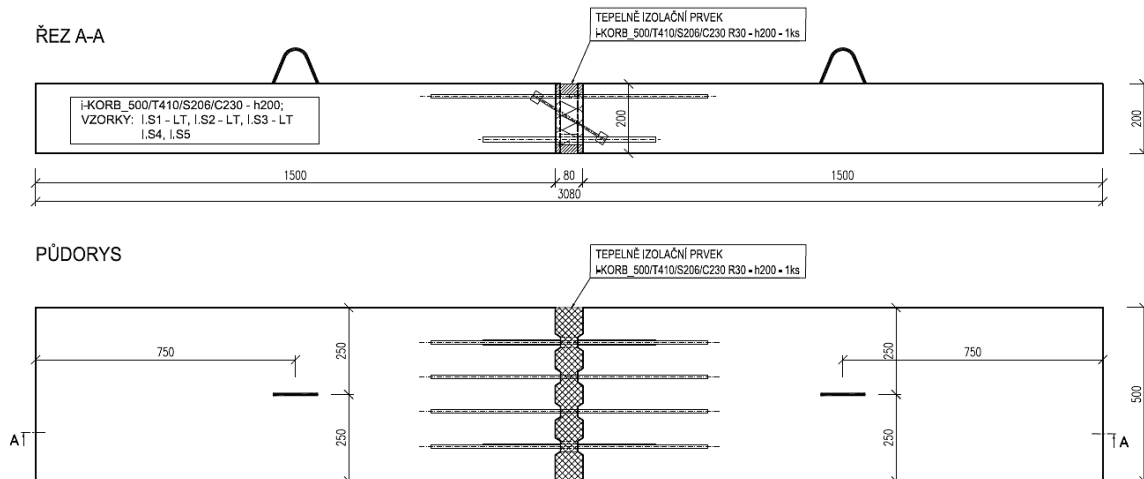
obr. 75: Osazení prvku i-KORB v betonové konstrukci vzorku, řez (2019)

tab. 20: Přehled doposud testovaných full-scale vzorků

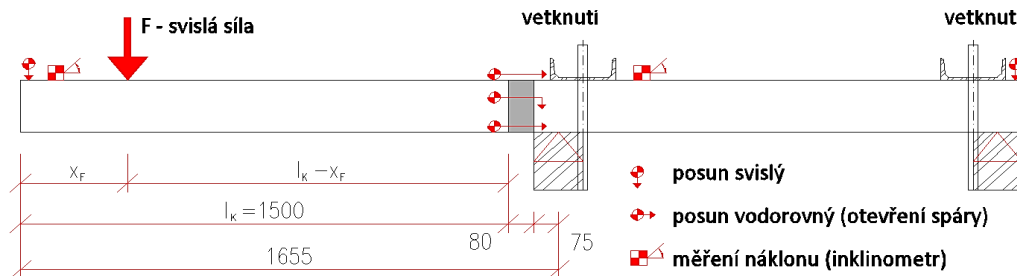
	Název vzorku (včetně kódového označení použitého i-KORBu)	Účel/Zkouška	Datum výroby	Poznámka/rozměry
1	i-KORB_300/T510/S206/C230-h180-UJC-S1	Statická zkouška	11/2015	1x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 0,4x3,06x0,18 m
2	i-KORB_300/T510/S206/C230-h180-UJC-S2	Statická zkouška	11/2015	
3	i-KORB_300/T510/S206/C230-h180-NC-S3	Statická zkouška	11/2015	2x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 1,0x3,06x0,18 m
4	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S1-LT	Dlouhodobá zkouška - Kulkova	12/2018	1x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 0,5x3,08x0,20 m
5	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S2-LT	Dlouhodobá zkouška - Kulkova	12/2018	
6	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S3-LT	Dlouhodobá zkouška - Kulkova	12/2018	
7	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S4-S	Statická zkouška + Modální analýza	12/2018	
8	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S5-S	Statická zkouška + Únava (2 mil cyklů)	12/2018	
9	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-II.S1-LT	Dlouhodobá zkouška - Kulkova	12/2018	1x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 0,5x2,58x0,20 m
10	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-II.S2-LT	Dlouhodobá zkouška - Kulkova	12/2018	
11	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-II.S3-S	Statická zkouška	12/2018	
12	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S1-F	Požární zkouška PAVUS	02/2019	3x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 1,35x3,08x0,20 m
13	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S2-F	Požární zkouška PAVUS	02/2019	
14	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S	Statická zkouška + Modální analýza + Únava (2 mil cyklů)	02/2019	
15	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-III.S1-S	Statická zkouška	08/2019	1x i-KORB; rozměry betonového vzorku: 0,5x2,4x0,20(0,19) m
16	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-III.S3-LWAC-S	Statická zkouška	08/2019	
17	i-KORB_330/T410/S206/C230-h190-P25-IV.S1-S	Statická zkouška	08/2019	
18	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-III.S2-F	Požární zkouška KBK	08/2019	
19	i-KORB_330/T410/S206/C230-h190-P25-IV.S2-F	Požární zkouška KBK	08/2019	
20	i-KORB_330/T410/S206/C230-h190-P10VF-IV.S4-F	Požární zkouška KBK	08/2019	
21	K10S-h200-III.S4-S	Statická zkouška	08/2019	Referenční Schock Isokorb; rozměry betonového vzorku: 0,5x2,4x0,19 m
22	K10S-h200-III.S5-F	Požární zkouška KBK	08/2019	

5.3.3.2.1 Statické zkoušky vzorků

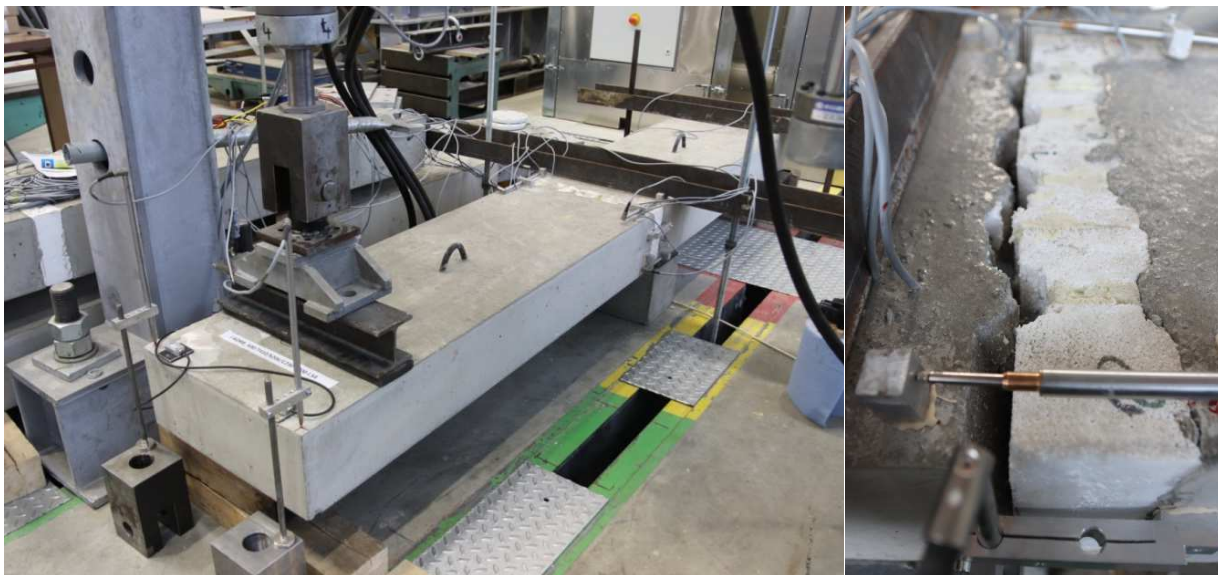
V průběhu vývoje bylo celkem deset vzorků určeno na statické/referenční zkoušky (viz tab. 20). Tyto byly prováděny vždy do kolapsu vzorku, kdy cílem bylo ověřit návrhové předpoklady a experimentálně stanovit mezní zatížitelnost vyvinutého tepelněizolačního dílce. Typický výrobní výkres vzorků určený pro krátkodobé statické zkoušky je zřejmý z obr. 76. Vzorek byl vždy vyhotoven ze dvou (většinou symetrických) betonových částí, kdy jedna sloužila pro fixaci vzorku ve zkušebním rámu (simuluje interiér konstrukce), druhá pak představuje vyloženou část konstrukce – balkon. Statické schéma a uspořádání typické zkoušky je zřejmé z obr. 77, reálné provedení pak z obr. 78.



obr. 76: Výkres tvaru vzorku s osazeným tepelně-izolačním dílcem (vzorek 0,5 x 3,08m)



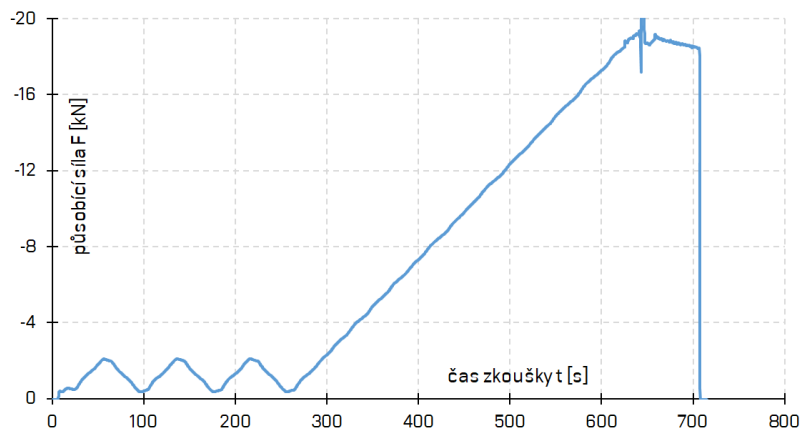
obr. 77: Uspořádání statické zatěžovací zkoušky, způsob ukotvení vzorku



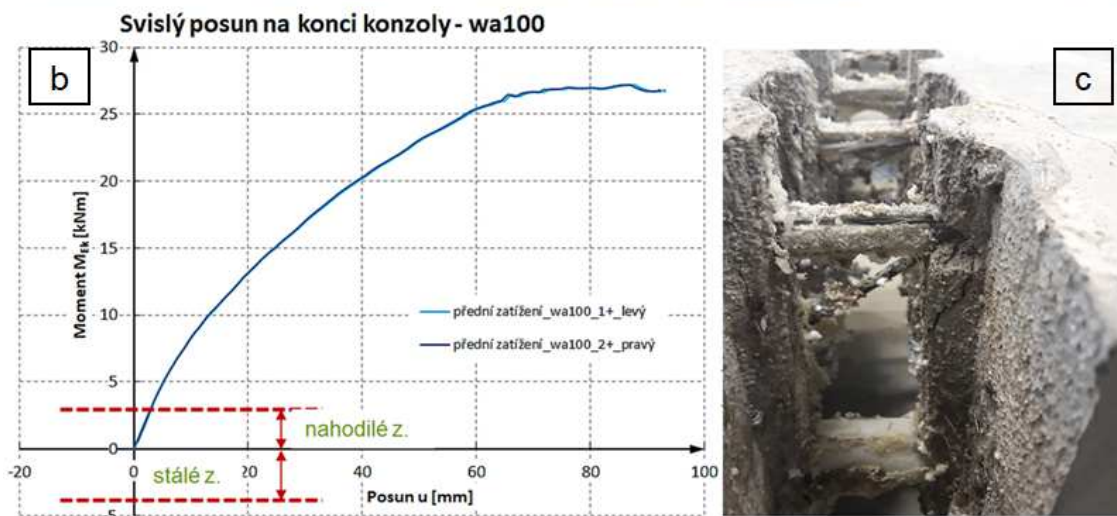
obr. 78: Reálné provedení statické zatěžovací zkoušky

Finální výrobek byl testován ve dvou základních konfiguracích experimentu – s převládajícím ohybovým zatížením a převládajícím smykovým zatížením. Indukčnostními snímači (podle typu vzorku osazeno až 10 ks) byly měřeny posuny konce konzoly, otevření/zkosení spáry s vloženým tepelněizolačním dílcem a posuny vetknuté/fixované části. Instalována byla též dvojice inklinometrů pro sledování pootočení fixované i konzolované části konstrukce.

