

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra materiálového inženýrství a chemie

Koroze čedičových vláken v simulovaných prostředích

Corrosion of basalt fibres in simulated environment

Diplomová práce

Bc. Oskar Soukup

Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Příprava, realizace a provoz staveb
Vedoucí práce:	doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.
Rok vytvoření práce:	2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Soukup	Jméno: Oskar	Osobní číslo: 458567
Zadávající katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Koroze čedičových vláken v simulovaných prostředích	
Název diplomové práce anglicky: Corrosion of basalt fibers in simulated environment	
Pokyny pro vypracování: Student provede literární rešerši na téma využití čediče a čedičových výrobků ve stavebnictví, se zvláštním zřetelem na vlákna. V experimentální části pak bude zkoumat korozní chování čedičových vláken v různých korozních prostředích. Tato prostředí budou jak kapalná, tak pevná - cementová pasta s čedičovou rozptýlenou výztuží. Porovná působení různých prostředí na vlákna.	
Seznam doporučené literatury: Fiore et al., A review on basalt fibre and its composites, Composites Part B 74 (2015) 74-94 Dhand et al., A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, Composites Part B 73 (2015) 166-180	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 14. 2. 2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 15. 5. 2022 <i>Údaj uveďte v souladu s u příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
15.2.2022	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/200 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, 2022

.....

Bc. Oskar Soukup

Poděkování

Děkuji mé vedoucí doc. Ing. Evě Vejmelkové, Ph.D. za možnost psát tuto diplomovou práci pod jejím vedením na katedře materiálové inženýrství a chemie. V neposlední řadě za její vstřícnost, nasazení a motivující přístup.

Děkuji doc. Ing. Martinu Keppertovi, Ph.D. za odborné rady v oblastech chemie, poskytnuté podklady a jeho ochotu při řešení problematiky.

Děkuji doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a doc. Ing. Martinu Böhmovi, Ph.D. za poskytnuté podklady.

Děkuji Ing. Lukáši Děkanovskému za ochotu a poskytnutý prostor pro provedení zkoušek v prostorách Vysoké školy chemicko-technologické v Praze.

Děkuji kolektivu katedry materiálového inženýrství a chemie, který mi společně s kolektivem experimentálního centra poskytl prostor a materiál pro výrobu i zkoušení vzorků. Také děkuji všem, kteří mi pomáhali s výrobou vzorků.

Děkuji rodičům za jejich tolerantní přístup a podporu.

Abstrakt

Práce se zabývá studiem v oblasti čedičových vláken a kompozitů z nich vyrobených, které mohou být využity ve stavebním průmyslu jako ekologičtější alternativa k dosud používaným ocelovým tyčím nebo rozptýlené výztuži. V rámci experimentálního programu byl prováděn výzkum na krátkých čedičových vláknech, BFRP (polymery vyztuženy čedičovými vlákny) tyčích a cementových pastách s rozptýlenou čedičovou výztuží s různým obsahem mikrosiliky. Testované materiály byly vystaveny několika typům simulovaných korozních prostředí a byl testován vliv na jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Konkrétně byl studován vliv prostředí a pH na chemické složení studovaných materiálů, mikrostrukturu, na základní a mechanické vlastnosti.

Klíčová slova

čedičová vlákna, polymery vyztuženy čedičovými vlákny, výztuž, koroze, simulovaná prostředí, analýza, mechanické zkoušky

Abstract

The thesis deals with research of basalt fibres and composites made of them. They might be used in civil engineering as ecological alternative for traditional steel rebars and dispersed wire reinforcement which are used today. In the experimental part of the thesis the research on of short basalt fibers, BFRP (basalt fiber reinforcement polymer) rebars and cement pastes with dispersed basalt fibers and variable volume of silica fume. Tested materials were exposed to several types of simulated corrosion environments and there were tested effects on their physical characteristics and chemical properties. Specifically, the influence of the environment and pH on the chemical composition of the studied materials, microstructure, basic and mechanical properties were studied.

Keywords

basalt fibre, basalt fibre reinforcement polymer, reinforcement, corrosion, simulated solutions, mechanical tests

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíl práce a motivace	12
3	Teoretická část práce	13
3.1	Čedič - Přírodní materiál	13
3.2	Čedič - Vlastnosti	14
3.3	Čedič - Procesy tepelného zpracování.....	14
3.4	Čedič - Použití ve stavebním průmyslu	19
3.5	Současná problematika čedičových vláken a BFRP – Degradace.....	31
3.6	Použité materiály a jejich charakteristiky	41
3.7	Experimentální metody měření a popis výroby zkušebních vzorků	46
4	Výsledky a diskuse.....	66
4.1	Čedičová vlákna	66
4.2	BFRP tyče	104
4.3	Beton s čedičovými vlákny	107
4.4	Stručné shrnutí výsledků.....	114
5	Závěr.....	116
6	Poznámky	118
7	Použitá literatura.....	119
	Seznam obrázků	127
	Seznam tabulek	130

Seznam použitých symbolů a zkratek

Použité symboly:

ppm částic na jeden milion (parts per milion)

σ pevnost v tahu [MPa]

Použité zkratky:

LULUCF land use, land use change and forestry

GHG greenhouse gases (skleníkové plyny)

HDI index lidského rozvoje (Human Development Index) [2]

BFRP basalt fibre reinforced polymer (polymer vyztužený čedičovým vláknem)

SEM skenovací elektronová mikroskopie

XRD rentgenová difrakční metoda

XRF rentgenová fluorescenční spektrometrie

SPS simulated pore solution (simulované porozní prostředí)

SSW simulated sea water (simulovaná mořská voda)

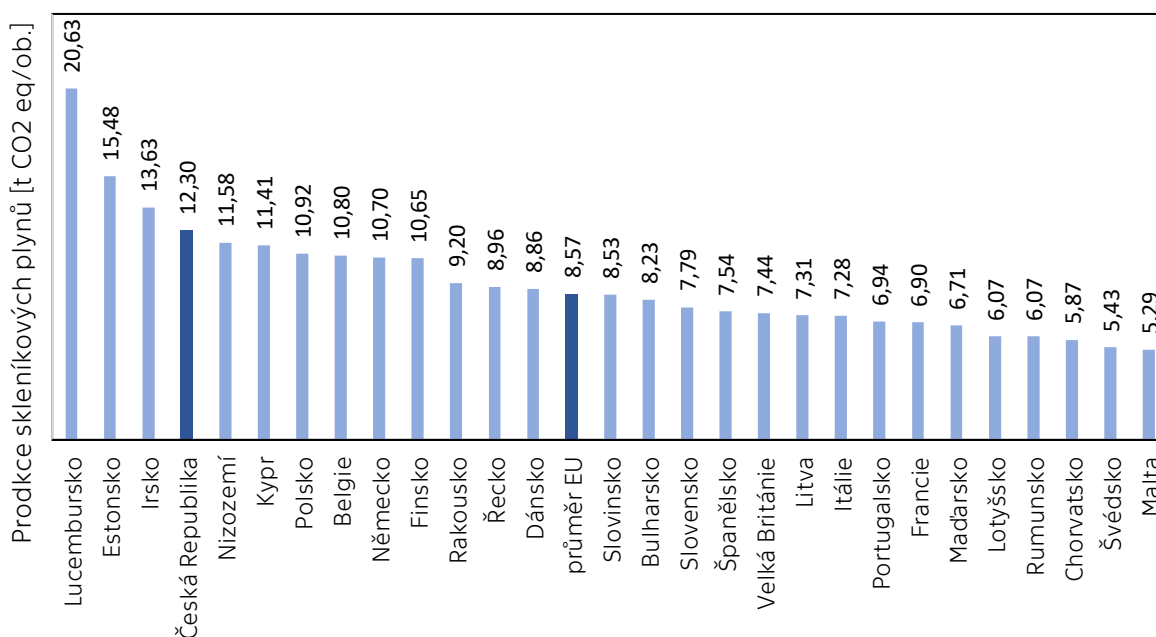
ASSW alkaline simulated sea water (simulovaná alkalická mořská voda)

pH3 prostředí kyseliny

1 Úvod

Naše společnost se neustále rozvíjí ve všech odvětvích, s čímž je spojený růst indexu lidského rozvoje (HDI), který celosvětově srovnává životní úroveň dané země. Současně s vlivem zvyšování počtu obyvatel na planetě, který v roce 2021 přesáhl 7,875 miliard [1], dochází především v rozvinutých zemích k tlaku na udržitelnost a šetrnost k životnímu prostředí. Lidé ve vyspělých státech, jejichž základní lidské potřeby jsou naplněny, si uvědomují nevýhody tradičních materiálů. Mezi ně patří například vysoká výrobní cena, náročnost výroby, nedostatečná recyklace, jejich možná neobnovitelnost.

Zmíněný společenský růst se značnou mírou podílí na nárůstu koncentrace skleníkových plynů (GHG) v atmosféře, které mají za následek zvyšování teplot. Jedním a nejvíce zmiňovaných skleníkových plynů je oxid uhličitý (CO₂). Od roku 1960 do začátku druhé dekády 21. století se koncentrace CO₂ v atmosféře zvýšila o přibližně 22 %, z hodnoty 317 ppm na hodnotu 408 ppm [3, 4]. V roce 2018 byla Česká republika, v porovnání se státy Evropské unie, na osmém místě v celkové produkci skleníkových plynů s hodnotou 130,5 mil. t CO₂ eq [6]. Po přepočtu hodnoty na obyvatele daného státu, se Češi řadí jako čtvrtí v produkci skleníkových plynů. Srovnání je patrné z Obrázku 1.

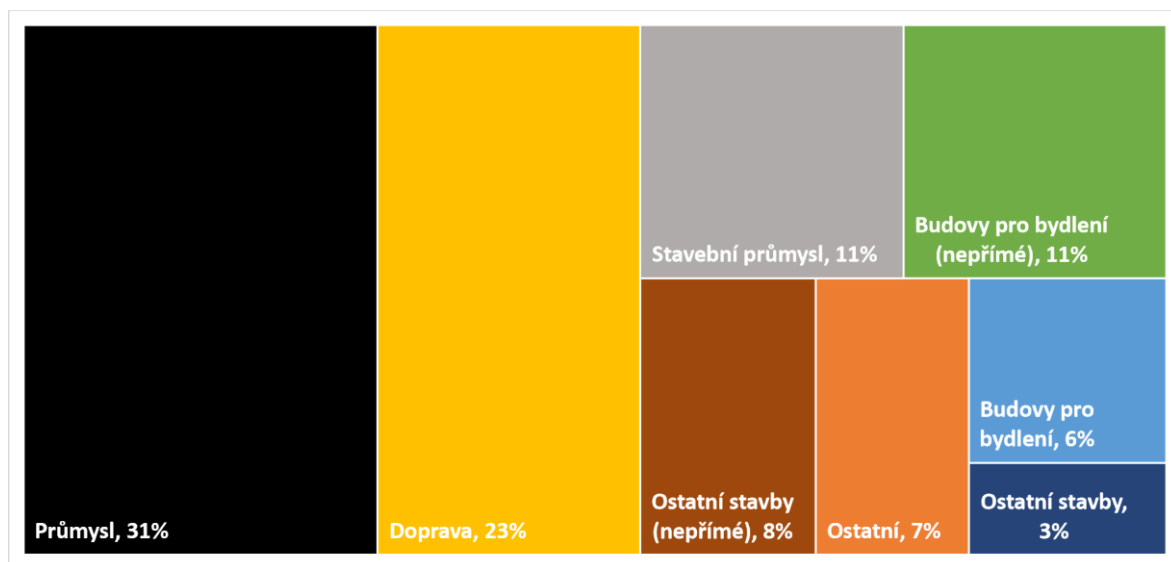


Obrázek 1: Srovnání produkce skleníkových plynů obyvatel států EU v roce 2018 [5 - 7] (Pozn.1)

Budovy a jejich prostředí se ve světovém měřítku podílí na celkové spotřebě energie z 36 %. Hlavními sektory, které se podílí na spotřebě energii v budovách je vytápění, ohřev vody a vaření. S postupnou modernizací rozvojových zemí, které se nachází v teplejších pásmech Země a vlivem globálního oteplování, se začíná projevovat trend zvyšující se spotřeby energií na chlazení. Vzhledem k tomu, že na získání elektrické energie se

světově podílí z 64,2% fosilní paliva, která s sebou nesou vysokou uhlíkovou stopu, je vyvíjen tlak na nalezení alternativ zdroje nebo snížení spotřeby této elektřiny [11, 65].

Z pohledu emisí a produkce skleníkových plynů je stavební sektor odpovědný za 39 %, z kterých je 28 % spojených s výrobou energií pro toto odvětví a dalšími 11 %, které jsou svázány s výrobou stavebních materiálů jako je například cement nebo ocel [11, 12].



Obrázek 2: Celkový světový podíl emisí [11] (Pozn. 2)

Právě cementářský a hutnický průmysl je tím největším znečišťovatelem spojeným se stavebnictvím. Obě odvětví využívají pro získání produktu vysoké teploty (cement 450 °C, ocel 1600 °C), kterých je dosaženo spalováním nejčastěji fosilních paliv, resp. elektřinou (např. elektrickou obloukovou pecí). Z celkové absolutní produkce emisí v průmyslu s kovy výroba oceli zabírá přibližně 70 %, druhý hliník „pouze“ 11 %. Při výrobě cementu vznikají emise dosahováním vysokých teplot a chemickými reakcemi z přeměny vápence na slínek. Z celkové produkce GHG ČR v roce 2018 bylo 2,7 % spojeno s cementem a 5,4 % s produkcí železa a oceli [10, 13, 14]. Srovnání vypuštěných emisí na příkladech je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1: Srovnání emisí na 1 tunu produktu [13, 14]

Produkt (1 t)	Emise CO ₂ (t)
Cement	1,1 - 1,2
Ocel (vysoká pec)	1,8 - 2,5
Ocel (oblouková pec)	0,5 - 0,9
Hliník	9,0

Jak je patrné, stavebnictví je v oblasti ekologie významným faktorem. Již v této době dochází ke zlepšování efektivnosti spotřebičů i samotných budov z pohledu snižování uhlíkové stopy. I přes vývoj technologií a zvyšování efektivity se dá očekávat nárůst GHG, z důvodu zvyšující se zastavěnosti.

V roce 2016 Česká republika podepsala Pařížskou dohodu, kterou v roce 2017 ratifikovala a zavázala se tak k jejímu plnění [8, 9]. Cílem této dohody je

- *„Udržení nárůstu průměrné globální teploty výrazně pod hranicí 2 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí a úsilí o to, aby nárůst teploty nepřekročil hranici 1,5 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí, a uznání, že by to výrazně snížilo rizika a dopady změny klimatu;*
- *zvyšovat schopnosti přizpůsobit se nepříznivým dopadům změny klimatu a posilování odolnosti vůči změně klimatu a nízkoemisního rozvoje způsobem, který neohrozí produkci potravin;*
- *sladění finančních toků s nízkoemisním rozvojem odolný vůči změně klimatu.“* [9]

Aby ČR dosáhla svého závazku, je dekarbonizace stavebnictví jedním z nástrojů. V tomto směru se nabízí řešení, jako je například: zefektivnění urbanismu intravilánu, kladení důrazu na výstavbu budov s nízkou uhlíkovou stopou, zdokonalování již existujících objektů, vyvíjení úsilí o zvýšení efektivity vytápění, osvětlení, chlazení, využívání čistší energie, navrhování budovy s delší životností, vyvíjení nových materiálů nebo kompozitů a vylepšování vlastností těch stávajících.

Právě výzkumu v oblasti zlepšování nových kompozitů, je věnována tato diplomová práce, neboť beton a železobeton jsou světově nejpoužívanějšími kompozity v oblasti stavebnictví [66, 67]. Snaha vylepšit vlastnosti betonu s postupem času dosahuje úspěchů, které se ovšem v několika dekádách opět ukazují jako nedostatečné. To je také způsobeno modernizací výzkumu, vývojem technologií a novými objevy, což umožňuje další, dříve nemyslitelné uchopení problematiky. Nové materiály je při experimentech potřeba podrobit řadě testů a zkoušek, podle kterých se vyhodnotí jejich skutečné chování a vlastnosti. Tento proces bývá zpravidla časově náročný, a i následné prosazení v konzervativním stavebnictví také nebývá jednoduché.

2 Cíl práce a motivace

Čedičová vlákna a jejich kompozity jsou v dnešní době častěji zmiňovaným materiálem, a to v souvislosti s jejich možným nahrazením stávající ocelové výztuže. S výrobou oceli je spojena vysoká produkce skleníkových plynů, která vzniká už v procesu výroby. S důrazem na šetrnost lidské činnosti k životnímu prostředí se snažíme hledat alternativy k stávajícím materiálům. Zvyšující se ceny energií, společně s ekologičností, vybízejí k využití netradičních surovin a k vývoji nových materiálů. Nižší náročnost zpracování a cena výroby čedičových kompozitů je důvodem k tomu, abychom se tímto materiálem více zabývali a prokázali, jak se chová z chemického pohledu v prostředích, ve kterých se jinak používá ocel, a kde se tím pádem může nahradit. Experimenty s čedičovými materiály v současnosti postrádají dostatečné množství výsledků pro rozšíření jejich využívání. Problematika chemické stálosti a degradace v různých prostředích není zcela jasná a zdokumentovaná tak, aby mohlo být řečeno, že pro používání ve stavebnictví je jednoznačně lepší používat čedičové kompozity jako alternativu.

Cílem této diplomové práce bylo v teoretické části provést rešerši zaměřenou na využití čediče a jeho kompozitů ve stavebním průmyslu a nastínit problematiku korozního chování na základě odborné literatury.

Praktická část je zaměřena na výzkum v oblasti korozního chování krátkých čedičových vláken a kompozitů obsahujících čedič. Hlavním cílem je popis a porovnání chování vláken a BFRP tyčí v korozním prostředí a vliv pH na vlákna v cementových pastách.

Na třech hlavních typech testovaných materiálů budou zkoumány změny vlastností ovlivněné různými typy korozních prostředí. Vyhodnocení chování pro krátká čedičová vlákna bude provedeno na základě změn hmotnosti, chemického složení a pevnosti v tahu. Zhodnocení kompozitu v podobě BFRP tyčí bude provedeno na základě pevnosti v tahu. Pro cementové pasty s různým obsahem mikrosiliky a jednotným obsahem čedičových vláken by mělo být potvrzeno nebo vyvráceno, že snížením pH prostředí klesá degradace vláken. Bude provedeno shrnutí výsledků podle typů zkušebních těles.

3 Teoretická část práce

3.1 Čedič - Přírodní materiál

Čedič neboli basalt tvoří z více než 90 % všechny vyvřelé horniny na povrchu Země. Také se předpokládá jeho výskyt na dně většiny oceánů pod vrstvou sedimentů různých mocností. Tímto názvem se může označovat materiál ve všech svých stádiích, tzn. kámen, láva i magma. Nejčastějším dělení basaltů je na alkalické a tholeiitické [15, 16].

Tholeiitické basalty jsou přesyceny křemeny, alkalické nikoli. Ty mohou naopak obsahovat malá množství olivínu nebo nefelínu. Jsou známy i další typy jako například čediče s vysokým obsahem oxidu hlinitého, někdy nazývány oceánskými tholeiity, podle místa výskytu. Není úplně jednoznačné, v jaké hloubce, za jakých teplot a vlivem jakých tlaků dochází v zemském povrchu k formaci basaltů. To je způsobeno především průběžným chladnutím a chemickou změnou během procesu. Zdrojem magmatu je ale evidentně zemský plášť. Teplota zemské lávy při erupci dosahuje teplot 1150-1250 °C poté chladne (sloupcovitě nebo struskovitě) a může vytvářet i velké plochy [15, 16].

V momentě, kdy se basalt v podobě lávy prudce schladí, což nebývá v přírodě tolik běžné, vytváří materiál s vlastnostmi podobnými sklu. Pokud dochází k postupnému a pomalému ochlazení, vznikají minerály s různým stupněm krystalizace. Dva hlavní minerály, které obsahují přibližně 80 % čedičů, jsou plagioklasy a pyroxeny (převážně vápenné). Přítomnost pyroxenů chudých na vápník značí tholeiitický basalt. Místo pyroxenů chudých na vápník se v alkalických čedičích vyskytuje olivín. Další minerály, které se v čedičích mohou objevit, jsou oxidy Fe-Ti, křemen a nefelín [16].

Tabulka 2: Chemické složení kenozoického čediče, průměr z 2413 analýz [16] Pozn. 3

Chemické označení	% zastoupení
SiO ₂	47,65
Al ₂ O ₃	15,28
Fe ₂ O ₃	3,57
FeO	7,54
MgO	7,52
CaO	9,91
Na ₂ O	2,98
K ₂ O	1,23
TiO ₂	2,14
P ₂ O ₅	0,44
H ₂ O	1,51

3.2 Čedič - Vlastnosti

Basalty mají ve většině případů černou nebo šedou barvu, můžou se ale objevit tmavé odstíny zelené, červené nebo hnědé. Jejich mechanické vlastnosti se mohou lišit díky jejich sopečnému původu, který je proměnný na základě geologie daného regionu. Vznik čediče, jak je znám dnes, byl ovlivněn nejen z pohledu chemického složení a teplot, ale také vnitřními geologickými silami, které mohly vytvářet mikrotrhliny nebo póry snižující například pevnost. Poréznost má zásadní negativní vliv na vlastnosti, kvůli kterým je ve stavebnictví v surové podobě čedič používán. Vysoká pevnost, nízká nasákavost a chemická stálost jsou hlavními přednostmi této horniny [18].

Tabulka 3: Vybrané fyzikální vlastnosti kamene z lomu Soutěšky [19]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Objemová hmotnost	2980	kg/m ³
Pórovitost	0,30	%
Nasákavost	0,11	%
Tepelná roztažnost	7,20	10 ⁶ K ⁻¹
Pevnost v tlaku	269,5	MPa
Pevnost za ohybu	22,90	MPa

3.3 Čedič - Procesy tepelného zpracování

3.3.1 Tavení a odlévání

Zabýváme-li se tavením hornin a jejich následným odléváním do forem, hovoříme o petrurgii (český překlad je kamenolitectví). Obor, jehož technologie je na přechodu mezi sklářstvím a metalurgií. Toto průmyslové odvětví se začalo na území dnešní ČR dostávat do povědomí kolem roku 1946 a v roce 1949 se tímto tématem začal zabývat původní Výzkumný ústav sklářský v Hradci Králové. Výchozí surovinou pro výzkum byl nefelinický bazanit z Libochovan [22].

Souběžně s požadovaným chemickým složením (Tabulka 4), které odpovídá alkalickému olivinickému čediči až nefelinickému bazanitu, je potřebné dosažení i daných fyzikálních vlastností vstupní suroviny. Hornina musí mít jemnozrnné homogenní složení a nesmí obsahovat cizí uzavřeniny a větší vyrostlice olivínu nebo pyroxenu. Při zpracování by části větší 2 milimetrů způsobily nedostatečné protavení hmoty. Shluky menších (1-2 mm) vyrostlic, mohou také negativně ovlivnit finální odlitek. Aby nebyla kvalitní „jádrová“ hornina kontaminována z povrchu svou zvětranou částí, je vhodné, aby těžba neprobíhala komorovými odstřely [21, 22].

Tabulka 4: Ideální složení petrurgického čediče [22]

Chemické označení	% zastoupení
SiO ₂	43,5-47,0
Al ₂ O ₃	11,0-13,0
Fe ₂ O ₃	4,0-7,0
FeO	5,0-8,0
MgO	8,0-11,0
CaO	10,0-12,0
Na ₂ O	2,0-3,5
K ₂ O	1,0-2,0
TiO ₂	2,0-3,5
P ₂ O ₅	0,5-1,0

Tabulka 5: Průměrné chemické složení kamene ze Slapan [22] Pozn. 4

Chemické označení	% zastoupení
SiO ₂	44,2
Al ₂ O ₃	12,7
Fe ₂ O ₃	5,4
FeO	6,9
MgO	12,2
CaO	12,2
Na ₂ O	2,5
K ₂ O	1,1
TiO ₂	2,0
P ₂ O ₅	0,4

V roce 1951 byla v bývalé sklárně ve Staré Vodě u Mariánských Lázní zahájena výroba čedičových odlitků. Dnes se na tomto místě nachází firma EUTIT, která zvýšila kapacitu zpracování čediče v tunách až sedmnáctkrát oproti roku 1953. Firma od roku 1957 využívá nedaleký lom čediče v Slapanech. Tento lom má světově unikátní chemické složení ideální k petrurgickému zpracování (Tabulka 5) [20, 22].

Pro tavbu je hornina upravována už v lomu, kde se nadrtí na velikost 8-15 cm a poté se dopraví k šachtové peci. Do pece se surovina nakládá tak, že se horkými spalinami

postupně přehřívá a zbavuje vody. Poté, co se hornina roztaví na teplotu kolem 1300 °C, putuje do homogenizačního bubnu, kde se zchladí až na 1160 °C. Za stálého míchání dochází k homogenizaci materiálu a vytváření krystalizačních zárodků magnetitu. Následně je tavenina vylita do kovových nebo pískových forem. Může se také zpracovat odstředivým litím. V závislosti na velikosti odlitku probíhá tuhnutí a rekrystalizace 2-3 minuty, respektive 5-8 minut. Následně se výrobky vyjmou z forem a ihned se vloží do tunelové pece s 800 °C, kde se po počáteční prodlevě postupně ochlazují až na teplotu 40 °C. Dojde tak k dokrystalizování a odstranění vnitřního pnutí. Délka chladicího cyklu, se podle autorů různí. Čtyroký a kol. uvádí interval 20 – 24 hodin, Svoboda 16 – 21 hodin [22, 23].

Tyto odolné čedičové odlitky najdou uplatnění všude tam, kde dochází k velkému namáhání obrusem nebo kde se vyskytuje chemicky agresivní prostředí. Finální produkt má typický vzhled, proto je vhodný i do interiérů.

Tabulka 6: Základní vlastnosti taveného čediče [24]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Tvrдость podle Mohse (ČSN EN 101)	stupeň	> 8
Objemová hmotnost (ČSN EN 993-1)	kg/m ³	2900 – 3000
Nasákavost (ČSN EN ISO 10545-3)	% hmotnost	0
Pevnost v tlaku (ČSN EN 993-5)	MPa	> 300 – 450
Pevnost v ohybu (ČSN EN 993-6)	MPa	>45
Koeficient délkové teplotní roztažnosti (ČSN EN ISO 10545-8)	0-100 °C K ⁻¹	8*10 ⁻⁶
	0-400 °C K ⁻¹	9*10 ⁻⁶
Rozpustnost v kyselině sírové (ČSN EN 993-16)	% hmotnost	< 9
Ner rozpustnost v hydroxidu sodném (ČSN 72 5122)	% hmotnost	> 98,5
Obrusnost (DIN 52108)	cm ³ /50cm ²	<5
Odolnost proti opotřebení (ČSN EN ISO 10545-6)	mm ³	< 110
Odolnost proti teplotním šokům (DIN 52313)	°C	> 150
Odolnost proti vlivu mrazu (ČSN EN ISO 10545-12)	cykly	> 50
Izolační odpor (ČSN 34 1382)	Ω	< 10 ¹⁰
Tvrдость podle Vickerse (EN ISO 6507-1)	MPa	700 - 800

3.3.2 Tavení a rozvláknování čediče

Nejrozšířenější a takřka většinové využití rozvlákněného čediče na vlákna je pro výrobu tepelné nebo akustické izolace. Pro rozvláknování horniny je, stejně jako v předešlém případě práce s taveninou, klíčové vhodné složení vstupní suroviny. Výrobě vláken byly

věnovány mnohé výzkumy, které stanovily optimální váhové složení a poměry jednotlivých chemických složek (Tabulka 7). V patentu „No. 09/314001“ je zmíněno doporučení, které udává, že ve vstupní surovině je vhodné udržet jisté poměry chemických složení pro zajištění stálosti teploty a viskozity v tavenině. Tyto hmotnostní poměry jsou uvedeny ve vzorcích (1)-(3) [23,26]. Pozn. 9

Starší literatura uvádí pro výrobu čedičových vláken jako vstupní surovinu pouze přírodní kámen, nejlépe se složením podle Tabulky 7 [27]. Novější literatura uvádí složení těchto vláken s původem z 75-80 % z čediče a 20-25 % z vysokopecní strusky [28]. Tato kombinace je využívána především z důvodu vyšší energetické náročnosti na roztavení samotného čediče a struska samotná nemá dostatečné mechanické vlastnosti po vytvrnutí. Zároveň přidaná struska upravuje kyselost vláken, ta je podstatná pro vztah vláken vůči vodě [23].

Samotná výroba může probíhat odstředivým způsobem na stroji s horizontální rotační osou, odstředivým způsobem s rozvlákňovacím kotoučem nebo rozfukováním [23, 27].

