

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 703

ISSN 1213-418X

František Girgle

**SPECIFIKA VYUŽITÍ
KOMPOZITNÍCH VÝZTUŽÍ
V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav betonových a zděných konstrukcí

Ing. František Girgle, Ph.D.

SPECIFIKA VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH VÝZTUŽÍ V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH

SPECIFICS OF THE UTILIZATION OF COMPOSITE REINFORCEMENT
IN CONCRETE STRUCTURES

ZKRÁCENÁ VERSE HABILITAENÍ PRÁCE
OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2021

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, thermal insulation element, glass fibres, shear stress, carbon fibres, load tests, service life of a structure

Místo uložení

Originál práce je uložen v archivu Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veverí 331/95, 602 00 Brno

© František Girgle, 2021

ISBN 978-80-214-5992-2

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 DLOUHODOBÁ SPOLEHLIVOST KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE	6
2.1 Modely pro predikci dlouhodobého chování FRP výztuže.....	6
2.2 Experimentální ověření degradace vláken v alkalickém roztoku	8
2.3 Degradální zkoušky FRP výztuží bez vlivu krycí vrstvy betonu	9
2.4 Vliv konfigurace experimentu na výsledek – degradační zkoušky GFRP výztuže s vlivem krycí vrstvy betonu.....	18
2.5 Alternativní zkušební metody pro určení míry degradace FRP výztuže	19
2.6 Vliv alkalického prostředí na soudržnost FRP výztuže	20
3 VLIV INTERAKCE NORMÁLOVÉ A POSOUVAJÍCÍ SÍLY NA ÚNOSNOST FRP VÝZTUŽE.....	22
3.1 Teoretické stanovení únosnosti FRP výztuže při kombinovaném působení tahové a posouvající síly	23
3.2 Navržený Experimentální program	23
3.3 Chování GFRP výztuže při víceosém namáhání – výsledky a způsob porušení	25
3.4 Diskuse výsledků a porovnání s teoretickou predikcí dle [21]	27
4 VÝVOJ A APLIKACE SPECIÁLNÍCH PRVKŮ S VYUŽITÍM KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ – PRVEK PRO PŘERUŠENÍ TEPELNÉHO MOSTU V BETONOVÉ KONSTRUKCI	28
4.1 Teoretický koncept řešení a předpoklady pro návrh izolačního dílce i-KORB	28
4.2 Navržený experimentální program a klíčové výsledky.....	30
5 CERTIFIKOVANÉ METODIKY ZKOUŠENÍ.....	36
6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR	36
7 POUŽITÁ LITERATURA.....	37
ABSTRAKT.....	40
ABSTRACT.....	40

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: František Girgle

Datum a místo narození: 4. 3. 1983 v Boskovicích

Adresa zaměstnání:

Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně,
Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR
Telefon: 541 147 852
E-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- Ing. – 2007, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Pozemní stavitelství;
- Ph.D. – 2011, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby.

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

- 2007 – 2011 Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně, interní doktorand;
- 2008 – 2010 Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně, technik pro výzkum a vývoj, vědecký pracovník
- 2010 – 2012 Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně, asistent/odborný asistent;
- 2011 – dosud BESTEX, spol. s r.o., Křenová 42, 602 00 Brno, projektant - statik
- 2012 – 2015 Centrum AdMaS, Fakulta stavební VUT v Brně, postdoktorand výzkumného týmu
- 2015 – dosud Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně, odborný asistent;

Odborné a výzkumné zaměření:

Problematika návrhu odolných kompozitních a betonových konstrukcí vyztužených převážně vnitřní předpjatou i nepředpjatou kompozitní výztuží; nelineární modelování konstrukcí, statické a dynamické chování nosných konstrukcí staveb. Řešena je též oblast návrhu, optimalizace, realizace a provozování monitorovacích systémů staveb.

Výzkumné úkoly a projekty:

Od roku 2007 doposud člen/klíčový člen řešitelských kolektivů 14 národních výzkumných projektů a hlavní řešitel 4 interních projektů FAST VUT.

Pedagogická činnost:

Výuka v předmětech Prvky betonových konstrukcí, Betonové konstrukce (K), 1 a 2, Nosné konstrukce 1 (garant předmětu) a Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru (garant předmětu). Vedoucí 10-ti obhájených diplomových a 12-ti bakalářských prací. Od roku 2016 školitel specialista dvou doktorandů, z nichž jeden již úspěšně obhájil doktorskou práci.

Publikační činnost a tvůrčí činnost:

Autor či spoluautor více než 100 publikací, jedné monografie a jedné odborné příručky v oboru; spoluautor 1 patentu, 3 certifikovaných metodik, 2 užitných vzorů; 2 průmyslových vzorů; 35 funkčních vzorků; 7 ověřených technologií a 1 software.

1 ÚVOD

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 i širší uplatnění ve stavebnictví a to především jako náhrada ocelových válcovaných profilů, či jako materiály pro zesilování konstrukcí a zajišťování zemních těles. Významný rozvoj v posledních dekádách nastává v oblasti využití kompozitních materiálů jako vnitřní výztuže při vyztužování betonových konstrukcí realizovaných v agresivních podmínkách.

Práce je zaměřena vysoce aktuální oblasti vývoje, testování a návrhu vnitřní nekovové (FRP) výztuže určené pro vyztužování či zesilování betonových prvků, na jejímž vývoji a uvedení do české stavební praxe se autor od roku 2007 aktivně podílí. Zvyšující se využití těchto materiálů v praxi s sebou přináší potřebu normalizovat zkušební postupy, spolehlivě stanovit krátkodobé i dlouhodobé materiálové charakteristiky a především sestavit výstižné návrhové algoritmy.

Zatímco se základní (krátkodobý) návrh ohýbaných betonových prvků vyztužených FRP výztuží stává rutinní záležitostí, širšímu využití těchto materiálů v (nejen) české stavební praxi brání především omezená znalost jejich dlouhodobého chování. Problematický je též nedostatek zkušeností s provozem a údržbou konstrukcí, jež jsou z těchto materiálů budovány. Je již 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). Mechanismy degradace těchto materiálů a jejich chování v dlouhodobém časovém měřítku však nejsou ve všech aspektech zcela jasně popsány. Z nedostačené znalosti pak v důsledku pramení značný konzervatismus návrhových přístupů a nedůvěra praxe. Doposud není dostatečně řešena ani oblast testování a návrhu FRP výztuží při souběžném působení normálové a posouvající síly a vliv této interakce na snížení mechanických charakteristik kompozitu.

Výše uvedené skutečnosti byly motivací pro sepsání předkládané práce. Jejím cílem je odborné veřejnosti prezentovat aktuální poznatky a zásadní výsledky týkající se uvedených klíčových částí návrhu a testování betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží, které byly obdrženy při řešení řady výzkumných projektů. Tyto přímo ovlivňují spolehlivost návrhu a věrohodnost experimentálně získaných dat a v současnosti stále významně limitují využití tohoto moderního a perspektivního materiálu ve stavební praxi. Jedná se o oblasti:

- degradace FRP výztuže a vlivu vnějších podmínek na dlouhodobou únosnost a spolehlivost tohoto materiálu a to včetně řešení přístupu aktuálních návrhových podkladů ke stanovení dlouhodobé únosnosti. Diskutována je i problematika volby experimentu, typu zkoušky a vliv zvolené konfigurace na sledované materiálové charakteristiky. Získané poznatky jsou stručně prezentovány v kapitole 2 ;
- popisu 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 nepříliš probádanou oblast chování tyčového FRP kompozitu. Pro získání požadovaných mechanických charakteristik byl navržen vlastní unikátní zkušební postup – podrobněji je téma řešeno v kapitole 3 ;
- návrhu a využití FRP kompozitní výztuže ve speciálních aplikacích pozemních staveb. Jako příklad je v kapitole 4 uveden návrh, testování a implementace do výroby patentovaného prvku pro přerušení tepelného mostu v monolitické betonové konstrukci, který byl navržen zcela bez kovových částí. Nedílnou součástí byla realizace unikátních experimentů ověřujících spolehlivost nejslabšího článku prvku – tlačného celokompozitního ložiska.

2 DLOUHODOBÁ SPOLEHLIVOST KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE

V textu kapitoly jsou prezentovány výsledky získané v průběhu rozsáhlého experimentálního programu realizovaného mezi lety 2014 a 2019 při řešení projektů TA4010881 „*Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitných vlastností*“ [49] a FV10505 „*Inteligentní kompozitní kotevní prvek*“ [47], kdy byla provedena řada dlouhodobých degradačních testů výztuže vyvíjené společně s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s. Testovány byly stovky vzorků GFRP výztuží (resp. kompozitních horninových kotev) vyrobených z vinylesterové (VE) a epoxidové (EP) pryskyřice a E/ECR, resp. AR vláken (povrchová úprava opískováním, případně žebírky). Cílem 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 platných EN norem (především [18]);
- ověřit dlouhodobé chování/degradaci GFRP kompozitu (resp. jeho klíčové komponenty – vláken) pomocí teplotně urychlených testů při souběžném působení zatížení (urychlené zkoušky bez a s vlivem tahového napětí) a stanovit vliv krycí vrstvy betonu;
- kvantifikovat míru poškození kontaktu výztuže a okolního betonu při vystavení degradačnímu prostředí.

Kapitola pro omezený rozsah pouze velmi stručně zmiňuje poznatky ze zahraničních studií a dostupné modely pro predikci dlouhodobého chování. Tyto jsou uvedeny v plném textu práce. Následující text z nich cituje a využívá je při hodnocení vlastních dosažených výsledků.

2.1 MODELÝ PRO PREDIKCI DLOUHODOBÉHO CHOVÁNÍ FRP VÝZTUŽE

Pro bezpečný návrh FRP výztuže v betonových konstrukcích je zcela nezbytné korektně popsat její dlouhodobé chování. S ohledem na nutnost degradaci vyčíslit pro horizont životnosti konstrukce 50 – 100 let a absenci takto dlouhé historické zkušenosti (resp. experimentu) je nezbytné na tuto usuzovat především na základě střednědobých testů¹. S ohledem na tuto skutečnost je velmi výhodné využít tzv. (teplotně) urychlené testy [19].

Pro stanovení míry degradace pomocí urychlených testů je možno využít několik metod, které obecně využívají principu ponoření výztuží do alkalických roztoků za současného působení teploty (případně aplikované hladiny zatížení) kdy tato slouží jako tzv. akcelerační faktor (např. [43], [19], [20], [32]; akcelerace testu teplotou je využita též např. v [2] a [13]). Teoretickým základem je předpoklad, že existuje přímá závislost mezi změnou sledovaných mechanických charakteristik kompozitu a změnou na úrovni chemického složení, případně mikrostruktury materiálu [30]. Působením akceleračních činitelů pak dochází ke zvýšení rychlosti chemické reakce a tím i k úměrnému zvýšení rychlosti degradace kompozitu.

Degradační modely lze obecně rozdělit do dvou skupin: a) modely založené na stanovení míry poklesu únosnosti po expozici vzorku (nejčastěji využívané, tzv. „strength-retention“ modely) a b) na stanovení rychlosti/míry absorpce vlhkosti do těla výztuže („moisture absorption“) [45]. Nejčastěji užívané modely jsou založeny na principu popsaného tzv. Arrheniovou rovnicí [19].

2.1.1 Arrheniova rovnice

Obvykle užívané modely pro stanovení „akceleračního faktoru“ (tj. míry urychlení testu; dále AF) vycházejí z Arrheniovy rovnice. Z této lze odvodit, že zvýšení teploty okolního prostředí vede ke zvýšení rychlosti degradace [32]. Veškeré modely založené na této rovnici předpokládají, že jediným mechanismem ovlivňujícím rychlost degradace (tj. probíhající chemické reakce) je

¹ Jako střednědobé jsou pro účely tohoto textu uváženy testy v intervalu trvání 10^3 až 10^4 hodin

zvyšující se teplota a že tento mechanismus se v průběhu času nemění [10], [32]. Na hodnotu výsledného akceleračního faktoru má vliv kompozice testované FRP výztuže, velikost vzorku, okrajové podmínky (teplota, vlhkost, typ roztoku) aj.

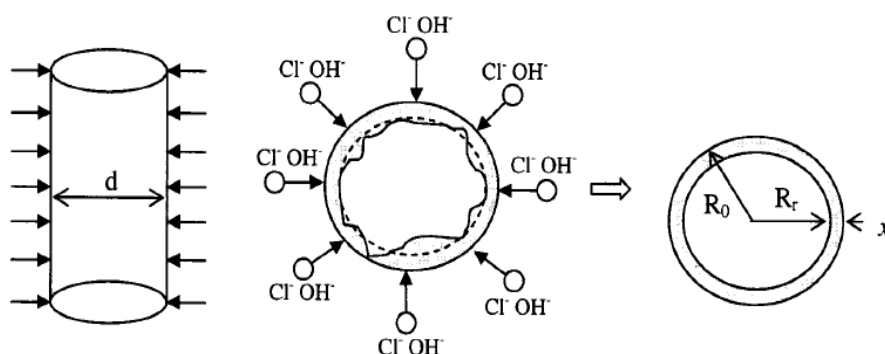
Arrheniova rovnice nabývá tvaru

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

kde k značí rychlostní konstantu degradace (1/čas), A konstantu degradačního procesu pro daný materiál, E_a aktivační energii reakce, R univerzální plynovou konstantu a T teplotu v kelvinech.

2.1.2 Degradální modely pro predikci dlouhodobého chování založené na stanovení rychlosti absorpce vlhkosti

V [50] 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. 1. Potřebné vztahy pro výpočet lze nalézt v [50].



Obr. 1 Difuze iontů z degradačního roztoku do tělesa výztuže; převzato z [30]

Např. autoři studie [12] však uvádějí, že výše popsané předpoklady mohou významně podhodnotit skutečné chování výztuže. Navíc je obtížné získání nutných vstupních koeficientů pro výpočet. Metodu též nelze využít, pokud je degradačním médiem destilovaná voda.

2.1.3 Degradální modely pro predikci dlouhodobého chování založené na určení zbytkové únosnosti

Existuje několik modelů pro predikci dlouhodobého chování FRP výztuže založených na určení zbytkové únosnosti po expozici danému prostředí, kdy tyto využívají principu Arrheniovy rovnice. Ve studii [9] byl navržen vztah pro stanovení dlouhodobé životnosti FRP materiálu ve tvaru

$$Y = a \cdot \log(t) + b, \quad (2)$$

kde Y značí míru snížení sledované vlastnosti (tahové pevnosti) v % v lineárním měřítku, t je čas vystavení danému prostředí uvážený v logaritmickém měřítku a a , resp. b jsou konstanty.

Model (2) byl poprvé použit pro predikci degradace betonu s rozptýlenými skleněnými vlákny, v současnosti je to i velmi rozšířený model pro popis dlouhodobého chování FRP výztuže [19]. Tento přístup má však svá omezení. Jde pouze o reprezentaci údajů získaných ze zkoušek. Vztah též není vhodný pro časy blízké nule. Některé dostupné práce poukazují na skutečnost, že byli-li tento model aplikován na výsledky dlouhodobých testů pro různé teploty, vyhodnocené závislosti nebyly rovnoběžné, což naznačovalo, že se degradační mechanismus s dobou expozice změnil. To je ale v rozporu se základním předpokladem pro využití vztahu (1).