Klíčové nosné prvky dílce byly osazeny tenzometrickými snímači. Statická zkouška vždy sestávala z trojice zatěžovacích cyklů s nízkou zátěží (cca 10 % teoretické mezní únosnosti vzorku), následně bylo kontinuálně vnášeno zatížení až do porušení vzorku – viz obr. 79.



obr. 79: Typický průběh zatěžování (závislost síly na čase) v průběhu statické zatěžovací zkoušky



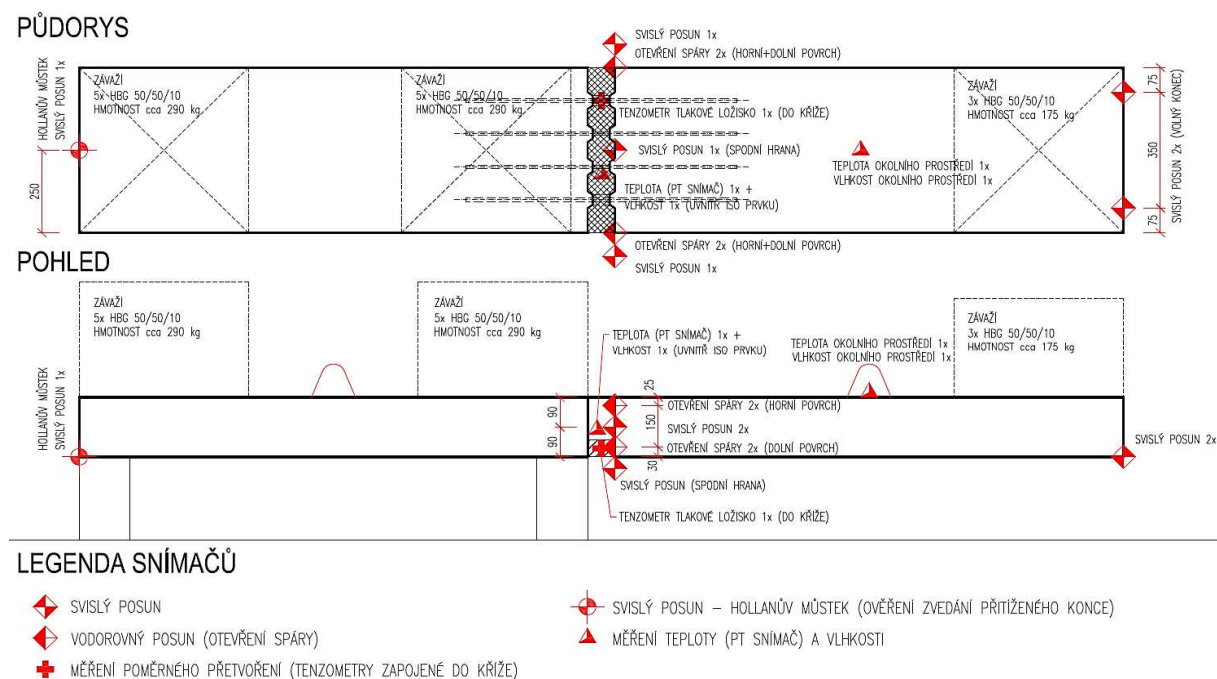
obr. 80: Statická zatěžovací zkouška: a) porušení vzorku; b) měřené deformace na konci konzoly; c) porušená tahová výztuž

U všech testovaných vzorků došlo při zkouškách k tahovému porušení vložených izolačních dílců. Kolaps nastal přetržením horní GFRP výztuže. Tento způsob porušení byl cílený, neboť tahové porušení elementu je, s ohledem na predikci chování, žádoucí/lépe kontrolovatelné. Typický způsob porušení vzorku (i jeho odezva na vnášené zatížení) je zřejmý z obr. 80. Zde je též patrná oblast využití konstrukce a míra rezervy (nutno ovšem uvážit, že se jedná o krátkodobou zkoušku).

5.3.3.2.2 Dlouhodobé zkoušky vzorků

Zcela nezbytnou součástí experimentálního programu byla realizace dlouhodobé zkoušky pěti vzorků exponovaných vnějšímu prostředí a působení zatížení²⁶. Vzorky pro tuto zkoušku (pořadové číslo 4 až 6, 9 a 10 v tab. 20) byly vyrobeny na konci roku 2018. V průběhu roku 2019 byly následně umístěny na připravený stand v areálu formy PREFA Brno, a.s. Od té doby jsou kontinuálně zaznamenávány posuny a přetvoření klíčových míst konstrukce a též teplota a vlhkost prostředí.

Schéma vzorku, včetně způsobu zatěžování a umístění snímačů (platí pro typ I. dle tab. 20) je zřejmé z obr. 81. Realizovaný stav (s instalovanou hmotou a zakrytými snímači) je dobře patrný z obr. 82.



obr. 81: Dlouhodobá zkouška: schéma umístění měřících čidel a hmoty; vzorek I.S1_LT (č.4 v tab. 20)

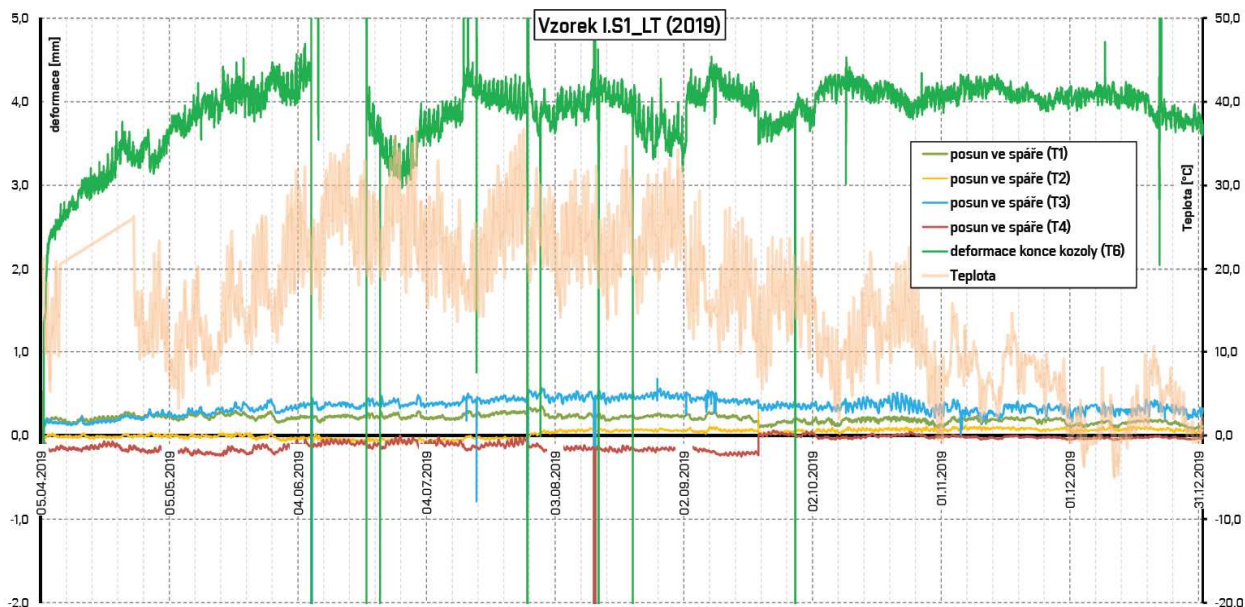
²⁶ Vloženou hmotou vyvozena hladina zatížení odpovídající očekávanému dlouhodobě působícímu zatížení v objektech občanské výstavby.



obr. 82: Umístění vzorků pro dlouhodobou zkoušku na standu

Experiment stále probíhá a není plánováno jeho ukončení. Průběžně je získáváno značné množství dat. Pro ilustraci je na obr. 83 uveden typický průběh záznamu (vzorek IS1-LT za období 2019). Z výsledků je zřejmé, že vzorky jsou dlouhodobě stabilní a ke změnám v měřených veličinách dochází především v souvislosti se změnou teploty v průběhu dne a ročních období. Důležitý nárůst v deformaci byl patrný z počátku po instalaci a zatížení vzorku (patrně především ze snímače T6 – průhyb na konci konzoly).

V rámci experimentu jsou realizovány i dlouhodobé provozní zkoušky snímačů typu OSTD (tenzometrická ohybová planžeta, jež byla vyvinuta pro měření robustních betonových celků v průběhu přetlakových zkoušek objektů kontejnmentu Jaderné elektrárny Dukovany), které jsou využity pro měření posunů. U snímačů je testována jejich životnost/odolnost ve vnějších podmínkách.



obr. 83: Dlouhodobá zkouška: záznam dlouhodobého měření na vzorku I.S1_LT za rok 2019

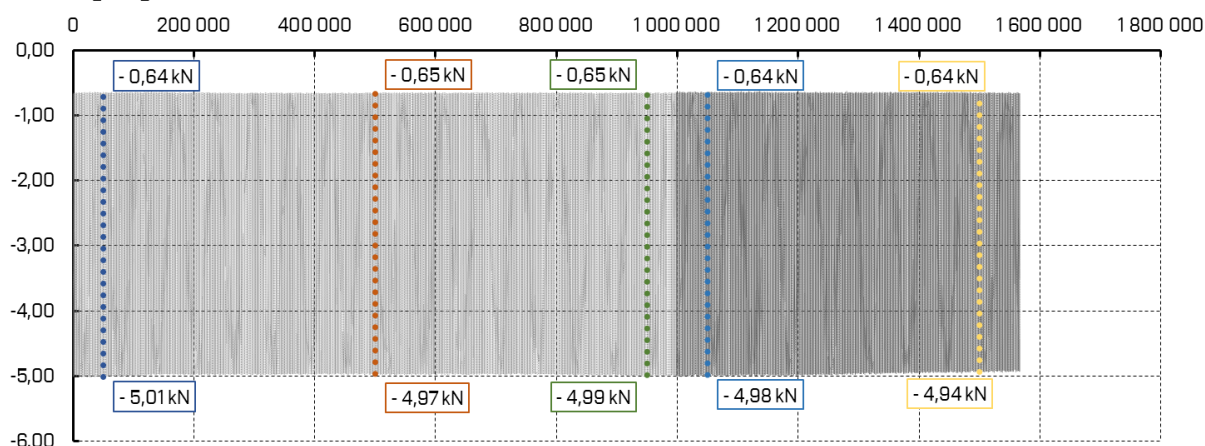
5.3.3.2.3 Únavové testy a modální analýza

Pro finální vyvinuté řešení byly provedeny též únavové testy, které ověřily odezvu dílce na působení cyklického zatížení. Testovány byly dva vzorky (č. 8 a 14 v tab. 20), jejichž provedení bylo odlišné. Vzorek č. 8 obsahoval pouze jeden izolační dílec i-KORB, u vzorku č. 14 (1,35x3,08x0,20 m) pak bylo ověřeno chování skupiny tří dílců. Cílem bylo vzorky podrobit 2 mil. cyklů zatížení a stanovit vliv na reziduální únosnost a mechanismus porušení (cyklicky vnášená síla na konci konzoly odpovídala 175 kg/m^2 ; frekvence 2 Hz; průběh zatěžování pro vzorek č. 14 je zřejmý z obr. 85). Reálné provedení zkoušky viz obr. 84.



obr. 84: Vzorek i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S před zahájením zkoušky

Síla F [kN]

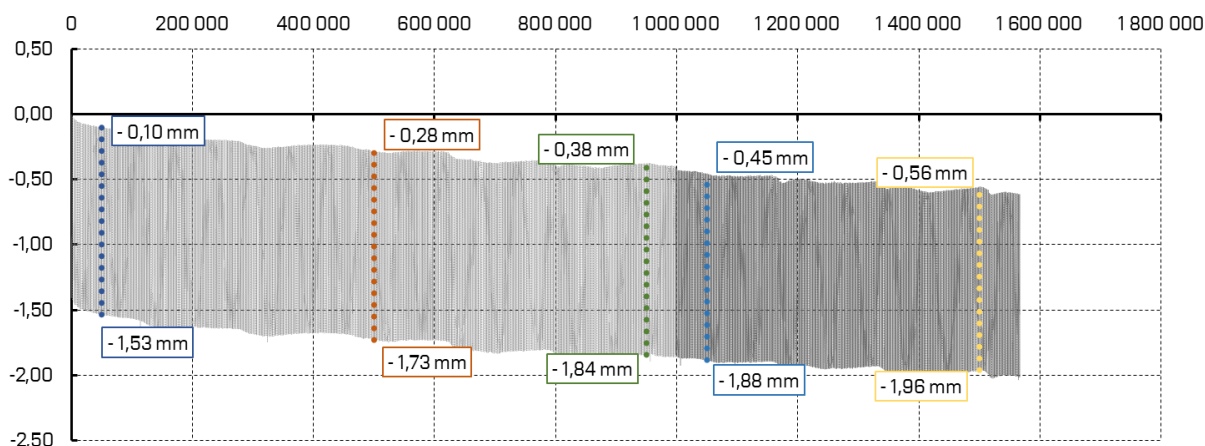


obr. 85: Únavový test vzorku i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S – závislost vnášené síly na počtu cyklů (v cca 1,6 mil cyklů došlo k výpadku záznamu)