Tabulka 7: Doporučené hodnoty chemického složení taveniny pro vlákna [25]

Chemické označení	% zastoupení
SiO ₂	45,0-60,0
Al ₂ O ₃	12,0-19,0
Fe ₂ O ₃ +FeO	7,0-18,0
MgO	3,0-7,0
CaO	6,0-15,0
Na ₂ O+ K ₂ O	2,5-6,0
TiO ₂	0,9-2,0

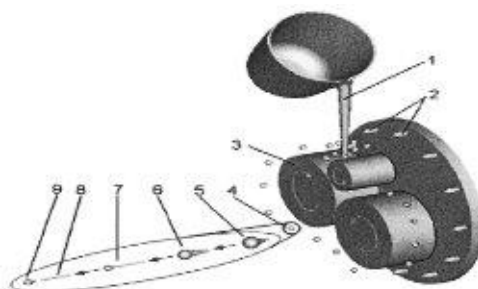
$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO} \geq 3 \quad (1)$$

$$\frac{FeO}{Fe_2O_3} \geq 0,5 \quad (2)$$

$$\frac{SiO_2 + 2Al_2O_3}{2Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO + K_2O + Na_2O} \geq 0,5 \quad (3)$$

Na příklad při výrobě odstředivým způsobem za použití rozvlákňovacího kotouče je surovina drcená na velikost 6 – 10 cm a rozežívána v kupolové (dříve šachtové) peci na teplotu 1350 – 1450 °C. Následně stéká po tavící plošině, kde se homogenizuje a poté se rozlévá při teplotě asi 1200 °C na rozvlákňovací kotouče. Velmi důležité je kontinuální lítí o jednotném průměru praménku taveniny (nesmí kmitat). Tavenina je vymrštěna do chladného vzduchu, kde postupně chladne a vznikají tak vlákna. Tento proces doprovází i vznik čedičových kapek, tzv. granálií. Část z nich se vrací zpět do pece, ovšem menší

část (cca. 15 % finální hmotnosti) zůstává spolu s rozvlákněnou hmotou, kde má negativní účinek na vlastnosti finálního produktu. Poté produkt postupuje do usazovací komory, kde se pohybující vlákna ještě ve vzletu skrání směsí pojiva, hydrofobizační složky a fungicidu. V závislosti na obsahu pojiv, které určují i výslednou tuhost, může být obsah organických látek z pojiv v rozmezí 3 až 8 % finální hmotnosti. Toto rozmezí má vliv na hořlavost a nasákavost rozvlákněného čediče. Následuje vytvrzovací komora s teplotami okolo 200 °C (± 20 °C), kde dochází k odparu vody a polykondenzaci fenol-formaldehydového pojiva. Materiál se přesouvá od lisu k formátovací diamantové pile, kde se upravuje na velikost běžných desek. Takto vyrobená strusko-čedičová vlákna mají průměr 4 až 20 μm , jejich délka se pohybuje v rozmezí 10 – 70 mm a celková objemová hmotnost nepřesahuje 120 kg/m³ [23, 27, 28]. Pozn. 5.

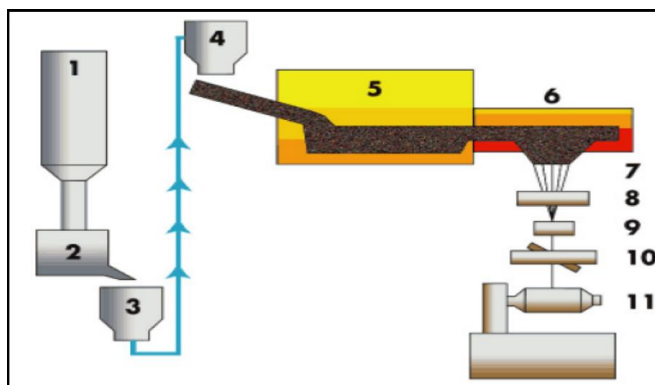


Obrázek 3: Schéma rozvláknování pomocí zařízení typu Junkers [38]

1) Roztavený čedič, 2) vzduchové ventily 3) rozvláknovací kotouč 4) kapičky 5-7) tvorba vláken 8) vlákno 9) gránálie

3.3.3 Tavení a rozvláknování čediče na nekonečná vlákna

Tento proces výroby má podobnosti s výrobou skleněných vláken. Vzniklá vlákna o průměru 10 – 14 μm jsou oproti předešlému způsobu výroby využitelná v náročnějších aplikacích. Rozdrcený čedič je dopraven do tavní pece, kde je rozžhaven na teplotu 1500 – 1600 °C. Tavenina je zde po nějakou dobu udržována, aby byla řádně homogenizovaná a prohřátá. Když nastane souměrnost v tavenině, která se projeví odstraněním plynů, je tekutý čedič přelit do speciálních úzkých průchodek, z kterých jsou spodem vytlačena jednotlivá vlákna. Tyto průchodky (mají až 500 otvorů) jsou vyrobeny z platinovo-rhodianých slitků vysoké odolnosti a jsou elektromechanicky vyhřívány. Teplota je přesně kontrolována, aby byla udržena viskozita taveniny. Vlákna jsou poté ochlazována ve vodní páře, z které jsou následně spřádána do pramenů požadovaných průměrů. Následně je pramen ošetřen hmotou (šlichtou), tím je zabráněno obrusu jednotlivých vláken mezi sebou. Tato hmota přidá přibližně 0,5 – 2 % celkové hmotnosti a je velice podstatnou pro budoucí chování pramene, především jeho odolností vůči okolnímu prostředí. Prameny jsou namotány na role, na kterých jsou vysušeny před finálním zpracováním na vlákna, svazky nebo přízi [30, 37].



Obrázek 4: Schéma spřádání čedičových vláken [37]

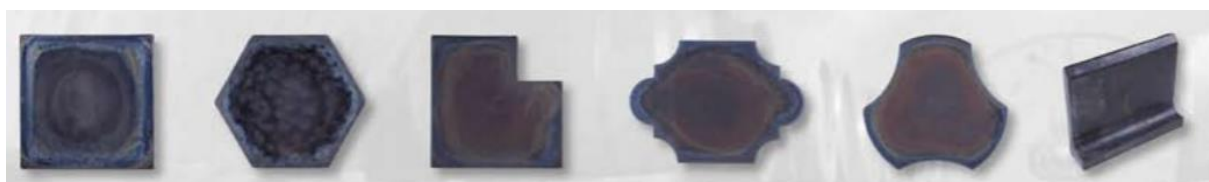
1) rozdrčený čedič 2) nakládací stanice 3) transportní sestava 4) plnicí stanice 5) počáteční zóna tavení 6) sekundární tavící zóna 7) formování vláken 8) aplikace ošetrovací hmoty 9) vytváření pramenů 10) napínání 11) navíjení

3.4 Čedič - Použití ve stavebním průmyslu

Díky vysoké pevnosti a náročnosti na opracování nebyl ve stavebnictví čedič tolik využívanou surovinou jako například pískovec. Přesto pro svou odolnost, našel uplatnění v surové podobě do základů staveb nebo pro vyzdívání opěrných zdí. Často se také využívá jako materiál pro dlažební kostky. V podobě drceného kameniva je uplatnitelný do skladeb vozovek nebo do kolejového lože. Ve 20. století byly rozvinuty technologie, umožňující tavení čediče (3.3.2. a 3.3.3). Tento proces umožnil využívat horninu k tvorbě odlitků nebo vláken, které se dále využívají na výrobu složitějších materiálů.

3.4.1 Dlažba

Dlažba z petrurgicky upraveného čediče má typický kovový vzhled a výborné vlastnosti, (Tabulka 6) díky kterým je vhodná do exponovaných interiérů nebo průmyslových provozů. Mezi ně patří například obchody, pasáže, chemické provozy, expediční haly nebo pivovary. Tvar, rozměr a povrch dlažby je definován formou, do níž se tavenina ukládá. Vyrábí se dlažby hladké i protiskluzné s různými vzory. Z rubové strany jsou dlaždice opatřeny rýhováním pro zvýšení adheze [23]. Kromě obvyklých dlažeb jsou vyráběny i dlažby pro automobilové polygony nebo pro splavovací kanály vodních elektráren [20].



Obrázek 5: Hladké čedičové dlažby [20]



Obrázek 6: Protiskluzné čedičové dlažby [20]

3.4.2 Otěruvzdorná potrubí

Otěruvzdorná potrubí vznikají vložením čedičové vložky do ocelových bezešvých nebo svařovaných potrubí, protože samostatné použití čedičových trub není možné. Do ocelového pláště se vloží otěruvzdorná vložka a meziprostor se vylije cementovou zálivkou. Využívají se pro hydraulickou či pneumatickou dopravu abrazivních nebo chemicky agresivních materiálů. V minulosti převažovalo využití na dopravu uhlí, koks, štětku, písku, škváry, sklářského kamene a jiných tvrdých materiálů. Díky procesu lití do pískových forem je takřka nekonečná tvarová rozmanitost kolen, odboček aj. [20, 22, 23].

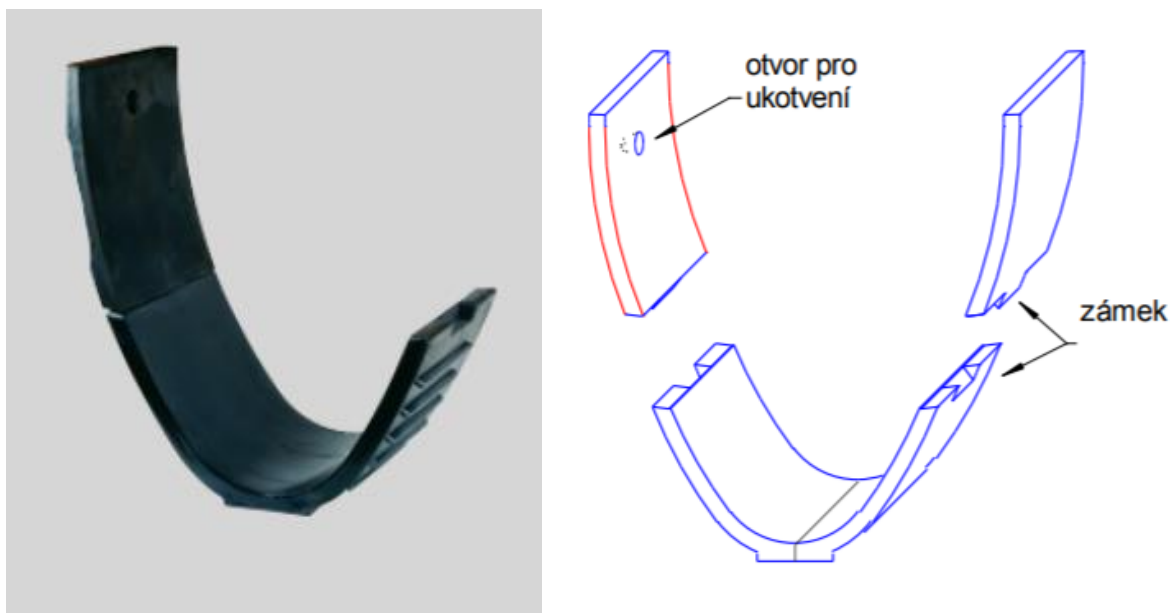


Obrázek 7: Příklady dílů s otěruvzdornou vložkou [20]

3.4.3 Kanalizační prvky

Odlitky slouží k výstavbě a rekonstrukci kanalizačních stokových sítí. V porovnání s ostatními materiály nabízí čedič několikanásobně vyšší životnost, především díky vysoké abrazivní odolnosti proti transportovaným materiálům, netečnosti vůči látkám rozpuštěným ve vodě a nízké hydraulické drsnosti. Opět je možná široká tvarová přizpůsobivost podle požadavků každého projektu [20]. Základní sortiment firmy EUTIT,

předního světového výrobce, nabízí žlaby pro vejčité stoky, radiální tvarovky, spadišťové prvky i různé druhy kanalizačních cihel [31].



Obrázek 8 a 9: Tvarovky pro kanalizační vejčité stoky [31] a Schéma [24]

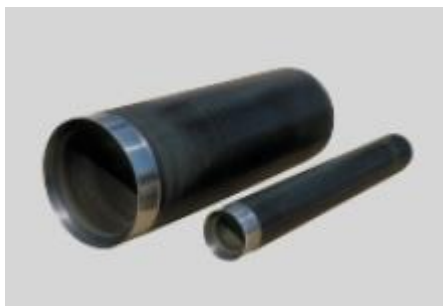
3.4.4 Trouby a speciální odlitky

Vzhledem k časté originalitě tvarů se v počátku výroby určitého dílu zpravidla vyhotoví dřevěný model, který následně slouží k výrobě pískové formy pro lití. Tímto způsobem se vyrábí doplňky pro potrubní řady jako např. T nebo Y-kusy, ale také cyklony, trysky nestandardní dlaždice, trouby malých průměrů, radiální desky, L-kusy, kanalizační přípojky. [68].

Čedičové trouby se kromě malých průměrů vyrábí odstředivým litím. Průměr stěn trub je od 12 až do 40 mm. Vnitřní průměry se pohybují od 75 do 700 mm z pravidla v půlmetrové délce. Výjimku tvoří trouby pro ražení s délkou jeden metr, které mají nerezovou spojku s pryžovým těsněním [20].



Obrázek 10: Speciální odlitky [20]



Obrázek 11: Trouby pro ražení IN LINE [32]

3.4.5 Minerální vlna (MV)

Termín minerální vlna je podle normy ČSN 72 7308 definován jako „*tepelná a zvuková izolace ve stavebnictví, průmyslu a energetice*“ [33]. Tato norma dále rozlišuje dva druhy minerální vlny:“

- *A - minerální vlna, určená pro zabezpečování běžných tepelně a zvukově izolačních požadavků*
- *B - minerální vlna, určená pro zabezpečování náročnějších tepelně a zvukově izolačních požadavků, především v podmínkách dlouhodobé tepelně-vlhkostní expozice“* [33]

Podle novější normy ČSN EN 13162 je tento termín formulován jako „*izolační vlna vyrobená z roztavené horniny, strusky nebo skla*“ [34]. Ze zmíněných norem je tedy patrné většinové uplatnění MV, které ovšem může být doplněno o využití k protipožárním účelům.

Díky postupu výroby uvedeném v kapitole 3.3.2. „Tavení a rozvláknování čediče“ vznikají desky, ve kterých jsou jednotlivá minerální vlákna oddělena vzduchovou mezerou, na základě čehož, se zde uplatňuje přenos prouděním pouze minimálně. Jejich pórovitost může dosahovat až 99 %. Vlákna v izolaci s podélnou orientací jsou ve většině případů zatěžována silou působící kolmo na osu vláken a nemusí mít pro konstrukci dostatečnou tuhost. Zvýšení tuhosti zhruba o 30 % je možné na úkor 10 % snížení tepelně-technických vlastností takzvaným lemováním. Tento proces spočívá v nařezání klasické MV na 100 mm široké pásy, které se oproti výrobě otočí o 90° a nalepí na společnou podložku. Desky s podélným nebo kolmým vláknem mají objemovou hmotnost od 35 do 220 kg /m³ s součinitel tepelné vodivosti v rozmezí 0,035 – 0,045 W/mK. K těmto deskám je také možné přilepit impregnovaný papír nebo asfaltový pás a docílit tak dodatečné hydroizolační funkce [23].

Kromě desek jsou vyráběny i role, které mají menší tuhost a obvykle se využívají pro vodorovné nebo zakřivené plochy. Jejich objemová hmotnost je přibližně 70 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti se pohybuje okolo hodnoty 0,04 W/mK. Pro lepší přepravu je výrobce expeduje stlačené a v zafóliovaném balení, v momentě rozříznutí obalové folie nabývá své plné tloušťky [23].

Minerální vlna se využívá i v podobě rohoží. Na vrstvu MV je oboustranně našita vlnitá lepenka, hliníková folie nebo drátěné pletivo. Tento materiál má objemovou hmotnost 100 až 120 kg/m³ a tepelnou vodivost stejné hodnoty jako role. Využití rohoží je především v místech, kde je kladen důraz na odolnost izolace a klasické způsoby nejsou dostačující. Nejčastěji to jsou potrubí technických zařízení budov nebo průmyslových zařízení (parovody, kotle, aj.) [23].

Pro méně přístupné nebo atypické prostory je možnost vyplnění pomocí foukané MV [23].

Především díky nízkému modulu pružnosti se veškeré výrobky z MV mohou využívat ve funkci akustické izolace pro výplně přiček, dělicích stěn, předstěn nebo plovoucích podlah pro útlum kročejového hluku. Ve vhodných frekvenčních oblastech mohou pohlcovat až 95 % zvukové energie [23].

Jak bylo zmíněno na začátku této kapitoly, minerální vlna má v budově pozitivní dopad vzhledem k rychlosti šíření a rozsahu požáru. Hodnocení požární bezpečnosti stavby začíná posouzením stavebních materiálů (především vlastnostmi každého jednoho materiálu) a jejich umístění. Kvalitní izolace z kamenné MV jsou nehořlavé, nezpůsobují odkapávání nebo odpad hořících částic, nepříspívají k rozšiřování požáru a odolávají teplotám až 1000 °C. Díky tomu jsou zařazeny do kategorie třídy reakce na oheň A1 [35]. Pro zlepšení požárních vlastností budovy je MV často využívána k zakrytí hořlavých nosných konstrukcí nebo k vymezení požárních úseků. Zateplení pláště budovy a volbě tepelné izolace je věnována pozornost v normě ČSN 73 0810 [33], která například stanovuje provedení kontaktního zateplovacího systému u budov s výškou přesahující 22,5 m kompletně z materiálu s třídou reakce na oheň A1 nebo A2. To v současné době, z klasických materiálů, umožňují pouze minerální vlny nebo pěnové sklo.



Obrázek 12: Tepelná izolace z čedičových vláken ROCKWOOL [36]

Tabulka 8: Fyzikálně-chemické vlastnosti minerální vlny podle ČSN 73 0810 [33] Pozn. 6

Druh vlny	A	B
Modul kyselosti	> 1,4	> 1,6
Střední průměr vláken (μm)	4 - 7	4 - 7
Vlhkost (%)	< 20	< 12
Obsah granulí velikosti nad 2 mm (%)	< 1,5	< 1,5
Obsah organických látek (%)	< 0,5	< 0,5
Obsah síry (%)	< 0,4	< 0,4
Odolnost proti vodě (pH)	< 5	< 5
Tepelná vodivost ($^{\circ}\text{C}$)	> 650	> 650

3.4.6 Nekonečná čedičová vlákna

Čedičová vlákna, která přebírají své vlastnosti z horninové suroviny otevírají zcela nové možnosti využití tohoto materiálu v kompozitních materiálech. Proces výroby nekonečných vláken je podrobně popsán v kapitole 3.3.3 „Tavení a rozvláknování čediče na nekonečná vlákna“. Na konci tohoto výrobního procesu vznikají role s navinutým nekonečným vláknem, které následně slouží k výrobě sofistikovanějších výrobků. Pro porovnání vlastností jednotlivých materiálů je v přílohouvé části Tabulka 9.

3.4.6.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti čedičových vláken

S hustotou zhruba o 5 % větší než sklo ($2800\text{-}2900\text{ kg/m}^3$) a vysokou tvrdostí (5-9 Mohs) vstupní suroviny souvisí nadprůměrná odolnost vláken vůči obrusu. Vlákna jsou vysoce voděodolná a jejich modul pružnosti je vyšší než u vláken skleněných. Čedičové textilie mají vyšší tuhost kvůli horším ohybovým vlastnostem jednotlivých vláken. Tuto vadu lze odstranit nanesením hmoty (šlichty). Textilie poté mají dostatečnou flexibilitu, odolnost proti opotřebení a při používání mají látkový vzhled. Příze z čedičových vláken vykazuje menší koeficient tření v porovnání s ostatními výztužnými materiály [38].

Některé vlastnosti čedičových vláken jsou podobné vlastnostem azbestových vláken, proto se nabízí jako jejich náhrada. Pro zjištění jejich případné zdravotní závadnosti byly v tomto ohledu podrobeny zkouškám a výzkumu v tomto ohledu. Obecně je známo, že vlákna, jejichž průměr je větší $3,5\ \mu\text{m}$ jsou nevdechutelná [39]. Protože většina dnes využívaných vláken má průměr větší, nepovažují se čedičová vlákna za karcinogenní [39, 41, 69]. Koncem dvacátého století byl proveden pokus na krysách, kterým byly intraperitoneálně podány tři dávky směsi s různou koncentrací azbestových vláken a jedna dávka směsi čedičové. Dávka s koncentrací $1,7\text{ g/kg}$ usmrtila 33 % krys, dávka s koncentrací $2,2\text{ g/kg}$ usmrtila 50 % krys a dávka 6 g/kg usmrtila všechny krysy. Zatímco dávka s čedičovými vlákny s koncentrací 10 g/kg neusmrtila ani jedinou. Přesto, u 12 – 14 % krys s aplikací čedičových vláken byla nalezena rakovina pobřišnice. Zde je

ale potřeba uvést, že k pokusu byla využita vlákna s velikostí 0,6 – 3 μm (37,1 %) a granulát (62,9 %) převážně serpentinitu a peridotitu [40]. Pozn. 7

3.4.6.2 Chemické vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna mají dobrou odolnost vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a předčí tak vlákna skleněná. Předností je především ona odolnost vůči zásadám až do pH 13 nebo 14. Zároveň odolnost proti UV záření, biologickému znečištění a vnější korozi. V surové podobě nemají vlákna zápach, vykazují vynikající smáčivost k široké škále pojiv a nátěrových hmot matricových materiálů v kompozitních aplikacích. Mají nízkou absorpci vlhkosti, která dosahuje pouze 0,1 %, při 65 % relativní vlhkosti a pokojové teplotě [38].

3.4.6.3 Tepelné vlastnosti čedičových vláken

Jak již bylo zmíněno, čedičová vlákna mají výborné vlastnosti tepelného odporu. Odolají teplotám až 1200 °C po mnoho hodin a pokud nejsou zatížena vydrží teplotu až 1250 °C. To je činí nadstandardními i oproti vláknům skleněným nebo karbonovým [38].

3.4.7 Čedičové šupiny

Čedičové šupiny nesou název podle šupin rybích na základě podobnosti jejich účelu. Jejich primární využití je jako ochrana proti opotřebení a na antikorozi nebo chemickou ochranu. Zároveň mohou být nanášeny jako nehořlavé a tepelně odolné nástřiky, zvyšují tak životnost ošetřených konstrukcí. Trvanlivost u plastových materiálu se zvyšuje až třikrát. Využití v nátěrových hmotách je především u mostních konstrukcí, tunelů a v továrnách. Voděodolně jsou ošetřovány železobetonové konstrukce [38, 42].

Tabulka 9: Hlavní specifikace čedičových šupin [42]

Specifikace	Jednotka	Hodnota
Průřez	μm	2 – 6
Povrch	mm^2	0,5 – 5
Dlouhodobá expozice	°C	-200 – 600
Odolnost proti kyselinám a zásadám při 100 °C		
2 hod HCl	%	76 – 84
2 hod H ₂ SO ₄	%	94 – 96
2 hod NaOH	%	93 – 96



Obrázek 13: Čedičové šupiny [38]

3.4.8 Čedičové výztužné tyče

Uplatnění polymerů, které jsou vyztuženy vlákny (FRP-fiber reinforced polymer) jako alternativa ke klasické ocelové výztuži je v poslední době věnováno více pozornosti. Například z důvodu nevyhnutelné koroze klasické výztuže, která je navíc často podpořena solením v zimních obdobích. V současné době existují polymery s různými výztužnými vlákny, ty tento problém mohou vyřešit [43, 73]. Jedná se o:

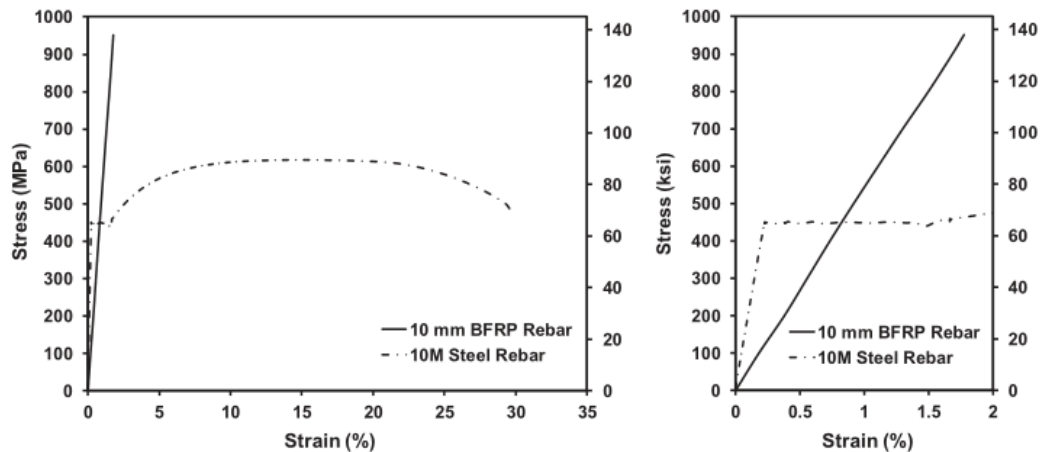
- Polymery s výztužnými karbonovými vlákny (CFRP - carbon fibre reinforced polymer)
- Polymery s výztužnými skleněnými vlákny (FRP - glass fibre reinforced polymer)
- Polymery s výztužnými aramidovými vlákny (AFRP - aramid fibre reinforced polymer)

Každý z těchto FRP má své nevýhody a výhody v mechanických vlastnostech, životnosti nebo ceně. V posledních letech se na trhu začaly objevovat produkty z čedičových vláken. Mezi ně patří i tyče z polymeru vyztuženého čedičovými vlákny (BFRP - basalt fibre reinforced polymer), které jsou dostupné v mnohých odvětvích stavebnictví. BFRP jsou ekologičtější alternativou než ostatní FRP produkty a pro stavebnictví jsou vhodné [43, 71].

Čedičovými tyčím jako výztužnému prvku a jejich chování v betonu byly věnovány mnohé studie a odborná literatura. Z publikací lze vyvodit:

- Ohybové zkoušky ukázaly při vysokém procentním vyztužení trámů, menší výskyt střížných trhlin, ovšem se strmějším sklonem oproti vyztužení ocelovými tyčemi [43].
- Při nízkém procentním vyztužení vykazovaly trámy vyšší počet trhlin od stříhu a od ohybu [43] oproti ocelové výztuži.
- Ohybový moment při porušení nosníku je proti ocelové výztuži o 30 – 50 % nižší [43].
- Porušení trámů stříhem u trámů z BFRP výztuží se může jevit jako větší problém oproti porušení v tlaku nebo tahu. Výroba kvalitních BFRP třmínků je v budoucnu pro širší využívání tohoto polymeru klíčová [43,70].

- Prvky vyztužené BFRP s dostatečnou pevností ve stříhu mohou být porušeny na základě drčení betonu v tlaku [72]. Tento fakt může být překonán použitím UHPC, díky kterému se využije vlastností obou materiálů do maxima [44].
- V ohybových zkouškách byla u vzorků s BFRP tyčemi zjištěna vyšší nosnost, současně větší deformace a vychýlení vzorku oproti vzorkům vyztuženým ocelovými tyčemi a to díky nižšímu modulu pružnosti v tahu [44, 70, 73].



Obrázek 14: Pracovní diagram BFRP a ocelové tyče [43] Pozn. 8

3.4.9 Čedičové tkaniny a textilie

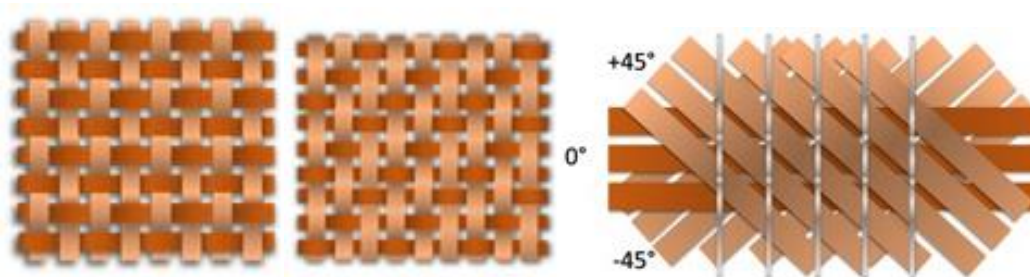
Vhodné rozdělení čedičových tkanin je na tkané a netkané. Netkané textilie se mohou vyrábět takzvaným vpichováním. Proces spočívá ve vertikálním vpichování jehel s háčky do vrstev horizontálně orientovaných vláken. Dochází tak k zatlačení vláken z vyšších vrstev směrem ke středu, čímž se materiál zpevňuje a ztenčuje [53, 54]. Konečné vlastnosti netkané textilie jsou tak ovlivňovány:

- typem, rozměrem a délkou vláken
- rozměrem, hloubkou a četností vpichu
- tvarem jehel a háčků

Pro své vlastnosti se využívají při zemních pracích jako separační, filtrační, odvodňovací, výtěžné nebo ochranné geotextilie. Při větších mocnostech materiálu je možné využití pro tepelné nebo akustické izolace ve stěnách, podlahách, střeších a potrubních systémech. Při aplikaci pryskyřic vznikají z netkaných textilií konstrukční desky [53, 54].

Většina textilií se vyrábí tkaním jednotlivých vláken nebo svazků vláken dohromady. Existuje nepřeberné množství kombinací, pro příklad slouží Obrázek 15. Vzhled k vlastnosti dané tkaniny jsou ovlivněny způsobem její výroby. Využití ve stavebnictví není tolik rozšířené jako například v automobilovém průmyslu, přesto je využívána především k ochranným účelům, ať už proti mechanickému a tepelnému namáhání nebo elektrické izolaci. Pro plnění své funkce je nutné např. nosníky, elektrické rozvody nebo vzduchotechnická potrubí obalit nebo omotat. Látky zůstávají flexibilní a dobře manipulovatelné, dokud nejsou nadměrně zatíženy. Tkaniny ze skleněných vláken mají

horší vlastnosti a v porovnání s karbonovými vlákny jsou čedičové těžší, ale levnější [46,47,55].