V rámci studie [45] byl z tohoto důvodu vztah (2) upraven a pro vykreslení experimentálně získaných dat uvážena i míra redukce (retence) sledované charakteristiky – reziduální tahové pevnosti – v logaritmickém měřítku. Model dle [45] lze zapsat ve tvaru

$$\log Y = a \cdot \log(t) + b. \quad (3)$$

V práci [45] navržený postup stanovení dlouhodobé tahové pevnosti FRP výztuže je využit i v rámci doporučení *fib* Bulletin no. 40 [21].

Existuje i několik dalších přístupů, které lze pro predikci dlouhodobého chování kompozitní výztuže využít. V textu odstavce 2.1 byly uvedeny pouze nejrozšířenější. Srovnání různých modelů a výstižnosti jejich predikce je možno nalézt např. v článku [5].

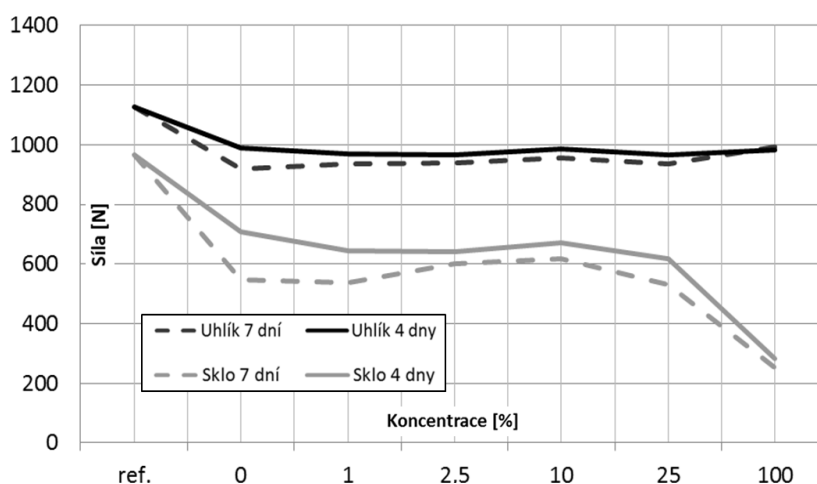
2.2 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ DEGRADACE VLÁKEN V ALKALICKÉM ROZTOKU

Cílem dílčího experimentu bylo kvantifikovat vliv alkalického roztoku o různé koncentraci na tahovou únosnost klíčového komponentu FRP výztuže – výztužných vláken (testována skleněná AR a uhlíková C vlákna; viz Tab. 1). 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 [25], resp. [49].

Pro posouzení vlivu alkalického prostředí na míru degradace bylo připraveno šest různých koncentrací alkalického roztoku dle ACI 440.3 [2] (0 % - vodní prostředí bez rozpuštěných iontů, 1 %, 2,5 %, 10 %, 25 %, 100 % roztok o pH cca 12,8). Doby expozice vláken byly uváženy v souladu s [16] a [17], 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 uložených v laboratoři na vzduchu při teplotě 21 °C a 50 % RH.

Tab. 1 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	85	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	230	Expoziční časy: 96 a 168 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 80 °C



Obr. 2 Únosnost při porušení; AR a C vlákna; 4 a 7 dnů expozice v roztoku různé koncentrace

I přes vysoce agresivní podmínky (teplota 80°C, pH > 12), plně v souladu se závěry zahraničních studií (např. [37]), 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 zcela nový, neočekávaný [25].

Nejvýraznější redukce únosnosti byla dosažena při uložení skleněných AR vláken do 100 % roztoku dle [2], a to na 29 %, resp. 26 % referenční hodnoty po 96, resp. 168 hodinách expozice. Z experimentu bylo zřejmé, že úbytek únosnosti závisí především na koncentraci iontů draslíku a sodíku. Degradace při stoprocentní koncentraci roztoku probíhá významně rychleji, nebyl již pozorován významný rozdíl mezi hodnotou zbytkové únosnosti pro čtyřdenní a sedmidenní expozici. Zbytkové tahové pevnosti uhlíkových vláken při uložení v roztocích o všech uvážených koncentracích nezávisle na čase expozice dosahovaly 81 % až 88 % referenční hodnoty [25].

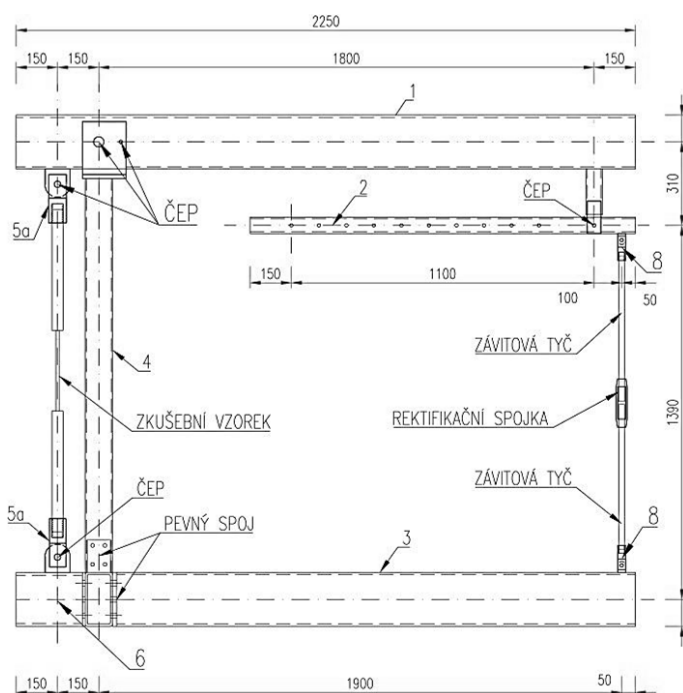
2.3 DEGRADAČNÍ ZKOUŠKY FRP VÝZTUŽÍ BEZ VLIVU KRYCÍ VRSTVY BETONU

Rozsáhlá studie měla za cíl ověřit chování GFRP výztuží na bázi vinyl esterové (VE) a epoxidové (EP) matrice při působení degradačního prostředí alkálií, roztoků chloridů a zatížení. Zkušební program byl navržen s cílem kvantifikovat míru vlivu jednotlivých degradačních činitelů – prostředí; teploty a působícího tahového napětí, resp. jejich interakce. Experimentálně bylo ověřeno i dlouhodobé chování výztuže exponované pouze tahovému zatížení („creep test“).

Bylo zcela nezbytné navrhnout speciální zkušební zařízení pro urychlené degradační zkoušky s vlivem napětí. 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, jež umožnily stanovit závislost klíčových mechanických charakteristik testované GFRP výztuže na působícím agresivním prostředí, napětí a teplotě. Výsledkem řešení byly nejen publikované články, které jsou v textu citovány, ale především zásadně zlepšené vlastnosti kompozitní výztuže vyvíjené ve spolupráci s firmou PREFA KOMPOZITY, a.s.

2.3.1 Zkušební zařízení pro urychlené degradační zkoušky s vlivem napětí

Pro realizaci experimentů v plánovaném rozsahu bylo zcela zásadní navrhnout vhodný zkušební postup, který by vycházel z poznatků směrnic [2], [13], resp. [35]; relevantních studií [30] a [40] a zároveň byl plně v souladu s přístupem ČSN EN 1990 [18]. Bylo navrženo speciální zkušební zařízení pro dlouhodobé zkoušky výztuží s možností vzorky dlouhodobě zatížit konstantní hladinou působící síly (chráněno průmyslovými vzory: 003492313-0001 a 003491976-0001).



Obř. 3 Schéma a reálné provedení zkušebního zařízení pro dlouhodobé tahové zkoušky

Navržené zkušební zařízení využívající jednoduchého principu páky splnilo nároky z hlediska konstrukční nenáročnosti 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). Zatížení bylo realizováno pomocí aplikované hmoty, což umožňuje držet konstantní hladinu působící síly po celou dobu časově náročných zkoušek.

Díky modulárnímu řešení bylo možno realizovat velmi jednoduchou přestavbu pro provedení dlouhodobých zkoušek soudržnosti i tlakových zkoušek kompozitních ložisek. Vyvinuté zařízení je celkem v šesti kusech doposud využíváno v laboratořích VUT v Brně a to nejen při výzkumné, ale i hospodářské činnosti. Sestava zkušebního zařízení pro dlouhodobé tahové zkoušky je zřejmá z Obr. 3.

2.3.2 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 dle [2] (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. 2.

Celkem bylo testováno více než 175 ks vzorků GFRP výztuže na bázi VE pryskyřice (E-CR sklo a AR sklo) a 70 vzorků výztuže s epoxidovou pryskyřicí a E-CR vlákny (viz Tab. 2; vzorky GFRP-E-EP a GFRP^{NG}). Všechny byly po požadovaný expoziční čas uloženy do vysoce alkalického roztoku připraveného dle [2] temperovaného na teplotu 20 °C, 40 °C a 60 °C. Následně byly vyjmuty, očištěny a bylo provedeno optické zkoumání případné degradace povrchu. Vzorky opatřené koncovkami byly poté podrobeny tahové zkoušce provedené dle [27] (s přihlédnutím k [7], [13] a [35]). Tato zde není podrobněji popsána, neboť se dnes již jedná o rutinní typ zkoušky. Presentovány jsou pouze zásadní zjištěné skutečnosti.

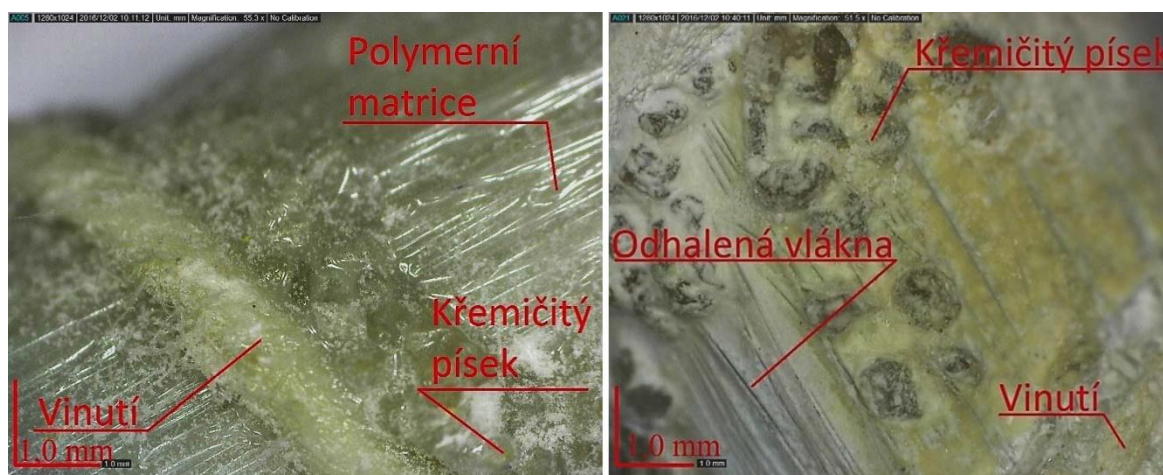
Tab. 2 Přehled vzorků GFRP výztuže pro zkoušky v alkalickém prostředí bez působícího napětí

Označení série vzorků	vlákna	matrice	povrchová úprava	expoze
GFRP-E-VE	ECR	VE	krycí/adhezni vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovinem	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/adhezni vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovinem	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/adhezni vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s kevlarovým ovinem	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/adhezni vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s nylonovým ovinem	Expoziční časy: 1000 hodin Alkalický roztok dle ACI 440.3R12 Teplota roztoku 20, 40 a 60 °C

Vliv alkalického prostředí na kvalitu povrchové úpravy vzorků

Dlouhodobá expoze vzorků alkalickému roztoku (pH = cca 13, teplota 60 °C, 650 dní) se projevila negativně na kvalitě povrchové vrstvy. V závislosti na typu vzorku docházelo k lokálnímu narušení soudržnosti mezi vrstvou křemičitého písku a tělem kompozitu. I po očištění byla stále zřetelně patrná vysrážená vrstva především hydroxidu a uhličitanu vápenatého. U nižších testovaných teplot nebyla degradace povrchu tak výrazná, vždy však byla patrná vysrážená vrstva vápenatých solí.

U jedné z testovaných sérií vzorků došlo k velmi významné, pro vzorky exponované 180 dní teplotě 60 °C velmi netypické, plošné ztrátě adhezní vrstvy. Pozorovaná degradace byla s ohledem na potřebu zajištění dlouhodobé spolehlivosti kontaktu beton/výztuž alarmující. Na základě provedených analýz bylo možno vyslovit závěr, že na míru degradace kontaktu má zcela zásadní vliv postup a kvalita výroby. 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. [43]. Zjištění bylo zásadní s ohledem na experimentální ověření dlouhodobé spolehlivosti kontaktu mezi výztuží a betonem [23] a [49].



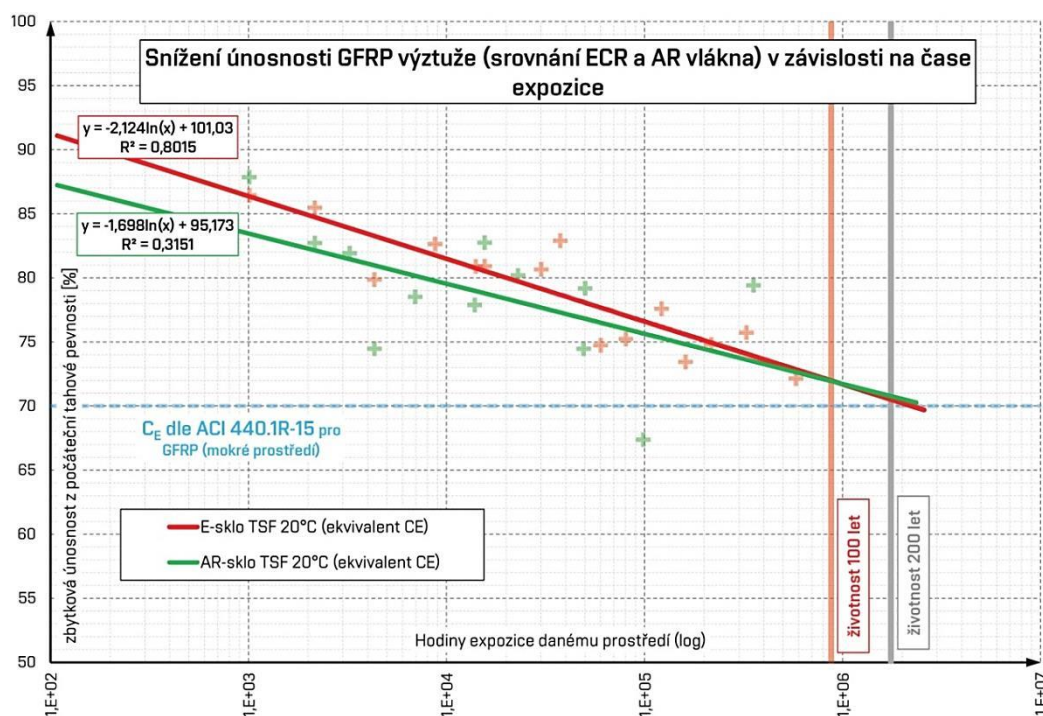
Obr. 4 Vlevo: referenční GFRP výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu; vpravo: GFRP výztuž uložená 365 dní v alkalickém roztoku při teplotě 40 °C [49]

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 [49] a [23]. Bez závislosti na typu testované GFRP výztuže byl patrný negativní vliv alkalického roztoku na experimentálně stanovené tahové pevnosti. Se zvyšující se teplotou alkalického prostředí a délkou expozice pevnost v tahu GFRP výztuží klesá, toto chování bylo očekávané a v souladu s výsledky zahraničních studií ([10], [11], [19] nebo [31]). Dominantní část degradace proběhla cca v prvních 180 dnech expozice. Zásadní roli hrála 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). CSA S807-19 [14] doporučuje délku expozice 3000 hodin; tento časový interval je na základě obdržených výsledků možno považovat pro některé typy výztuží potenciálně za nedostatečný. Jako bezpečný lze uvážit interval 5000 hodin.