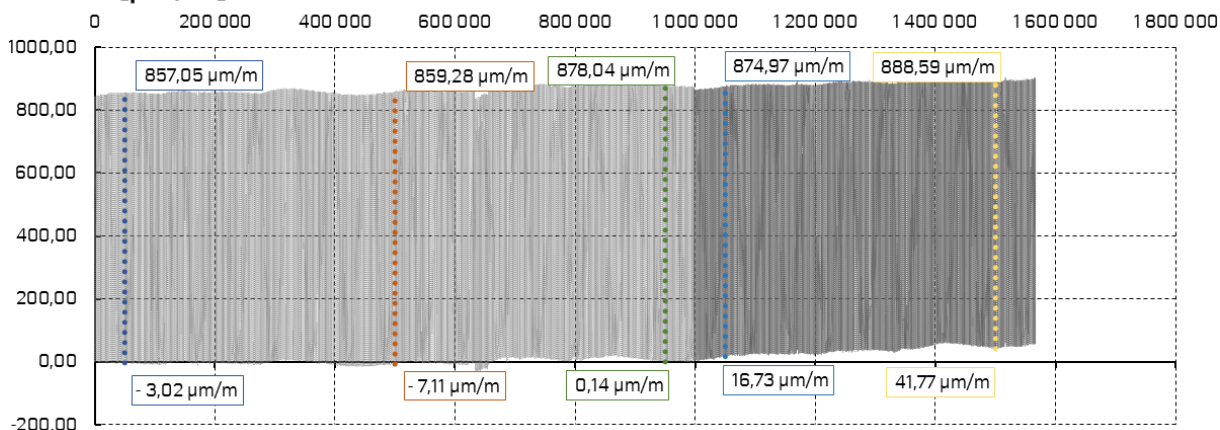
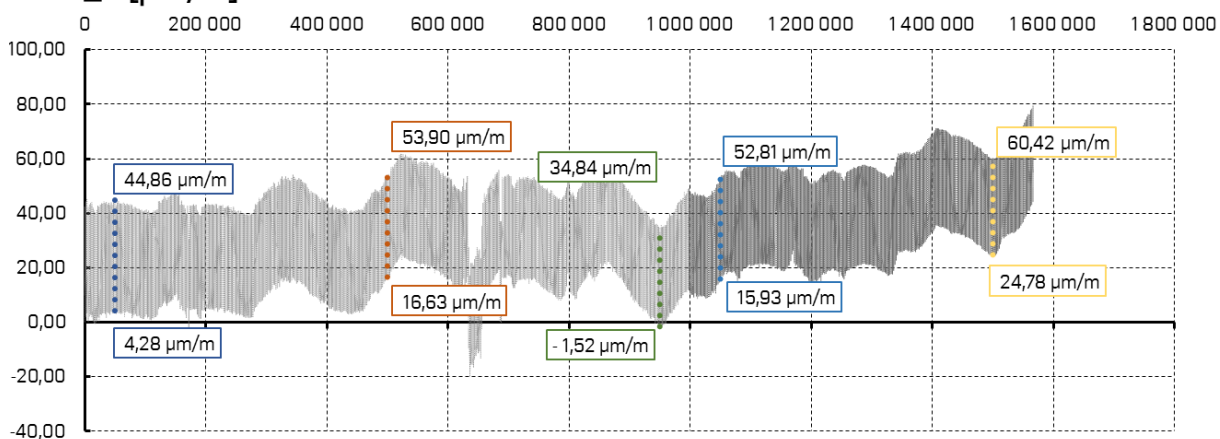
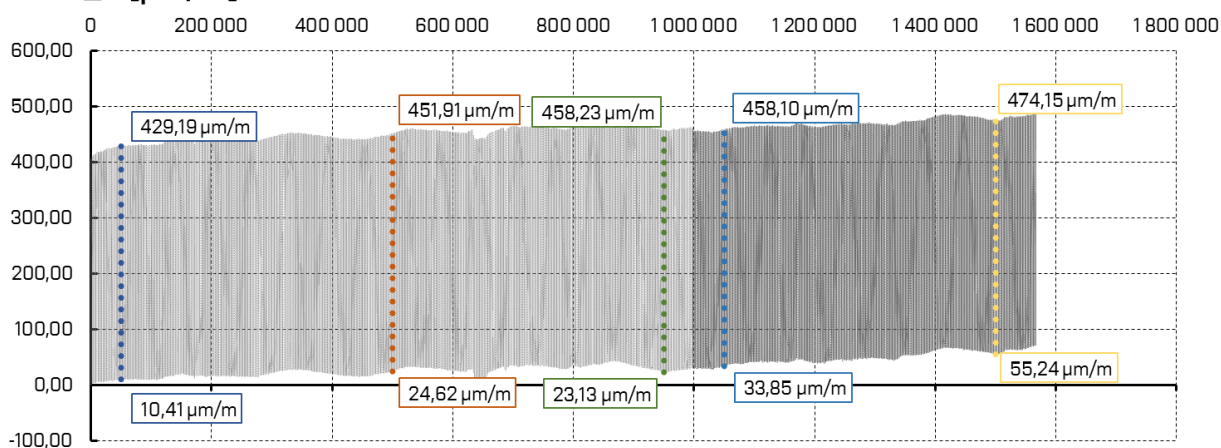
Odezva testovaného vzorku č. 14 v závislosti na vzrůstajícím počtu cyklů je zřejmá z obr. 86. Zobrazena je změna posunu na konci konzoly, tj. v nejméně deformovatelném místě vzorku. Je patrné, že došlo k nárůstu průhybu o cca 30 % (0,45 mm abs. za 1,5 mil. cyklů), avšak rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou v cyklu zůstal zachován (1,4 mm). Na obr. 87 je zobrazeno srovnání změny měřených přetvoření (hlavní nosné prvky dílce – tažená výztuž, tlakové ložisko a smyková výztuž). Je zřejmé, že shodně se zvyšující se deformací dochází též k navýšení měřeného přetvoření na všech třech sledovaných prvcích. Nejvíce je tento trend patrný u tlačného ložiska. Pozorované změny napětí na elementu jsou však malé.

Lze konstatovat, že experimentálně zjištěný výsledek je velmi dobrý, v průběhu zatěžování nedošlo k podstatné změně v chování vzorku. Obdobný závěr je možno vyslovit i pro vzorek č. 8, jehož výsledky zde však pro omezený rozsah textu nejsou uvedeny.

WA50_1 [mm]



obr. 86: Únavový test vzorku i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S – závislost deformace na konci konzoly na počtu cyklů (v cca 1,6 mil cyklů došlo k výpadku záznamu)

tenz_1 [$\mu\text{m/m}$]tenz_4 [$\mu\text{m/m}$]tenz_5 [$\mu\text{m/m}$]

obr. 87: Únavový test vzorku i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S – závislost přetvoření na počtu cyklů: nahoře: tažená výztuž; uprostřed: tlačené ložisko; dole: smyková výztuž

Po provedení únavové zkoušky, tj. po dosažení požadovaných 2 mil. cyklů, byly oba testované vzorky podrobeny statické zkoušce s cílem stanovit mezní únosnost (osazení vzorku a způsob porušení je zřejmý z obr. 88). Provedení zkoušky bylo shodné s uvedeným v 5.3.3.2.1. Únosnost vzorku č. 8 nebyla únavovým zatěžováním negativně ovlivněna,

nedošlo ke snížení experimentálně zjištěné hodnotě mezní únosnosti. U vzorku č. 14 nebyla možnost srovnání, neboť byl vyroben pouze jeden referenční vzorek (pro požární zkoušku; viz 5.3.3.2.4), na kterém bylo nejdříve provedeno cyklování a následně statická zkouška.



obr. 88: Statická zkouška po provedení únavového testu; vzorek i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S

Pro oba vzorky byla též provedena modální analýza. U vzorku č. 8 proběhla před realizací únavové zkoušky, vzorek č. 14 pak byl ověřen ve třech časových uzlech – před zahájením cyklování; po dosažení 1 milionu cyklů a po ukončení, tj. po dosažení 2 milionů cyklů. Měření a analýzy byly realizovány v průběhu měsíců ledna až května 2019 v prostorách laboratoří centra AdMaS. Získané poznatky jsou součástí zprávy [113], klíčové výsledky – stanovená dominantní frekvence pro oba vzorky (včetně útlumu) – jsou pro přehlednost sumarizovány v tab. 21.

tab. 21: Dominantní (první tři) vlastní frekvence a útlum vzorků č. 8 a č. 14 (viz tab. 20)

	Název vzorku (včetně kódového označení použitého i-KORBu)		1. tvar	2. tvar	3. tvar
8	i-KORB_500/T410/S206/C230-h200-I.S5-S	Frekvence [Hz]	10,8	21,5	26,1
		Útlum [%]	0,256	0,119	0,010
14	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S (před provedením únavové zkoušky)	Frekvence [Hz]	14,8	29,6	36,6
		Útlum [%]	0,343	0,306	0,108
14	i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S (po provedení 2 mil cyklů)	Frekvence [Hz]	14,1	28,2	36,8
		Útlum [%]	0,422	0,206	0,045

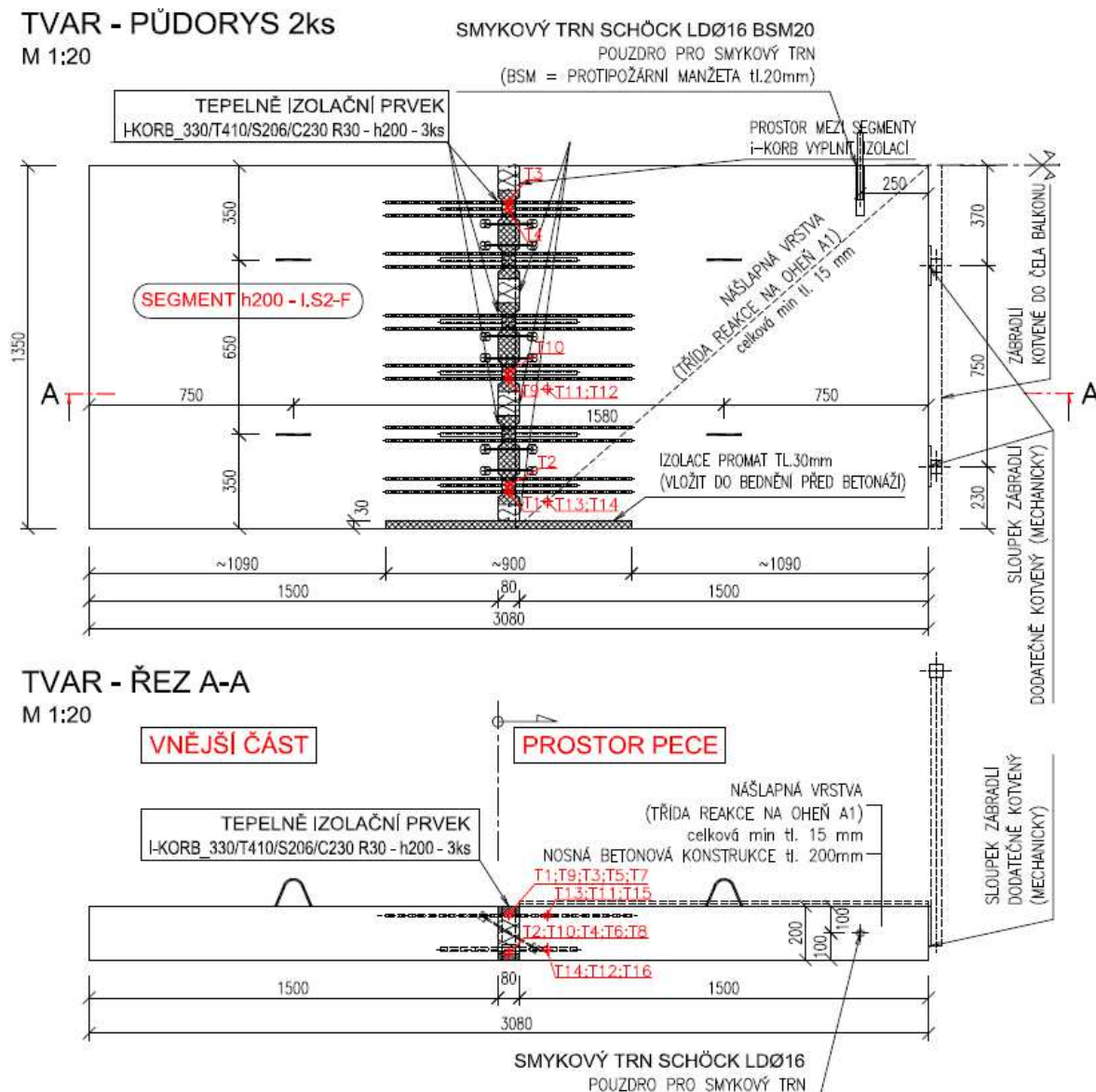
5.3.3.2.4 Požární zkoušky

V průběhu vývoje systémového prvku pro přerušení tepelného mostu bylo realizováno celkem pět požárních zkoušek (viz tab. 20), přičemž čtyři se uskutečnily na malých vzorcích v areálu firmy K.B.K. fire, s.r.o. a sloužily pro optimalizaci navrženého řešení. Tyto výsledky zde pro omezený rozsah textu nejsou prezentovány. Zásadní však byla požární zkouška realizovaná v roce 2019 v certifikované zkušebně PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí [88].

Předmětem zkoušky bylo stanovení požární odolnosti nosných systémových prvků pro přerušení tepelného mostu i-KORB, které byly pro zkoušku osazeny ve dvojici betonových balkonových nosníků, každý o celkovém rozměru 3 080 x 1 350 x 200 mm (výkres tvaru viz obr. 89). Uprostřed délky vzorků byly vloženy tepelně izolační dílce i-KORB, které dělily každý vzorek na část tepelně exponovanou (délky 1 580 mm) a na část bez tepelné expozice umístěnou mimo pec, která zajišťovala fixaci vzorku. V každém vzorku byly osazeny 3 kusy izolačních dílců i-KORB modulové šířky 330 mm, tloušťky 80 mm a výšky 200 mm²⁷, prostory mezi nimi byly vyplněny minerální vlnou (třída reakce na oheň A1).

Nosníky byly vyrobeny z betonu C30/37 XC4, XF3 a vyztuženy (vyjma střední části s vloženými nosníky i-KORB) betonářskou výztuží B500. Na části umístěné v prostoru pece byla provedena spádová vrstva z jemnozrnného betonu v tloušťce 10 mm (u zábradlí) až 20 mm (u vetknutí). Vzorky byly sesazeny bez dilatace, tzv. na sraz a mezi sebou spojeny smykovým trnem Ø18 mm z kulatiny (ocel S235) osazené do kovového pouzdra (umístění vzorků v peci je zřejmé z obr. 90 a obr. 91).

²⁷ Izolační dílce i-KORB určené pro požární zkoušku: 4x GFRP tahový prvek Ø 10 mm délky 900 mm; 2x tlakové ložisko Ø14 mm délky 500 mm s válečkem Ø30 mm délky 50 mm; 2x CFRP smykový prvek Ø6 mm délky 250 mm). Vzorky byly opatřeny ochrannou protipožární vrstvou z materiálu PROMATECT®-T (výrobce Promat), tloušťka horní krycí vrstvy 30 mm; dolní 25 mm. Samotné tělo izolačního dílce bylo vyplněno protipožární pěnou PROMAFOAM®-C.



obr. 89: Výkres tvaru vzorku na požární zkoušku s vyznačenou polohou termočlánků (červeně)

Zkouška požární odolnosti byla provedena dle [34] ve vodorovné zkušební peci. Vzorky byly do pece osazeny jako konzola (vetknutí zajištěno na části vzorku mimo pec) s vyložení 1 580 mm. Boční strany byly ponechány volné a neomezující průhyb zatížené konstrukce.

