



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**ODOLNOST FRP KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VŮČI
PŮSOBENÍ VYBRANÝCH AGRESIVNÍCH PROSTŘEDÍ**

FRP COMPOSITE MATERIALS RESISTANCE TO THE EFFECTS OF SELECTED CORROSIVE
ENVIRONMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Mičkal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
PRACOVISTĚ	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Petr Mičkal
NÁZEV	Odolnost FRP kompozitních materiálů vůči působení vybraných agresivních prostředí
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforce with FRP Bars ACI 440.1R-03
Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures ACI 440.2R-02
Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI 440.3R-04
Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons ACI 440.4R-04
Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI 440R-07
FRP reinforcement in RC structures, Technical Report fib CEB-FIP, 2007
Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007
Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2011-2016), České a zahraniční technické normy, Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Kompozitní materiály s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží (FRP) nachází ve stavebnictví uplatnění především pro speciální aplikace v extrémních agresivních prostředích. Kromě pevnostních parametrů je velmi důležitá i odolnost těchto materiálů vůči působení agresivních látek.

V teoretické části diplomové práce proveďte rešerši literatury z oblasti trvanlivosti FRP profilů, zejména se zaměřte na trvanlivost FRP profilů užitých jako vnitřní výztuž do betonu. Zaměřte se na odolnost vůči působení různých teplot a vůči vlhkosti, včetně požadavků na ověřování trvanlivosti FRP v této oblasti. Vyhledejte informace o odolnosti FRP materiálů vůči působení záporných teplot.

V experimentální části diplomové práce definujte podmínky pro laboratorní testování odolnosti FRP výztuží vůči působení teploty a vlhkosti.

Sledujte vlastnosti FRP výztuží v prostředí s alkalickým prostředím dle ACI 440,3R-04, při uložení v roztocích o různých teplotách (20 °C, 40 °C a 60 °C). Popište změny vlastností FRP výztuží v čase při definovaném uložení pomocí destruktivních zkoušek a sledováním na optickém mikroskopu.

Zhodnoťte vliv prostředí na vlastnosti FRP výztuží, zejména na pevnostní charakteristiky.

Doporučený rozsah diplomové práce min. 80 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá sledováním trvanlivosti FRP výztuží v alkalickém prostředí při různých teplotách expozice. V teoretické části diplomové práce je obecný popis FRP kompozitů, výroba FRP výztuží technologií pultruze, odolnost těchto kompozitu v agresivní alkalickém prostředí a vliv teploty na rychlost a způsob degradace. V experimentální části této diplomové práce byly FRP výztuže uloženy v alkalickém prostředí a temperovány na různou teplotu (20 °C, 40 °C, 60 °C). Následně byly popsány a vyhodnoceny optické a fyzikální změny výztuží za použití optické mikroskopie a destruktivních zkoušek výztuží.

KLÍČOVÁ SLOVA

FRP, vlákny vyztužený polymer, trvanlivost, degradace, alkalické prostředí, vliv teploty, optická mikroskopie, kríková zkouška

ABSTRACT

This thesis deals with monitoring of the durability of FRP reinforcements in alkaline environments with differing temperature exposures. The theoretical part of the thesis consists of a general description of the FRP composites, the manufacturing of these FRP reinforcements using pultrusion technology, the resistance of these composites in aggressive alkaline environments, and the influence of temperature on the speed and manner of degradation. In the experimental part of this thesis, the FRP reinforcements were placed in an alkaline environment tempered at different temperatures (20 °C, 40 °C, 60 °C). Subsequently, any optical physical changes of the reinforcements were described and evaluated by the use of optical microscopy and the destructive tests of these reinforcements.

KEYWORDS

FRP, fiber-reinforcement polymer, degradation, durability, alkaline environment, influence of temperature, optical microscopy, creep test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Petr Mičkal *Odolnost FRP kompozitních materiálů vůči působení vybraných agresivních prostředí*. Brno, 2016. 124 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 12. 2016

Bc. Petr Mičkal

autor práce

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji své vedoucí diplomové práce Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. František Girgle, Ph.D, Ing. Vojtěch Kostiha, Ing. Ondřej Januš a Ing. Tomáš Jarolím za odbornou pomoc, cenné rady a asistenci při vyhodnocení laboratorních zkoušek.

V Brně dne 21. 12. 2016

Bc. Petr Mičkal

autor práce

Obsah

ÚVOD	11
CÍLE PRÁCE	12
I. TEORETICKÁ ČÁST	13
1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY – FRP VÝZTUŽE	13
1.1 OBECNÉ VLASTNOSTI FRP KOMPOZITŮ	14
1.1.1 Hustota	15
1.1.2 Koeficient tepelné roztažnosti	16
1.1.3 Chemické vlastnosti	16
1.1.4 Mechanické vlastnosti	17
1.2 VLÁKNA VÝZTUŽUJÍCÍ POLYMER	18
1.2.1 Skelná vlákna	19
1.2.2 Uhlíková vlákna	20
1.2.3 Aramidové vlákna	21
1.2.4 Čedičová vlákna	22
1.3 MATRICE	23
1.3.1 Mechanická pevnost matrice	24
1.3.2 Chemická odolnost matrice	25
1.3.3 Typy polymerních matric užívaných pro FRP výztuže	26
2. POPIS A VÝROBA FRP VÝZTUŽÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	28
2.1 POPIS A TYPY KOMPOZITNÍCH VÝZUTŽÍ	28
2.1.1 Povrch výztuží	29
2.1.2 Kvalita výrobku	29
2.1.3 Výroba výztuží	30
3. TRVANLIVOST FRP VÝZUŽÍ	31
3.1 Vliv alkálií	32
3.2 Vliv vlhkosti	33

3.3	Vliv chloridů	35
3.4	Vliv teploty	35
3.4.1	Vliv mrazu a zvýšené teploty	35
3.4.2	Požární odolnost	37
3.5	Vliv UV záření	38
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	39
4.	METODIKA PRÁCE	39
5.	OVĚŘENÍ TRVANLIVOSTI FRP VÝZTUŽÍ V ALKALICKÉM PROSTŘEDÍ	39
5.1	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 1000 HOD	41
5.2	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 1000 HOD	50
5.3	PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 1000 HOD	56
5.4	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 1000 HODINÁCH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	59
5.5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 1000 HODINÁCH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	60
5.6	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 90 DNÍ	62
5.7	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 90 DNÍ	68
5.8	PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 90 DNÍ	74
5.9	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 90 DNECH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	77
5.10	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 90 DNECH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	78
5.11	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 180 DNÍ	80
5.12	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 180 DNÍ	86
5.13	PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 180 DNÍ	92
5.14	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 180 DNECH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	95

5.15 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ DESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE	96
5.16 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 180 DNECH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	101
6. DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY VÝZTUŽE PŘI DLOUHODOBÉM ZATÍŽENÍ	105
6.1 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – CREEP TEST	106
6.2 VYHODNOCENÍ DESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – CREEP TEST	109
7. OPTICKÁ MIKROSKOPIE	110
7.1 OPTICKÁ MIKROSKOPIE – PŮSOBNÍ ALKALICKÉHO PROSTŘEDÍ A VLIV TEPLoty	110
7.2 OPTICKÁ MIKROSKOPIE – PORUŠENÍ VLIVEM DLOUHODOBÉHO TAHOVÉHO NAMÁHÁNÍ	113
ZÁVĚR	115
8. POUŽITÁ LITERATURA	117
9. SEZNAM OBRÁZKŮ	120
10. SEZNAM TABULEK	123

ÚVOD

Při návrhu nových stavebních konstrukcí je jedním z rozhodujících hledisek výběr použitých materiálů. Tento výběr je omezen požadavky na fyzikálně-mechanické charakteristiky použitých materiálů a jejich finanční dosažitelností. Po zavedení kompozitních materiálů na stavební trh se tak možnosti při návrhu konstrukcí značně rozšířily. Materiálové charakteristiky kompozitů (vytvořených na bázi uhlíkových, skleněných, aramidových či jiných vláken) jsou vhodné pro využití při vyztužování betonových či zděných konstrukcí. Z historického hlediska je jedním z nejpoužívanějších materiálů pro vyztužování betonu ocel. Díky své dostupnosti a vlastnostem našla uplatnění ve všech průmyslových odvětvích. Vzájemným spojením výhodných vlastností betonu a oceli vznikl ve stavebnictví nejrozšířenější a nejvíce používaný kompozit současnosti – železobeton. Pro svou komplexnost jsou železobetonové prvky projektanty umísťovány ve všech typech prostředí a aplikačních oblastech, a to i tam, kde je životnost těchto prvků vlivem environmentálního namáhání značně omezená. Splnění normami požadované životnosti konstrukčních prvků (při zohlednění způsobu jejich užívání a působení negativních vlivů okolního prostředí) často vede nejen k navýšení pořizovací ceny, ale vlivem degradace materiálů během užívání prvku také k vynaložení nepřiměřených nákladů spojených s jejich údržbou a sanací. Ve specifických případech mohou náklady na udržovací a sanační práce přesáhnout pořizovací cenu nové konstrukce. Pro takovéto případy je využití FRP výztuží výhodné. [7], [8]

Základním krokem při vývoji kompozitních výztuží je volba vhodných komponent. Materiál vhodný pro vyztužování betonových prvků a konstrukcí musí být dostatečně chemicky odolný (jak vzhledem k předpokládané vlhkosti prostředí, tak i vzhledem k počáteční vysoké alkalitě betonu) a musí být vhodný pro předpokládanou technologii výroby. Při volbě materiálů a návrhu složení kompozitní výztuže se vychází z všeobecně známých vlastností základních materiálů a z laboratorních zkoušek. Nespornou nevýhodou (především v očích investora) je vyšší pořizovací cena kompozitní výztuže. Tato nevýhoda je však z velké části eliminována při kalkulaci celého životního cyklu konstrukce a tím i všech nákladů, které musí investor vynaložit během životnosti konstrukce (především údržba a sanační práce). [7], [8]

CÍLE PRÁCE

Cíle teoretické části této diplomové práce je zpracování rešerše literatury z oblasti trvanlivost FRP profilů a jejich komponent, zejména se zaměřením na trvanlivost FRP profilů užitých jako výztuž do betonu. Zaměřujeme se na odolnost vůči působení různých teplot prostředí (při zvýšených teplotách i při působení záporných teplot) a vůči vlhkosti, včetně požadavků na ověřování trvanlivosti FRP. Při zkoumání trvanlivosti bude brán ohled jak na jednotlivé komponenty výztuže, tak jejich synergetický účinek mezi sebou. Dále je provedena rešerše výroby FRP profilů s popisem metodiky a způsobu výroby FRP profilů technologii pultruze.

Cílem praktické (experimentální) části je zkoumání vlivu agresivního prostředí na výztuže PREFAB REBAR GFRP uložené v alkalickém roztoku dle směrnice ACI 440.3R-04 (nyní řešeno v ACI 440.3R-12), které má stanovenou hodnotu pH, přičemž její hodnota bude průběžně kontrolována. Výztuže podrobíme destruktivním zkouškám dle směrnice ACI 440.3R-04 (nyní řešeno v ASTM D7205) za účel vyhodnocení změn mechanických vlastností v důsledku degradace v agresivním prostředí a provedeme optickou mikroskopii pro zjištění změn struktury a posouzení hloubky a míry degradace. Dále se zaměříme na chování výztuží při dlouhodobém zatěžování.

Výstup této diplomové práce je zhodnocení chování FRP výztuží (mechanické vlastnosti) při působení zvýšených teplot, agresivního prostředí a dlouhodobého zatěžování. Zjištěné hodnoty budou porovnány se zahraničními zdroji.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY – FRP VÝZTUŽE

První kompozitní materiály byly uměle vytvořeny např. přidávkem kousků slámy do hlíny a jílu, tak vznikl materiál pro stavbu stěn obydlí, který měl lepší vlastnosti než samotná hlína. Podstatný pokrok v rozvoji kompozitních materiálů byl zaznamenán v minulém století, kdy se objevil beton vyztužený ocelí. ^[6]

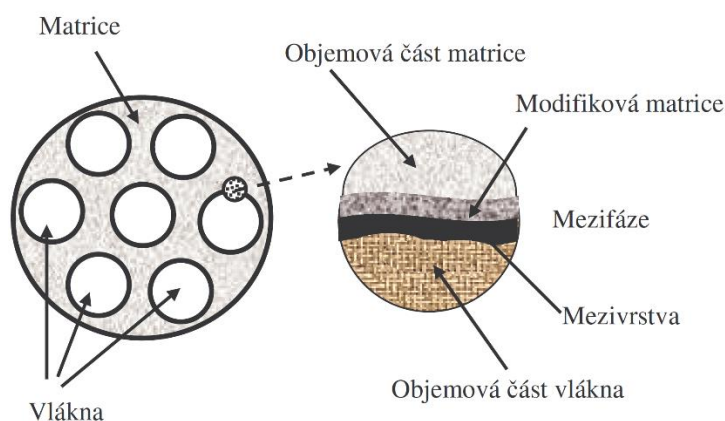
Kompozitní materiály (kompozity) jsou složené materiály, skládající se ze dvou či více složek, z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné. Vhodnou kombinací složek s využitím příslušných výrobních technologií je možné vytvořit nehomogenní anizotropní materiálovou strukturu, která odpovídá deformačním a pevnostním požadavkům na příslušné těleso. Ve srovnání s klasickými kovovými materiály je možné zvýšit pevnost (zejména měrnou pevnost), tuhost, lomovou houževnatost, odolnost proti korozi, upravit tepelnou a elektrickou vodivost, redukovat hmotnost. Nevýhodou je na druhé straně většinou komplikovanější výrobní technologie, vyšší cena, menší odolnost vůči vysokým teplotám, přítomnost zbytkových napětí z titulu výrobní technologie atd. ^[9]

Během návrhu a výroby kompozitního materiálu má být vyvolán synergetický účinek v jeho struktuře tak, aby bylo možno získat nový materiál s lepšími vlastnostmi, než jsou vlastnosti jednotlivých složek nebo jejich součet. Mezi kompozitní materiály patří i FRP výztuže neboli výztuže na materiálové bázi polymerů vyztužených vlákny (uhlíkové, skleněné, aramidové). ^{[6], [7]}

FRP kompozity lze obecně popsat jako materiály tvořené dvěma složkami – nosnou složkou vyskytující se ve formě jednosměrně orientovaných vláken a pojivovou složkou tvořenou polymerní matricí. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány především typem a vzájemným poměrem obou složek. FRP výztuže se dělí na výztuže externí, které se využívají pro dodatečné zesilování konstrukcí namáhaných normálovou silou, ohybovým, resp. kroutícím momentem nebo kombinací uvedených namáhání (lamely, tkaniny) a výztuže interní z kompozitů na bázi skleněných (GFRP), uhlíkových (CFRP) a aramidových (AFRP) vláken, které lze využívat pro zesilování nově prováděných konstrukcí (nosná, rozdělovací či smykové výztuž), a které jsou i předmětem zkoumání této diplomové práce. ^{[10], [6]}

1.1 OBECNÉ VLASTNOSTI FRP KOMPOZITŮ

FRP kompozity se skládají z výztuže a matrice. Největší předností kompozitů s organickými matricemi je kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. Vlastnosti všech složek kompozitu je nutné dokonale propojit na jejich rozhraní. Tímto dokonalým propojením všech složek na rozhraní zajistíme co možná nejlepší přenos napětí při zatěžování. Nositelem tuhosti a pevnosti u dlouhoválnových kompozitů, jak se výztuže FRP také nazývají, jsou vyztužující vlákna, matrice k nim výrazně nepřispívá. Vlákna mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a modul pružnosti ve srovnání s polymerní matricí. Polymerní matrice se při vnějším namáhání deformuje více než vyztužující vlákna a na jejich rozhraní (mezivrstva) tedy vznikají smykové síly. [6]



Obrázek 1 Schématické znázornění kompozitní mezifáze [6]

V poslední době, kompozitní materiály vyrobené z vláken vložených do polymerní pryskyřice, také známý jako vlákna vyztužené polymery (FRP), se staly alternativou k vyztužení pro betonových konstrukcí. Vzhledem k tomu, že FRP materiály jsou nemagnetické a nekorozivní, lze se jejich použitím vyhnout problémům elektromagnetického rušení a koroze oceli v konstrukci. Dále také FRP výztuže vykazují několik vlastností (např. vysoká pevnost v tahu), které je činí vhodné pro použití jako konstrukční výztuž. Mechanické chování FRP výztuže se liší od chování ocelové výztuže. Z tohoto důvodu je nutné měnit filozofii designu betonových konstrukcí vyztužených pomocí FRP výztuže. FRP materiály jsou anizotropní a vyznačují se vysokou pevností v tahu pouze ve směru výztužných vláken. Toto anizotropní chování má vliv na pevnosti ve smyku. Kromě toho jsou FRP materiály pružné až do porušení. [11]

Několik zemí, ke kterým patří např. Japonsko nebo Kanada, vytvořily speciální konstrukční postupy, určené pro použití FRP výztuže pro betonové konstrukce. V Severní

Americe jsou analytické a experimentální fáze z velké části dokončeny a je zde úsilí vytvořit doporučení pro konstrukční řešení s použitím FRP výztuží. ^[11]

Korozi odolná povaha FRP výztuže je významným přínosem pro konstrukce ve vysoce korozivním prostředí, jako jsou mořské vlnolamy a jiné mořské konstrukce. V našich zeměpisných šířkách je lze s výhodou použít např. při konstrukci mostovek vystavených rozmrazovacím solím. Dále pak v nosných částech budov, které jsou vybavené zobrazovacími jednotkami magnetické rezonance (nemocnice) nebo jiná zařízení citlivá na elektromagnetické pole. Jelikož, jsou FRP výztuže dražší oproti tradiční ocelové výztuží, její použití by se mělo omezit pouze na aplikace, kde jejich vlastnosti přinášejí do konstrukce významný benefit pro danou konstrukci. Vzhledem k nedostatku zkušeností s použitím FRP výztuží, se FRP výztuž nedoporučuje tam, kde je vyžadována přerozdělování momentů (přerozdělení znamená snížení ohybových momentů nad podporami a zvýšení ohybových momentů uprostřed rozpětí, přičemž rozdělení momentů zůstává v rovnováze s působícími zatíženími). Mezi nevýhody využití kompozitů jako náhrady vázané ocelové výztuže patří především skutečnost, že jejich vlastnosti jsou v dlouhodobém horizontu negativně ovlivněny zásaditostí betonu, které se pohybuje u nových betonů v rozsahu pH 12,4 až 13,7. Matrice kompozitních výztuží je navržena tak, aby ochránila vlákna před působením těchto látek, ale hydrolyzou, plastifikací a bobtnáním může dojít k degradaci matrice samotné. Podstatnou nevýhodou především levnějších GFRP výztuží je jejich nízký modul pružnosti (v porovnání s ocelí), který snižuje výslednou tuhost konstrukce. FRP výztuže mají také nižší odolnost vůči působení vysokých teplot. ^{[11], [12], [7]}

1.1.1 Hustota

FRP profily mají hustotu v rozmezí od 1,25 do 2,1 g/cm³, tedy přibližně jednu šestinu až jednu čtvrtinu oceli. Snížená hmotnost vede ke snížení nákladů na dopravu a může usnadnit manipulaci s profily přímo na stavbě. ^[11]

Tabulka 1 Typické hodnoty hustoty FRP výztuží ^[11]

Matrice \ FRP	CFRP	AFRP	GFRP	Ocel
Polyester	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7850
Epoxy	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Vinyl ester	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

1.1.2 Koeficient tepelné roztažnosti

Součinitel tepelné roztažnosti FRP profilů se liší v podélném a příčném směru v závislosti na typu vláken, typu matrice a objemovém podílu vláken. V podélném směru je koeficient tepelné roztažnosti určován vlastností vláken, zatímco v příčném směru je koeficient určený vlastností pryskyřice (matrice) (viz tabulka 2).

Tabulka 2 Typické hodnoty součinitele tepelné roztažnosti pro vybrané FRP výztuže ^[11]

Směr	Součinitel tepelné roztažnosti [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]			
	Ocel	GFRP	CFRP	AFRP
Podélný, α_L	11.7	6.0 až 10.0	-9.0 až 60.0	-6.0 až -2.0
Příčný, α_T	11.7	21.0 až 23.0	74.0 až 104.0	60.0 až 80.0

Všimněte si, negativního koeficientu tepelné roztažnosti, který znamená, že se materiál zvýšenou teplotou smršťuje, a naopak se sníženou teplotou se bude rozšiřovat. Pro porovnání beton má koeficient tepelné roztažnosti, který se liší od $7.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ až $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a obvykle se předpokládá, že je izotropní. ^{[11], [13]}

1.1.3 Chemické vlastnosti

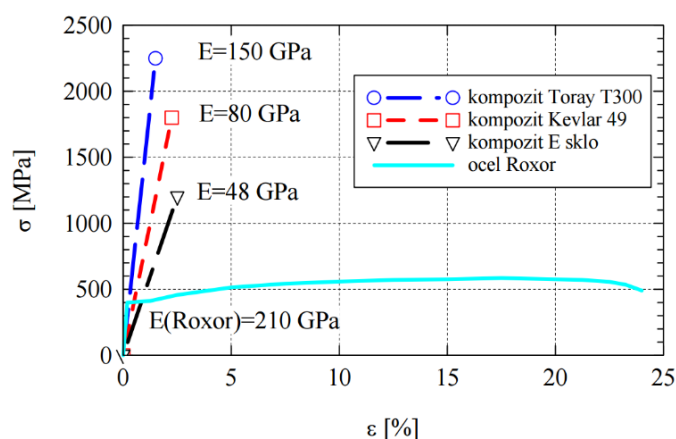
Chemické vlastnosti materiálů jsou určovány jejich schopností chemicky reagovat s okolním prostředím (kapalným, plynným). Chemické reakce vedou vždy ke změně chemického složení a téměř ve všech případech i k zhoršení užitečných vlastností. Chemická reaktivita má proto rozhodující význam pro korozní procesy, tj. pro postupné znehodnocování materiálů účinkem vnějšího prostředí. Pro posuzování životnosti je důležitá rychlost chemických reakcí neboli jejich reakční kinetika. Vyjadřuje se jako úbytek hmotnosti výchozí látky nebo přírůstek hmotnosti reakčního produktu v jednotce objemu za určitý časový interval. U polymerů nedochází k elektrochemické korozi, ale např. u FRP s uhlíkovými vlákny v kontaktu se slitinami Al, Zn a Mg mohou vytvářet katodu elektrochemického článku a působit rozpouštění kovů.

O rychlosti poškozování polymeru nízkomolekulární látkou rozhoduje rychlost difuze a vzájemná chemická reaktivita. Difuze může probíhat jako čistě fyzikální proces – makromolekuly jsou difundující látkou oddalovány, polymer bobtná, měkne a stává se méně pevným. Napětí mezi různě nabobtnanými částmi (povrch a kompak) způsobuje vznik trhlinek. Spolupůsobení mechanického zatížení způsobuje tzv. korozi pod napětím. Při chemických reakcích může dojít ke štěpení vazeb makromolekul (ztrátě pevnosti), případně zabudování nových skupin do makromolekul polymeru, který následně tvrdne a křehne. Obecně

lze říci, že kinetika chemických reakcí polymeru s agresivním prostředím je podobná jako u nízkomolekulárních látek se stejnými skupinami atomů. [31]

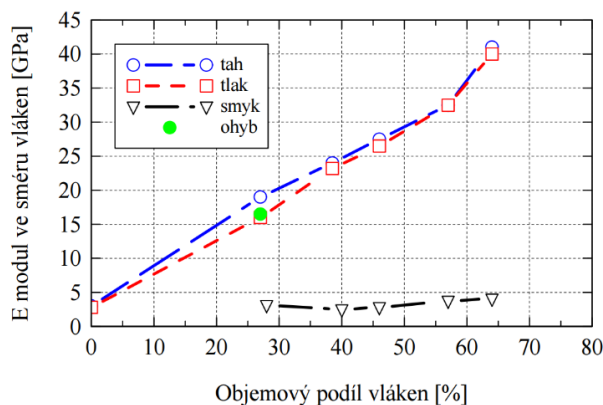
1.1.4 Mechanické vlastnosti

FRP výztuže nejsou zcela homogenní, jejich vlastnosti jsou závislé na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou typ výztužných vláken, jejich kvantita (objemový podíl) a míra jejich zakřivení. Obrázek 2 ukazuje, že jejich chování v jednoosém tahu je až do poruchy pružné a na rozdíl od ocele nevykazují mez kluzu ani plasticitu. Plocha pod pracovním diagramem, která je měřítkem práce spotřebované na porušení je relativně malá ve srovnání s konstrukčně více využívanou ocelí. [31]



Obrázek 2 Typické pracovní diagramy jednosměrných kompozitů ($V_f = 65\%$) a ocele Roxor. [31]

Tato skutečnost představuje jednu z nevýhod FRP – nemají možnost přizpůsobit se velkým lokálním napětím rozvojem plastické deformace. Na druhé straně ovšem i návrh kovových konstrukcí obvykle nepřipouští větší poměrné deformace než 0.5 %. Vliv objemu vláken na modul pružnosti jednosměrně vyztužených FRP je znázorněn pro kompozit E sklo/polyester a základní mechanické zkoušky na obrázku 3. [31]



Obrázek 3 Závislost modulu ve směru vláken na objemovém podílu vláken (jednosměrně vyztužený kompozit E sklo/polyester) [31]

1.2 VLÁKNA VYZTUŽUJÍCÍ POLYMER

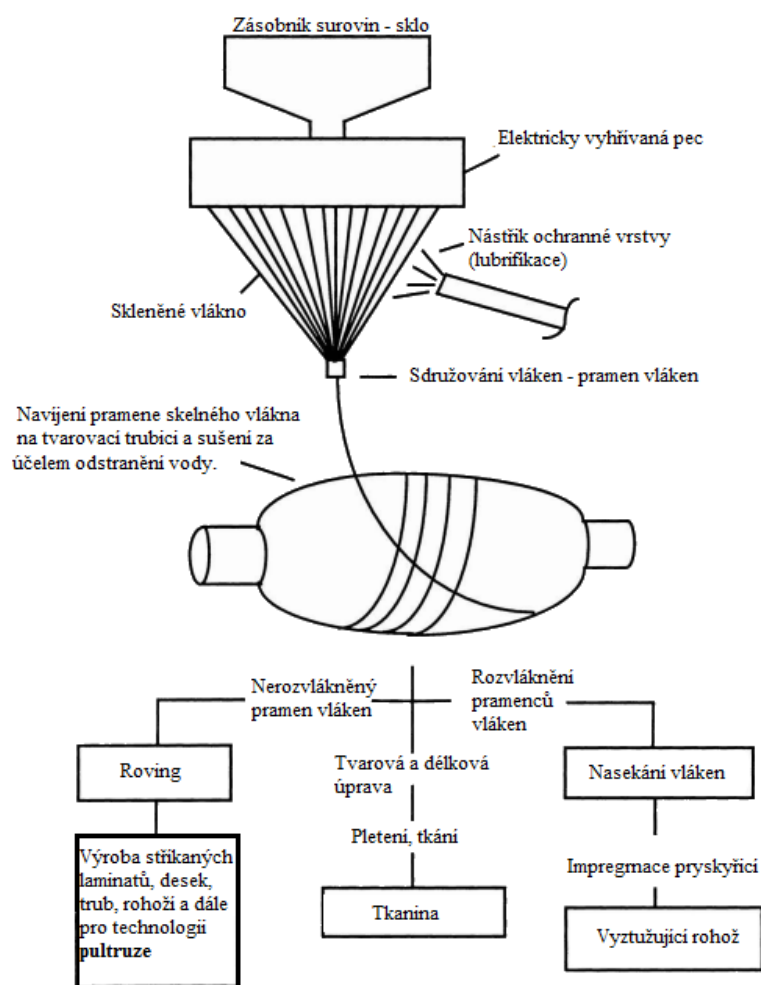
Jak již bylo řečeno v úvodu, vlákna vytvářejí nosnou strukturu kompozitních materiálů. Nejběžnějšími typy používaných vláken jsou vlákna skelná (vzhledem k alkalickému prostředí betonu je vhodnější použít alkaliresistentní (AR) sklo), uhlíková, čedičová a aramidové. Typem použitého nosného vlákna je dáno značení výsledného produktu jako GFRP (výztuž tvořena skelnými vlákny), CFRP (uhlíková výztuž), AFRP (aramidová výztuž) a v zemích bývalého SSSR často používaná BFRP (čedičová) výztuž. Všechny typy nosných vláken jsou lineárně elastické, ale zároveň křehce lámavé. Z tohoto důvodu jsou kompozitní výztuže při namáhání ve směru vláken lineárně elastické s křehkým lomem při dosažení mezního napětí a pracovní diagram má vždy lineární průběh až do porušení. Jednotlivé typy nosných vláken je možné za účelem snížení nákladů a pro dosažení požadovaných parametrů kombinovat. Výsledkem jsou potom tzv. hybridní typy FRP výztuží. Do této skupiny patří například výztuž typu C-GFRP vyvinutá firmou PREFA Kompozity, a. s.. Výztuž je tvořena dvěma druhy nosných vláken. Jádrem je tvořeno únosnějšími uhlíkovými vlákny a ochranný obal je tvořen levnějšími vlákny skleněnými. [7], [9]

Tabulka 3 Typické vlastnosti vláken užívaných v FRP výztužích [18]

Typ vlákna	Hustota	Pevnost v tahu	Modul pružnosti	Mezní poměrné přetvoření	Koeficient tepelné rotažnosti
	(kg/m ³)	(MPa)	(GPa)	(%)	(10 ⁻⁶ /°C)
E-glass	2500	3450	72.4	2.4	5
S-glass	2500	4580	85.5	3.3	2.9
Alkali resistant glass	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-
ECR	2620	3500	80.5	4.6	6
Carbon (high modulus)	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2...-0.1
Carbon (high strength)	1750	3500	240	1.1	-0.6...-0.2
Aramid (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2.0 longitudinal 59 radial
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2.0 longitudinal 59 radial
Aramid (Kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2.0 longitudinal 59 radial
Aramid (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-6.0 longitudinal 59 radial
Aramid (SVM)	1430	3800-4200	130	3.5	-
Basalt (Albarrie)	2800	4840	89	3.1	8

1.2.1 Skelná vlákna

Historie skleněných vláken je datována do dob starověkého Egypta, kde byla tažená hrubá vlákna z roztaveného skla navíjena na vřetena. Rychlý vývoj plastových materiálů vyztužených skleněnými vlákny nastal v moderní době v 19. století až na počátku 50. let. Vyrábí se tažením z taveniny připravené v platinových pecích. Vlákno je následně ochlazováno a opatřeno ochrannou vrstvou, která brání vlákno před okysličováním a rovněž zvyšuje adhesi a smáčivost organickými matricemi. [19]



Obrázek 4 Schéma výroby sklených vláken a dostupných forem jeho následného zpracování. [19]

Zaručení životnosti skleněných vláken je důležitým faktorem pro jejich zařazení mezi materiály s vysoce užitnými vlastnostmi. Pro dosažení těchto vlastností a speciální odolnosti vůči okolnímu prostředí jsou ve výrobním procesu vlákna povrchově upravována. Dnešní E-sklo obsahuje méně než 0,2 % alkálií. A-sklo je sodno-vápenato-křemičité sklo a lze jej levněji vyrobit než E-sklo. Protože neobsahuje bór, má mnohem nižší výrobní teplotu. Má však mnohem horší elektrické vlastnosti. D-sklo je boro-křemičitého složení. Má nízkou

dielektrickou konstantu a bylo vyvinuto pro nejvýkonnější elektrické aplikace. ECR-sklo je sklo vápenato-hlinito-křemičité s obsahem maximálně 2 % alkálií. Vlastnosti ECR-skla jsou podobné jako E-skla, ale jsou více odolné vůči kyselému prostředí. AR-sklo má alkalické zirkono-křemičité složení, která znamená větší alkalickou odolnost při použití jako cementových či betonových výztuží. S-sklo je hořečnato-hlinito-křemičité sklo, které dosahuje kombinaci nejlepších mechanických, teplotních a chemických vlastností ze všech komerčních vláken. [15], [16], [9]

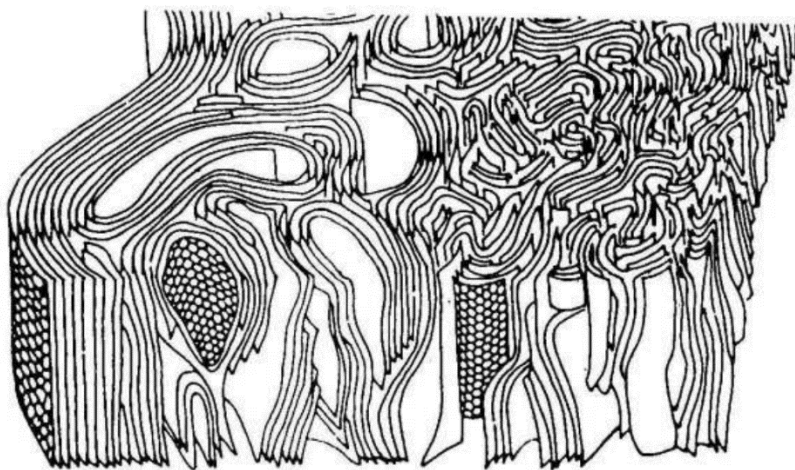
Pevnost v tahu skleněných vláken se snižuje při zvýšených teplotách, avšak pro rozsah teplot, kterým může být vystavena polymerní matrice, lze pevnost vláken považovat za konstantní. Pevnost v tahu se dále snižuje chemickou korozí a s časem při trvalém zatížení. [18]

Chemická koroze je velice rozdílná pro kyselé a zásadité prostředí. V kyselině dojde k rychlému odstranění kationtů a k vytvoření bariéry vyloučeného skla (oxidu křemičitého). Ke snížení pevnosti vlákna dojde vytvořením křehkého pórovitého povrchu, vzniklého ochuzením o kationty. Zásadité roztoky efektivně útočí na křemičitou síť, ale některé kovové oxidy se mohou opět vysrážet na povrch vlákna, což vede k nejasné interpretaci úbytku hmotnosti. Měření pevnosti vláken po vystavení účinku prostředí s různým pH popisují mechanismy snižování vláknové pevnosti po aplikaci zásaditého nebo kyselého roztoku. [15]

1.2.2 Uhlíková vlákna

Člověk se snaží o zhotovení uhlíkových vláken přibližně 120 let, ale příroda je zvládla vytvořit již v dávných geologických časech v některých ložiskách grafitu ve formě vláknitých krystalitů. Za otce uhlíkových vláken je oficiálně považován Edison, který v roce 1879 představil svůj vynález žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem. Skutečná výroba uhlíkových vláken začala až v 50. letech 20. století. Významný pokrok nastal v roce 1959, kdy firma Union Carbide představila uhlíková vlákna s výraznými mechanickými vlastnostmi. Modul plasticity byl u těchto vláken zvýšen pomocí tažení při velmi vysoké teplotě. [21]

V současné době se v nových technologiích kompozitů můžeme velmi často setkat s užíváním uhlíkových vláken. Jejich vlastnosti určuje jejich struktura. Nejlepší mechanické vlastnosti nabývají ty struktury uhlíkových vláken, které se blíží struktuře grafitu namáhané ve směru bazálních rovin. Vlastnosti pro konstrukci kompozitů závisejí na struktuře, hlavně pak na stupni grafitizace uhlíkových vláken. Struktura vláken je vrstevnatá, což znamená, že bazální roviny jsou ve směru vláken zprohýbané (viz obr. 5) [15]