Pro testované GFRP výztuže s AR a ECR vlákny je na Obr. 5. provedeno vyhodnocení pro životnost 100 let a teplotu okolního prostředí 20 °C (proveden dopočet hodnoty urychlení teplotou – tzv. akcelerační faktor). Při degradaci pouze alkalickým roztokem (bez působení zatížení) je předpoklad snížení únosnosti cca 28 % pro výztuže s oběma typy vláken. Byla potvrzena hodnota environmentálního součinitele $C_E = 0,7$ (mokrém prostředí) dle [1]. Obdržený výsledek je v dobré shodě i se závěry studie [4].

Výztuže s AR vlákny vykazovaly nižší míru poklesu pevnosti za jednotku času, avšak vyšší citlivost na vodní uložení. Je ale nutno podotknout, že zvolený degradační model dle vztahu (2) 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 tento typ výztuže je třeba chápat pouze jako informativní.



Obr. 5 Porovnání vzorků GFRP výztuže s ECR a AR vlákny; alkalické prostředí ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Na začátku řešení experimentu byl předpoklad o vyšší odolnosti kompozitních výztuží s AR vlákny při expozici alkáliím. Tento však nebyl potvrzen. Naopak docházelo k významné degradaci povrchové vrstvy, která se projevila při realizaci testů soudržnosti [36]. Na základě zjištěných skutečností bylo upuštěno od dalšího využití AR vláken při výrobě GFRP výztuže [49].

Testované vzorky v průběhu sledovaného období nevykazovaly významnou změnu hodnoty modulu pružnosti. Všechny dosažené výsledky získané v rámci degračních testů však vykazují (v porovnání s referenčními vzorky) významně vyšší rozptyl. Tento poznatek je důležitý s ohledem na stanovení bezpečných materiálových součinitelů při návrhu výztuže.

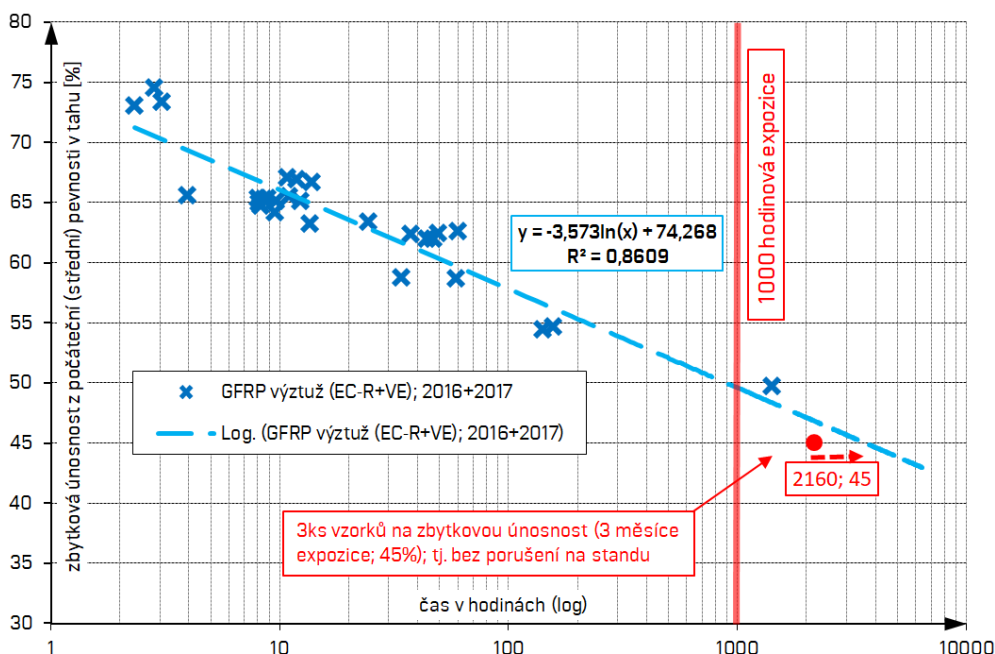
2.3.3 Dlouhodobé chování FRP výztuží při působení zatížení bez vlivu alkálií - creep

S ohledem na potřebu odlišit příspěvek jednotlivých degračních činitelů na životnost GFRP výztuže byly realizovány zkoušky vlivu působícího zatížení bez souběžného působení alkálií a urychlení teplotou (tzv. creep rupture test dle [2], resp. [13]). Zkoušky s vlivem působícího zatížení v kombinaci s účinkem alkálií/chloridů a teploty jsou uvedeny v odstavci 2.3.4 a 2.3.5.

Experimentálně byly testovány 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. 3). Celkem bylo v této konfiguraci ověřeno chování více než 30 vzorků. Zkoušky byly realizovány na vyvinutém zařízení, které bylo velmi stručně popsáno v odstavci 2.3.1. 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 [49], kde lze nalézt i úplný výčet obdržených výsledků. Tyto jsou v grafické formě zobrazeny na Obr. 6.

Tab. 3 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



Obr. 6 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 (2) dle [9], který dává v porovnání s (3) [45] konzervativní výsledky. Přesnost zvoleného modelu [9] 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. Při srovnání s uvedeným na Obr. 5 je zřejmé, že zvolená působící hladina zatížení má významně vyšší vliv na životnost vzorku než účinek alkalického prostředí. Tento poznatek je zásadní, neboť je zcela zřejmá potřeba realizace zkoušek kombinujících vliv degradačního média a dlouhodobě působícího zatížení [49].

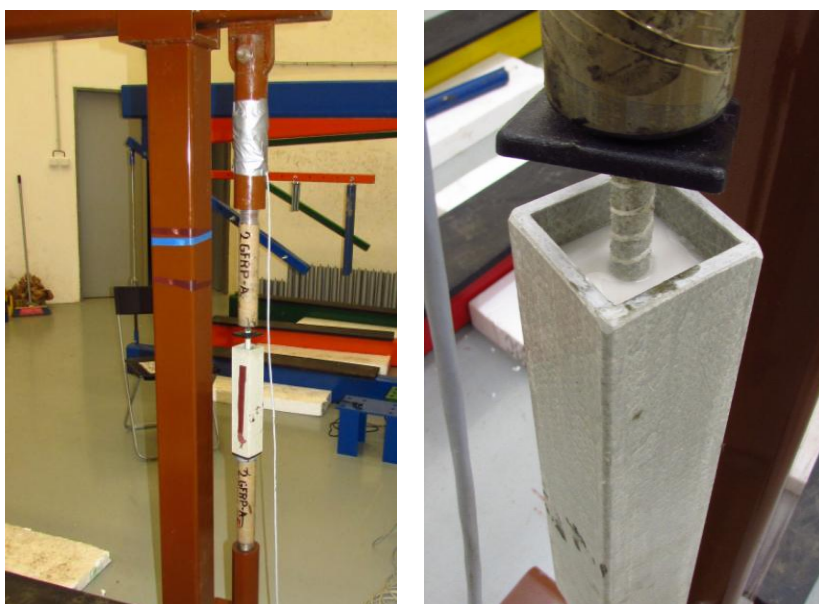
2.3.4 Dlouhodobé chování GFRP výztuží při souběžném působení zatížení a alkálií

Jak bylo uvedeno výše, pro výstižné ověření dlouhodobé spolehlivosti FRP výztuže jsou zásadní zkoušky vzorků vystavených kombinovanému účinku působícího zatížení, alkalického prostředí (např. ve formě roztoku) a teploty, kdy cílem je stanovit čas do kolapsu vzorku. Pro provedení těchto teplotně urychlených testů, které teoreticky vycházely z prací [30] a [40], však dostupné normativní podklady [2], [13], [35] nedefinují jasná pravidla. Především systém zkoušení zakotvený v severoamerických směrnících vychází z opačného principu – stanovení zbytkové únosnosti po definované době expozice². Dle názoru autora této práce však není tento způsob s ohledem na skutečný popis dlouhodobé životnosti zcela vhodný (viz i [51] nebo [52]), resp. vyžaduje velmi omezující stanovení limitů pro vyhodnocení těchto testů (v dané oblasti došlo k významným změnám např. při zavedení nového vydání normy CSA S807-19 [14]).

Testovány byly vzorky GFRP výztuže s ECR vlákny a VE maticí o průměru 10 mm (vlastnosti viz Tab. 3). Tvar vzorků a jejich osazení do zkušebního zařízení bylo pro možnost vzájemného srovnání provedeno shodně s uvedeným v odstavci 2.3.3. Střední část vzorku mezi koncovkami

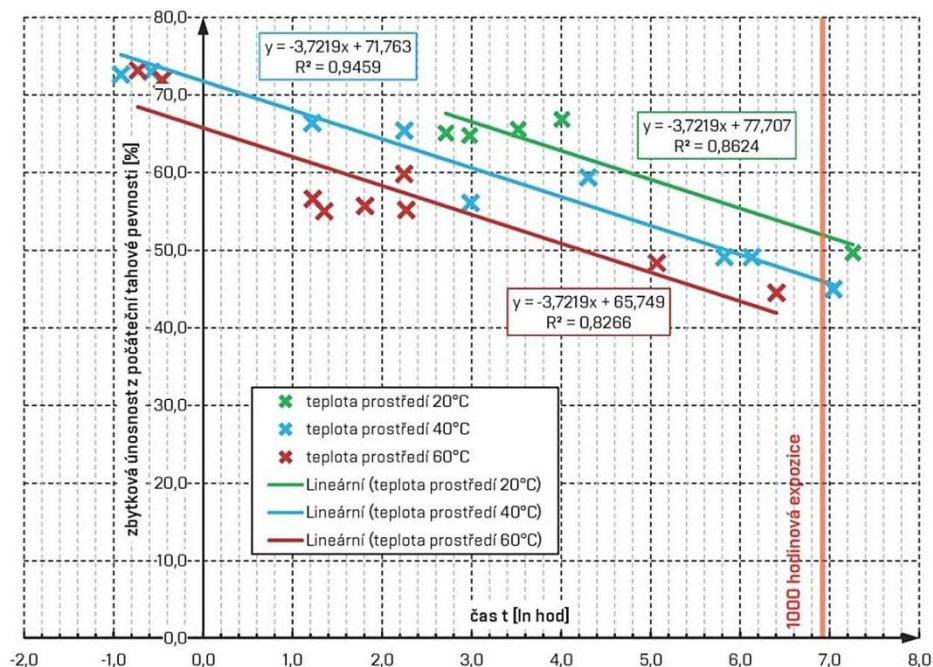
² Princip stanovení tzv. retence vzorku, tj. zbytkové únosnosti vzorku po definovaném expozičním čase v daném prostředí a působení zatížení.

však byla navíc osazena nádobkou s alkalickým roztokem (pH roztoku 12,6 – 13), který byl temperován na požadovanou teplotu. Vzorek osazený ve zkušebním zařízení je patrný z Obr. 7.



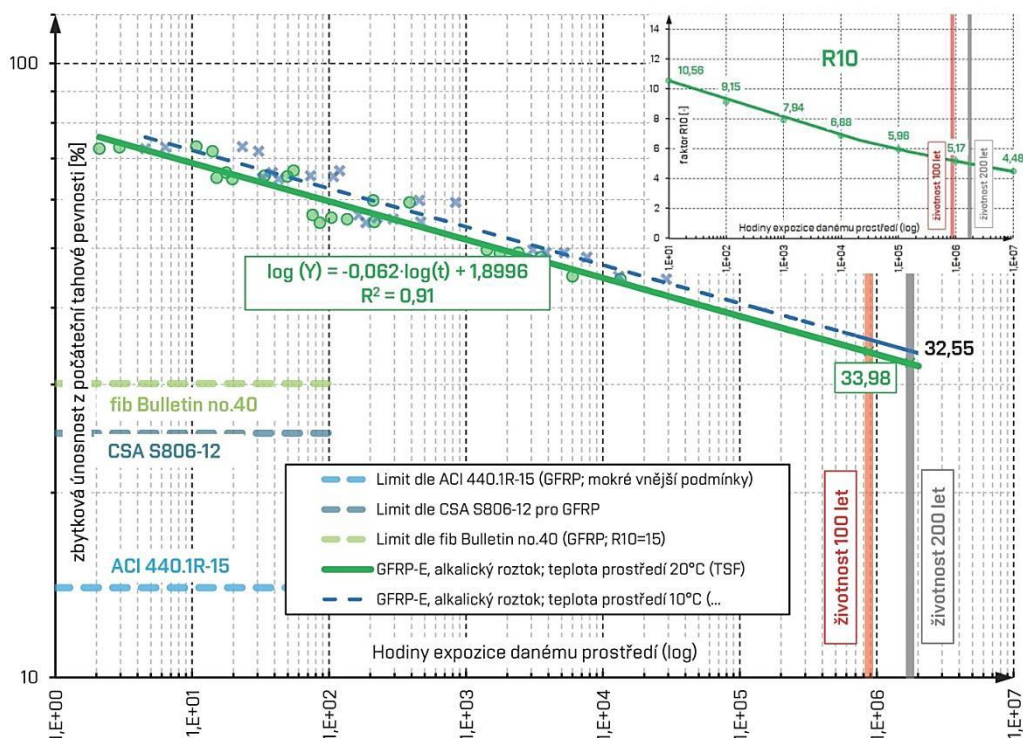
Obr. 7 Vzorek GFRP výztuže s osazenou nádobkou s alkalickým roztokem

Bylo provedeno 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). Grafické zobrazení získaných závislostí teploty, hladiny působícího zatížení a času do porušení vzorku je provedeno na Obr. 8 (působící napětí je vyjádřeno v závislosti na logaritmu (ln) času). Z grafu je patrná závislost obou sledovaných veličin a také zcela zřejmý účinek teploty, kdy dochází ke zřetelnému urychlení degradace, která se zvyšuje exponenciálně s jejím nárůstem.



Obr. 8 Dlouhodobá tahová zkouška GFRP výztuží s VE pryskyřicí s vlivem alkalického prostředí

Na základě obdržných výsledků byla potvrzena platnost předpokladu možnosti urychlení dlouhodobých testů pomocí teploty a stanoven akcelerační faktor (vztaženo pro laboratorní teplotu 20°C). Výsledná získaná závislost mezi časem (životností prvku) a hladinou působícího zatížení při souběžném účinku alkalického prostředí (pH ≥ 12,5) je prezentována na Obr. 9.