Obrázek 15: Příklad textilního úpletu [55]

3.4.10 Potrubí s čedičovou vrstvou

Vinutím čedičových vláknem a aplikací pojiv je vytvořená vrstva, která ve skladbě potrubí výrazně zlepšuje jeho celkové vlastnosti. Takto vytvořené potrubí, má mnohem lepší vlastnosti než klasická ocelová nebo jiná potrubí. Jejich chemická stálost, nízká tepelná vodivost a ekologická přívětivost je předurčuje k hojnému využívání především k potrubním vedením teplé vody nebo plynů. Média o teplotě 115 °C při tlaku do 1,5 MPa by měla být schopna přenášet více jak 25 let. Jsou odolné proti houbám, spodní i splaškové vodě. Vzhledem k hmotnosti ocelového potrubí, které je 3 – 4 těžší, je vybudování například vodovodů levnější a jednodušší. Z pohledu ceny údržby mají potrubí s čedičovými vlákny oproti klasickým navrch. Nevýhodou se může zdát pořizovací cena, která je asi o 75 % vyšší než u potrubí ocelového. Na druhou stranu provozuschopnost potrubí z čedičových vláken je minimálně 20 let, což je oproti ocelovým, která mají 5 – 7 let, značná výhoda [38].

V roce 2013 bylo na český trh uvedeno potrubí Fiber Basalt Plus z nové generace polypropylenu (PPP-RCT) a čedičového vlákna pro rozvody vody. Výrobce Wavin u tohoto potrubí deklaruje až o 50 % vyšší tlakovou odolnost při vysokých teplotách, o 20 % vyšší průtočnost a o 15 % nižší hmotnost s padesátiletou životností [56].



Obrázek 16: Čedičové potrubí Wavin [56]

3.4.11 Geomříže/sítoviny

Geomříže jsou výztužné textilie s rozmanitou škálou velikostí jednotlivých ok. Ta jsou vymezena jednotlivými BFRP nebo nitěmi spředenými z nekonečných vláken. Za účelem zvýšení přilnavosti mohou být impregnovány pro konkrétní prostředí. V plošných konstrukcích mají výztužnou funkci, kde zabraňují deformacím nebo je minimalizují. U cementových kompozitů snižují počet a omezují další rozšiřování únavových nebo teplotní změnou vyvolaných trhlin. *Basfiber*[®] rozlišuje sítě s otevřenými a zavřenými oky (Obrázek 17 a Obrázek 18). Další uplatnění tohoto materiálu je v podkladních i vyšších vrstvách komunikací a chodníků betonových i asfaltových. Při ukládání zeminy nebo štěrku se využívá ke zpevnění zemních těles a kolejového lože. Ve zpracování s oky 3,5 x 3,5 mm je využívána jako výztužný prvek v omítkách nebo samonivelačních podlahách [48 - 51].



Obrázek 17: Uzavřená oka [51]



Obrázek 18: Otevřená oka [51]

Tabulka 10: Technická data čedičové geomříže 220 25 x 25 [52]

Specifikace	Jednotka	Hodnota
Hustota vlákna	kg/m ³	2670
Bod tání	°C	1350
Pracovní teplota	°C	-250 – 550
Typ impregnace	-	silanová
Obsah vlhkosti	%	< 0,1
Stálost na UV světlo	-	> 7
Velikost ok	mm	25 x 25
Hmotnost	g/m ²	220
Četnost vláken	kus / m	40
Porušení při zatížení	kN/m	> 50
Šíře	mm	1000
Protažení před porušením	%	2,5
Obsah pojiv	%	10

3.4.12 Krátká čedičová výztužná vlákna

Krátkým čedičovým vláknům je věnována každým rokem větší pozornost v podobě nových výzkumů a studií. Tento fakt je ovlivněn slibnými vlastnostmi z pohledu chemické i teplotní stálosti, udržitelnosti a schopností zlepšení mechanických vlastností kompozitu, které jsou deklarovány již publikovanými výzkumy [37 - 39, 57 - 61].

Bohužel pozitivní dopad těchto vláken v deklarovaném kompozitu, může v kompozitu o jiném složení vstupních surovin nebo s obsahem jen drobně odlišných vláken, mít rozdílný až negativní efekt na chování nově vzniklé směsi. Proto je širší využití čedičových vláken v cementových kompozitech nutno podrobit hlubšímu zkoumání. Pro příklad, některé studie kompozitů deklarují při aplikaci čedičových vláken zvýšení pevnosti v tlaku, kdežto další studie poukazují na její mírné zhoršení. Tato skutečnost je především dána neshodou jednotlivých autorů na tom, jaký efekt má délka, průměr a celkový obsah vláken v kompozitu [38, 57, 60 - 63].

Přesto panuje shoda, že obsah krátkých čedičových vláken má vliv na zlepšení ohybové i tahové pevnosti a snižuje deformace vyvolané teplotou nebo dotvarováním [30, 58, 60, 61, 63].

Čedičová vlákna mění i chování čerstvých cementových směsí. Především konzistenci, která s přidáváním vláken houstne. Díky horninovému původu vláken se ve směsi dobře rozprostřou, pokud jejich délka nebo množství nepřekročí určitou mez. Poté mohou ve směsi vznikat shluky těchto vláken (tzv. „balling effect“), které zhoršují finální vlastnosti [30, 58, 60, 61, 63].

Využití krátkých čedičových vláken v asfaltových směsích má za následek zlepšení oproti směsím nevyztuženým. Zvyšuje se odolnost proti vzniku trhlin v nízkých teplotách, snižuje se citlivost směsi na přítomnost vody, vzrůstá stabilita při vysokých teplotách a v dlouhodobém měřítku se snižuje hloubka vyjížděných kolejí. Mikrotextura směsi s vlákny narůstá, zatímco makrotextura se snižuje [62, 63].



Obrázek 19: Krátká čedičová vlákna [64]

3.5 Současná problematika čedičových vláken a BFRP – Degradace

Obecně vzato, degradace materiálu je zcela přirozený proces, který nastává u všech materiálů a jeho principem je dosažení rovnovážného stavu. Pod pojmem degradace se ve stavebnictví považuje děj, který má za následek negativní změnu v mechanických, fyzikálních nebo estetických vlastnostech. Porozumění tomuto procesu z pohledu chemické nebo mechanické koroze a jim přidružených procesů je důležité pro uplatnění nejen čediče a čedičových kompozitů. K dnešnímu dni bylo tématu chemické koroze čedičových vláken (dále BF - basalt fibre) a chemické koroze polymerů vyztužených čedičovými vlákny věnováno nespočet výzkumů a studií, které ovšem díky rozmanitosti a náročnosti zkušebních metod, ale také rozličnosti samotné suroviny na vstupu, nedosáhly zcela jednotných výsledků. Tento fakt jen utvrzuje onu skutečnost o rozsahu a nutnosti porozumět chování BF a BFRP ve stavebním prostředí. Společným znakem všech prací je snaha vytvořit degradabilní prostředí a následně vyhodnotit změny materiálu a jejich příčiny.

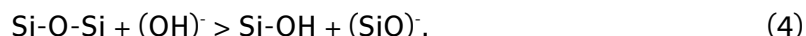
3.5.1 Degradace čedičových vláken

Jedni z prvních, kteří věnovali pozornost BF, byli v roce 1981 B.E. Ramachandran a kol. Ve své práci [74] vystavili BF alkalickému prostředí NaOH a kyselému prostředí 4M HCl. Autoři uvádí, že při vystavení vláken alkalickému prostředí nebylo na povrchu vláken shledáno výrazné poškození a úbytek tahové pevnosti měl hodnotu pouze 16 % (hodnota po 2 hodinách při refluxaci). Bylo vysloveno, že korozní odolnost vláken vůči alkalickému prostředí je vynikající, a to na základě přítomnosti oxidů titanu, manganu, železa a hliníku (TiO_2 , MnO_2 , FeO_2 , Al_2O_3). Při reakci oxidu hlinitého (Al_2O_3) a oxidu křemičitého (SiO_2) totiž dochází ke vzniku povlaku (jiní autoři uvádí korozní vrstva) na vláknech, který zpomaluje degradaci. Naopak kyselému prostředí 4M HCl přiřknuli značné negativní účinky jako například světlání vláken vlivem úbytku železitých iontů (Fe^{3+}) a vznik prasklin na vláknech (při refluxaci), což vedlo k značné křehkosti a tím pádem neměřitelnosti mechanických vlastností. Po 24 hodinách při pokojové teplotě došlo k úbytku 46 % pevnosti v tahu. Závěry vyvozené z práce [74] jsou do jisté míry v neshodě s většinou závěrů prací publikovaných v následujících letech.

Cheolwoo Park a kol. se zaměřili na chování BF pouze v alkalickém prostředí 1M NaOH v krátkodobém a střednědobém časovém intervalu při 40 °C. Autoři uvádí v průběhu času značný úbytek objemu BF a výskyt produktů chemické reakce na povrchu vláken, které se ovšem s rostoucí dobou vystavení rozpadly. Předpokládají, že se jednalo o produkty reakce SiO_2 a NaOH. Po 7 dnech vystavení byla pevnost vláken snížena o 50 % a po 28 dnech o více jak 80 % [75].

Bin Wei a kol. zkoumali chování vláken v krátkodobém časovém horizontu v prostředí NaOH a HCl o koncentracích 2 M při varu [76]. U BF z roztoku HCl naměřili po 3 hodinách cca 12 % úbytek hmotnosti oproti původní. Pevnost vláken během prvních 30 minut klesala dramaticky, a poté do jedné hodiny pozvolně (na hodnotu cca 23 % původní), aby následně část své pevnosti nabrala zpět, a to až do konce experimentu (na hodnotu cca 36 % původní). Souběžně povrch čedičových vláken byl po první hodině

značně poškozen trhlinami, které se ovšem po 3 hodinách z většiny zacelily. Shledali, že trhliny jsou pravděpodobně vyplněny produktem nějaké chemické reakce. Koncentrace prvků v čedičových vláknech má tendenci se zvyšující expozicí v HCl klesat, kromě křemíku. Předpokládají, že vznik SiO_2 na povrchu čedičových vláken má antikoroziční účinky. BF při vystavení roztoku NaOH vykázala lineární ztrátu hmotnosti během prvních dvou hodin na hodnotu 7 % , na které se až do konce experimentu. Zaznamenali ztrátu pevnosti BF během první půl hodiny na hodnotu 12 % původní a následně po 2 hodinách hodnotu 0 % původní. Usoudili, že díky Si-O vazbě, která je převažující v BF dochází k jejímu rozbití hydroxylovými ionty podle chemické nerovnice:



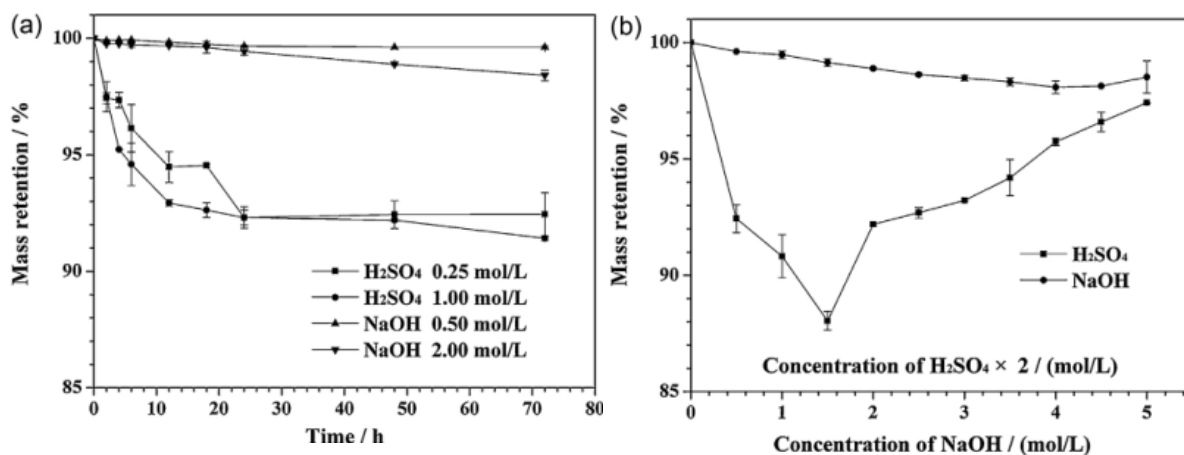
To má za následek značné snížení pevnosti v alkalickém prostředí. Odolnost vůči kyselinám je právě díky Si-O vazbě lepší, díky její inertnosti k HCl a H_3PO_3 . Z jejich práce je patrné, že BF mohou být při vystavení HCl a NaOH s koncentrací 2 mol/l značně poškozena. Pevnost vláken s délkou expozice v obou prostředích klesá a odolnost je vůči kyselinám větší, nežli vůči zásadám, což se projevuje mimo jiné i na povrchu vláken.

Chování BF v alkalickém prostředí o různé koncentraci ve střednědobém časovém intervalu věnovali pozornost Hodong Kim a kol. Ve své práci [77] zjistili, že BF vystaveny slabému alkalickému prostředí jsou stabilní, kdežto při vystavení agresivnímu alkalickému prostředí zaznamenají slabé uchování hmotnosti díky vysoké disociaci. Snížení tahové pevnosti v alkalickém prostředí nastane drasticky a rychle, nehledě na koncentraci. Tzn. i přes to, že zachování hmotnosti vláken v roztoku 0,4 % NaOH bylo mnohem větší než v roztoku 10 % NaOH, pokles pevnosti v tahu byl u obou koncentrací podobně významný. Předpokládají, podobně jako Bin Wei že OH^- ionty z alkalického prostředí NaOH rozbíjí siloxánové vazby, což uvolňuje křemičitany a rozkládá tak vlákna. Při vystavení BF saturovanému prostředí $\text{Ca}(\text{OH})_2$, které je podobné hydrataci betonu, vykázala vlákna velmi malý úbytek hmotnosti (1 %) i při expozici 3 měsíců.

Chování BF, vliv průměru na chování vláken v roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ simulující prostředí zrání betonu a absorbce CaO vlákny bylo zkoumáno ve střednědobém časovém intervalu F.N. Rabinovichem a kol. v práci [78]. Bylo shledáno, že všechna BF přijímají CaO z alkalického prostředí, přičemž největší intenzita je během 3 až 6 měsíců. Stupeň přijímání CaO vlákny roste se zvyšujícím se průměrem vláken (tak jako se zvětšuje povrch vláken v kontaktu s alk. prostředím). Současně vlákna vykázala úbytek tahové pevnosti s jasným trendem. Čím menší je průměr vláken v prostředí, tím znatelnější a intenzivnější je pokles pevnosti. Dále se také s dobou vystavení snižuje pevnost. Například BF s průměrem 6,5 μm po tříměsíčním vystavení alkalickému prostředí měla 40 % původní pevnosti, po dvanácti měsíční expozici už jen 28 %.

Chování BF v různém prostředí (H_2SO_4 , NaOH) s různou koncentrací (0,25, 1, 0,5, 2 M) při 25 °C bylo při krátkodobém časovém intervalu studováno Shugao Zhaoem a kol. [79]. Po vystavení kyselému prostředí H_2SO_4 byly na povrchu vláken pozorovány úbytky Al^{3+} , Ca^{2+} a $\text{Fe}^{3+/2+}$ a naopak vznik bohaté Si vrstvy. Při koncentraci 0,25 M, 0,75 M a 2,5N byla po 48 hodinách na povrchu vláken pozorována koncentrace

Si 78 %, 94 % a 55 %. U BF ponořených do roztoku H_2SO_4 byla podle hloubky vyluhování iontů v případě, že rychlost vyluhování kovových iontů byla pomalá, hloubka vyluhování malá a mezi vnější vrstvou a vnitřním jádrem vznikaly kvůli namáhání v radiálním směru trhliny. Naopak spirálové a axiální trhliny vznikaly na povrchu BF v případě, že hloubka vyluhování byla vysoká, což bylo způsobeno vysokou rychlostí vyluhování kovových iontů. Vyvodili, stejně tak jako již dvě uvedené studie, že koroze v alkalickém prostředí NaOH je spojená s degradací siloxanových vazeb a uvolňováním křemičitanů díky iontům OH^- , což rozpouští vlákna. Navíc, na povrchu vláken se začaly vyskytovat zvýšené koncentrace Si a Al^{3+} a naopak klesat koncentrace $\text{Fe}^{3+/2+}$ a Ca^{2+} , což ovšem nebylo ovlivněno hodnotou koncentrace alkálie. Na udržení hmotnosti vláken mělo vliv jak oboje prostředí, tak koncentrace i doba vystavení. BF vykazovala lepší retenci hmoty při ponoření do alkalického nežli do kyselého roztoku.



Obrázek 20: Zachování hmotnosti svazků BF [79]

Chunhong Tang a kol. podrobili BF nejen různým koncentracím roztoku NaOH, ale také různým teplotám v krátkodobém časovém intervalu [80]. Výsledky práce ukázaly, že pevnost vláken v tahu je silně závislá na teplotě a koncentraci roztoku, přičemž korozní vrstva, která vzniká na povrchu vláken může značně zvýšit pevnost a prodloužení při přetržení. Po ponoření čedičových vláken do roztoku NaOH o koncentraci 1 M při 50 °C po dobu 1 h, 3 h, 6 h, 1 den a 3 dny byly jejich retenční poměry pevnosti 67,6 %, 57,8 %, 52,5 %, 49,0 %, 58,2 %, při teplotě 25 °C byla hodnota 77,9 %, 70,7 %, 65,4 %, 62,5 %, 53,6 %. Se zvyšováním teploty 1 M roztoku NaOH z 25 °C na 50 °C a poté na 70 °C se hmotnostní ztráta vláken zvýšila z 2,4 % na 16,6 % a následně na 33,8 % po 3 dnech vystavení. Vyšší teplota urychlila rychlost koroze BF, zkrátila dobu tvorby korozního pláště a zvýšila hmotnostní ztrátu. Vlivem vyplavování křemíkových, hliníkových a draselných iontů se poměr ztrát hmotnosti BF zvyšoval. Současně hydroxylové ionty narušují vazbu Si-O-Si a Si-O – Al, a to vede k formaci nerozpustných hydroxidů s vysokým obsahem vápníku a železa na povrchu vláken (korozní vrstva).

Chování BF ve střednědobém časovém intervalu a pouze v kyselém prostředí H_2SO_4 byla věnována práce [81] od autora F. Taheri-Behrooz a kol. V průběhu doby

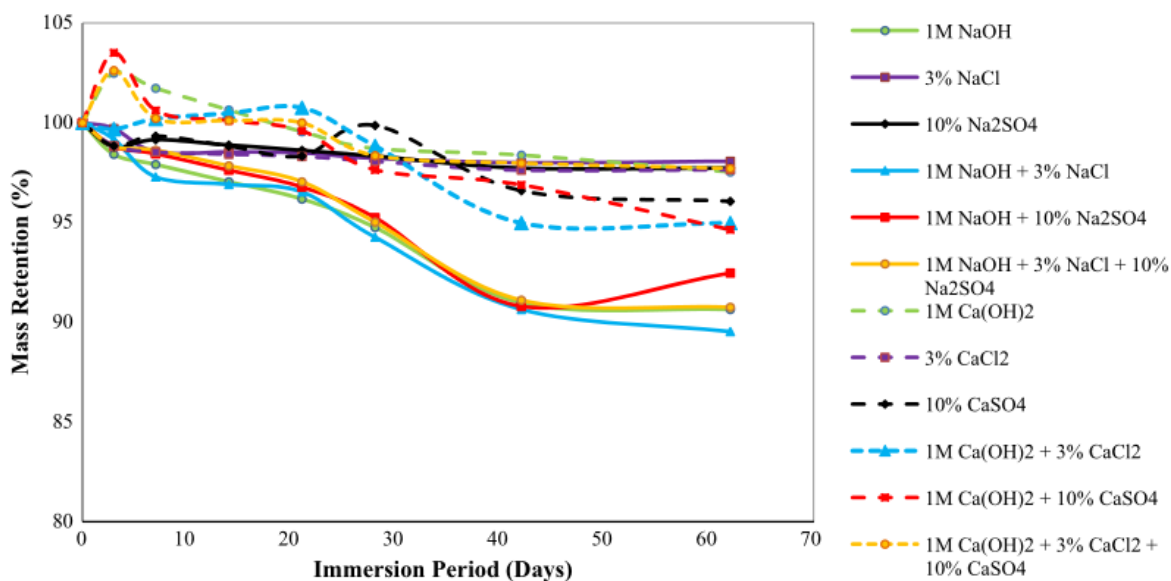
vystavení vláken došlo k vyluhování Al^{3+} , Ca^{2+} a Fe^{3+} iontů, což mělo za následek vytvoření bohaté Si vrstvy na povrchu vláken. Během prvních 500 hodin nebyl na povrchu vláken pozorován vznik trhlin. Poté se začaly objevovat spirální a axiální trhliny. Jako důvod vzniku těchto trhlin uvedli autoři možnost výskytu reziduálních sil procesem z výroby, nebo mohou být zapříčiněny vyvolaným napětím z úbytku iontů na povrchu vláken oproti jádru. Vzhledem k následným odlišným mechanickým vlastnostem jádra a povrchu tak vzniká trojrozměrné napětí. Po 720 hodinách expozice klesla pevnost o 59 %, modul pružnosti o 32 % a protažení při přetržení o 37 %.

Vzhledem k vysokému pH betonu, tzn. alkalickému prostředí a degradaci BF v něm, se zaměřili někteří autoři na tvorbu odolnějších BF. Autor Wang Mingchao a kol. v práci [82] zkoumali chování „alkalicky odolných čedičových vláken“ BF-CMD-01 v prostředí destilované vody, kyselém prostředí 2 M HCl a alkalickém prostředí 2 M NaOH v krátkodobém časovém intervalu při varu. Naměřené hmotnostní ztráty BF po 3 hodinách v H_2O , NaOH a HCl byly rovny 0,4 %, 4,3 % a 8,1 %. Zachování pevnosti mělo hodnoty 99,8 %, 81,6 % a 65,5 % v téže prostředích. Uvedené hodnoty reflektují i změny ve složení prvků vláken po vystavení. V prostředí destilované vody došlo k velmi malé změně prvků, kdežto v alkalickém a kyselém prostředí nastaly velmi rozdílné změny. V prostředí kyseliny se obsah prvků Na, Mg, Al, K, Ca a Fe dramaticky snížil. Bylo patrné, že atomy kovu jsou nahrazeny H^+ . Tato výměna zničí síťovou strukturu vlákna a redukuje pevnost. V prostředí NaOH je síťová struktura rozbíjena přímo hydroxidem OH^- . Pokles prvků Si a nárůst prvků Na ve vlákně je zřetelný. Změny na povrchu vláken po vystavení H_2O jsou oproti nevystaveným nepatrné, naopak u vystavení NaOH velmi rozdílné. Povrch vláken zhrubl a vyskytly se mikrotrhliny, které jsou ovšem pouze na povrchu a nepronikají do středu vláken. BF z kyselého prostředí mají povrch stále hladký, ale jsou rozlamována na kratší segmenty z důvodu napětí vyvolaném množstvím výměn iontů.

V.A. Rybyn a kol. ve svých dvou pracích zkoumali dopad povrchové úpravy BF pomocí ZrO_2 o různých koncentracích (0,1 M a 0,4 M) na chování vláken v prostředí NaOH ve střednědobém časovém intervalu [83] a také vliv procesu nanášení povrchové úpravy na vlastnosti vláken [84]. Neošetřená vlákna vykazovala v NaOH dramatické změny na povrchu vláken v podobě vzniku korozního pláště již po osmi dnech. Po 16 dnech bylo patrné, že tento plášť se skládá ze dvou vrstev. Spodní vrstva má podobu plošných částic a vnější vrstva se skládá spíše z kulovitých částic. V průběhu zkoumaného období se zvyšovala tloušťka korozní vrstvy, stejně tak jako vrstva z obloukovitých částic. Po 64 dnech bylo patrné značné zkorodování povrchu vláken. Vlákna ošetřená slabou vrstvou ZrO_2 vykazovala po 8 dnech podobné chování jako vlákna neošetřená, a to s tím rozdílem, že vznik kulovitých částic nebyl tak markantní. Současně nebylo pozorováno odlupující se chování z povrchu vláken, to začalo být viditelné po 16 dnech. Po 32 dnech byla slabě ošetřená vlákna od těch neošetřených obtížně rozlišitelná. Bylo pozorováno, že většina vrstvy ZrO_2 se společně s vrstvou koroze odloupne po 64 dnech. Vlákna ošetřena hustší vrstvou ZrO_2 nevykazovala po 8 dnech žádné známky korozních dějů. Po 16 dnech bylo na vláknech pozorováno prvních znaků korozní vrstvy v podobě malých kulových částic.

Chování neošetřených a slabě ošetřených vláken je podobné a je tedy patrné, že je nedostačující. Naopak vlákna ošetřená hustší vrstvou ZrO_2 jednoznačně zpomalují korozi v alkalickém prostředí NaOH. Vlákna neošetřená a silně ošetřená byla použita k vytvoření dvou betonových směsí, ze kterých se po 30 dnech provedl rozbor chování vláken. V prostředí betonu bylo na neošetřených vláknech pozorováno značné množství odlupujících se korozních prvků. Oproti tomu vlákna ošetřená vykazovala značně méně této degradace. Proces sušení BF ukázal, že vysoušení vláken na vzduchu nebo argonu nad teplotu $500\text{ }^\circ\text{C}$ způsobuje degradaci mechanických vlastností vláken o 58 %, resp. 47 %. Zřejmě je to v důsledku tvorby krystalů, které vytvoří vnitřní napětí.

Mahzabia Afroz a kol. [85] se zabývali povrchovou úpravou BF pomocí SiH_4 a následným rozbořením chování v různých chemických prostředích (NaOH, NaCl, Na_2SO_4 , $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$, $CaSO_4$ a jejich kombinace) s ohledem na složení betonu ve střednědobém časovém intervalu. Naměřená průměrná hodnota hustoty vláken z 12 roztoků po 62 dnech ukázala u ošetřených vláken pokles o 6 %, kdežto u neošetřených navýšení o 22 %. Zvýšení mělo příčinu především na základě hodnot z alkalických prostředí. BF v kontaktu s alkalickým prostředím vytváří korozní vrstvu. Hydroxylové ionty napadají mřížky oxidu křemičitého a ničí vazbu Si-O-Si. To snižuje koncentraci hydroxylových iontů v roztoku, což snižuje pH podle rovnice (4). Silanová vrstva ošetřených vláken zabraňuje nabývání vláken vytvořením zasíťované struktury. Pokles pH nastal u neošetřených vláken v alkalických roztocích, u ošetřených vláken nastal v solném roztoku nárůst pH. Alkalické prostředí vede ke snižování Na^+ , L^+ , Al^{3+} a Si^+ na povrchu BF. Vazba Si-O je inertní k solím, ale při kontaktu s vodou mohou alkalické ionty vstupovat do BF. Modifikovaná BF byla v $Ca(OH)_2$ roztoku porušena, byla pak křehčí a vlákna měla dutiny oproti vláknům z NaOH roztoku. To mělo za následek 30 % úbytek hmoty vláken. Oproti tomu, $Ca(OH)_2$ vytváří nehladký povrch BF, což může mít za následek lepší svázání s betonem. Neošetřená vlákna vykazovala slabší povrch ve všech alkalických prostředích z důvodu vyvazování původní mřížky Si atomů. Úroveň degradace je větší v NaOH nežli v $Ca(OH)_2$. Zhoršení mechanických vlastností je ovlivněno koncentrací roztoku, délkou expozice, hodnotou pH, velikostí exponované plochy a případným ošetřením BF. Po 62 dnech v silném alkalickém prostředí bylo tempo degradace horší na neošetřených BF.



Obrázek 21: Zachování hmotnosti BF v prostředích [85]

Degradace povrchu BF nemusí být vždy nežádoucím efektem. V práci [86] od autora P.I. Bashtanik a kol. se uvádí jako jedna z nevýhod BF malý měrný povrch vláken, díky které je nízká adheze s matricí termoplastů. Pro zlepšení vlastností polymerů vyztuženými čedičovými vlákny (BFRP) je možno BF leptat v kyselinách, což může zlepšit mechanické vlastnosti i o 20 %.

3.5.2 Degradace BFRP tyčů

Aby bylo dosaženo ochrany vláken proti agresivnímu prostředí, a tím pádem i udržení požadovaných vlastností, nabízí se u BFRP používat pro BF matrice odolné prostředí jejich použití. Vznikne tedy nový kompozit o odlišných degradačních/korozních vlastnostech s novým typem problematiky nežli BF. V rámci experimentu [87] od autora J.L. Reyes-Araiza a kol., kteří podrobili BFRP z reaktoplastu A (BPA) s plnivem CaCO₃ alkalickému prostředí (NaOH+KOH+Ca(OH)₂) simulující prostředí betonu a zkoumali tak jeho chování. Prostředí mělo pH 13,5 a teplota byla udržovaná 50 °C. Ještě před zahájením pozorovali autoři v matrici BPA póry, které pravděpodobně vznikly díky vysoké viskozitě BPA při aplikaci. Tento nežádoucí efekt defacto odhaluje BF, která mohou snáze degradovat. Autoři bohužel nepodrobili BFRP před vystavením prostředí mechanickým zkouškám a není tak možné vyhodnotit dopady prostředí.

Studie [88] autora Jianxun Liu a kol. zhodnocuje chování BFRP s rozdílným typem polymeru ve slaném alkalickém prostředí při trvalé expozici nebo „wet-dry“ cyklu ve střednědobém časovém intervalu při teplotní akceleraci 55 °C. Dva druhy vinylové pryskyřice (DSM430+MFE-9) a jedna epoxidová pryskyřice (E51) byly použity k vytvoření BFRP. Autoři usoudili, že korozivní degradace FRP v alkalickém prostředí je primárně způsobena snižováním ochranné vrstvy vláken na základě průniku molekul vody do pryskyřice. Po „wet-dry“ cyklech nastal zřetelný úbytek tlakových a stříhových pevností. Tento úbytek byl ale pomalejší oproti trvalé expozici v roztoku. Na základě jejich

mechanických zkoušek vyvodili, že odolnost vůči chemismu alkalického prostředí byla znatelně lepší u FBRP s vinylovou pryskyřicí oproti epoxidové.