Obrázek 5 Vrstvená struktura uhlíkových vláken ^[20]

Uhlíková vlákna se vyrábí pyrolýzou polyakrylonitrilových vláken PAN. Ta jsou nejprve zahřata a protahována, aby se získala vhodná orientace molekul. Následuje stabilizace v okysličující atmosféře při teplotě 220–230 °C po dobu 10 hod. Potom se pokračuje grafitizací v inertní atmosféře při 1000–1500 °C a dalším protahováním. Dalším technologickým krokem je grafitizace v inertní atmosféře za teplot 2500–3000 °C pod napětím. Jiný způsob výroby uhlíkového vlákna využívá jako výchozí surovinu dehtovou smolu. Vnější povrch se upravuje okysličením, aby se zvýšila adheze na polymerní matrici. ^[9]

1.2.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou tvořena na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Výroba probíhá spřádáním z vysoko viskózního 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá elementární vlákna se spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží (pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V hotovém laminátu je možné využít až 70 % jejich skutečné pevnosti. Mezi hlavní přednosti patří vysoká pevnost v tahu při nízké specifické hmotnosti. Aramidové vlákno fy. Dupont je známé pod obchodním označením Kevlar 29 resp. Kevlar 49 pro letecké aplikace. Jde o organické vlákno s vysokou pevností a malou měrnou hmotností. Přesné chemické složení je předmětem obchodního tajemství. Aramidové vlákno je hydrofobické a musí být před impregnací vysušeno. Využívají se především díky své malé hustotě. Vysoké tuhosti a pevnosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna. Polymerní vlákna nejsou křehká, při kolmém působení tlakové síly na vlákno

dojde k plastickému přetvoření. Oproti skleněným vláknům jsou aramidy výrazně lehčí. Mají rovněž dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kevlar je odolný plamenu, je samozhášivý a netaví se. Velmi dobře tlumí vibrace a má dobrou rázovou houževnatost. [22], [21]

Z hlediska chemické odolnosti jsou aramidová vlákna velmi dobře odolná proti působení různých druhů agresivního prostředí jako je například působení rozpouštědel, kyselin a zásad. Aramidová vlákna jsou velmi citlivá na působení vlhkosti. Tato skutečnost je dána polaritou karbonamidových vazeb, jenž se štěpí při působení velké koncentrace OH^- iontů. Do vláken pronikající voda totiž zvyšuje pohyblivost řetězců a výrazně snižuje hodnotu pevnosti i E-modulu. [23]

1.2.4 Čedičová vlákna

Vlastnostmi se čedičová vlákna výrazně podobají skleněným vláknům typu S. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve nedávno, jedná se o nový typ technického vlákna. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, nenasákavá, mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, dobrou tepelnou odolnost. Výhodou je také jejich cena, která činí asi 60 % ceny skleněných S-vláken. Jednou z negativních vlastností těchto vláken je jejich křehkost. Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných. Čedičová vlákna nacházejí uplatnění ve stavebnictví v podobě tepelně a zvukově izolačních desek, příček, stropů, sendvičového obvodového zdiva, podlah a v různých technických výrobcích jako rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky. [21]

Při posouzení chemické odolnosti čedičových vláken můžeme vycházet ze studie [24], při níž byly čedičové vlákna vystaveny působení agresivního prostředí (deionizovaná voda, kyselý roztok (10% HCl), solný roztok (10% NaCl), a alkalický roztok (3,2 g NaOH na litr)) a temperovány na teplotu 96 °C. Po 7 dnech uložení byly vzorky důkladně vysušeny. Následovalo vážení vláken pro zjištění hmotnostního úbytku. Tabulka 5 ukazuje hmotnostní ztráty po 1 a 7 dnech uložení vláken ve výše zmíněných prostředích. Hmotnostní ztráty ve vodě, solném roztoku a alkalickém roztoku byly nižší než 1 % hmotnosti. V kyselém roztoku pak ztráta hmotnosti byla v rozmezí od 5 do 6 % (hmotnostní). Kyselý roztok navíc vykazoval zbarvení do zelena, což bylo pravděpodobně způsobeno vyluhováním oxidů železa. [24]

Tabulka 4 Hmotnostní ztráta čedičových vláken po vyluhování v agresivním prostředí ^[24]

Doba uložení	Hmotnostní úbytek [%]				
	Typ prostředí	voda	kyselé	solné	zásadité
1 den		0,0	4,8	0,0	0,4
7 dní		0,3	5,9	0,2	0,9

Dále byly vlákna analyzovány za použití SEM (rastrovací elektronická mikroskopie) pro detekci jakékoliv změn mikrostruktury. Čedičová vlákna stabilizovaná v deionizované vodě byla podobná referenční. Vyluhování v kyselém a slaném roztoku nemělo vizuální vliv na materiál. Na druhé straně, čedičová vlákna umístěná v alkalickém roztoku vykazovala malé známky koroze (přítomnost chemického zbytku na povrchu). ^[24]

1.3 MATRICE

Hlavní úlohou matrice je zajištění celistvosti kompozitního tělesa, tj. dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Materiálové vlastnosti matrice a vláken musí být v souladu pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu. Specifické funkce matrice je možné vyjádřit v několika bodech: ^[9]

- Spojuje vlákna (resp. částice u částicových kompozitů) v kompaktní celek
- zprostředkuje zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými, přemostňuje trhliny ve vláknech atd.
- vytváří vnější funkční povrch tělesa a estetický vzhled včetně barvy.

Obečným mechanickým požadavkem na matrici je dobrá adheze k výztuži a dobrá mezní tažnost.

Jako matrice se využívají polymery (termoplasty i termosety). Plastické hmoty nebo polymery, jak dnes nazýváme většinu makromolekulárních látek, které se dobře uplatňují ve stavebnictví, jsou lehké, mají pěkný vzhled, dají se dobře vybarvovat, snadno tvarovat, jsou prakticky nenasákavé, většinou chemicky odolné, mají výborné elektrické vlastnosti, malou tepelnou vodivost, dají se snadno spojovat, snadno se čistí a udržují a při výrobě dílců vznikající odpady se dají znovu zpracovat. ^{[15], [25]}

Mají však také pro stavební aplikace některé nevýhodné vlastnosti. Zejména je třeba uvést změny jejich vlastností teplotou, hořlavost, špatnou odolnost proti UV záření a působení povětrnostních vlivů, změny jejich vlastností při tzv. stárnutí, malou pevnost v tlaku (pevnost v tahu je často stejně velká jako pevnost v tlaku), velmi nízký modul pružnosti, velký součinitel teplotní roztažnosti, v některých případech i snadné mechanické poškození a křehkost za nižších teplot apod. Každý typ matrice má výhody a nevýhody a je vhodný pro jiné aplikace. Při volbě matrice se zohledňují její mechanické a fyzikální vlastnosti (tabulka 5), které spolu s parametry výztuže tvoří výsledné vlastnosti pro použití daného kompozitního systému. ^{[15], [25]}

Tabulka 5 Vybrané mechanické vlastnosti polymerní matrice ve srovnání s matricí kovovou a keramickou ^[15]

Matrice	Hustota ρ (Mg m ⁻³)	Youngův modul E (GPa)	Poissonův poměr ν	Pevnost v tahu σ (GPa)	Tažnost ε (%)	Teplotní roztlačnost α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Tepelná vodivost K (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Termosety							
Epoxidy	1,1–1,4	3–6	0,38–0,40	0,035–0,1	1–6	60	0,1
Polyestery	1,2–1,5	2,0–4,5	0,37–0,39	0,04–0,09	2	100–200	0,2
Termoplasty							
PA 6.6	1,14	1,4–2,8	0,3	0,06–0,07	40–80	90	0,2
PP	0,90	1,0–1,4	0,3	0,02–0,04	300	110	0,2
PEEK	1,26–1,32	3,6	0,3	0,17	50	47	0,2
Kovy							
Al	2,70	70	0,33	0,2–0,6	6–20	24	130–230
Mg	1,80	45	0,35	0,1–0,3	3–10	27	100
Ti	4,50	110	0,36	0,3–1,0	4–12	9	6–22
Keramika							
Sodnokřemičité sklo	2,3	64	0,21	0,1	0,2	3	12
SiC	3,4	400	0,20	0,4	0,1	4	50
Al ₂ O ₃	3,8	380	0,25	0,5	0,1	8	30

Jak již bylo řečeno polymery se dělí na termosety a termoplasty. Z termosetových polymerů se nejčastěji používají epoxidové, polyesterové a vinylesterové pryskyřice. Kapalná pryskyřice spolu s příslušnými iniciátory je při vytváření kompozitu převedena na pevný chemicky zesíťovaný polymer. Mechanické vlastnosti závisí na molekulárních jednotkách tvořících polymerní síť a na jejich délce a hustotě vazeb. ^[15]

1.3.1 Mechanická pevnost matrice

Jak již bylo několikrát zmíněno, matrice je tvořená polymerním materiálem. Pevnost polymerů snižují mikrostrukturální a technologické defekty. Rozměry mikrostrukturálních defektů závisí na chemické a nadmolekulární struktuře. Jejich nebezpečí z hlediska vzniku předčasného, obvykle křehkého lomu, souvisí mimo jiné s omezenou schopností polymeru

vytvářet plastické deformace. Kromě strukturálních charakteristik rozhodují o růstu defektu podmínky, za nichž vnější síly působí. Nejdůležitější jsou rychlost zatěžování a vlivy okolního prostředí (teploty, relativní vlhkosti vzduchu, popřípadě korozně působícího prostředí). Uvedené faktory ve vzájemné kombinaci rozhodují o tom, zda dojde k rychlému zvětšování defektu za vzniku trhlin. [26]

Nejčastěji se pevnost dělí na:

- a) Pevnost vyznačující se většími hodnotami napětí (krátkodobé, rázové namáhání),
- b) pevnost vyznačující se malými hodnotami napětí (dlouhodobé nebo cyklické namáhání).

Mez kluzu, mez pevnosti

Nabývá důležitosti při krátkodobém zatížení. Mez kluzu je důležitá pro homogenní, semikrystalické, houževnaté termoplasty. Za normálních teplot se u těchto materiálů projevuje výrazná mez kluzu. Při vyšších rychlostech zatěžování klesá u plastů houževnatost a mez kluzu. [27]

Modul pružnosti v tahu

Je velice proměnný v oblastech teploty skelného přechodu (T_g) při měnící se velikosti zatížení a doby zatížení. V praxi je proto využíván takzvaný konstrukční modul pružnosti E_k . Konstrukční modul pružnosti je závislý na teplotě, době zatěžování a velikosti napětí. [27]

Rázová a vrubová houževnatost

Jedná se o vlastnosti materiálu (plastu), které nám určují vhodnost materiálu pro daný výrobek s vrubem. S poklesem teploty nám také klesá rázová a vrubová houževnatost materiálu. [27]

Tažnost materiálu

Tažnost roste se zvyšující se teplotou plastu. Snižuje se při dlouhodobém působení světelného záření, chemických látek a nepříznivého venkovního prostředí – materiál degraduje. [27]

1.3.2 Chemická odolnost matrice

Chemická odolnost polymerů vůči korozi je závislá především na jejich chemickém složení. Čím vyšší je stupeň zesítení polymerů, tím více odolává chemikáliím. V opačném případě může docházet k bobtnání, až rozpouštění. Plasty odolávají nejméně takovým chemikáliím, které mají obdobné chemické složení. Nepochybně polymery odolávají dobře

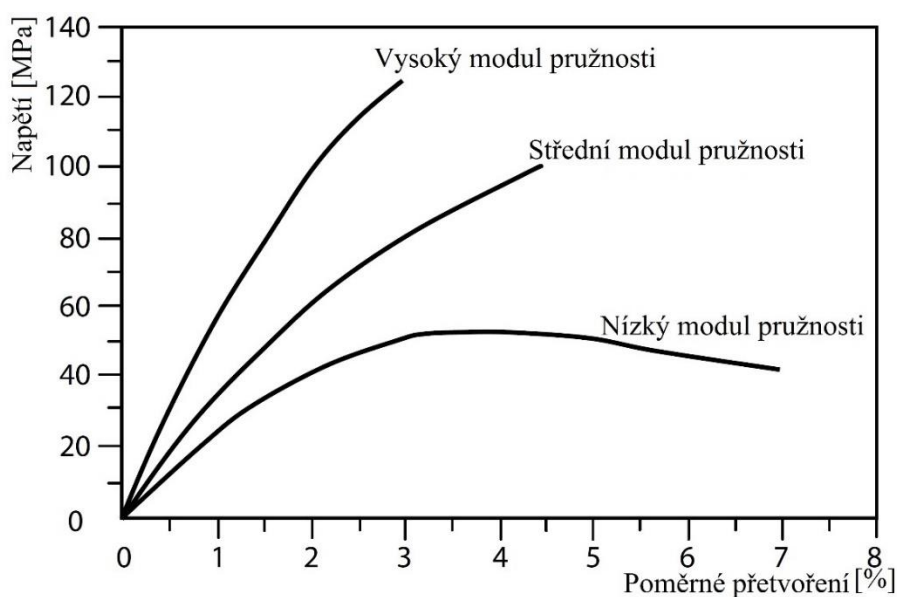
kyselinám, zásadám a polárním rozpouštědlům. Polární plasty odolávají nepolárním rozpouštědlům. [27]

1.3.3 Typy polymerních matric užívaných pro FRP výztuže

1.3.3.1 Epoxidové matrice

Pojem epoxidová pryskyřice definuje třídu termosetických pryskyřic, které obsahují v molekule více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Tato skupina je velmi reaktivní a na její reaktivitě s velkým počtem látek, vedoucí k zesíťovaným makromolekulárním produktům, spočívá aplikace těchto pryskyřic jako lepidel, zalévacích a lisovacích hmot, laminátů a lakařských pryskyřic. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází jen k malému štěpení. Vytvrzené produkty mají výbornou přilnavost na kovy, sklo, keramiku, dřevo aj. Mají velmi dobré chemické a elektroizolační vlastnosti v poměrně široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost vůči vodě, roztokům alkálií a kyselin a některým rozpouštědlům. Modul pružnosti v tahu a pevnost v tahu, tepelná stabilita a chemická odolnost se zlepšuje s hustotou zesíťování. Na druhé straně se snižuje lomová houževnatost. [28], [25]

Mezi hlavní výhody epoxidových pryskyřic patří výborné mechanické vlastnosti, snadné zpracování, nízké smrštění během vytvrzování a dobrou přilnavost na širokou škálu vláken. Epoxidy mají vysokou odolnost proti korozi a jsou odolnější vůči působení vlhkosti a tepla než jiné polymerní matrice. Vytvrzování těchto pryskyřic bývá při teplotách v rozmezí mezi 5 ° C a 150 ° C. Epoxidové pryskyřice mohou být značně modifikovány, čímž lze do značné míry upravovat jejich vlastnosti. [28]



Obrázek 6 Graf chování při zatížení matric z epoxidových pryskyřic různého modulu [28]

Hlavní nevýhodou epoxidových pryskyřic je jejich poměrně vysoká cena a dlouhá vytvrzovací doba. Náklady na epoxidy jsou úměrné jejich výborným vlastnostem a jsou tedy obecně dražší než polyesterové a vinylestery. ^[28]

1.3.3.2 Polyesterové matrice (UP-R)

Pod pojmem nenasyčené polyesterové pryskyřice rozumíme roztoky lineárních nenasyčených polyesterů v polymerace schopných monomerech. Tyto materiály mohou být vytvrzováním zasítovány. Při vytvrzování dochází ke kopolymeraci nenasyčeného polyesteru s nenasyčeným monomerem. Kombinace nenasyčeného polyesteru s kapalným monomerem má řasu výhod:

- Vzniklý roztok je kapalný a lze s ním snadno manipulovat,
- vytvrzování za přídavku iniciátoru probíhá snadno,
- vlastnosti vytvrzených produktů jsou velmi dobré.

Nenasycené polyesterové se připravují polyesterifikací nenasyčených dikarboxylových kyselin s dioly. ^[25]

Polyesterové pryskyřice mohou být modifikovány tak, aby měly dobrou odolnost vůči UV záření pro použití v exteriéru. Jsou známi případy, kdy byly polyesterové pryskyřice vystaveny UV záření po dobu 30 let a vykazovaly jen mírné zabarvení a malou ztrátu pevnosti. Velmi dobré trvanlivosti lze docílit, pokud jsou styrenové řetězce doplněny metylmetakrylátem (MMA). Zvýšené odolnosti proti hoření polyesterových pryskyřic lze docílit halogeny, které zpomalují čas vzplanutí. Polyesterové pryskyřice se používají v aplikacích, které nevyžadují odolnost proti korozi. Při výrobě GFRP s polyesterovou matricí a použitím skelných vláken se může odolnost proti korozi ještě více snížit. To platí zejména v silně leptavém (fluorovodíkovém) prostředí, jelikož tyto chemikálie mohou napadat a rozpouštět skelná vlákna. Hlavní nevýhodou polyesterových pryskyřic je jejich objemové smrštění. Toto objemové smrštění lze snížit přidáním termické složky. ^[28]

1.3.3.3 Vinylesterové matrice

Vinylesterové pryskyřice jsou pryskyřice na bázi metakrylátu a akrylátu. Některé variace obsahují uretan. Vzhledem ke své chemické struktuře jsou tyto pryskyřice flexibilnější a mají vyšší lomovou houževnatost než polyesterové. Mají také velmi dobrou adhezi při vytvrzení skelnými vlákny. Jejich vlastnosti jsou dobrou kombinací mezi vlastnostmi epoxidových pryskyřic (chemická odolnost a pevnost v tahu) a polyesterů (viskozita a rychlé vytvrzení), a to z nich dělá preferovanou volbu při výrobě kompozitních materiálů se skleněnými vlákny,

nicméně jejich objemové smrštění je vyšší než u epoxidových pryskyřic a mají pouze mírnou lepicí schopnost v porovnání s epoxidovými pryskyřicemi. K dispozici je široká škála vinylesterových pryskyřic pro aplikace do 170 ° C. Vinylesterové pryskyřice jsou vysoce odolné vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a peroxidům. Bromované verze vinylesterových pryskyřic mají vysokou schopnost retardace hoření.

2. POPIS A VÝROBA FRP VÝZTUŽÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V této kapitole budou popsány výztuže, které byly předmětem experimentálního zkoušení a budu popsán jejich výrobní postup technologii pultruze.

2.1 POPIS A TYPY KOMPOZITNÍCH VÝZUTŽÍ

Kompozitní výztuže se vyrábějí v několika základních provedeních, které jsou určeny jejich příslušnou aplikací. Nosnou funkci mají skleněná nebo uhlíková vlákna, 100 % těchto vláken je uložených v podélném směru. Vlákna mohou být skleněná (typ AR nebo E), uhlíková nebo i jiná (např. čedičová). Obsah vláken je v rozmezí 75-80 % (bráno hmotnostně). Pojivem je vinylesterová, polyesterová nebo epoxidová pryskyřice. Na povrchu výztuže je nad spirálovým ovinutím zajišťujícím tvar výztuže vrstva křemičitého písku zalitá v pryskyřici. Kompozitní výztuže je možné ohýbat pouze v nevytvrzeném stavu. Není možné tvarování na stavbě.^[29]

Předmětem experimentální části bylo zkoušení dvou typů výztuží firmy PREFA KOMPOZITY, a.s.:

PREFA REBAR GFRP A

Výztuž z polyesterové pryskyřice a běžných skleněných vláken typu E. Výztuž je určena pro krátkodobé aplikace nebo pro nealkalická pojiva bez portlandského cementu.^[29]

PREFA REBAR GFRP B

Výztuž z vinylesterové pryskyřice a alkalirezistentních skleněných vláken. Výztuž je určena pro dlouhodobé aplikace a je vhodná pro pojiva na bázi portlandského cementu.^[29]

Další charakteristiky:

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

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

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

Kruhovitost průřezu: $\pm 10\%$

Soudržnost s betonem: 18,0 MPa

Měrná hmotnost: $2,1 \text{ g/cm}^3$

2.1.1 Povrch výztuží

Běžný povrch kompozitních výztuží je opatřený vrstvou křemičitého písku zalitého v pryskyřici, nejsou v něm trhlinky nebo vlákna nesmočená v pryskyřici. Jsou přípustné plochy bez křemičitého písku nebo kapky pryskyřice, celková plocha těchto míst by neměla přesáhnout 10 % celkového povrchu výztuže. V místě ohybů kompozitní výztuže dochází vždy k zploštění průřezu, rovněž je na vnitřním povrchu plocha hladká (křemičitý písek je zatlačen do povrchu). Výše uvedené odchylky nemohou být reklamovány. Výztuže jsou standardně vyráběny v přírodním zabarvení nebo v barvě světle šedé. Na přání kupujícího mohou být výztuže vyrobeny i v jiných barevných odstínech. ^[29]

2.1.2 Kvalita výrobku

Kontrola jakosti výrobků je průběžně zajišťována v souladu se směrnicemi pro systém řízení jakosti podle ČSN ISO 9001 a ČSN ISO 14001. Výroba kompozitních výztuží se řídí podle normy ČSN EN 13706-1 až -3. Doklad o jakosti je pro odběratele uveden na dodacích listech. V souladu s ustanovením zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky předá kupující po realizaci dodávek prohlášení o shodě. ^[29]

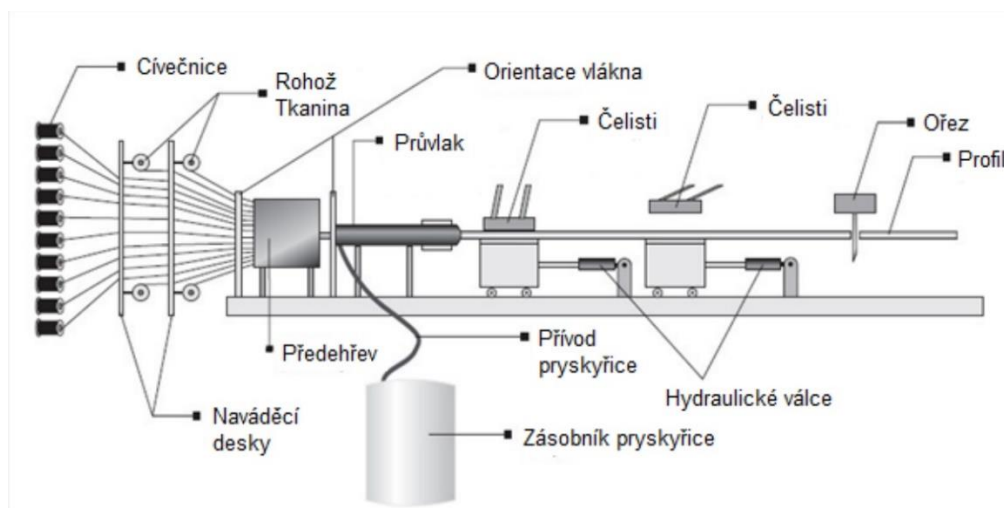
2.1.3 Výroba výztuží

Výztuže z FRP materiálu do betonu se vyrábí pomocí technologie pultruze. Slovo „pultruze“ vzniklo z anglického názvu „pultrusion“ a v této české podobě se již mezi odbornou veřejností zažilo. Pultruze je proces kontinuální výroby vyztužených pryskyřic různých tvarů a délky tažením. Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. [30]

Vyztužující materiál, převážně skelné vlákno, je ve formě rovingu a plošných rohoží. Tato vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu a správné umístění rohoží. [30]

V dalším zařízení se vlákna, rohože a rouška smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru, popř. dalších přísad pro zlepšení materiálových vlastností výsledného profilu. Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil. V předtvarovací formě se vytlačuje přebytečné pojivo, profil se postupně tvaruje a vstupuje do vytvrzovací formy. V této vyhřívané formě probíhá termosetická reakce a profil se vytvrzuje.

Na výstupu z formy je hotový profil tažen podávacím zařízením a dělen na požadované délky, většinou šestimetrové. [30]



Obrázek 7 Schéma technologie pultruze [21]

Používaná technologie pultruze – tažení umožňuje dosažení více než 70% podílu vláken v objemu (u ručního laminování je to kolem 20 %, u lisování 40 %). Materiál prochází výrobní linkou rychlostí 30 až 150 cm za minutu. Rozměr polotovaru je omezen při určité tloušťce stěny, délka není omezena. Linka je navíc schopna ovíjení. Při tomto procesu vznikne velmi a pevný a extrémně lehký dutý profil s minimální tloušťkou 1,5 mm. [30]

3. TRVANLIVOST FRP VÝZUŽÍ

Požadavky na trvanlivost vláknových polymerních kompozitů v technických aplikacích závisí na druhu a účelu jejich použití. Pro stavební konstrukce má zřejmě největší význam odolnost proti vlivům klimatu (mrznutí a rozmrzání, vlhkost, UV záření, u mostních konstrukcí rovněž odolnost vůči rozmrazovacím solím). Dosud otevřeným problémem zůstává dlouhodobá odolnost nejvíce používané skelné výztuže proti působení alkálií (beton). Jen uhlíková vlákna jsou obecně považována za rezistentní. ^[31]

Při zkoumání trvanlivosti jsou zde tři složky kompozitního materiálu, které ovlivňují jeho dlouhodobé vlastnosti, a to následující:

- Matrice
- Vlákná
- Mezifáze vlákno/matrice

Každý z těchto prvků může být náchylný k degradaci jiným agresivním prostředím, ale všechny tři by měli i nadále plně fungovat po celou dobu projektované životnosti kompozitu. Matrice je ve své podstatě nejdůležitější ochrana proti agresivnímu médiu (v našem případě – alkalické prostředí betonu), protože zabraňuje poškození vláken tím, že poskytuje bariéru působení alkalického prostředí betonu. Vnější faktory, které mohou ovlivnit účinnost této ochrany jsou: ^[28]

- Charakter prostředí (pH a přítomnost agresivních iontů),
- napětí kompozitu,
- teplota,
- stav kompozitu (mech. poškození),
- kvalita provedení výztuže (povrchová úprava, dutiny, homogenita pryskyřice a rozmístění vláken).

Účinnost pryskyřice bude záviset na celistvosti jeho povrchu. Problém nastává u řezaných konců FRP výztuží, kde jsou vlákna odkrytá a vystavená tak agresivnímu prostředí. V těchto místech můžou chemické látky obsažené v agresivní prostředí napadnout vazbu mezi vlákny a maticí a dále rychle pokračovat po délce vlákna, což vystaví zbytek průřezu působení agresivních chemických látek. Střihy však mohou být dodatečně utěsněny, aby nedocházelo k výše popsanému pronikání chemických látek do výztuží. ^[28]

Kvalita kompozitu, pokud jde o jeho míru trvanlivosti může být vyjádřena pomocí těchto faktorů: [28]

- Smáčení pryskyřicí (jak dobře jsou vlákna pokryta pryskyřicí),
- absence trhlin (trhliny povrchové nebo skrz průřez),
- absence dutin (menší s pravidelnou distribucí je lepší),
- stupeň vytvrzení pryskyřice (při špatném výrobním procesu může dojít k nezesíťování pryskyřice což má za následek snížení odolnosti výztuže vůči pronikání cizorodých látek do strukturu pryskyřice)
- kompatibilita mezi vláknem a matricí (nesprávná volba vláken nebo matrice nebo jejich nesprávné spojení může vést ke špatnému rozhraní, které je náchylnější na agresivní prostředí)

Všechny výše uvedené faktory je třeba zahrnout do návrhu výztuže, aby byla zajištěna optimální trvanlivost kompozitního systém.

3.1 Vliv alkálií

Beton tradiční chrání ocelovou výztuž před korozí, kdy hovoříme o alkalické pasivaci výztuže betonem. To je možné díky vysokému pH betonu, které se pohybuje na hodnotě 12,4. Se snižující alkalitou betonu (pod 9,6 pH) vzrůstá nebezpečí vzniku koroze. [33]

U FRP výztuží je tomu však naopak. Vlákná v alkalickém prostředí betonu značně degradují. Uhlíková vlákna samotná jsou odolné vůči alkáliím a kyselému prostředí. Naopak skelná vlákna jsou na tom s odolností nejhůře. Ochranu jím do jisté míry dodává, jak již bylo zmíněno, kvalitně provedená polymerní matrice. Kombinace iontů alkalických kovů a vysoké hodnoty pH může mít za následek degradaci pryskyřice nebo vazby mezi pryskyřicí a betonovým podkladem. Poškození pryskyřice v důsledku alkalického degradace je obvykle mnohem výraznější než vlivem vlhkosti. V současné době problém skelných vláken do jisté míry eliminují alkalivzdorná vlákna, která mají sníženou rychlost degradace. [32], [28]

Alkalické působení je v současnosti široce studováno, avšak absence mezinárodně uznávané metody pro stanovení trvanlivosti a také používání velké škály typů výztuží s odlišnými vlastnostmi má za následek velmi různorodé údaje o chování výztuží v alkalickém prostředí. Ve většině výzkumných projektů zaměřených na trvanlivost FRP v alkalickém prostředí byly roztoky uvnitř pórů betonu simulovány pomocí roztoku s NaOH , KOH a nasyceným $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s pH 12-13.5. Teplotní rozsahy se pohybovaly mezi 20 až 80 °C. Důležité je říci, že díky zvýšené mobilitě OH^- iontů v simulovaném prostředí, je toto prostředí

agresivnější než prostředí betonu (viz tabulka 6). Z toho plyne, že výsledky dosud prováděných zkoušek by se neměly brát jako lineární vztah k chování výztuží v reálném prostředí a je třeba provést rozvoj a popsat metody, jak výztuže zkoumat v reálných modelech konstrukce s možností urychlení degradace. [28]

Tabulka 6 Souhrn výsledků testů z Chalmers University zaměřených na vývoj pevnosti v tahu GFRP výztuží v alkalickém roztoku, betonu a vody o teplotě 60 ° C. [28]

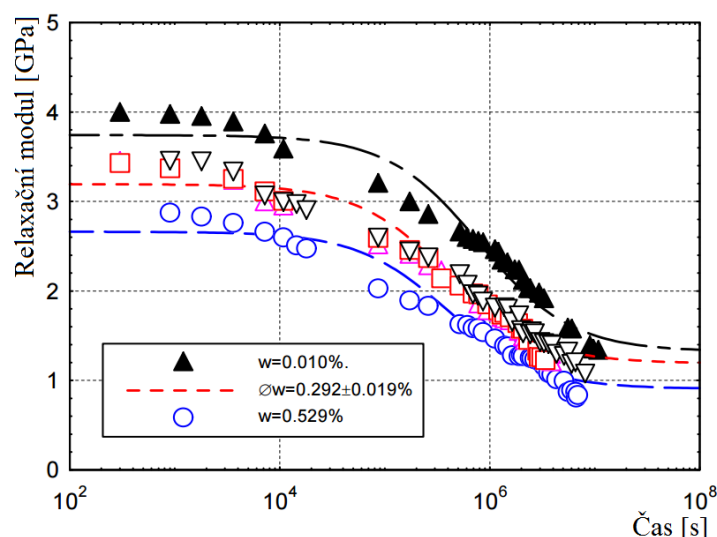
Prostředí expozice	Teplota [°C]	Procentuální změna referenční tahové pevnosti				
		Doba testování [dny]				
		28	90	180	365	545
Alkalické	60	82	55	37	32	31
Beton	60	91	80	57	51	45
Voda	60	93	84	75	73	75

Ačkoli se zkoušky prováděné v současné době od sebe do značné míry liší, byly identifikovány následující faktory, které ovlivňují rychlost degradace FRP výztuží v alkalickém prostředí:

- Náchylnost hladkých vláken k degradaci alkalickým prostředím,
- alkalická propustnost matrice (pryskyřic) a tedy úroveň ochrany vlákna,
- kvalita vazby vláken s matricí,
- koncentrace alkálií (ovlivněno především typem betonu a betonových směsí),
- mobilita OH⁻ iontů (ovlivněná stupněm nasycení a objemů pórů).