Obr. 9 Závislost životnosti GFRP výztuže na hladině působícího zatížení prvku při souběžném účinku alkalického roztoku ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Vzhledem k dostatečně dlouhým přímo měřeným expozičním časům byl pro vyhodnocení využit model dle vztahu (3); [45], který vykazoval pro testovanou sadu vzorků vyšší index spolehlivosti. Získaná závislost byla následně extrapolována pro životnost konstrukce cca 100 let. Mezní přípustné zatížení (při uvážení středních hodnot sledovaných veličin; platí pro zkoumané vzorky a uvážené podmínky degradace) pro dosažení této životnosti je cca 34 %. Z Obr. 9 je též zřejmé srovnání experimentálně zjištěné hodnoty s doporučeními podkladů [1], [13] a [21].

2.3.5 Verifikace dlouhodobého chování GFRP horninových kotev při souběžném působení zatížení a chloridů

V rámci výzkumného projektu FV10505 byla řešena dlouhodobá odolnost vyvíjené kompozitní horninové kotvy (svorníku) na bázi skleněných vláken. Tato může být namáhána souběžně tahovou silou a chloridy. Produkt vznikl ve spolupráci se společností PREFA KOMPOZITY, a.s. a STRIX Chomutov, a.s. Aplikace produktu je patrna z Obr. 10 (trhací zkouška svorníku in-situ).



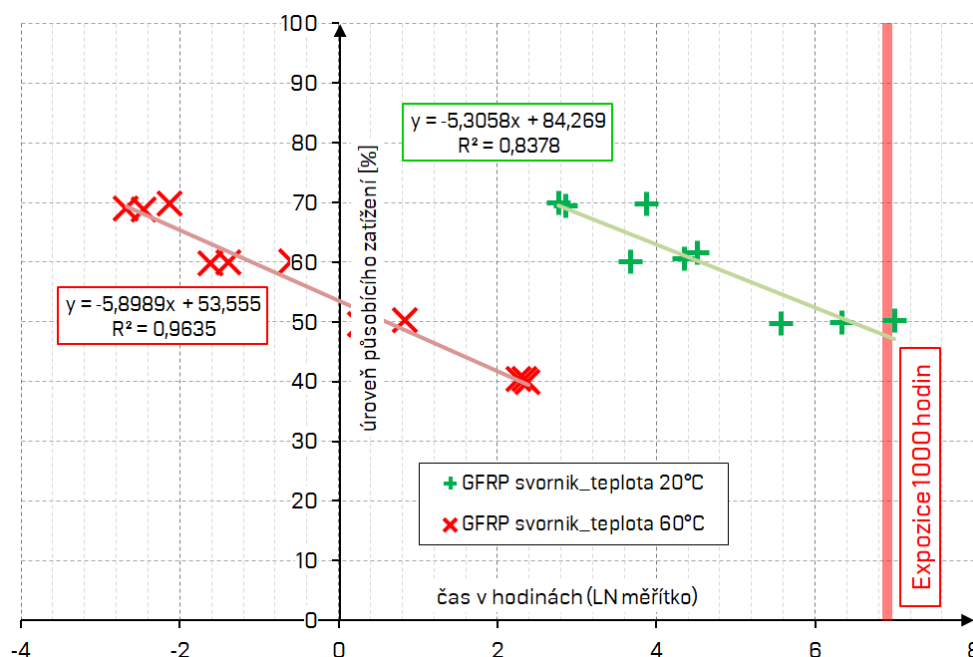
Obr. 10 Osazený GFRP horninový svorník při provádění trhací (pull-out) zkoušky; [46]

Provedený experiment si kládł za cíl stanovit dlouhodobou odolnost/životnost navrženého řešení a zároveň definovat přípustnou hladinu napínací síly, kterou bude kotva schopna dlouhodobě bezpečně přenášet. Konfigurace testu byla volena totožná s uvedeným v 2.3.4, obdržené výsledky je tedy možno (s jistými omezeními, viz dále) navzájem porovnat. Zkoušky byly realizovány na vzorcích GFRP svorníků Ø10 mm vyrobených z ECR vláken a EP pryskyřice (základní mechanické charakteristiky viz Tab. 4). Degradční médium představoval 3 % solný roztok (hmotnostně). Jako urychlující faktor byla uvažována teplota 60 °C, referenční pak 20°C. Celkem bylo testováno 24 vzorků GFRP svorníků s různými okrajovými podmínkami a časy expozice od desítek minut po více jak tisíc hodin.

Tab. 4 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

Výsledná závislost hladiny působícího zatížení a teploty na logaritmu času je zobrazena na Obr. 11 (jako 100 % je uvažována mezní únosnost z krátkodobé zkoušky). Opět je zcela zřejmý faktor působící teploty roztoku. Došlo ke zřetelnému urychlení degradace, která se zvyšuje exponenciálně s rostoucí teplotou. Z obdrženého AF (5,79 v LN měřítku) je zřejmá zvýšená citlivost testované výztuže na prostředí, jemuž byla vystavena.

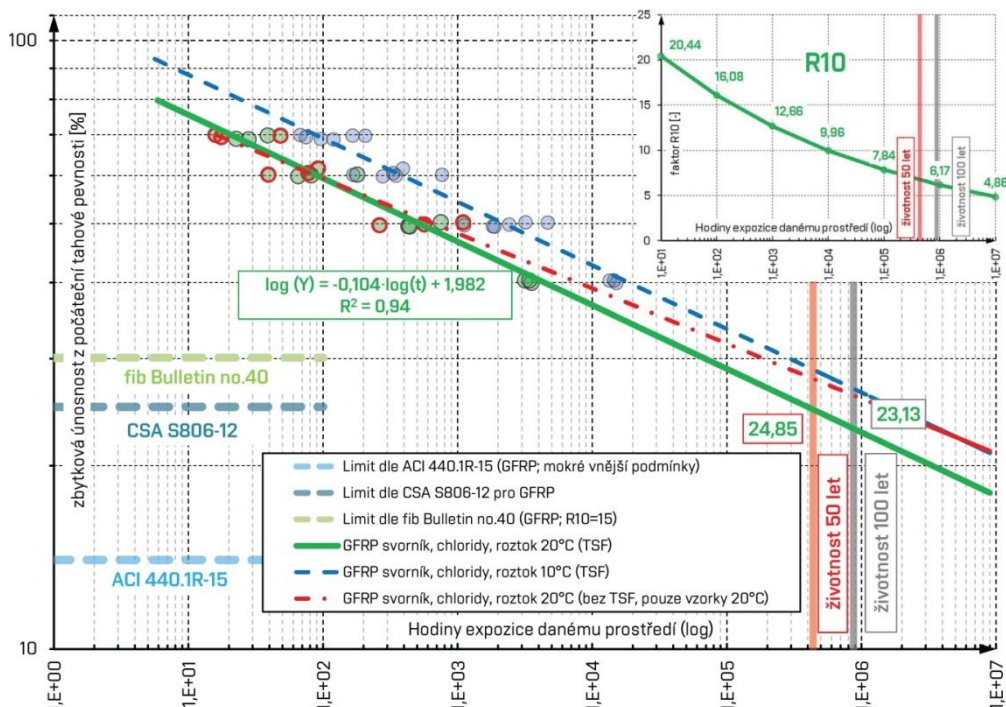


Obr. 11 Dlouhodobá zkouška GFRP svorníku s EP pryskyřicí s vlivem roztoku chloridů

Za využití degradačního modelu dle vztahu (3) byla sestavena závislosti mezi hladinou působícího zatížení a časem expozice degradačnímu prostředí o teplotě 20°C. Následně byla získaná závislost extrapolována pro životnost konstrukce 100 let. Mezní přípustné zatížení pro dosažení této životnosti (při uvažování středních hodnot sledovaných veličin a referenční teploty 20°C) je 23,1 % krátkodobé únosnosti – Obr. 12. Při využití degradačního modelu dle (2) [9] by byla dosažena významně nižší hodnota.

Je třeba poukázat na zvýšenou/neočekávanou míru degradace vzorků při vystavení teplotě prostředí 60°C. Z vyhodnocení výsledků bylo zřejmé, že tato teplota působila na materiál svorníku degradačně. Její využití jako akceleračního faktoru je tak sporné. Je pravděpodobné, že zmíněné

chování bylo způsobeno méně kvalitním vytvrzením materiálu svorníku. 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.



Obř. 12 Životnost GFRP svorníku v závislosti na hladině působícího zatížení při souběžném účinku chloridů

2.3.6 Srovnání výsledků degradace vzorků GFRP výztuží v alkáliích a roztoku chloridů

Pro realizaci experimentu popsaného v 2.3.4 a 2.3.5 a následné vyhodnocení byly využity shodné postupy a degradační modely. Nabízí se tak možnost získané výsledky porovnat. Je však třeba uvést, že v obou experimentech byly testovány mírně odlišné kompozice GFRP materiálu. Srovnání je tedy nutno chápat pouze jako orientační.

Tab. 5 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/adhezni vrstva z VE pryskyřice a křemičitého písku s lněným ovinem	33,98 %	8,3
svorník GFRP NaCl	ECR	EP	krycí/adhezni vrstva z EP pryskyřice a křemičitého písku s nylonovým ovinem	23,13 %	13,2

Z uvedených výsledků (viz Tab. 5) je velmi dobře patřno, 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 [38], nebo [30], kdy byly testovány obdobné podmínky expozice. Provedený následný rozbor poukázal na významný vliv výroby na obdržené výsledky, kdy GFRP svorník byl hůře vytvrzen. Významná pro posouzení dlouhodobého chování je též hodnota faktoru R₁₀ (pokles tahové pevnosti FRP výztuže za dekádu životnosti na logaritmickém měřítku), který velmi zjednodušeně poukazuje na kvalitu testované výztuže a její odolnost v daném prostředí.

I přes výše vyslovené pochybnosti o nižší kvalitě výroby GFRP svorníku je třeba poukázat na skutečnost, že oba testované produkty překročily limitní hodnoty definované v ACI 440.1 [1]. 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.

Lze konstatovat, že zkoušky prokázaly vhodnost navrženého způsobu testování – tj. souběžného účinku působícího tahového napětí a degradačního média. Pouze tyto typy testů dokáží poskytnout spolehlivou predikci dlouhodobého chování.

2.4 VLIV KONFIGURACE EXPERIMENTU NA VÝSLEDEK – DEGRADAČNÍ ZKOUŠKY GFRP VÝZTUŽE S VLIVEM KRYCÍ VRSTVY BETONU

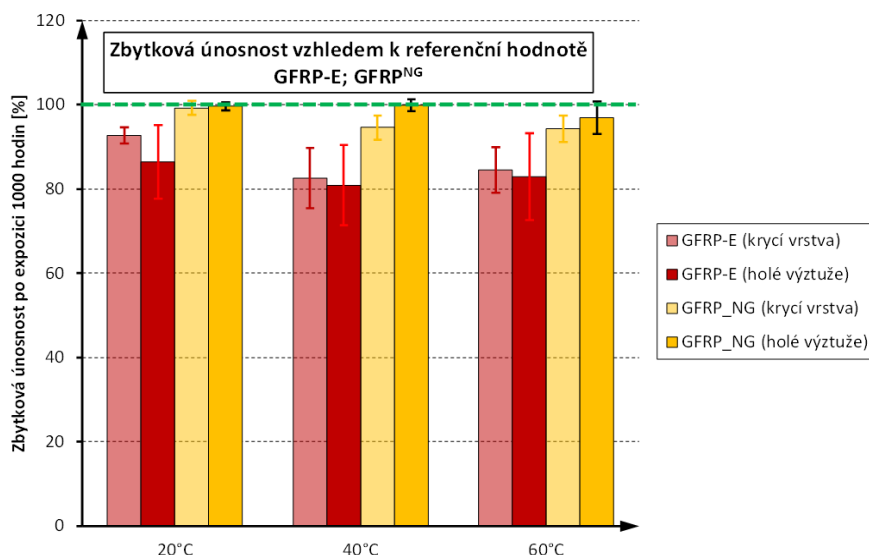
Dostupné zkušební podklady [2], resp. [13] umožňují testovat vzorky v konfiguraci „holé výztuže“, která je přímo exponována danému degradačnímu médiu, ovšem také s betonovou krycí vrstvou. Je tedy účelné stanovit míru ovlivnění výsledku uváženými okrajovými podmínkami. Byl proto navržen experiment s cílem zjistit, zdali dojde v reálném prostředí betonové konstrukce ke zpomalení pronikání alkálií do těla výztuže a tím i ke snížení míry degradace.

Byly vyhotoveny vzorky GFRP výztuže opatřené betonovou krycí vrstvou. Tyto byly následně umístěny do alkalického roztoku o teplotě 20, 40 a 60 °C (shodně s uvedeným v 2.3.2). Betonová krycí vrstva ve formě „válečku“ byla provedena z jemnozrnného samozhutnitelného betonu pevnosti cca 30 MPa [49]. V definovaném časovém intervalu 1000 hodin (uváženo v souladu s [21]) byly vzorky podrobeny jednorázové tahové zkoušce. Typický způsob porušení je patrný z Obr. 13 (vlevo betonový váleček porušený příčnými trhlinami v průběhu zatěžování, vpravo porušení výztuže).



Obr. 13 Provedení a typický způsob porušení vzorků GFRP výztuže s betonovou krycí vrstvou

Výsledné/zjištěné procentuální hodnoty zbytkové únosnosti jsou zobrazeny na Obr. 14. Z vyhodnocení je zřejmé, že přítomnost betonové krycí vrstvy snížila míru degradace. Pozitivní vliv byl zřejmý u vzorků s větším impaktem agresivního prostředí, tj. méně kvalitních výztuží (GFRP-E). Došlo ke snížení redukce tahové pevnosti a též rozptylu získaných výsledků. Pozorovaný rozdíl 2 – 5% (dle teploty) je významný, neboť je předpoklad, že při delších časech expozice bude dále narůstat. Uvedené závěry jsou v souladu i se zahraničními studiemi, např. [38].

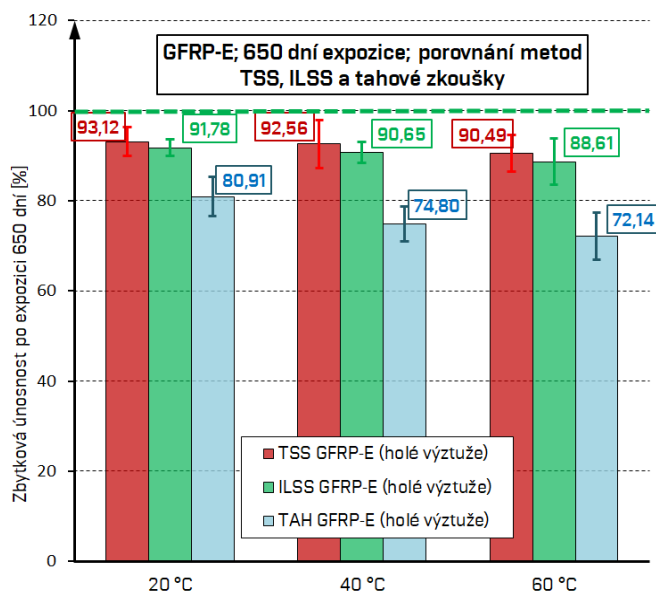


Obr. 14 Zbytková únosnost vzhladem k referenční hodnotě (vyjádřeno v %)

2.5 ALTERNATIVNÍ ZKUŠEBNÍ METODY PRO URČENÍ MÍRY DEGRADACE FRP VÝZTUŽE

Z hlediska realizace 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. Tyto mohou být určeny pouze k orientačnímu hodnocení míry degradace a není nezbytné, aby zcela nahradily tahové zkoušky, které poskytují nezbytné mechanické charakteristiky. Mohou však významně zredukovat jejich objem. Získané hodnoty mohou sloužit též jako referenční pro budoucí sledování homogenity výroby.