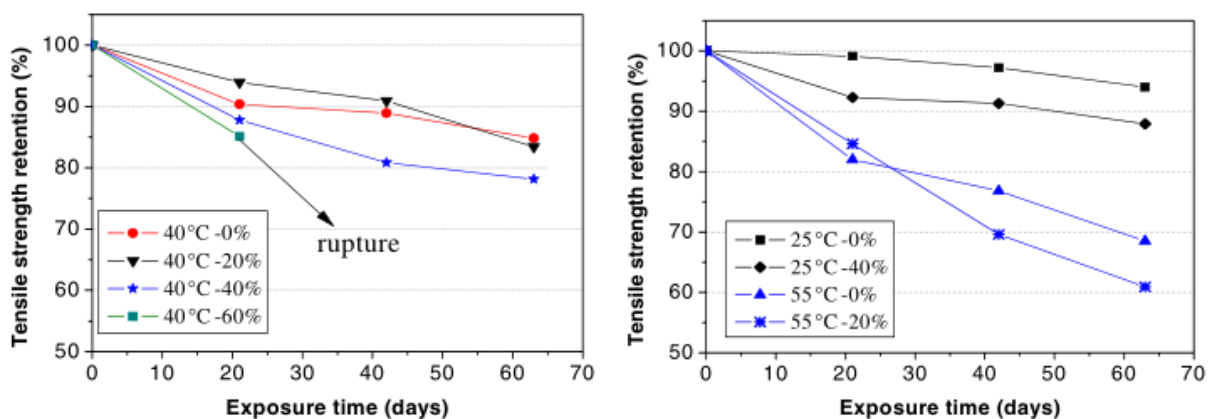
Poměrně rozsáhlý experiment s dobou trvání jeden rok uvádí Zhongyu Lu a kol. ve své práci [89], kde BRFP (matrice z epoxydové pryskyřice na bázi byfenolu A) o průměru 8 mm s krycí vrstvou 20 mm (i bez ní), byly vystaveny mořské vodě a laboratorní mořské vodě při různých teplotách. Pokles tahové pevnosti nastal ve všech roztocích, přičemž největší byl u BRFP bez krycí vrstvy při 60 °C a následoval BFRP s krycí vrstvou z prostředí simulující mořskou vodu při 23 °C. BFRP bez krycí vrstvy v mořské vodě a laboratorní mořské vodě při 23 °C vykázaly shodné degradace tahové pevnosti. Degradace tyčí s betonem v mořské vodě byla stejná jako degradace v laboratorní mořské vodě při 60 °C. Pokles modulů pružnosti v tahu byl podobný jako pevnosti v tahu, ale moduly pružnosti v tahu jsou méně ovlivňovány vystavením. Usoudili, že zhoršení vlastností má příčinu v degradaci epoxidové matrice nebo v degradaci vazby mezi vlákny a matricí. Dalším důvodem může být reakce iontů Fe s ionty OH⁻, což má za následek degradaci vláken. Vzhledem k obsahu Fe ve vláknech ale uvedli tento děj jako nedominantní. Uvedli že: Hustota alkalického roztoku je důležitým faktorem degradace. Rozdílné výsledky laboratorního měření oproti skutečnému vystavení mořské vodě je založeno na rozdílném chování kapalin. Mořská voda se pohybuje a laboratorní roztok je v pH koncentrovanější. V závěru prohlásili, že BFRP je citlivé na chloridové ionty, nicméně velmi náchylné na alkalické prostředí. Alkalický roztok vedl k degradaci matrice a leptání vláken poskytlo základní podmínku pro alkalicko-křemičitou reakci.

Autor Qiang Liu a kol. ve své práci [90] porovnávají BFRP vyrobený z BF s matricí epoxydové pryskyřice nebo vinyl esteru. Zkoumala se odolnost pod prostředím 2 M NaOH nebo 2 M CHI v krátkodobém časovém intervalu. Propojení vinyl esteru s BF nebylo díky vzniklým dutinám (2,7 %) tak dokonalé jako v epoxidové pryskyřici. Youngův modul pružnosti a pevnost čedičových kompozitů kleslá během expozice v prostředích, kdežto tahová pevnost je relativně stálá. Pro využití BFRP je při dlouhé expozici doporučili modifikovat povrch prvků.

Fyzikální, mechanické a odolnostní charakteristiky 6 mm BFRP vyrobených z BF s matricí z vinyl esteru nebo epoxydové pryskyřice byly studovány, po vystavení až 5000 hodin v alkalickém prostředí simulující beton (Ca(OH)₂+KOH+NaOH) při 60 °C autorem Brahimem Benmokranem a kol. [91]. Vinylová i epoxidová matrice vykázaly poměrně velkou hodnotu přijmutí vody (40 a 68 %), což je pravděpodobně spojeno s delaminací styčné plochy mezi vlákny a matricí a s přítomností drobné pórovitosti v ní. Rozdílný způsob výroby BFRP tyčí z epoxydu měl zřejmě za následek zvýšení této pórovitosti. BFRP s vinylovou matricí vykázaly nejhorší mechanické vlastnosti a chování styčné plochy matrice/vlákno. Příčná smyková pevnost byla značně ovlivněna (pokles 33 % oproti poklesu 9 % vzorků s epoxydovou matricí) po 5 000 hodinách. Ohybová pevnost vinylových a epoxydových vzorků po expozici 5 000 hodin klesla o 37 % nebo 39 % a mezilaminární smyková pevnost klesla o 22 % nebo 14 %. Vyvodili, že vlastnosti po expozici v alkalickém prostředí epoxydové matrice byly nadřazeny vlastnostem vinylové matrice. Jako degradační příčinu mechanických vlastností uvedli šlichtu

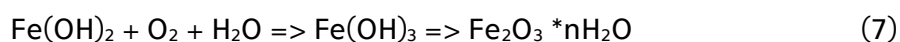
(z angl. sizing) na vláknech z výroby, díky kterému není ideální propojení vlákno/matrice. Vlákna v obou matricích nevykazovala po vystavení známky poškození.

Omezením experimentálních prací může být absence zatížení/namáhání v průběhu zkoušek, které se ovšem vyskytují po zabudování prvku do konstrukcí. Pozornost nejen tomuto věnoval Gang Wu a kol. ve své práci [92], když zkoumali chování BFRP (matrice z epoxydové pryskyřice na bázi byfenolu A) tyčí o průměru 6 mm v prostředí deionizované nebo slané vody, kyseliny a alkálie při různých teplotách. Po 63 dnech tahová pevnost klesla o 31,5 % při 55 °C a o 6 % při 25 °C. Při 40 °C po 42 dnech byl úbytek tahové pevnosti BFRP 5,5 %, 5,5 %, a 4,2 % v deionizované vodě, slaném prostředí a kyselině. Největší degradace nastala v alkalickém prostředí, přičemž modul pružnosti prvků zůstal neměnný ve všech prostředích. Z výsledku je patrné, že proces degradace BFRP byl značně urychlen zvýšením teploty. Při zatížení BFRP přes úroveň 20 % pevnosti nastává akcelerace degradačního procesu a při dosažení 40 % je znatelná. Při zatížení 60 % převažovalo porušení prvku v důsledku tečení materiálu.



Obrázek 22: Efekt stálého zatížení na zachování pevnosti BFRP tyčí ponořených v alkalickém prostředí [92]

BFRP s epoxydovou matricí, vystaveny slanému prostředí simulující mořskou vodu při 25 °C v krátkodobém časovém intervalu, byli podrobena Bin Weinem a kol. zkoumání [93]. V prvních 30 dnech bylo pozorováno razantní (0,4 %) nabývání hmotnosti, aby se poté kolísavě ustálilo. Molekuly vody mohou pronikat do matrice, čímž se sice zvětšuje hmotnost, zároveň ale dochází k vyplavování rozpustných částic, což i potvrzuje ono kolísání. Pokles tahové pevnosti, stejně tak jako ohybové tuhosti, se s dobou expozice zvětšuje. Důvod poklesu ohybové tuhosti se předpokládá díky uvolňování alkalických kovových iontů, které jsou ve vláknu nestabilní a mohou tak reagovat s ostatními ionty. Což bylo zřejmě prokázáno změnou barvy roztoku po 90 dnech na bledě žlutou a zvýšením pH z 7,1 na 7,4. Změna barvy je příkládána právě chloridu železitému, má žlutou barvu.



Z předposlední rovnice (7) je patrné, že vzniká více vody, což způsobuje bobtnání matrice. Pro všechny FRP je klíčová schopnost povrchu v navazování na matrici, což ovlivňuje finální vlastnosti kompozitu. Na styčné ploše vlákno/matrice bylo patrné velké množství prasklin. Z velkého zvětšení je patrné odlupování epoxydové pryskyřice z vláken čediče. Porovnání lomu vzorku exponovaného a neexponovaného je patrné, že v neexponovaném došlo k porušení vláken současně, v exponovaném opačně (tzn. BF jsou přetrhaná v různých místech odděleně). Povrch BFRP po 90 dnech zaznamenal změny. Lesk BFRP značně klesl a barva se na některých místech změnila z černé na slonovinovou bílou. Současně se objevily praskliny po délce. Zároveň byl na povrchu BF pozorován úbytek prvků vyjma Si, Ti a Fe. Koncentrace Si a Ti je neměnná pravděpodobně díky jejich chemické stálosti. Při expozici mohou molekuly H_2O , O_2 , CO_2 a Cl^- a Na^+ ionty pronikat do matrice a reagovat s matricí samotnou nebo s vlákny. Současně se louhují prvky Ca, Mg, Al, K, které mohou na povrchu vytvářet hydratovanou vrstvu na styčné ploše. Tím se mění mikrostruktura a vznikají praskliny, které zapříčiňují ojedinělé (přetrhání v různých místech) porušení jednotlivých vláken. Dochází tedy k redukci mechanických vlastností vláken i matrice. Difuze iontů NaCl v okolí povrchu BFRP vně je hlavní důvod korozní degradace. Hydrolyza matrice, vlákna a jejich styčných ploch může rozbít molekulární vazby a redukuje stupeň vyžrávání vazeb.

Další prací, kde byly zkoušky pro ověření vlastností čedičových lan (4 mm) a BFRP (8 mm) provedeny před a po expozici ve vodě, kyselině a alkálii, publikoval Enrico Quagliarini a kol. [94]. Část BFRP byla ošetřena ochranou vrstvou polymethyl methacrylatu (PMMA) pro snahu zlepšit vlastnosti v alkalickém prostředí. Chemická odolnost lan byla testována v prostředí vody, 2 M NaOH a 2 M HCl při varu během 3 hodin. Chemická odolnost BFRP byla testována v 60 °C po dobu 21 dní v prostředí 3 % NaCl simulující prostředí mořské vody, v alkalickém prostředí simulujícím beton o pH 13 (1,4 % KOH+1 % NaOH+0,16 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a v prostředí vody (vysoká vlhkost). Úbytek hmotnosti lan po třech hodinách při varu v prostředí vody, NaOH a HCl byl 1 %, 4 % a 5 %. Na povrchu vláken lan po expozici ve vodě a kyselině byla oproti nevystaveným vláknům patrná jen drobná změna kontrastu. Oproti tomu na povrchu po NaOH expozici byly zaznamenány produkty rozkladu, což následovalo po zmenšení objemu vláken. Korozní vrstva na povrchu vláken byla taktéž patrná. Obsah Si ve vláknech po expozici v alkalickém prostředí klesl (o 3 %), naopak obsah Na stoupl (o 3,5 %). Lana z HCl prostředí ztratila 23 % pevnosti, lana z NaOH prostředí 90 %. Na základě testů BFRP se ukázalo, že mají dobrou odolnost vůči vodě a chloridovému napadení. Vinylová pryskyřice dobře chrání v tomto prostředí a PMMA nemá zásadní vliv. Nicméně po PMMA ochraně se zvýšila odolnosti vůči alkalickému prostředí. BFRP tyče bez PMMA se v alkalickém prostředí značně degradovali, což znemožnilo jejich měření.

Matrice (pryskyřice) se úplně rozložila. Na závěr uvedli, že lana při vystavení vodě vykazují dobrou odolnost, pod kyselinou nastala jen drobná změna v mechanických vlastnostech. V alkalickém prostředí se projevila největší degradace vlastností i samotných vláken. Prohlásili, že vinylová pryskyřice je pro BFRP v alkalickém prostředí nevhodná a neměla by se využívat, protože neposkytuje dostatečnou ochranu vláknům. Proti chloridům, mořskému prostředí a případně rozmrazovacím solím funguje dobře.

Existují BFRP s povrchovou úpravou popískování. Tento typ RF byl před a po expozicích v alkalickém (pH 12,5), kyselém (pH 2) a slaném prostředí zkoumán ve střednědobém časovém intervalu při 60 °C [95]. Ahmad Altalmas a kol. zde uvádějí, že expozice vzorků ve vodním prostředí měla zanedbatelný efekt na chování při vytrhnutí, což odvodily z křivky prokluzu. Pokrytí pískovou úpravou má pozitivní vliv na adhezi a vazbu s betonem. Bobtnání tyčí v ranném stádiu má také pozitivní vliv na přilnutí k betonu. Vnitřní stříh byl určujícím faktorem porušení, důležitější než napětí mezi betonem a tyčí bez ohledu na vystavení prostředí či nikoliv. BFRP exponované v mořské vodě nebo alkalickém prostředí vykázali po 90 dnech 25 % pokles ve spolupůsobení matrice s vlákny a jejich soudržnosti oproti 14 % poklesu z kyseliny. Proklouzávání BFRP bylo vždy zanedbatelné. Došlo k poklesu počáteční tuhosti o 14 % po 90. denní expozici.

BRFP tyče se stejnou povrchovou úpravou, ale rozdílným typem matrice (epoxydová pryskyřice nebo vinyl ester), byly zkoumány Andreea Serbescu a kol. [96] ve střednědobém časovém intervalu při různých teplotách. Vzorky po expozici ve vodě při pokojové teplotě nezaznamenaly zhoršení mechanických vlastností. Při zvýšení pH se zvětšuje pokles mechanických vlastností a při zvýšení teploty je tento pokles značný. Teplota má tedy výrazně horší efekt na zachování vlastností než hodnota pH. S délkou a teplotou expozice vzrůstá pokles vlastností. Největší pevnostní ztráta 31 % nastala po 5 000 hodinách v 60 °C při pH 9. Vzorky ve 20 °C a pH 9 měly po 1 000 hodinách větší pokles pevnosti než po 5 000 hodinách. Elastický modul pružnosti klesl v průměru o 6,5 %, což může být způsobeno hojením matrice. Roztok o pH 13 oproti roztoku o pH 9 měl o 8 % větší pokles mechanické pevnosti.

Experimentální část

V těchto částech diplomové práce jsou uvedeny materiály, které byly použity pro přípravu zkušebních těles i vzorků a pro přípravu jednotlivých simulovaných prostředí. Také jsou uvedeny postupy přípravy zkušebních těles, popis zkušebních metod a jejich měření.

Primární pozornost byla věnována změnám čedičových vláken, BFRP tyčí a pastám s čedičovými vlákny jako rozptýlenou výztuží. Chování těchto materiálů v kapalných simulovaných prostředích je vyhodnoceno z důvodu snahy porozumět jejich degradaci, následně jsou shrnuty závěry a vyvozena doporučení.

3.6 Použité materiály a jejich charakteristiky

3.6.1 Nekonečná a krátká vlákna

V této diplomové práci jsou pro veškeré experimenty použita vlákna od výrobce *ARMBAS [Arménie]*.

Objemová hmotnost a chemické složení vláken je zjištěno v rámci práce a detailněji je popsáno níže (3.7.1.3 a 4.1.3). Hodnoty jsou směrodatné, jak pro nekonečná vlákna, tak pro vlákna krátká, neboť krátká vznikají z nekonečných, jak je popsáno v teoretické části této diplomové práce (3.3.3).

Tabulka 11: Chemické složení vláken od výrobce *ARMBAS*

Oxid	hmotnostní zastoupení [%]
SiO ₂	44,4
Al ₂ O ₃	27,0
Fe ₂ O ₃	8,5
CaO	6,7
MgO	8,0
Na ₂ O	1,9
K ₂ O	2,4
TiO ₂	0,8

Nekonečná vlákna

Jedná se o shluk netkaných, rovnoběžně jdoucích vláken bez úpletu s tmavě olivovou barvou. Výrobce uvádí jako použitou povrchovou úpravu Silan [97].



Obrázek 23: Klubko nekonečného vlákna před výrobou zkušebních pramenů

Krátká vlákna

Čedičová sekaná vlákna s obsahem různě dlouhých vláken.



Obrázek 24: Čedičová vlákna



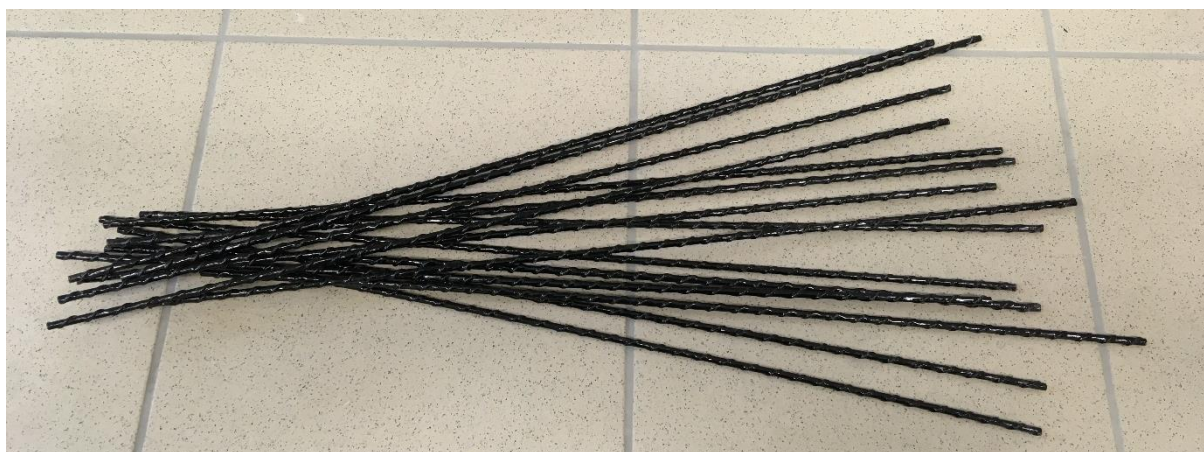
Obrázek 25: Délkové varianty vláken

Tabulka 12: Naměřené zastoupení jednotlivých délek vláken

Délka vláken [mm]	Zastoupení [%]
2,9-12	85,5
20-22	7,8
27-32	4,0
40-41	2,3
55-73	0,4

3.6.2 BFRP tyče

Pro experimenty v této diplomové práci byly použity čedičové tyče od výrobce *ARMBAS*, o průměru 6 mm a maticí na bázi organických pojiv.



Obrázek 26: 6 mm BRFP tyče

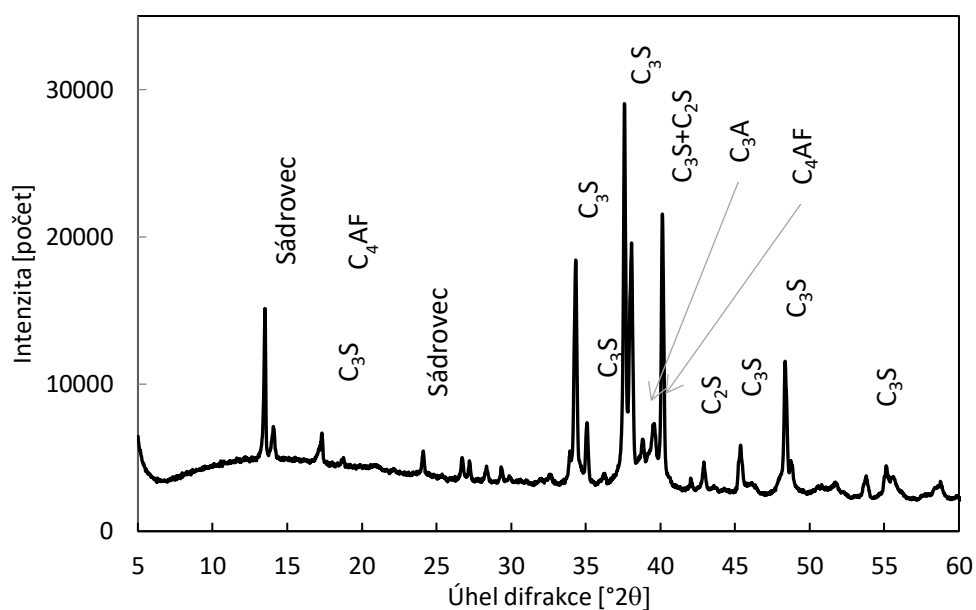


Obrázek 27: Žebrování na tyčích

3.6.3 Pasty s čedičovými vlákny

Cement

Pro zkušební vzorky (trámečky) byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R ze závodu Mokrá od výrobce *Českomoravský cement* s garantovanou minimální pevností v tlaku 28 MPa po 2 dnech a 57 MPa po 28 dnech. Obsah cementu v jednotlivých směsích je zapsán v tabulce 13.



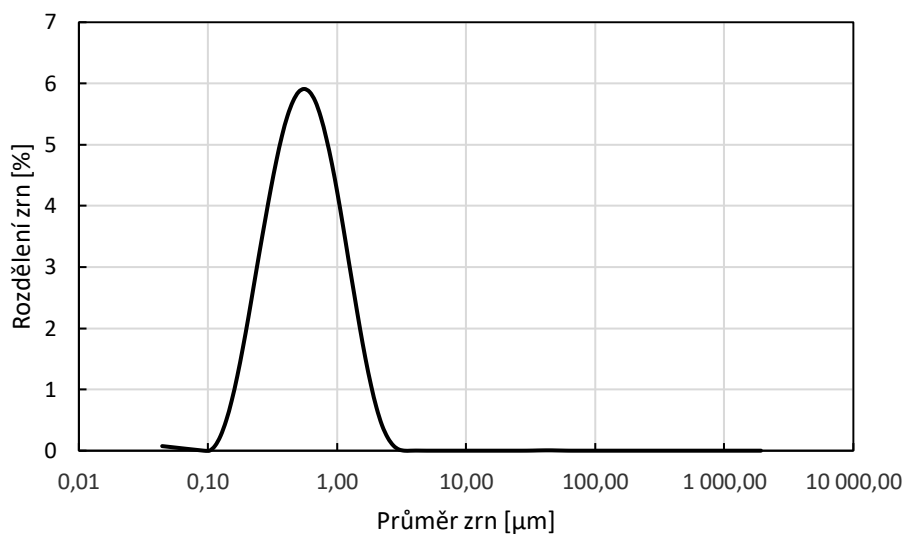
Obrázek 28: Difraktogram použitého cementu

Tabulka 13: Mineralogické složení použitého cementu

Minerál	Vzorec	Obsah [%]
Alit	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C3S)	47,4
Belit	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C2S)	10,4
Celit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF)	13,7
Aluminát vápenatý	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A)	4,7
Sádrovec	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2,8
Kalcit	CaCO_3	1,0

Mikrosilika

Jako náhrada pojiva byla ve třech směsích použita mikrosilika od výrobce *Stachema*.



Obrázek 29: Granulometrie mikrosiliky

Voda

Do směsí byla použita pitná kohoutková voda. Její množství je zapsáno v tabulce 14.

Čedičová vlákna

Pro všechny směsi byla použita krátká čedičová vlákna popsaná v předešlé kapitole 3.6.1.

Tabulka 14: Složení vyrobených pastových směsí

Složení	Označení směsi			
	Č1-REF	Č1-10	Č1-20	Č1-30
Cement	32,0	28,8	25,6	22,4
Mikrosilika	0,0	3,2	6,4	9,6
Voda	9,6	12,2	15,9	16,0
Čedičová vlákna	0,32	0,32	0,32	0,32

3.7 Experimentální metody měření a popis výroby zkušebních vzorků

V rámci této diplomové práce byla provedena měření na různých typech zkušebních těles a vzorcích. Na nich vyhotovené zkoušky mohou být totožné, ale liší se jejich příprava nebo výroba. Výchozí vzorky již sloužící k měření nebo k následně úpravě je možno souhrnně rozdělit do následujících třech skupin.

- Čedičová vlákna
- BFRP tyče
- Pasty s čedičovými vlákny

3.7.1 Čedičová vlákna

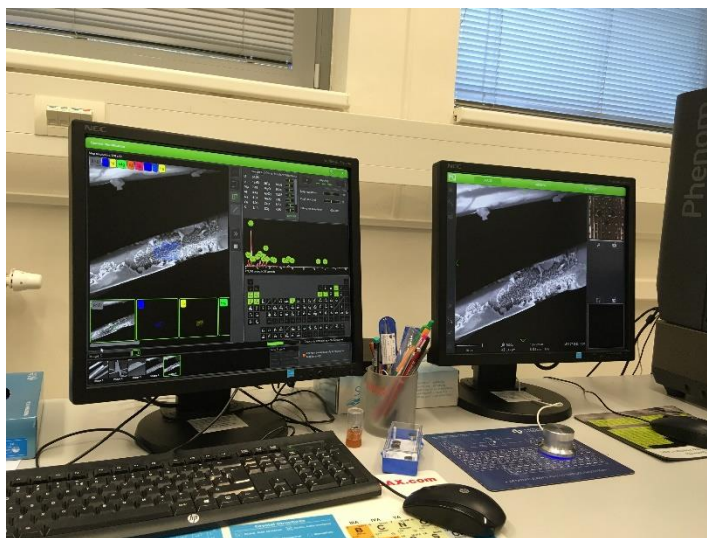
3.7.1.1 Rentgenová difrakční metoda (XRD)

Použité přístroje pro analýzu jsou popsány v následující kapitole 3.7.3.4.

Jako referenční vzorky byly v achátových mističkách pomocí tloučku rozemleta čedičová vlákna. Čedičová vlákna zpracována obdobným způsobem vystavená simulovaným prostředím po dobu 28 dní byla dalšími vzorky.

3.7.1.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Měření bylo provedeno na elektronovém mikroskopu *SEM Thermo Scientific™ Phenom XL*.



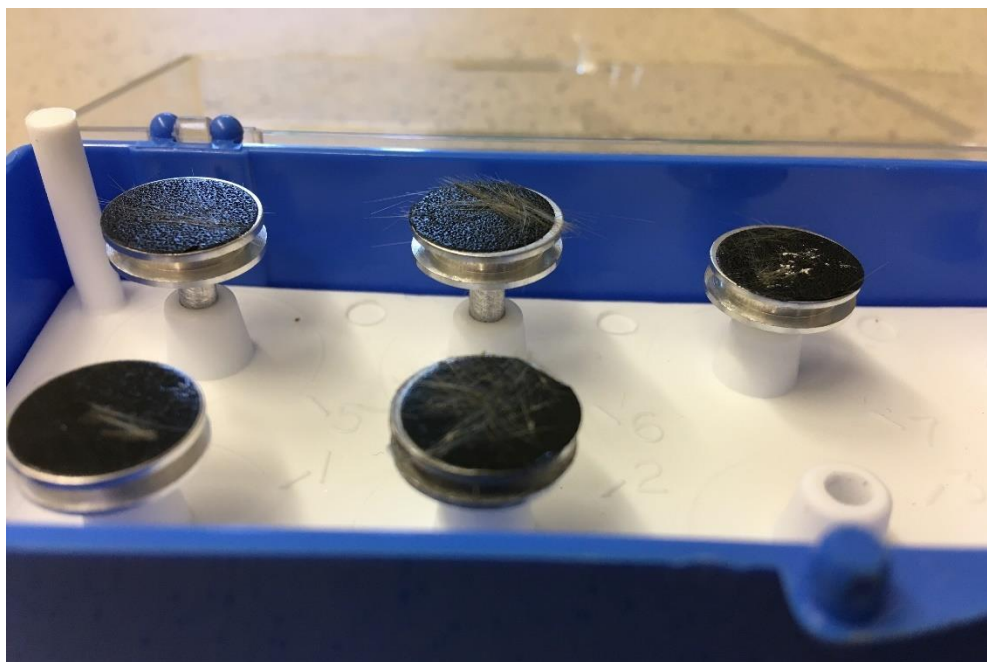
Obrázek 30: Monitory elektronového mikroskopu se zobrazenými vlákny



Obrázek 31: Elektronový mikroskop s podstavcem

Pro tento typ zkoušek byla, jako referenční vzorek, použita čedičová vlákna, která nebyla vystavena simulovaným prostředím. Oproti tomu vlákna z expozice po uplynutí 28 dní byla těmi zkušebními.

Samotný vznik zkušebních vzorků byl procesem totožný se vznikem zkušebních vzorků pro měření hmotnostních změn vláken v simulovaných prostředích (3.7.1.5) s tím rozdílem, že pro měření SEM se po vysušení a zvážení odebrala pouze drobná část z jednogramového vzorku. Tato část vláken se následně nanasla na oboustranně lepicí uhlíkovou pásku z opačné strany přilepenou k terčíku. Před vložením terčíku se vzorkem do prostoru mikroskopu, bylo nutné vzorek zabezpečit proti nežádoucímu uvolňování vláken do vakuové komory přístroje pomocí ofouknutí stlačeným vzduchem. Terčíky byly vloženy s podstavcem do komory a byla zahájena dekomprese.



Obrázek 32: Čedičová vlákna na hliníkovém terčičku a uhlíkové pásce

3.7.1.3 Heliová pyknometrie

Měření proběhlo na heliovém pyknometru *Pycnomatic Evo*.



Obrázek 33: Heliový pyknometr

Pro toto měření není zvláštní potřeba na úpravu čedičových vláken z dodávky od výrobce. Suchý stav byl zaručen vysušením vzorku v sušárně.