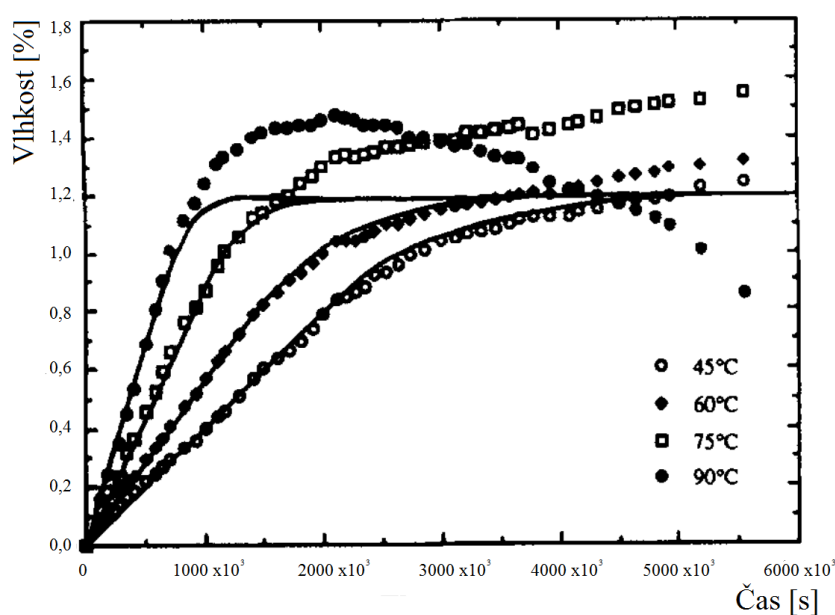
3.2 Vliv vlhkosti

Organické polymery jsou náchylné k absorpci okolního média, a to buď kapalné nebo plynné povahy. Vliv vody na vlastnosti FRP kompozitu byl studován na vzduchu při různých relativních vlhkostech (% RH) a různých teplotách, jakož i při ponoření do vody při různých teplotách a napětí. Společné ukazatele pro hodnocení dlouhodobé trvanlivosti FRP výztuží za těchto podmínek jsou změny pevnosti v tahu a modul pružnosti. Vlhkost penetruje všechny organické materiály difusním procesem, který probíhá až do rovnovážného stavu. Výsledkem je snížení T_g polymerní matrice a redukce jejich mechanických vlastností. Puchýřkování se projevuje u polyesterových laminátů vyztužených skelnými vlákny při dlouhém styku s vodou. Soli přítomné ve vodě mohou způsobit vznik osmotického procesu, tj. průniku vody přes polopropustné membrány v místech trhlinek či dutinek a v konečném stadiu vznik puchýřků. [31], [28], [32]



Obrázek 8 Průběh hodnot relaxačního modulu pro tři různé obsahy vlhkosti w [%] při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (epoxidová kompozice Comflor) ^[31]

Pánové Zhou a Lucas (1995) studovali nasákavost a desorpci epoxidové pryskyřice při různých teplotách uložení. Výztuže byly uloženy v destilované vodě. Výsledky absorpce ukázaly, že největšího nárůstu hmotnosti dochází v počátečním období expozice a později jen mírně narůstá. Maximální absorpce vody byla méně než 2 %. ^[34]



Obrázek 9 Změny hmotnosti epoxidové kompozitu ponořeného do destilované vody při různých teplotách. Plná čára představuje teoretickou Fickovu difuzi. ^[34]

Další studie ukazují, že se degradace polymerních pryskyřic může objevit v momentě, kdy molekuly vody působí jako změkčovadla pryskyřice a naruší tak Van-der-Waalsovy vazby v polymerních řetězcích. To způsobuje změny pevností, meze porušení a houževnatost výztuží, které vedou k praskání matrice, hydrolýze a ztrátě soudržnosti mezi vláknem a matricí. ^[28]

3.3 Vliv chloridů

Perspektivní aplikační oblastí pro použití kompozitní FRP výztuže jsou především betonové prvky vystavené působení agresivního prostředí, u nichž běžně dochází k rychlé depasivaci a následné degradaci (korozi) nosné ocelové výztuže. Jedná se především o konstrukce vystavené působení chloridů. [7]

Při zkoumání odolnosti FRP výztuži vůči chloridům byly testovány 3 základní typy výztuží (GFRP, CFRP, AFRP). Výztuže byly uloženy do roztoku, ve kterém se koncentrace chloridů pohybovala až na úrovni 4 %. Výsledky testování ukázaly, že se jednotlivé typy výztuží od sebe liší jen velmi málo a všechny testované typy výztuží vykazovali jen mírné známky degradace. [28]

3.4 Vliv teploty

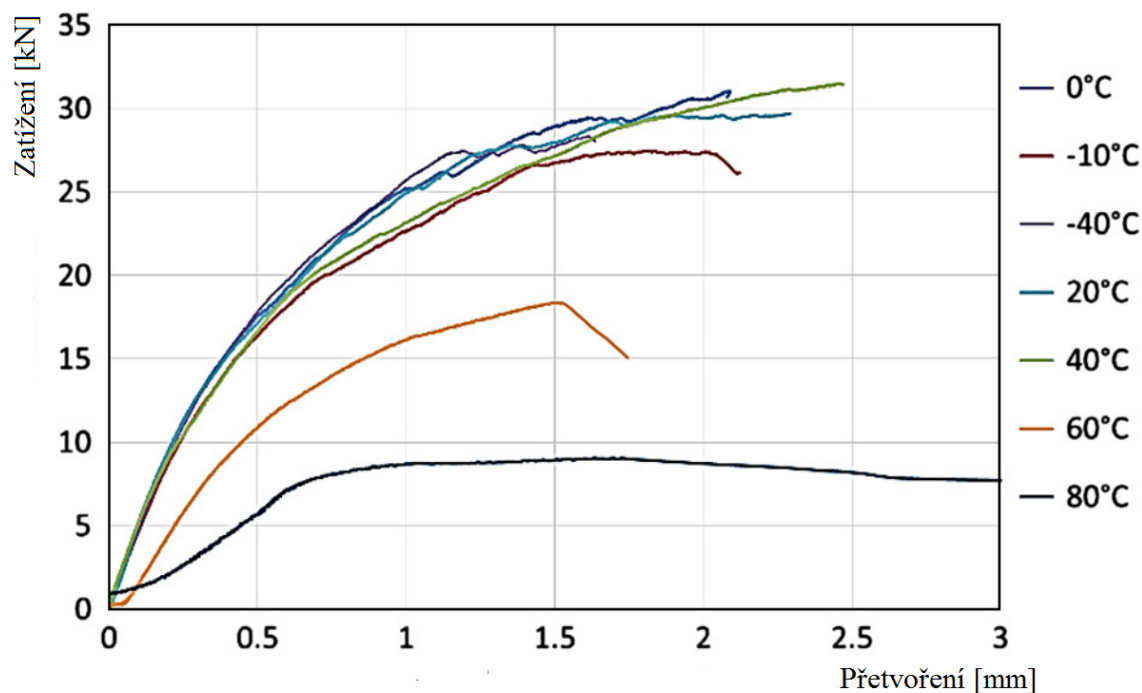
3.4.1 Vliv mrazu a zvýšené teploty

Při běžných teplotách typických pro přírodní podmínky nedochází u FRP materiály ke změnám jejich mechanických vlastností. Změna však nastává při působení zvýšených teplot. Dle studií [14] má zvýšení teploty ze 40 °C na 80 °C za následek až 70 % pokles únosnosti výztuže (viz tabulka 7, obrázek 10). Z tohoto důvodu používání FRP profilů není doporučeno v konstrukcích, kde je požární odolnost hlavním požadavkem integrity konstrukce. Výztuž je konstrukčně ukryta uvnitř betonu a nemůže tedy hořet z důvodu nedostatku kyslíku, nicméně polymerní matrice začne vlivem vysokých teplot měknout.

Při zkoumání působení záporných teplot na FRP výztuže lze pozorovat, že nízké teploty pod bodem mrazu nemají velký vliv na mechanické pevnosti výztuže (viz tabulka 7, obrázek 10), ovlivní však výrazně jejich soudržnost s betonem. Pro testování byly použity tažené FRP výztuže s vysokou pevností laminátů z uhlíkových vláken s pevností v tahu přibližně 2900 MPa, které byly vyvinuty speciálně pro konstrukční aplikace posílení konstrukce. [11]

Tabulka 7 Výsledky naměřené při studii o chování FRP výztuží v extrémních teplotách [14]

Testovací teplota [°C]	-40	-20	-10	0	20	40	60	80
Síla při porušení [kN]	28,12	26,65	27,4	29	29,7	31,45	19,3	9,05
Procentuální změna únosnosti	95 %	90 %	92 %	98 %	100 %	106 %	65 %	30 %



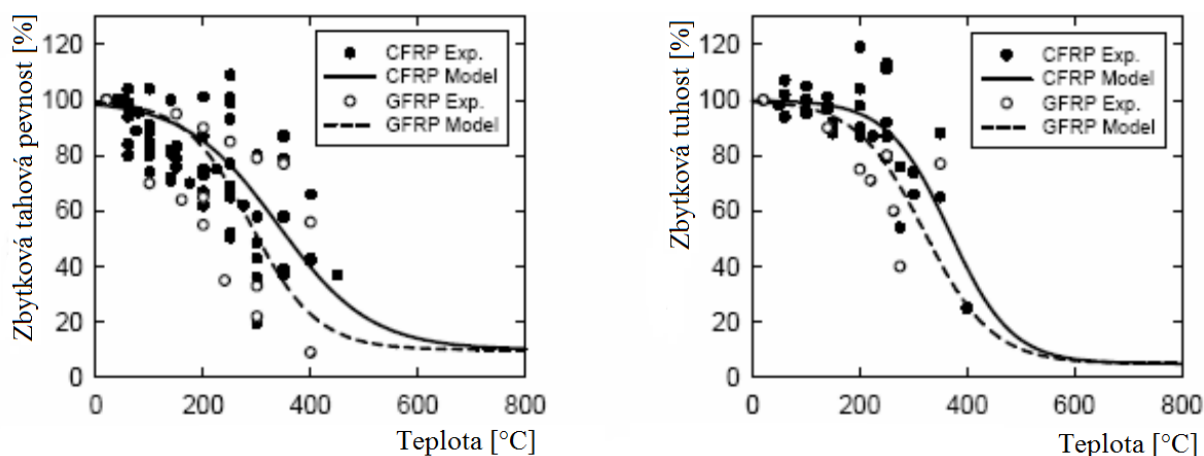
Obrázek 10 Graf chování výztuží při různých teplotách ^[14]

Z grafů je patrná razantní změna chování FRP výztuží při vyšších teplotách. Lze pozorovat, jak výztuže měknou a zhoršují se jejich mechanické pevnosti. Chování při nízkých teplotách pod bodem mrazu ukazuje, že se výztuže temperované na tyto nízké teploty přetrhly při menším přetvoření a jsou tedy křehčí.

Jak již bylo řečeno, nízké teploty mají jen malý vliv na pevnost samotné výztuže, pokud však jde o strukturální výkonnost FRP výztuží a její užití v konstrukci při nízkých teplotách pod bodem mrazu, vazba mezi FRP výztuží a betonem je nejvýznamnější aspekt, určujícím provozuschopnost dané konstrukce. Z toho hlediska byla vazba GFRP a CFRP výztuží s betonem široce zkoumána, což mělo za následek značné množství experimentálních dat o výkonnosti vazby výztuž-beton. Bylo zjištěno, že parametry jako pevnost betonu, průměr výztuže a délka ukotvení významně ovlivňují výkonnost FRP výztuží jako vyztužujícího prvek. Při experimentu byly všechny vzorky zatěžovány do porušení. Výsledky ukázaly, že nízké teploty způsobují prokluz mezi výztuží a betonem. K prokluzu došlo při zatížení v rozmezí mezi 70 % a 90 % maximální únosnosti testované konstrukce. Můžeme tedy konstatovat, že dlouhodobé působení nízké teploty může způsobit závažné porušení vazby mezi výztuží a betonem a tím dojde k oslabení celé konstrukce. ^[17]

3.4.2 Požární odolnost

Nedostatečná požární odolnost FRP výztuží, je jednou z hlavních překážek omezujících jejich široké použití v občanské výstavbě. Je dobře známo, že se polymerní matrice v přítomnosti extrémně vysokých teplot rozkládá. Hlavním příčinou je ve většině případu degradace pryskyřice a její změkčování a následné zuhelnatění jejího povrchu. Požár na počátku ohřívá povrch kompozitu až teplota vzroste na teplotu skelného přechodu. Po dosažení této kritické teploty (pohybuje se v rozmezí od 65–120 °C) dochází ke snížení modulu pružnosti z důvodu změn v molekulární struktuře, což vede k zhoršení příčné pevnosti, smykové pevnosti a tuhosti. Další zvýšení teploty (např. 230 °C u GFRP s vinylesterovou matricí) vede k degradaci chemické struktury pryskyřice, která vede k nevratnému poškození a ztrátě pevností (viz obrázek 11). [32]



Obrázek 11 Snížení tahové pevnosti a tuhosti CFRP a GFRP se zvýšením teploty
(Bisby 2003) [32]

Ve srovnání s betonem a ocelí je tedy požární odolnost FRP výztuží nízká (polyesterové matrice ztrácejí pevnost již při 100 °C). Důležitou otázkou ke zvážení je i produkce toxických výparů, vznikajících při hoření FRP výztuží zejména v uzavřených prostorách. Možné řešení je připravit materiály odolné vyšším teplotám (fenolické matrice) se sníženou hořlavostí, nevyvíjející při hoření toxické zplodiny. Díky nízké tepelné vodivosti je šíření tepla zhruba dvěstěkrát pomalejší než u ocele. V případě potřeby je nutné k zvýšení odolnosti proti ohni provést konstrukční opatření. [32], [31]

3.5 Vliv UV záření

Ultrafialové záření, zkráceně UV záření, je elektromagnetické záření o vlnové délce 100–400 nm, leží tedy pod hranicí viditelného spektra. Největší vliv má na plasty UV záření o vlnové délce 290–400 nm, což je cca 5 % celkové sluneční radiace dopadající na Zemi. Světelné záření dopadající na ozařovaný plast může být jeho povrchem odraženo, rozptýleno, propuštěno nebo absorbováno. Uvedené fotochemické změny probíhají, je-li UV záření polymerem absorbováno. Například karbonylová skupina $C=O$ absorbuje vlnové záření o vlnové délce 187 nm a dále v rozmezí délek 280–320 nm. Vazba $C-C$ pak absorbuje záření o vlnové délce 195 nm a 230 nm a 250 nm. Je-li energie světla větší než energie vazby v polymerech, vazba se přetrhne. Vzniklé radikály jsou schopny vyvolat degradační proces (štěpení nebo síťování makromolekulárních řetězců). Hmotnostní úbytek polymerů a změna mechanických vlastností polymerů je způsobena intenzitou dopadající sluneční energie, ta může být vyjádřena dobou vystavení záření — ovšem za konstantních podmínek. Během roku je sluneční záření nerovnoměrné. V letním období dopadá na Zemi kolem 75 % celkové sluneční energie, zatímco v zimním období je to naopak pouze 25 %. ^[35]

Účinky ultrafialového záření na FRP jsou omezeny na povrch výztuže (matrici). Účinek UV záření může proniknout hlouběji do FRP pouze pokud existují nějaké vady povrchu. UV záření může spolupůsobit s jinými faktory, jako je teplota a vlhkost. Právě tato synergie více faktorů je pro FRP výztuže nebezpečná. UV záření může vyvolat na povrchu kompozitů vady, které umožní pronikání vlhkosti. U FRP výztuží se v praxi s tímto druhem degradace nesetkáváme, jelikož je výztuž chráněná povrchem betonu, který zamezí pronikání UV záření k povrchu výztuže. Lze se s ním však setkat u externích výztužných lamel z FRP materiálu. Z tohoto byly na těchto materiálech provedeny laboratorní zkoušky, kdy byl zkoumán účinek UV záření na AFRP, CFRP a GFRP výztuže vystavené vysoké intenzitě UV záření ($0,2 \text{ MJ/m}^2$ za hodinu při teplotě 26°C). Výsledkem bylo 13 % snížení pevnosti v tahu AFRP výztuží po 2500 hodinách a 8 % snížení pevnosti v tahu GFRP výztuží po 500 hodinách. U CFRP výztuží nebyl prokázán pokles pevností. ^{[32], [28]}

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4. METODIKA PRÁCE

Praktická část této práce je zaměřena na zkoumání trvanlivosti GFRP kompozitních výztuží, jejichž výroba je popsána v teoretické části. Byly sledovány vlastnosti FRP výztuží v alkalickém prostředí dle směrnice ACI 440,3R-04 (nyní řešeno v ACI 440.3R-12), při uložení v roztocích o různých teplotách (20 °C, 40 °C, 60 °C). Byly popsány změny FRP výztuží v čase při definovaném uložení pomocí destruktivních zkoušek dle ACI 440,3R-04 (nyní řešeno v ASTM D7205) a sledováním na optickém mikroskopu. Cílem bylo zhodnotit vliv prostředí na vlastnosti FRP výztuží, zejména na pevnostní charakteristiky. Dále bylo stanoveno dle normy ISO 10406-1 krípkové chování výztuží. Celý experiment je podrobně popsán v následujících kapitolách.

Členění experimentální části:

- Ověření trvanlivosti FRP výztuží v alkalickém prostředí
- Destruktivní zkoušky výztuže při dlouhodobém zatížení
- Optická mikroskopie

5. OVĚŘENÍ TRVANLIVOSTI FRP VÝZTUŽÍ V ALKALICKÉM PROSTŘEDÍ

Cílem této zkoušky bylo určit maximální osovou tahovou únosnost vzorku a této únosnosti odpovídající poměrné přetvoření. Současně bylo cílem také stanovení modulu pružnosti vzorku v podélném směru a určení pevnosti v tahu. Destruktivní zkoušky byly provedeny dle ACI 440.3R-04 pro FRP výztuže uložené na vzduchu při teplotě 20 °C a pro výztuže uložené v alkalickém roztoku dle ACI 440.3R-04 při teplotě 20 °C, 40 °C a 60 °C po dobu 1000 h, 90 dnů a 180 dnů.

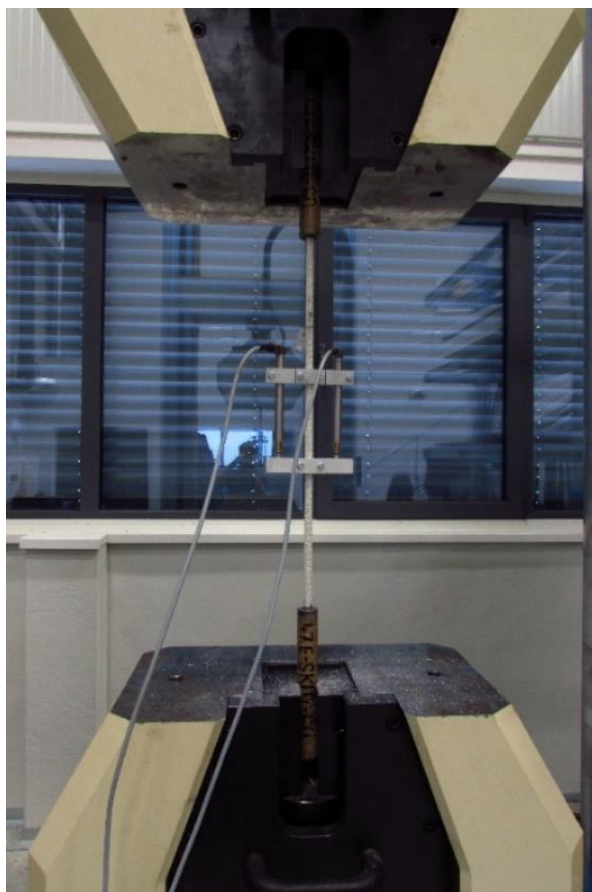
Výztuže jsou primárně určené pro použití v betonu. Tvrdnutí betonu je způsobené hydratací cementu, které se projevuje nabýváním pevností betonu v závislosti na technologických parametrech a podmínkách prostředí. Reakce slínekových minerálů s vodou probíhá v alkalickém prostředí rozpuštěného Ca(OH)_2 a případně alkálií. Vzniká nenasycený roztok Ca(OH)_2 a kalcium hydrosilikáty typu C-S-H I a typu C-S-H II. Výztuže jsou uloženy v alkalickém roztoku dle ACI 440.3R-04, který reprezentuje alkalitu roztoku uvnitř pórů betonu

na bázi portlandského cementu. Na 1 litr deionizované vody bylo použito 118,5 g Ca(OH)_2 , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Procentuálně by se toto složení dalo vyjádřit jako 10% roztok Ca(OH)_2 , 0,1% roztok NaOH, a 0,4% roztok KOH. Výsledný roztok by měl mít výsledné pH v rozmezí 12,6 – 13, které reprezentuje alkalické prostředí betonu. Pro měření pH byl použit přístroj HACH® HQ11d Portable pH/ORP Meter, který je přímo určený pro měření pH v kapalném prostředí (viz obrázek 12). pH bylo průběžně měřeno a bylo v požadovaném rozmezí 12,6-12,9. [1], [3]



Obrázek 12 Měřicí přístroj HACH® HQ11d

Vzorky FRP výztuží byly pro zkoušku opatřeny ocelovými koncovkami, s důrazem na centrické usazení výztuží do koncovek, aby při zatěžování docházelo k porušení ve středu délky zatěžovaného průřezu. Do těchto koncovek se GFRP výztuž zalila pomocí epoxidové pryskyřice. Uchycení do zkušebního zařízení a osazení měřicího zařízení na zaznamenání deformací je znázorněno na obr. 13 – Osazení výztuže v měřícím zařízení.



Obrázek 13 Osazení výztuže v měřícím zařízení.

5.1 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 1000 HOD

Vzorky kompozitních výztuží s vlákny z E-SKLA byly uloženy v plastových nádobách uzavřených víkem, kde byly temperovány na požadovanou teplotu (20 °C, 40 °C, 60 °C) po dobu 1000 hod. Objem roztoku v nádobách byl 100 l, přičemž bylo zapotřebí objem roztoku dorovnávat v důsledku vypařování. Rovněž byla zkoušena i sada výztuží exponovaných na vzduchu v laboratorním prostředí při 20 °C. Výsledkem měření bylo stanovení střední tahové pevnosti a modulu pružnosti v závislosti na prostředí uložení výztuží a grafické znázornění naměřených výsledků. Jelikož, byly výztuže vyrobeny na dvou linkách, byly výztuže rozděleny na výztuže z linky č. 1 a výztuže z linky č. 2, které jsou v tabulkách zvýrazněny **růžovým** pozadím a jejich průměrné hodnoty jsou pak uvedeny vždy v pravém sloupci tabulek naměřených a vypočtených hodnot.

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo, referenční 20 °C – na vzduchu v laboratorním prostředí



Obrázek 14 Porušení výztuží: 2.E-SKLO-CREEP, 4.E-SKLO-CREEP, 7.E-SKLO-CREEP, 15.E-SKLO-CREEP, 22.E-SKLO-CREEP, 26.E-SKLO-CREEP

Tabulka 8 Popis porušení I. Sada GFRP Ø10 mm, E-sklo, referenční 20 °C – na vzduchu v laboratorním prostředí, 1000 hodin

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
2. E-SKLO CREEP	"Lineární" chování – typické porušení roztřepáním prvku (ne tak velké roztřepení, ojedinělé selhání kopírovalo vinutí provázku).
4. E-SKLO CREEP	Porušení u koncovky – selhala povrchová vrstva výztuže (selhání kopírovala vinutí provázku).
7. E-SKLO CREEP	Typické porušení delaminací a roztřepáním jednotlivých vláken.
15. E-SKLO CREEP	Typické porušení – porušení v blízkosti spodního rámečku – po vyjetí lisem patrné místo porušení.
22. E-SKLO CREEP	Netypické porušení – porušení ve spodní části (mezi koncovkou a rámečkem) - na dvou místech porušený povrch. Vrstvy kopírující vinutí provázku. Vyřazen z vyhodnocení.
26. E-SKLO CREEP	Typické porušení – delaminace – porušení ve spodní části (viditelná delaminace pouze ve spodní části – mezi koncovkou a rámečkem; provázek selhal po délce).

Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod I. Sada GFRP Ø10 mm, E-sklo, referenční 20 °C – na vzduchu v laboratorním prostředí

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, referenční 20 °C – na vzduchu v laboratorním prostředí					
Označení vzorku	2. E-SKLO CREEP	4. E-SKLO CREEP	7. E-SKLO CREEP	15. E-SKLO CREEP	22. E-SKLO CREEP	26. E-SKLO CREEP
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	63,81	64,03	65,34	64,52	56,45	63,67
Maximální tahová pevnost [MPa]	812,45	815,25	831,93	821,49	718,74	810,67
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	6:30	6:22	6:27	6:19	5:08	5:56
Střední tahová pevnost [MPa]	818					
Směrodatná odchylka [MPa]	8,63					
Variační koeficient [-]	0,01					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	49,26	49,30	-	49,78	51,15	45,24
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	49,0					
Směrodatná odchylka [GPa]	2,21					
Variační koeficient [-]	0,05					

Pozn. - hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení nebo vyhodnoceny zvlášť

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 15 Porušení výztuží: 31.E-SKL-20, 32.E-SKLO-20, 33.E-SKLO-20, 34.E-SKLO-20, 37.E-SKLO-20, 38.E-SKLO-20

Tabulka 10 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
31. E-SKLO - 20	"Lineární" chování – typické porušení roztřepáním prvku (ne tak velké roztřepení, ojedinělé selhání kopírovalo vinutí provázku).
32. E – SKLO - 20	Porušení uprostřed (mezi rámečky) v jednom řezu – řez kopíroval vinutí provázku.
33. E – SKLO - 20	Typické porušení delaminací a roztřepáním jednotlivých vláken.
34. E – SKLO - 20	Porušení v jednom řezu cca 150 mm od koncovky – řez kopíroval vinutí provázku
37. E – SKLO - 20	Porušení v jednom řezu cca 150 mm od koncovky – řez kopíroval vinutí provázku
38. E – SKLO - 20	Typické porušení – delaminace roztřepení jednotlivých vláken výztuže (roztřepení vláken nebylo tak velké jako obvykle; provázek se porušil na větší vzdálenosti).

Tabulka 11 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po 1000 hodin					
Označení vzorku	31. E-SKLO 20	32. E-SKLO 20	33. E-SKLO 20	34. E-SKLO 20	37. E-SKLO 20	38. E-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	61,04	49,57	50,89	54,05	63,51	54,32
Maximální tahová pevnost [MPa]	777,18	631,14	647,95	688,18	808,63	691,62
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	5:40	4:24	4:27	4:40	5:59	5:05
Střední tahová pevnost [MPa]	665			793		
Směrodatná odchylka [MPa]	29,90			22,24		
Variační koeficient [-]	0,04			0,03		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	49,51	50,65	-	50,27	49,75	50,32
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	50,4			49,6		
Směrodatná odchylka [GPa]	0,21			0,17		
Variační koeficient [-]	0,004			0,003		

Pozn. ■ -výztuže vyrobené na lince č. 2

■ - nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 16 Porušení výztuží: 39.E-SKLO-40, 40.E-SKLO-40, 41.E-SKLO-40, 42.E-SKLO-40, 43.E-SKLO-40, 44.E-SKLO-40

Tabulka 12 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
39. E-SKLO - 40	"Lineární" chování – porušení v jednom řezu u koncovky.
40. E-SKLO - 40	Typické porušení – delaminace roztřepení jednotlivých vláken výztuže, provázek selhal po celé délce prvku.
41. E-SKLO - 40	Typické porušení vzorku (delaminace po celé délce + roztřepení vláken) - porušení části povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
42. E-SKLO - 40	Typické porušení – porušení v blízkosti spodního rámečku – po vyjetí lisem patrné místo porušení.
43. E-SKLO - 40	Porušení v jednom řezu (nad rámečkem) - porušení povrchové vrstvy – řez kopíroval vinutí provázku.
44. E-SKLO - 40	Porušení v jednom řezu v koncovce – částečná delaminace

Tabulka 13 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po 1000 hodin					
Označení vzorku	39. E-SKLO 40	40. E-SKLO 40	41. E-SKLO 40	42. E-SKLO 40	43. E-SKLO 40	44. E-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	49,44	59,52	49,88	59,28	44,15	49,67
Maximální tahová pevnost [MPa]	629,49	757,83	635,09	754,77	562,13	632,42
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:51	5:48	4:19	5:28	3:57	4:19
Střední tahová pevnost [MPa]	632			756		
Směrodatná odchylka [MPa]	2,80			2,16		
Variační koeficient [-]	0,004			0,003		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	49,52	48,64	-	49,50	50,40	50,13
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	49,8			49,1		
Směrodatná odchylka [GPa]	0,43			0,61		
Variační koeficient [-]	0,009			0,012		

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

- hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 17 Porušení výztuží: 45.E-SKLO-60, 47.E-SKLO-60, 48.E-SKLO-60, 51.E-SKLO-60, 52.E-SKLO-60, 53.E-SKLO-60, 54.E-SKLO-60, 55.E-SKLO-60

Tabulka 14 Popis porušení IV. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
45. E-SKLO - 60	"Lineární" chování – porušení v jednom řezu u koncovky – řez kopíroval vinutí provázku.
47. E-SKLO - 60	Typické porušení (delaminace po celé délce, vlákna se neroztřepily tak moc jako obvykle).
48. E-SKLO - 60	Typické porušení – delaminace po celé délce (více povrchových vláken najednou porušeno v jednom řezu, který kopíroval vinutí provázku) - možné typické porušení degradovaných výztuží.
51. E-SKLO - 60	Typické porušení – delaminace po celé délce (více povrchových vláken najednou porušeno v jednom řezu, který kopíroval vinutí provázku) - možné typické porušení degradovaných výztuží.
52. E-SKLO - 60	Typické porušení – delaminace po celé délce (více povrchových vláken najednou porušeno v jednom řezu, který kopíroval vinutí provázku) - možné typické porušení degradovaných výztuží.
53. E-SKLO - 60	Typické porušení (delaminace po celé délce, vlákna se neroztřepily tak moc jako obvykle)
54. E-SKLO - 60	Porušení povrchových vláken v místě vinutí provázku (blíže koncovky); delaminace po celé délce)
55. E-SKLO - 60	Porušení povrchových vláken v místě vinutí provázku (cca 100 mm od koncovky), delaminace po celé délce.

Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	IV. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po 1000 hodin							
Označení vzorku	45.E-SKLO 60	47.E-SKLO 60	48.E-SKLO 60	51.E-SKLO 60	52.E-SKLO 60	53.E-SKLO 60	54.E-SKLO 60	55.E-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	43,10	61,14	61,78	47,44	52,67	58,38	50,26	51,60
Maximální tahová pevnost [MPa]	548,76	778,46	786,61	604,02	670,61	743,32	639,93	656,99
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:10	6:00	6:19	4:18	4:39	5:35	4:27	4:21
Sřední tahová pevnost [MPa]	643				769			
Směrodatná odchylka [MPa]	28,79				23,00			
Variační koeficient [-]	0,04				0,03			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	50,83	45,18	-	50,91	50,88	49,41	49,88	49,74
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	50,4				47,4			
Směrodatná odchylka [GPa]	0,63				2,99			
Variační koeficient [-]	0,01				0,06			

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

- hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

5.2 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 1000 HOD

Vzorky kompozitních výztuží s využitím vláken (AR-SKLO) byly uloženy v plastových nádobách a uzavřených víkem, kde byly temperovány na požadovanou teplotu (20 °C, 40 °C, 60 °C) po dobu 1000 hod. Objem roztoku v nádobách byl 100 l, přičemž bylo zapotřebí objem roztoku dorovnávat v důsledku vypařování. Výsledkem měření bylo stanovení střední tahové pevnosti a modulu pružnosti v závislosti na prostředí uložení výztuží a grafické znázornění naměřených výsledků.

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 18 Porušení výztuží: 9.AR-SKLO-20, 8.AR-SKLO-20, 6.AR-SKLO-20, 5.AR-SKLO-20, 1.AR-SKLO-20

Tabulka 16 Popis porušení I. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
1. AR-SKLO-20	"Lineární" chování – typické porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (podélné trhliny) - pouze v části kolem místa porušení.
5. AR-SKLO-20	Porušení u dolní koncovky – porušení části povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku. Netypické porušení v jednom místě (v jednom řezu). Nedošlo ke vzniku podélných trhlin (delaminaci).
6. AR-SKLO-20	Porušení uprostřed – porušení části povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku. Netypické porušení v jednom místě (v jednom řezu). Nedošlo ke vzniku podélných trhlin (delaminaci).

8. AR-SKLO-20	Porušení mezi rámečkem a dolní koncovkou – porušení části povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku. Netypické porušení v jednom místě (v jednom řezu). Nedošlo ke vzniku podélných trhlin (delaminaci).
9. AR-SKLO-20	Porušení mezi rámečkem a dolní koncovkou – porušení části povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku. Netypické porušení v jednom řezu. Nedošlo ke vzniku podélných trhlin (delaminaci).

Tabulka 17 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 30 dní				
Označení vzorku	1. AR-SKLO 20	5. AR-SKLO 20	6. AR-SKLO 20	8. AR-SKLO 20	9. AR-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	39,58	40,08	38,66	39,2	39,32
Maximální tahová pevnost [MPa]	503,95	510,31	492,23	499,11	500,64
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:27	4:06	4:00	3:49	3:38
Střední tahová pevnost [MPa]	501				
Směrodatná odchylka [MPa]	6,63				
Variační koeficient [-]	0,013				
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	43,87	43,13	46,22	43,00
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,1				
Směrodatná odchylka [GPa]	1,49				
Variační koeficient [-]	0,034				

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 19 Porušení výztuží: 29.AR-SKLO-40, 27.AR-SKLO-40, 24.AR-SKLO-40, 17.AR-SKLO-40, 11.AR-SKLO-40, 10.AR-SKLO-40

Tabulka 18 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
10. AR-SKLO-40	"Lineární" chování – typické porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (podélné trhliny) ne přes celý vzorek.
11. AR-SKLO-40	Porušení v oblasti mezi rámečky, porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (vznik podélných trhlin) pouze na části vzorku (ne přes celou délku).
17. AR-SKLO-40	Porušení mezi rámečkem a horní koncovkou, porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (vznik podélných trhlin) pouze na části vzorku (ne přes celou délku).
24. AR-SKLO-40	Porušení mezi rámečkem a horní koncovkou, porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (vznik podélných trhlin přes celou délku vzorku).
27. AR-SKLO-40	Porušení u horní koncovky, porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, porušení v jednom místě (v jednom řezu) - nežádoucí způsob porušení.
29. AR-SKLO-40	Porušení mezi rámečkem a horní koncovkou, porušení části povrchové vrstvy kopírující vinutí provázku, delaminace (vznik podélných trhlin ne přes celou délku vzorku – cca 150 mm od koncovky).

Tabulka 19 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 30 dní					
Označení vzorku	10. AR-SKLO 40	11. AR-SKLO 40	17. AR-SKLO 40	24. AR-SKLO 40	27. AR-SKLO 40	29. AR-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	36,47	36,26	36,28	36,84	37,67	36,74
Maximální tahová pevnost [MPa]	464,35	461,68	461,93	469,06	479,63	467,79
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:34	4:22	4:03	3:58	4:29	3:29
Střední tahová pevnost [MPa]	467					
Směrodatná odchylka [MPa]	6,70					
Variační koeficient [-]	0,014					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	43,64	45,87	-	41,99	43,50	40,22
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	43,0					
Směrodatná odchylka [GPa]	2,10					
Variační koeficient [-]	0,049					

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 20 Porušení výztuží: 50.AR-SKLO-60, 49.AR-SKLO-60, 45.AR-SKLO-60, 36.AR-SKLO-60, 35.AR-SKLO-60, 30.AR-SKLO-60

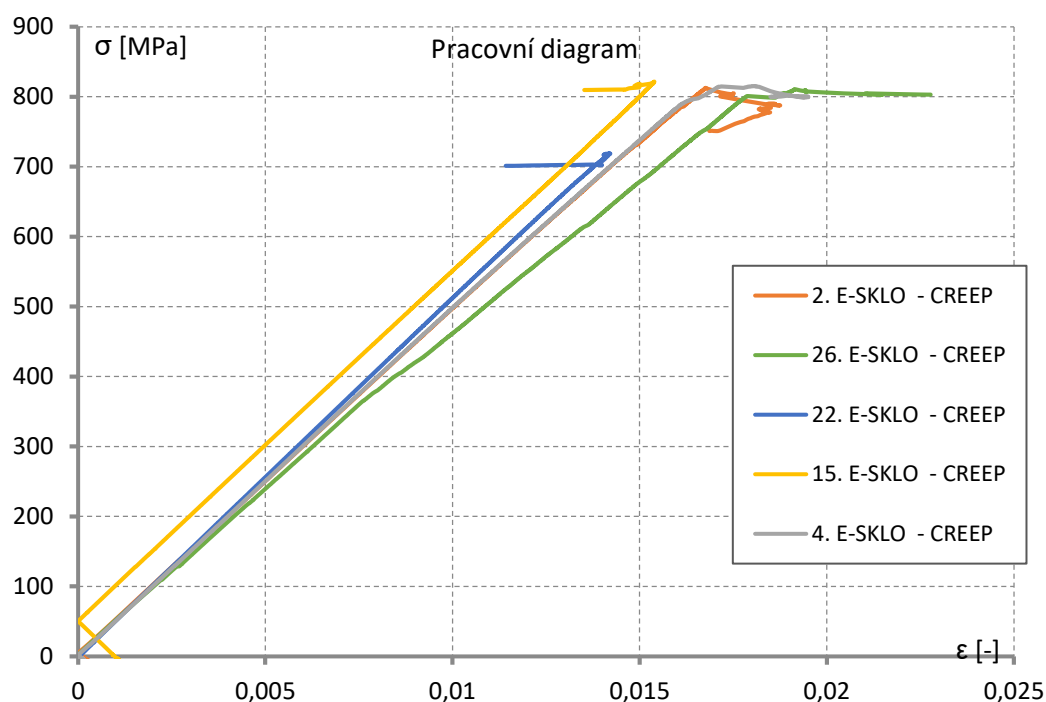
Tabulka 20 Popis porušení III. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C, 1000 hodin v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
30. AR-SKLO-60	Porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku, delaminace po celé délce prvku (částečně vytažení z koncovky).
35. AR-SKLO-60	Typické porušení – delaminace (podélné trhliny) po celé délce, porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutý provázku.
36. AR-SKLO-60	Selhala koncovka při současném porušení vzorku – vzorek se prohnul (jakoby namáhám ohybem) a zůstal zdeformovaný. Stlačen při uchycení.
46. AR-SKLO-60	Povrchová vrstva se porušila v místě vinutí provázku (delaminace po celé délce vzorku). Stlačen při uchycení. Vzorek se porušil pod rámečkem.
49. AR-SKLO-60	Vznik podélných trhlin po celé délce vzorku (delaminace). Stlačen při uchycení, zatěžován na 2x. Vzorek se porušil pod rámečkem.
50. AR-SKLO-60	Porušení vzorku vznikem podélných trhlin přes celou jeho délku (delaminace). Vzorek se porušil pod rámečkem.