Při zkoušce byly testované izolační dílce i-KORB zatíženy vlastní hmotností betonového prvku, ostatním plošným stálým zatížením 50 kg/m^2 (včetně spádové vrstvy z jemnozrnného betonu), zábradlím a nahodilým zatížením (v souladu s [38] uvážena častá kombinační hodnota zatížení pro stavby kategorie A a B). Zkušební zatížení aplikované na konci konzoly balkonu 163 kg/m bylo zajištěno ocelovým závažím. Celkové působící zatížení odpovídalo ohybovému momentu $9,6 \text{ kNm}$ v místě vetknutí. Zatížení bylo vneseno do vzorků 30 minut před zkouškou a po celou dobu zkoušky zůstalo konstantní.



obr. 90: Osazení vzorků v peci – průběh instalace

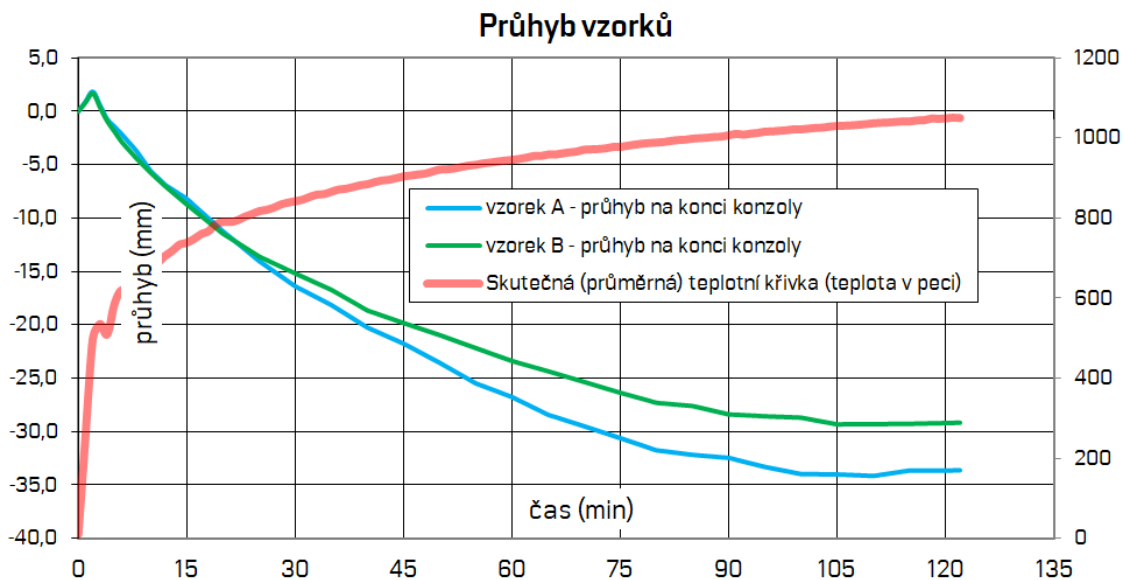


obr. 91: Vzorky v peci v průběhu požární zkoušky

Vzorek byl vystaven požárnímu zatížení odpovídající normové požární křivce dle ISO 834-1 [39]. V průběhu zkoušky byla snímána teplota uvnitř prostoru pece, teplota uvnitř vzorků a také průhyb konzoly. Jako kritérium porušení byla sledována doba, po kterou si zkušební prvek zachovával svou schopnost přenášet působící zatížení. Dle [34] se za porušení nosnosti považuje překročení mezního průhybu, případně mezní rychlosti průhybu. Limitních kritérií dle [34] ani kolapsu vzorku nebylo dosaženo po celou dobu experimentu, tj. po 122 minut – viz uvedené v tab. 22, která je převzata ze zprávy [88]. Měřený průhyb v závislosti na čase zkoušky a teplotě v peci je zřejmý z obr. 92.

tab. 22: Požární zkouška PAVUS, vyhodnocení; převzato z [88]

Kritérium	Jev	Naměřená hodnota	Hodnocení kritéria
Nosnost	Mezní průhyb	122 minut, bez dosažení	122 minut
	Mezní rychlost průhybu	122 minut, bez dosažení	122 minut



obr. 92: Změna měřené deformace na konci konzoly v průběhu požární zkoušky, [88]



obr. 93: Vzorky den po zkoušce: vlevo spára bez vnějšího zásahu; vpravo po odstranění izolace

Vzorky po expozici požárnímu zatížení jsou patrné z obr. 93. Po odstranění požární izolace jsou viditelné stále celistvé výztužné pruty. Požární zkouška byla zcela úspěšná. Prokázala velmi dobré chování vyvinutého tepelněizolačního dílce při působení požárního zatížení. Byla dosažena požární odolnost vzorku R120 minut [88].

Je třeba též uvést, že výše popsaná zkouška byla v České Republice jako první realizována dle zkušební normy ČSN EN 1365-5:2005 [34].

5.3.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. byl v rámci výzkumu a vývoje moderních kompozitních materiálů realizován vývoj zcela unikátního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, jenž je vyroben plně z kompozitních materiálů. Obdobné technické řešení nebylo při zahájení vývoje na trhu dostupné a tato situace platí i nyní, při jeho ukončení (viz uvedené v 5.3.1). Dílec je dnes finalizován a připraven pro výrobu. Teoretické řešení bylo v roce 2016 patentováno (CZ 305718; [61]).

V průběhu pěti let vývoje byl realizován rozsáhlý experimentální program, který prokázal vhodnost a spolehlivost navrženého řešení. Byly realizovány nejen statické, ale především dlouhodobé, dynamické a požární zkoušky (podrobněji viz 5.3.3; rozsah je zřejmý např. z tab. 20). Tyto poukázaly na vysokou únosnost, odolnost a dostatečnou robustnost řešení. Jmenovitě je vhodné zmínit především dosaženou 120 minut požární odolnost plně kompozitního řešení dílce.

Je nutno poznamenat, že řada z dosažených výsledků je unikátní v mezinárodním měřítku a řada testů bylo v tomto rozsahu realizována v ČR poprvé. S ohledem na skutečnost, že vývoj dílce je v současnosti u konce, mohou být získané unikátní výsledky v nejbližší době publikovány.

5.4 Certifikované metodiky zkoušení

V návaznosti na řešení experimentální činnosti v oblasti vývoje a testování kompozitních materiálů a speciálních stavebních elementů bylo často nutno navrhnout unikátní zkušební postupy, resp. vhodně upravit stávající zahraniční. Zcela nezbytné bylo sjednotit zkušební postupy a lokalizovat je pro potřeby praxe v České republice. Řada testů byla v ČR realizována poprvé. V důsledku tak vznikly podklady pro dvě certifikované metodiky, které uvádění zkušební postupy pro testování těchto moderních materiálů.

5.4.1 Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek

Metodika [58] uvádí zkušební postupy pro testování základních krátkodobých mechanických charakteristik vnitřní kompozitní (FRP) výztuže a splétaných předpínacích lan. Její uplatnění je především v oblasti výzkumu a vývoje těchto progresivních materiálů. Slouží jako podklad pro odborníky a certifikační organizace pracující v dané oblasti. Metodika vychází z platných zahraničních podkladů, především normy ISO 10406-1:2015 [70], CSA S806-12 [32] a směrnice ACI 440.3R-12 [6] a též aktuálních vědeckých poznatků.

V metodice popsané postupy nejsou z celosvětového hlediska principiálně nové. Všechny však metodika lokalizuje do národních podmínek s ohledem na trhu dostupné výrobky a platné národní normy (především ČSN EN 1990 [37] a ČSN EN 1992-1-1 [40]) a vhodně doplňuje vlastními zkušenostmi z vývoje tohoto materiálu.

Cílem bylo sjednotit používané zkušební postupy (ve světě dostupné podklady obvykle uvádějí různé počty a konfigurace zkušebních vzorků a okrajových podmínek experimentů, také požadavky na měřicí aparaturu mohou být odlišné), poukázat na důležité aspekty a též případně identifikovat proměnné, které jsou z hlediska dosažení výsledku podstatné a je nutno dbát jejich dodržení. S ohledem na široký sortiment dostupných FRP výztuží je naprosto nezbytné, aby odborná veřejnost dokázala kriticky přistupovat k výrobcí uváděným mechanickým charakteristikám stanoveným často dle nekompatibilních zkušebních postupů. Metodika tyto rozdíly kvantifikuje a komentuje.

S přihlédnutím k lokalizaci metodiky v rámci České republiky je předpokládáno její využití jako doplňkového podkladu především k normě ISO 10406-1:2015 [70] při provádění zkoušek v souladu s přílohou D, normy ČSN EN 1990 [37] a též v rámci certifikace

a zavádění jednotlivých výrobků na trh. V současnosti je využívána na VUT v Brně a ve firmě PREFA KOMPOZITY, a.s. při vývoji a testování FRP materiálů.

5.4.2 Metodika stanovení únavových vlastností FRP výztuží

Metodika [56] je určena pro provádění zkoušek kompozitní výztuže pro betonové konstrukce pozemních a inženýrských staveb vystavené cyklickému zatížení, např. pojezdu vozidel. V metodice uvedené zkušební postupy umožňují stanovit únavové charakteristiky FRP výztuže, resp. kontaktu FRP výztuž/beton.

V části stanovení tahových únavových vlastností FRP výztuže metodika vychází z platných zahraničních podkladů, především normy ISO 10406-1:2015 [70] a JSCE-E 535-1995 [73] a též CSA S806-12 [32] a ACI 440.3R-12 [6]. Uvádí dvě alternativní konfigurace testu – Varianta A s „holými“ výztužemi upnutými do ocelových kotevních koncovek; Varianta B se zabetonovanými pruty pro simulaci reálného působení vzorku v betonu a eliminaci negativního vlivu tuhých ocelových kotevních koncovek na stanovenou únavovou životnost. Oba uvedené postupy lokalizuje s ohledem na dostupné výrobky a platné národní normy a též doplňuje vlastními zkušenostmi.

V části únavových zkoušek soudržnosti metodika popisuje zcela nový zkušební postup. Tento typ zkoušky není doposud ve světě standardizován a neexistují tak závazná doporučení. Konfigurace únavového testu soudržnosti vychází z monotónní nosíkové zkoušky soudržnosti ocelové výztuže dle RILEM a přihlíží k aktuálním světovým poznatkům. S přihlédnutím k vlastním zkušenostem autorů z dlouholetého vývoje kompozitní výztuže navrhuje zcela novou konfiguraci zkoušky.

Uplatnění metodiky zkoušení únavových vlastností FRP výztuže je cíleno především do oblasti výzkumu a vývoje, ale též i certifikace; v současnosti je využívána v rámci výzkumné činnosti na VUT v Brně.

6 Diskuse dosažených výsledků a závěr

Práce uvádí původní výsledky autora, které se týkají v současné době velmi aktuálních oblastí návrhu betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží, jež byly stručně definovány v úvodní kapitole práce. Jedná se především o problematiku dlouhodobé spolehlivosti kompozitních materiálů a vlivu interakce tahové a posouvající síly na únosnost FRP výztuže. Tyto přímo ovlivňují spolehlivost návrhu a limitují využití tohoto moderního materiálu ve stavební praxi. V neposlední řadě text prezentuje poznatky z vývoje zcela unikátního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, který vznikl ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. a je chráněn patentem CZ305718 [61].

Cílem práce bylo též prezentovat získaná unikátní data a závěry k dlouhodobé spolehlivosti FRP materiálů, jejich chování při kombinovaném namáhání normálovou/osovou a posouvající silou a představit navržené, v mnoha případech jedinečné, experimenty a řešení. Z pohledu autora je též zásadní, ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. dosažené, podstatné zvýšení charakteristik (krátkodobých i dlouhodobých) v ČR vyvinuté i vyráběné GFRP výztuže PREFA Rebar [96].

Poznatky získané z realizovaných výzkumných činností jsou v textu prezentovány pouze stručně, dobře však ilustrují rozsah řešené problematiky. V textu uvedené údaje v kapitole 4 také umožňují nahlédnout do aktuálního stavu řešení této problematiky ve světě.

Problematika dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuže v betonových konstrukcích byla komplexně pojednána v odstavci 5.1. Byly představeny provedené experimenty i dosažené výsledky a provedena diskuse/srovnání s obdobnými výzkumy v zahraničí. Některé z navržených zkušebních postupů byly v ČR použity poprvé. Unikátní je též rozsah realizovaných zkoušek. V textu bylo poukázáno na konzervativnost určení dlouhodobé únosnosti GFRP výztuže, resp. stanovení dlouhodobě přípustného působícího zatížení, dle ACI 440.1R-15 [5]. Naopak využití nové generace podkladů CSA S806-12 [32] a *fib* Bulletin no.40 [46] se jeví jako vhodné a již nevede k významnému podhodnocení potenciálu moderních FRP výztuží. Experimenty také poukázaly na mírně nižší charakteristiky výztuží domácí produkce (ve srovnání se špičkovými světovými produkty) a vytyčily směr pro další vývoj produktu.

Problematika interakce normálové/osové a posouvající síly na únosnost FRP výztuže a především sestavení obálky porušení není v zahraniční odborné literatuře dostatečně

popsána (viz uvedené v odstavci 4.3). Neexistují relevantní zkušební postupy. Bylo tak nutno navrhnout jedinečný experiment a to včetně zkušebního zařízení a metodologie zkoušky. Provedený rozsáhlý experiment zahrnující vzorky GFRP výztuží tří průměrů od dvou výrobců poskytl robustní databázi výsledků pro popis závislosti působící normálové a posouvající síly a v důsledku umožnil sestavit obálku porušení. Bylo zjištěno, že stávající teoretický přístup dle *fib* Bulletin no.40 [46], jenž je založen na teoriích odvozených pro plošné lamináty, nemusí vést ke konzervativním výsledkům (podrobněji viz 5.2). Zásadní je též pozorovaný vliv poměru tahové a smykové únosnosti FRP výztuže (T/S) na sledované charakteristiky. Tuto skutečnost bude vhodné dále ověřit; jedná se o zcela unikátní poznatky.

V textu odstavce 5.3 byl stručně popsán vývoj systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, který byl navržen a realizován jako celokompozitní. Autorovi této práce není známo obdobné technické řešení dostupné na trhu. V průběhu jeho vývoje byl realizován rozsáhlý experimentální program, který zahrnoval krátkodobé statické a především dlouhodobé, dynamické a požární testy. Výsledky prokázaly vhodnost a odolnost navrženého řešení (např. dosažená požární odolnost R120 je pro kompozitní materiály zcela unikátní). Výsledný produkt je v současnosti implementován do výrobního portfolia firmy PREFA KOMPOZITY, a.s.

Lze konstatovat, že definované cíle práce byly naplněny. V textu uvedené výsledky byly průběžně publikovány na mezinárodních konferencích i časopisech. Nejvýznamnější publikační výstupy týkající se řešené problematiky byly průběžně citovány.