3.7.1.4 Analýza chemického složení vláken (XRF)

Analýza chemického složení byla realizována na přístroji *ARL TM QUANT X EDXRF* pro rentgenovou fluorescenční spektrometrii.

Čedičová vlákna v surové podobě od výrobce byla rozemleta v achátových mističkách tloučkem na jemný prášek, který se poté umístil do nádobek přístroje, na kterém bylo následně zahájeno měření.

3.7.1.5 Změna hmotnosti vláken v simulovaných prostředích

Vlákná s roztoky byla v Erlenmeyerových baňkách vložena do třepačky s inkubátorem *Innova 42*. K vážení vláken před i po expozici, byla použita analytická váha *OHAUS*. Pro dokonalé vysušení vláken po expozici byla použita sušárna *Memmert*.



Obrázek 34 a 35: Třepačka s inkubátorem a Baňky v třepačce



Obrázek 36 a 37: Analytická váha a Sušárna Memmert

Příprava vzorků započala náhodným výběrem krátkých čedičových vláken, jejichž jeden gram byl pečlivě zvážen a vložen do každé z Erlenmeyerových baňek. Baňky byly popsány a do každé bylo přilito 100 ml jednoho roztoku simulovaného prostředí. Pro zajištění stálé koncentrace roztoku byla všechna hrdla těsně zakryta hliníkovou folií. Takto připravené vzorky byly vloženy do třepačky s nastavenou konstantní teplotou 25 °C a rotací 120 otáček za minutu. Baňky byly po daných časových intervalech odebírány. Z každé baňky byly vzniklé shluky čedičových vláken omyty pod tekoucí kohoutkovou vodou a následně umístěny na popsanou a zváženou Petriho misku, v níž byly vloženy do sušárny. Simulovaná prostředí vystavená vláknům byla z baňek odebrána do sterilních plastových centrifugačních zkumavek pro následnou chemickou analýzu. Sušení probíhalo vždy minimálně jeden den při teplotě 60 °C. Vysušená vlákna byla s miskou zvážena na analytické váze a uchována pro další typy zkoušek.

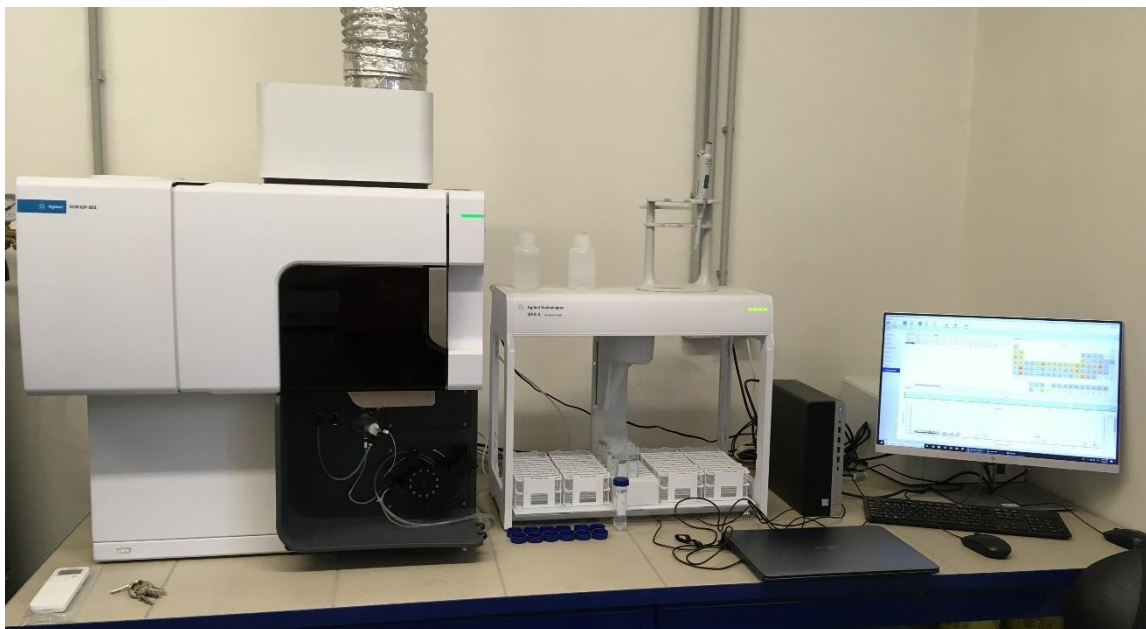


Obrázek 38 a 39: Zafóliované baňky roztoků s vlákny a Pohled do sušárny se vzorky

Celkem bylo připraveno 59 jednogramových vzorků, které byly vystaveny simulovaným rostředím.

3.7.1.6 Reakce simulovaných prostředí s vlákny

Pro chemickou analýzu byl použit emisní spektrometr 5110 ICP-OES a autosampler SPS 4 od výrobce *Agilent technologies*.

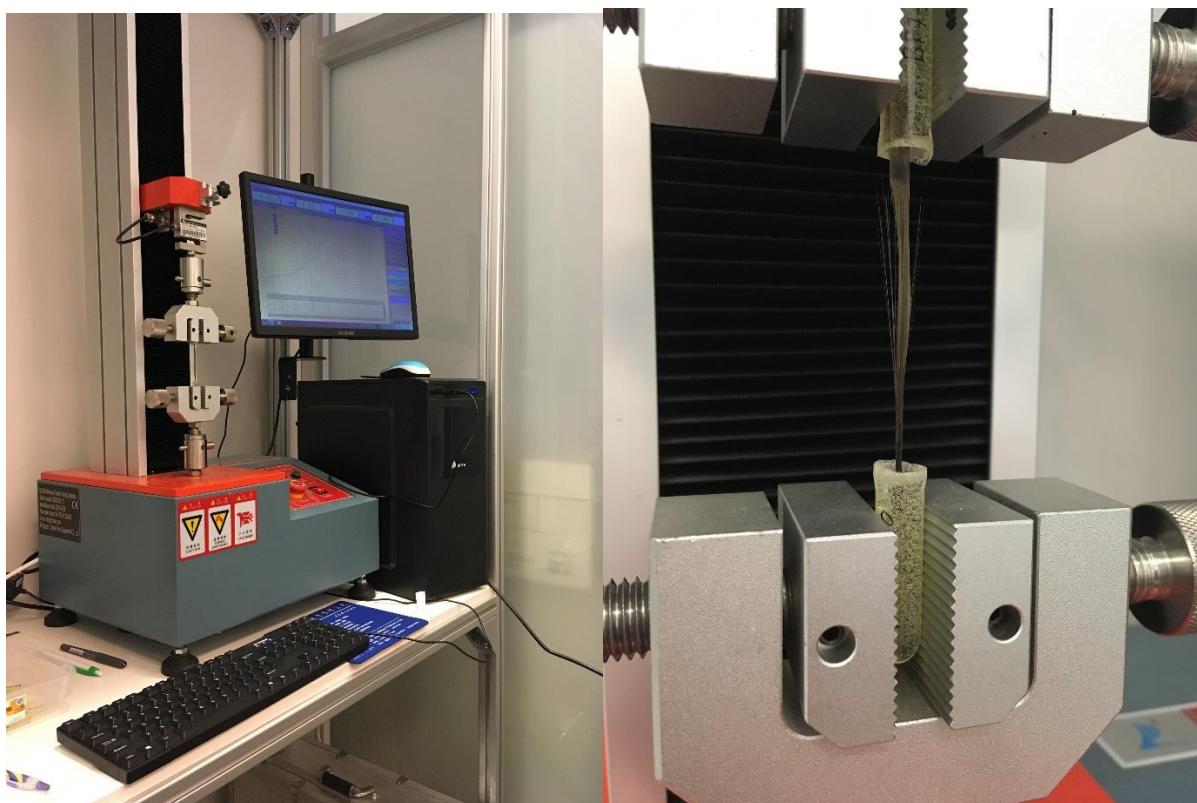


Obrázek 40: Emisní spektrometr a autosampler

Jako vzorky pro analýzu posloužily roztoky simulovaných prostředí s výluhy z vláken. Vznik těchto vzorků je spojen se vznikem vzorků pro hmotnostní změny a je detailně popsán v předešlé kapitole (3.7.1.5).

3.7.1.7 Pevnost v tahu

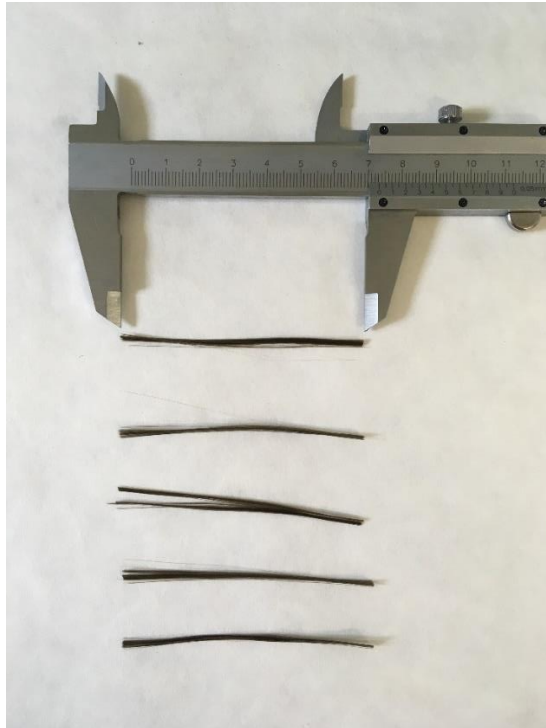
Vážení svazků vláken probíhalo na stejné váze jako v předcházejícím případě (3.7.1.5). První tři zkoušky byly realizovány pomocí trhacího stroje na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Po rozvaze byl ale použit univerzální testovací přístroj pro tah od výrobce *Dongguan Zonhow Test Equipmet Co., Ltd*, který má přesnější rozsah citlivosti. Ten je umístěn v budově A na půdě Vysoké školy chemicko-technologické v Praze.



Obrázek 41 a 42: Univerzální trhací stroj a Čelisti se vzorkem

Měření tahové pevnosti probíhalo na vzorcích vyrobených z netkaného svazku nekonečných vláken před expozicí a po určitých časových intervalech v simulovaných prostředích.

Z klubka bylo odebráno vždy přibližně 7,3 cm svazku, který byl pomocí pinzety rozdělen na tři části. Zde byla snaha vytvořit vzorky pro měření pevnosti v tahu o přibližně stejné hmotnosti. Takto vyrobené vzorky, ale nemohly být použity pro zkoušku. Oba konce svazku musely být opatřeny vhodným zakončením pro uchycení do čelistí trhacího stroje. V první řadě byly do aranžovací hmoty vyhloubeny důlky pro fixaci mikrozkušavek. Následně byly jednotlivé svazky vláken uchyceny plastovým kolíčkem tak, aby se při jejich položení na aranžovací hmotu alespoň jeden centimetr vláken zapustil do plastové mikrozkušavky vložené do důlku. Kolíčky tak zamezily poklesu svazku na dno mikrozkušavky a zároveň se jimi určila poloha v nich. Mikrozkušavky s obsahem dvousložkového epoxydového lepidla *Lepox* a s vloženými svazky byly ponechány alespoň jeden den pro vytvrdnutí. Obdobným způsobem bylo vyhotoveno druhé zakončení svazku. Aby ovšem nebyla vlákna během zrání lepidla ohnuta tíhou již vyzrálého zakončení, byl z polystyrénu a drátu vyroben stojan. Stojan aretoval kolíčky svírající mikrozkušavky s již vyhotoveným zakončením. To umožnilo polohování a požadovanou hloubku zapuštění svazku do mikrozkušavky. Po vyzrání byla nově vzniklá zkušební tělesa šetrně vyndána ze stojanu, aby nedošlo k jejich poškození. Pro zabránění prokluzu mezi mikrozkušavkou a epoxidem, byly z každého tělesa odebrány obě mikrozkušavky pomocí kombinovaných kleští. Takto vyrobené vzorky byly, kromě referenčních, vystaveny simulovaným prostředím.



Obrázek 43: Svazky před výrobou zakončení



Obrázek 44: Aranžovací hmota se vzorky aretovanými kolíčky

Z důvodu možnosti, že by mohlo dojít k reakci epoxidu se simulovaným prostředím a zároveň, aby byly svazky z čedičových vláken v přímé poloze, a i přesto v kontaktu se simulovaným prostředím, bylo potřeba vyrobit podstavce, které by to umožnily.

K tomuto účelu byly použity 50 ml centrifugační zkušavky, které byly pomocí pilky, zlamovacího nože a rozžhaveného kovu upraveny do vhodného tvaru. Vznikly tak drážky, do kterých byla ve směru kolmém na osu zkušavek vložena zkušební tělesa, která byla utěsněna pomocí bílého neutrálního silikonu Ceys. Takto vyhotovené podstavce byly položeny do plastové bedýnky vyplněné pískem, kde byly patřičně usazeny. Jednotlivé podstavce byly pomocí pipety naplněny příslušným simulovaným prostředím. Aby bylo zaručeno exponování svazku prostředím i při drobném odparu vody, byl do podstavců

přes svazky umístěn proužek filtračního papíru a roztok byl v průběhu času doplňován. Po uplynutí určitých časových intervalů byly podstavce se vzorky vyjmuty z bedýnky, opláchnuty kohoutkovou vodou, šetrně odděleny od sebe a ponechány oschnout.

Celkem bylo vyrobeno 59 zkušebních vzorků, které byly umístěny do 27 podstavců a byly vystaveny simulovaným prostředím. Zbývajících 9 vzorků bylo použito jako referenčních.



Obrázek 45: Plastové bedýnky s podstavci se zkušebními vzorky

Proces destruktivního zkoušení začal namontováním vhodných čelistí a senzoru. Snímač byl vybrán střední, s maximálním možným vyvozeným zatížením 490 N a rychlost posunu čelistí byla upravena na hodnotu 10 mm/min. Zkoušený vzorek byl vždy umístěn centricky nejdříve do horních čelistí, poté do spodních. Upnutí probíhalo pomocí dotahovacích šroubů. Po přetržení vzorku byly čelisti povoleny, vzorek odebrán a data z měření uložena v příslušných formátech. Pevnost vláken byla stanovena na základě výpočtu a známých veličin podle rovnice:

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (9)$$

kde je

σ_n pevnost v tahu, v Pa;

F kritická síla, v N;

S průřez kolmého řezu, v cm²

příčemž plocha S je vypočítána pomocí naměřené hustoty čedičových vláken a hmotnosti svazku podle rovnice:

$$S = \frac{m}{\rho * l} \quad (10)$$

kde je

m hmotnost čedičových vláken, v g;

ρ objemová hmotnost čedičových vláken, v g/cm³

l délka čedičových vláken, v cm

3.7.2 BFRP tyče

3.7.2.1 Typ kotevního materiálu a délka kotvení

Pro krácení, vrtání a podobné práce spojené s výrobou kotevních prvků bylo použito elektrické nářadí z dílen v prostorách Stavební fakulty ČVUT v Praze.

Jakožto základní vymezení prostoru kolem tyče pro kotevní materiál, posloužily bezešvé trubky o rozměrech 14 x 2 mm. Trubky byly ponořeny do toluenového rozpouštědla pro odmaštění. V některých trubkách byly vytvořeny kruhové otvory pro vznik pracovních „trnů“, které umožnily zatečení kotevního materiálu a zvýšily vzájemnou soudržnost trubky a kotevního materiálu. Tyto otvory byly před vléváním kotevního materiálu přelepeny izolepou. Do prostoru trubky byl nejdříve zapraven kotevní materiál a poté zasunuta BFRP tyč. Vždy bylo vyhotoveno kotvení na jedné straně a po vytvrdnutí bylo vyhotoveno opačné. Tímto principem byla vytvořena zkušební tělíska o různých kotevních délkách (100, 150, 200 a 250 mm) a zároveň z různých kotevních materiálů (3 typy epoxidové pryskyřice a chemická malta).



Obrázek 46: Různé kotevní délky

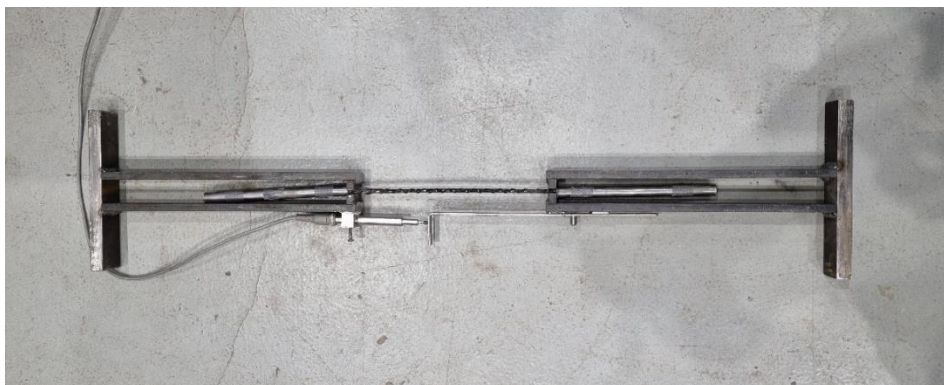
3.7.2.2 Pevnost v tahu

Výroba zkušebních tělísek je detailně popsána v předešlé kapitole (3.7.2.1). Jediným rozdílem ve vyhotovování vzorků je, že neprobíhala „na slepo“. Byly známy výsledky měření věnované typu kotevního materiálu a délce kotvení. Proto se použily ocelové trubičky o délce 225 mm s vyvrtanými otvory a jako kotevní materiál byla použita *Chemická malta FIS VL 300 T* od výrobce *Fischer*.



Obrázek 47: BFRP tyče s vytvořenou kotevní délkou

Vyhotovení svařovaného ocelového rámu, který nesvíral vzorek ze stran kotevní délky a nezpůsobil tak deformace a prokluz, ale tlačil na „hrdlo“ kotevních délek, byl vyhotoven techniky z katedry K210. Rám byl poté vždy přichycen přímo k lisu, kam se pak upevnila i zkušební tělesa.



Obrázek 48: Svařovaný ocelový rám se vzorkem



Obrázek 49: Uchycení vzorku v lisu s vsazeným ocelovým rámem

Z naměřené hodnoty byla pomocí rovnice (9) z kapitoly 3.7.1.7 vypočtena pevnost jednotlivých tyčí.

3.7.3 Pasty s čedičovými vlákny

Pro zjišťování mechanických a chemických vlastností past s čedičovými vlákny, bylo vyhotoveno 48 trámečků ze 4 různých cementových směsí, které byly vystaveny simulovaným prostředím. Takto vyhotovené trámečky byly použity na samotné zkoušky nebo na další zpracování pro ostatní druhy zkoušek.

3.7.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pro výrobu pastových směsí byla použita míchačka *ALBA RE 24* a velký vibrační stůl. Zkoušky byly provedeny na lisu s výrobním číslem 990.06/57 od výrobce *Fritz Hecker*, který byl v souladu s ČSN EN 12390-4 [98]. Vážení bylo provedeno na váze *OHAUS*.



Obrázek 50 a 51: Míchačka ALBA RE 24 a Lis pro mechanické zkoušky

Směsi pro výrobu zkušebních trámečků byly vyráběny postupně od směsí s nejmenší koncentrací mikrosiliky až po nejvyšší. Po pečlivém navážení jednotlivých složek směsí byly suché složky vloženy do míchačky a řádně promíchány. Poté byla za stálého míchání přidávána voda. Jako poslední složkou byla za stálého míchání postupně přidávána vlákna o hmotnostním obsahu 1 % pojiv. Během celého procesu míchání byla vždy, alespoň 2x sundána nádoba na směs a z jejího dna byly na povrch přesunuty hůře promísené složky pomocí malé zednické lžice. Po řádném procesu míchání byla čerstvá směs ve třech vrstvách uložena do forem s hutněním na vibračním stolem mezi každou vrstvou. Na formy o rozměrech pro trámečky 40 x 40 x 160 mm, byl před uložením nanesen odbedňovací přípravek. Formy se směsí byly zakryty stretch folií a ponechány do odbednění.



Obrázek 52 a 53: Směs ve formách před zhutněním a Trámečky po odbednění

Po 28 dnech zrání byly trámečky, kromě referenčních, rozděleny do přepravek se simulovaným prostředím tak, aby vzorky byly přístupny prostředí ze všech stran. Do bedýnek byly vlitý roztoky, které simulovaly daná prostředí a ty byly zakonzervovány proti odparu roztoku víkem a lepicí páskou. Po uplynutí tří měsíců byly trámečky odebrány z bedýnek, opláchnuty pod tekoucí kohoutkovou vodou a ponechány okapat. Následně došlo k změření jejich rozměrů a hmotností.



Obrázek 54: Trámečky naložené v simulovaných prostředích

Takto upravené trámečky byly použity k provedení tříbodového tahu za ohybu na lisu s vloženými čelistmi. Trámeček byl do prostoru lisu vložen centricky tak, aby byl směr zatěžování kolmý na směr ukládání betonu vyhotoveného tělesa. Samotné měření probíhalo v souladu s ČSN EN 12390-5 [99]. Po provedení zkoušky byly oba konce zachovány pro další typy zkoušek či měření.



Obrázek 55: Čelisti pro tříbodový tah za ohybu

3.7.3.2 Pevnost v tlaku

Veškeré charakteristiky použitých přístrojů na výrobu zkušebních těles a provádění zkoušek jsou totožné s předchozí kapitolou (3.7.3.1).

Detailní výroba a příprava zkušebních vzorků je popsána v předcházející kapitole (3.7.3.1) pouze s tím rozdílem, že vzniklé konce po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly výchozími vzorky pro měření pevnosti v tlaku. Ty byly podle normy ČSN EN 12390-3 [100] vloženy do prostoru lisu a z výsledného zatížení byla vypočítána jednotlivá pevnost v tlaku podle vzorce z normy [100]:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (11)$$

kde je

f_c pevnost v tlaku, v MPa (N/mm²);

F maximální zatížení při porušení, v N;

A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku ze změřených rozměrů tělesa.

Jako výsledná hodnota pevnosti byla považována průměrná hodnota z obou měřených konců trámečků.



Obrázek 56 a 57: Lis se vzorkem a Rozdrcený vzorek po zkoušce

3.7.3.3 Hmotnostní nasákavost

Veškeré charakteristiky použitých přístrojů na výrobu a vážení zkušebních těles jsou totožné s předcházející kapitolou (3.7.3.1).

Popis výroby a práce se vzorky trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm je detailně popsán kapitole (3.7.3.1).

Na základě naměřených hodnot byla vypočtena hmotnostní nasákavost podle vzorce:

$$n_h = \frac{m_n - m_s}{m_s} * 100 \quad (11)$$

kde je

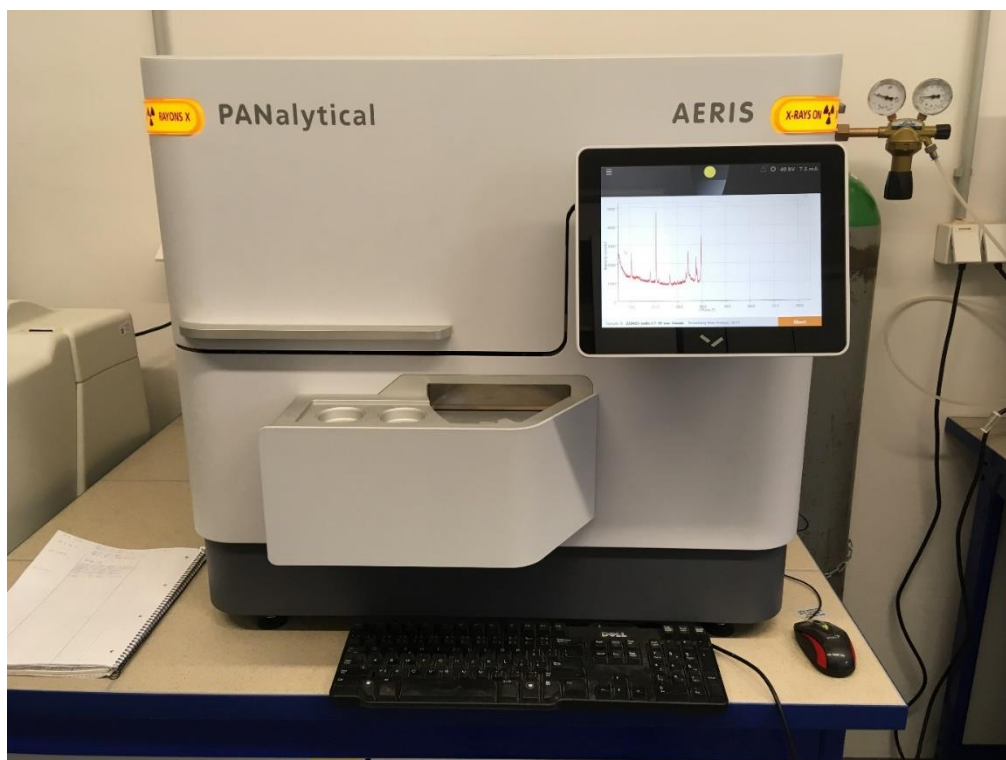
n_h hmotnostní nasákavost, v %

m_s hmotnost suchého vzorku, v g

m_n hmotnost mokrého vzorku, v g

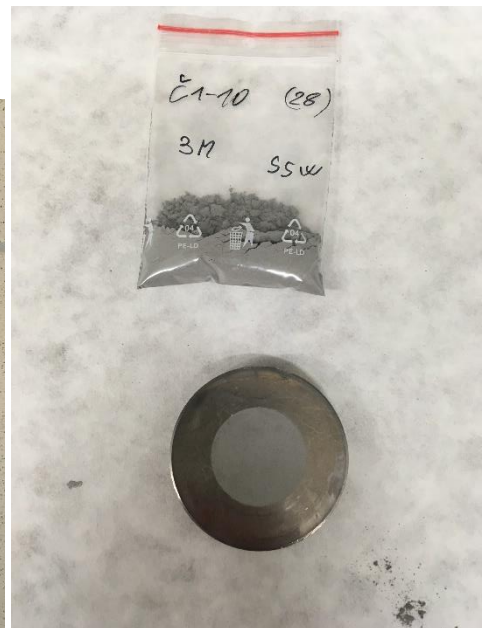
3.7.3.4 Rentgenová difrakční metoda (XRD)

Veškeré charakteristiky použitých přístrojů na výrobu zkušebních těles jsou totožné s předcházející kapitolou (3.7.3.1). Pro provedení zkoušky byl použit difraktometr *PANalytical AERIS*.



Obrázek 58: Přístroj pro XRD analýzu

Detailní výroba a příprava zkušebních vzorků je popsána v předcházející kapitole (3.7.3.1), přičemž po provedení mechanických zkoušek byly odebrány zbytky rozdrčené pasty z jádrové části vzorku, z kterých byl pomocí achátové mističky a tlučku vytvořen jemný prášek. Ten byl umístěn do formičky, zalisován válečkem a vložen do podavače přístroje, odkud byl poté mechanicky zprocesován již samotným přístrojem.

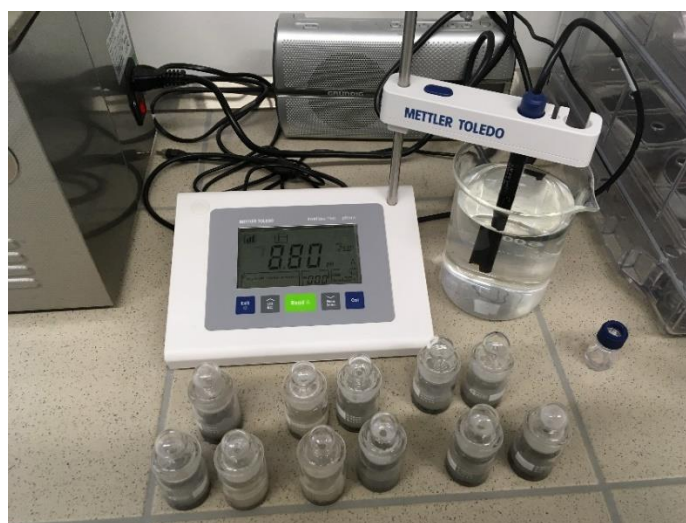


Obrázek 59 a 60: Vzorky v příslušných sáčcích a Vzorek ve formičce

3.7.3.5 Hodnota pH

Veškeré charakteristiky použitých přístrojů na výrobu zkušebních těles jsou totožné s předcházející kapitolou (3.7.3.1). Zařízení pro měření pH od výrobce *Mettler Toledo* má označení *FiveEasy Plus*.

Proces výroby a získání prášku pro zjištění hodnoty pH je totožný jako v předešlé kapitole (3.7.3.4). Práce se samotným práškem získaným z past byla ovšem jiná. Do váženky byly vloženy dva gramy prášku vždy jednoho vzorku, ke kterým bylo přidáno osm gramů destilované vody. Takto vytvořená suspenze byla promíchána kopístkou a nechána jednu hodinu interagovat. Měřidlo přístroje bylo opláchnuto v destilované vodě a zasunuto do váženky se vzorkem tak, aby nebyl senzor ponořen v sedlině prášku. Bylo zahájeno opakované měření pro získání průměrné hodnoty pH. Po 24 hodinách od vzniku suspenze bylo měření pH provedeno znovu, obdobným způsobem.