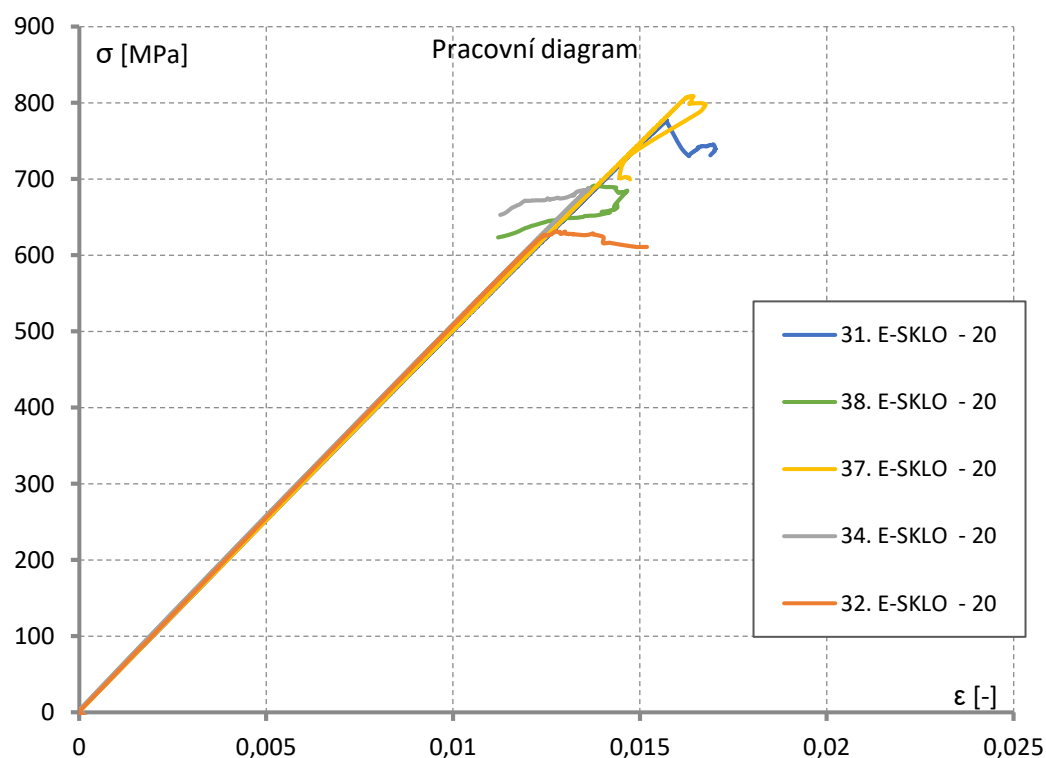
Tabulka 21 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hod – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 30 dní					
Označení vzorku	30. AR-SKLO 60	35. AR-SKLO 60	36. AR-SKLO 60	46. AR-SKLO 60	49. AR-SKLO 60	50. AR-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	35,99	33,33	36,02	39,49	34,66	36,11
Maximální tahová pevnost [MPa]	458,24	424,37	458,62	502,80	441,30	459,77
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	1:59	4:56	3:54	4:29	5:10	4:24
Střední tahová pevnost [MPa]	458					
Směrodatná odchylka [MPa]	26,15					
Variační koeficient [-]	0,057					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	41,96	43,85	44,79	45,32	41,93	43,81
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	43,6					
Směrodatná odchylka [GPa]	1,41					
Variační koeficient [-]	0,032					

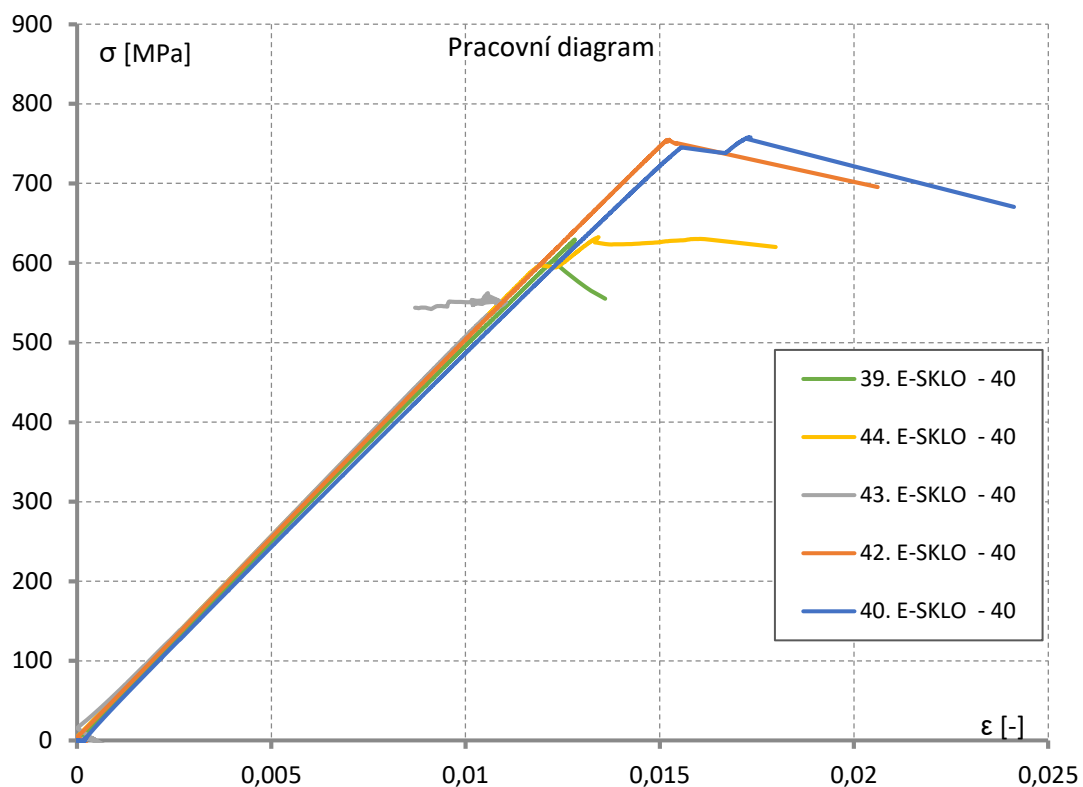
5.3 PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 1000 HOD



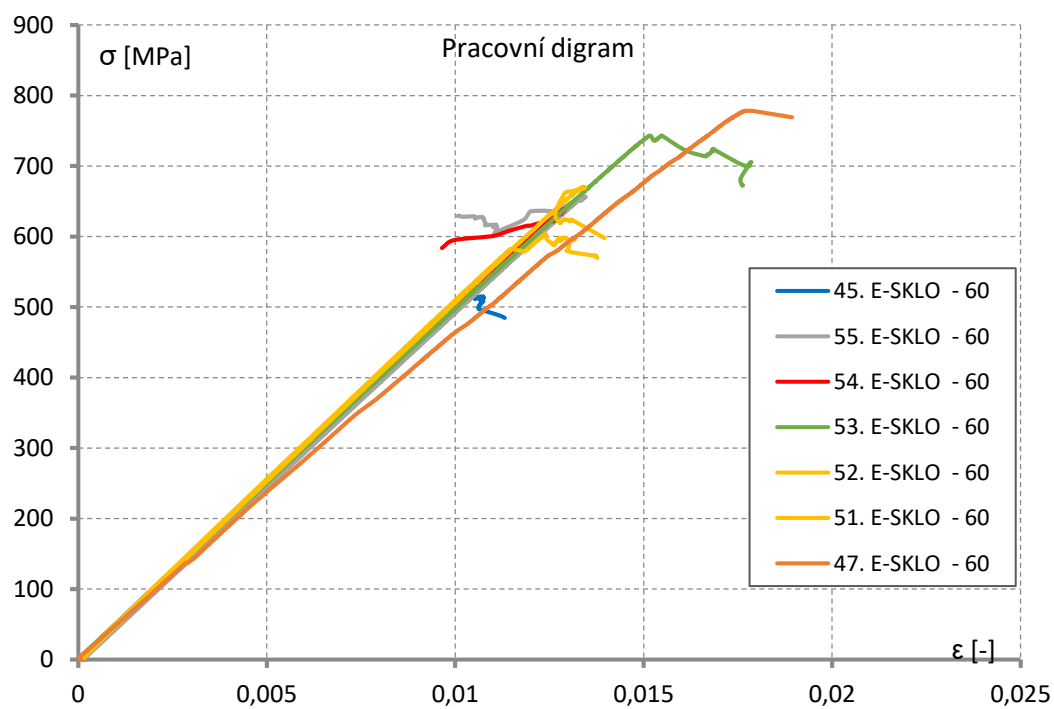
Obrázek 21 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo – CREEP (referenční vzorky, 20 °C, vzduch, laboratorní prostředí)



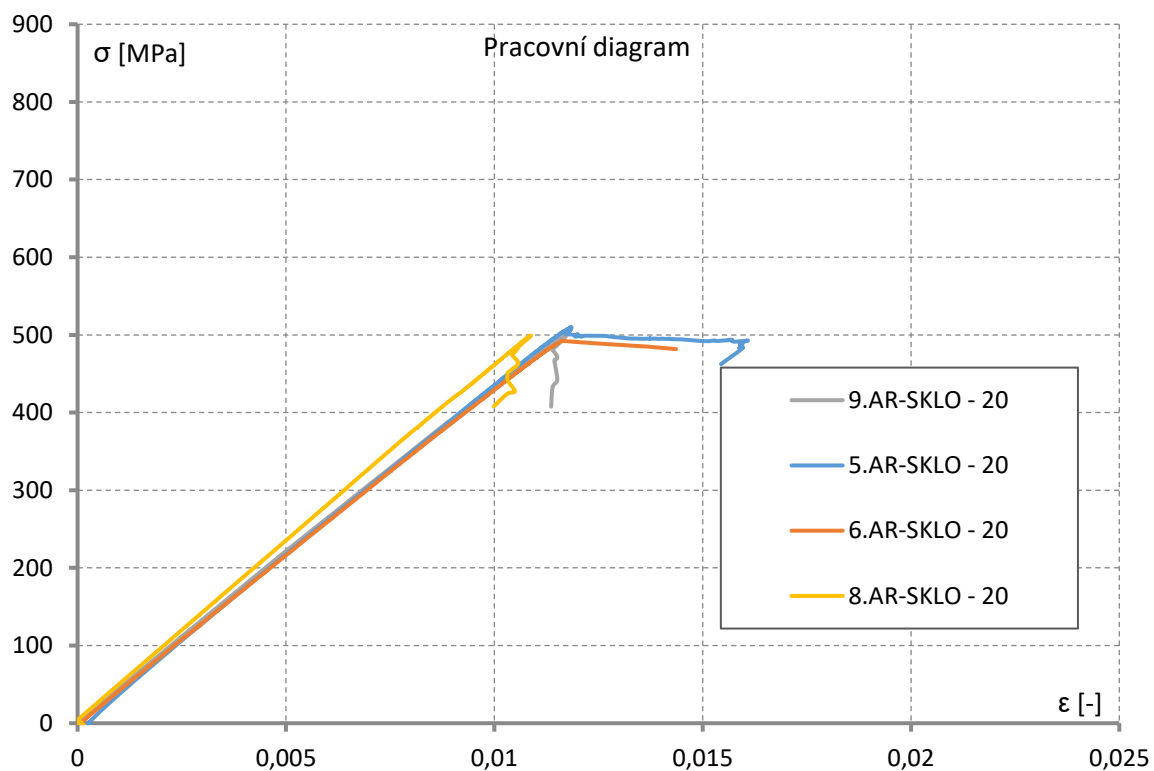
Obrázek 22 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 1000 hodin



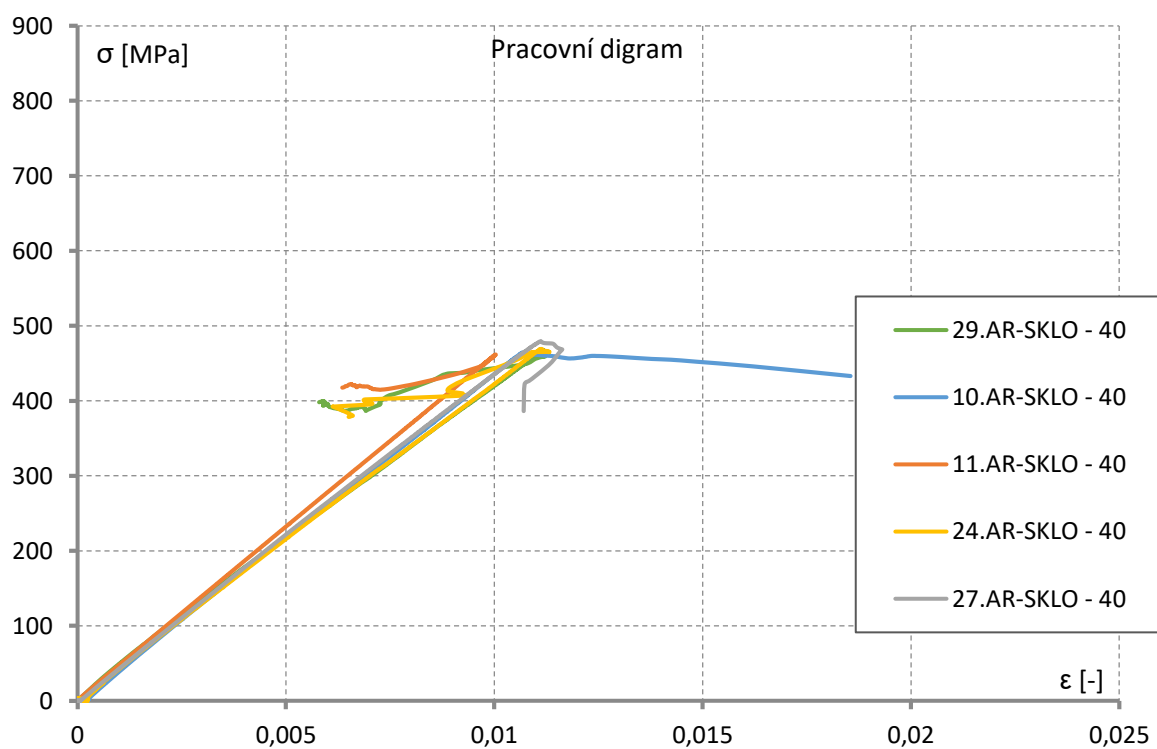
Obrázek 23 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 1000 hodin



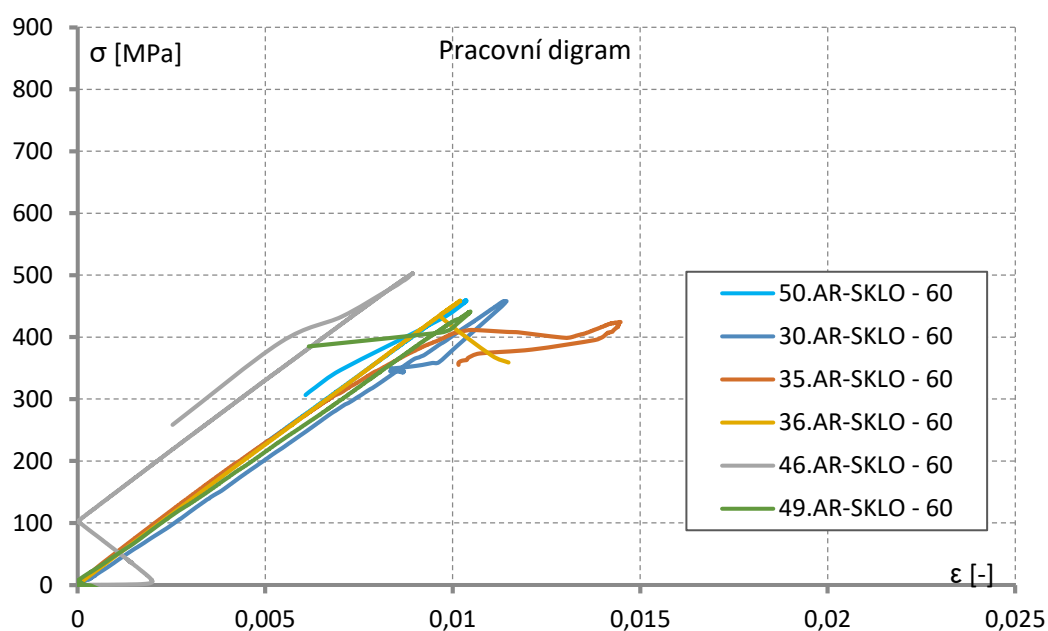
Obrázek 24 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 1000 hodin



Obrázek 25 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 1000 hodin



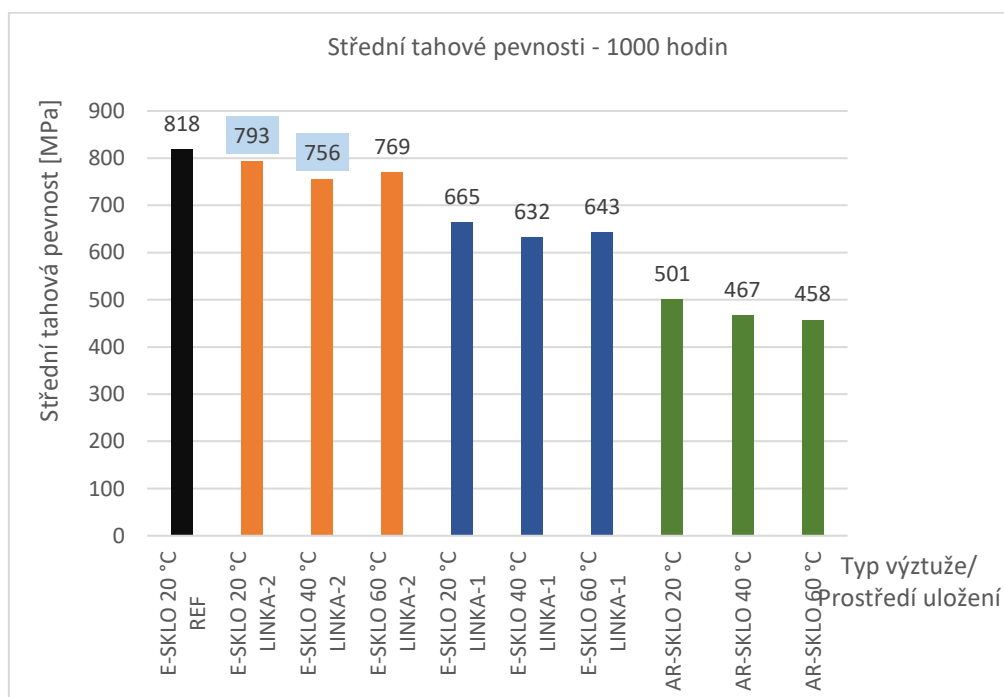
Obrázek 26 Pracovní diagram – AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 1000 hodin



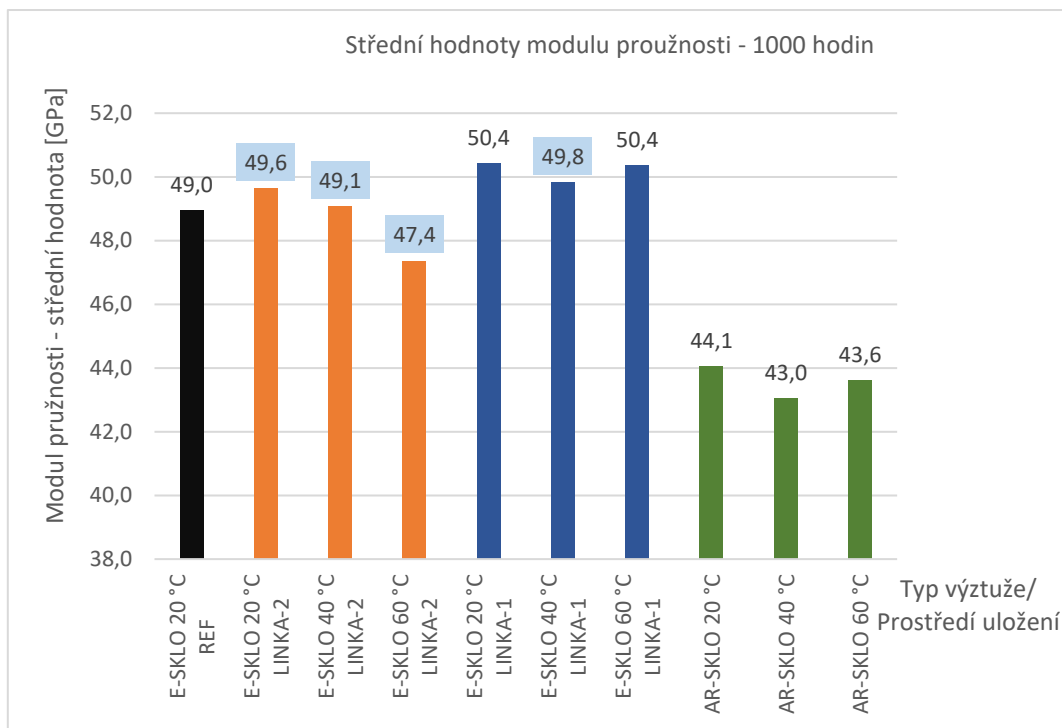
Obrázek 27 Pracovní diagram – AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 1000 hodin

5.4 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 1000 HODINÁCH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Pozn. Hodnoty označeny **modrým** podkladem jsou pouze orientační.



Obrázek 28 Střední tahové pevnosti po 1000 hodinách



Obrázek 29 Střední hodnota modulu pružnosti po 1000 hodinách

5.5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 1000 HODINÁCH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Na vzorcích GFRP bylo provedeno vyhodnocení střední tahové pevnosti a střední hodnoty modulu pružnosti (viz Tabulka č. 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21) a jejich grafické vyjádření (viz obrázky č. 21-29). Byly roztrženy podle typy použitého vlákna (E-SKLO, AR-SKLO) a dále dle prostředí uložení.

Při použití vláken typu E-SKLO byly výztuže roztrženy do čtyř testovacích sad. V první sadě s názvem Referenční byly vzorky uloženy na vzduchu v laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C. Zbylé tři sady byly uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (druhá sada – 20 °C, třetí sada – 40 °C, čtvrtá sada – 60 °C). Dále se během vyhodnocování prokázalo, že má na pevnosti výztuží vliv i výrobní linka, na které byla výztuž vyrobena. Jelikož se sady vyráběly na dvou linkách, jsou vyhodnocovány samostatně. Při uložení na vzduchu měly výztuže nejvyšší dosaženou střední tahovou pevnost 818 MPa se střední hodnotou modulu pružnosti 44,1 GPa. Velmi důležité pozorování na výztužích bylo, že s rostoucí teplotou uložení neklesala pevnost v tahu úměrně s teplotou. Výztuže uložené na teplotu 40 °C vykazovaly nižší pevnosti v tahu než výztuže uložené při teplotě 60 °C. Toto pravidlo platilo u výztuží vyrobených na obou linkách.

Střední hodnota modulu pružnosti byla výší teploty uložení ovlivněná jen velmi málo (maximálně o 4 %). Toto pravidlo platí u všech výztuží nezávisle na výrobní lince. Předmět vyhodnocování bylo i optické pozorování a záznam porušení jednotlivých výztuží (viz Tabulka č. 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20). Typickým porušením se jeví delaminace vláken s porušením vinutí provázku. Při vyšších teplotách uložení docházelo k většímu roztřepení vláken a můžeme tedy sledovat možné typické porušení degradovaných výztuží.

Při použití vláken typu AR-SKLO byly výztuže roztrženy do třech testovacích sad a uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (první sada – 20 °C, druhá sada – 40 °C, třetí sada – 60 °C). Dosahovali jsme nižších tahových pevností, nežli u vláken typu E-SKLO a opět platilo stejné pravidlo klesajících pevností v závislosti na teplotě prostředí. Odlišnost však vykazovaly při typu porušení, kdy se vlákna netřepila, a výztuže se měly tendenci trhat v jednom řezu, přičemž samotná teplota prostředí neměla významný vliv na způsob porušení.

5.6 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 90 DNÍ

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dní



Obrázek 30 Porušení výztuží: 38.E-SKLO-20, 37.E-SKLO-20, 34.E-SKLO-20, 33.E-SKLO-20, 32.E-SKLO-20, 31.E-SKLO-20

Tabulka 22 Popis porušení I. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
38. E-SKLO-20	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.
37. E-SKLO-20	Typické porušení delaminací a roztřepáním jednotlivých vláken – porušení povrchové vrstvy kopírovalo porušení vinutí provázku.
34. E-SKLO-20	Porušení v jednom řezu 10 cm od koncovky, porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
33. E-SKLO-20	Porušení v koncovce v jednom řezu. Vyřazeno z vyhodnocení.
32. E-SKLO-20	Porušení v jednom řezu 15 cm od koncovky, porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
31. E-SKLO-20	Typické porušení delaminací a roztřepáním jednotlivých vláken – porušení povrchové vrstvy kopírovalo porušení vinutí provázku.

Tabulka 23 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dní					
Označení vzorku	31. E-SKLO 20	32. E-SKLO 20	33. E-SKLO 20	34. E-SKLO 20	37. E-SKLO 20	38. E-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	61,7	51,09	50,18	52,69	61,07	52,88
Maximální tahová pevnost [MPa]	785,59	650,50	638,91	670,87	777,57	673,29
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	5:56	5:21	4:32	5:35	6:04	4:51
Střední tahová pevnost [MPa]	658			782		
Směrodatná odchylka [MPa]	16,53			5,67		
Variační koeficient [-]	0,025			0,007		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	45,92	-	50,98	46,01	48,40	47,95
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	48,3			47,2		
Směrodatná odchylka [GPa]	2,50			1,75		
Variační koeficient [-]	0,052			0,037		

Pozn. ■ -výztuže vyrobené na lince č. 2

■ - nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dní



Obrázek 31 Porušení výztuží: 44.E-SKLO-40, 43.E-SKLO-40, 42.E-SKLO-40, 41.E-SKLO-40, 40.E-SKLO-40, 39.E-SKLO-40

Tabulka 24 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
44. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (menší roztřepení, provázek neporušen).
43. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (provázek porušen, delaminace jen v jedné polovině délky výztuže).
42. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (protržení provázku – výraznější roztřepení vláken).
41. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (menší roztřepení, provázek neporušen).
40. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (protržení provázku – výraznější roztřepení vláken).
39. E-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (protržení provázku – výraznější roztřepení vláken).

Tabulka 25 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dní					
Označení vzorku	39. E-SKLO 40	40. E-SKLO 40	41. E-SKLO 40	42. E-SKLO 40	43. E-SKLO 40	44. E-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	50,74	58,75	50,40	58,38	45,31	47,47
Maximální tahová pevnost [MPa]	646,04	748,03	641,71	743,32	576,90	604,41
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	5:14	5:45	5:17	6:36	4:35	4:22
Střední tahová pevnost [MPa]	617			746		
Směrodatná odchylka [MPa]	32,76			3,33		
Variační koeficient [-]	0,053			0,004		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	49,98	-	46,45	47,56	51,18	47,89
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	48,9			47,6		
Směrodatná odchylka [GPa]	2,11			-		
Variační koeficient [-]	0,043			-		

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dní



Obrázek 32 Porušení výztuží: 55.E-SKLO-60, 54.E-SKLO-60, 53.E-SKLO-60, 52.E-SKLO-60, 51.E-SKLO-60, 48.E-SKLO-60, 47.E-SKLO-60, 45.E-SKLO-60

Tabulka 26 Popis porušení III. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
55. E-SKLO-60	Celá sada vykazovala typické poškození delaminací (vznik podélných trhlin), porušení povrchové vrstvy kopírovalo porušení provázku. Lineární průběh sada vykazovala i při zatěžování až do porušení. Rozsáhlá delaminace se jeví jako možný typický způsob porušení pro degradaci výztuží v daném prostředí.
54. E-SKLO-60	
53. E-SKLO-60	
52. E-SKLO-60	
51. E-SKLO-60	
48. E-SKLO-60	
47. E-SKLO-60	
45. E-SKLO-60	

Tabulka 27 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dní							
Označení vzorku	45.E-SKLO 60	47.E-SKLO 60	48.E-SKLO 60	51.E-SKLO 60	52.E-SKLO 60	53.E-SKLO 60	54.E-SKLO 60	55.E-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	40,66	56,19	56,35	41,96	49,18	55,72	44,12	42,66
Maximální tahová pevnost [MPa]	517,70	715,43	717,47	534,25	626,18	709,45	561,75	543,16
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:55	5:28	5:28	4:09	4:40	5:13	4:05	3:57
Střední tahová pevnost [MPa]	539				714			
Směrodatná odchylka [MPa]	18,36				4,17			
Variační koeficient [-]	0,034				0,006			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	50,93	-	48,95	49,18	49,75	47,91	49,55	46,14
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	49,0				48,4			
Směrodatná odchylka [GPa]	2,02				0,74			
Variační koeficient [-]	0,041				0,015			

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

- hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

5.7 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 90 DNÍ

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dní



Obrázek 33 Porušení výztuží: 9.AR-SKLO-20, 8.AR-SKLO-20, 6.AR-SKLO-20, 5.AR-SKLO-20, 1.AR-SKLO-20

Tabulka 28 Popis porušení I. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
9. AR-SKLO-20	Porušení v místě rámečku v jednom řezu, porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
8. AR-SKLO-20	Porušení v místě rámečku v jednom řezu (větší roztřepení vláken), porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
6. AR-SKLO-20	Porušení v koncovce v jednom řezu. Vyřazeno z vyhodnocení.
5. AR-SKLO-20	Porušení 3 cm od koncovky v jednom řezu.
1. AR-SKLO-20	Porušení v koncovce v jednom řezu. Vyřazeno z vyhodnocení.

Tabulka 29 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dní				
Označení vzorku	1. AR-SKLO 20	5. AR-SKLO 20	6. AR-SKLO 20	8. AR-SKLO 20	9. AR-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	37,62	37,75	34,53	38,24	37,21
Maximální tahová pevnost [MPa]	478,99	480,65	439,65	486,89	473,77
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	3:47	3:57	3:47	4:02	4:25
Střední tahová pevnost [MPa]	480				
Směrodatná odchylka [MPa]	6,56				
Variační koeficient [-]	0,014				
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	45,00	44,05	45,07	44,64
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,7				
Směrodatná odchylka [GPa]	0,47				
Variační koeficient [-]	0,010				

Pozn.  - vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dní



Obrázek 34 Porušení výztuží: 29.AR-SKLO-40, 27.AR-SKLO-40, 24.AR-SKLO-40, 17.AR-SKLO-40, 11.AR-SKLO-40, 10.AR-SKLO-40

Tabulka 30 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
29. AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (menší roztřepení, provázek neporušen).
27. AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (protržení provázku – výraznější roztřepení vláken).
24. AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (menší roztřepení, provázek neporušen).
17 AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (menší roztřepení, provázek neporušen).
11. AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (roztřepení jen v jedné polovině výztuže).
10. AR-SKLO-40	Typické porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken (protržení provázku – výraznější roztřepení vláken).

Tabulka 31 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dní					
Označení vzorku	10. AR-SKLO 40	11. AR-SKLO 40	17. AR-SKLO 40	24. AR-SKLO 40	27. AR-SKLO 40	29. AR-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	36,17	35,11	35,62	33,86	34,38	35,98
Maximální tahová pevnost [MPa]	460,53	447,03	453,53	431,12	437,74	458,11
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	6:15	3:59	3:35	3:34	3:31	3:41
Střední tahová pevnost [MPa]	448					
Směrodatná odchylka [MPa]	11,67					
Variační koeficient [-]	0,026					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	44,56	45,88	43,96	43,96	46,00
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,9					
Směrodatná odchylka [GPa]	1,01					
Variační koeficient [-]	0,022					

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dní



Obrázek 35 Porušení výztuží: 50.AR-SKLO-60, 49.AR-SKLO-60, 46.AR-SKLO-60, 36.AR-SKLO-60, 35.AR-SKLO-60, 30.AR-SKLO-60

Tabulka 32 Popis porušení III. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C, 90 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
50. AR-SKLO-60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky.
49. AR-SKLO-60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky.
46. AR-SKLO-60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky.
36. AR-SKLO-60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky.
35. AR-SKLO-60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky.
30. AR-SKLO-60	Delaminace menšího rozsahu – porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.

Pozn. U sady došlo ke špatnému vyplnění koncovek epoxidovou pryskyřicí, což mělo za následek vyjetí výztuží z koncovky. S naměřenými hodnotami se dále počítá, jelikož se naměřené hodnoty příliš neliší od výztuže 30.AR-SKLO-20, u které jako jediné nedošlo vyjetí výztuže z koncovky, výsledky jsou však uvažovány jen jako orientační.