Z tohoto důvodu byly jako alternativní testovány dvě metody a) zkouška v příčném smyku (TSS) dle ISO 10406-1:2015 [35] a b) zkouška v podélném – interlaminárním – smyku (ILSS) dle normy ASTM D 4475 [6]. Pro možnost srovnání byly zkoušky 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 (viz odstavec 2.3.2). Obdržené výsledky jsou uvedeny na Obr. 15.



Obr. 15 Porovnání alternativních zkušebních metod: zbytková únosnost vzhladem k referenční hodnotě (vyjádřeno v %), vzorky GFRP-E, expozice 650 dní

Z výsledků je patrné, 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 je však v porovnání s výsledky zjednodušených testů vyšší. Lze tak konstatovat, že testy nejsou srovnatelně citlivé (v porovnání s touto referenční metodou), avšak mají obdobný trend. Při uvážení náročnosti jednotlivých testovaných metod je možno doporučit pro další využití především zkoušku ILSS. Tato je zcela nenáročná na instrumentaci, velikost vzorků a v důsledku má i 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 zkušební. Vhodnost metody byla ověřena i např. ve studii [11].

2.6 VLIV ALKALICKÉHO PROSTŘEDÍ NA SOUDRŽNOST FRP VÝZTUŽE

Jedním ze zásadních poznatků z vývoje nové GFRP výztuže bylo zjištění, v jaké míře dlouhodobou spolehlivost řešení může ovlivnit kvalita provedení a odolnost kontaktu mezi výztuží a betonem. Závěry zahraničních studií v této oblasti nejsou jednoznačné a silně varují především v závislosti na typu testovaného materiálu.

Doposud provedené testy soudržnosti těchto typů výztuží poukázaly na skutečnost, že selhání kontaktu nastává nejčastěji na rozhraní jádra prutu a opískování [36] nebo [49]. 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 navržen 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 AR a ECR vlákny s VE matricí a lněným ovinem nominálního průměru 10 mm uložená cca 2 roky v alkalické lázni (vzorky GFRP-E-VE a GFRP-AR-VE; viz Tab. 2) při teplotě 60 °C – základní mechanické charakteristiky jsou zřejmé z Tab. 6.

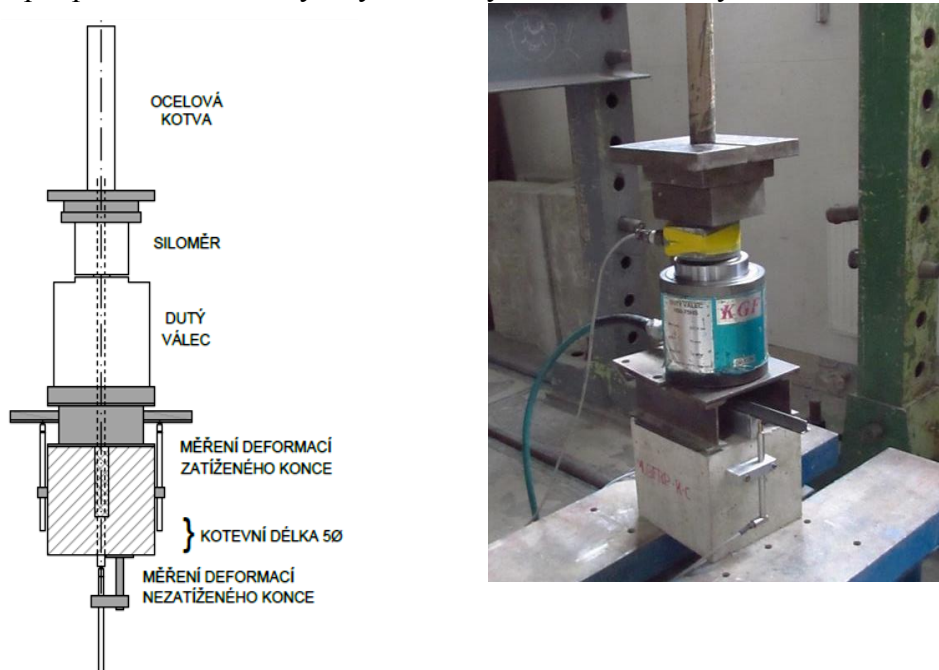
Tab. 6 Základní mechanické charakteristiky testované GFRP výztuže s ECR a AR vlákny (d650 v názvu značí expozici vzorku po dobu 650 dní)

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

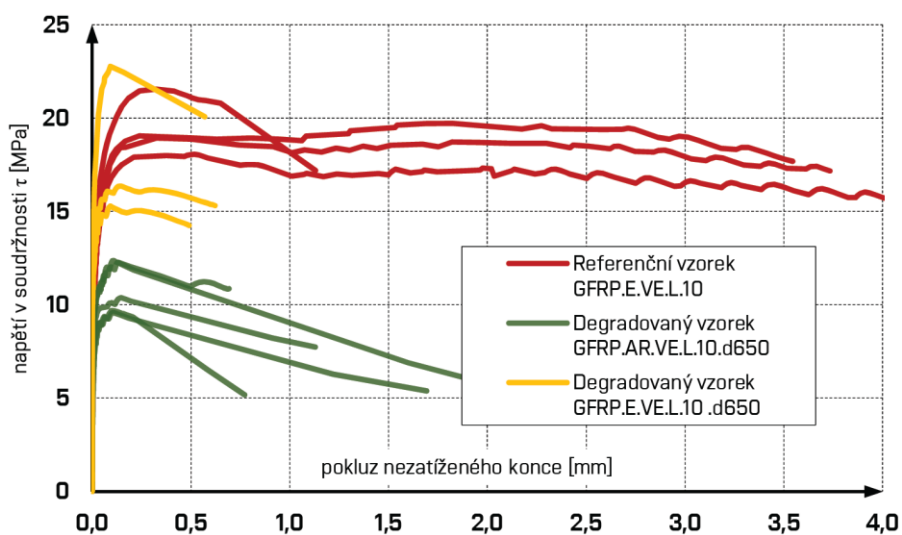
Hodnota mezního napětí v soudržnosti byla stanovena pomocí tzv. pull-out zkoušek realizovaných dle [2] a metodiky [27]. Tento test je dnes již rutinní, proto zde nebude podrobněji popsán, uvedeny jsou pouze získané výsledky a zásadní skutečnosti. Testované vzorky byly zabetonovány v krychli o hraně 200 mm z betonu o střední tlakové pevnosti 55 MPa. Délka se zajištěnou soudržností byla uvážena jako pětinasobek průměru testovaného prutu, zbývající část byla separována. Provedení zkoušky je zřejmé z Obr. 16. Maximální napětí v soudržnosti τ_{max} bylo stanoveno s uvážením konstantního rozdělení napětí po délce se zajištěnou soudržností.

Na Obr. 17 je provedeno srovnání chování referenčních a degradovaných vzorků s AR a ECR vlákny a VE matricí, 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. 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 (redukce nižší než 10%). U vzorků s AR vlákny však došlo k velmi významné redukci vyšší než 40 %. V případě těchto vzorků byl pozorován také odlišný typ 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. Pozorovaný mechanismus porušení byl neobvyklý, alarmující, [36]. 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.



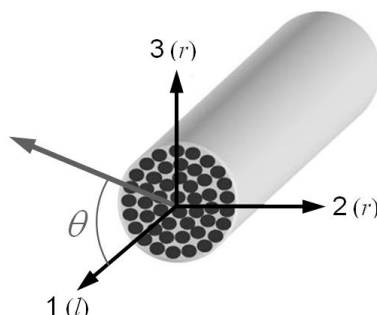
Obr. 16 Zkouška soudržnosti - pull-out test dle [2]; provedení a konfigurace zkoušky



Obr. 17 Závislost pokluzu nezatíženého konce na napětí v soudržnosti GFRP výztuží s VE matricí

3 VLIV INTERAKCE NORMÁLOVÉ A POSOUVAJÍCÍ SÍLY NA ÚNOSNOST FRP VÝZTUŽE

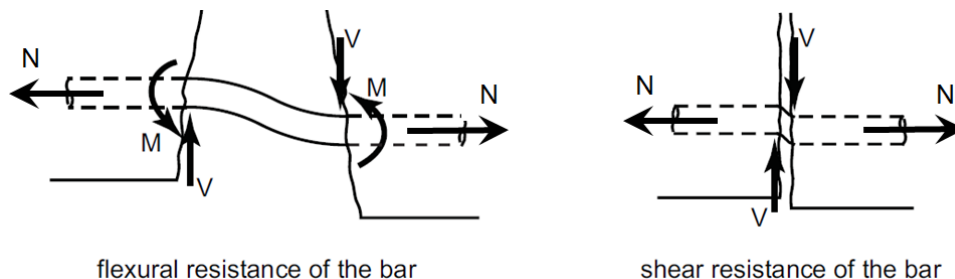
Kompozitní výztuže vyráběné z dlouhých nosných vláken dosahují zcela odlišných vlastností při namáhání ve směru vláken a ve směru na ně kolmém. V podélném směru je tahová únosnost limitována mezním přetvořením nosných vláken, přičemž dochází k jejich křehkému porušení (podélný směr l , viz Obr. 18). V příčném směru dochází k porušení matrice, vlákna jsou přestřižena ve směru kolmém k jejich orientaci a na přenosu smykových sil se přímo nepodílejí (směr r , Obr. 18). Při porušení smykem je dosahováno přibližně o řád nižších mezních napětí.



Obr. 18 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 [21]

V reálných aplikacích je často nezbytné uvážit kombinované namáhání výztuže tahem i smykem (příčným, případně podélným). Uvedená kombinace namáhání vždy nastává v případě řešení tvarovaných FRP prutů – nejčastěji třmínků, 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 třmínkách s cílem stanovit míru redukce tahové únosnosti prutu v místě ohybu; např. [3], [33], [34] a [39], či [42]. Tyto studie však neměly za cíl kvantifikovat velikost působícího smykového napětí a jeho vliv na změnu tahové únosnosti prutu³.

Namáhání FRP výztuže kombinací tahového napětí a příčného smyku (střihu) je nutno řešit např. v oblasti, kde výztuž prochází trhlinou (viz Obr. 19). Tento typ namáhání je též relevantní například pro kotevní prvky (horninové či fasádní kotvy apod.). V případě prvků s předpjatou FRP výztuží na správné interpretaci tohoto chování závisí schopnost spolehlivě určit mezní únosnost dílce v oblasti podpory. V případě vyčíslení vlivu interakce tahové a posouvající síly na únosnost FRP prutu a stanovení tzv. „obálky porušení“ však bylo ve světě doposud realizováno pouze velmi omezené množství experimentálních studií.



Obr. 19 Mechanismus působení podélné výztuže v místě trhliny (převzato úpravou z [21])

³ 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.

3.1 TEORETICKÉ STANOVENÍ ÚNOSNOSTI FRP VÝZTUŽE PŘI KOMBINOVANÉM PŮSOBENÍ TAHOVÉ A POSOUVAJÍCÍ SÍLY

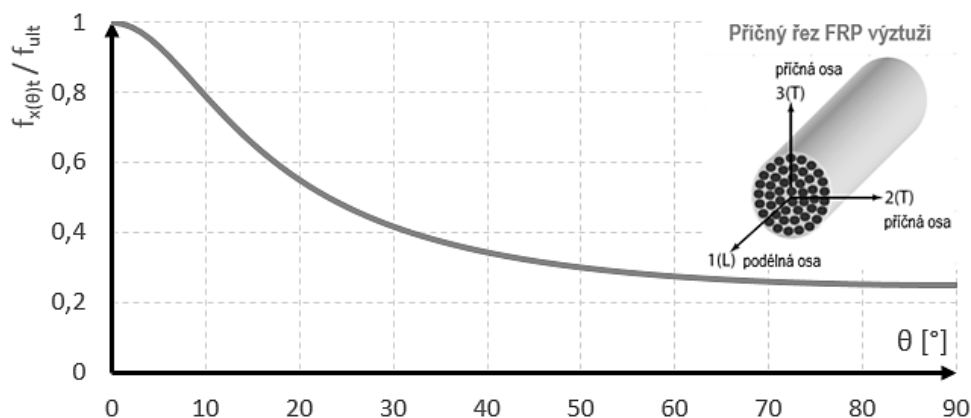
Únosnost kompozitu variuje v závislosti na velikosti úhlu θ , který se může obecně pohybovat v intervalu $\langle 0; 90^\circ \rangle$ a to v závislosti na vzájemném poměru působící normálové a posouvající síly. Mezi v současnosti nejpoužívanější kritéria porušení při kombinaci tahového a smykového namáhání, které lze využít pro kompozitní materiály, patří především přístup „Tsai-Hill“, „Tsai-Wu“, „Hashin“, „Puck“ 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.

fib Bulletin No. 40 [21] pro výpočet únosnosti FRP výztuže při namáhání v obecném směru $f_{x(\theta)t}$ uvádí vztah (4). Tento lze zapsat ve tvaru

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

kde f_{Lt} , resp. f_{Tt} značí tahovou (smykovou) 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 (4) – 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} .

Závislost únosnosti na odklonu výslednice působících sil od střednice prutu stanovenou dle vztahu (4) je možno vyjádřit graficky – viz Obr. 20. Modelová závislost je sestavena pro typickou GFRP výztuž při předpokladu poměru tahové a smykové pevnosti cca 0,25.



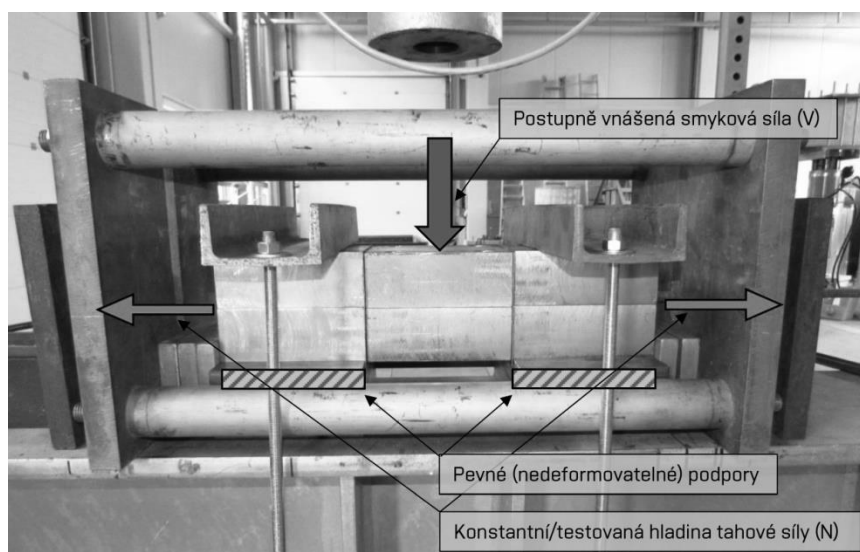
Obr. 20 Závislost únosnosti FRP kompozitu na změně úhlu výslednice zatížení, vztah (4)

Vztah (4) vychází z kritéria porušení Tsai-Hill [44], tj. vychází z teorie (a souvisejících experimentů) určených pro návrh plošného FRP laminátu. Je zřejmé, že tento přístup nemusí plně vystihovat skutečné chování prutu, resp. je třeba jeho experimentálního ověření. V současné době však v této oblasti není k dispozici robustní databáze relevantních zahraničních experimentálních studií. Správný popis kombinovaného působení tahového a smykového napětí v prutu však může být pro některé aplikace zcela zásadní/limitující. Uvedené skutečnosti byly důvodem pro realizaci vlastního experimentálního programu s cílem ověřit platnost predikce dle (4) i pro FRP výztuž.