Klíčové přínosy autora práce v řešených oblastech lze sumarizovat do následujících bodů:

- kvantifikace vlivu jednotlivých činitelů negativně ovlivňujících dlouhodobou únosnost GFRP výztuže a související provedení rozsáhlého dlouhodobého experimentálního programu, kdy zjištěné skutečnosti významně přispěly k vývoji nové generace GFRP výztuže PREFA Rebar [96];
- návrh unikátního experimentu pro ověření kombinovaného působení normálové/osové a posouvající síly a to včetně návrhu zkušebního zařízení a metodologie zkoušky;
- experimentální ověření interakce normálové a posouvající síly při jejich souběžném působení na prutovou FRP výztuž, tj. vliv odklonu výslednice od osy prutu na jeho

únosnost, a související diskuse nad výstižností predikce dle [46], kdy uvedený vztah nemusí vést ke konzervativním výsledkům. Sestavení obálky porušení;

- návrh a realizace unikátního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, jenž je vyroben plně z kompozitních materiálů (patent CZ 305718) a to včetně rozsáhlého experimentálního ověření;
- vytvoření dvojice certifikovaných metodik, které se zabývají testováním kompozitních materiálů.

Náměty pro další rozvoj v oblasti řešené problematiky

S ohledem na ve světě aktuální stav řešené problematiky diskutované v této práci autor spatřuje následující perspektivní oblasti pro další rozvoj:

- z hlediska dlouhodobé spolehlivosti konstrukcí vyztužených FRP výztuží bude vhodné se dále zaměřit na popis chování kontaktu mezi FRP výztuží a betonem a stanovení vlivu degradace/creepu na pokles mezního napětí v soudržnosti. Tato oblast není doposud uspokojivě popsána a to především při zohlednění souběžného účinku působícího napětí, teploty a degradačního prostředí;
- návrh a realizace vhodných dlouhodobých zkoušek FRP výztuží/prvků v tlaku a smyku, neboť zde je ve světové literatuře dostupných velmi málo relevantních údajů. Významnou roli při tomto typu namáhání hrají vlastnosti matrice. Není tedy možné vycházet z teoreticky odvozených predikcí založených na tahových zkouškách, jež jsou dominantně řízeny vlastnostmi vláken;
- doposud obdržené výsledky v oblasti kombinovaného účinku normálové/osové a posouvající síly naznačují při popisu chování nutnost uvážit odlišný poměr tahové a smykové únosnosti vzorků (T/S). Této problematice bude vhodné se dále věnovat a výsledky potvrdit též pro výztuže s významně vyšší (než doposud testovanou) hodnotou poměru T/S – především CFRP výztuž. Tato je velmi často využívána pro předpínání a správné stanovení mezní únosnosti při souběžném namáhání osové a posouvající síly je tak velmi významné s ohledem na bezpečnost návrhu.

Na problematiku kombinovaného účinku normálového a smykového namáhání na únosnost FRP kompozitu velmi úzce navazuje řešení nepřímých/tvarově komplikovaných FRP výztuží. V současnosti je technologie výroby přímých výztužných prutů pultruzí již dobře zvládnuta,

kdy jsou v závislosti na typu kompozitu dosahovány velmi vysoké tahové pevnosti (v ČR i celosvětově). Jako klíčové se však ukazuje omezení s ohledem na vyztužování tvarově komplikovaných dílců či konstrukčních částí, resp. řešení např. smykové výztuže ve formě trmínků, ohybů atd. S ohledem na technologii nelze běžně vyráběnou kompozitní výztuž na bázi termosetických matric po vytvrzení dále tvarovat. Výroba zakřivených prutů, jsou-li požadovány, probíhá ve výrobě před finálním vytvrzením kompozitu. Ve stávajícím stavu jde o velmi obtížnou, neefektivní a v důsledku značně nákladnou kusovou výrobu. Ohyby nelze provádět (a ani dodatečně upravovat) přímo na stavbě.

V oblasti ohybu výztuže jsou, díky technologiím výroby a zároveň i souběžnému působení tahu, příčného a podélného smyku, dosahovány významně nižší mechanické charakteristiky než u přímých částí FRP výztuže. Tato oblast vývoje FRP materiálů se tak jeví jako vysoce perspektivní a to především s ohledem na maximalizaci potenciálu výztuže v oblasti ohybu (např. využitím termoplastických pryskyřic či optimalizací vedení vláken apod.) a též teoretické stanovení krátkodobé i dlouhodobé únosnosti tohoto detailu.

Dané téma je předmětem aktuálního projektu FW01010520, na jehož řešení se autor podílí jako klíčový člen týmu.

7 Seznam použité literatury

- [1] A. Nanni: Bond of FRP reinforcement to concrete - Experimental results, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1995
- [2] A. Puck: Calculating the strength of Glass fibre/Plastics laminates under combined load, 1969
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete, Second Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018, pp. 121, ISBN 978-1-56051-717-7
- [4] Abdul-Salam, B.; Farghaly, A., S.; Benmokrane, B.: Mechanism of shear resistance of one-way concrete slabs reinforced with FRP bars; J. Construction and Building Materials; 2016; 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.015
- [5] ACI 440.1R-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, American Concrete Institute (ACI), 2015, Farmington Hills, Mich.
- [6] ACI 440.3R-12, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI). 2012, Farmington Hills, Mich., ISBN: 978-0-87031-781-1
- [7] ACI 440.3R-4, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI). 2004, Farmington Hills, Mich., ISBN: 978-0-87031-781-1 (dnes neplatná)
- [8] Ahmed, E., A., El-Sayed, A., K., El-Salakawy, E.; Benmokrane, B.: Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods. Web of Science. 2015, 9. doi:10.1061/_x0001_ASCE_x0002_CC.1943-5614.0000050
- [9] Ali, A., Mohamed, H., Benmokrane, B., ElSafty, A., & Chaallal, O. (2019). Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 157, 248-258
- [10] Ali, H. A., Benmokrane, B., Mohamed, H., M., Manalo, A., ElSafty, A.: Statistical analysis and theoretical predictions of the tensile-strength retention of glass fiber-reinforced polymer bars based on resin type. *Journal of Composite Materials*. 2018;52(21):2929-2948. doi:10.1177/0021998318755866
- [11] Ali, H. A., Mohamed, H., M., Benmokrane, B., ElSafty, A.: Theory-based approaches and microstructural analysis to evaluate the service life-retention of stressed carbon fiber composite strands for concrete bridge applications, *Composites Part B: Engineering*, Volume 165, 2019, Pages 279-292, ISSN 1359-8368, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.083.
- [12] ASTM D4475-02 (2016), Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method, ASTM International, West Conshohocken, 2016

- [13] ASTM D4475-02, 2016. Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method: ASTM D4475-02. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International.
- [14] ASTM D695-15, Standard Test Method For Compressive Properties Of Rigid Plastics, ASTM International, West Conshohocken, 2015
- [15] ASTM D7078/D7078M-12, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method, ASTM International
- [16] ASTM D7205/D7205M-06, Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2011, ASTM International
- [17] ASTM D7337 / D7337M-12(2019), Standard Test Method for Tensile Creep Rupture of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019
- [18] ASTM D7617/D7617M-11 (2017), Standard Test Method for Transverse Shear Strength of Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2011, ASTM International
- [19] ASTM D7913/D7913M-14, Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing, 2014, ASTM International
- [20] Bakis, C., E., Freimanis, A., J., Gremel, D., Nanni, A.: "Effect of Resin Material on Bond and Tensile Properties of Unconditioned and Conditioned FRP Reinforcement Rods", First international conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction, 525–535, 1998
- [21] Bank, L. C.: Composites for construction: Structural design with FRP materials, 2006, New Jersey, USA, ISBN 978-0471-68126-7
- [22] Bank, L.C., Gentry, T. R., Thompson, B. P., Russell, J.S.: A model specification for FRP composites for civil engineering structures, Construction and Building Materials, Volume 17, Issues 6–7, 2003, Pages 405-437, ISSN 0950-0618, doi: 10.1016/S0950-0618(03)00041-2.
- [23] Benmokrane, B., Ali, H. A., Mohamed, H., M., Robert, M., ElSafty, A.: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, 2016, Journal of Composites for Construction, Volume 20, Issue 1, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000606
- [24] Benmokrane, B., Brown, V., Mohamed, K., Nanni, A., Rossini, M., Shield, C.: Creep-Rupture Limit for GFRP Bars Subjected to Sustained Loads, Journal of Composites for Construction, 23 (6) doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000971, 2019
- [25] Benmokrane, B., Hassan, M., Robert, M., Vijay, P. V., Manalo, A: Effect of Different Constituent Fiber, Resin, and Sizing Combinations on Alkaline Resistance of Basalt,

- Carbon, and Glass FRP Bars, 2020, Journal of Composites for Construction, Volume 24, Issue 3, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001009
- [26] Benmokrane, B., Mohamed, H. M.: Durability Issues of FRP for Civil Infrastructure, 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS11). Guimaraes2013. 2013. p. 1-14
- [27] Benmokrane, B., Elgabbas, F., Ahmed, E., and Cousin, P.: Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars, J. Compos. Constr., 19 (6)
- [28] Benmokrane, B., Ali, A.H.: Review and assessment of various theories for modeling durability of GFRP reinforcement for concrete structures, Advances in Engineering Materials; Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications (ed. Zingoni), 2019, Cape Town, South Africa, ISBN 978-1-138-38696-9
- [29] Benmokrane, B.; Wang, P.; Ton-That, T., M.; Rahman, H.; Robert, J., F.: Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment; J. Compos. Constr., 6 (2), 2002
- [30] CERONI, Francesca, Edoardo COSENZA, Manfredi GAETANO a Marisa PECCE. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, Cement and Concrete Composites, 2006, 28(10): 857-868.
- [31] CSA S6-14 – Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association (CSA), 2014
- [32] CSA S806-12 – Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association (CSA), 2012
- [33] CSA S807-19 - Specification for fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association (CSA), 2019, ISBN: 978-1-55491-394-7
- [34] ČSN EN 1365-5:2005 Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 5: Balkony a rampy
- [35] ČSN EN 14649 (72 3412) Betonové prefabrikáty - Zkušební metoda pro určení stálosti pevnosti skleněných vláken v cementu a betonu (Zkouška SIC).
- [36] ČSN EN 15422 (72 3413) Betonové prefabrikáty - Specifikace skleněných vláken pro výztuž malt a betonů
- [37] ČSN EN 1990 ed.2 (73 0002) Zásady navrhování konstrukcí, 2015
- [38] ČSN EN 1991-1-1 (730035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb
- [39] ČSN EN 1991-1-2 (730035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru
- [40] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (73 1201) Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2019

- [41] ČSN EN 206+A1 Beton – specifikace, vlastnosti, výroba, shoda. Praha: ÚNMZ, 2018
- [42] Davalos, J., F., Chen, Y., Ray, I.: Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment. *Journal of Composite Materials*, 2012; 46(16):1899-1914. doi:10.1177/0021998311427777
- [43] Dejke, V.: Durability of FRP reinforcement in concrete, Ph.D. thesis, Dept. of Building Material, Chalmers Univ. of Technology, 2001, Sweden, 205.
- [44] Design Manual No. 3: Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers. Winnipeg: ISIS Canada, 2006. 150 s.
- [45] ElSafty, A., Ali, A., Mohamed, H., Khalaf, O., Rizkalla, S., Benmokrane, B.: Degradation Mechanisms and Service Life Estimation of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Concrete Reinforcements, Materials Research Report, Jacksonville, Florida, USA, 2019
- [46] *fib* Bulletin no. 40, “FRP reinforcement in RC structures”, International federation for structural concrete, 2007, Lausanne, Switzerland, ISBN 978-2-88394-080-2
- [47] *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete, 2013, Lausanne, Switzerland, ISBN 978-3-433-03061-5
- [48] Gay, D., Hoa, S.V. and Tsai, S. W. (2002). *Composite Materials. Design and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 552 p., ISBN 9780429134968
- [49] Giannopoulos, I. P., Burgoyne, C. J.: Stress limits for aramid fibres; *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*; 221-232, 162 (4), doi: 10.1680/stbu.2009.162.4.221, 2009
- [50] Gilbert, D., Mirza, A., Li, X., Rasekh, H., Aziz, N., Nemcik, J.: Strength Properties of Fibre Glass Dowels Used for Strata Reinforcement in Coal Mines, 15th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy and Mine Managers Association of Australia, 2015, 365-375.
- [51] Girgle, F. a kol.: Navrhování betonových prvků vyztužených kompozitní výztuží – návrh na ohyb, *Beton TKS*, 2017, roč. 17, č. 3, s. 54-59. ISSN: 1213-3116.
- [52] Girgle, F. a kol.: Dlouhodobé vlastnosti kompozitní výztuže při aplikaci v betonových konstrukcích. *Beton TKS*, 2019, roč. 2019, č. 2, s. 38-45. ISSN: 1213-3116.
- [53] Girgle, F. a kol.: Kompozitní výztuž do betonu - perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce. *Beton TKS*, 2017, roč. 17, č. 2, s. 50-55. ISSN: 1213-3116.
- [54] Girgle, F., Bodnářová, L., Januš, O., Kostiha, V.: Influence of Alkalinity and Ambient Temperature on Long-Term Properties of GFRP Reinforcement. *Key Engineering Materials*, 760, 213–218, 2018; doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.760.213