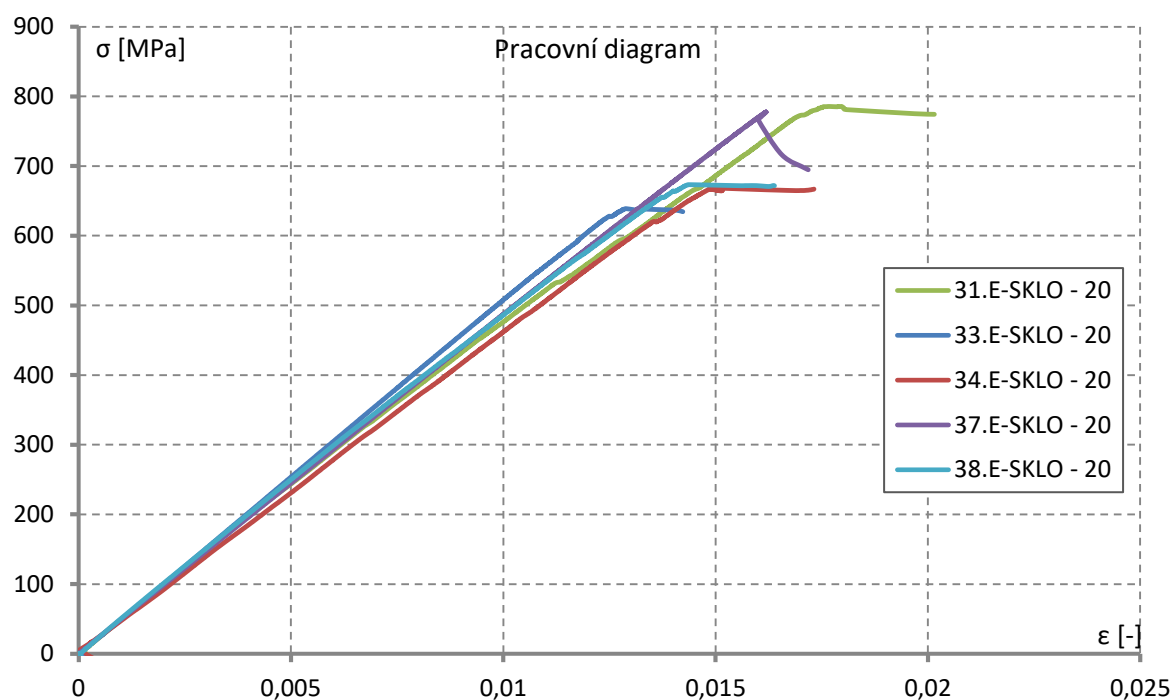
Tabulka 33 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dní					
Označení vzorku	30. AR-SKLO 60	35. AR-SKLO 60	36. AR-SKLO 60	46. AR-SKLO 60	49. AR-SKLO 60	50. AR-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	32,08	32,83	34,45	32,71	33,69	34,49
Maximální tahová pevnost [MPa]	408,45	418,00	438,63	416,48	428,95	439,14
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	3:34	7:09	5:50	4:14	4:11	4:01
Střední tahová pevnost [MPa]	425					
Směrodatná odchylka [MPa]	12,62					
Variační koeficient [-]	0,030					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	45,38	43,92	44,61	43,91	44,60
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,5					
Směrodatná odchylka [GPa]	0,61					
Variační koeficient [-]	0,014					

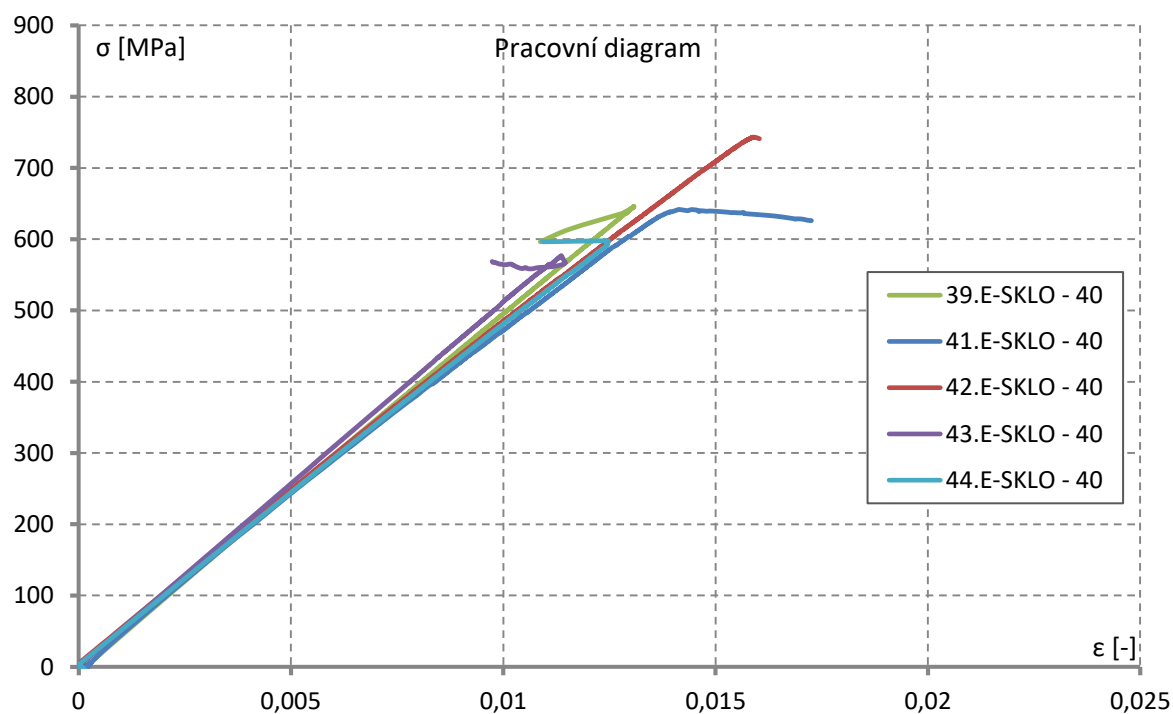
Pozn. Hodnoty jsou pouze orientační – došlo k vyjetí výztuží z koncovky.

- vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení
- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

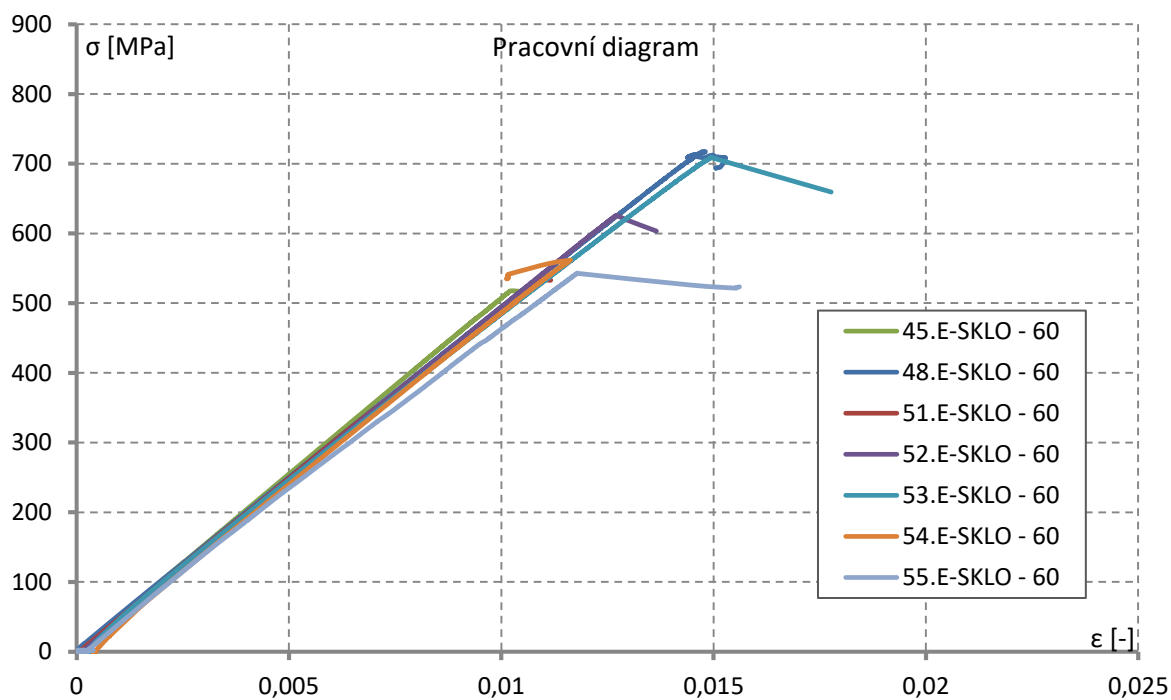
5.8 PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 90 DNÍ



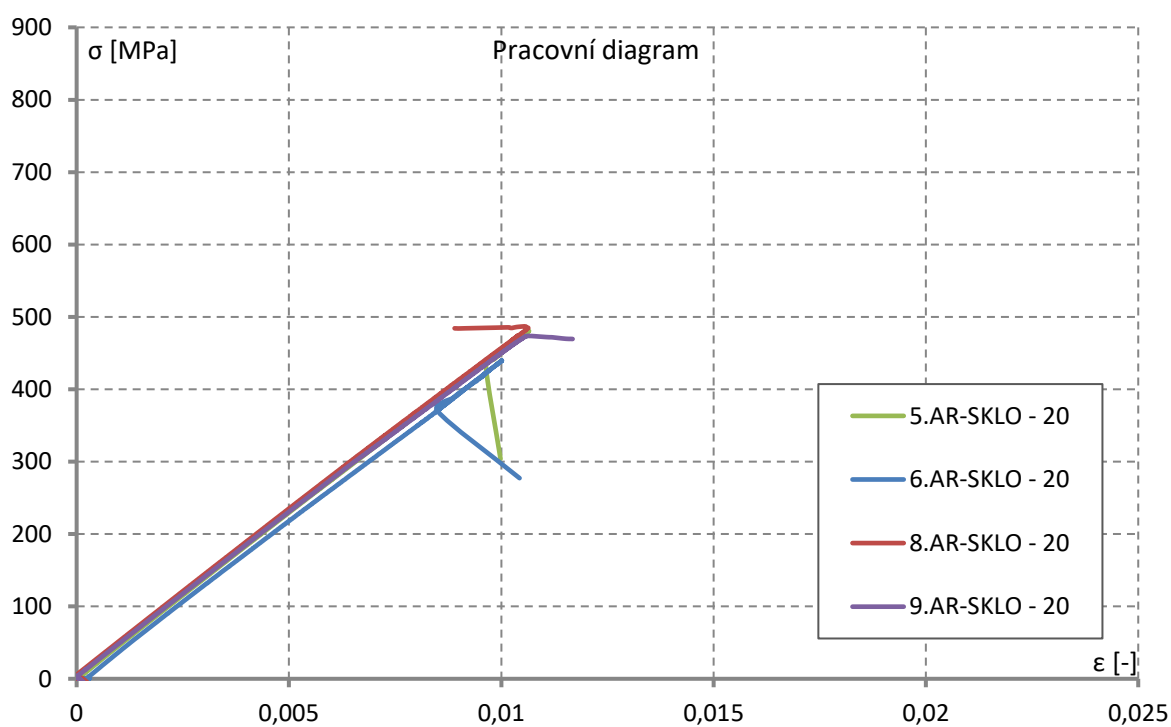
Obrázek 36 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů



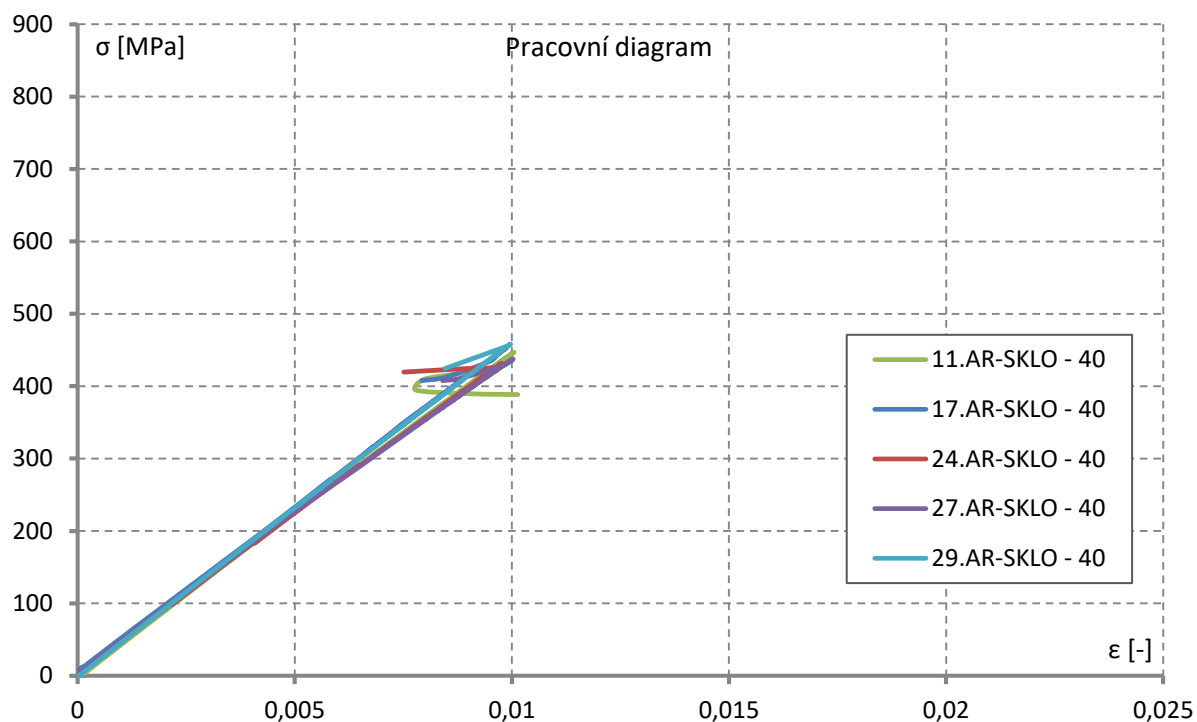
Obrázek 37 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů



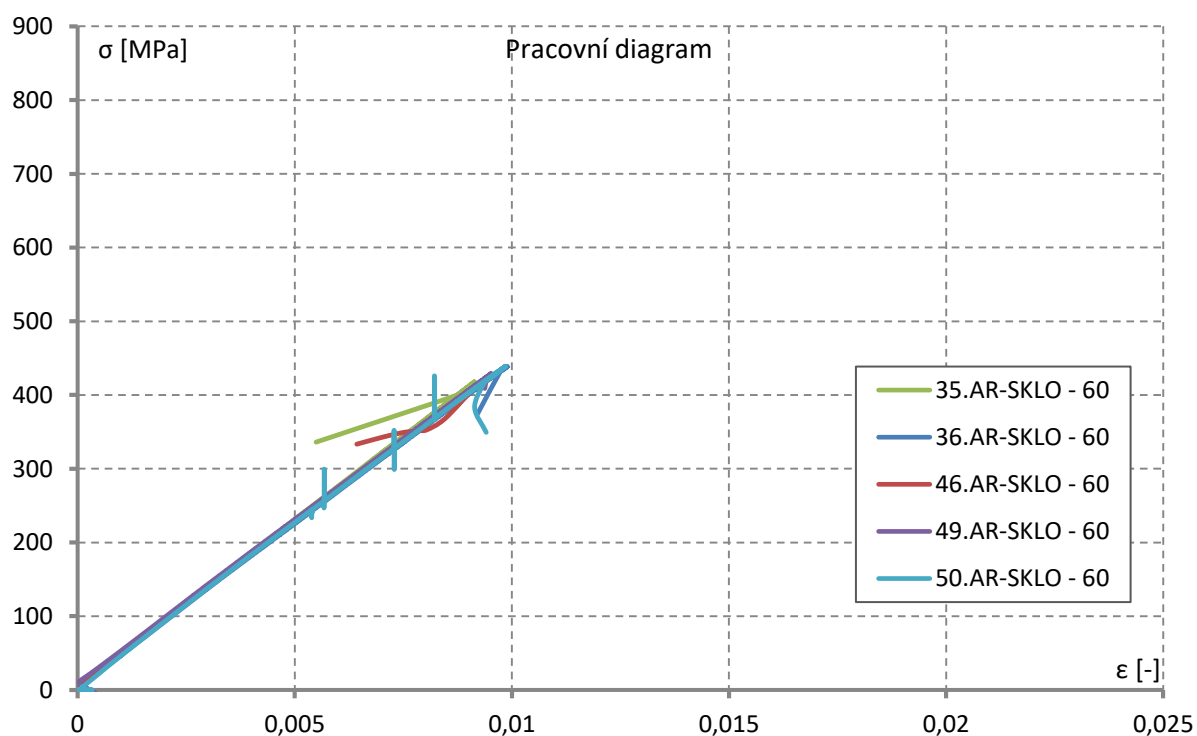
Obrázek 38 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů



Obrázek 39 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů



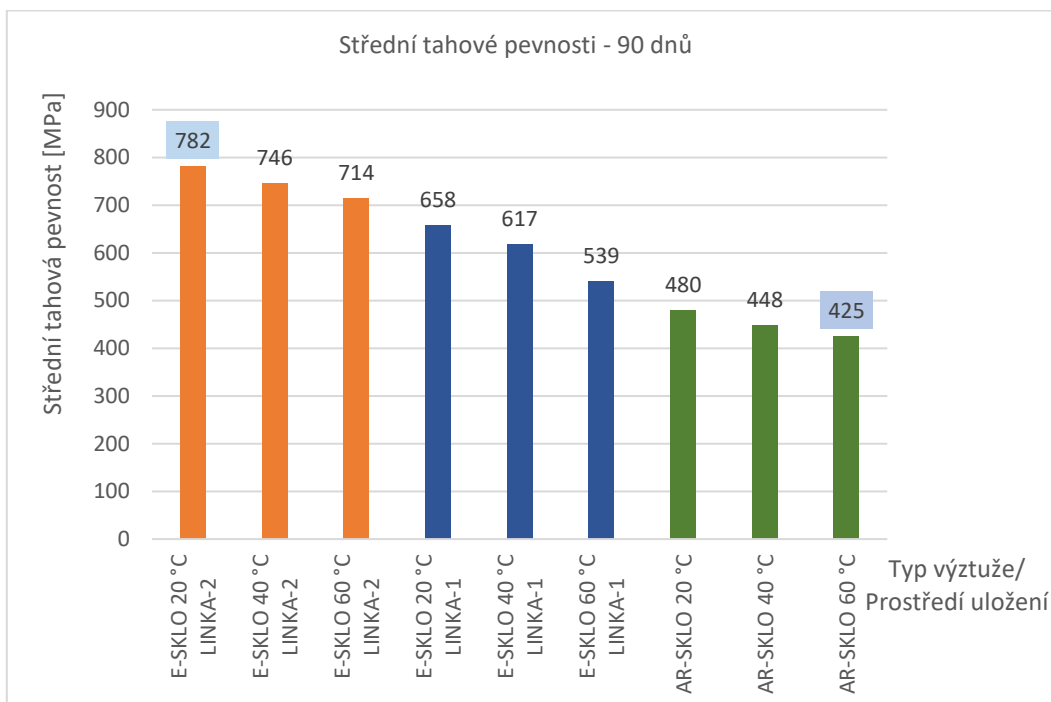
Obrázek 40 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů



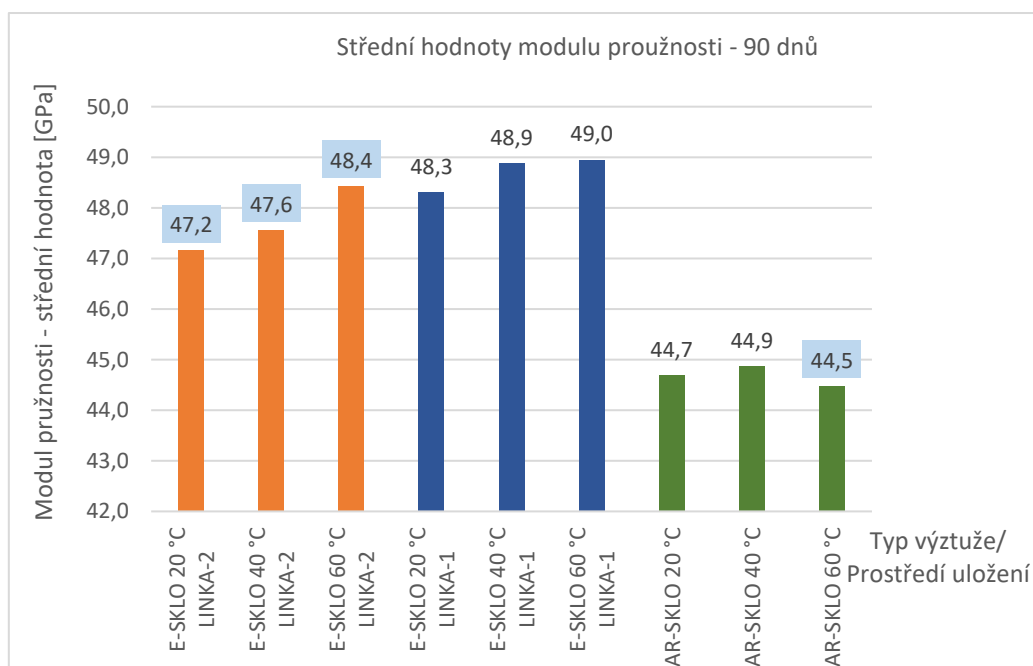
Obrázek 41 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů

5.9 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 90 DNECH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Pozn. Hodnoty označeny **modrým** podkladem jsou pouze orientační.



Obrázek 42 Střední tahové pevnosti po 90 dnech



Obrázek 43 Střední hodnota modulu pružnosti po 90 dnech

5.10 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 90 DNECH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Na vzorcích GFRP bylo provedeno vyhodnocení střední tahové pevnosti a střední hodnoty modulu pružnosti (viz Tabulka č. 23, 25, 27, 29, 31, 33) a jejich grafické vyjádření (viz obrázky č. 36-43). Byly roztrženy podle typu použitého vlákna (E-SKLO, AR-SKLO) a dále dle prostředí uložení.

Při použití vláken typu E-SKLO byly výztuže roztrženy do třech testovacích sad. Sady byly uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (první sada – 20 °C, druhá sada – 40 °C, třetí sada – 60 °C). Dále se během vyhodnocování prokázalo, že má na pevnosti výztuží vliv i výrobní linka, na které byla výztuž vyrobena. Jelikož se sady vyráběly na dvou linkách, jsou vyhodnocovány samostatně. U výztuží vyrobených na lince 1 lze při srovnání vlivu prostředí pozorovat, že s rostoucí teplotou klesala střední hodnota tahové pevnosti, kdy při 20 °C byla zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 658 MPa (směrodatná odchylka 16,53 MPa, variační koeficient 0,025), při 40 °C 617 MPa (směrodatná odchylka 32,76 MPa, variační koeficient 0,053) a při 60 °C 539 MPa (směrodatná odchylka 18,36 MPa, variační koeficient 0,034). U výztuží vyrobených na lince 2 je při srovnání vlivu prostředí pozorovat stejné pravidlo jako u linky 1, s rostoucí teplotou klesala střední hodnota tahové pevnosti, kdy při 20 °C byla zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 782 MPa (směrodatná odchylka 5,67 MPa, variační koeficient 0,007), při 40 °C 746 MPa (směrodatná odchylka 3,33 MPa, variační koeficient 0,004) a při 60 °C 714 MPa (směrodatná odchylka 4,17 MPa, variační koeficient 0,006). Při optickém posouzení porušení výztuží (viz Tabulka č. 22, 24, 26) se jako typické porušení jeví delaminace vláken s porušením vinutí provázku. Při vyšších teplotách uložení docházelo k většímu roztřepení vláken a můžeme tedy sledovat možné typické porušení degradovaných výztuží. Toto chování vykazovaly i výztuže vyhodnocené po 1000 hodinách uložení, lze tedy říci, že rozsáhlá delaminace a roztřepení vláken je důsledek zrychlené degradace výztuže v prostředí s vyšší teplotou.

Při použití vláken typu AR-SKLO byly výztuže roztrženy do třech testovacích sad a uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (první sada – 20 °C, druhá sada – 40 °C, třetí sada – 60 °C). Dosahovali jsme nižších tahových pevností, nežli u vláken typu E-SKLO a opět platilo stejné pravidlo závislosti na prostředí uložení, kdy s rostoucí teplotou uložení klesala tahová pevnost výztuží. Při 20 °C byla zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 480 MPa (směrodatná odchylka 6,56 MPa, variační koeficient 0,014), při 40 °C 448 MPa (směrodatná odchylka 11,67 MPa, variační koeficient 0,026) a při 60 °C 425 MPa

(směrodatná odchylka 12,62 MPa, variační koeficient 0,030). V případě sady uložené v prostředí o teplotě 60 °C jsou však hodnoty pouze orientační, jelikož téměř u celé sady došlo k vyjetí výztuže z koncovky vlivem špatně zalité koncovky. Při optickém posouzení porušení výztuží (viz Tabulka č. 28, 30, 32), nelze posoudit způsob porušení, jelikož u většina testovaných výztuží došlo k vyjetí výztuže z koncovky, a tedy nedošlo k žádnému porušení. U jediné výztuže (zn. 30. AR-SKLO-60), která nevyjela z koncovky, lze pozorovat delaminaci menšího rozsahu.

5.11 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – 180 DNÍ

Destrukční zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dní



Obrázek 44 Porušení výztuží: 31.E-SKL-20, 32.E-SKLO-20, 33.E-SKLO-20, 34.E-SKLO-20, 37.E-SKLO-20, 38.E-SKLO-20

Tabulka 34 Popis porušení I. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
31. E-SKLO 20	Porušení delaminací (intenzivní roztřepení vláken). Koncovka byla nedostatečně zalita.
32. E-SKLO 20	Dlouhé podélné trhliny po celé délce výztuže – nedošlo k roztřepení.
33. E-SKLO 20	Poškození v jednom řezu mezi rámečky – porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
34. E-SKLO 20	Poškození v jednom řezu mezi rámečky – porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
37. E-SKLO 20	Koncovka byla nedostatečně zalita – vzorek vyjel z koncovky a je vyřazen z vyhodnocování.
38. E-SKLO 20	Poškození v jednom řezu pod rámečkem – porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.

Tabulka 35 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dní					
Označení vzorku	31. E-SKLO 20	32. E-SKLO 20	33. E-SKLO 20	34. E-SKLO 20	37. E-SKLO 20	38. E-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	58,24	48,92	47,12	51,97	54,9	50,4
Maximální tahová pevnost [MPa]	741,53	622,87	599,95	661,70	699,01	641,71
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	6:17	5:27	5:14	5:36	7:25	5:10
Střední tahová pevnost [MPa]	632			742		
Směrodatná odchylka [MPa]	26,37			-		
Variační koeficient [-]	0,042			-		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	49,65	49,18	48,40	45,99	49,33
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	49,1			-		
Směrodatná odchylka [GPa]	0,53			-		
Variační koeficient [-]	0,011			-		

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

- vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dní



Obrázek 45 Porušení výztuží: 39.E-SKLO-40, 40.E-SKLO-40, 41.E-SKLO-40, 42.E-SKLO-40, 43.E-SKLO-40, 44.E-SKLO-40

Tabulka 36 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
39. E-SKLO 40	Porušení delaminací, roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
40. E-SKLO 40	Koncovka byla nedostatečně zalita – porušení v koncovce. Vzorek vyřazen z vyhodnocení.
41. E-SKLO 40	Porušení delaminací, roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
42. E-SKLO 40	Porušení delaminací, roztřepení vláken. Koncovka byla nedostatečně zalita.
43. E-SKLO 40	Porušení delaminací, roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
44. E-SKLO 40	Porušení delaminací, roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.

Tabulka 37 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dní					
Označení vzorku	39. E-SKLO 40	40. E-SKLO 40	41. E-SKLO 40	42. E-SKLO 40	43. E-SKLO 40	44. E-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	47,80	43,00	45,01	53,17	44,71	49,26
Maximální tahová pevnost [MPa]	608,61	547,49	573,08	676,98	569,26	627,20
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	5:35	4:40	4:55	6:52	4:23	5:01
Střední tahová pevnost [MPa]	595			677		
Směrodatná odchylka [MPa]	28,07			-		
Variační koeficient [-]	0,047			-		
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	47,84	47,39	48,03	49,71	49,33
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	48,8			48,0		
Směrodatná odchylka [GPa]	1,24			-		
Variační koeficient [-]	0,025			-		

Pozn.

-výztuže vyrobené na lince č. 2

- nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

- vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: E-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dní



Obrázek 46 Porušení výztuží: 45.E-SKLO-60, 47.E-SKLO-60, 48.E-SKLO-60, 51.E-SKLO-60, 52.E-SKLO-60, 53.E-SKLO-60, 54.E-SKLO-60, 55.E-SKLO-60

Tabulka 38 Popis porušení III. Sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
45. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
47. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
48. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
51. E-SKLO 60	Porušení delaminací, roztřepení vláken menší než u ostatních ze sady. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
52. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
53. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
54. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.
55. E-SKLO 60	Porušení delaminací, intenzivní roztřepení vláken. Porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku. Koncovka byla nedostatečně zalita.

Tabulka 39 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, E-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dní							
Označení vzorku	45.E-SKLO 60	47.E-SKLO 60	48.E-SKLO 60	51.E-SKLO 60	52.E-SKLO 60	53.E-SKLO 60	54.E-SKLO 60	55.E-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	41,69	55,01	49,58	42,94	48,60	50,54	41,72	47,52
Maximální tahová pevnost [MPa]	530,81	700,41	631,27	546,73	618,79	643,49	531,19	605,04
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:15	5:00	5:37	4:07	5:26	5:23	4:10	4:26
Střední tahová pevnost [MPa]	567				658			
Směrodatná odchylka [MPa]	42,22				36,90			
Variační koeficient [-]	0,075				0,056			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	48,59	49,17	50,17	49,25	48,94	50,24	48,94
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	49,7				48,9			
Směrodatná odchylka [GPa]	0,65				0,29			
Variační koeficient [-]	0,013				0,006			

Pozn. -výztuže vyrobené na lince č. 2

5.12 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – AR-SKLO – 180 DNÍ

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dní



Obrázek 47 Porušení výztuží: 1.AR-SKLO-20, 5.AR-SKLO-20, 6.AR-SKLO-20, 8.AR-SKLO-20, 9.AR-SKLO-20

Tabulka 40 Popis porušení I. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
1. AR-SKLO 20	Porušení delaminací (v jedné trhlině dlouhé cca 18 cm); porušení a vytažení lisu vyjela z koncovky.
5. AR-SKLO 20	Poškození v jednom řezu mezi rámečky – porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku.
6. AR-SKLO 20	Poškození v jednom řezu mezi rámečky – porušení povrchové vrstvy kopíruje porušení provázku.
8. AR-SKLO 20	Deformace koncovky – koncovka byla nedostatečně zalita. Výztuž vyjela z koncovky a je vyřazena z vyhodnocení.
9. AR-SKLO 20	Porušení v jednom řezu u koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.

Tabulka 41 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C v roztoku

Typ vzorku	I. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dní				
Označení vzorku	1. AR-SKLO 20	5. AR-SKLO 20	6. AR-SKLO 20	8. AR-SKLO 20	9. AR-SKLO 20
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	32,80	33,56	33,84	30,85	33,29
Maximální tahová pevnost [MPa]	417,62	427,30	430,86	392,79	423,86
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	3:54	4:55	3:59	4:19	4:16
Střední tahová pevnost [MPa]	425				
Směrodatná odchylka [MPa]	6,85				
Variační koeficient [-]	0,016				
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	44,30	43,87	45,45	44,62
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,3				
Směrodatná odchylka [GPa]	0,38				
Variační koeficient [-]	0,009				

Pozn. - vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dní



Obrázek 48 Porušení výztuží: 10.AR-SKLO-40, 11.AR-SKLO-40, 17.AR-SKLO-40, 24.AR-SKLO-40, 27.AR-SKLO-40, 29.AR-SKLO-40

Tabulka 42 Popis porušení II. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
10. AR-SKLO 40	Porušení delaminací – vznikly dlouhé podélné trhliny. Vlákná se neroztřepila. Koncovka byla nedostatečně zalita.
11. AR-SKLO 40	Porušení delaminací – vznikly dlouhé podélné trhliny. Vlákná se mírně roztřepila. Koncovka byla nedostatečně zalita. Nebyly zaznamenány hodnoty tahových pevností – nevyskytuje se v tabulce naměřených a vypočtených hodnot II. Sada AR-SKLO-40 po 180 dnech a dále se neuvažuje ve vyhodnocování.
17. AR-SKLO 40	Koncovka byla nedostatečně zalita – porušení v koncovce. Vzorek vyřazen z vyhodnocení.
24. AR-SKLO 40	Koncovka byla nedostatečně zalita – porušení v koncovce – vznikla dlouhá podélná trhlina přes celý vzorek. Vzorek vyřazen z vyhodnocení.
27. AR-SKLO 40	Vzorek se porušil podélnými trhlinami přes celou délku vzorku, vzorek se neroztřepil. Koncovka byla nedostatečně zalita.
29. AR-SKLO 40	Vzorek se porušil podélnými trhlinami přes celou délku vzorku, vzorek se neroztřepil. Koncovka byla nedostatečně zalita.

Tabulka 43 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 40 °C v roztoku

Typ vzorku	II. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dní				
Označení vzorku	10. AR-SKLO 40	17. AR-SKLO 40	24. AR-SKLO 40	27. AR-SKLO 40	29. AR-SKLO 40
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	34,540	31,100	27,200	34,090	36,080
Maximální tahová pevnost [MPa]	439,78	395,98	346,32	434,05	459,38
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:46	5:34	4:02	4:41	4:09
Střední tahová pevnost [MPa]	444				
Směrodatná odchylka [MPa]	13,29				
Variační koeficient [-]	0,030				
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	44,71	45,47	45,47	43,03
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	44,7				
Směrodatná odchylka [GPa]	1,15				
Variační koeficient [-]	0,026				

Pozn.  - vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

Destruktivní zkoušení výztuže: AR-sklo – degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dní



Obrázek 49 Porušení výztuží: 30.AR-SKLO-60, 35.AR-SKLO-60, 36.AR-SKLO-60, 46.AR-SKLO-60, 49.AR-SKLO-60, 50.AR-SKLO-60

Tabulka 44 Popis porušení III. Sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C, 180 dní v roztoku

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
30. AR-SKLO 60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.
35. AR-SKLO 60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.
36. AR-SKLO 60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.
46. AR-SKLO 60	Porušení delaminací – vznikly dlouhé podélné trhliny. Vlákná se neroztřepila.
49. AR-SKLO 60	Porušení delaminací – vznikly dlouhé podélné trhliny. Vlákná se neroztřepila. Koncovka byla nedostatečně zalita.
50. AR-SKLO 60	Porušení v koncovce – výztuž vyjela z koncovky. Vyřazeno z vyhodnocení.