3.2 NAVRŽENÝ EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Základní mechanické charakteristiky FRP výztuže – tahovou pevnost a pevnost v příčném smyku – lze snadno experimentálně ověřit (např. [8] nebo [35]). Autor této práce však neví o normovaném zkušebním postupu, který by umožnil experimentálně stanovit obálku porušení

FRP prutu při kombinaci působení těchto namáhání. Pro realizaci experimentu tak bylo nezbytné navrhnout vhodný zkušební postup a sestavit zkušební zařízení pro tyto zkoušky. Při návrhu bylo vycházeno ze studie [22] a principu zkoušky TSS [35]. Princip byl však upraven s ohledem na minimalizaci tření mezi jednotlivými částmi zkušebního zařízení a možnost vnesení definované hladiny osově síly. Konfigurace experimentu je patrna z Obr. 21; [47].



Obr. 21 Stanovení únosnosti FRP prutu při působení víceosého namáhání – konfigurace zkoušky

V rámci navrženého experimentu byla testována GFRP výztuž PREFA ReBAR vyrobená ze skelných vláken typu ECR (přibližně 80 % hmotnostně) s 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). Základní mechanické charakteristiky testované výztuže jsou sumarizovány v Tab. 7. Vzorky byly vybrány s ohledem na pokrytí širokého intervalu sledovaných mechanických charakteristik (tahová pevnost 870 – 1350 MPa; pevnost v příčném smyku 215 – 310 MPa). Důležitý se jeví též poměr normálové a smykové únosnosti (poměr T/S).

Tab. 7 Základní mechanické charakteristiky testované 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. 21. 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 vztahu (4).

Postup zatěžování byl rozdělen do tří kroků – v prvním byl aplikován přítlak, který stabilizoval krajní bloky; ve druhém kroku byl vzorek zatížen požadovanou hladinou osově tahové síly a teprve následně byla vnesena posouvající síla, kdy vzorek byl zatěžován až do porušení.

3.3 CHOVÁNÍ GFRP VÝZTUŽE PŘI VÍCEOSÉM NAMÁHÁNÍ – VÝSLEDKY A ZPŮSOB PORUŠENÍ

Při zkouškách bylo získáno značné množství údajů, které jsou zde prezentovány pouze velmi stručně. S ohledem na specifickou kompozici (G)FRP materiálu dochází, v závislosti na intenzitě působící osově síly a jejím odklonu od osy prutu, k následujícím způsobům porušení:

- smykovému porušení v jednom řezu (nízká úroveň působící tahové síly; převládá smykové chování prutu; nosná vlákna jsou přestřižena);
- 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.

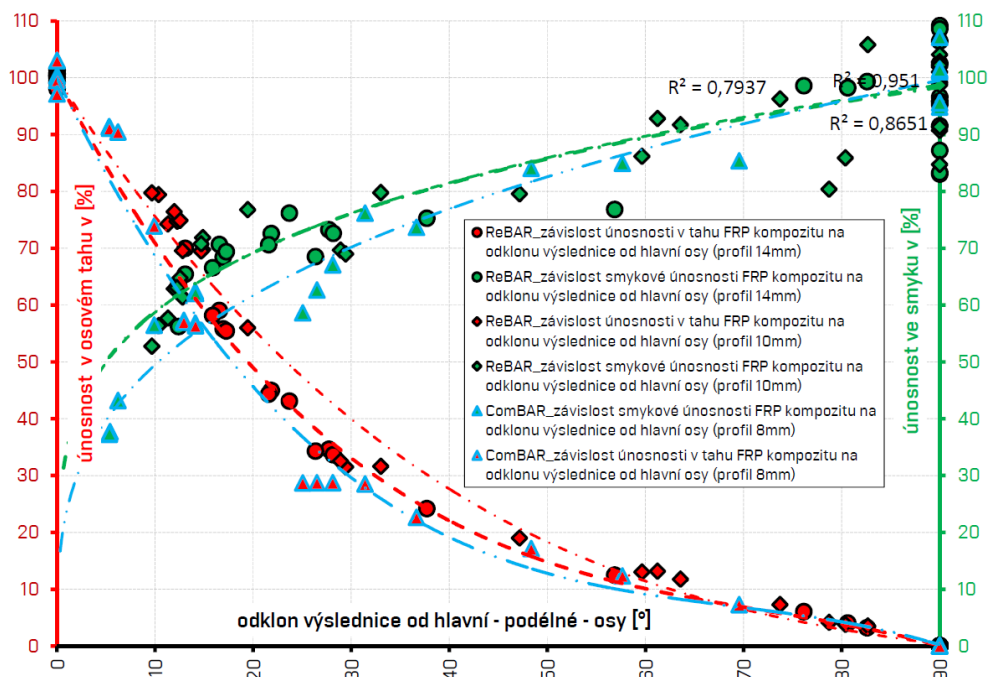
Výše uvedené způsoby porušení jsou pro výztuž PREFA ReBAR patrné z Obr. 22. Mírně odlišné chování bylo pozorováno u vzorků ComBAR s vyšším poměrem T/S (Tab. 7). U těchto byla ve významně vyšší míře pozorována delaminace a to i pro hladiny s nízkou působící normálovou silou. Z obdržných výsledků je patrné, že kompozice prutu (a pravděpodobně poměr T/S) má na způsob porušení vliv. Toto konstatování by však bylo vhodné ověřit i pro další typy FRP výztuží s vyšším poměrem T/S (například CFRP kompozit).



Obr. 22 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

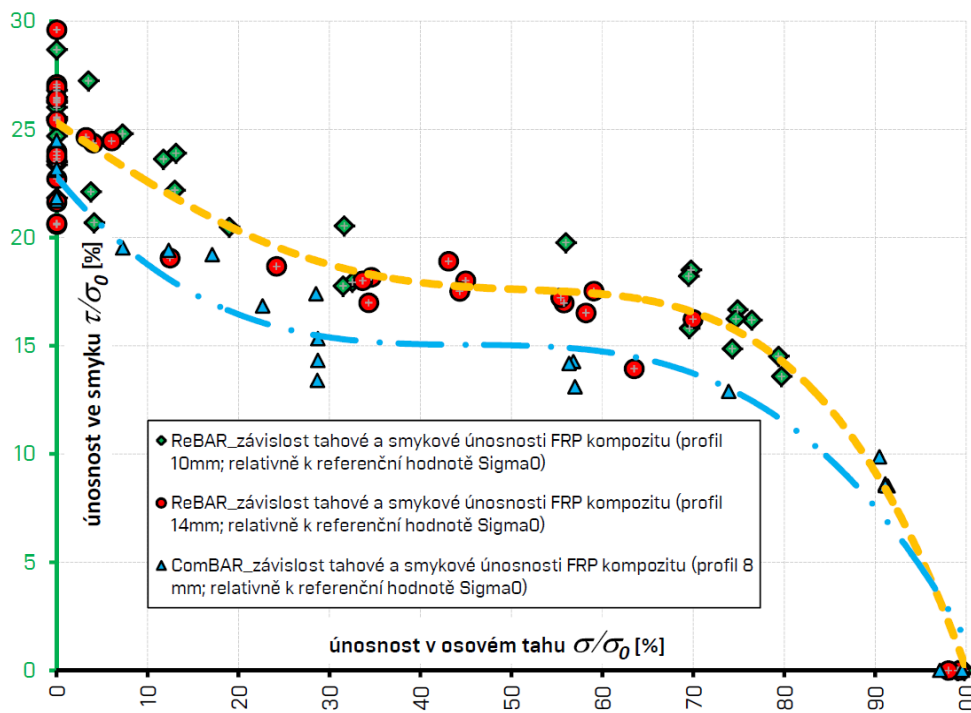
Experimentálně stanovený pokles normálové/tahové a smykové únosnosti vzorků v závislosti na odklonu výslednice od hlavní podélné osy je pro všechny testované typy výztuží zřejmý z Obr. 23. Z uvedeného je velmi dobře patrná významná redukce normálové únosnosti již při malých úhlech θ . Pro úhel odklonu 10° byla experimentálně zjištěna redukce tahové únosnosti v intervalu od cca 25 % (ReBAR profil 10 mm) do 30 % (ComBAR). 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.



Obr. 23 Závislost smykové a tahové únosnosti GFRP výztuže na úhlu odklonu výslednice

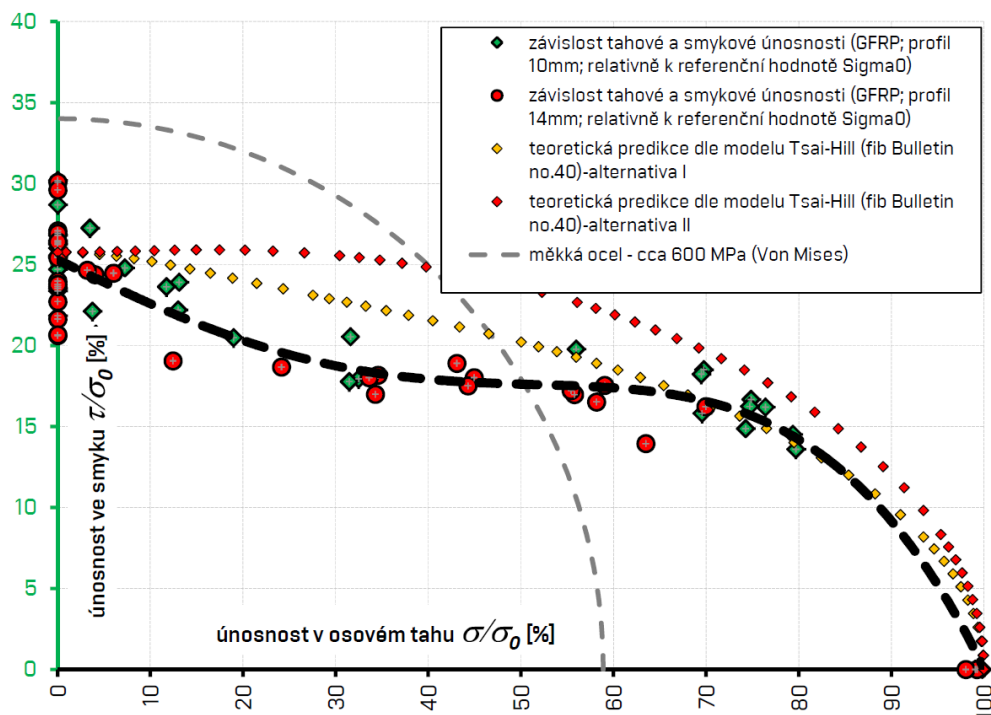
Na Obr. 24 je vynesena závislost smykové a normálové únosnosti normalizované k počáteční/krátkodobé tahové únosnosti vzorku; tj. obálky porušení FRP prutu při kombinaci působení tahové a posouvající síly. U obou typů výztuží je zřejmé obdobné chování, avšak projevuje se vliv odlišného poměru T/S, který zvyrazňuje rozdíl především v oblasti smykového namáhání. Nebyl pozorován významný rozdíl v odezvě výztuží různých průměrů a tahových únosností od shodného výrobce se shodným poměrem T/S.



Obr. 24 Závislost smykové a normálové únosnosti (normalizováno k tahové pevnosti)

3.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ S TEORETICKOU PREDIKCÍ DLE [21]

Výsledné, experimentálně získané hodnoty pro výztuže PREFA ReBAR, byly srovnány s teoretickou predikcí dle vztahu (4) uvedeného v [21]. Na Obr. 25 je zobrazeno kritérium porušení stanovené dle vztahu (4) a to při uvážení středních mechanických charakteristik testované výztuže. Predikce v alternativě I. uvažuje $f_{LTs} = 0,85 \times f_{Tt}$; v alternativě II. je pak $f_{LTs} = f_{Tt}$. Černá čárkovaná křivka značí experimentálně získanou obálku odolnosti FRP prutu (střední hodnoty). Pro úplnost je uvedeno i srovnání s kritériem porušení Von Mises používaným pro běžnou ocel (vyčísleno pro ocel s 600 MPa; normalizováno k tahové pevnosti FRP cca 1 GPa).



Obr. 25 Obálka porušení při namáhání smykovou a normálovou silou a srovnání s teoretickou predikcí; GFRP výztuž PREFA ReBAR

Z výsledků je velmi dobře patrna nižší výstižnost vztahu (4) především v případě stanovení únosnosti vzorku v oblasti tahových napětí $\leq 60 \% \sigma_0$ (alternativa II, Obr. 25). V případě uvážení dalšího snížení hodnoty f_{LTs} , která je z hlediska přesnosti predikce významná, vztah naopak podhodnotí únosnost v oblasti téměř centricky namáhaného prutu (tj. $\theta < 15^\circ$). Uvedené závěry jsou platné pro výztuže s poměrem $\tau_0/\sigma_0 \approx 0,25$.

Prezentované závislosti byly získány při uvážení středních hodnot sledovaných veličin. Z hlediska návrhu je vhodné dále definovat požadovanou spolehlivost, tj. stanovit na základě statistického vyhodnocení charakteristické (5% kvantil) a návrhové hodnoty (0,1% kvantil) sledovaných veličin.

4 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 dlouhodobém chování 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 vlastnosti, 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 (nákladných) či povlakových (z hlediska odolnosti problematických) výztužných vložek.

Prvky pro přerušení tepelného mostu 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.

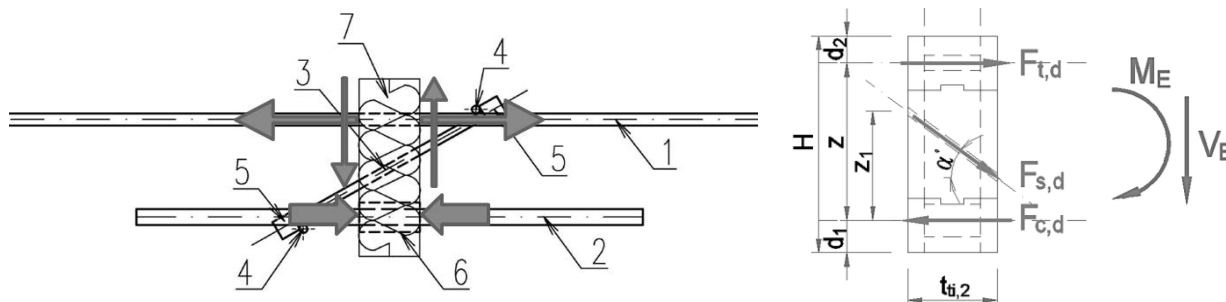
Ve spolupráci s výrobcem kompozitních materiálů, firmou PREFA KOMPOZITY, a.s., byl proveden návrh modulárního systémového dílce pro přerušení tepelného mostu, jenž je vyroben plně z kompozitních materiálů (obchodní název i-KORB). Teoretické řešení, na němž se autor této práce jako klíčový člen týmu podílel, bylo v roce 2016 patentováno (CZ 305718; [29]). 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 textu je pouze velmi stručně představen základní koncept patentovaného řešení a sumarizovány provedené experimentální činnosti a klíčové dosažené výsledky. Není 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.