Obrázek 61: Přístroj na měření pH *FiveEasy plus* a vzorky ve váženkách

3.7.4 Simulovaná prostředí

Jako degradabilní prostředí byla po konzultaci s vedoucím diplomové práce vybrána simulující prostředí, u kterých se předpokládá, že mohou ovlivnit chování vzorků, nebo u kterých bylo potřeba ověřit vzájemnou inertnost. Při volbě koncentrací byl brán ohled k možnému vzniku hodnoty v praxi a současně, aby proces degradace byl dostatečně patrný v čase. Jako simulovaná prostředí byly vytvořeny:

- Destilovaná voda „H₂O dest“
- Simulovaný beton „SPS“ (simulated pore solution)
- Mořská voda „SSW“ (simulated sea water)
- Alkalická mořská voda „ASSW“ (alkaline simulated sea water)
- Kyselina „pH3“



Obrázek 62: Nádoby na simulované roztoky a destilovaná voda

Tabulka 15: Složení jednotlivých simulovaných prostředí

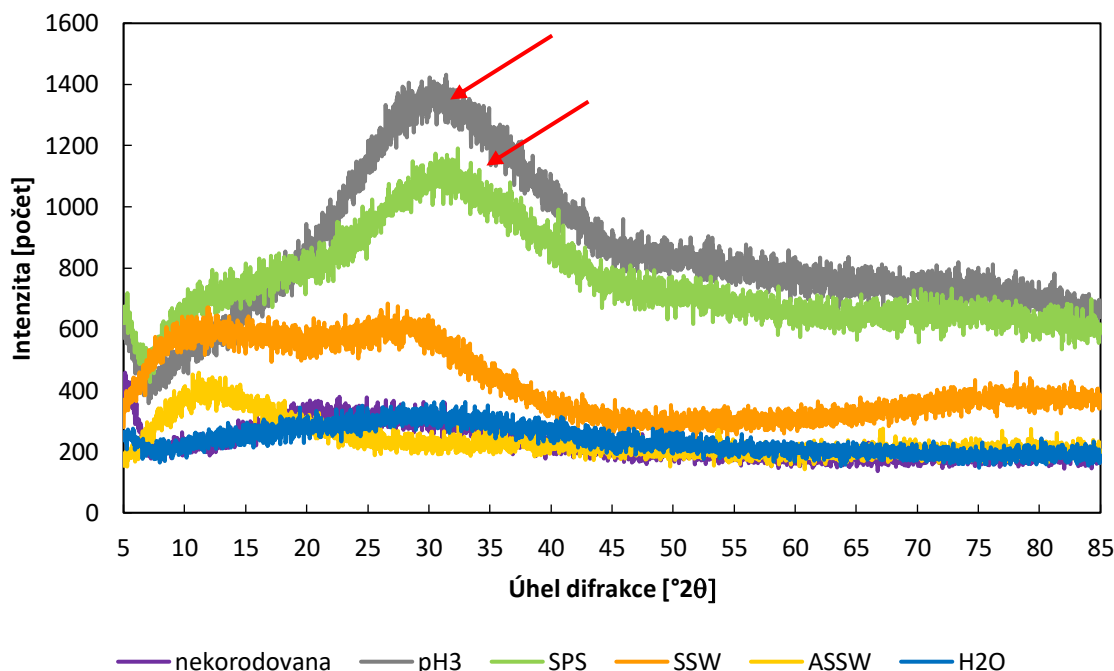
Označení simulovaného prostředí	Sloučenina		Množství v roztoku		pH
	Název	Zkratka	g/l	mol/l	
SPS	Hydroxid vápenatý	Ca(OH) ₂	2,64	0,036	12,91
	Hydroxid draselný	KOH	3,36	0,060	
	Hydroxid sodný	NaOH	8,33	0,208	
Celkem			14,33	0,304	
SSW	Chlorid sodný	NaCl	24,50	0,419	5,65
	Síran sodný	Na ₂ SO ₄	4,09	0,029	
	Chlorid hořečnatý	MgCl ₂	5,20	0,055	
	Chlorid vápenatý	CaCl ₂	1,16	0,010	
Celkem			34,95	0,513	
ASSW	Hydroxid vápenatý	Ca(OH) ₂	2,64	0,036	12,73
	Hydroxid draselný	KOH	3,36	0,060	
	Hydroxid sodný	NaOH	8,33	0,208	
	Chlorid sodný	NaCl	24,50	0,419	
	Síran sodný	Na ₂ SO ₄	4,09	0,029	
	Chlorid hořečnatý	MgCl ₂	5,20	0,055	
	Chlorid vápenatý	CaCl ₂	1,16	0,010	
Celkem			49,28	0,816	
pH3	Kyselina chlorovodíková	HCl	0,04	0,001	3,1
Celkem			0,04	0,001	
H ₂ O	Destilovaná voda	H ₂ O	-	-	6,25
Celkem			-	-	

Čedičová vlákna a BFRP tyče byly vystaveny všem pěti uvedeným prostředím. Betonové trámečky nebyly vystaveny kyselině, tzn. pH3.

4 Výsledky a diskuse

4.1 Čedičová vlákna

4.1.1 Rentgenová difrakční metoda (XRD)



Obrázek 63: Difraktogram vláken

Obrázek 63 zobrazuje difraktogramy vláken vystavených simulovaným prostředím po uplynutí 28 dní v prostředí a také vlákna prostředí nekorodovaná. Všechna čedičová vlákna jsou amorfní, proto na žádném z difraktogramů není patrný typický náhlý nárůst intenzity naznačující krystalickou mřížku minerálu. Přesto se u vláken z prostředí pH3 a SPS dá pozorovat nárůst difrakční intenzity, který naznačuje vznik zárodků krystalové mřížky křemene.

4.1.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

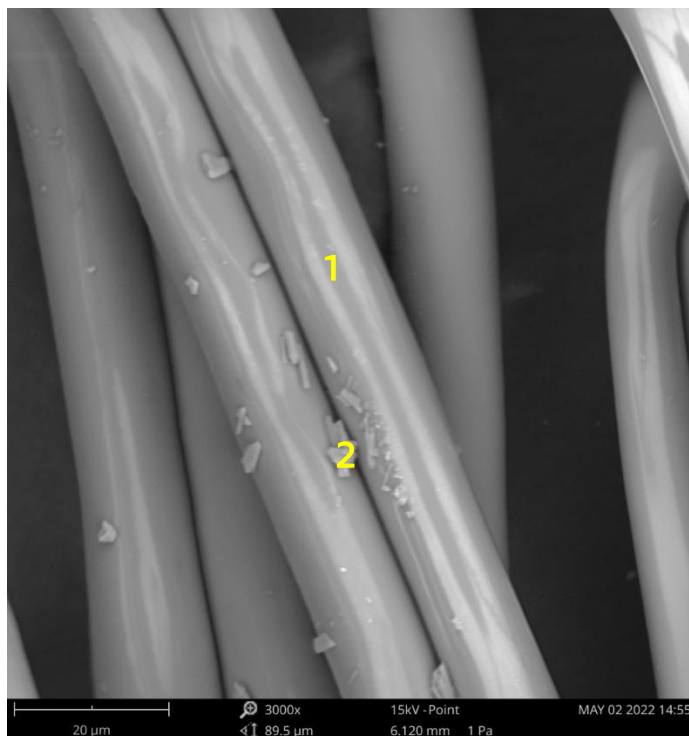
Tato zkušební metoda byla zvolena na základě obsáhlé rešerše, ze které je předpokládáno, že vlákna mohou vykazat po expozici vizuální odlišnosti, například v podobě poruch, ale také změny v chemickém složení na svém povrchu. Současně také mohou chemicky reagovat se simulovaným prostředím. Tyto skutečnosti je možno pozorovat a následně popsat pomocí elektronového mikroskopu. Jako vzorky pro zkoumání odlišností byly vybrány vlákna ze simulovaných prostředích po 28 dnech.

Výchozí stav vláken



Obrázek 64: Vlákna nevystavená simulovanému prostředí

Z obrázku 64 je na vláknech vidět občasné kontaminace povrchu.



Obrázek 65: Místa detailní analýzy složení

Tabulka 16: Složení povrchu vlákna, bod 1

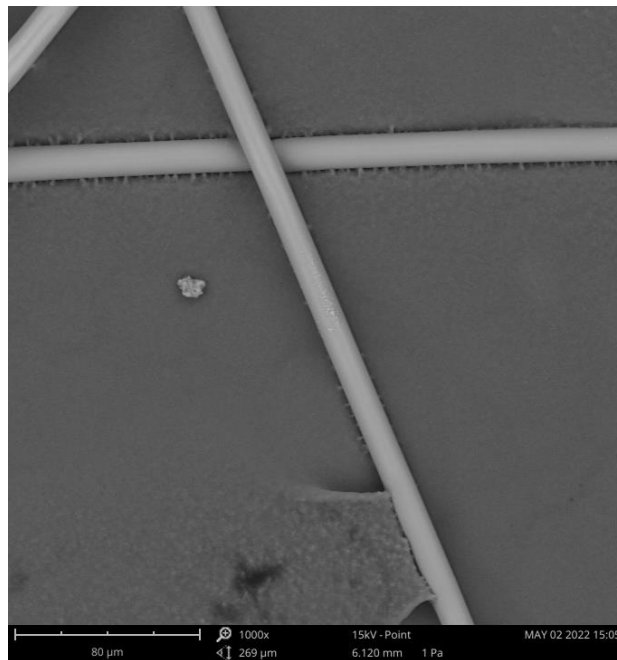
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	77,38	67,00	-	-
Si	10,03	15,24	SiO ₂	53,26
Al	4,47	6,52	Al ₂ O ₃	20,14
Na	4,42	5,50	Na ₂ O	12,10
Mg	2,79	3,67	MgO	9,94
Ca	0,53	1,15	CaO	2,63
K	0,27	0,56	K ₂ O	1,11
Fe	0,12	0,35	Fe ₂ O ₃	0,83

Tabulka 17: Složení povrchu vlákna, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	81,67	68,73	-	-
S	4,89	8,24	SO ₃	34,78
Ca	4,84	10,19	CaO	24,11
Si	4,56	6,73	SiO ₂	24,34
Al	1,81	2,58	Al ₂ O ₃	8,23
Na	0,95	1,15	Na ₂ O	2,62
Mg	0,72	0,92	MgO	2,57
Fe	0,34	1,00	Fe ₂ O ₃	2,41
K	0,23	0,46	K ₂ O	0,94

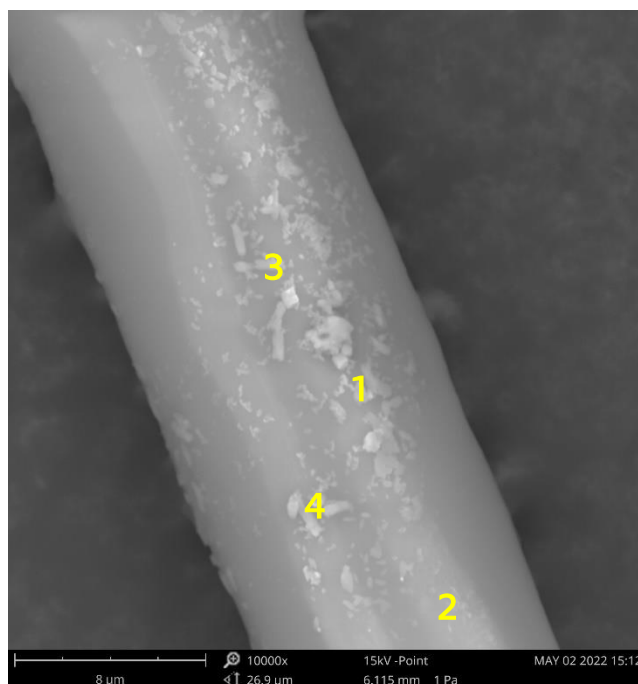
Pro analýzu byl vybrán bod 2, z kterého je následně patrná kontaminace S.

Prostředí SPS



Obrázek 66: Vlákna vystavená SPS

Na povrchu vláken jsou vidět úplné korozní produkty (vodorovné vlákno v horní části obrázku 66).



Obrázek 67: Místa detailní analýzy složení korozního produktu

Tabulka 18: Složení povrchu vlákna po expozici SPS, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	74,25	62,33	-	-
Si	11,99	17,66	SiO ₂	54,08
Al	5,00	7,08	Al ₂ O ₃	19,16
Na	3,93	4,74	Na ₂ O	9,14
Mg	2,92	3,72	MgO	8,84
Ca	0,93	1,95	CaO	3,90
Fe	0,57	1,67	Fe ₂ O ₃	3,43
K	0,41	0,85	K ₂ O	1,46

Při porovnání zastoupení oxidů na běžném povrchu vláken z tabulek 16 a 18 jsou po expozici SPS patrné jen drobné změny, které nepřekročí 3 % pro jednotlivý oxid prvku. Drobně se zvýšila koncentrace oxidů Fe a naopak poklesla pro prvek Na.

Tabulka 19: Složení korozního produktu, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	65,02	49,88	-	-
Si	12,09	16,29	SiO ₂	40,13
Ca	5,88	11,30	CaO	18,21
Al	4,86	6,28	Al ₂ O ₃	13,68
Na	4,79	5,28	Na ₂ O	8,19
Mg	4,64	5,41	MgO	10,33
Fe	0,92	2,47	Fe ₂ O ₃	4,06
K	0,71	1,33	K ₂ O	1,84
S	0,58	0,89	SO ₃	2,55
Cl	0,51	0,87	-	-

Tabulka 20: Složení korozního produktu, bod 3

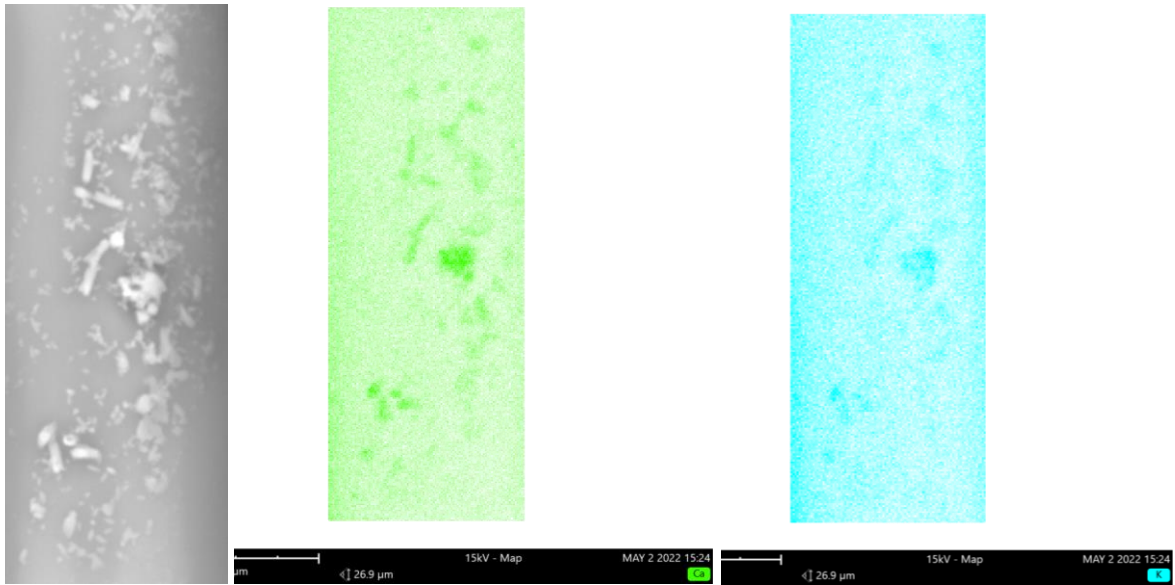
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	66,96	54,28	-	-
Si	14,45	20,56	SiO ₂	52,85
Al	5,68	7,77	Al ₂ O ₃	17,64
Na	4,38	5,11	Na ₂ O	8,27
Mg	3,49	4,30	MgO	8,56
C	1,97	1,20	-	-
Ca	1,78	3,61	CaO	6,07
Fe	0,73	2,07	Fe ₂ O ₃	3,55
K	0,56	1,11	K ₂ O	1,61

Při porovnání tabulky 18 s tabulkami 19, 20 a 21 je zjevné, že v bodě 1 dochází na povrchu vlákna ke vzniku korozního produktu obohaceného o Ca společně s S a ochuzeného o Si. V bodech 3 a 4 dochází k obohacení pouze vápníkem.

Tabulka 21: Složení korozního produktu, bod 4

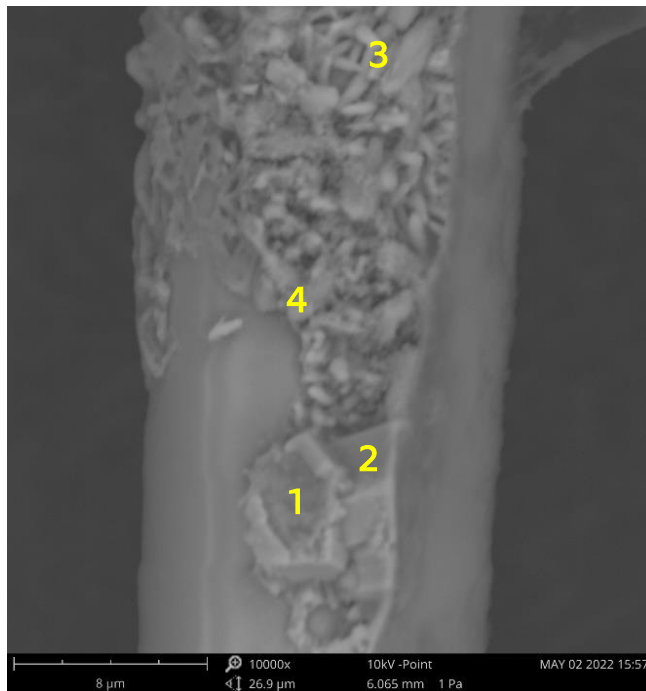
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	70,11	56,78	-	-
Si	11,96	17,01	SiO ₂	47,37
Na	5,27	6,13	Na ₂ O	10,76
Al	4,90	6,69	Al ₂ O ₃	16,47
Mg	3,55	4,37	MgO	9,44
Ca	2,61	5,30	CaO	9,65
Fe	0,75	2,11	Fe ₂ O ₃	3,93
K	0,52	1,03	K ₂ O	1,61
Cl	0,33	0,58	-	-

Prvkové mapování korozního produktu na vláknech z prostředí SPS



Obrázek 68, 69 a 70: Detail vlákna, Ca filtr, K filtr

Pomocí filtru bylo možné graficky zobrazit rozdíly v koncentracích jednotlivých prvků, kde tmavší plochy znamenají vyšší koncentrace daného prvku.



Obrázek 71: Místa detailní analýzy složení korozního produktu

Tabulka 22: Složení jiného korozního produktu, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	75,31	63,00	-	-
Na	6,10	7,34	Na ₂ O	16,15
Ca	5,78	12,12	CaO	27,69
S	5,43	9,11	SO ₃	37,16
C	2,94	1,85	-	-
Mg	2,77	3,53	MgO	9,55
K	0,74	1,51	K ₂ O	2,96
Cl	0,56	1,04	-	-
Si	0,27	0,40	SiO ₂	1,39
Al	0,09	0,13	Al ₂ O ₃	0,39

Tabulka 23: Složení jiného korozního produktu, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	75,34	58,93	-	-
S	9,43	14,79	SO ₃	48,40
Ca	9,00	17,63	CaO	32,34
Si	2,03	2,79	SiO ₂	7,81
Na	1,72	1,93	Na ₂ O	3,42
Mg	1,14	1,35	MgO	2,93
Al	0,57	0,75	Al ₂ O ₃	1,86
Fe	0,42	1,14	Fe ₂ O ₃	2,14
K	0,36	0,69	K ₂ O	1,09

Tabulka 24: Složení jiného korozního produktu, bod 3

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	55,17	40,60	-	-
Si	12,06	15,57	SiO ₂	33,79
Mg	9,82	10,98	MgO	18,47
Ca	7,13	13,14	CaO	18,65
C	4,47	2,47	-	-
Al	4,00	4,96	Al ₂ O ₃	9,51
Na	2,00	2,12	Na ₂ O	2,89
Cl	1,95	3,18	-	-
Fe	1,46	3,76	Fe ₂ O ₃	5,45
K	1,12	2,02	K ₂ O	2,47
S	0,81	1,19	SO ₃	3,03

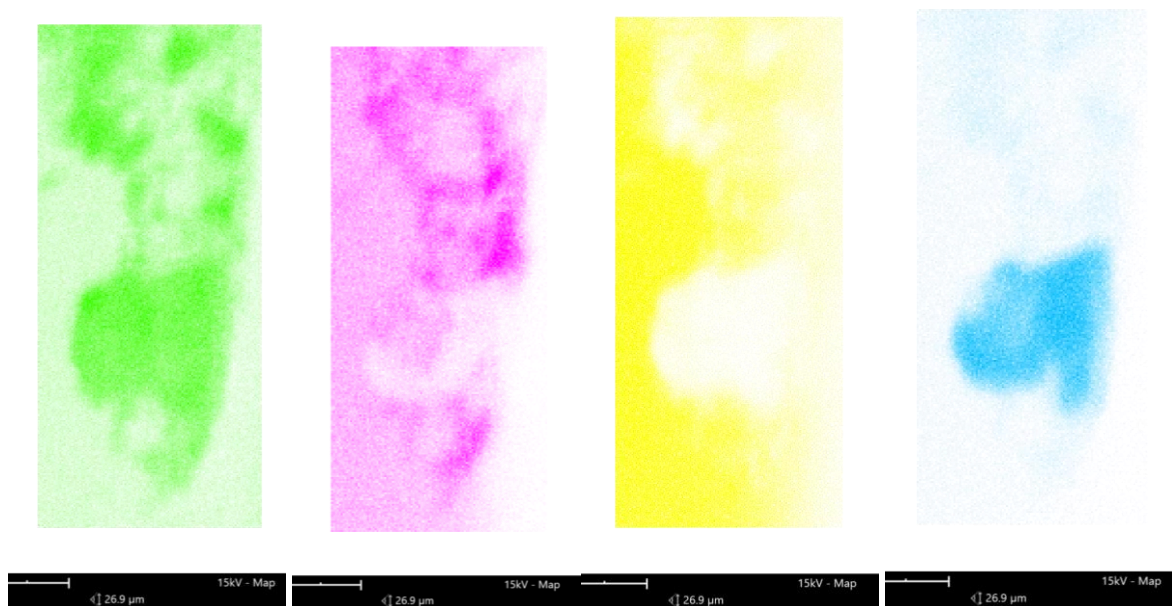
Tabulka 25: Složení jiného korozního produktu, bod 4

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	63,49	48,72	-	-
Mg	8,33	9,71	MgO	19,12
Ca	8,28	15,92	CaO	26,44
Si	8,01	10,80	SiO ₂	27,41
Al	3,13	4,05	Al ₂ O ₃	9,08
C	2,76	1,59	-	-
Na	2,48	2,74	Na ₂ O	4,38
Cl	1,18	2,01	-	-
S	1,07	1,65	SO ₃	4,89
K	0,70	1,32	K ₂ O	1,89
Fe	0,56	1,49	Fe ₂ O ₃	2,53

Prvkové mapování jiného korozního produktu na vláknech z prostředí SPS



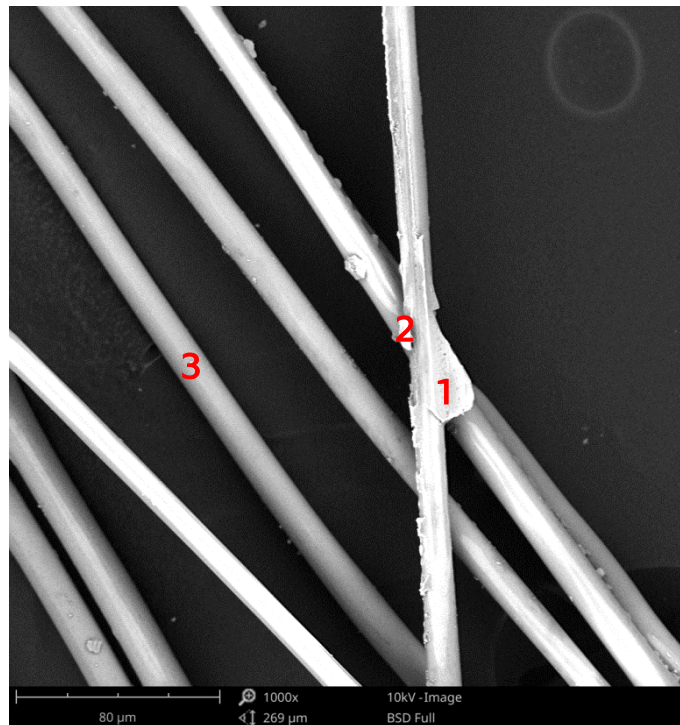
Obrázek 72: Detail vlákna s jiným korozním produktem



Obrázek 73, 74, 75, 76: Ca filtr, Mg filtr, Si filtr, S filtr

Vzniklý korozní produkt nemá jednotné složení v celé své ploše, což je dobře patrné z prvkového mapování.

Prostředí H₂O



Obrázek 77: Vlákna vystavená H₂O a místa detailní analýzy

Tabulka 26: Složení produktu - ulpělá nečistota, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	55,80	42,99	-	-
C	15,36	8,89	-	-
S	14,74	22,76	SO ₃	54,44
Ca	10,90	21,04	CaO	28,20
Si	3,19	4,32	SiO ₂	8,85

Tabulka 27: Složení - NaCl, bod 2

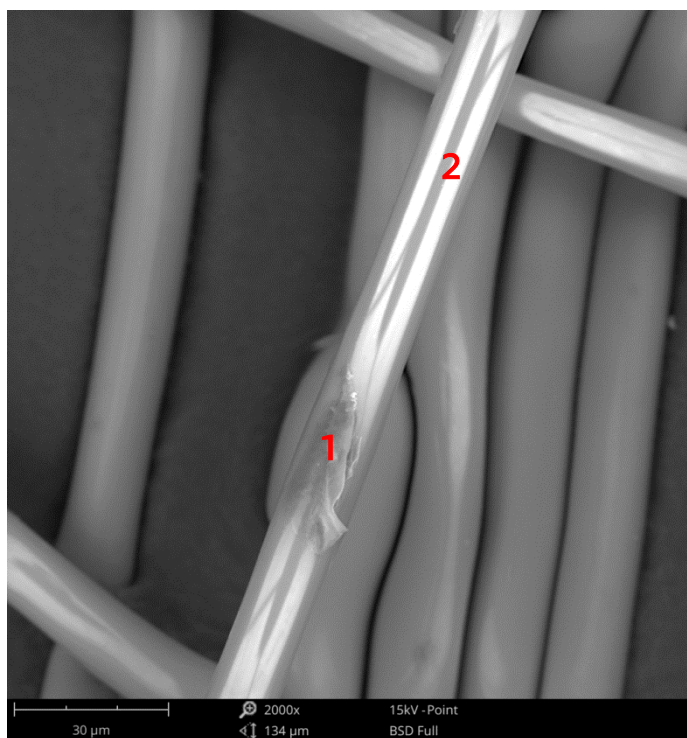
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
Na	52,15	50,61	Na ₂ O	65,40
O	22,72	15,34	-	-
Cl	20,12	30,11	-	-
C	2,52	1,28	-	-
Mg	1,87	1,92	MgO	3,05
Si	0,41	0,49	SiO ₂	1,00
Al	0,22	0,25	Al ₂ O ₃	0,46

Tabulka 28: Složení povrchu vlákna po expozici H₂O, bod 3

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	73,28	60,72	-	-
Si	12,02	17,48	SiO ₂	52,02
Al	5,00	6,98	Al ₂ O ₃	18,36
Na	4,13	4,91	Na ₂ O	9,21
Mg	2,87	3,61	MgO	8,33
Ca	1,37	2,85	CaO	5,54
Fe	0,85	2,47	Fe ₂ O ₃	4,90

Z tabulky 26 je patrné kontaminování vláken CaSO₄ a z tabulky 27 kontaminace NaCl. Z porovnání povrchů vláken z tabulek 16 a 28 je díky prostředí H₂O patrný pokles jinak hojně zastoupených oxidů prvků jako jsou Si, Al, Na a Mg a naopak dochází k nárůstu zastoupení oxidů původně méně zastoupených, tzn. Ca a Fe., vyjma K.

Prostředí pH3



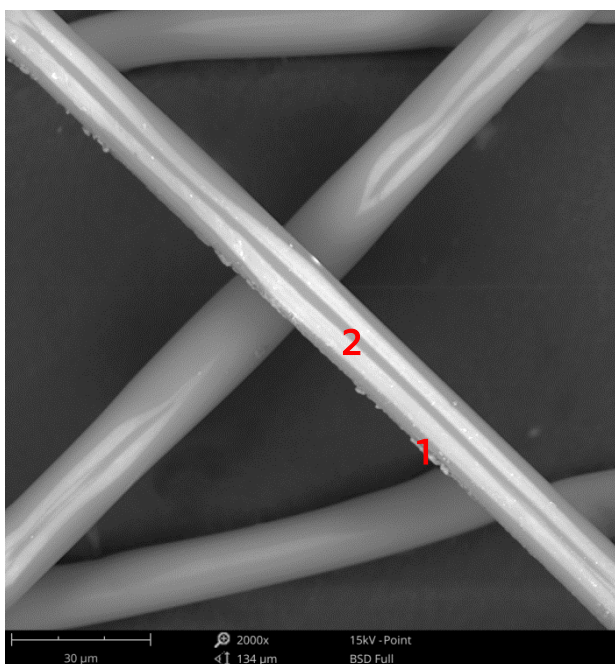
Obrázek 78: Poškozené vlákno vystavené pH3 a místa detailní analýzy

Tabulka 29: Složení v místě poškození, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	62,98	49,53	-	-
Si	15,83	21,85	SiO ₂	51,41
Na	8,04	9,09	Na ₂ O	13,47
Al	6,19	8,22	Al ₂ O ₃	17,08
Mg	3,55	4,24	MgO	7,73
Ca	1,55	3,05	CaO	4,69
K	0,84	1,61	K ₂ O	2,13
Fe	0,64	1,76	Fe ₂ O ₃	2,77
Cl	0,37	0,65	-	-

Tabulka 30: Složení povrchu vlákna po expozici pH3, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	80,64	71,41	-	-
Si	8,55	13,30	SiO ₂	53,32
Al	4,05	6,05	Al ₂ O ₃	21,43
Na	3,82	4,85	Na ₂ O	12,26
Mg	2,46	3,31	MgO	10,28
Ca	0,30	0,67	CaO	1,76
K	0,16	0,34	K ₂ O	0,77
Fe	0,02	0,07	Fe ₂ O ₃	0,18



Obrázek 79: Depozit NaCl na povrchu vlákna

V místech bez korozních produktů (bod 2) se po expozici na povrchu vláken zvýší zastoupení oxidů prvků hojně obsažených ve vláknech (Si, Al, Na a Mg) a oxidy prvků méně obsažených sníží své procentuální zastoupení. Největší změna 1,29 % nastala u prvku Al. Z velmi drobných změn hodnot by se dalo vyvodit, že vlákna jsou v prostředí vcelku stálá nebo se prvky uvolňují vcelku rovnoměrně.