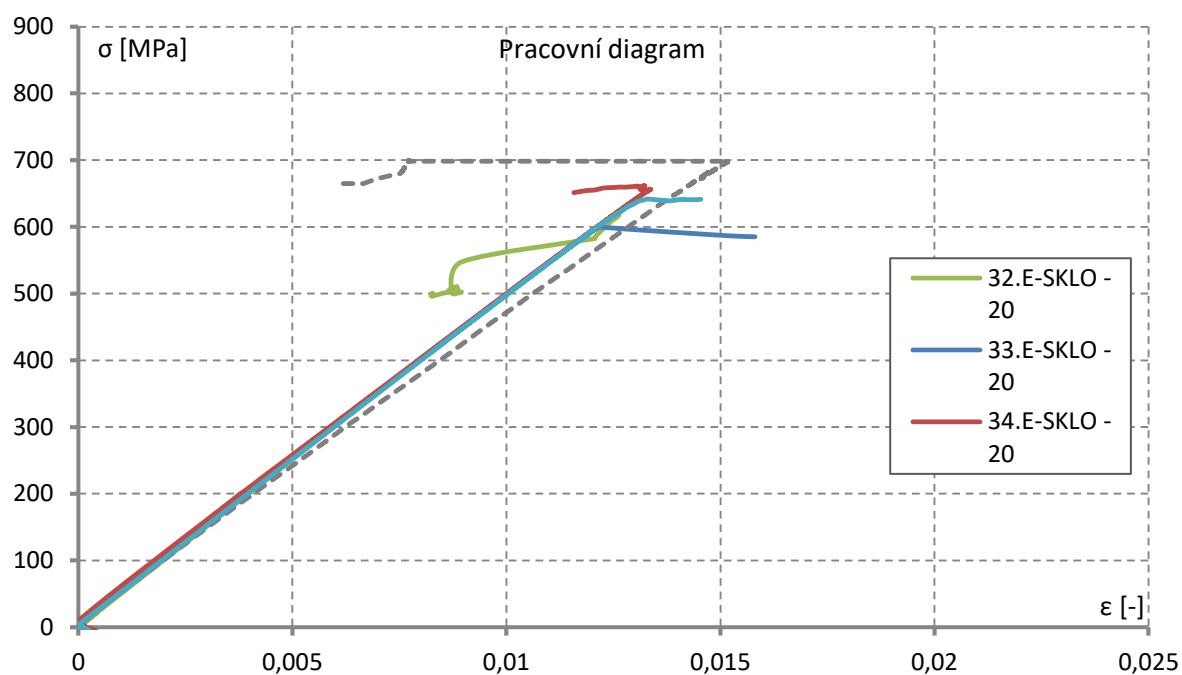
Tabulka 45 Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 180 dní – GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 60 °C v roztoku

Typ vzorku	III. sada – GFRP Ø10 mm, AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dní					
Označení vzorku	30. AR-SKLO 60	35. AR-SKLO 60	36. AR-SKLO 60	46. AR-SKLO 60	49. AR-SKLO 60	50. AR-SKLO 60
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	25,80	27,79	26,56	30,76	29,62	26,95
Maximální tahová pevnost [MPa]	328,50	353,83	338,17	391,65	377,13	343,14
Rychlost zatěžování [mm/min]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Délka zatěžování [min]	4:11	4:38	4:31	4:18	4:16	6:43
Střední tahová pevnost [MPa]	384					
Směrodatná odchylka [MPa]	10,26					
Variační koeficient [-]	0,027					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	44,63	44,66	43,10	43,07	42,98
Modul pružnosti – střední hodnota [GPa]	43,7					
Směrodatná odchylka [GPa]	0,87					
Variační koeficient [-]	0,020					

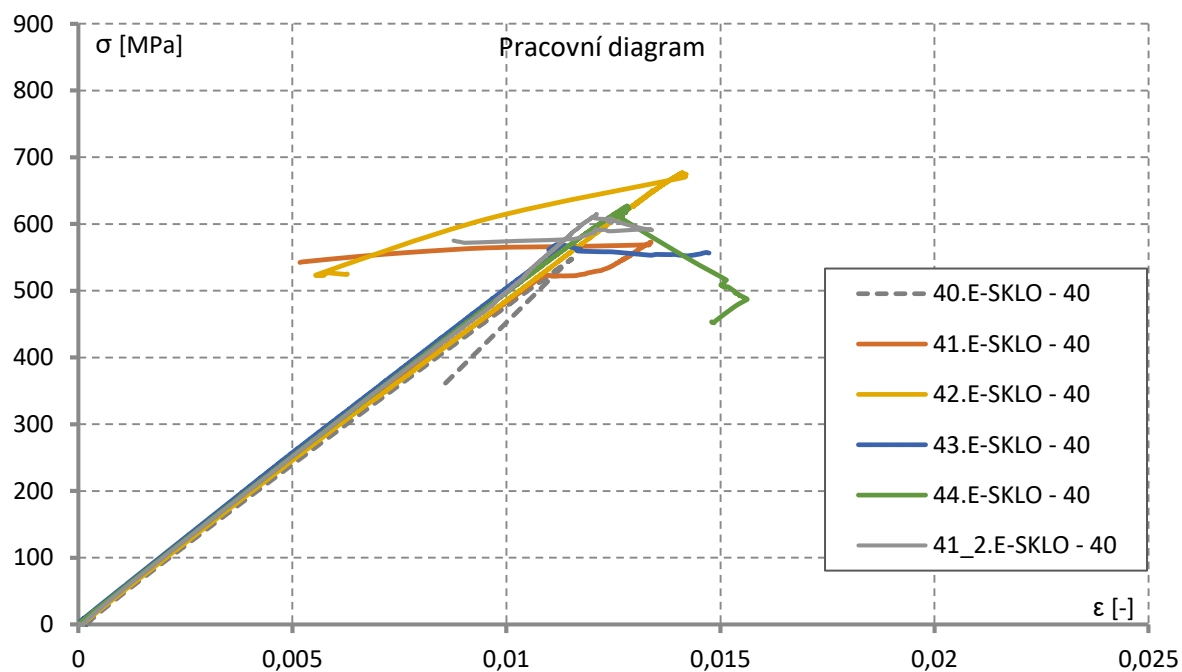
Pozn. - vzorek vyjel z koncovky nebo byl porušen v koncovce a je vyřazen z hodnocení

 - nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

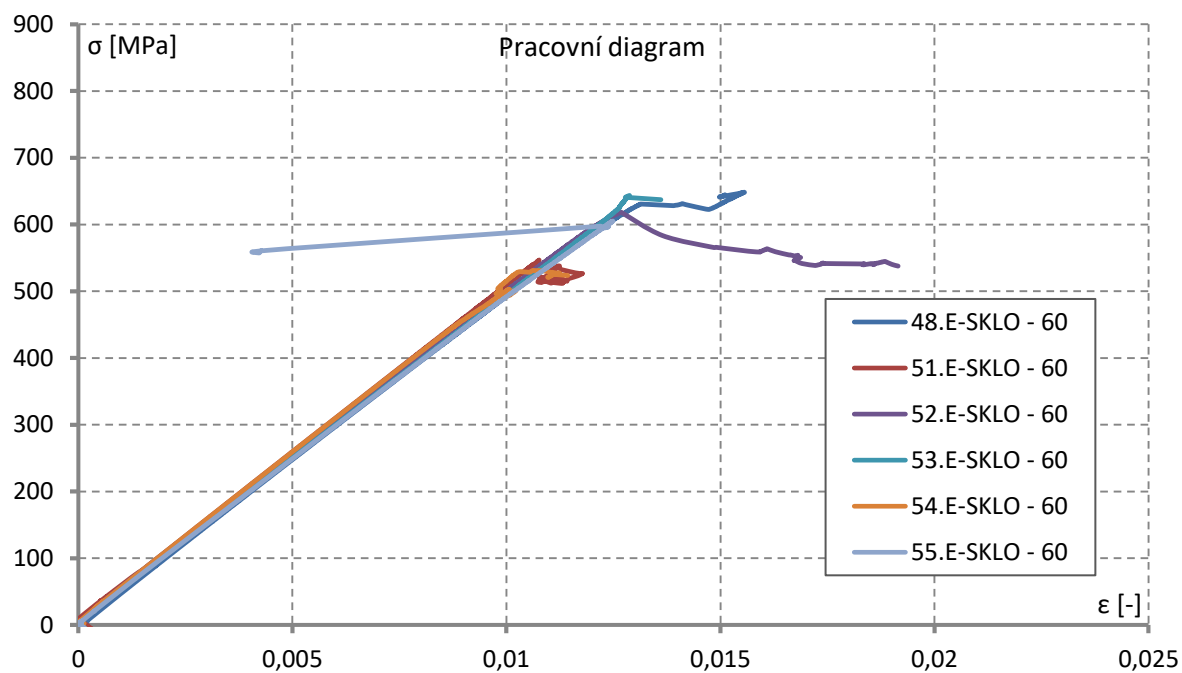
5.13 PRACOVNÍ DIAGRAMY E-SKLO/AR-SKLO – 180 DNÍ



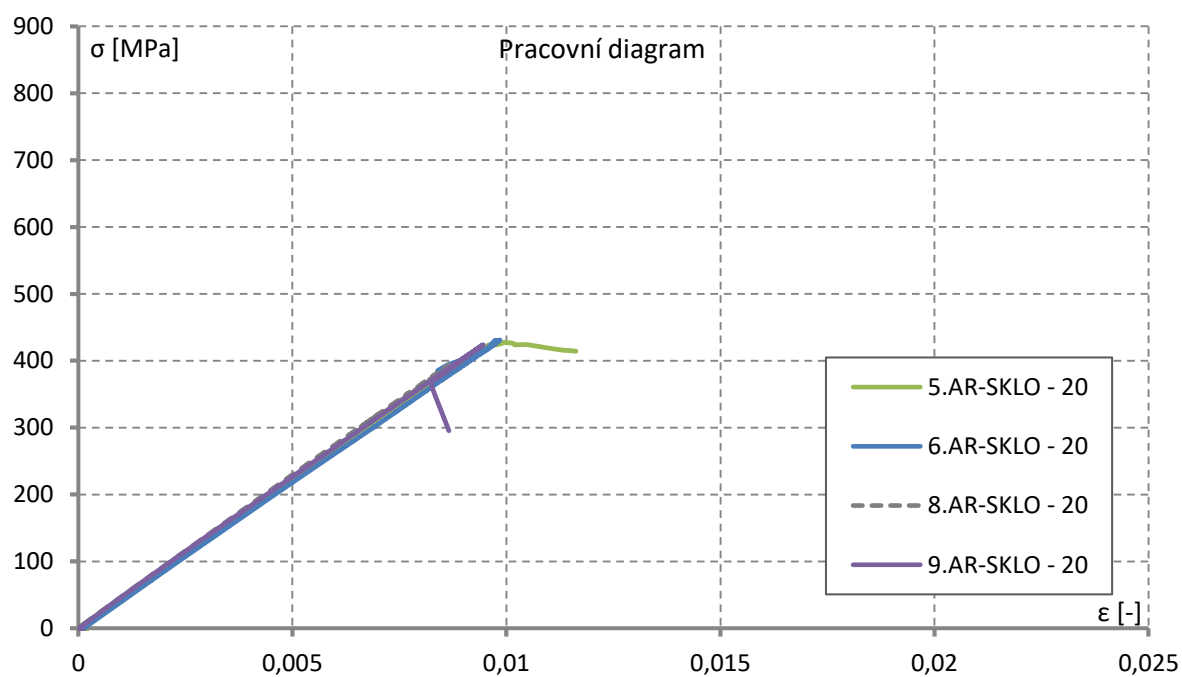
Obrázek 50 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dnů



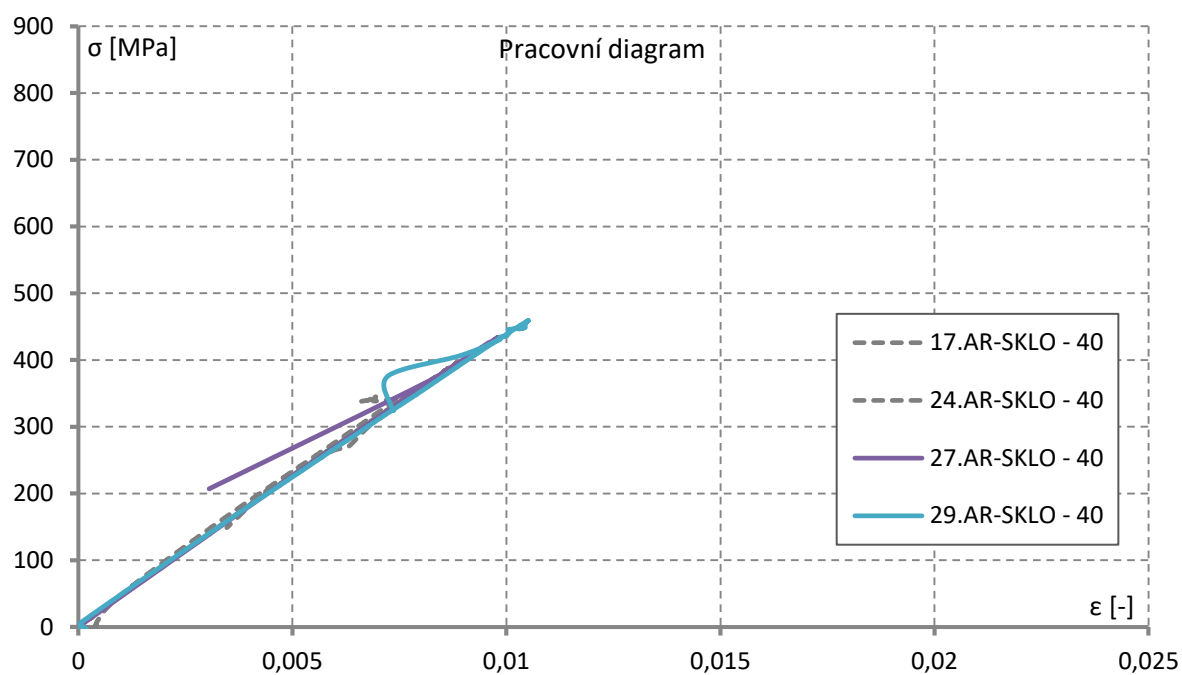
Obrázek 51 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dnů



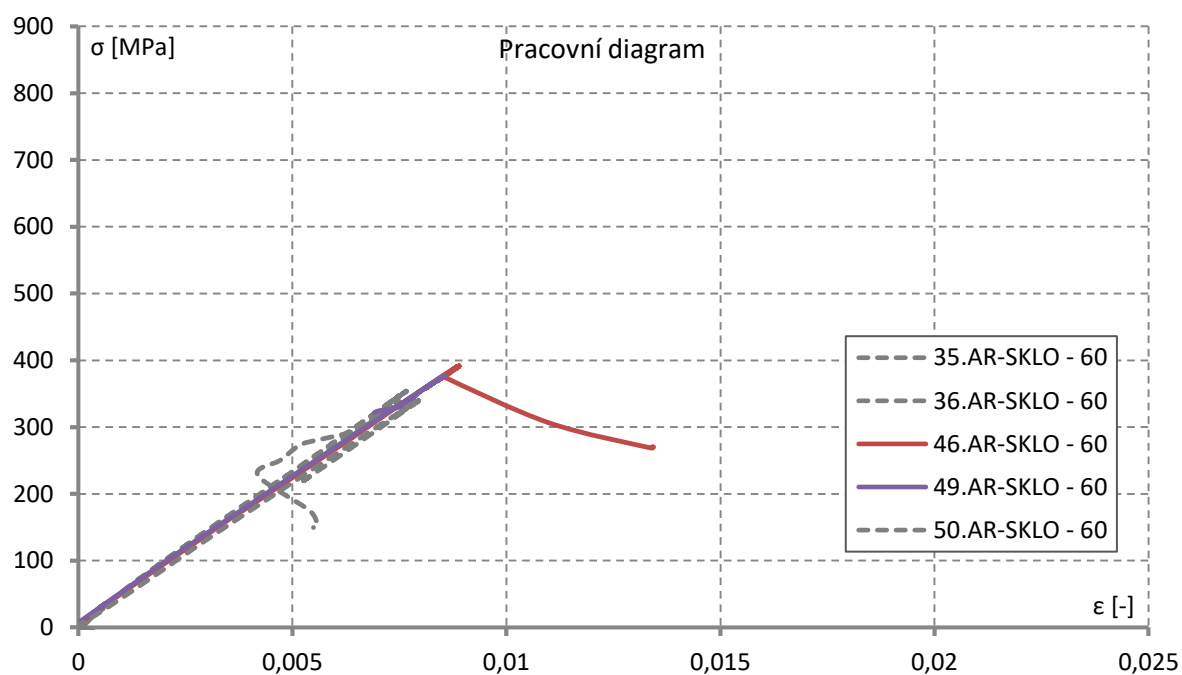
Obrázek 52 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dnů



Obrázek 53 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 20 - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 180 dnů



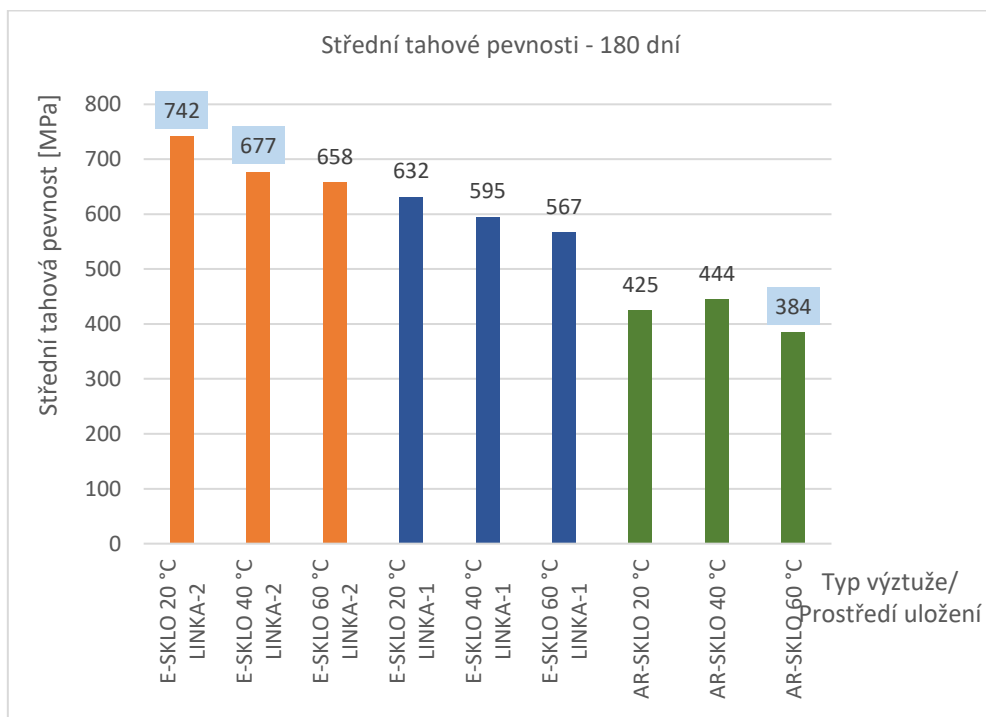
Obrázek 54 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 40 - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 180 dnů



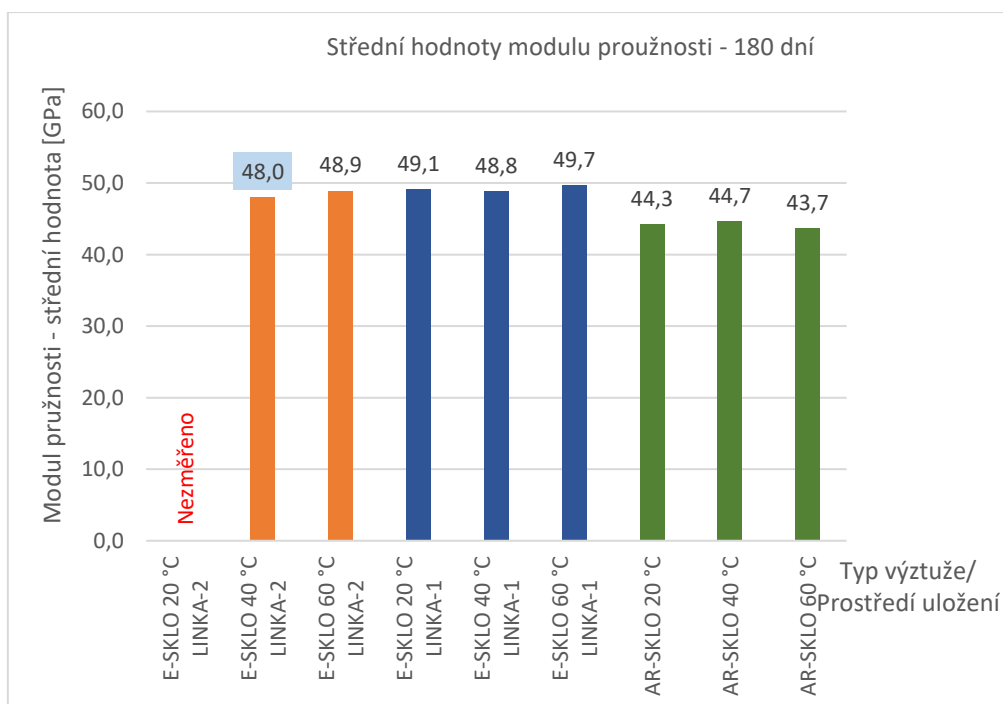
Obrázek 55 Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - 60 - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 180 dnů

5.14 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ TAHOVÉ PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI VÝZTUŽÍ PO 180 DNECH ULOŽENÍ V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Pozn. Hodnoty označeny **modrým** podkladem jsou pouze orientační.



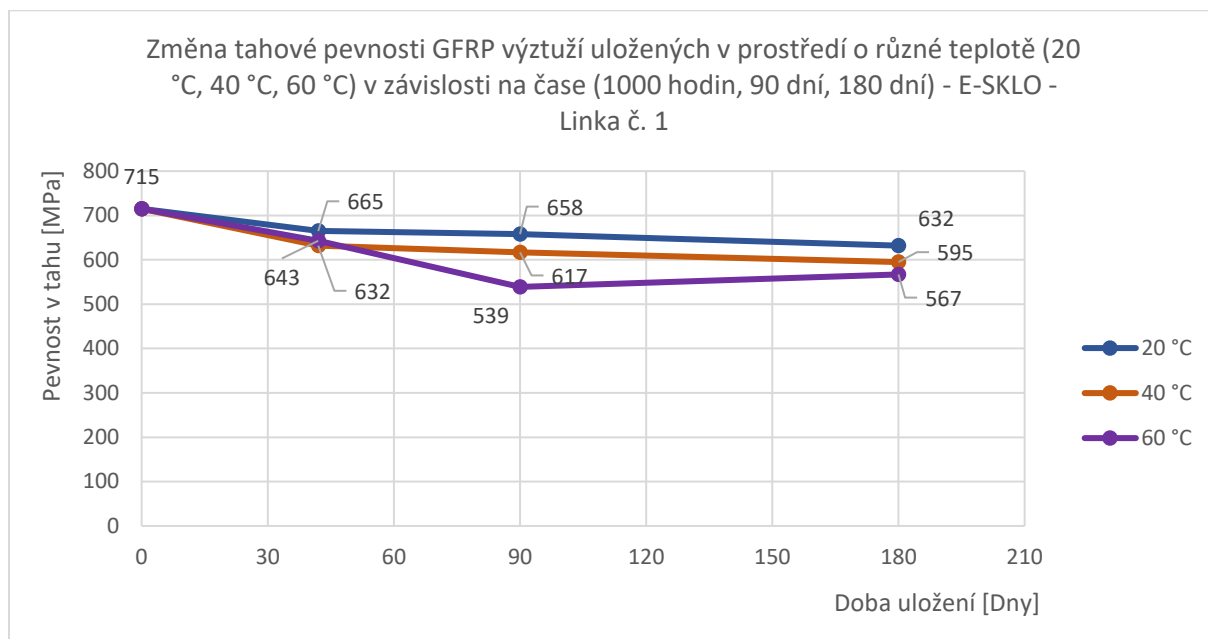
Obrázek 56 Střední tahové pevnosti po 180 dnech



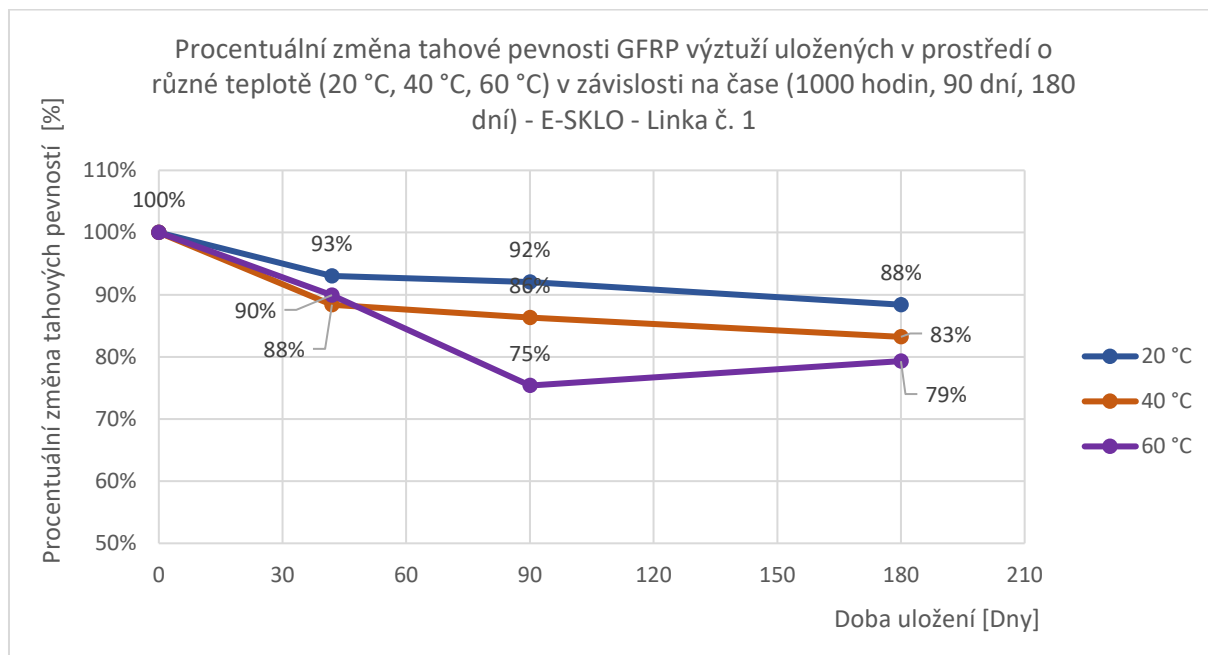
Obrázek 57 Střední hodnota modulu pružnosti po 180 dnech

5.15 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ DESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE

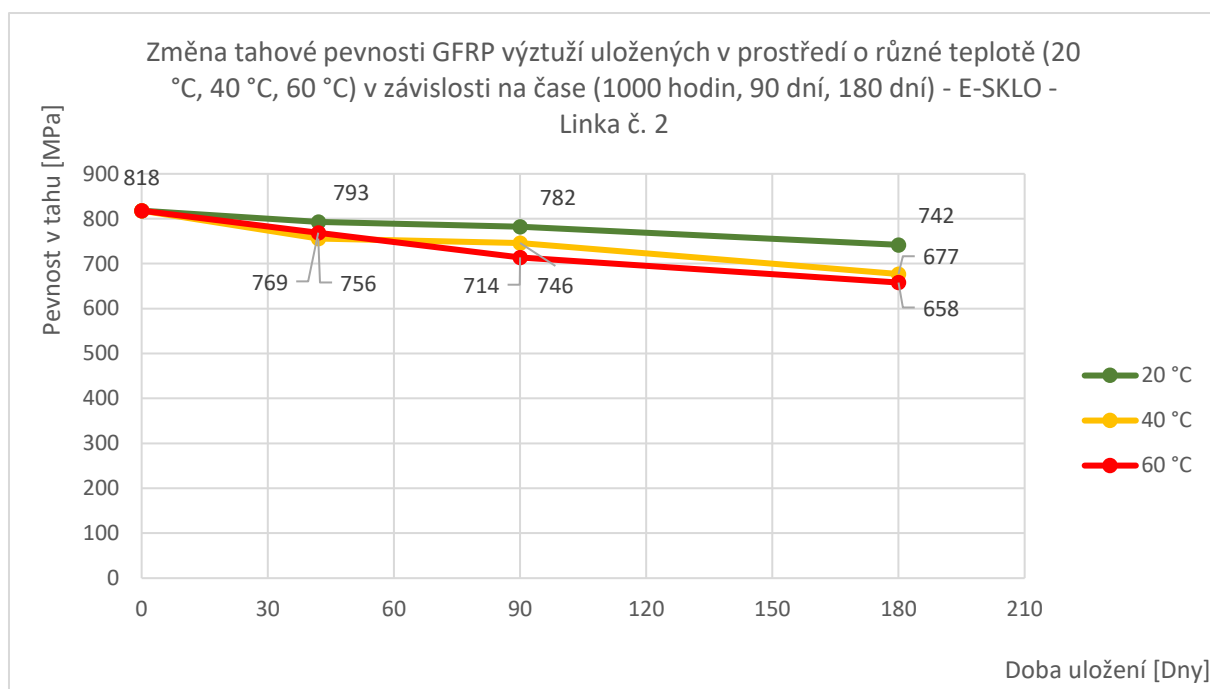
Porovnání výsledků destrukтивních zkoušek v závislosti na čase – výztuže GFRP E-SKLO



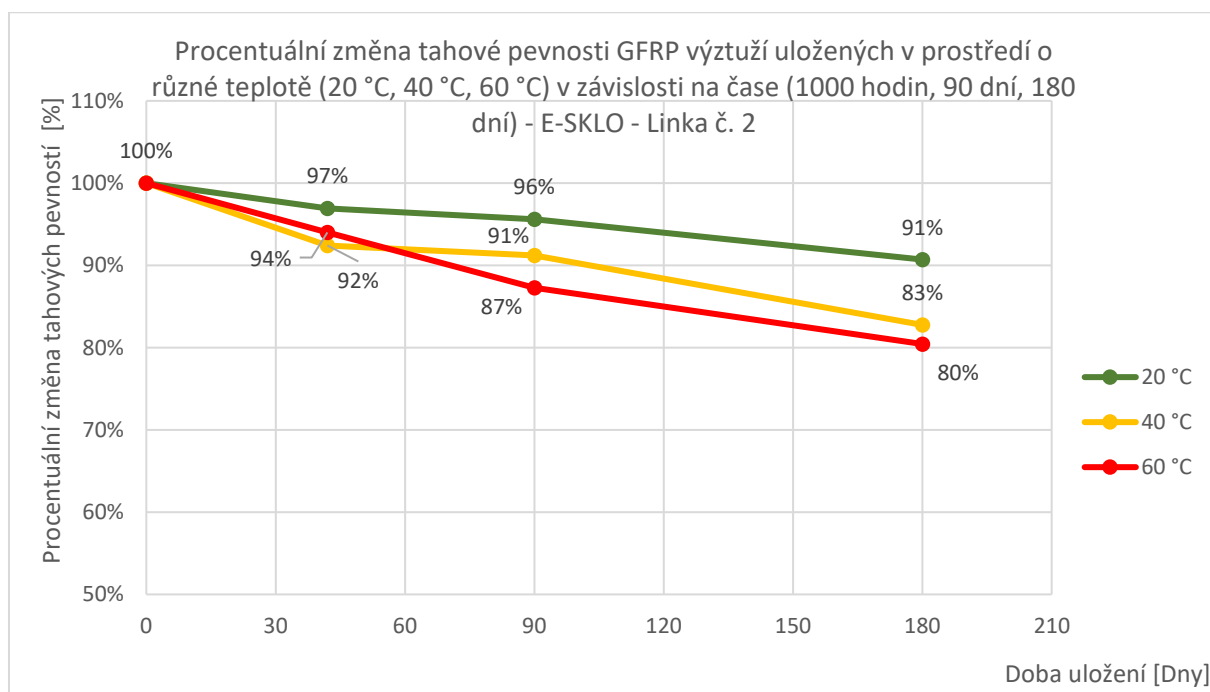
Obrázek 58 Vývoj střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP - E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 1**



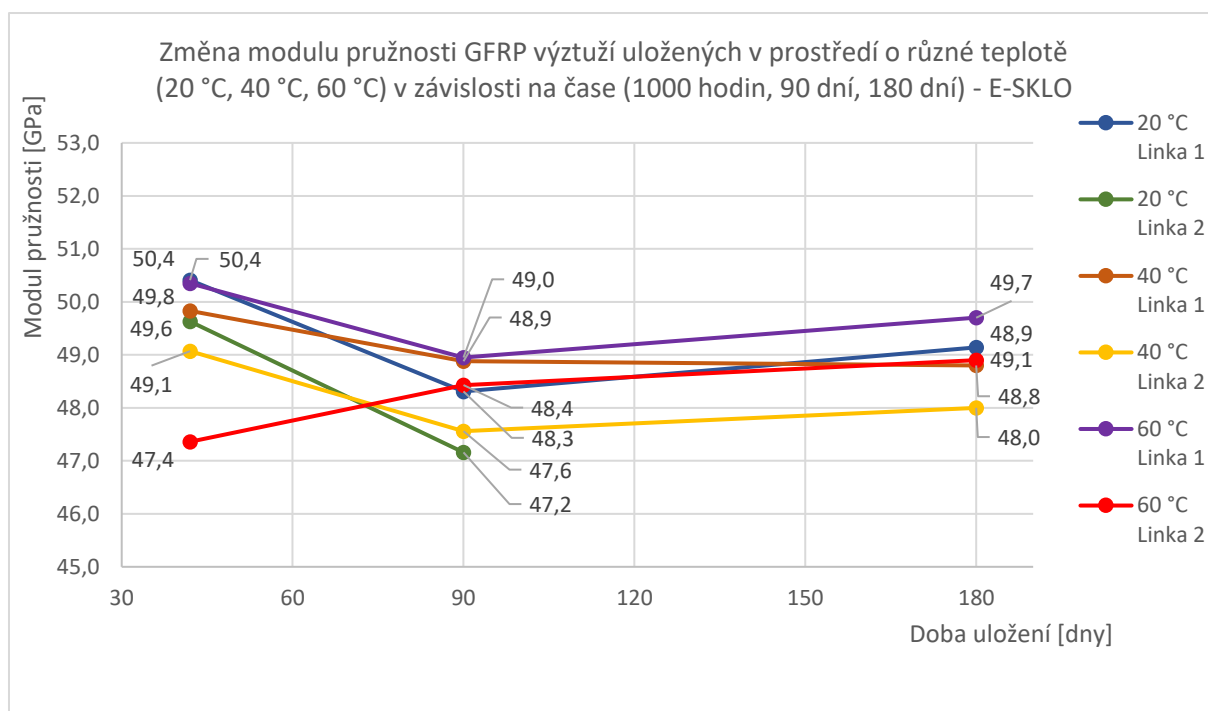
Obrázek 59 Procentuální změna střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 1**



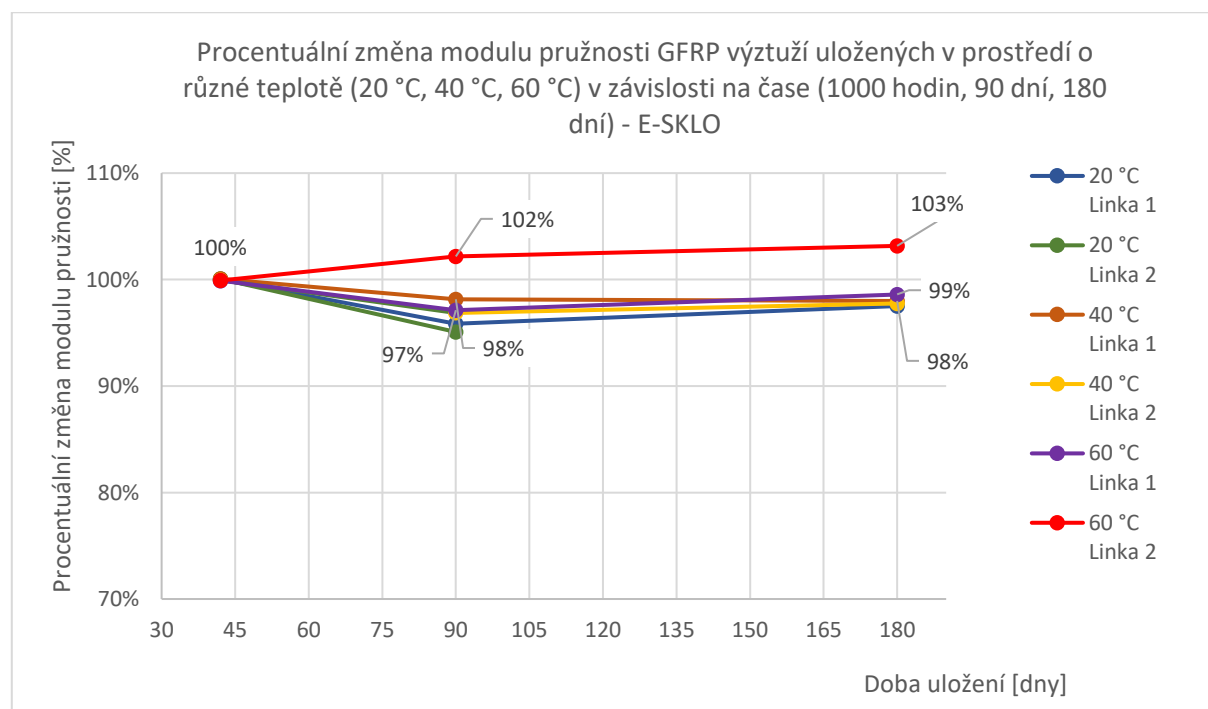
Obrázek 60 Vývoj střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP - E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 2**



Obrázek 61 Procentuální změna střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 2**