V tomto odstavci prezentované výsledky 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.

4.1 TEORETICKÝ KONCEPT ŘEŠENÍ A PŘEDPOKLADY PRO NÁVRH IZOLAČNÍHO DÍLCE I-KORB

Idealizované statické chování izolačního dílce je zřejmé z Obr. 26. Návrh prvku byl od počátku uvážen jako modulární. Nosné části je možno variabilně kombinovat a modifikovat (různý počet a průměr nosných prutů) s cílem dosáhnout požadované únosnosti a tuhosti.



Obr. 26 Prvek pro přerušení tepelného mostu z FRP materiálů – patent CZ 305718

V základním zamýšleném provedení dílec i-KORB obsahuje přímý tažený prvek (1) - výztuž - umístěnou v horní části segmentu, smykový prvek (3) - výztuž - procházející šikmo skrz tepelně izolační část, kompozitní tlakové ložisko (6) vložené v dolní části segmentu a tepelnou izolaci (7) zajišťující přerušování 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.

Při návrhu izolačního dílce byly uváženy tyto základní předpoklady (podrobně viz [28]):

- veškeré nosné prvky izolačního dílce jsou provedeny z FRP materiálu;
- počet tahových, smykových i tlačených elementů je variabilní, výrobcem 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 (tlačený 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, tlačené i smykové FRP výztuži je uvažováno lineárně pružné až do porušení a lze jej popsat příslušným pracovním diagramem. Návrhové hodnoty materiálových charakteristik musí být uváženy s přihlédnutím k očekávané degradaci prostředím (vlhkost, teplota atd.) a aplikovanou hladinou trvale působícího zatížení;
- musí být možné zajistit požární ochranu dílce pro dosažení odolnosti alespoň R30.

Byla provedena studie vlivu materiálového řešení, vyztužení a výšky izolačního dílce i-KORB na výslednou ohybovou a smykovou únosnost [28]. 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. Výsledkem byly zatěžovací údaje stanovené vždy pro jeden kus izolačního dílce šířky 250 (330) mm. Hodnoty jsou stručně sumarizovány v Tab. 8.

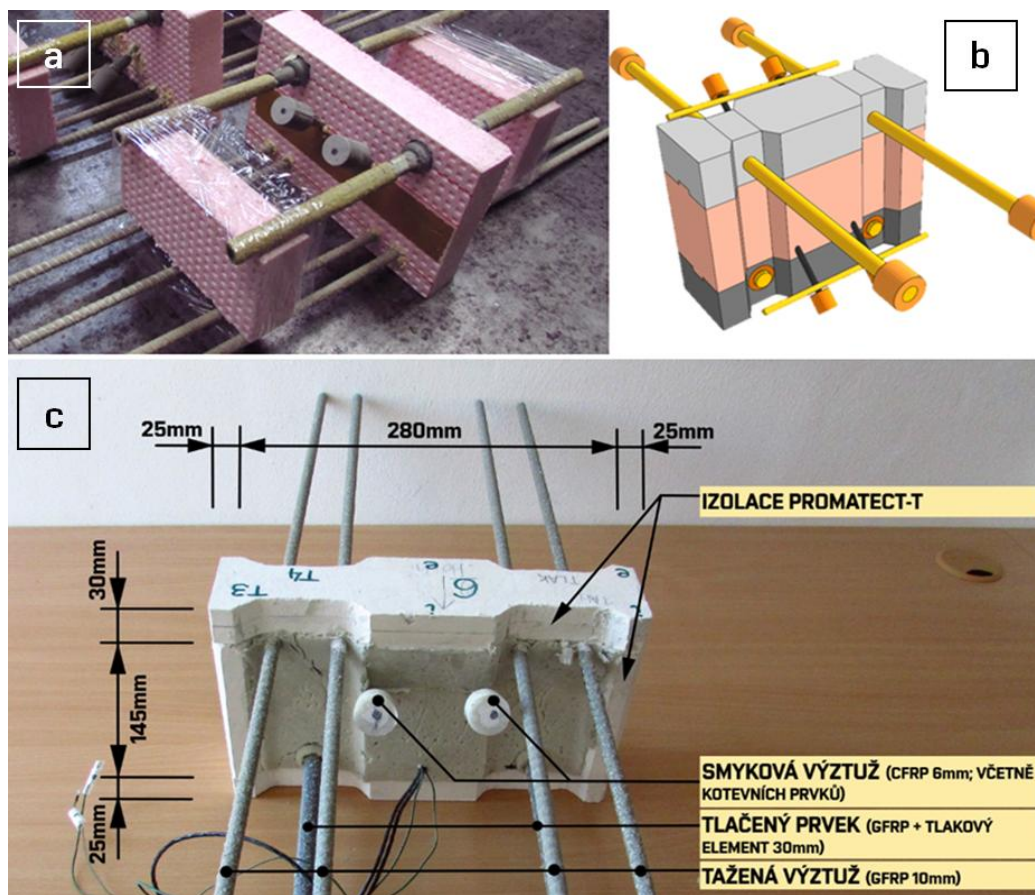
Tab. 8 Ohybová a smyková únosnost izolačního dílce pro různé typy vyztužení a výšky průřezu

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

O dlouhodobé únosnosti izolačního dílce i-KORB rozhoduje především únosnost/spolehlivost tlačeného elementu – tlakového ložiska. Výstižný popis jeho chování je proto klíčový. Žádoucí (navržený) způsob porušení dílce je přetržení tahové výztuže. Smyková únosnost prvku je,

z důvodu velmi omezeného prostoru v kotevní oblasti, determinována především schopností bezpečně zakotvit přenášené složky sil.

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; [41]), je zřejmé z Obr. 27.



Obr. 27 Tepelně izolační dílec i-KORB; a) výroba funkčního vzorku 2015; b) vizualizace ideového řešení 2015; c) finální prototyp určený pro požární zkoušky (2019)

4.2 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. 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 (požadováno minimálně R30);
- tepelné vodivosti/odporu segmentu. Tato část zde není prezentována, neboť se netýká statického návrhu prvku.

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

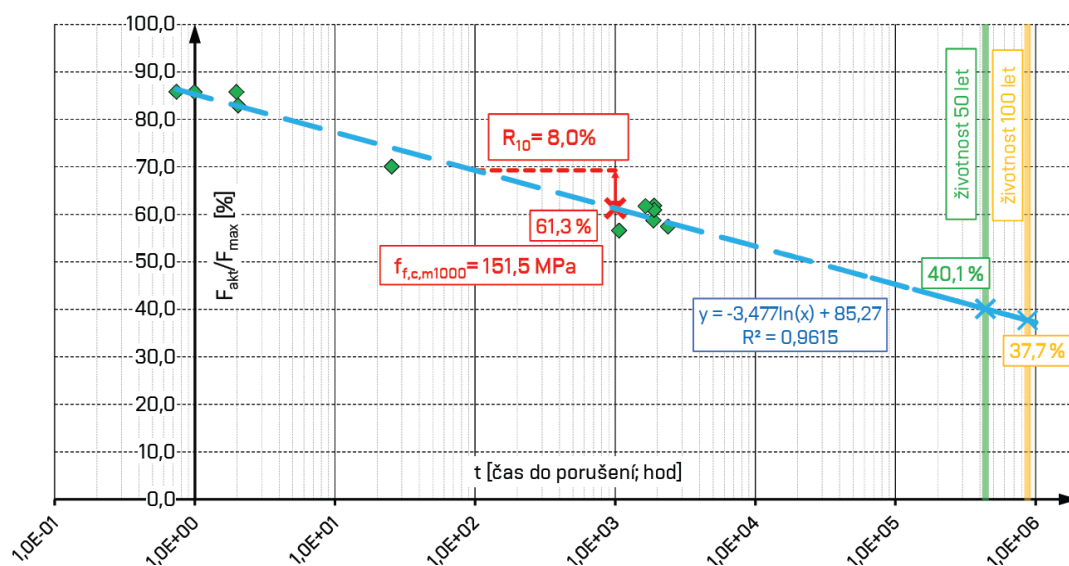
4.2.1 Dlouhodobé zkoušky tlakových elementů

V průběhu řešení projektu TN01000056/05 byly realizovány experimenty s cílem ověřit dlouhodobé chování vyvíjeného řešení tlakového elementu (krátkodobé vlastnosti viz [24]). Tyto zkoušky nejsou standardizovány. Při návrhu experimentu však bylo vycházeno z doporučení [2] a [35] pro realizaci dlouhodobých tahových zkoušek. Sledován byl vliv hladiny působícího zatížení na životnost (tzv. zkoušky „creep“). Provedení testu je zřejmé z Obr. 28.



Obr. 28 Zkouška tlakového elementu; vlevo: zkušební zařízení; vpravo: porušení vzorků

K porušení docházelo vždy obdobným způsobem (viz Obr. 28) a to otláčením styčné plochy ložiska, které bylo doprovázeno přetržením vláken tkaniny. Porušení bylo náhlé, křehké, viz [24]. Na Obr. 29 je zobrazena závislost aplikované hladiny působícího tlakového zatížení na čase kolapsu vzorku. Pro vynesení závislosti byl uvažován degradační model dle [9] a to především z důvodu dobré shody a konzervativnosti predikce. Výsledky je proložena regresní křivka s velmi dobrou shodou (index spolehlivosti $R^2 = 0,96$). Výsledky ukazují na dobré dlouhodobé vlastnosti vyvíjeného tlakového ložiska a tím i správnost zvolené materiálové kompozice. Na základě provedeného vyhodnocení byla stanovena mezní zatížitelnost (střední hodnoty; životnost 100 let) na úrovni cca 38% krátkodobé únosnosti.



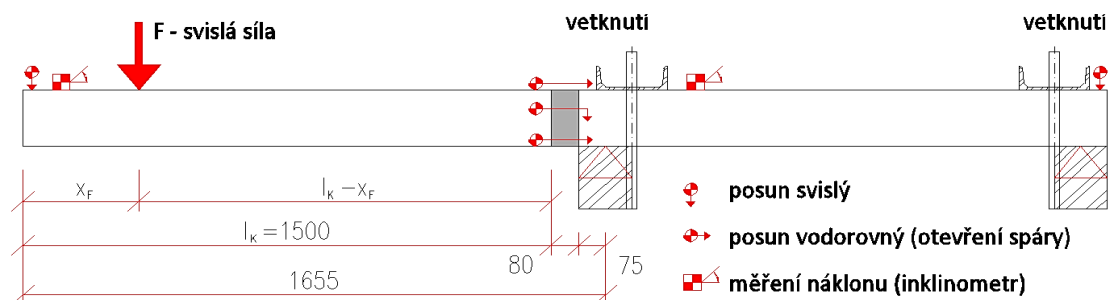
Obr. 29 Závislost životnosti prvku (času do porušení) na hladině působícího zatížení

4.2.2 Full-scale testy dílce osazeného v betonové konstrukci

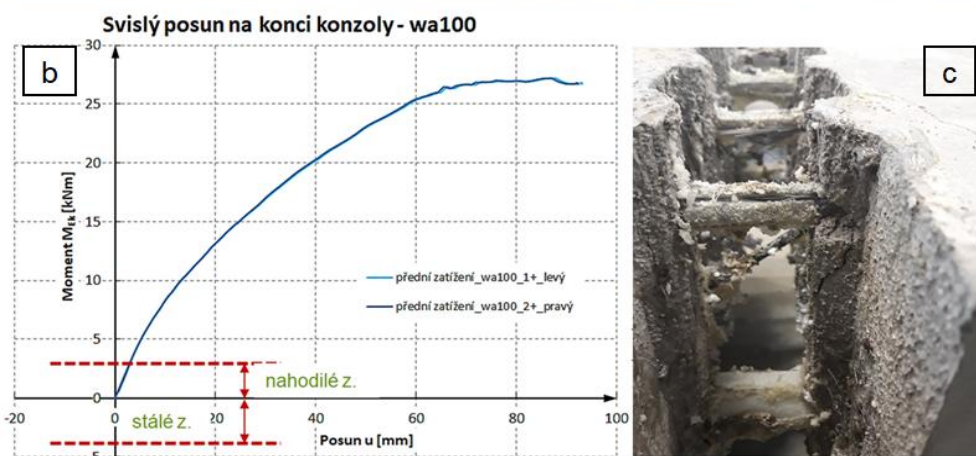
Od počátku vývoje (rok 2015) bylo vyrobeno celkem 20 (+2) velkorozměrových vzorků s cílem ověřit skutečné chování vyvíjeného tepelněizolačního dílce. Realizovány byly nejen krátkodobé statické testy, ale především dlouhodobé zkoušky; zkoušky únavy a požární zkoušky.

Statické zkoušky vzorků

Statické zkoušky byly prováděny vždy do kolapsu vzorku, kdy cílem bylo ověřit návrhové předpoklady a experimentálně stanovit mezní zatížitelnost. Vzorek byl vždy vyhotoven ze dvou betonových částí, kdy jedna sloužila pro fixaci vzorku ve zkušebním rámu (simuluje interiér konstrukce), druhá pak představuje vyloženou část konstrukce – balkon. Segment byl testován ve dvou základních konfiguracích experimentu: a) s převládajícím ohybovým b) a převládajícím smykovým zatížením. Statické schéma a uspořádání typické zkoušky je zřejmé z Obr. 30.



Obr. 30 Uspořádání statické zatěžovací zkoušky, způsob ukotvení vzorku



Obr. 31 Statická zatěžovací zkouška: a) porušení vzorku; b) měřené deformace na konci konzoly; c) detail porušené tahové výztuže

U všech testovaných vzorků došlo při zkouškách k tahovému porušení přetržením horní GFRP výztuže. Tento způsob porušení byl cílený, neboť tahové porušení elementu je, s ohledem na predikci chování, lépe kontrolovatelné. Typický způsob porušení vzorku (i jeho odezva na vnášené zatížení) je zřejmý z Obr. 31. Zde je též patrná oblast využití konstrukce a míra rezervy (nutno ovšem uvážit, že se jedná o krátkodobou zkoušku).