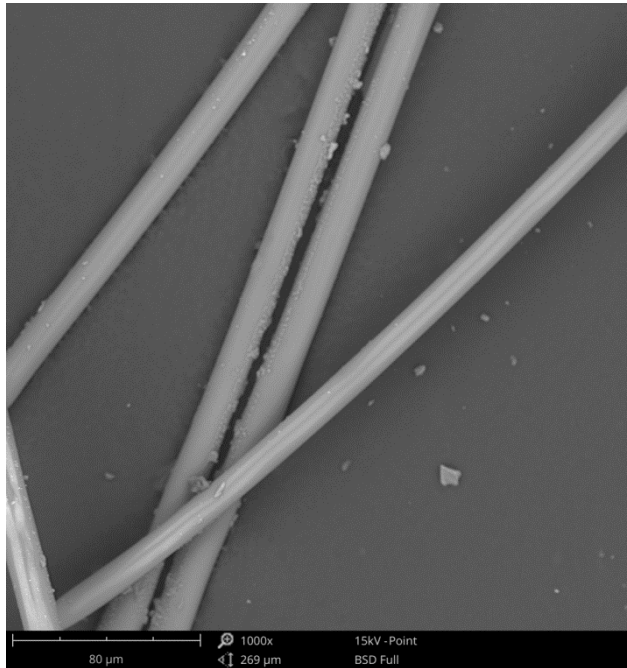
Tabulka 31: Složení depozitu NaCl, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	77,64	67,60	-	-
Si	8,14	12,45	SiO ₂	46,76
Na	6,44	8,06	Na ₂ O	19,08
Al	3,59	5,28	Al ₂ O ₃	17,51
Mg	2,76	3,64	MgO	10,61
Cl	0,92	1,78	-	-
Ca	0,34	0,75	CaO	1,84
Fe	0,11	0,34	Fe ₂ O ₃	0,85
K	0,05	0,10	K ₂ O	0,21

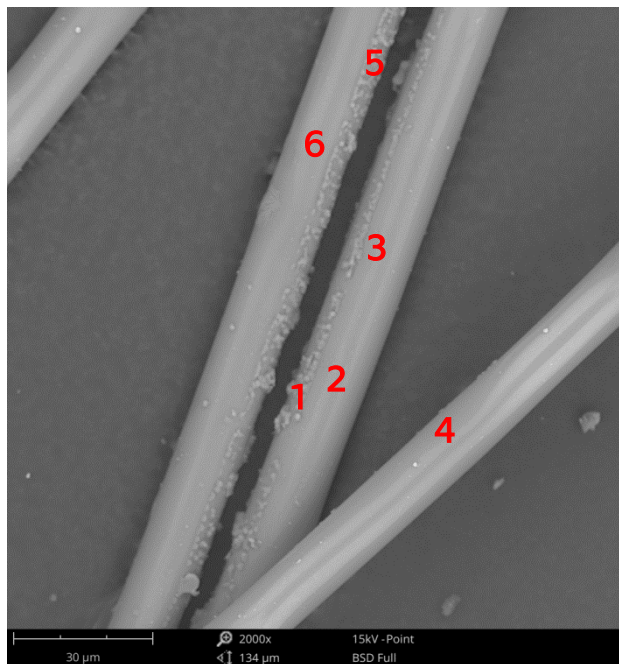
Tabulka 32: Složení povrchu, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	76,83	66,11	-	-
Si	11,37	17,17	SiO ₂	57,20
Al	4,70	6,82	Al ₂ O ₃	20,08
Na	3,42	4,23	Na ₂ O	8,88
Mg	2,88	3,77	MgO	9,73
Ca	0,48	1,03	CaO	2,24
Fe	0,22	0,67	Fe ₂ O ₃	1,50
K	0,08	0,17	K ₂ O	0,32
Cl	0,02	0,03	-	-

Prostředí SSW



Obrázek 80: Vlákna vystavená SSW



Obrázek 81: Místa detailních analýz

Na obrázku 81 jsou vidět vlákna s korozními produkty i bez nich. Je otázkou, zdali vlákna bez korozních produktů mají nějakým způsobem vyšší odolnost, nebo byla pouze intenzivněji omyta a korozní produkty byly splaveny pryč.

Tabulka 33: Možná kontaminace nebo korozní produkt, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	70,82	58,15	-	-
Si	9,63	13,88	SiO ₂	41,00
Mg	4,39	5,47	MgO	12,53
Al	4,01	5,56	Al ₂ O ₃	14,50
Na	3,81	4,50	Na ₂ O	8,37
Ca	3,32	6,82	CaO	13,18
C	2,20	1,36	-	-
Fe	0,87	2,50	Fe ₂ O ₃	4,93
S	0,27	0,45	SO ₃	1,54
Cl	0,19	0,35	-	-

Tabulka 34: Bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	62,16	44,21	-	-
Si	14,76	18,42	SiO ₂	41,22
Fe	5,82	14,44	Fe ₂ O ₃	21,60
Al	5,73	6,87	Al ₂ O ₃	13,59
Ca	4,03	7,17	CaO	10,50
Na	3,26	3,33	Na ₂ O	4,70
Mg	2,77	2,99	MgO	5,18
K	1,47	2,56	K ₂ O	3,22

Tabulka 35: Bod 3

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
Fe	38,01	54,03	Fe ₂ O ₃	54,55
C	22,97	7,02	-	-
Ca	21,37	21,80	CaO	21,54
Si	10,36	7,41	SiO ₂	11,19
K	6,18	6,15	K ₂ O	5,23
I	1,11	3,58		

Tabulka 36: Složení povrchu vlákna po expozici SSW, Bod 4

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	76,45	65,53	-	-
Si	11,08	16,67	SiO ₂	55,33
Al	4,70	6,79	Al ₂ O ₃	19,91
Na	3,81	4,69	Na ₂ O	9,80
Mg	2,74	3,57	MgO	9,18
Ca	0,71	1,52	CaO	3,31
K	0,34	0,70	K ₂ O	1,31
Fe	0,18	0,53	Fe ₂ O ₃	1,16

Tabulka 37: Bod 5

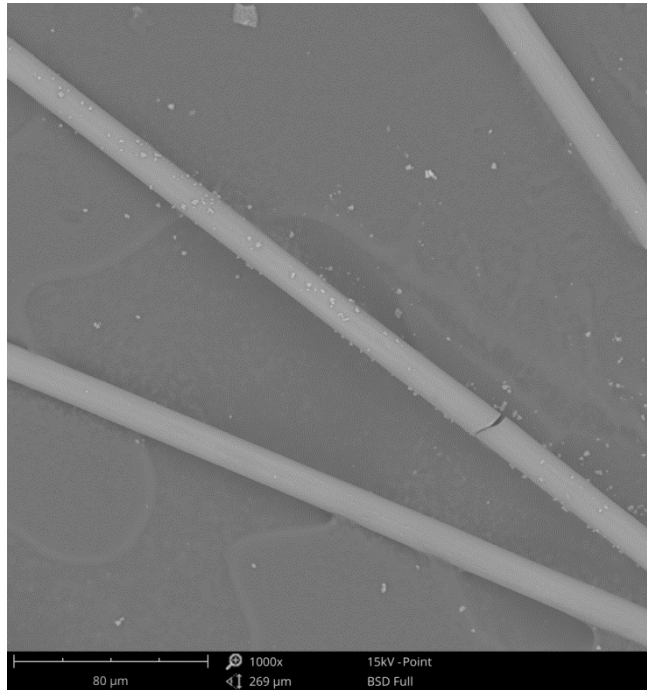
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
Ca	31,77	37,82	CaO	35,12
C	18,51	6,60	-	-
Si	16,72	13,94	SiO ₂	19,80
Fe	16,65	27,61	Fe ₂ O ₃	26,20
Al	7,04	5,64	Al ₂ O ₃	7,08
K	3,99	4,64	K ₂ O	3,71
Na	2,85	1,94	Na ₂ O	1,74
Mg	2,48	1,79	MgO	1,97

Tabulka 38: Bod 6

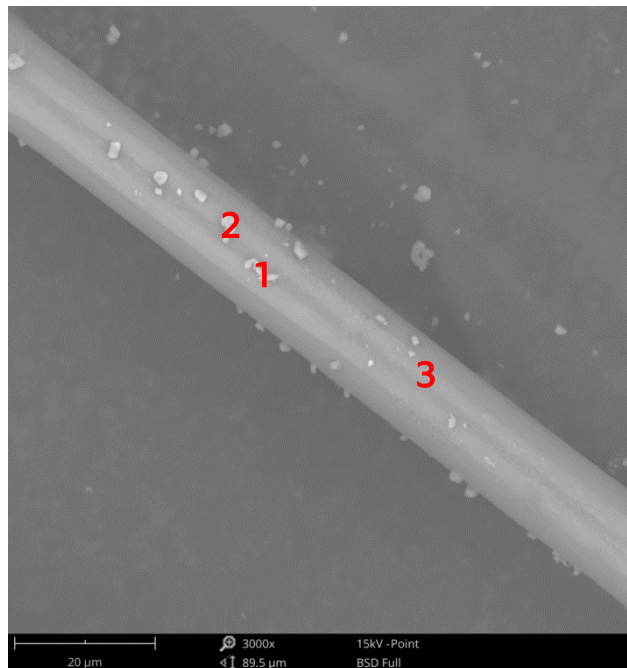
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	65,67	50,05	-	-
Si	13,68	18,31	SiO ₂	44,76
Al	5,71	7,34	Al ₂ O ₃	15,84
Na	4,83	5,29	Na ₂ O	8,15
Mg	3,22	3,72	MgO	7,06
Fe	2,93	7,79	Fe ₂ O ₃	12,73
Ca	2,69	5,13	CaO	8,21
K	1,27	2,36	K ₂ O	3,25

Z tabulek 34, 35, 37 a 38 je zjevné vysoké obohacení povrchu vláken oxidy železa, jak na běžném povrchu, tak v místech s korozními prvky. Z tabulky 35 a 37 je vidět i zvýšení koncentrací Ca.

Prostředí ASSW



Obrázek 82: Vlákna vystavená ASSW



Obrázek 83: Místa detailních analýz

Tabulka 39: Bod 1

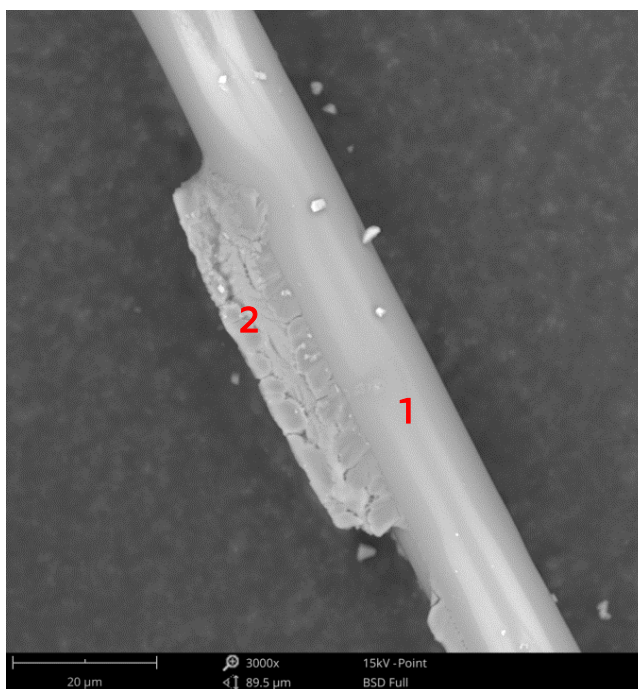
Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	71,30	58,13	-	-
Si	12,89	18,44	SiO ₂	51,39
Al	5,29	7,27	Al ₂ O ₃	17,91
Mg	4,01	4,97	MgO	10,73
Na	3,42	4,00	Na ₂ O	7,03
Ca	1,46	2,99	CaO	5,45
Fe	1,11	3,15	Fe ₂ O ₃	5,87
K	0,52	1,03	K ₂ O	1,62

Tabulka 40: Depozit CaCO₃, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	79,19	66,85	-	-
Ca	9,72	20,56	CaO	57,60
C	3,97	2,51	-	-
Si	2,81	4,16	SiO ₂	17,83
Mg	1,79	2,30	MgO	7,62
Al	1,34	1,91	Al ₂ O ₃	7,24
Na	1,02	1,24	Na ₂ O	3,33
Fe	0,16	0,47	Fe ₂ O ₃	1,33

Tabulka 41: Bod 3

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	75,57	64,33	-	-
Si	11,24	16,80	SiO ₂	54,04
Al	4,69	6,74	Al ₂ O ₃	19,15
Na	3,57	4,37	Na ₂ O	8,86
Mg	3,52	4,55	MgO	11,34
Ca	0,79	1,69	CaO	3,55
K	0,33	0,70	K ₂ O	1,26
Fe	0,28	0,84	Fe ₂ O ₃	1,81



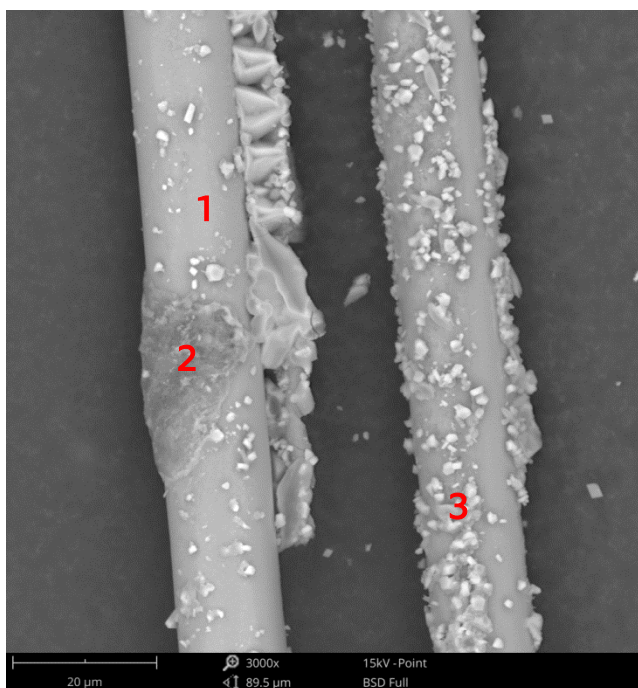
Obrázek 84: Místa detailních analýz s depozitem NaCl

Tabulka 42: Povrch vlákna po expozici ASSW, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	66,13	52,06	-	-
Si	15,56	21,50	SiO ₂	52,55
Al	6,15	8,16	Al ₂ O ₃	17,63
Na	5,01	5,66	Na ₂ O	8,72
Mg	3,25	3,89	MgO	7,37
Ca	1,64	3,24	CaO	5,18
Fe	1,40	3,84	Fe ₂ O ₃	6,28
K	0,85	1,64	K ₂ O	2,26

Tabulka 43: Depozit NaCl, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
Na	38,40	35,47	Na ₂ O	48,16
O	29,12	18,72	-	-
Cl	27,78	39,57	-	-
S	1,92	2,47	SO ₃	6,21
Ca	0,95	1,53	CaO	2,16
Mg	0,70	0,68	MgO	1,14
K	0,60	0,94	K ₂ O	1,14
Si	0,54	0,61	SiO ₂	1,32



Obrázek 85: Místa detailních analýz s naleptaným povrchem

Tabulka 44: Povrch vlákna po expozici ASSW, bod 1

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	66,55	53,08	-	-
Si	14,12	19,77	SiO ₂	50,20
Na	7,08	8,11	Na ₂ O	12,98
Al	5,57	7,49	Al ₂ O ₃	16,81
Mg	3,26	3,95	MgO	7,77
Ca	1,41	2,81	CaO	4,66
K	1,01	1,97	K ₂ O	2,82
Fe	1,01	2,81	Fe ₂ O ₃	4,77

K zásadním změnám na běžném povrchu vláken z prostředí oproti neexponovaným nedochází. Drobné změny po expozici jsou v poklesu oxidů Al a nárůstu Fe. To je patrné z průměrných hodnot zastoupení z tabulek 42 a 44 v porovnání s hodnotami v tabulce 16. Celkově je možno pozorovat drobný úbytek oxidů prvků hojně zastoupených ve vláknech Si, Al, Na a Mg. Naopak je vidět zvýšení koncentrací oxidů méně zastoupených prvků Ca, Fe a K.

Tabulka 45: Naleptaný povrch, bod 2

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	41,71	32,88		
Na	16,97	19,23	Na ₂ O	24,48
C	14,66	8,68		
Si	13,40	18,55	SiO ₂	37,49
Al	5,10	6,77	Al ₂ O ₃	12,09
Mg	3,07	3,68	MgO	5,76
Cl	1,93	3,37		
Ca	1,27	2,50	CaO	3,31
K	1,00	1,92	K ₂ O	2,19
Fe	0,84	2,30	Fe ₂ O ₃	3,11

Tabulka 46: Produkty, bod 3

Chemický prvek	Molární zlomek	Hmotnostní zlomek	Oxid	Hmotnostní zlomek oxidu
O	75,25	60,91		
Na	10,03	11,67	Na ₂ O	29,05
Ca	9,61	19,49	CaO	50,36
Cl	2,36	4,23		
Mg	1,50	1,84	MgO	5,63
Si	0,59	0,84	SiO ₂	3,33
Al	0,31	0,43	Al ₂ O ₃	1,50
S	0,26	0,42	SO ₃	1,93
K	0,09	0,18	K ₂ O	0,39

V prostředí dochází ke vzniku produktů se zvýšeným obsahem Na a Ca na povrchu vláken. Dochází i k naleptání části vláken, jak je patrné z obrázku 85.

4.1.3 Heliová pyknometrie

Díky tomu, že čedičová vlákna mohou mít od různých výrobců odlišné vlastnosti, což je dáno rozdílnou vstupní surovinou (3.3.2), byla tato zkouška provedena za účelem zjištění přesné a konkrétní objemové hmotnosti zkoumaných vláken. Naměřená hodnota 2627 kg/m^3 byla dále použita k výpočtu pevnosti v tahu (3.7.1.7).

4.1.4 Analýza chemického složení vláken (XRF)

Na základě provedené analýzy bylo určeno chemické složení vláken, které je zobrazeno v tabulce 47.

Tabulka 47: Chemické složení vláken od výrobce ARMBAS

Oxid	Hmotnostní zastoupení [%]
SiO ₂	44,4
Al ₂ O ₃	27,0
Fe ₂ O ₃	8,5
CaO	6,7
MgO	8,0
Na ₂ O	1,9
K ₂ O	2,4
TiO ₂	0,8

4.1.5 Změna hmotnosti vláken v simulovaných prostředích

Před začátkem experimentu, který byl věnovaný hmotnostním změnám čedičových vláken v simulovaných prostředích, bylo předpokládáno, že se budou čedičová vlákna v roztocích rozpouštět a budou tak ztrácet svou hmotnost, popřípadě, že na sebe budou vázat prvky z roztoků nebo s nimi reagovat, a bude tak docházet k nárůstu hmotnosti, nebo že čedičová vlákna budou k roztoku inertní a hmotnost se nezmění.

Z přiloženého obrázku 86 s naměřenými hodnotami se může jevit, že čedičová vlákna vždy svou hmotnost ztrácí nebo získávají. Z grafu viditelný úbytek hmotnosti ale nemusí být vždy spojen s rozkladem vláken v roztoku. V průběhu experimentu došlo ke zjištění, že existují faktory, které mohou výsledné hodnoty zkreslit.

- Při ukončení expozice, bylo potřeba čedičová vlákna oddělit od simulovaného prostředí, což se ovšem díky tvaru Erlenmeyerovy baňky s pinzetou nedalo pohodlně realizovat. Vlákna byla mnohdy osamoceně plovoucí v roztoku a byla tak neuchopitelná, především díky jejich malému rozměru nebyla mnohdy ani vidět. (Obrázek 90 a 91)

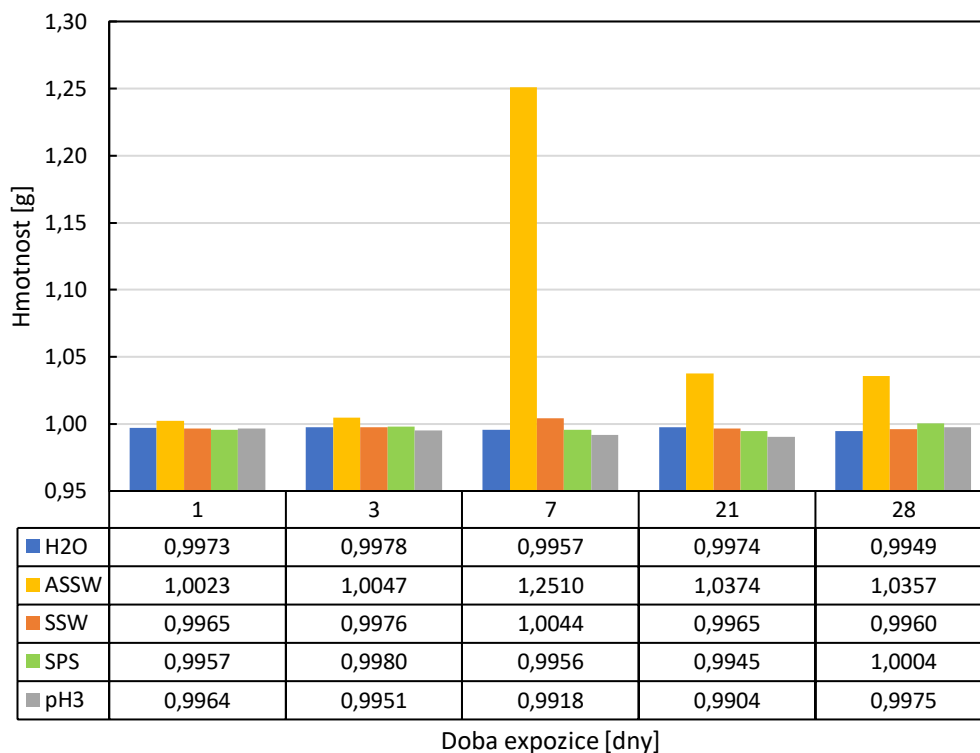
- Pozorovaným jevem, který měl negativní dopady na měření je i usazování vláken v hrdle baňky u některých roztoků, jejich uschnutí zde a nemožnost jejich oddělení od skla. (Obrázek 88)
- Drobným a nechtěným úbytkem vláken vzniká při jejich oplachu pod tekoucí kohoutkovou vodou. Některá jemná vlákna, která se v procesu třepání nestihla svázat do shluku s ostatními mohla být splavena oplachující vodou. Tento úbytek se potvrdil i nálezem drobného množství vláken v sítku dřezu po oplachování většího množství vzorků.
- Posledním možným zjištěným faktorem, který mohl způsobovat ztrátu vláken, je ventilátor sušárny. Ventilátor byl pro lepší proudění vzduchu zpočátku zapnutý na maximální výkon a Petriho misky s vlákny byly umísťovány v jeho těsné blízkosti. Tento proces a průběh zpracování mohl mít za následek nasávání drobných vláken ze vzorku, což bylo prokázáno u jednoho z nich. Vzorek byl umístěn v těsné blízkosti, a tak byla část vzorku nasáta a zachycena na mřížce před ventilátorem (Obrázek 89). V průběhu experimentu se tedy upravil proces sušení.

V prostředí H_2O , na základě naměřených hodnot, dochází k rozpouštění vláken nebo jsou s prostředími inertní. Naměřené drobné úbytky hmotnosti totiž mohou být způsobeny jednou z možností, nebo kombinacemi popsány výše. Což je více pravděpodobné, i vzhledem ke kolísavému chování retence hmotnosti vláken.

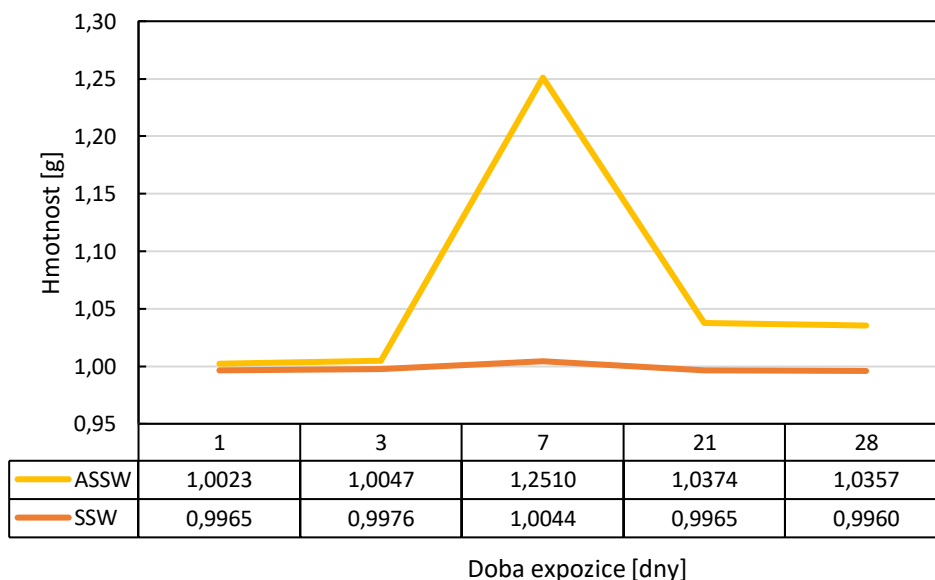
V prostředí pH3 jsou po 3, 7 a 21 dnech znatelně vyšší úbytky hmotnosti oproti ostatním prostředím a dá se tedy předpokládat, že zde opravdu dochází k mírnému poklesu hmotnosti a úbytku prvků na základě reakce s prostředím. U tohoto prostředí je také možné po 28 dnech pozorovat nárůst hmotnosti. Zde je otázkou, jaké prvky na těchto vlákních přibývají a zdali dochází ke vzniku korozní vrstvy, popřípadě co jiného tento nárůst skutečnost způsobuje.

V prostředí SPS má hmotnostní retence kolísavý trend, který se ovšem v prvních 4 měřených dnech drží v záporných hodnotách retence, aby se však po 28 dnech přenesl do kladných hodnot. Zde by tedy také mohlo docházet k reakci vláken s prostředím.

Nejzajímavější je ale chování vláken v roztoku simulujícím alkalickou mořskou vodu (ASSW), protože hodnota retence je oproti ostatním roztokům vždy kladná. Růst hmotnosti vláken má lineární trend, nebýt vzorků po 7 dnech v prostředí. Aby byla vyloučena možná chyba v měření, bylo toto měření opakováno. Trend vysokého nárůstu hmotnosti v sedmi dnech se ale opět potvrdil. Možné vysvětlení je, že čedičová vlákna s prostředím ASSW interagují a váží na sebe prvky z roztoku, nebo že zde dokonce vznikají sloučeniny, které nejsou tak dobře omyvatelné, což má za následek onen nárůst hmotnosti. Ony sloučeniny ale mohou s dobou interakce opět ubývat. Dalším možným vysvětlením nárůstu hmotností v prostředí je, že složky $Ca(OH)_2$ a Na_2SO_4 jsou hůře rozpustitelné nebo více srážlivé a mohly tak při třepání proniknout více do středu vznikajících shluků vláken odkud nebylo možné je vypláchnout při procesu odstraňování simulovaného prostředí před sušením.

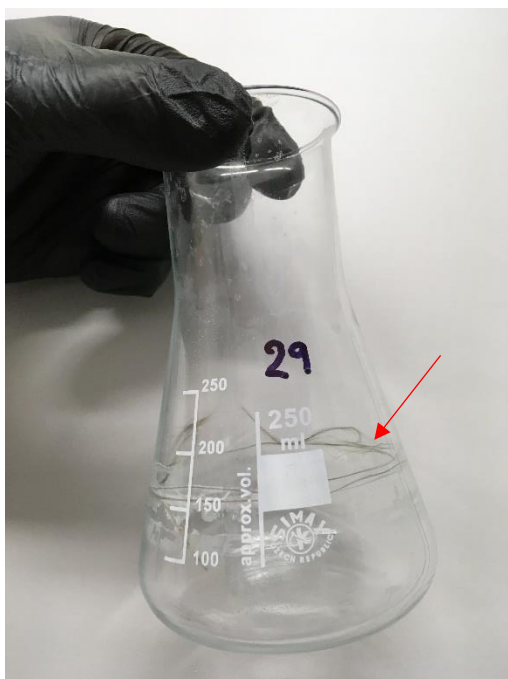


Obrázek 86: Hmotnosti čedičových vláken vystavených expozici simulovaných prostředích

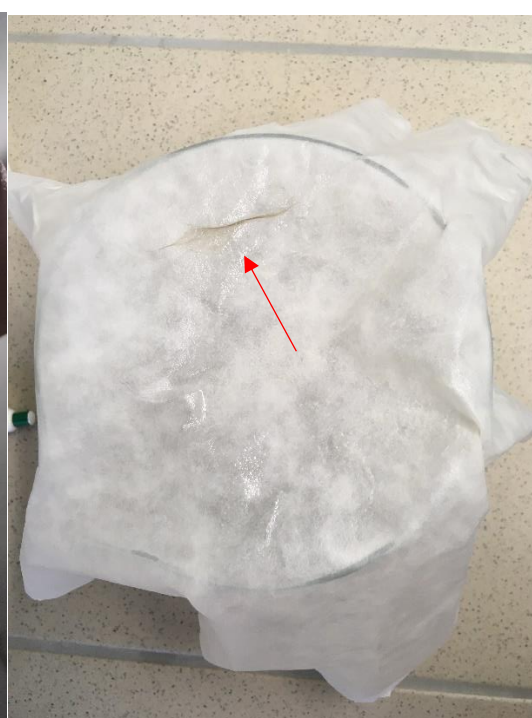


Obrázek 87: Chování čedičových vláken v prostředí ASSW a SSW

Čedičová vlákna v prostředí SSW mají nápadně podobné chování jako v prostředí ASSW s tím rozdílem, že nárůst v 7 dnech není tak dominantní. Zdá se tedy, že alkalické složky roztoku ASSW umocňují chování roztoku SSW, jak je patrné z obrázku 87.