- [55] Girgle, F.; Bodnárová, L.; Kučerová, A.; Janák, P.; Prokeš, J.: Experimental Verification of Behavior of Glass and Carbon Fibers in Alkali Environment; Key Engineering Materials Vol. 677 (2016) pp 43-48
- [56] Girgle, F.; Kostiha, V.; Januš, O.; Štěpánek, P.; Prokeš, J.: Metodika stanovení únavových vlastností FRP výztuží; certifikovaná metodika; VUT v Brně, 2020
- [57] Girgle, F.; Kostiha, V.; Januš, O.; Šulák, P.; Švaříčková, I.; Štěpánek, P. Experimentální stanovení únosnosti GFRP výztuže při souběžném namáhání tahovou a smykovou silou, Zborník příspěvků z 11. seminára SANÁCIA BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ. 1, Bratislava, 2019. s. 89-94. ISBN: 978-80-227-4973-2.
- [58] Girgle, F.; Kostiha, V.; Matušíková, A.; Štěpánek, P.: Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek; certifikovaná metodika; VUT v Brně, 2016
- [59] Girgle, F.; Štěpánek, P. An anchoring element for prestressed FRP reinforcement: simplified design of the anchoring area. In »Materials and Structures«, 2016. 49(4). p. 1337 - 1350. DOI: 10.1617/s11527-015-0580-z. ISSN 1359-5997
- [60] Girgle, F.; Štěpánek, P.: Výzkumná zpráva MPO OPPIK CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0005058: Kompozitní i-KORB - Návrh prvku a parametrická studie; VUT v Brně, Fakulta stavební; 06/2017
- [61] Girgle, F.; Štěpánek, P.; Prokeš, J.; VUT v Brně PREFA Kompozity a.s.: Sestava prvků pro kotvení. 305718, patent. (2016)
- [62] GOST 31938-2012 - Fiber-reinforced polymer bar for concrete reinforcement. General specifications, 2014
- [63] Huang J, Aboutaha R. Environmental reduction factors for GFRP bars used as concrete reinforcement: new scientific approach. Journal of Composites for Construction, 2010; 14(5):479–86, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000122
- [64] Chambers, J. J., Burgoyne, C. J.: An experimental investigation of the stress-rupture behavior of parallel-lay aramid rope, Journal of Material Science 25, 3723-3730, 1990
- [65] Chen Y. „Accelerated aging tests and long-term prediction models for durability of FRP bars in concrete“ (2007) Ph.D. thesis, West Virginia Univ., West Virginia
- [66] Chen, Y., Davalos, J. F.; Ray, I.: Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests, Journal of Composites for Construction, 10. 279-286, 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279), 2006
- [67] Chen, Y., Davalos, J. F.; Ray, I.; Kim, H.: Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, Composite Structures, 78. 101-111, 10.1016/j.compstruct.2005.08.015., 2005
- [68] Imjai, T., Guadagnini, M., Pilakoutas, K., Garcia, R., Sukontasukkul, P., & Limkatanyu, S. (2020). A practical macro-mechanical model for the bend capacity of

- fibre-reinforced polymer bars. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 1–28. doi:10.1680/jstbu.19.00135
- [69] Imjai, T.; Garcia, R.; Guadagnini, M.; Pilakoutas, K. Strength Degradation in Curved Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars Used as Concrete Reinforcement. *Polymers* 2020, 12, 1653. <https://doi.org/10.3390/polym12081653>
- [70] ISO 10406-1:2015, Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete -- Test methods -- Part 1: FRP bars and grids; 2015; Geneva, Switzerland
- [71] Januš, O.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Štěpánek, P. Effect of Surface Treatment and Test Configuration on Bond Behaviour of GFRP Rebars. Paris: Composites in Civil Engineering, 2018. s. 905-914.
- [72] Januš, O.; Girgle, F.; Kostiha, V.; Štěpánek, P.; Šulák, P.; Mansour, M. Vliv povrchové úpravy a zkušební konfigurace na soudržnost vnitřní GFRP výztuže. *Beton TKS*, 2018, roč. 18, č. 3, s. 51-57. ISSN: 1213-3116.
- [73] JSCE (Japan Society of Civil Engineers): Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series No. 23, 325 pp.; 1997
- [74] JU, M., OH, H.: Experimental Assessment on the Flexural Bonding Performance of Concrete Beam with GFRP Reinforcing Bar under Repeated Loading. *International Journal of Polymer Science*. 2015, 2015(1), 1-11. <https://doi.org/10.1155/2015/36752>
- [75] Juette, B., Weber, A., Witt, C.: Long-term Bond Behaviour of GFRP Rebar in Severe Environments, Proceedings of the Fourth International Conference (CDCC-11) Québec (Québec) Canada, July 20-22, 2011
- [76] Karbhari, V. M. (Ed.). Durability of composites for civil structural applications, Elsevier, 2007, ISBN 978-0-8493-9109-5
- [77] KOSTIHA, V.; GIRGLE, F.; MATUŠÍKOVÁ, A.; DANĚK, P.; ŠTĚPÁNEK, P. Stanovení smykové únosnosti kompozitní výztuže. In 23. Betonářské dny (2016) Sborník. Litomyšl: 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-906097-6- 1.
- [78] Litherland, KL., Oakley, DR., and Proctor, BA., “The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites”, *Cement and Concrete Research*, 1981, v 11, pp. 455–466.
- [79] Manalo, A., Maranan, G., Benmokrane, B., Cousin, P., Alajarmeh, O., Ferdous, W., Liang, R., Hota, G.; Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments, *Cement and Concrete Composites*, 2020, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103564>.
- [80] Matta, F.; El-Sayed, A.; Nanni, A.; Benmokrane, B.: Size Effect on Concrete Shear Strength in Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*. 2013, 110. 617-628.

- [81] Micelli, F., & Nanni, A.: Durability of FRP rods for concrete structures, *Construction and Building Materials*, 18(7), 2004; 491-503; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012
- [82] Mohamed, K., Benmokrane, B., Nazair, C., Loranger, M.; Development and Validation of a Testing Procedure for Determining Tensile Strength of Bent GFRP Reinforcing Bars; 2021; *Journal of Composites for Construction*; Volume 25; Issue 2; doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001102
- [83] Mohamed, N., Farghaly, A., S., Benmokrane. B.: Beam-Testing Method for Assessment of Bond Performance of FRP Bars in Concrete under Tension–Compression Reversed Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*. 2016, **21**(1), 1-6. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000687. ISSN 1090-0268
- [84] Mufti, A., Onofrei, M., Benmokrane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J. P., Bakht, B., Tadros, G. S., Brett, P.: Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete, 2007, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 355-366, Volume 3, Issue 3, doi: 10.1139/106-138
- [85] Park S. Y., Naaman A. E.: Shear behaviour of concrete beams prestressed with FRP tendons. *Prestress Concr Inst J* 1999;44(1):74–85.
- [86] Park S. Y., Naaman A. E.: Shear behaviour of concrete beams prestressed with FRP tendons. *Prestress Concr Inst J* 1999;44(1):74–85.
- [87] Park, Y. „Long-term performance of GFRP reinforced concrete beams and bars subjected to aggressive environments“, Ph.D. Thesis, The University of Texas at Arlington, USA, 2012
- [88] PAVUS, a.s.; Protokol o zkoušce požární odolnosti č.Pr-19-2.049: Vodorovná nosná konstrukce - balkon s tepelně izolačním dílcem i-KORB; 2019-04-15
- [89] Podklady Bronze s.r.o.; dostupné na adrese http://www.bronze.cz/termoizolacni-nosnik_tip-mq.html
- [90] Podklady společnosti Halfen: dostupné na adrese <https://www.halfen.com/cz/2084/product-ranges/stavba/vyztuze/hit-balkonove-a-izolacni-nosniky/uvod/>
- [91] Podklady společnosti Schöck Bauteile GmbH; výrobek Schöck Isokorb, dostupné na adrese <https://www.schoeck.com/cs/isokorb-t>
- [92] Podklady společnosti Schöck Bauteile GmbH; výrobek Schöck Isokorb CXT, dostupné na adrese <https://www.schoeck.com/cs/isokorb-cxt>
- [93] Podklady výrobce Construction Fixing Systems Limited; UK; dostupné na adrese https://cfix.cz/pdf/CFix_AVI_Thermo_Korb.pdf
- [94] Podklady výrobce Locher Bewehrungen AG; dostupné na adrese https://www.locherbewehrungen.ch/de/web/bereiche/bausysteme/sortiment_1/isolan_kragplatten_daemmelement/isolan_kragplatten_daemmelement_1.html

- [95] Podklady výrobce Max Frank GmbH & Co. KG; dostupné na adrese <https://www.maxfrank.com/intl-en/products/reinforcement-technologies/04-thermal-break-balcony-connector-egcobox/>
- [96] Podklady výrobce PREFA KOMPOZITY, a.s., výztuž PREFA Rebar, dostupné na adrese https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog_kompozitni_vyztuze_cze_m.pdf
- [97] Podklady výrobce TEMA Klášterec nad Ohří s.r.o.; dostupné na adrese <https://www.temaklasterec.cz/nosnik-nil/>
- [98] Průběžná zpráva o řešení dílčího projektu TN01000056/05 ATiCoS za rok 2020 na pracovišti VUT, FAST za rok 2020, řešitel dílčí části prof. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.; dílčí část řešená na FAST UBZK – Task 3 (Girgle, Štěpánek, Laníková); 2020
- [99] Razaqpur, A.; Spadea, S.: Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups“; J. Compos. Constr., 10.1061/ (ASCE) CC.1943-5614.0000483, 2014
- [100] Renaud, C. M., Greenwood, M. E. „Effect of Glass Fibres and Environments on Long-Term Durability of GFRP Composites, Zpráva z laboratoří Owens Corning Composites, Belgie, Ohio
- [101] Robert, M., Benmokrane, B.: Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 6, 2010, Pages 461-467, ISSN 0958-9465; doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.02.010.
- [102] Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B.: Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete, 2009, Journal of Composites for Construction, Pages 66-73, Volume 13, Issue N 2, doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(66)
- [103] Robert, M.; Wang, P.; Cousin, P.; Benmokrane, B.: Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing of FRPs: Should there be any limitations?, J. Compos. Constr., 14 (4) (2010), pp. 361–367
- [104] S. W. Tsai, E.M. Wu: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, Journal of Composite Materials, 1971
- [105] S. W. Tsai: Strength Theories of Filamentary Structures, Fundamental Aspects of Fiber Reinforced Plastic Composites, 1968
- [106] Sasaki, I., Nishizaki, I., Tensile load relaxation of FRP cable system during long-term exposure tests, Proceedings CICE 2012, Rome, 2012
- [107] Scott, P.; Lees, J. M.: Effects of solution exposure on the combined axial-shear behaviour of unidirectional CFRP rods; Composites: Part A 2012; 43: 1599–1611
- [108] Scott, P.; Lees, J. M.: Effects of solution exposure on the combined axial-shear behaviour of unidirectional CFRP rods; Composites: Part A 2012; 43: 1599–1611
- [109] Seki, H., K. Sekijima, and Konno, T.: “Test method on creep of continuous fiber reinforcing materials.” In Vol. 2 of Proceedings of the 3rd International Symposium

- on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), 195–202. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1997
- [110] Serbescu, A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Mechanical Characterization of Basalt FRP Rebars and Long-Term Strength Predictive Model. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 19(2), doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000497
- [111] Schwartz, M. M.: *Composite materials*, Vol. I. a II., 1997, New Jersey, USA, ISBN 978-0070-55819-9
- [112] SKSI: MANUÁL na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií, 2015, 978-80-8076-117-2
- [113] Smutný, J.; Pazdera, L.; Janoščík, D.; Kropáček, P.: Zpráva k zakázce SR12957078L: Dynamické zkoušky segmentů se zabudovanými kompozitními prvky; 2019
- [114] Štefaňák, J.; Chalmovský, J.; Miča, L.; Girgle, F.; Štěpánek, P.; Pačes, P. Sanace skalních svahů - pasivní kompozitní prvky. Brno, Česká republika: Akademické nakladatelství CERM, 2019. 137 s. ISBN: 978-80-7623-015-6
- [115] Štěpánek, P., Girgle, F., Bodnárová, L., Kostiha, V., Januš, O., Filip, M., Prokeš, J., Bezděk, O.: Roční zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu TAČR TA04010881 v roce 2017, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 12/2017, řešitel: prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.,dr.h.c.; 2017
- [116] Štěpánek, P., Girgle, F., Bodnárová, L., Kučerová, A., Filip, M., Prokeš, J., Sedláček, O.: Roční zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu TAČR TA04010881 v roce 2014, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 12/2014, řešitel: prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.,dr.h.c.; 2014
- [117] Štěpánek, P., Girgle, F., Januš, O.: Zpráva z řešení projektu FV10505 na pracovišti VUT, FAST, UBZK za rok 2016, řešitel dílčí části prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.,dr.h.c.; 2016
- [118] Štěpánek, P., Girgle, F., Kostiha, V., Januš, O.: Zpráva z řešení projektu FV10505 na pracovišti VUT, FAST, UBZK za rok 2019, řešitel dílčí části prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.,dr.h.c.; 2019
- [119] Štěpánek, P.; Januš, O.; Girgle, F.; Bodnárová, L.; Kostiha, V.; Rozsypalová, I. Long term strength of internal GFRP reinforcement by alkaline, temperature and cyclic loading. In XIV International Conference on Building Pathology and Constructions Repair (CINPAR 2018), Florence, Italy, June 20-22, 2018. *Procedia Structural Integrity*. 2018. s. 12-19. ISSN: 2452-3216.
- [120] Tannous, F. E. 1998. Environmental effects on the mechanical properties of E-glass FRP rebars. *ACI Mater. J.*, 95(2), 87-100.
- [121] Technical Document CNR-DT 203/2006: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. Rome: ITA, 2007. 39 s.