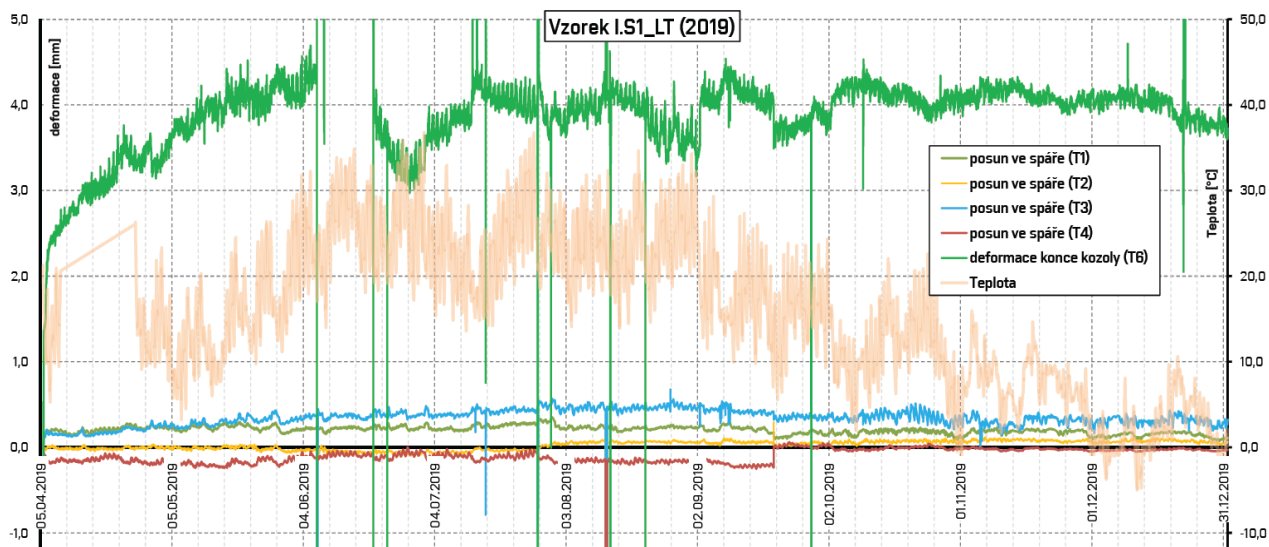
Dlouhodobé zkoušky vzorků

Zcela klíčovou součástí experimentálního programu byla realizace dlouhodobé zkoušky pěti vzorků exponovaných vnějšímu prostředí a působení zatížení. Vzorky pro tuto zkoušku 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 sledované konstrukce a též teplota a vlhkost prostředí. Realizovaný stav (s instalovanou hmotou a zakrytými snímači) je dobře patrný z Obr. 32.



Obr. 32 Umístění vzorků pro dlouhodobou zkoušku na standu v areálu Prefa Brno a.s.

Experiment stále probíhá. Průběžně je získáváno značné množství dat. Pro ilustraci je na Obr. 33 uveden typický průběh záznamu. 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. Nárůst měřené deformace byl patrný především z počátku po vnesení zatížení. V rámci experimentu jsou realizovány i dlouhodobé provozní zkoušky snímačů typu OSTD (tenzometrická ohybová planžeta), kdy je testována jejich životnost ve vnějších podmínkách.



Obr. 33 Dlouhodobá zkouška: záznam dlouhodobého měření na vzorku I.S1_LT za rok 2019

Únavové testy a modální analýza

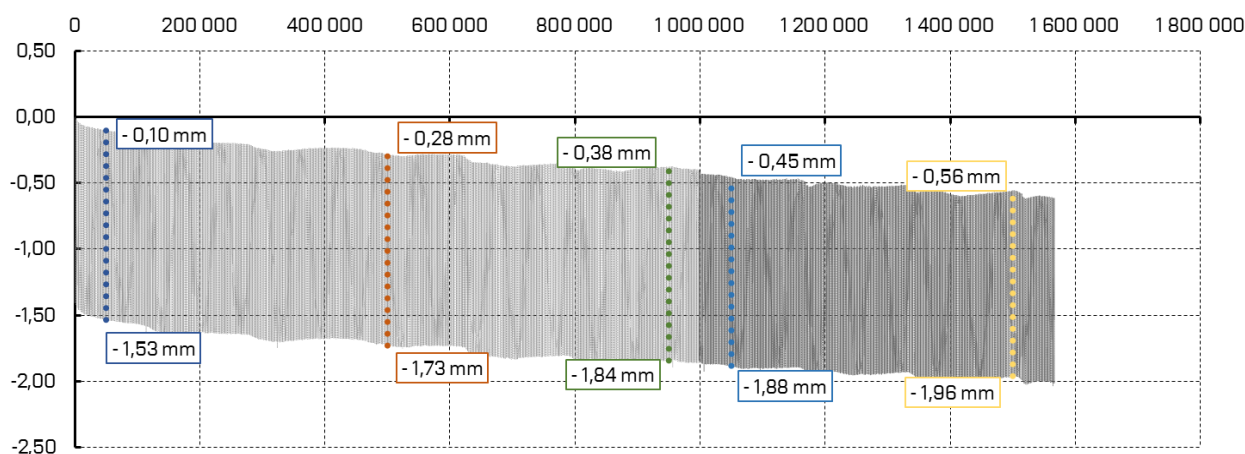
Pro finální vyvinuté řešení byly provedeny též únavové testy, které ověřily odezvu dvojice dílců na působení cyklického zatížení (vzorek č. 8 a č. 14, viz plný text práce). Cílem bylo vzorky podrobit 2 mil. cyklů zatížení a stanovit reziduální únosnost a mechanismus porušení (vnášená síla na konci konzoly odpovídala 175 kg/m^2 ; frekvence 2 Hz). Reálné provedení zkoušky viz Obr. 34.



Obr. 34 Vzorek č. 14: i-KORB_330/T410/S206/C230-h200-P30-I.S3-S před zahájením zkoušky

Odezva testovaného vzorku č. 14 v závislosti na vzrůstajícím počtu cyklů je zřejmá z Obr. 35. Zobrazena je pouze 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). Další měřené veličiny je možno nalézt v plném textu habilitační práce.

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



Obr. 35 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)

Po provedení únavové zkoušky, tj. po dosažení požadovaných 2 mil. cyklů, byly oba testované vzorky podrobeny statické zkoušce s cílem stanovit mezní únosnost. Únosnost vzorku č. 8 nebyla únavovým zatěžováním negativně ovlivněna a nedošlo ke snížení mezní únosnosti. U vzorku č. 14 nebyla možnost srovnání, neboť byl vyroben pouze jeden referenční vzorek (pro požární zkoušku), na kterém bylo nejdříve provedeno cyklování a následně statická zkouška. Pro oba vzorky byla též provedena modální analýza.

Požární zkoušky

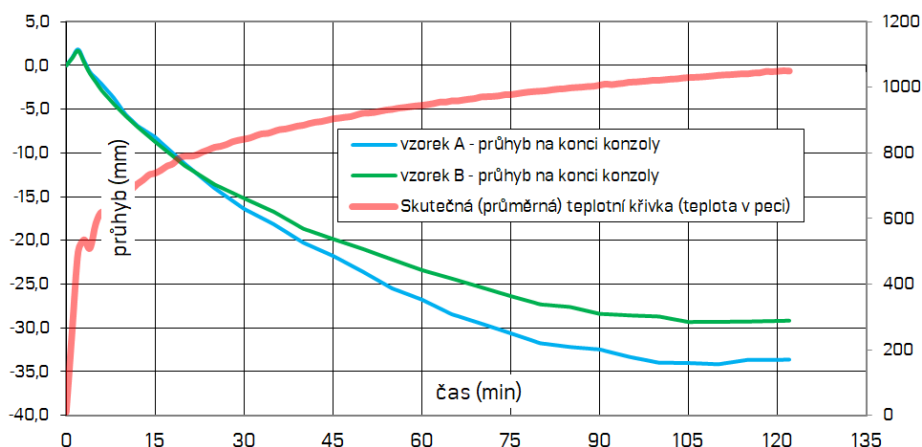
V průběhu vývoje bylo realizováno celkem pět požárních zkoušek, přičemž čtyři se uskutečnily na malých vzorcích a sloužily pro optimalizaci návrhu. Tyto zde pro omezený rozsah textu nejsou prezentovány. Zásadní však byla požární zkouška realizovaná v roce 2019 v certifikované zkušebně PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí [41]. Testované systémové prvky i-KORB byly pro zkoušku osazeny ve dvojici betonových balkonových nosníků, každý o celkovém rozměru 3 080 x 1 350 x 200 mm. Uprostřed délky vzorků byly vloženy tepelně izolační dílce i-KORB, které vzorek dělily na část tepelně exponovanou (konzolu délky 1 580 mm) a na část bez tepelné expozice umístěnou mimo pec zajišťující fixaci/vetknutí vzorku.

Zkouška požární odolnosti byla provedena dle [15] ve vodorovné zkušební peci. Při zkoušce byly testované dílce i-KORB zatíženy vlastní hmotností betonového prvku, ostatním plošným stálým zatížením 50 kg/m^2 , zábradlím a nahodilým zatížením (častá kombinační hodnota dle [18]), které bylo zajištěno ocelovým závažím. V místě vetknutí působil ohybový moment v hodnotě 9,6 kNm. Zatížení bylo vneseno do vzorků 30 minut před zkouškou a dále zůstalo konstantní. Vzorek byl vystaven požárnímu zatížení odpovídající požární křivce dle ISO 834-1, viz Obr. 36.



Obr. 36 Vzorky v peci v průběhu požární zkoušky

Zkouška byla v České Republice vůbec poprvé realizována dle zkušební normy ČSN EN 1365-5:2005 [15]. Jako kritérium porušení byla sledována doba, po kterou si zkušební prvek zachovával svou schopnost přenášet působící zatížení a též průhyb konzoly, resp. mezní rychlost nárůstu průhybu. Limitních kritérií dle [15] ani kolapsu vzorku nebylo dosaženo po celou dobu experimentu, tj. po 122 minut. Zkouška prokázala velmi dobré chování vyvinutého dílce, což dosvědčuje dosažená požární odolnost R120 [41].



Obr. 37 Změna měřené deformace na konci konzoly v průběhu požární zkoušky, [41]

5 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 popisují zkušební postupy pro testování těchto moderních materiálů. Jedná se o

- metodiku stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek, [27] a
- metodiku stanovení únavových vlastností FRP výztuží, [26].

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. Cílem bylo 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 a vyráběné GFRP výztuže.

Poznatky získané z realizovaných výzkumných činností jsou v textu prezentovány pouze stručně, dobře však ilustrují rozsah řešené problematiky. Klíčové výsledky 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. 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;
- 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 [21], kdy uvedený vztah nemusí vést ke konzervativním výsledkům. 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;
- 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, které 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);
- vytvoření dvojice certifikovaných metodik, které se zabývají testováním kompozitních materiálů.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ACI 440.1R-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, American Concrete Institute (ACI), 2015, Farmington Hills, Mich.
- [2] ACI 440.3R-12, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI). 2012
- [3] 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
- [4] Ali, H. A., Benmokrane, B. et al.: 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
- [5] 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.
- [6] ASTM D4475-02 (2016), Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method, ASTM International, 2016
- [7] ASTM D7205/D7205M-06, Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2011, ASTM International
- [8] ASTM D7617/D7617M-11 (2017), Standard Test Method for Transverse Shear Strength of Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2011, ASTM International
- [9] Bank, L.C., Gentry, T. R. et al.: 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.
- [10] Benmokrane, B., Ali, H. A., Mohamed, H. et al.: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, 2016, J. Compos. Constr., Volume 20, Issue 1, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000606
- [11] Benmokrane, B., Hassan, M. et al.: Effect of Different Constituent Fiber, Resin, and Sizing Combinations on Alkaline Resistance of Basalt, Carbon, and Glass FRP Bars, 2020, J. Compos. Constr., Volume 24, Issue 3, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001009
- [12] 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
- [13] CSA S806-12 – Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association (CSA), 2012
- [14] CSA S807-19 - Specification for fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association (CSA), 2019, ISBN: 978-1-55491-394-7
- [15] ČSN EN 1365-5:2005 Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 5: Balkony a rampy
- [16] ČSN EN 14649 (72 3412) Betonové prefabrikáty - Zkušební metoda pro určení stálosti pevnosti skleněných vláken v cementu a betonu (Zkouška SIC).
- [17] ČSN EN 15422 (72 3413) Betonové prefabrikáty - Specifikace skleněných vláken pro výztuž malt a betonů
- [18] ČSN EN 1990 ed.2 (73 0002) Zásady navrhování konstrukcí, 2015

- [19] 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
- [20] Dejke, V.: Durability of FRP reinforcement in concrete, Ph.D. thesis, Dept. of Building Material, Chalmers Univ. of Technology, 2001, Sweden, 205.
- [21] *fib* Bulletin no. 40, "FRP reinforcement in RC structures", International federation for structural concrete, 2007, Lausanne, Switzerland, ISBN 978-2-88394-080-2
- [22] 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.
- [23] Girgle, F., Bodnárová, 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
- [24] Girgle, F., Štěpánek, P., Laníková, I., 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
- [25] Girgle, F.; Bodnárová, L. a kol.: Experimental Verification of Behavior of Glass and Carbon Fibers in Alkali Environment; *Key Engineering Materials Vol. 677* (2016) pp 43-48
- [26] Girgle, F.; Kostiha, V.; Januš, O.; Štěpánek, P.; Prokeš, J.: Metodika stanovení únavových vlastností FRP výztuží; certifikovaná metodika; VUT v Brně, 2020
- [27] Girgle, F.; Kostiha, V.; Matušíková, A.; Štěpánek, P.: Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek; certifikovaná met; VUT v Brně, 2016
- [28] 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, FAST; 06/2017
- [29] Girgle, F.; Štěpánek, P.; Prokeš, J.; VUT v Brně PREFA Kompozity a.s.: Sestava prvků pro kotvení. 305718, patent. (2016)
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Imjai, T., Guadagnini, M., Pilakoutas, K. et al.: 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, 2020, doi:10.1680/jstbu.19.00135
- [34] 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>
- [35] ISO 10406-1:2015, Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete -- Test methods -- Part 1: FRP bars and grids; 2015; Geneva, Switzerland

- [36] Januš, O.; Girgle, F. et al.: Effect of Surface Treatment and Test Configuration on Bond Behaviour of GFRP Rebars. Paris: Composites in Civil Engineering, 2018. s. 905-914.
- [37] Karbhari, V. M. (Ed.). Durability of composites for civil structural applications, Elsevier, 2007, ISBN 978-0-8493-9109-5
- [38] Manalo, A., Maranan, G., Benmokrane, et al.; 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>.
- [39] 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; J. Compos. Constr.; Volume 25; Issue 2; doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001102
- [40] 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
- [41] 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
- [42] Razaqpur, A.; Spadea, S.: Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups“, J. Compos. Constr., 10.1061/ (ASCE) CC.1943-5614.0000483, 2014
- [43] Robert, M.; Wang, P. et al.: Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing of FRPs: Should there be any limitations?, J. Compos. Constr., 14 (4) (2010)
- [44] S. W. Tsai: Strength Theories of Filamentary Structures, Fundamental Aspects of Fiber Reinforced Plastic Composites, 1968
- [45] Serbescu, A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Mechanical Characterization of Basalt FRP Rebars and Long-Term Strength Predictive Model. J. Compos. Constr., 2014, 19(2), doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000497
- [46] 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
- [47] Štěpánek, P., Girgle, F., Kostiha, V., Januš. O: Zpráva z řešení projektu FV10505 na pracovišti VUT, FAST, UBZK za rok 2019
- [48] Štěpánek, P., Girgle, F., Bodnářová, L. a kol.: Roční zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu TAČR TA04010881 v roce 2014, VUT v Brně, FAST, Brno, 12/2014
- [49] Štěpánek, P., Girgle, F., Bodnářová, L. a kol.: Roční zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu TAČR TA04010881 v roce 2017, VUT v Brně, FAST, Brno, 12/2017
- [50] Tannous, F. E. 1998. Environmental effects on the mechanical properties of E-glass FRP rebars. ACI Mater. J., 95(2), 87-100.
- [51] 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
- [52] Weber, A.: Gaps between short term and long term design for internal FRP reinforcement; ACIC 2017, pp. 84-90

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.