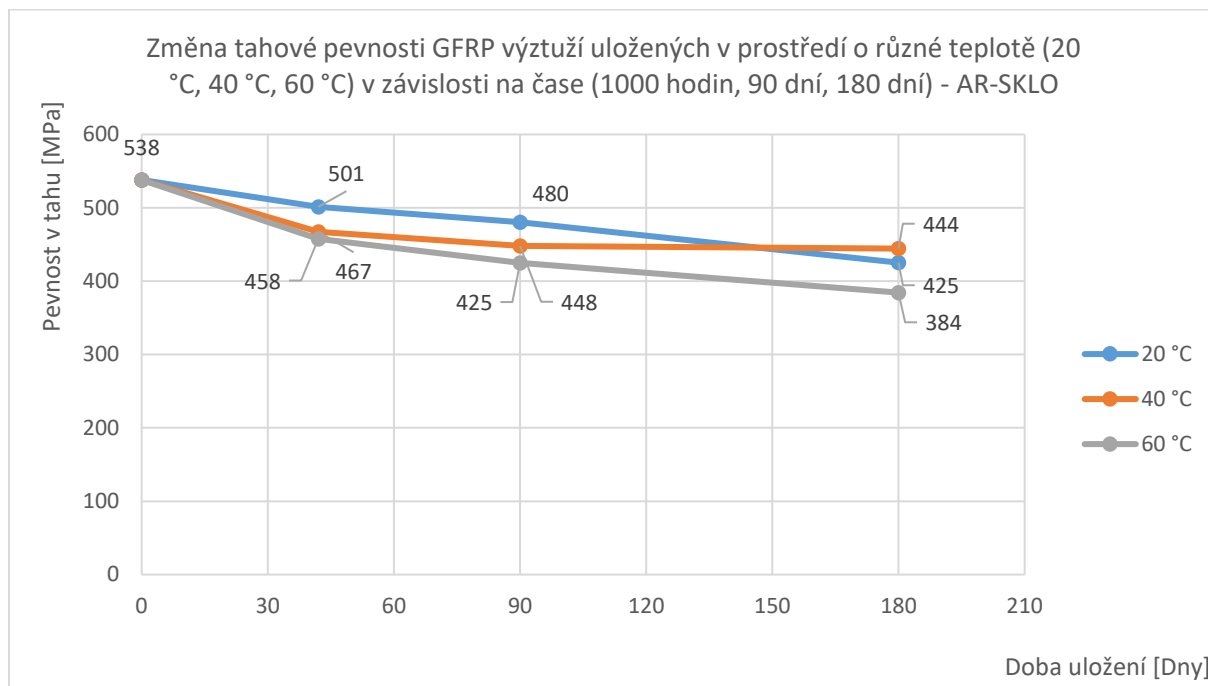


Obrázek 62 Vývoj modulu pružnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 1 / Linka 2**

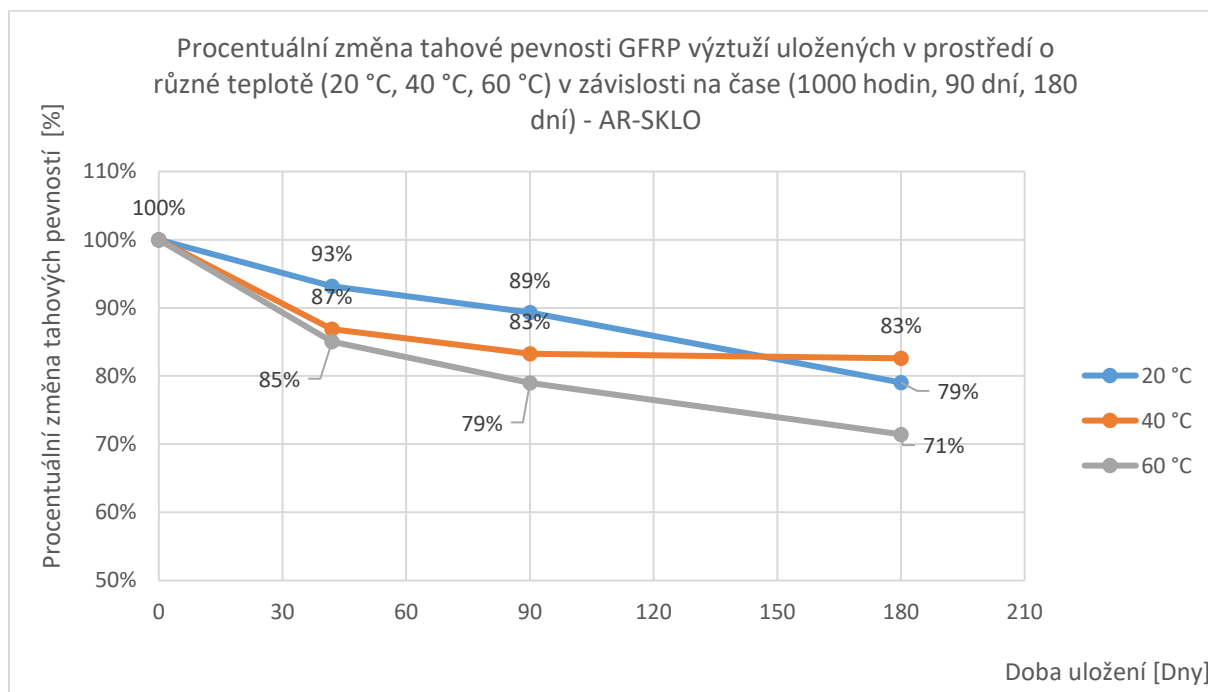


Obrázek 63 Procentuální změna modulu pružnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – E-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04; **Linka 1 / Linka 2**

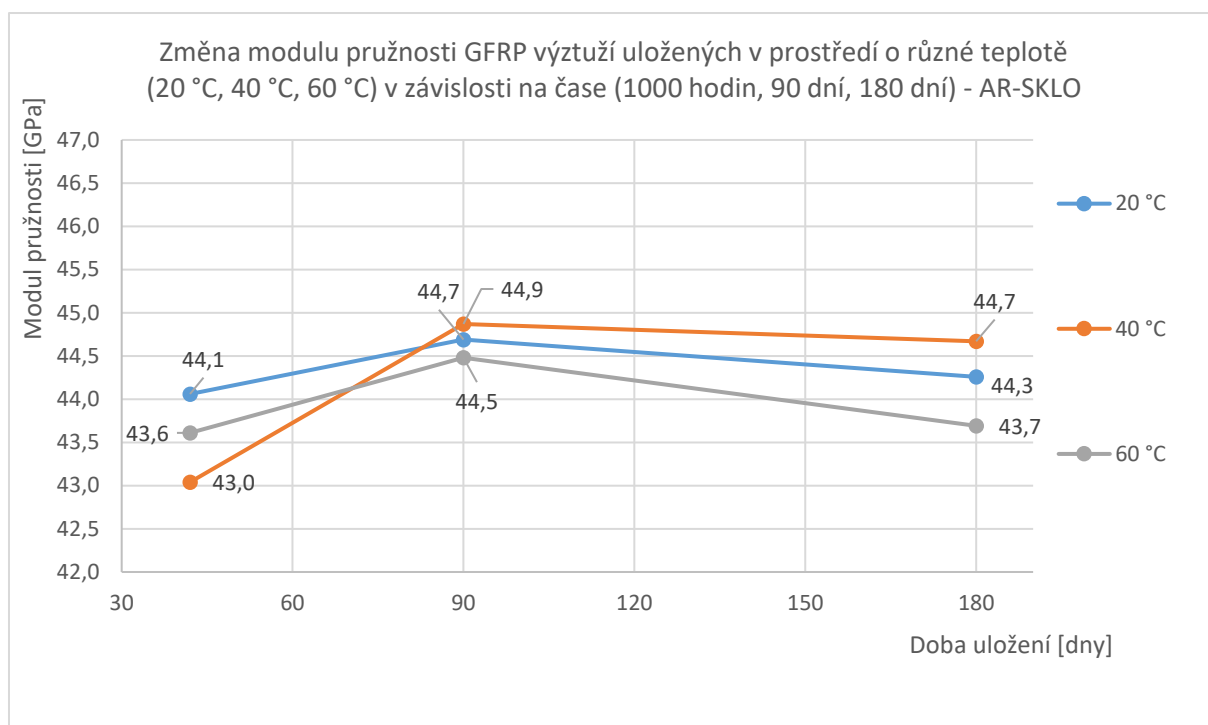
Porovnání výsledků destruktivních zkoušek v závislosti na čase – výztuže GFRP AR-SKLO



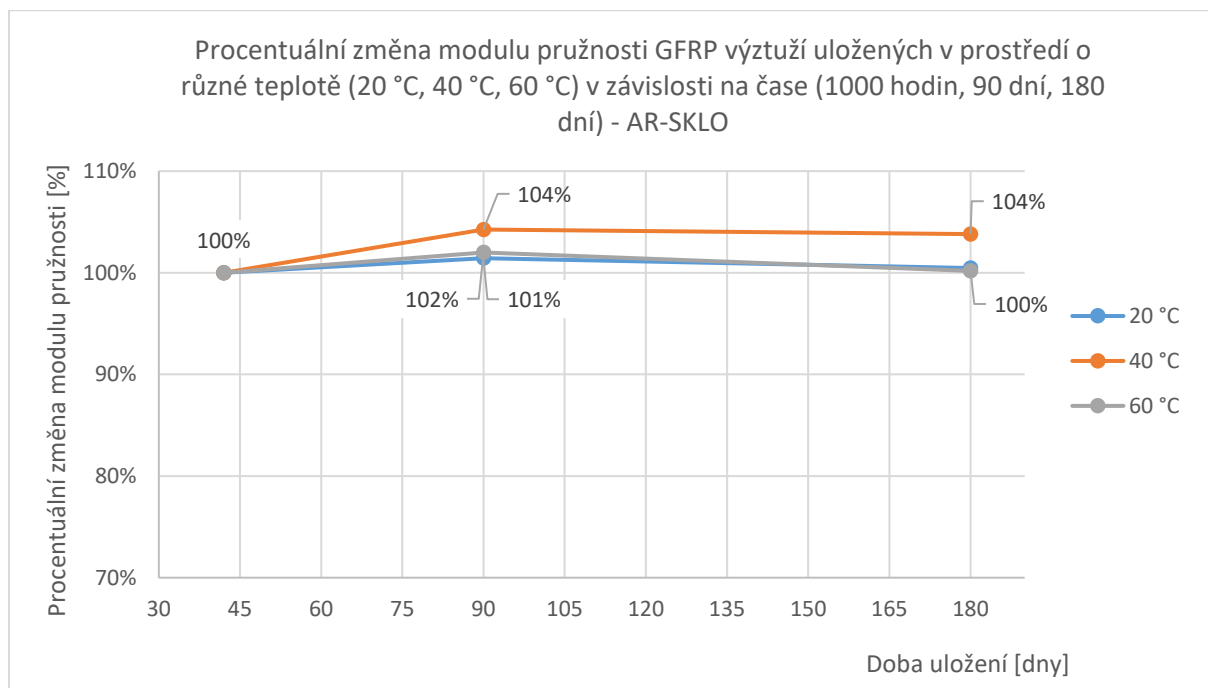
Obrázek 64 Vývoj střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – AR-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04



Obrázek 65 Procentuální změna střední tahové pevnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – AR-SKLO uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04



Obrázek 66 Vývoj modulu pružnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – **AR-SKLO** uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04



Obrázek 67 Procentuální změna modulu pružnosti v závislosti na čase pro výztuže GFRP – **AR-SKLO** uložené v normovém prostředí v dle ACI 440.3R-04

5.16 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PO 180 DNECH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Na vzorcích GFRP bylo provedeno vyhodnocení střední tahové pevnosti a střední hodnoty modulu pružnosti (viz Tabulka č. 35, 37, 39, 41, 43, 45) a jejich grafické vyjádření (viz obrázky č. 50-57). Vzorky GFRP byly roztrženy podle typu použitého vlákna (E-SKLO, AR-SKLO) a dále dle prostředí uložení.

Při použití vláken typu E-SKLO byly výztuže roztrženy do třech testovacích sad. Sady byly uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (první sada – 20 °C, druhá sada – 40 °C, třetí sada – 60 °C). Na rozdíl od zkoušek po 1000 hodinách a 90 dnech nebylo u výztuží s vlákny typu E-SKLO při hodnocení vlastností po 180 dnech vždy patrné, z které linky výztuže pochází (s výjimkou výztuží uložených v prostředí o teplotě 60 °C), proto je toto roztržení provedeno na základě číselného značení výztuží. Opět můžeme sledovat vliv teploty uložení na výsledné hodnoty pevnosti v tahu, které s rostoucí teplotou uložení klesají. Pro výztuže z linka č. 1 byla při teplotě 20 °C zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 632 MPa (směrodatná odchylka 26,37 MPa, variační koeficient 0,042), při 40 °C 595 MPa (směrodatná odchylka 28,07 MPa, variační koeficient 0,047) a při 60 °C 536 MPa (směrodatná odchylka 42,22 MPa, variační koeficient 0,075). Pro výztuže z linka č. 2 byla při teplotě 20 °C zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 742 MPa (směrodatná odchylka nelze určit, jelikož byla naměřena pouze jedna platná hodnota), při 40 °C 677 MPa (opět nelze určit směrodatnou odchylku) a při 60 °C 658 MPa (směrodatná odchylka 36,90 MPa, variační koeficient 0,056). Při optickém posouzení porušení výztuží (viz Tabulka č. 34, 36, 38) se potvrdilo, že při vyšších teplotách uložení docházelo k většímu roztřepení vláken a můžeme tedy s velkou pravděpodobností říci, že se jedná o typické porušení degradovaných výztuží. Toto chování vykazovaly i výztuže vyhodnocené po 1000 hodinách uložení i výztuže vyhodnocené po 90 dnech uložení.

Při použití vláken typu AR-SKLO byly výztuže roztrženy do třech testovacích sad a uloženy v prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (první sada – 20 °C, druhá sada – 40 °C, třetí sada – 60 °C). Dosahovali jsme nižších tahových pevností, nežli u vláken typu E-SKLO. U vyhodnocování tahové pevnosti výztuží jsme však nepotvrdili trend, že s rostoucí teplotou prostředí uložení klesá tahová pevnost výztuží. Při teplotě 20 °C byla zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 425 MPa (směrodatná odchylka 6,85 MPa, variační koeficient 0,016), při 40 °C 444 MPa (směrodatná odchylka 13,29 MPa, variační koeficient 0,026) a při 60 °C 384 MPa (směrodatná odchylka 10,26 MPa, variační koeficient 0,030).

V případě sady uložené v prostředí o teplotě 60 °C jsou však hodnoty pouze orientační, jelikož téměř u celé sady došlo k vyjetí výztuže z koncovky vlivem špatně zalité koncovky. Možnou příčinou nepotvrzení tohoto pravidla je i velké množství špatně zalitých koncovek v důsledku rychlého zatvrdnutí epoxidové pryskyřice (zalití do koncovek se v letě – vysoká teplota prostředí vytvrdila epoxidovou pryskyřici dříve, než stačila vyplnit zbytek koncovky, viz obrázek č. 52)



Obrázek 68 Zdeformovaná špatně vyplněná koncovka

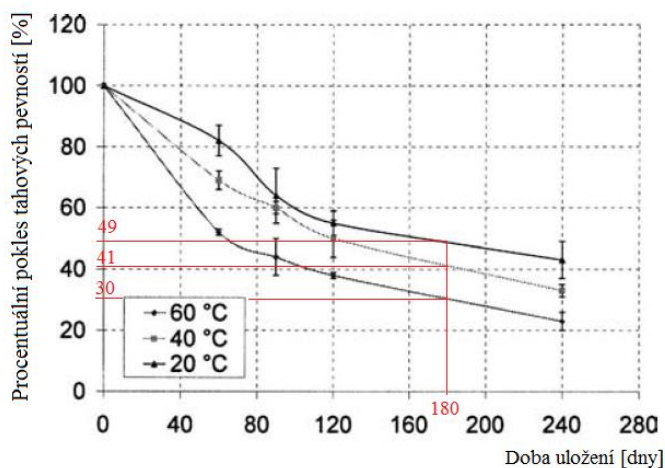
Při optickém posouzení porušení výztuží (viz Tabulka č. 40, 42, 44), lze pozorovat, že ve většině případů vůbec nedošlo k porušení výztuží, a to v důsledku špatně vyplněných koncovek, kdy výztuže z koncovek vyjely. Zjištění lze tedy brát pouze orientačně.

Dále bylo po 180 dnech provedeno posouzení výztuží, pro zjištění vlivu doby uložení ve stejném prostředí na tahové pevnosti a modul pružnosti výztuží (viz obrázky č. 58-67).

Při posuzování výztuží s využitím vláken typu E-SKLO uložené v prostředí dle ACI 440.3R-04 při teplotě 20 °C můžeme sledovat, že se u výztuží vyrobených na lince č. 1 střední hodnota tahové pevnosti snižuje (referenční hodnota pevnosti v tahu byla 715 MPa), po 1000 hodinách dosahovala hodnoty 665 MPa (modul pružnosti 50,4 GPa), po 90 dnech hodnoty 658 MPa (modul pružnosti 48,3 GPa) a po 180 dnech 632 MPa (modul pružnosti 49,1 GPa). Můžeme tedy sledovat 12% pokles tahových pevností. U linky č. 2 můžeme sledovat podobný trend, kdy tahové pevnosti poklesly o 9 %. Při optickém posouzení typu porušení pozorujeme jen malé změny v průběhu času. Při posuzování výztuží uložené v prostředí při teplotě 40 °C můžeme opět sledovat, že se střední hodnota tahové pevnosti u výztuží vyrobených na lince č. 1 mírně snižuje, po 1000 hodinách dosahovala hodnoty 632 MPa (modul pružnosti 49,8 GPa), po 90 dnech hodnoty 617 MPa (modul pružnosti 48,9 GPa) a po 180 dnech 595 MPa (modul pružnosti 48,8 GPa), mluvíme tedy o poklesu tahových pevností o 17 %. U výztuží vyrobených na lince č. 2 byl pokles tahových pevností stejný, jako u výztuží vyrobených na lince č. 1, tedy o 17 %. Při optickém posouzení typu porušení pozorujeme opět jen malé změny v průběhu času, kdy dochází k delaminaci a roztřepení vláken. V prostředí temperovaném na 60 °C se trend

klesající pevnosti v tahu opět prokázal, je však možné sledovat anomálii, jelikož byl u výztuží vyrobených na lince č. 1 zjištěn nárůst tahových pevností mezi měřením po 90 dnech a 180 dnech. Po 1000 hodinách dosahovala tahová pevnost hodnoty 643 MPa (modul pružnosti 50,4 GPa), po 90 dnech hodnoty 539 MPa (modul pružnosti 49,0 GPa) a po 180 dnech 567 MPa (modul pružnosti 49,7 GPa), lze tedy pozorovat, že je pokles tahových pevností při této teplotě již značný (25 %). Této hodnoty poklesu bylo však dosaženo již po 90 dnech. Při měření po 180 dnech je pokles tahových pevností pouze 21 % a je tedy nižší nežli po 90 dnech. Fakt, že se jedná o anomálii, potvrzuje i měření na výztužích vyrobených na lince č. 2, jelikož u těchto výztuží byl pokles tahových pevností v průběhu času téměř lineární (po 180 dnech o 20 %). Při vyhodnocení typu poškození můžeme konstatovat, že se vzorky poškodily delaminací s rozsáhlým roztřepením vláken nezávisle na době zkoušení. I přesto, že výztuže vykazovaly pokles tahových pevností až o 25 %, jejich modul pružnosti zůstal téměř nezměněný (≈ 2 %).

Tyto naměřené výsledky byly porovnány se studií [36], která se zabývala studií chování GFRP výztuží v alkalickém prostředí. Testování se řídilo dle směrnice ACI 440.3R-04, tedy stejně jako v našem případě. Materiálová báze testovaných výztuží se skládala z E-SKLO vláken a matrice z vinylesterové pryskyřice. Na obrázku 69 lze pozorovat pokles tahových pevností v čase.



Obrázek 69 Procentuální pokles tahových pevností zjištěný při studii [36] GFRP výztuží [36]

Jelikož bylo v našem případě vyhodnocení provedeno již po 180 dnech a ve studii [36] až po 240 dnech, bylo v grafu „procentuální pokles tahových pevností“ uvedeného ve studii [36] provedeno grafické vynesení v čase 180 dnů a provedeno odečtení příslušných poklesů pro teploty 20 °C, 40 °C a 60 °C. Bylo zjištěno, že komerčně vyráběné výztuže neznámého výrobce použité ve studii [36] (dále jen „konkurenční výztuže“) vykazují mnohem výraznější poklesy pevností. V prostředí dle ACI 440.3R-04 při teplotě 20 °C můžeme sledovat pokles tahových

pevností o 51 %, kdežto námi testované výztuže ve stejném prostředí a době uložení vykazovaly pokles pouze 12 %. Pokles tahových pevností se u konkurenční výztuže dál zvyšuje s teplotou, kdy při 40 °C byl pokles 59 % a při 60 °C 70 %. Námi testované výztuže, jak již bylo výše uvedeno, vykazovaly maximální pokles tahových pevností o 25 % a můžeme tedy říct, že jejich odolnost v alkalickém prostředí je v porovnání s konkurenční výztuží velmi dobrá.

Při posuzování výztuží s využitím vláken typu AR-SKLO uložené v prostředí dle ACI 440.3R-04 sledujeme výraznější poklesy pevností, nežli u výztuží s vlákny typu E-SKLO. Výztuže uložené ve 20 °C dosahovaly pevnosti v tahu po 1000 hodinách hodnoty 501 MPa (modul pružnosti 44,1 GPa), po 90 dnech 480 MPa (modul pružnosti 44,7 GPa) a 180 dnech 425 MPa (modul pružnosti 44,3 GPa). Při srovnání s referenční hodnotou 538 MPa lze pozorovat pokles pevností o 21 %. Výztuže uložené ve 40 °C dosahovaly pevnost v tah po 1000 hodinách hodnoty 467 (modul pružnosti 43,0 GPa), po 90 dnech 448 MPa (modul pružnosti 44,9 GPa) a 180 dnech 444 MPa (modul pružnosti 44,7 GPa). Zde pevnosti v tlaku klesly pouze o 17 %. Tuto skutečnost lze vysvětlit již výše uvedeným defektem koncovek, které toto měření mohlo do značné míry ovlivnit a naměřené hodnoty jsou tedy pouze orientační. Výztuže uložené v 60 °C dosahovaly pevnost v tah po 1000 hodinách hodnoty 458 (modul pružnosti 43,6 GPa), po 90 dnech 425 MPa (modul pružnosti 44,5 GPa) a 180 dnech 384 MPa (modul pružnosti 43,7 GPa). Po 180 dnech uložení v roztoku při 60 °C tak hodnota střední tahové pevnosti klesla o 29. Podobně jako u výztuží typu E-SKLO i zde přes značné snížení tahových pevností sledujeme jen minimální změny modulu pružnosti ($\approx 4\%$).

Z vyhodnocení je tedy patrné, že výztuže v daném alkalickém prostředí degradují a této degradaci výrazně napomáhá i zvýšená teplota prostředí uložení výztuží. Dále je patrné i snížení pevností výztuží v závislosti jak na čase, tak na teplotě prostředí uložení. Zajímavé je sledovat, že navzdory tomu, že jsou výztuže s využitím vláken typu AR-SKLO uvažována jako alkalivzdorná, podléhají při našem experimentu degradaci rychleji, než výztuže využívající vlákna typu E-SKLO, jelikož však posuzujeme projev kompozitu jako celku, jen těžko rozklíčujeme, zdali jde jen o vliv vláken nebo do toho vstupuje např. i problém výroby (např. špatný kontakt vlákno/matrice).

6. DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY VÝZTUŽE PŘI DLOUHODOBÉM ZATÍŽENÍ

Vedle výrobků určených k jednorázové či krátkodobé spotřebě, existuje celá řada aplikací, při kterých jsou polymerní materiály vystaveny namáhání (napětí či deformaci) v delším časovém období. K tomuto účelu slouží speciální dlouhodobé zkoušky. Řada materiálů má sklon k deformaci (tok) za normálních podmínek pod vlastní tíhou, to znamená při nízké deformaci (tak zvaný studený tok). V principu se používají dva postupy, jak si při těchto zkouškách postupuje. Buďto se vzorek definovaně zatíží a sleduje se jeho deformace v čase (creep zkouška – zvolená metoda) anebo se vzorek zdeformuje na příslušnou hodnotu a měří se časová změna napětí (relaxace napětí) ve zkušebním tělese. V obou případech se měření provádí za konstantní teploty. ^[4]

Pro vyhodnocení zkoumaných výztuží (PREFA REBAR GFRP A) byly provedeny creep zkoušky dle normy ISO 10406-1. Creep deformační zkoušky jsou normovány pro tah, tlak i ohyb. Pro větší citlivost a jednodušší mechanismus deformace se však dává přednost tahovým deformacím. Zkušební těleso se na jednom konci pevně uchytí a na druhém se napíná konstantní silou (plynule a bez rázů se zatěžuje zkušebním zatížením po dobu přibližně jedné minuty, síla je volena procentuálním výpočtem ze síly maximální, zjištěné při krátkodobých tahových zkouškách), což způsobí deformaci tělesa (obrázek 1). Z pracovního diagramu se zjistí čas, za který dojde k porušení zkušebního tělesa při dané míře zatížení. Z naměřených hodnot se sestojí graf vývoje tahové pevnosti v čase a popíše se způsob porušení výztuží. Ze samotné konstrukce a způsobu měření je zřejmé, že bylo měření možné provést pouze na referenčních výztužích uložených na vzduchu při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na tuto teplotu se musela temperovat i celá místnost, ve které bylo zkušební zařízení umístěno, aby bylo zamezeno zkreslení v podobě délkové teplotní roztažnosti materiálu (při změně teploty by délkové změny nemusely být vyvozeny pouze silou od zátěže). Ze zjištěných hodnot byl stanoven vzorec pro výpočet creep rupture load ration (český překlad: „míra zatížení při porušení dotvarováním“) a následně stanoven parametry milion-hour creep ruptre capacity (český překlad: „zatížitelnost (úroveň zatížení) při porušení dotvarováním výztuže pro časový okamžik milion hodin) a parametr milion-hour creep ruptre (český překlad: „pevnost při porušení dotvarováním výztuže pro časový okamžik milion hodin) (viz výpočet 1), což jsou parametry velmi důležité např. pro statický výpočet při navrhování budovy s ohledem na konstrukci a její životnost. ^{[1], [2]}

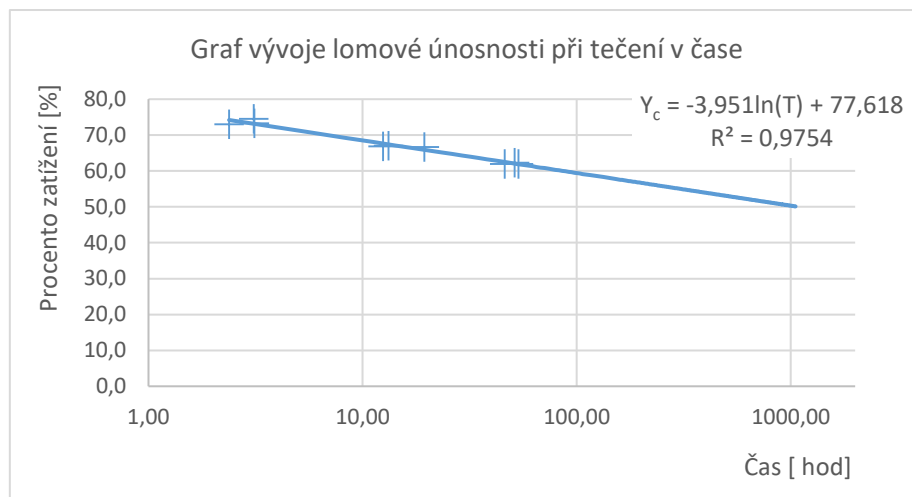


Obrázek 70 Zkušební zařízení

6.1 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – CREEP TEST

Tabulka 46 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot – CREEP test

vzorek č.	typ výztuže	mezní tahová únosnost ($F_{\max}$) [kN]	působící zatížení [kN]			působící zatížení [%]	čas do kolapsu [hh:mm]
			začátek testu	konec testu	průměr		
E-SKLO 4	GFRP, vlákna E (R25H 2400, 80 % hm)	63,0	47,3	46,6	47,0	74,5	3:10
E-SKLO 5			46,8	45,6	46,2	73,3	3:12
E-SKLO 6			47,0	45,0	46,0	73,0	2:38
E-SKLO 7			42,9	41,6	42,3	67,1	13:23
E-SKLO 8			42,5	41,8	42,2	66,9	12:45
E-SKLO 9			42,4	41,6	42,0	66,7	19:43
E-SKLO 10			39,9	38,7	39,3	62,4	51:31
E-SKLO 11			39,6	38,5	39,1	62,0	53:51
E-SKLO 12			39,5	38,6	39,1	62,0	46:06



Obrázek 71 Graf vývoje tahové pevnosti v čase

Výpočet 1:

- Z naměřených hodnot byla stanovena rovnice pro výpočet creep rupture load ration Y_c v čase T .
- Rovnice: $Y_c = (-3,951 \ln(T) + 77,618)/100 [-]$
- Spolehlivost $R^2=0,9754$ – byla dosažena hraniční shoda s požadavky dle ACI 440.3R-04 ($R^2>0,98$).
- Z této rovnice se určí parametr milion-hour creep ruptre capacity F_r a to dosazením milionu hodin ($\approx 114,1$ let) do rovnice pro Y_c a následným vynásobením Y_c s maximální silou naměřenou při krátkodobých tahových zkouškách F_{max} . Výsledek se zaokrouhlí na 3 platná číslíce.
- $F_r = Y_c \cdot F_{max} = \frac{-3,951 \ln(10^6) + 77,618}{100} \cdot 63 = 0,23 \cdot 63 = 14,5 \text{ kN}$
- Následně se určí parametr milion-hour creep ruptre strength f_r jako poměr F_r a průřezu výztuže A ($\varnothing$ GRFP 10 mm).
- $f_r = \frac{F_r}{A} = \frac{14,5 \cdot 1000}{78,54} = 185 \text{ MPa}$



Obrázek 72 Způsob porušení výztuže (shora) E-SKLO 6, E-SKLO 5, E-SKLO 4, E-SKLO 7, E-SKLO 8, E-SKLO 9, E-SKLO 12, E-SKLO 11, E-SKLO 10

Tabulka 47 Popis poškození výztuží

Označení vzorku	Působící zatížení [%]	Popis poškození výztuže
E-SKLO 4	74,5	Porušení uprostřed (mezi rámečky) v jednom řezu – řez kopíroval vinutí provázku.
E-SKLO 5	73,3	Porušení uprostřed (mezi rámečky) v jednom řezu – řez kopíroval vinutí provázku.
E-SKLO 6	73,0	Porušení ve spodní části (mezi koncovkou a rámečkem) - na dvou místech porušený povrch.
E-SKLO 7	67,1	Typické porušení – delaminace – provázek selhal po celé délce.
E-SKLO 8	66,9	Porušení uprostřed (mezi rámečky) v jednom řezu – provázek neporušen.
E-SKLO 9	66,7	Typické porušení – delaminace – provázek selhal po celé délce.
E-SKLO 10	62,4	Typické porušení – delaminace – provázek selhal pouze ve středové části (mezi rámečky).
E-SKLO 11	62,0	Porušení ve spodní části (mezi koncovkou a rámečkem) - provázek neporušen.
E-SKLO 12	62,0	Porušení v horní části (mezi rámečkem a koncovkou) v jednom řezu – řez kopíroval vinutí provázku.

6.2 VYHODNOCENÍ DESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ VÝZTUŽE – E-SKLO – CREEP TEST

Na vzorcích GFRP bylo provedeno vyhodnocení chování tahových pevností v závislosti na čase a popis porušení výztuží při dlouhodobém zatěžování.

Při testování výztuží dle normy ISO 10406-1 byla stanovena rovnice pro výpočet pevností v čase. Dle této rovnice byl proveden výpočet chování pevností výztuží při životnosti 1 000 000 hodin ($\approx 114,1$ let), jak ukládá směrnice ACI 440.3R-04 část B.8 – Test method for creep rupture of FRP bars odst. 9.3 a odst. 9.4. Výsledek byl porovnán s návrhovou hodnotou redukce dle ACI 440.3R-04, která je pro skleněná vlákna zakotvená na hodnotě 0,2. Dle výpočtu nám vyšel creep rupture load ration $Y_c = 0,23$ a vyhověl by tak redukci zakotvené ve směrnici ACI 440.3R-04. Bylo dosaženo míry spolehlivosti měření $R^2 = 0,9754$, byla tedy dosažena hraniční shoda s požadavky dle ACI 440.3R-04 ($R^2 > 0,98$). Důležité je však zmínit, že délka měření neplní podmínky postupu dle ACI 440.3R-04 na délku měření, a tedy naše hodnoty je třeba brát pouze jako orientační.

I při splnění podmínky by námi zjištěné hodnoty byly pouze teoretické, jelikož by ve skutečné konstrukci výztuž podléhala degradaci z prostředí. Určení rovnice pro výztuže vystavené alkalickému prostředí betonu nejsou danou metodikou zkoušení prozatím zjištěné, a tedy můžeme pracovat pouze s hodnotami zjištěnými na výztužích uložených v laboratorním prostředí při teplotě 20 °C na vzduchu.

Dále byl proveden popis poškození výztuží v závislosti na úrovni zatěžování. Rozdíly mezi jednotlivými stupni zatížení jsou jen minimální, ne zcela pravidelné. Podrobněji se tomuto problému zabýváme v následující kapitole optické mikroskopie, kde je provedena širší analýza chování výztuží.