- [122] Ueda, T., Y. Sato, Y. Kakuta, A. Imamura, and H. Kanematsu, Failure Criteria for FRP Rods Subjected to a Combination of Tensile and Shear Forces, in Non Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium, L. Tarwe, Editor. 1995: Ghent, Belgium.
- [123] Vrbka, J.: Mechanika kompozitů [online]. Brno: ÚMTMB FSI VUT v Brně, 94 s, 2008.
- [124] Wang, X., Wang, Z., Wu, Z., Cheng, F.: Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members, Construction and Building Materials, Volume 73, 2014, Pages 781-789, ISSN 0950-0618, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.104.
- [125] Webber A.: Durability and Bond Durability of Composite Rebars. R&D, Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden, Germany. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. (CICE 2008) Zurich, Switzerland, 2008
- [126] Weber, A., Jütte, B.: How to determine safe design values for FRP reinforcement in different exposure conditions?, CICE 2012 - 6th International Conference on FRP, Composites in Civil Engineering, 2012
- [127] Weber, A.: Coming European Standard for R/C Design EC2-Integration of FRP rebars; Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures SMAR 2015; ISBN 9783905594652
- [128] Weber, A.: Gaps between short term and long term design for internal FRP reinforcement; ACIC 2017, pp. 84-90
- [129] Yamaguchi T., Kato Y., Nishimura T. And Uomoto T. Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers. Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), 1997, 2, 179–186.
- [130] Youssef T., Time-dependent Behaviour of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars and FRP reinforced Concrete Beams under sustained load, PhD Thesis University of Sherbrooke, Canada 2010
- [131] Z. Hashin: Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, Journal of Applied Mechanics, 1980
- [132] Z. Wang, X.L. Zhao, G. Xian, G. Wu, R.K. Singh Raman, S. Al-Saadi, Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment, Construct. Build. Mater. 156 (2017) 985–1004.
- [133] Zhou, J., Chen, X., Chen, S.: “Effect of Different Environments on Bond Strength of Glass Fiber-Reinforced Polymer and Steel Reinforcing Bars”, KSCE Journal of Civil Engineering, 16(6), 994-1002, 2012

Příloha A

tab. A 1: Shrnutí výsledků tahových zkoušek degradované GFRP výztuže v alkalickém roztoku bez vlivu napětí (série I. GFRP-E-VE, II. GFRP-AR-VE, III. GFRP-E-EP a IV. GFRP^{NG})

Vzorek/testovaná série	Teplota alkalického roztoku [°C]	Degradace [dny]	Počet vzorků	střední tahová pevnost [MPa]	změna vůči ref. hodnotě [%]	směrodatná odchylka [MPa]	modul pružnosti - střední hodnota [GPa]	změna vůči ref. hodnotě [%]	směrodatná odchylka [GPa]
GFRP-E-VE	referenční	0,1	6	818,4	100,0	8,63	48,9	100,0	2,21
	20°C	42	6	707,5	86,5	70,83	50,1	102,4	0,46
		90	6	699,5	85,5	64,94	47,9	97,8	2,07
		180	6	653,6	79,9	54,23	48,5	99,1	1,48
		365	6	676,3	82,6	67,10	50,0	102,1	0,71
		650	6	662,1	80,9	35,74	49,7	101,5	0,71
	40°C	42	6	662,0	80,9	78,00	49,6	101,4	0,68
		90	6	660,1	80,7	71,01	48,6	99,3	1,92
		180	6	611,7	74,8	39,53	48,6	99,3	0,97
		365	6	634,9	77,6	69,06	49,4	101,0	0,77
		650	6	612,2	74,8	31,76	49,4	101,0	0,50
	60°C	42	6	678,4	82,9	84,51	49,5	101,2	2,02
		90	6	615,7	75,2	87,52	48,9	99,9	1,52
		180	6	601,0	73,4	60,57	49,3	100,8	0,63
		365	6	619,8	75,7	76,03	49,6	101,4	1,16
		650	6	590,4	72,1	42,79	50,3	102,8	1,09
GFRP-AR-VE	referenční	0,1	6	570,6	100,0	-	45,02	100,0	1,60
	20°C	42	6	501,3	87,9	6,63	44,05	97,9	1,49
		90	6	472,0	82,7	18,67	44,69	99,3	0,47
		180	6	424,9	74,5	5,64	44,56	99,0	0,67
		650	6	472,1	82,8	13,02	44,87	99,7	0,41
	40°C	42	6	467,4	81,9	6,70	43,05	95,6	2,10
		90	6	448,0	78,5	11,67	44,87	99,7	1,01
		180	6	444,4	77,9	13,29	44,67	99,2	1,15
		650	6	451,8	79,2	16,64	44,35	98,5	0,63
	60°C	42	6	457,5	80,2	26,15	43,61	96,9	1,41
		90	6	424,9	74,5	12,62	44,48	98,8	0,61
		180	6	384,4	67,4	10,26	43,69	97,0	0,87
		650	6	453,2	79,4	19,42	42,93	95,4	1,13
GFRP-E-EP	referenční	0,1	6	1081,1	100,0	15,06	49,23	100,0	0,28
	20°C	42	6	1060,6	98,1	31,44	48,91	99,3	0,35
		180	6	1022,9	94,6	31,99	49,74	101,0	0,53
	40°C	42	6	1048,7	97,0	25,43	49,05	99,6	0,25
		180	6	958,0	88,6	27,00	48,49	98,5	0,44
	60°C	42	6	951,9	88,1	20,11	48,02	97,5	0,51
180		6	794,9	73,5	51,82	45,98	93,4	0,77	
GFRP ^{NG}	referenční	42	6	1018,8	100,0	5,2	52,2	100	0,3
	20°C		6	1015,3	99,7	9,25	52,54	100,7	0,14
	40°C		6	1017,7	100,0	13,62	52,54	100,7	0,72
	60°C		6	987,5	96,9	39,05	52,52	100,6	0,52

tab. A 2: Shrnutí výsledků dlouhodobých tahových zkoušek bez vlivu degradačního prostředí - přehled testovaných vzorků (série I. GFRP-E-VE; creep)

	Typ výztuže	Označení vzorku	Působící zatížení [kN]			Působící zatížení [%]	Čas do porušení [h:mm]	Teplota prostředí [°C]
			začátek	konec	průměr			
1	GFRP-E (ECR vlákná, VE)	FRP A - GFRP-E10_04	47,3	46,6	47,0	74,6	2:50	19,7
2		FRP A - GFRP-E10_05	46,8	45,6	46,2	73,4	3:04	19,7
3		FRP A - GFRP-E10_06	47,0	45,0	46,0	73,1	2:20	19,7
4		FRP A - GFRP-E10_07	42,9	41,6	42,3	67,1	10:48	19,4
5		FRP A - GFRP-E10_08	42,5	41,8	42,2	66,9	11:50	19,4
6		FRP A - GFRP-E10_09	42,4	41,6	42,0	66,7	13:53	19,4
7		FRP A - GFRP-E10_10	39,9	38,7	39,3	62,4	49:06	19,4
8		FRP A - GFRP-E10_11	39,6	38,5	39,1	62,0	46:51	19,4
9		FRP A - GFRP-E10_12	39,5	38,6	39,1	62,0	43:56	19,4
10		FRP B - GFRP-E10_13	37,4	36,3	36,9	65,6	3:57	19,5
11		FRP B - GFRP-E10_14	37,4	36,0	36,7	65,3	8:51	19,5
12		FRP B - GFRP-E10_15	37,4	35,9	36,7	65,3	8:32	19,5
13		FRP B - GFRP-E10_16	37,4	35,7	36,6	65,1	9:38	19,2
14		FRP B - GFRP-E10_17	37,3	35,8	36,6	65,1	12:18	19,2
15		FRP B - GFRP-E10_18	37,8	35,8	36,8	65,5	10:59	19,2
16		FRP B - GFRP-E10_19	37,3	36,1	36,7	65,3	8:02	18,6
17		FRP B - GFRP-E10_20	37,5	35,5	36,5	65,0	8:08	18,6
18		FRP B - GFRP-E10_21	37,3	35,4	36,4	64,7	8:18	18,6
19		FRP B - GFRP-E10_22	33,8	32,2	33,0	58,8	34:10	18,0
20		FRP B - GFRP-E10_23	33,7	32,2	33,0	58,7	59:11	18,0
21		FRP B - GFRP-E10_24 !	34,1	32,1	33,1	58,9	-	18,0
22		FRP B - GFRP-E10_25	31,1	30,0	30,6	54,4	141:13	18,0
23		FRP B - GFRP-E10_26	31,1	30,3	30,7	54,7	155:49	18,0
24		FRP B - GFRP-E10_27 !	31,0	28,6	29,8	53,1	-	18,0
25		FRP B - GFRP-E10_28	36,4	34,6	35,5	63,2	13:34	16,6
26		FRP B - GFRP-E10_29	36,6	34,6	35,6	63,4	24:24	16,6
27		FRP B - GFRP-E10_30	36,5	35,6	36,1	64,2	9:32	16,6
28		FRP A - GFRP-E10 2017_31	-	-	31,3	49,7	1418:02	21,6
29		FRP A - GFRP-E10 2017_32	-	-	39,4	62,6	60:20	10,7
30		FRP A - GFRP-E10 2017_33	-	-	39,3	62,4	37:24	10,7
31		FRP A - GFRP-E10 2017_34	-	-	28,1	45,0	-	
32		FRP A - GFRP-E10 2017_35	-	-	28,1	45,0	-	
33		FRP A - GFRP-E10 2017_36	-	-	28,1	45,0	-	

! vyřazeno z vyhodnocení z důvodu výrazně odlišného chování

Vzorky 34 až 36 sejmuty ze zařízení po 2160 hodinách (3 měsíce expozice) pro určení zbytkové únosnosti

tab. A 3: Dlouhodobé zkoušky s vlivem napětí, alkalického prostředí a teploty; vzorky GFRP-E-VE-
přehled testovaných vzorků

typ výztuže	teplota exp. [°C]	označení vzorku	skutečná teplota T		čas expozice t		působící síla [kN]	hladina zatížení Y [%]	
			[°C]	[K]	[hod]	ln t			
GFRP-E-VE; EC-R vlákná (R25H 2400; 80% hm.), VE pryskyřice	20	GFRP-E-EV-20-03	17,9	291,0	19,6	2,98	40,6	64,8	
		GFRP-E-EV-20-04	17,2	290,4	15,1	2,71	40,8	65,1	
		GFRP-E-EV-20-05	15,9	289,0	55,0	4,01	41,9	66,9	
		GFRP-E-EV-20-07	16,4	289,6	33,8	3,52	41,1	65,6	
		GFRP-E-EV-20-22	21,6	294,8	1418,0	7,26	27,9	49,7	
		GFRP-E-EV-20-30	-						
		GFRP-E-EV-20-34	-						
	40	GFRP-E-EV-40-06	37,8	311,0	9,5	2,25	41,0	65,4	
		GFRP-E-EV-40-08	28,3	301,4	0,6	-0,58	41,0	73,0	
		GFRP-E-EV-40-09	34,4	307,6	3,4	1,22	41,6	66,4	
		GFRP-E-EV-40-20	36,9	310,1	19,8	2,99	31,5	56,1	
		GFRP-E-EV-40-25	42,8	316,0	1142,9	7,04	28,2	45,0	
		GFRP-E-EV-40-27	41,7	314,9	0,4	-0,92	40,8	72,6	
		GFRP-E-EV-40-31	41,7	314,9	73,8	4,30	37,2	59,4	
		GFRP-E-EV-40-32	39,0	312,1	337,6	5,82	30,8	49,1	
		GFRP-E-EV-40-33	40,7	313,9	459,2	6,13	30,8	49,1	
		GFRP-E-EV-40-38	-						
	60	GFRP-E-EV-60-13	53,7	326,8	3,4	1,23	31,8	56,6	
		GFRP-E-EV-60-19	52,8	325,9	3,9	1,35	30,9	55,0	
		GFRP-E-EV-60-24	58,7	331,9	604,5	6,40	27,9	44,5	
		GFRP-E-EV-60-26	57,6	330,7	9,5	2,25	33,6	59,8	
		GFRP-E-EV-60-28	56,3	329,4	0,5	-0,73	41,1	73,2	
		GFRP-E-EV-60-29	59,7	332,9	0,6	-0,46	40,4	71,9	
		GFRP-E-EV-60-35	56,7	329,9	6,1	1,81	31,3	55,7	
		GFRP-E-EV-60-36	59,0	332,1	158,8	5,07	30,3	48,3	
		GFRP-E-EV-60-37	54,0	327,2	9,7	2,27	31,0	55,2	

tab. A 4: Zkoušky GFRP horninového svorníku – creep + degradace solným roztokem – přehled vzorků

typ vzorku (výrobce)	označení vzorku	mezí únosnost (ref)	působící zatížení [kN]	působící zatížení [%]	čas do kolapsu [hh:mm]	teplota prostředí [°C]
GFRP NaCl GFRP, vlákna E (R25H 2400, 80% hm), EP pryskyřice	1. GFRP NaCl_20-01	55,35 kN	38,5	70	3:43	20
	2. GFRP NaCl_20-02		38,6	70	48:19	20
	3. GFRP NaCl_60-01		38,6	70	0:07	60
	4. GFRP NaCl_60-02		38,1	69	0:04	60
	5. GFRP NaCl_60-03		38,1	69	0:05	60
	6. GFRP NaCl_20-03		38,7	70	15:54	20
	7. GFRP NaCl_60-04		33,2	60	0:15	60
	8. GFRP NaCl_60-05		33,1	60	0:12	60
	9. GFRP NaCl_60-06		33,3	60	0:33	60
	10. GFRP NaCl_20-04		33,3	60	39:17	20
	11. GFRP NaCl_20-05		34,1	62	91:57	20
	12. GFRP NaCl_20-06		33,5	61	77:45	20
	13. GFRP NaCl_60-07	704,70 MPa	27,4	50	1:19	60
	14. GFRP NaCl_60-08		27,3	49	1:21	60
	15. GFRP NaCl_20-07		27,8	50	1098:22	20
	16. GFRP NaCl_20-08		27,5	50	262:42	20
	17. GFRP NaCl_20-09		27,6	50	567:21	20
	18. GFRP NaCl_60-09		27,8	50	2:18	60
	19. GFRP NaCl_60-10		22,3	40	9:41	60
	20. GFRP NaCl_60-11		22,1	40	10:51	60
	21. GFRP NaCl_60-12		22,3	40	10:27	60
	22. GFRP NaCl_60-13		11,1	20	-	60
	23. GFRP NaCl_20-10		38,4	69	17:31	20
	24. GFRP NaCl_60-14		17,1	31	-	60

tab. A 5: Interakce normálové a smykové síly: GFRP výztuž PREFA ReBAR; průměr 10 mm - přehled vzorků