7. OPTICKÁ MIKROSKOPIE

Cílem této zkoušky bylo pozorování změn FRP výztuží pomocí optického mikroskopu. Pozorování bylo provedeno pomocí optického mikroskopu Dino-Lite AM4515ZT-Edge (viz. Obr. 1). Modely Dino-Lite Edge nabízí vynikající kvalitu obrazu a vysokou úroveň flexibility, a to díky přizpůsobitelnému designu víčka. Vestavěný nastavitelný polarizér snižuje odlesky lesklých objektů (polymerní matrice). Optická mikroskopie byla provedena na vzorcích uložených v referenčním prostředí (20 °C, laboratorní prostředí) a vzorcích uložených v alkalickém roztoku dle ACI 440.3R–04 při teplotě 20 °C, 40 °C a 60 °C po dobu 365 dní. Výztuže se dále dělí typ A – kde jsou vlákna vyrobena z E-skloviny, a typ B, kde vlákna jsou vyrobena z AR-skloviny. Dále pak na vzorcích vystavených dlouhodobým tahovým zatížením (namáhány na 60 %, 65 %, 70 %, 75 % maximální tahové pevnosti).^[5]

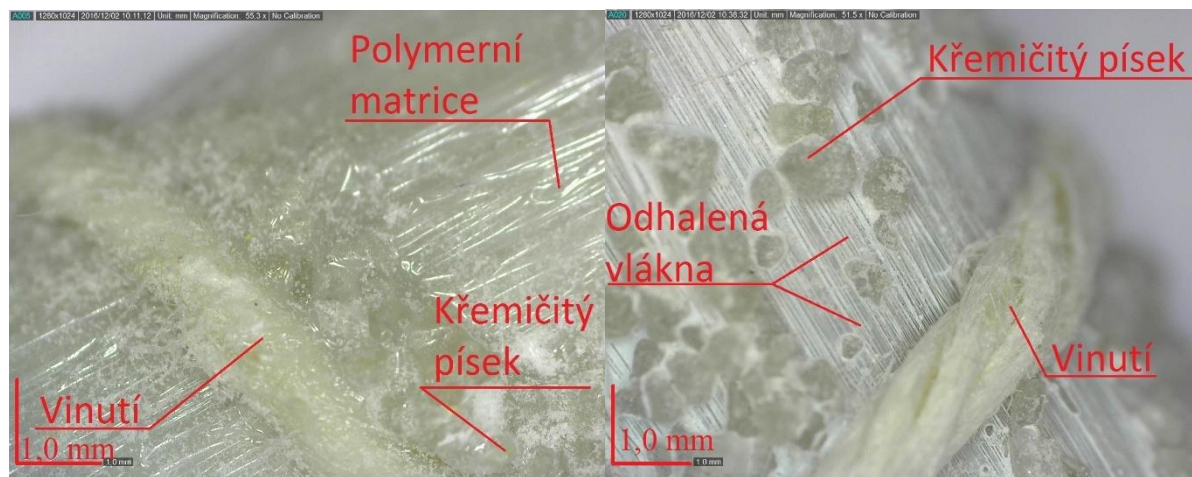


Obrázek 73 - Optický mikroskop Dino-Lite AM4515ZT – EDGE

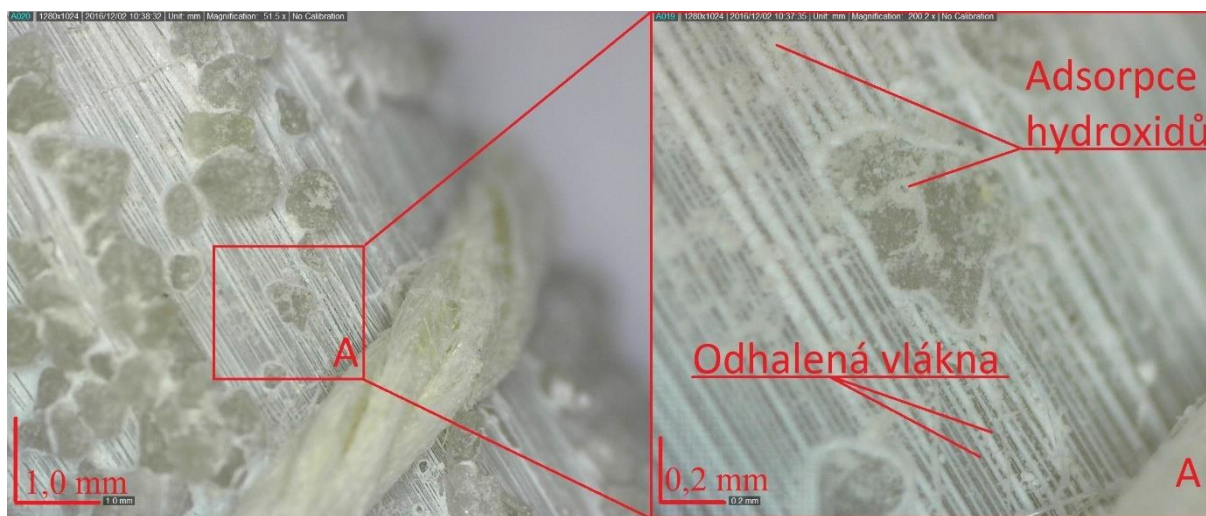
7.1 OPTICKÁ MIKROSKOPIE – PŮSOBENÍ ALKALICKÉHO PROSTŘEDÍ A VLIV TEPLoty

Nejprve byla provedena optická mikroskopie u vzorků uložených v alkalickém roztoku dle ACI 440.3R–04. Byl zkoumán povrch výztuží pro posouzení poškození povrchové vrstvy a její chování v agresivním prostředí (z principu fungování optické mikroskopie nešlo na oválný povrch výztuží zcela zaostřit) a dále byly provedeny řezy výztužemi pro posouzení možné hloubky degradace. Tyto řezy byly provedeny ruční pilou na ocel, což ve výsledku způsobilo

degradaci vláken na řezu, jelikož při řezání vznikalo vlivem tření velké teplo (viz. Obrázek 78). Výztuže typu E-SKLO vykazovaly stejný typ degradace jako výztuže typu AR-SKLO, proto byly vyhodnocovány pouze výztuže typu E-SKLO, jelikož byl tento typ podroben jak krátkodobým, tak dlouhodobým zkouškám tahových pevností.



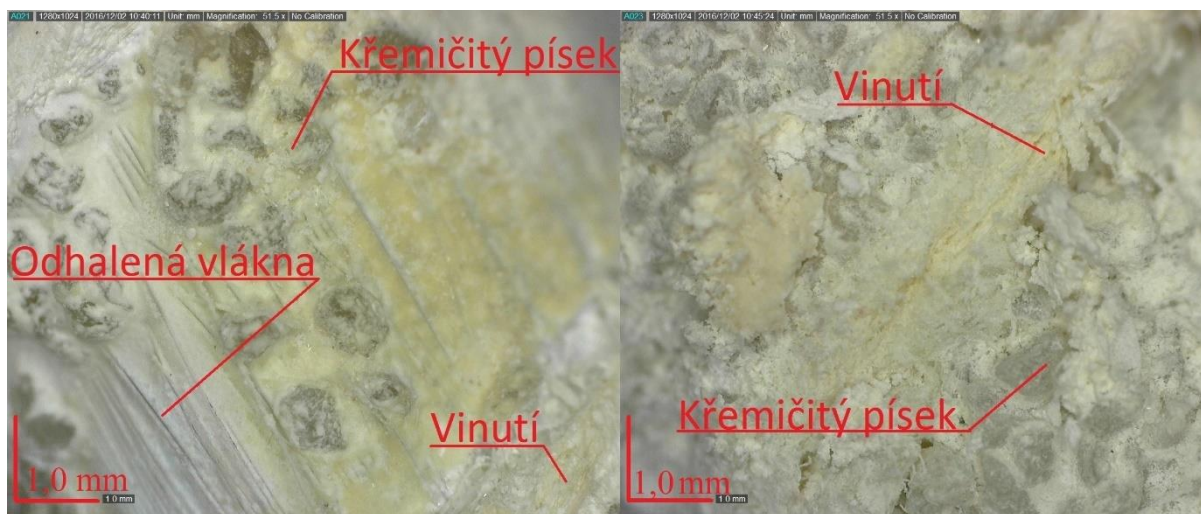
Obrázek 74: (vlevo) Referenční výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu při teplotě 20 °C; (vpravo) Výztuž uložená v agresivním prostředí při teplotě 20 °C. Vlevo i vpravo zvětšeno 50×.



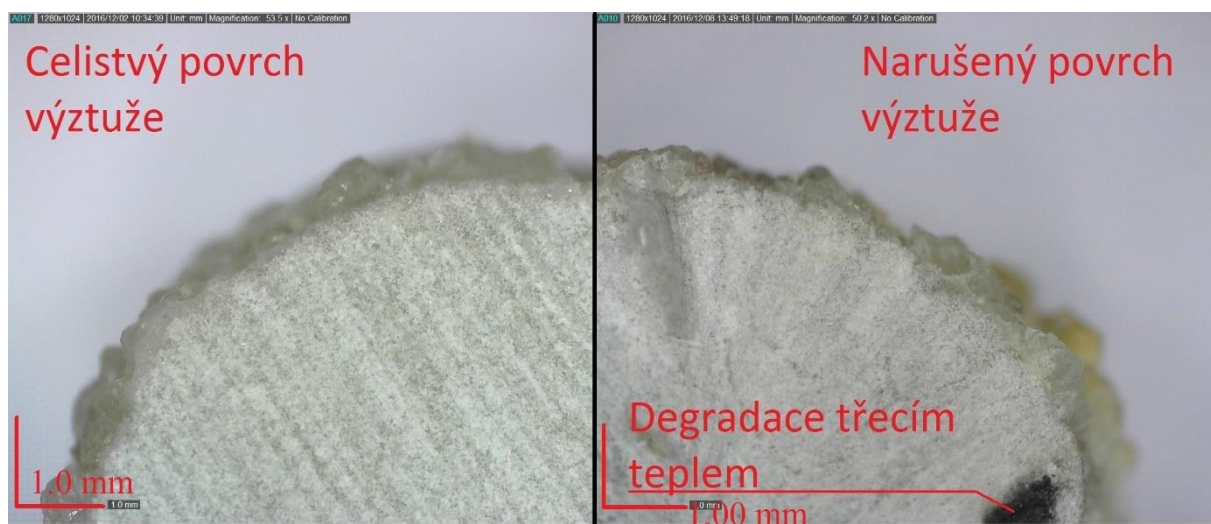
Obrázek 75 Výztuž uložená v agresivním prostředí při teplotě 20 °C – vlevo zvětšení 50×; vpravo zvětšení 200×

Při porovnání výztuže uložené v agresivním prostředí s výztuží uloženou na vzduchu je patrný značný rozdíl v povrchové struktuře výztuží. Nedegradovaná výztuž (viz obrázek 2) má skelný povrch. Vlákna, křemičitý písek i lněné vinutí je zalito polymerní matricí. U výztuže uložené v agresivním prostředí při teplotě 20 °C (viz obrázek 3) je patrná degradace povrchové vrstvy polymeru. Při větším přiblížení (viz obrázek 5) je možno vidět jednotlivá vlákna odhalená. Na povrchu matrice a křemičitého písku se začíná adsorbovat hydroxid. Vinutí

provázku je již bez polymerní matrice, ale nejeví žádné jiné známky degradace. Lze pozorovat i mírné opadávání křemičitého pískování, které plní funkci zlepšení soudržnosti s betonem.



Obrázek 76 (vlevo) Výztuž uložená v agresivním prostředí při teplotě 40 °C; (vpravo) Výztuž uložená v agresivním prostředí při teplotě 60 °C. Vlevo i vpravo zvětšeno 50×.



Obrázek 77 (vlevo) Řez výztuží uložené v laboratorním prostředí na vzduchu při teplotě 20 °C; (vpravo) Řez výztuží uložené v agresivním prostředí při teplotě 60 °C.

Vlevo i vpravo zvětšeno 50×.

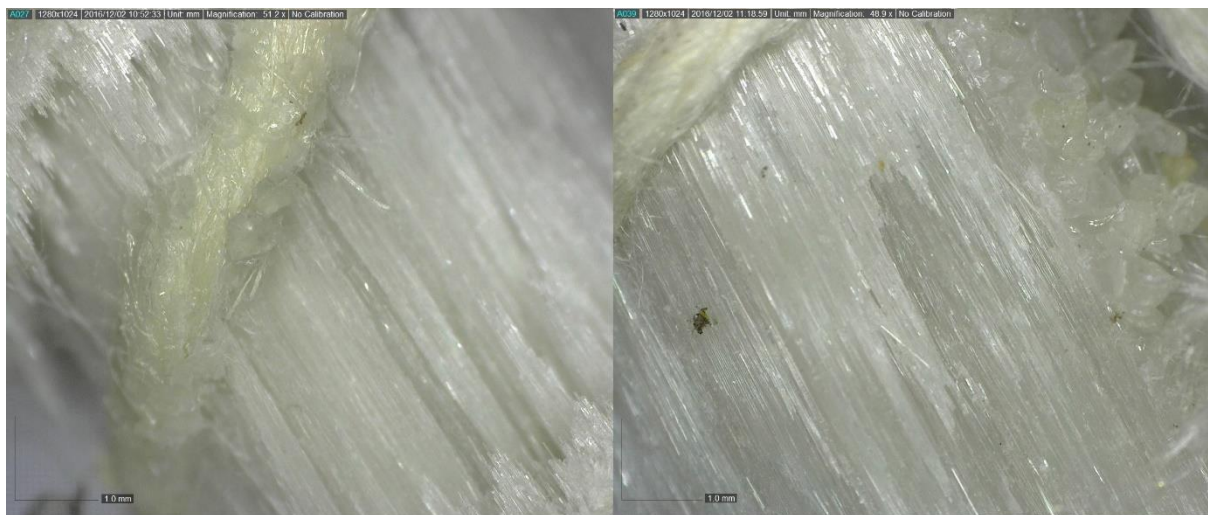


Obrázek 78 Prostup degradace do průřezu výztuže. Zvětšeno 50×.

Z dalšího pozorování na výztuži uložené v agresivním prostředí při teplotě 40 °C (viz obrázek 6), lze pozorovat prorůstání degradace hlouběji do matrice. Oproti uložení v agresivním prostředí při 20 °C jsou vlákna více odhalena, vinutí jeví známky porušení a dochází ke značné adsorpci hydroxidu. Při teplotě 60 °C (viz obrázek 7) je výztuž celá pokrytá silnou vrstvou hydroxidů a jednotlivá vlákna již nejdou pod touto vrstvou dále sledovat. Lněné vinuté provázku je vlivem degradace již téměř celé rozpadlé. Pro posouzení hloubky degradace byly provedeny řezy výztužemi. Výztuž referenční uložená na vzduchu při 20 °C má celistvý povrch sklovitého charakteru. U výztuže uložené v agresivním prostředí při 60 °C je zřetelné narušení povrchu do hloubky $\approx 0,2$ mm. Na jednom z řezů bylo také možné pozorovat možnou známku průniku degradace hlouběji do průřezu výztuže (viz obrázek 10). Na tomto místě byl průřez značně tmavší nežli okolní plocha řezu (byly pozorovány i tmavší plochy, ty byly však způsobeny vlivem třecího tepla při řezání výztuží). Průnik sahal až do hloubky 2 mm (při celkovém průřezu výztuží 10 mm), je tedy možné, že tyto průniky degradace do průřezu jsou hlavní příčinou zhoršení tahových pevností výztuží až o 19 %.

7.2 OPTICKÁ MIKORSKOPIE – PORUŠENÍ VLIVEM DLOUHODOBÉHO TAHOVÉHO NAMÁHÁNÍ

Výztuže vystavené dlouhodobému tahovému zatížení (creep zkouška) byly na optickém mikroskopu pozorovány za účele posouzení chování vláken a možných změn jejich porušování vlivem různého zatížení. Jelikož rozdíly v chování a způsobu porušení mezi jednotlivými stupni zatížení byly jen minimální, bylo vyhodnocení provedeno pouze u maximálního (75 %) a minimálního (55 %) stupně zatížení.



Obrázek 79 (Vlevo) Výztuž zatížená na 55 % maximálního zatížení; (Vpravo) Výztuž zatížená na 75 % maximálního zatížení

Při optickém pozorování vykazovaly výztuže zatěžované na nižší úroveň zatížení poškození vláken v jednom řezu a pouze na vnějším průřezu do hloubky ≈ 1 mm. To svědčí o nesoudržnosti matrice, vlivem čehož dochází k usmýknutí matrice (část průřezu výztuže). Jednotlivá vlákna nebyla roztřepená. Při zvyšování stupně zatížení se vlákna začínala více třepit a porušení nebylo v jedné rovině, spíše nahodilé do větší hloubky průřezu výztuže nebo došlo zcela k utržení celého průřezu. Jelikož se creepové zkoušky provádějí při konstantní teplotě a samotná konstrukce zkušebního zařízení nedovoluje uložení výztuží do agresivního prostředí, byla optická mikroskopie provedena pouze u nedegradovaných výztuží.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala shrnutím poznatků v oblasti FRP výztuží, a to především jejich trvanlivosti v degradačním prostředí. Byly popsány obecné vlastnosti jak kompozitu jako celku, tak i vlastnosti jednotlivých komponentů mezi které patří vlákna a matrice. Probrána byla vlákna skelná, uhlíková, aramidová a čedičová. Z matricové části kompozitu, byly popsány nejčastěji užívané typy pryskyřic, mezi které patří epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice a vinylesterová pryskyřice. Byly popsány jejich vlastnosti a funkce v kompozitu. Dále se teoretická část diplomové práce zabývá trvanlivostí FRP výztuží v různém degradačním prostředí. Byl probrán vliv vysokých a nízkých teplot, chování při požáru, vliv vlhkosti, vliv chloridů, degradace UV zářením, a především pak vliv alkálií. I přes mnoho výzkumu stále nejsou pro tyto kompozity předepsané normy pro zkoušení, a tedy při posuzování trvanlivosti nedocházíme vždy ke stejnému závěru. Tomuto nepomáhá ani fakt, že je velké množství typu FRP výztuží s velmi odlišnými vlastnostmi. Dále byly v teoretické části popsány výztuže určené pro zkoušení v experimentální části, spolu s popisem jejich výroby technologií pultruze.

Experimentální část se zabývá sledováním trvanlivosti FRP v alkalickém prostředí, které je přirozené pro beton. V nové betonové konstrukci na bázi portlandské cementu bývá pH 12,6. Toto vysoké pH může u FRP výztuží způsobit razantní snížení únosnosti výztuží. Pro zkoušky byly zvoleny dva typy výztuží. Výztuž typu PREFA REBAR GFRP A (polyesterová pryskyřice a běžných skleněných vláken typu E) a výztuž typu PREFA REBAR GFRP B (vinylesterová pryskyřice a alkalirezistentních skleněných vláken), která je určena pro dlouhodobé aplikace a je vhodná pro pojiva na bázi portlandského cementu. Metodika zkoušení vycházela ze směrnice ACI 440.3R-04, ve které se definuje prostředí uložení výztuží. Na 1 litr deionizované vody bylo použito 118,5 g Ca(OH)_2 , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Výsledný roztok měl mít výsledné pH v rozmezí 12,6 – 13, které reprezentuje alkalické prostředí betonu. Tohoto rozmezí bylo dosaženo. Při průběžném měření pH pohybovala mezi hodnotami 12,6 – 12,9. Vzorky výztuží byly také rozděleny do třech skupin, z nichž každé byla temperována na jinou teplotu a to na 20 °C, 40 °C a 60°C. Po předepsané době 1000 hodin, 90 dní a 180 dní byly výztuže podrobeny destruktivním zkouškám pro stanovení pevnosti v tahu a modulu pružnosti. Byl prokázán pokles tahových pevností, a to jak v závislosti na teplotě, tak v závislosti na době uložení. Tyto změny mají téměř lineární charakter. Velmi zajímavým faktem je, že vlákna typu B, která jsou určena pro použití s pojivem na bázi portlandského cementu, vykazovala větší pokles tahových pevností, nežli výztuže typu A. Při testování byla zjištěna i nepřesnost výroby, kdy u výztuží typu A bylo nutno určit výrobní linku, na které se daná výztuž vyrobila, jelikož

vykazovaly velmi odlišné tahové pevnosti. Při porovnání procentuálního poklesu pevností však vykazovaly výztuže vyrobené na obou linkách téměř totožné poklesy pevností. Dále bylo provedeno optické vyhodnocení míry degradace pomocí optického mikroskopu. Při posouzení referenční výztuže uložené na vzduchu při 20 °C v laboratorním prostředí s výztuží uloženou v prostředí dle ACI 440.3R-04 při teplotě 20 °C byla pozorovaná degradace povrchové vrstvy matrice, přičemž docházelo k odhalování jednotlivých vláken. Docházelo také k adsorpci hydroxidů na povrchu vinutí a křemičitého písku. Tento typ degradace se ještě více projevil na výztužích uložených při teplotě 40 °C. Výztuže uložené při teplotě 60 °C pak už měly takovou vrstvu hydroxidů, že degradace povrchu nebyla viditelná. Proto byly provedeny řezy pro stanovení hloubky degradace kde se ukázalo, že degradace prostoupila hlouběji do průřezu, což vysvětluje i větší pokles tahových pevností u výztuží uložených při 60 °C. Tento fakt a chování výztuží při destruktivních zkouškách, kdy se jako typické poškození jevila delaminace, ukazuje na degradaci matrice spojenou s poklesem tahových pevností výztuží v důsledku oslabení soudržnosti matrice s vlákny a je tedy prokázána degradace vlivem alkalického prostředí.

Dále byly provedeny creep zkoušky dle normy ISO 10406-1 pro stanovení chování výztuží při dlouhodobém zatěžování. Tyto výztuže již nebyly vystaveny agresivnímu prostředí, jelikož je nutno zkoušku provádět při konstantní teplotě a vlhkosti a uložení roztoku dle ACI 440.3R-04, tak není možné. Výztuže byly zatěžovány na 60 až 75 % maximální tahové únosnosti. Z naměřených hodnot byla stanovena rovnice pro výpočet creep rupture load ration $Y_c = 0,23$ v čase T a vyhověl by tak redukci zakotvené ve směrnici ACI 440.3R-04, která je stanovena na hodnotu 0,2. Při posouzení způsobu porušení při dlouhodobém zatížení jsme dospěli k závěru, že hladina zatěžování nemá u testovaných vzorků významný vliv na způsob porušení. Lze sice pozorovat prokluz matrice při nižší úrovni zatížení, to však není pravidlem, jelikož tohoto typu poškození nebylo dosaženo u všech výztuží zatěžovaných při nižší úrovni zatížení.

Pro další výzkum doporučuji provést ověření lineárního charakteru degradačních účinku dále po 360 dnech. Dále doporučuji opakování těchto zkoušek s výztuží na bázi epoxidové pryskyřice a skelných vláken. Tento typ matrice vykazuje dle dostupných informací dobrou odolnost vůči alkalickému prostředí a mohla by tak vytvořit funkční řešení pro použití FRP výztuží určených pro vyztužení konstrukcí s pojivem na bázi portlandského cementu.

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2003. ISBN 0-87031-162-X.
- [2] ISO 10406-1:2015: *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete -- Test methods -- Part 1: FRP bars and grids*. 2nd ed. Switzerland: Genava, 2015.
- [3] HELA, Rudlof. *Technologie betonu: BJ 04 Technologie betonu I*. Studijní opory. Vysoké učení v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2005
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Svitavy, 2016 [cit. 2016-12-18]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [5] AM4515ZT - EDGE. [Http://www.dino-lite.eu/](http://www.dino-lite.eu/) [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.dino-lite.eu/index.php/en/component/k2/item/2155-am4515zt>
- [6] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály: CJ02 – Kompozitní materiály*, učební opora VUT Brno, FAST, 2007
- [7] *Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu* [online]. 2015 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: [http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/\(moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu_42548.html](http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/(moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu_42548.html)
- [8] *Vývoj nekovových výztuží do betonu* [online]. 2009 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/vyvoj-nekovovych-vyztuzi-do-betonu-1_101464.html
- [9] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html>
- [10] STEPANEK, P., FOJTL, J., DIBELKA, V., HORAK, D.: *Reinforcing and Additional Strengthening of Concrete Structures with FRP materials*. Graz, Austria, 2005

- [11] *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015. ACI report, 440.1. ISBN 9781942727101.
- [12] *Přerozdělení ohybových momentů a plastická analýza podle ustanovení 5.5 a 5.6 normy EN 1992-1-1*. SCIAENGINEER [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://help.scia.net/16.0/cs/rb/concrete/redistributionofbendingmoments.htm>
- [13] HELA, Rudlof. *Technologie betonu II: BJ15 Technologie betonu II*. Studijní opory. Vysoké učení v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2007
- [14] *Construction and Building Materials: Mechanical behavior of concrete–resin/adhesive–FRP structural assemblies under low and high temperatures*. Reigate: Scientific and Technical Press, 2015. ISSN 09500618.
- [15] BÁBÍK, A. *Polymerní kompozity s vyššími užitnými vlastnostmi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 106 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D..
- [16] DWIGHT, D. W., *Comprehensives Composite Materials*, Amsterdam: Elsevier, 2000, Ed. Kelly A., Zweiben C. Volume 1. p 231 – 261. ISBN 0-080437192.
- [17] AMMAR, M. A. Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions. Québec, Canada, 2014. Université LAVAL.
- [18] TENG, J. G., et al. FRP: strengthened RC structures. *Frontiers in Physics*, 2002, 1.
- [19] KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), v. 29. ISBN 9780849313431.
- [20] Kim, Jang-Kyo, and Yiu-Wing Mai, eds. *Engineered interfaces in fiber reinforced composites*. Elsevier, 1998.
- [21] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 63 s. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [22] BAČOVSKÝ, M. *Použití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.

- [23] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009.
- [24] BENMOKRANE, Brahim, et al. *Characterization and comparative durability study of glass/vinylester, basalt/vinylester, and basalt/epoxy FRP bars*. Journal of Composites for Construction, 2015, 19.6: 04015008.
- [25] DROCHYTKA, R., *Plastické látky ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998, 122 s. ISBN 80-214-1148-1.
- [26] POSPÍCHAL, J. *Makromolekulární chemie* [online]. [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://jan.pospichal.biz/kestazeni/MakromolekulniChemie.pdf>
- [27] ADAMEC, L. *Návrh technologie výroby plastové páčky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 78 s., 5 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohumil Kandus.
- [28] FRP reinforcement in RC structures, Technical Report fib CEB-FIP, 2007
- [29] *KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE: PREFA Rebar PREFACARB. PREFA KOMPOZITY a.s.* 2015
- [30] *TECHNOLOGIE VÝROBY* [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>
- [31] MINISTER, Jiří. *Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví* [online]. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>
- [32] SMITH, Scott T., et al. *Durability considerations for FRP-strengthened RC structures in the Australian environment*. In: Australian Structural Engineering Conference, Sydney, NSW, Engineers Australia. 2005. p. 952-961.
- [33] DROCHYTKA, R., *Trvanlivost stavebních materiálů*. Brno, 2007
- [34] ZHOU, Jiming; LUCAS, James P. *The effects of a water environment on anomalous absorption behavior in graphite/epoxy composites*. Composites Science and Technology, 1995, 53.1: 57-64.
- [35] HEMMELOVÁ, S. *Síťování a degradace polymerních filtrů pomocí UV ozařování*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2014. 83 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.
- [36] CHEN, Yi, Julio F. DAVALOS a Indrajit RAY. *Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests*. Journal of Composites for Construction [online]. 2006, 10(4): 279-286 [cit. 2015-12-30]. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279). ISSN 1090-0268.

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schématické znázornění kompozitní mezifáze	14
Obrázek 2 Typické pracovní diagramy jednosměrných kompozitů	17
Obrázek 3 Závislost modulu ve směru vláken na objemovém podílu vláken	17
Obrázek 4 Schéma výroby skelných vláken	19
Obrázek 5 Vrstvená struktura uhlíkových vláken	21
Obrázek 6 Graf chování při zatížení matric z epoxidových pryskyřic	26
Obrázek 7 Schéma technologie pultruze	30
Obrázek 8 Průběh hodnot relaxačního modulu pro různé obsahy vlhkosti	34
Obrázek 9 Změny hmotnosti epoxidové kompozitu ponořeného do destilované vody	34
Obrázek 10 Graf chování výztuží při různých teplotách	36
Obrázek 11 Snížení tahové pevnosti a tuhosti	37
Obrázek 12 Měřicí přístroj HACH® HQ11d	40
Obrázek 13 Osazení výztuže v měřicím zařízení.	41
Obrázek 14 Porušení výztuží: ESKLO 20 °C, Vzduch, 1000 hod	42
Obrázek 15 Porušení výztuží: ESKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	44
Obrázek 16 Porušení výztuží: ESKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	46
Obrázek 17 Porušení výztuží: ESKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	48
Obrázek 18 Porušení výztuží: ARSKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	50
Obrázek 19 Porušení výztuží: ARSKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	52
Obrázek 20 Porušení výztuží: ARSKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	54
Obrázek 21 Pracovní diagram ESKLO 20 °C, Vzduch, 1000 hod	56
Obrázek 22 Pracovní diagram ESKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	56
Obrázek 23 Pracovní diagram ESKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	57
Obrázek 24 Pracovní diagram ESKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	57
Obrázek 25 Pracovní diagram ARSKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	58
Obrázek 26 Pracovní diagram ARSKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	58
Obrázek 27 Pracovní diagram ARSKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	59
Obrázek 28 Střední tahové pevnosti po 1000 hodinách	59

Obrázek 29 Střední hodnota modulu pružnosti po 1000 hodinách	60
Obrázek 30 Porušení výztuží: ESKLO 20 °C, roztok, 90 dní	62
Obrázek 31 Porušení výztuží: ESKLO 40 °C, roztok, 90 dní	64
Obrázek 32 Porušení výztuží: ESKLO 60 °C, roztok, 90 dní	66
Obrázek 33 Porušení výztuží: ARSKLO 20 °C, roztok, 90 dní	68
Obrázek 34 Porušení výztuží: ARSKLO 40 °C, roztok, 90 dní	70
Obrázek 35 Porušení výztuží: ARSKLO 60 °C, roztok, 90 dní	72
Obrázek 36 Pracovní diagram ESKLO 20 °C, roztok, 90 dní	74
Obrázek 37 Pracovní diagram ESKLO 40 °C, roztok, 90 dní	74
Obrázek 38 Pracovní diagram ESKLO 60 °C, roztok, 90 dní	75
Obrázek 39 Pracovní diagram ARSKLO 20 °C, roztok, 90 dní	75
Obrázek 40 Pracovní diagram ARSKLO 40 °C, roztok, 90 dní	76
Obrázek 41 Pracovní diagram ARSKLO 60 °C, roztok, 90 dní	76
Obrázek 42 Střední tahové pevnosti po 90 dnech	77
Obrázek 43 Střední hodnota modulu pružnosti po 90 dnech	77
Obrázek 44 Porušení výztuží: ESKLO 20 °C, roztok, 180 dní	80
Obrázek 45 Porušení výztuží: ESKLO 40 °C, roztok, 180 dní	82
Obrázek 46 Porušení výztuží: ESKLO 60 °C, roztok, 180 dní	84
Obrázek 47 Porušení výztuží: ARSKLO 20 °C, roztok, 180 dní	86
Obrázek 48 Porušení výztuží: ARSKLO 40 °C, roztok, 180 dní	88
Obrázek 49 Porušení výztuží: ARSKLO 60 °C, roztok, 180 dní	90
Obrázek 50 Pracovní diagram ESKLO 20 °C, roztok, 180 dní	92
Obrázek 51 Pracovní diagram ESKLO 40 °C, roztok, 180 dní	92
Obrázek 52 Pracovní diagram ESKLO 60 °C, roztok, 180 dní	93
Obrázek 53 Pracovní diagram ARSKLO 20 °C, roztok, 180 dní	93
Obrázek 54 Pracovní diagram ARSKLO 40 °C, roztok, 180 dní	94
Obrázek 55 Pracovní diagram ARSKLO 60 °C, roztok, 180 dní	94
Obrázek 56 Střední tahové pevnosti po 180 dnech	95
Obrázek 57 Střední hodnota modulu pružnosti po 180 dnech	95

Obrázek 58 Vývoj střední tahové pevnosti E-SKLO Linka 1	96
Obrázek 59 Procentuální změna střední tahové pevnosti E-SKLO Linka 1	96
Obrázek 60 Vývoj střední tahové pevnosti E-SKLO Linka 2	97
Obrázek 61 Procentuální změna střední tahové pevnosti E-SKLO Linka 2	97
Obrázek 62 Vývoj modulu pružnosti E-SKLO Linka 1 / Linka 2	98
Obrázek 63 Procentuální změna modulu pružnosti E-SKLO Linka 1 / Linka 2	98
Obrázek 64 Vývoj střední tahové pevnosti AR-SKLO	99
Obrázek 65 Procentuální změna střední tahové pevnosti AR-SKLO	99
Obrázek 66 Vývoj modulu pružnosti AR-SKLO	100
Obrázek 67 Procentuální změna modulu pružnosti AR-SKLO	100
Obrázek 68 Zdeformovaná špatně vyplněná koncovka	102
Obrázek 69 Procentuální pokles tahových pevností GFRP výztuží	103
Obrázek 70 Zkušební zařízení	106
Obrázek 71 Graf vývoje tahové pevnosti v čase	107
Obrázek 72 Způsob porušení výztuže CREEP TEST	108
Obrázek 73 Optický mikroskop Dino-Lite AM4515ZT – EDGE	110
Obrázek 74 Referenční výztuž/výztuž uložená v agresivním prostředí 20 °C	111
Obrázek 75 Výztuž uložená v agresivním prostředí při teplotě 20 °C	111
Obrázek 76 Výztuž uložená při teplotě 40 °C/Výztuž uložená při teplotě 60 °C	112
Obrázek 77 Řez výztuží REF 20 °C/Řez výztuží uložené při teplotě 60 °C	112
Obrázek 78 Prostup degradace do průřezu výztuže	113
Obrázek 79 Výztuž 55 % maximálního zatížení/výztuž 75 % maximálního zatížení	114

10. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Typické hodnoty hustoty FRP výztuží	15
Tabulka 2 Typické hodnoty součinitele tepelné roztažnosti pro vybrané FRP výztuže	16
Tabulka 3 Typické vlastnosti vláken užívaných v FRP výztužích	18
Tabulka 4 Hmotnostní ztráta čedičových vláken po vyluhování v agresivním prostředí	23
Tabulka 5 Vybrané mechanické vlastnosti polymerní matrice	24
Tabulka 6 Vývoj pevnosti v tahu GFRP	33
Tabulka 7 Chování FRP výztuží v extrémních teplotách	35
Tabulka 8 Popis porušení ESKLO 20 °C, vzduch, 1000 hod	42
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 20 °C, vzduch, 1000 hod	43
Tabulka 10 Popis porušení ESKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	44
Tabulka 11 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	45
Tabulka 12 Popis porušení ESKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	46
Tabulka 13 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	47
Tabulka 14 Popis porušení ESKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	48
Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	49
Tabulka 16 Popis porušení ARSKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	50
Tabulka 17 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 20 °C, roztok, 1000 hod	51
Tabulka 18 Popis porušení ARSKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	52
Tabulka 19 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 40 °C, roztok, 1000 hod	53
Tabulka 20 Popis porušení ARSKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	54
Tabulka 21 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 60 °C, roztok, 1000 hod	55
Tabulka 22 Popis porušení ESKLO 20 °C, roztok, 90 dní	62
Tabulka 23 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 20 °C, roztok, 90 dní	63
Tabulka 24 Popis porušení ESKLO 40 °C, roztok, 90 dní	64
Tabulka 25 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 40 °C, roztok, 90 dní	65
Tabulka 26 Popis porušení ESKLO 60 °C, roztok, 90 dní	66
Tabulka 27 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 60 °C, roztok, 90 dní	67
Tabulka 28 Popis porušení I. Sada ARSKLO 20 °C, roztok, 90 dní	68

Tabulka 29 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 20 °C, roztok, 90 dní	69
Tabulka 30 Popis porušení ARSKLO 40 °C, roztok, 90 dní	70
Tabulka 31 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 40 °C, roztok, 90 dní	71
Tabulka 32 Popis porušení ARSKLO 60 °C, roztok, 90 dní	72
Tabulka 33 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 60 °C, roztok, 90 dní	73
Tabulka 34 Popis porušení ESKLO 20 °C, roztok, 180 dní	80
Tabulka 35 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 20 °C, roztok, 180 dní	81
Tabulka 36 Popis porušení ESKLO 40 °C, roztok, 180 dní	82
Tabulka 37 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 40 °C, roztok, 180 dní	83
Tabulka 38 Popis porušení ESKLO 60 °C, roztok, 180 dní	84
Tabulka 39 Naměřené a vypočtené hodnoty ESKLO 60 °C, roztok, 180 dní	85
Tabulka 40 Popis porušení ARSKLO 20 °C, roztok, 180 dní	86
Tabulka 41 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 20 °C, roztok, 180 dní	87
Tabulka 42 Popis porušení ARSKLO 40 °C, roztok, 180 dní	88
Tabulka 43 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 40 °C, roztok, 180 dní	89
Tabulka 44 Popis porušení ARSKLO 60 °C, roztok, 180 dní	90
Tabulka 45 Naměřené a vypočtené hodnoty ARSKLO 60 °C, roztok, 180 dní	91
Tabulka 46 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot - CREEP test	106
Tabulka 47 Popis poškození výztuží	108