	Typ testu	Označení vzorku	N [kN]	N _{ult} [%]	V [kN]	Způsob porušení	
1	Čistý smyk (EXP 2) (spára 0,2 mm)	GFRPØ10.S.Va - 01	0,0	0	20,3	střih v jednom řezu + zub	
2		GFRPØ10.S.Va - 02			18,7	střih v jednom řezu + zub	
3		GFRPØ10.S.Va - 03			18,8	střih v jednom řezu + zub	
4		GFRPØ10.S.Va - 04			21,2	střih v jednom řezu + zub	
5	Čistý smyk (zkosení hran)	GFRPØ10.S.Vb - 01	0,0	0	19,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
6		GFRPØ10.S.Vb - 02			17,5	střih v jednom řezu + výrazný zub	
7		GFRPØ10.S.Vb - 03			21,1	střih v jednom řezu + výrazný zub	
8		GFRPØ10.S.Vb - 04			20,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
9	Kombinace tah + smyk (N+V) EXP 1	GFRPØ10.S.NV - X1	0,0	0	21,0	střih v jednom řezu + výrazný zub	
10		GFRPØ10.S.NV - X2			20,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
11		GFRPØ10.S.NV - X3			21,5	střih v jednom řezu + výrazný zub	
12		GFRPØ10.S.NV - X4			20,5	střih v jednom řezu + výrazný zub	
13		GFRPØ10.S.NV - X5			23,0	střih v jednom řezu + výrazný zub	
14		GFRPØ10.S.NV - X6			24,2	střih v jednom řezu + výrazný zub	
15		GFRPØ10.S.NV - 01	2,8	4	21,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
16		GFRPØ10.S.NV - 11	3,0	4	17,7	střih v jednom řezu + výrazný zub	
17		GFRPØ10.S.NV - 12	3,3	4	16,6	střih v jednom řezu + výrazný zub	
18		GFRPØ10.S.NV - 02	5,8	7	19,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
19		GFRPØ10.S.NV - 03	10,5	12	19,1	střih v jednom řezu + výrazný zub	
20		GFRPØ10.S.NV - 09	9,4	12	18,9	střih v jednom řezu + výrazný zub	
21		GFRPØ10.S.NV - 10	10,4	12	17,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
22		GFRPØ10.S.NV - 04	15,2	19	16,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
23		GFRPØ10.S.NV - 24	16,9	21	20,0 !	-	
24		GFRPØ10.S.NV - 05	25,2	31	14,2	střih v jednom řezu + výrazný zub	
25		GFRPØ10.S.NV - 06	25,3	31	16,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
26		GFRPØ10.S.NV - 08	26,0	31	14,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
27		GFRPØ10.S.NV - 07	44,8	56	15,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
28		GFRPØ10.S.NV - 15	55,6	69	14,6	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
29		GFRPØ10.S.NV - 16	55,4	69	10,4 !	-	
30		GFRPØ10.S.NV - 13	55,8	70	14,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
31		GFRPØ10.S.NV - 14	56,1	70	0,8 !	-	
32		GFRPØ10.S.NV - 19	55,7	70	12,7	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
33		GFRPØ10.S.NV - 17	59,4	74	11,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
34		GFRPØ10.S.NV - 18	59,8	75	13,0	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
35		GFRPØ10.S.NV - 20	59,9	75	13,3	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
36		GFRPØ10.S.NV - 21	61,1	76	13,0	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
37		GFRPØ10.S.NV - 22	63,5	79	11,6	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
38		GFRPØ10.S.NV - 23	63,8	80	10,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
39		Čistý tah EXP 3	GFRPØ10.S.T - 01	79,3	100	-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
40			GFRPØ10.S.T - 02	80,4		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
41			GFRPØ10.S.T - 03	80,1		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
42			GFRPØ10.S.T - 04	79,9		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
43			GFRPØ10.S.T - 05	80,3		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
44			GFRPØ10.S.T - 06	80,2		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu

! vyřazeno z vyhodnocení z důvodu výrazně odlišného chování

tab. A 6: Interakce normálové a smykové síly: GFRP výztuž PREFA ReBAR; průměr 14 mm - přehled vzorků

1	Typ testu		Označení vzorku	N [kN]	N _{ult} [%]	V [kN]	Způsob porušení
	Čistý smyk (EXP 2)	(spára 0,2 mm)					
2			GFRPØ14.S.Va - 01	0,0	0	27,6	střih v jednom řezu + zub
3			GFRPØ14.S.Va - 02			29,0	střih v jednom řezu + zub
4			GFRPØ14.S.Va - 03			27,7	střih v jednom řezu + zub
5			GFRPØ14.S.Va - 04			30,5	střih v jednom řezu + zub
6		(zkosení hran)	GFRPØ14.S.Vb - 01	0,0	0	32,2	střih v jednom řezu + výrazný zub
7			GFRPØ14.S.Vb - 02			34,1	střih v jednom řezu + výrazný zub
8			GFRPØ14.S.Vb - 03			31,7	střih v jednom řezu + výrazný zub
9			GFRPØ14.S.Vb - 04			35,4	střih v jednom řezu + výrazný zub
9		GFRPØ14.S.Vb - 05	31,9			střih v jednom řezu + výrazný zub	
10	Kombinace tah + smyk (N+V) EXP 1	GFRPØ14.S.NV - X1	0,0	0	36,3	střih v jednom řezu + výrazný zub	
11		GFRPØ14.S.NV - X2			36,1	střih v jednom řezu + výrazný zub	
12		GFRPØ14.S.NV - X3			40,3	střih v jednom řezu + výrazný zub	
13		GFRPØ14.S.NV - X4			39,7	střih v jednom řezu + výrazný zub	
14		GFRPØ14.S.NV - 11	4,3	3	33,1	střih v jednom řezu + výrazný zub	
15		GFRPØ14.S.NV - 12	5,4	4	32,7	střih v jednom řezu + výrazný zub	
16		GFRPØ14.S.NV - 10	8,1	6	32,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
17		GFRPØ14.S.NV - 09	16,7	12	25,6	střih v jednom řezu + výrazný zub	
18		GFRPØ14.S.NV - 08	32,4	24	25,0	střih v jednom řezu + výrazný zub	
19		GFRPØ14.S.NV - 01	45,1	34	24,2	střih v jednom řezu + výrazný zub	
20		GFRPØ14.S.NV - 03	46,0	34	22,8	střih v jednom řezu + výrazný zub	
21		GFRPØ14.S.NV - 02	46,4	35	24,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
22		GFRPØ14.S.NV - 06	57,8	43	25,4	střih v jednom řezu + výrazný zub	
23		GFRPØ14.S.NV - 05	59,4	44	23,5	střih v jednom řezu + výrazný zub	
24		GFRPØ14.S.NV - 04	60,0	45	-	porušení v kotevní koncovce	
25		GFRPØ14.S.NV - 07	60,3	45	24,2	střih v jednom řezu + výrazný zub	
26		GFRPØ14.S.NV - 18	73,2	55	16,8 !	-	
27		GFRPØ14.S.NV - 16	73,5	55	28,3 !	-	
28		GFRPØ14.S.NV - 17	74,3	55	23,1	střih + podélné trhliny v prutu (méně výrazné)	
29		GFRPØ14.S.NV - 19	74,8	56	22,8	střih + podélné trhliny v prutu (méně výrazné)	
30		GFRPØ14.S.NV - 21	78,0	58	22,2	střih + podélné trhliny v prutu (méně výrazné)	
31		GFRPØ14.S.NV - 22	79,2	59	23,5	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
32		GFRPØ14.S.NV - 20	80,5	60	-	porušení v kotevní koncovce	
33		GFRPØ14.S.NV - 23	81,0	60	27,5 !	-	
34		GFRPØ14.S.NV - 24	85,2	63	18,7	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
35		GFRPØ14.S.NV - 13	93,8	70	21,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu	
36		GFRPØ14.S.NV - 14	94,0	70	-	porušení v kotevní koncovce	
37	GFRPØ14.S.NV - 15	94,0	70	-	porušení v kotevní koncovce		
38	Čistý tah EXP 3	GFRPØ14.S.T - 01	79,3	100	-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	
39		GFRPØ14.S.T - 02	80,4		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	
40		GFRPØ14.S.T - 03	80,1		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	
41		GFRPØ14.S.T - 04	79,9		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	
42		GFRPØ14.S.T - 05	80,3		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	
43		GFRPØ14.S.T - 06	80,2		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu	

! vyřazeno z vyhodnocení z důvodu výrazně odlišného chování

tab. A 7: Interakce normálové a smykové síly: GFRP výztuž ComBAR; průměr 8 mm - přehled vzorků

	Typ testu	Označení vzorku	N [kN]	N _{ult} [%]	V [kN]	Způsob porušení
1	Čistý smyk (EXP 2)	GFRPØ8.R.V - 01	-	0	15,8	střih v jednom řezu + zub
2		GFRPØ8.R.V - 02	-		15,9	střih v jednom řezu + zub
3		GFRPØ8.R.V - 03	-		14,9	střih v jednom řezu + zub
4		GFRPØ8.R.V - 04	-		16,8	střih v jednom řezu + zub
5	Kombinace tah + smyk (N+V) EXP 1	GFRPØ8.R.NV - X1	0,0	0	15,0	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
6		GFRPØ8.R.NV - 09	5,0	7,3	13,4	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
7		GFRPØ8.R.NV - 10	8,4	12,3	13,3	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
8		GFRPØ8.R.NV - 21	11,7	17,1	13,2	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
9		GFRPØ8.R.NV - 22	15,5	22,6	11,6	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
10		GFRPØ8.R.NV - 15	19,6	28,5	12,0	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
11		GFRPØ8.R.NV - 13	19,7	28,7	9,2	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
12		GFRPØ8.R.NV - 18	19,7	28,7	10,5	střih s výraznou delaminací v místě vnášení síly
13		GFRPØ8.R.NV - 19	-	-	-	porušení při zatěžování v kotevní koncovce
14		GFRPØ8.R.NV - 14	19,7	28,7	9,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
15		GFRPØ8.R.NV - 11	38,6	56,3	9,7	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
16		GFRPØ8.R.NV - 17	39,0	56,8	9,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
17		GFRPØ8.R.NV - 16	39,1	57,0	9,0	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
18		GFRPØ8.R.NV - 20	50,7	74,0	8,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
19		GFRPØ8.R.NV - 12	62,0	90,5	6,8	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
20		GFRPØ8.R.NV - 01	62,5	91,1	5,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
21		GFRPØ8.R.NV - 03	62,5	91,1	5,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
22		GFRPØ8.R.NV - 02	62,7	91,4	5,9	střih s výrazným podélným porušením celého prutu
23	Čistý tah EXP 3	GFRPØ8.R.T - 01	70,7	100	-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
24		GFRPØ8.R.T - 02	68,8		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
25		GFRPØ8.R.T - 03	68,3		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu
26		GFRPØ8.R.T - 04	66,6		-	výrazná delaminace jednotlivých vrstev prutu

tab. A 8: Dlouhodobé zkoušky tlakových elementů tepelněizolačního dílce i-KORB: přehled vzorků

	Typ testu	Označení vzorku	Působící síla F_{fakt} [kN]	$F_{\text{fakt}}/F_{\text{ult}}$ $F_{\text{ult}}=174,9\text{kN}$ [%]	Délka zatěžování [h:mm:ss]	Způsob porušení/poznámka
1	EXP.LT1 Tlaková zkouška – dlouhodobá (vzorek 2:1; lis)	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.04	159,94	91!	-	Zborcení tkaniny a značná deformace dosedacích ploch
2		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.05	139,47	80!	-	Značná deformace tkaniny, podélné trhliny; značná otláčení čelních ploch
3		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.06	149,93	86	0:59:42	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
4		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.07	149,98	86	0:08:20	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
5		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.08	152,97	87!	-	Porušení tkaniny příčným tahem; značné otláčení čelních ploch
6		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.09	152,97	87	0:00:44	Porušení tkaniny příčným tahem; značné otláčení čelních ploch
7		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.10	149,97	86	0:44:25	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
8		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.11a	149,95	86	1:58:39	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
9		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.11b	153,04	88	0:02:24	Porušení tkaniny příčným tahem; značné otláčení čelních ploch
10		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.12	144,94	83	0:06:33	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
11		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.13	144,96	83	2:02:00	Porušení tkaniny a deformace dosedacích ploch
12	EXPLT2 (vzorek 2:1; houpačka)	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h01	102,6	59	1872:20:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
13		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h02	98,9	57	1063:22:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
14		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h03	108,1	62	1895:49:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
15		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h04	106,5	61	1894:07:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
16		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h05	107,9	62	1643:23:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
17		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h06	106,8	61	27:21:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
18		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h07	111,0	63!	-	Nepřesný/zkosený vzorek; porušení při zatěžování
19		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h08	100,4	57	2380:59:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
20		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h09	143,0	82!	-	Výrazná deformace/zkosení prvku a porušení při zatěžování
21		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h10	114,4	65!	-	Výrazná deformace/zkosení prvku a porušení při zatěžování
22		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h11	158,8	91!	-	Výrazná deformace/zkosení prvku a porušení při zatěžování
23		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h14	113,0	65	01:12:00	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny
24		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h17	100,8	58	> 622:00:0	Test přerušen z důvodu údržby zkušebního zařízení; vzorek se neporušil
18		GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h18	96,7	55!	-	Výrazná deformace/zkosení prvku a porušení při zatěžování
19	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h19	121,6	70	00:06:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny	
20	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h20	121,2	69!	-	Nestandardní zatěžování	
21	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h21	122,5	70	25:23:0	Výrazná deformace/zkosení prvku, porušení/otlačení tkaniny	
22	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h22	115,0	66!	-	Chyba záznamu	
23	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h23	103,2	59!	-	Chyba záznamu	
24	GFRP ϕ 30-LT-T+V14.h24	107,9	62!	-	Výrazná deformace/zkosení prvku a porušení při zatěžování	

! Vzorky, které se porušily během vnášení zatížení nebo bezprostředně po zatížení jsou z vyhodnocení vyřazeny

* uváděna síla při kolapsu vzorku