Obrázek 88 a 89: Přischlá vlákna v hrdle baňky a Nasátý shluk vláken v sušárně

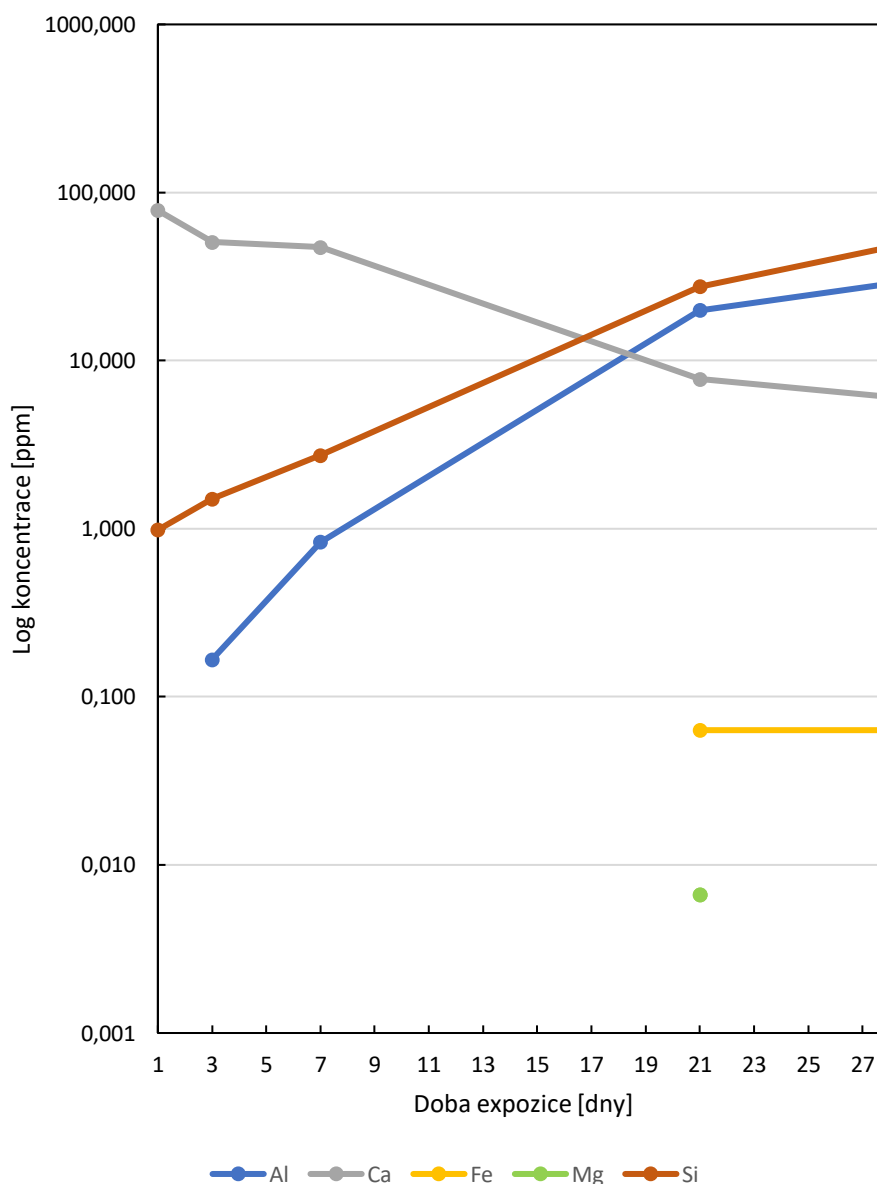


Obrázek 90 a 91: Rozptýlená vlákna v roztoku a Shluk vláken zachycený filtračním papírem

4.1.6 Reakce simulovaných prostředí s vlákny

Hlavním důvodem tohoto experimentu bylo potvrdit předpoklad, že, čedičová vlákna budou se simulovanými prostředími reagovat. To by se potvrdilo změnami v chemickém složení roztoků po expozici vlákny. Z jednotlivých analýz a průměrných denních hodnot po 1, 3, 7, 21 a 28 dnech jsou vyhotoveny grafy pro každé konkrétní prostředí, které jsou popsány níže.

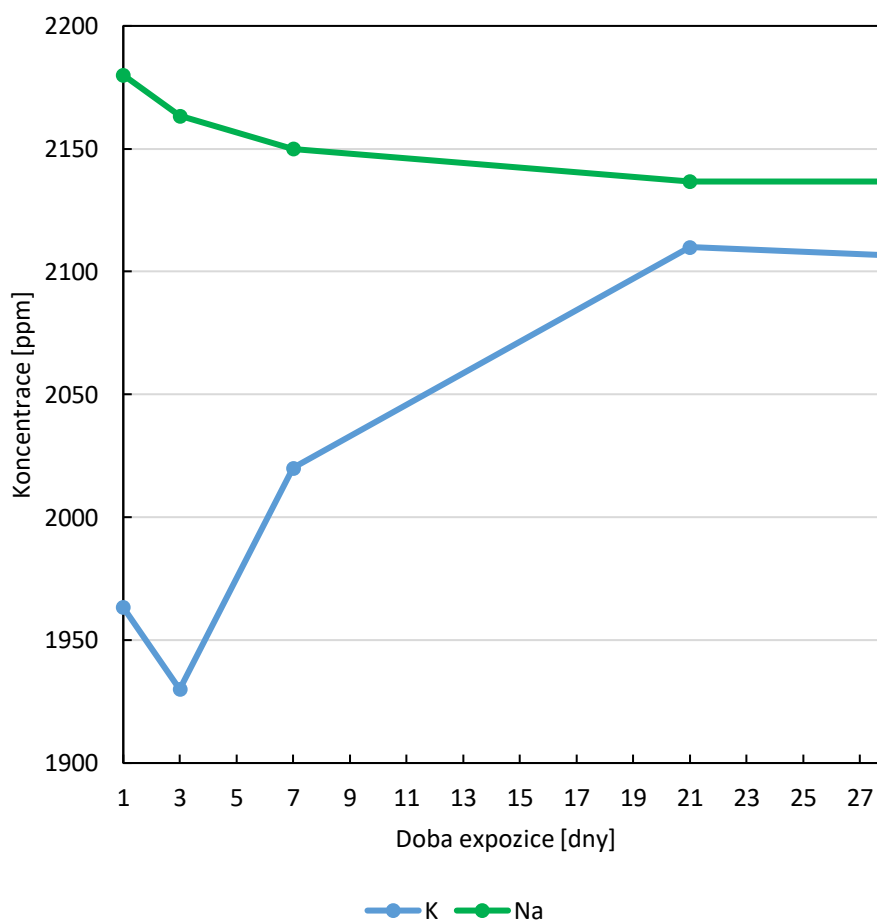
ASSW



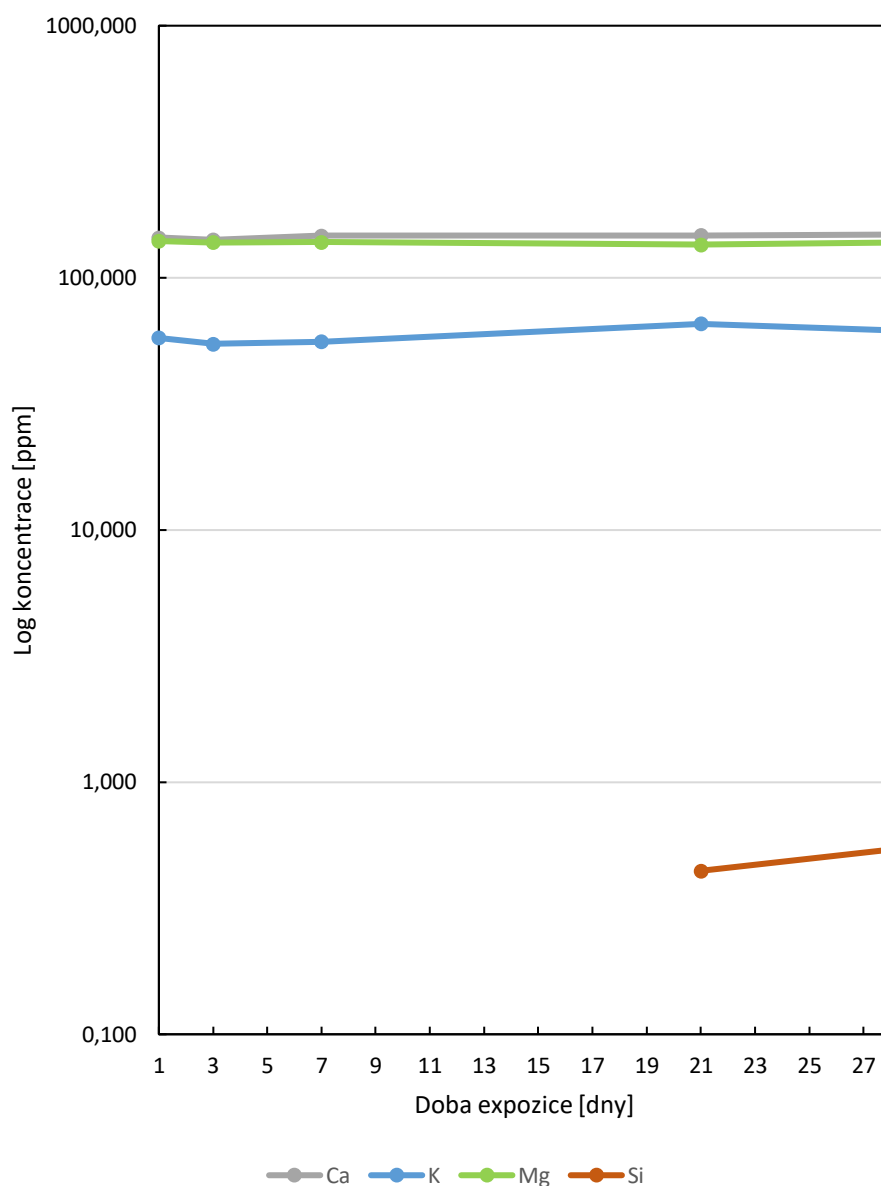
Obrázek 92: Změny koncentrací 6 prvků v prostředí ASSW

Při pohledu na grafy věnované prostředí ASSW je patrný pokles koncentrace Ca a Na, což naznačuje vázání těchto prvků na vlákna. Současně s tím je zjevné zvyšování koncentrace Si a Al, přičemž výskyt prvků Al v roztoku nastává až mezi 1. a 3. dnem v interakci s vlákny. Z měření po 21 dnech je patrné první zvýšení koncentrace Fe, které má až do 28 dne konstantní hodnotu. Z této skutečnosti se mohou vyvodit dvě teoretická

odůvodnění. K oddělení atomů Fe dojde pouze z povrchu vláken, kdy další atomy více ke středu jsou chráněny atomy jiných prvků k roztoku inertním, nebo že mezi 7. a 21. dnem dojde k oddělení určitého množství atomů Fe, aby následně vznikající vrstva z prvků Na a Ca na vláknech překryla atomy Fe a zabránila tak jejich oddělení. Při porovnání koncentrace K v roztoku z prvního a posledním měřeného dne je patrné stoupání, které ovšem mezi těmito dny drobně kolísá. Mezi 1. a 3. dnem, respektive mezi 21. a 28. měřeným dnem dochází k poklesu koncentrace K v roztoku. Vzhledem k vysoké koncentraci prvku v roztoku může být toto kolísání chybou v měření. Přítomnost atomů Mg byla v roztoku zjištěna pouze 21. den měření z čehož lze vyvodit, že mezi 7. a 21. dnem došlo k uvolnění tohoto prvku z vláken a následně mezi 21. a 28. dnem k opětovnému navázání zpět na vlákna. Nebo se jedná o kontaminaci prvku z okolí nebo vláken. U tohoto prostředí nebyla zaznamenána ani drobná koncentrace Ti, z toho lze vyvodit tři možné závěry. Prvek je k prostředí inertní a má dobré protikorozní vlastnosti, koncentrace simulovaného prostředí je nízká k spuštění reakce, popřípadě vzhledem k malému procentuálnímu zastoupení Ti ve vláknech není dostatek atomů prvku v kontaktu s prostředím, aby s ním mohl reagovat.



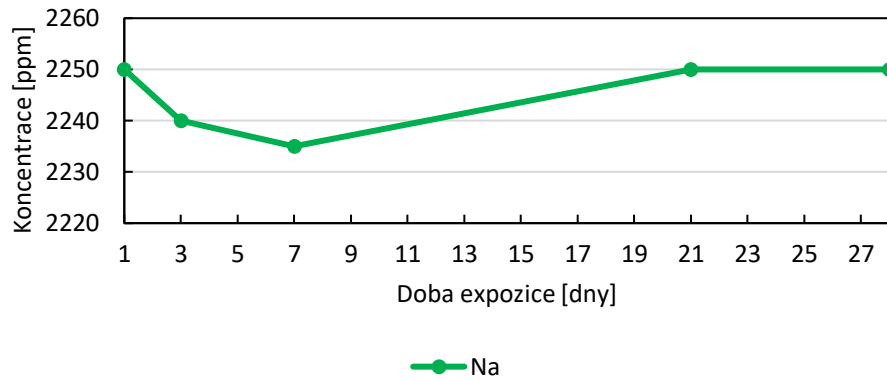
Obrázek 93: Změny koncentrací 2 prvků v prostředí ASSW



Obrázek 94: Změny koncentrací 4 prvků v prostředí SSW

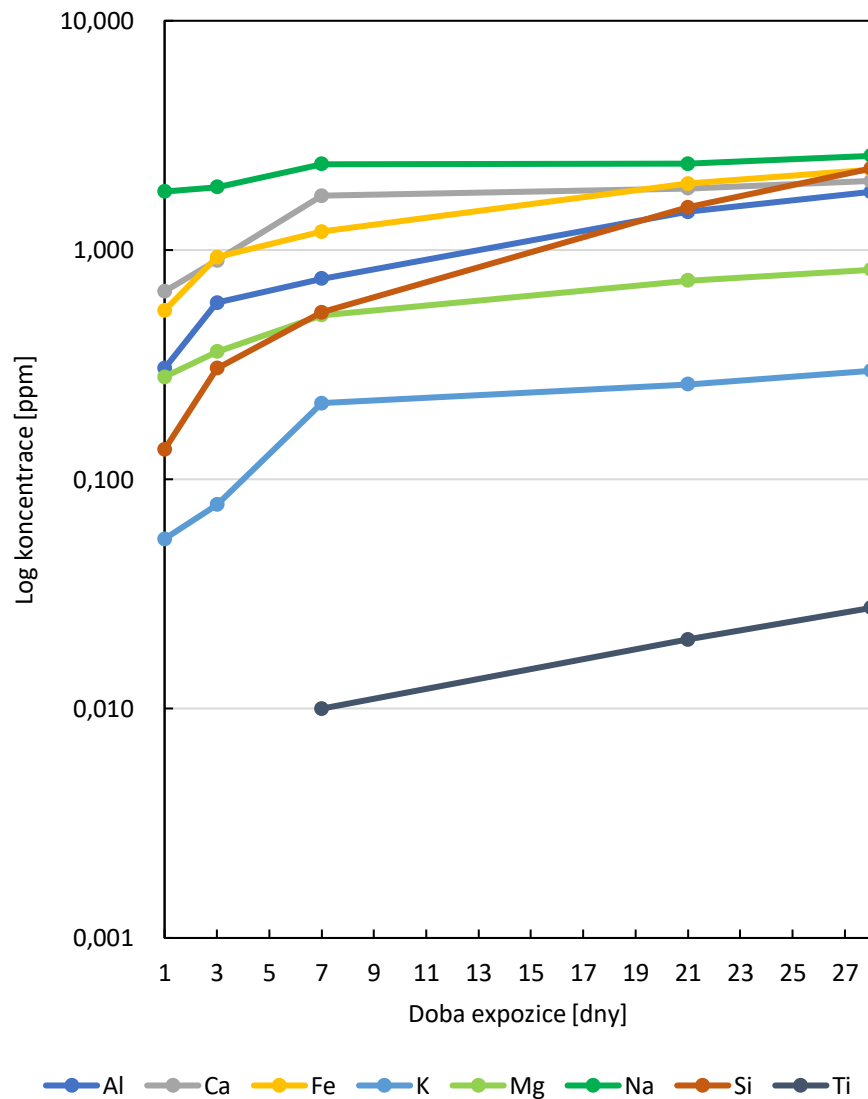
Z grafů prostředí SSW jsou u prvků Ca a Mg v čase patrné koncentrace blízké konstantě. Toto tvrzení se opírá i o hodnoty variačních rozpětí. Pro prvek Ca je variační rozpětí 6,97 ppm, což odpovídá přibližně 4,7 % z maxima a pro prvek Mg je variační rozpětí 4,33 ppm, což odpovídá přibližně 3,1 % z maxima. Jedná se tedy o velice drobné změny, z kterých není reakce roztoků s vlákny dostatečně průkazná. Z hodnot koncentrací pro prvek Si je patrné, že v prostředí dojde k reakci až mezi 7. a 21. dnem expozice, přičemž z hodnot mezi 21. a 28. dnem je patrná pozvolná rostoucí tendence koncentrace. Koncentrace prvku K v prostředí po 1. dni klesá a od 3. dne až do 21. dne se pozvolna zvyšuje na svou maximální hodnotu, z které poté opět drobně klesne. Opět se ale jedná o změny nikterak zásadní, aby jasně vypověděly o trendu. Změny koncentrace Na z roztoku mají do 7 dnů klesající trend, z kterého se do 21 dnů obrátí do nárůstu na hodnotu, která se poté ustálí až do 28. dne. Je zajímavé, že koncentrace tohoto prvku

v roztoku je stejná první i poslední, respektive předposlední měřený den a v průběhu se mění. S ohledem na vysokou koncentraci tohoto prvku je výkyv drobný.



Obrázek 95: Změny koncentrace 1 prvku v prostředí SSW

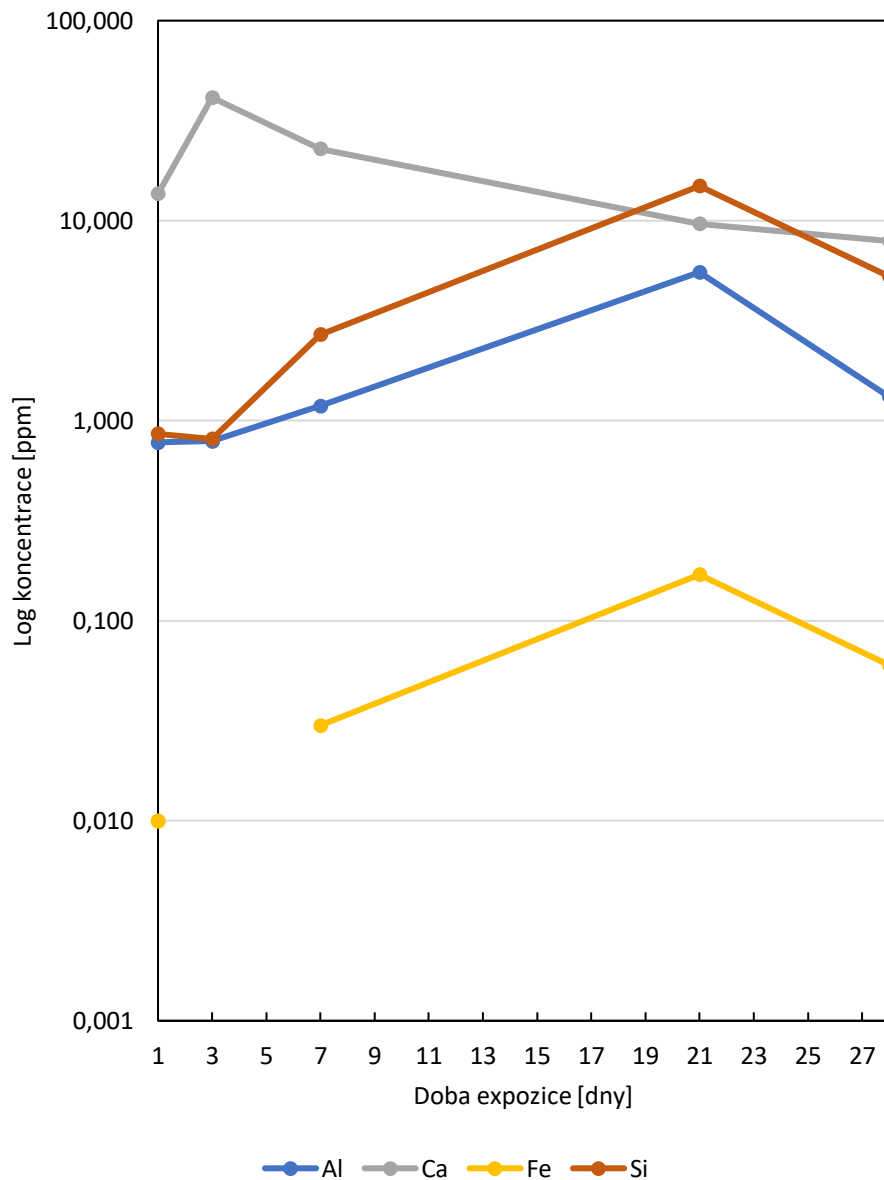
pH3



Obrázek 96: Změny koncentrací 8 prvků v prostředí pH3

Z přiloženého obrázku 96 je patrné, že i slabě koncentrovaná kyselina chlorovodíková reaguje se všemi prvky obsaženými v čedičových vláknech a postupně je z vláken odebírá, což se projevuje nárůstem jejich koncentrací v roztoku v čase. Mezi 3. a 7. dnem expozice dojde k reakci tohoto simulovaného prostředí i s atomy Ti. Tato reakce je s ohledem na ostatní simulovaná prostředí ojedinělá.

SPS

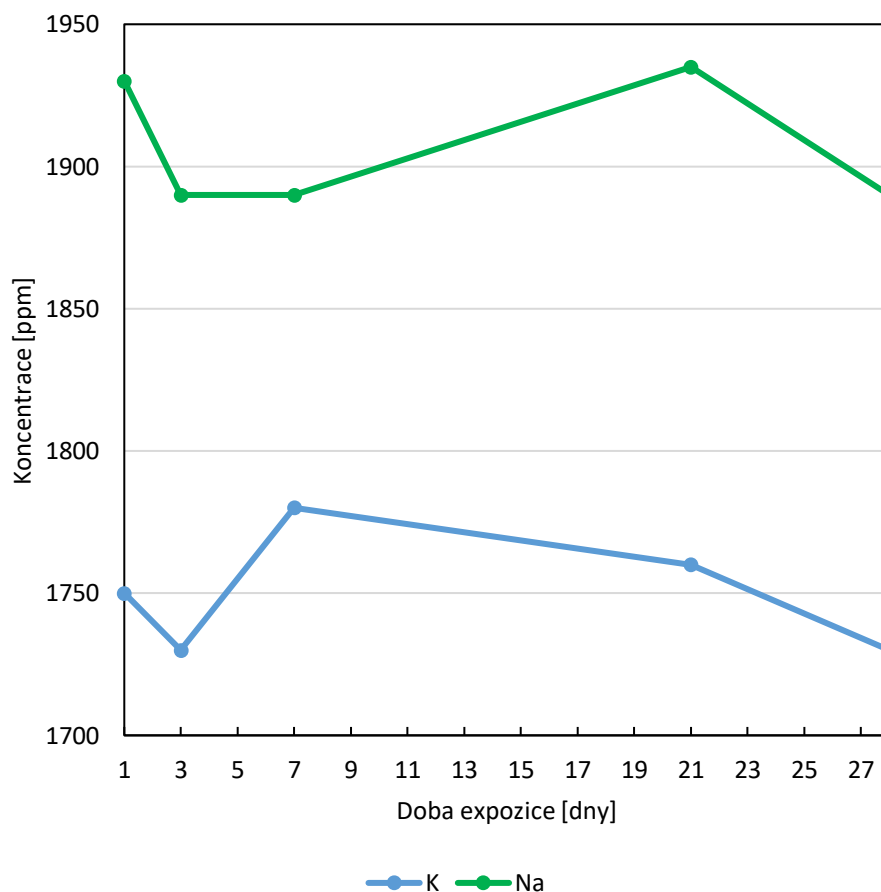


Obrázek 97: Změny koncentrací 4 prvků v prostředí SPS

Na obrázku 97 zobrazující změny koncentrací prvků v prostředí SPS je u prvku Al pozorovatelný nárůst koncentrace až do 21. měřeného dne, od kterého následně hodnota koncentrace klesá. Chování koncentrace prvku Si je velice podobné pouze s tím rozdílem, že se hodnota koncentrace po prvním dni nepatrně snižuje místo mírného zvýšení. Od třetího dne již začne stoupat jako již zmíněný prvek Al a dosahuje 21. den

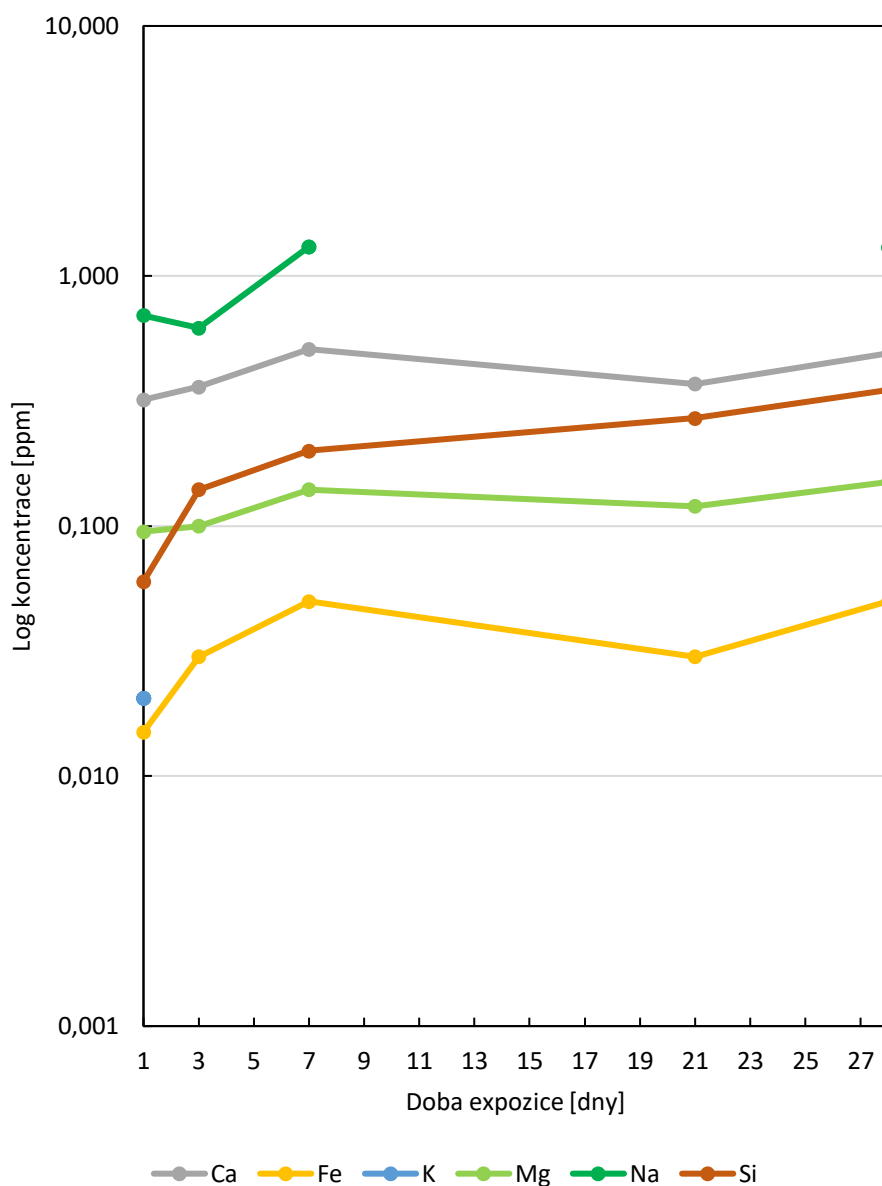
maxima koncentrace. Koncentrace prvku Ca během prvních 3 dní stoupá, poté až do 28. dne klesá na své minimum. V prostředí se po jednom dni objevuje drobné množství Fe, které ovšem není po 3 dnech rozbořem nalezeno. Nicméně jeho koncentrace se opět zvýší mezi 3. a 21. dnem a následně do 28. dní dojde k jeho opětovnému poklesu. Koncentrace prvků K a Na mají kolísavé tendence. Mezi 1. a 3. dnem obě koncentrace z počáteční klesají. Prvek K následně v 7. dni dosáhne maximální koncentrace a pozvolna se snižuje až do 28. dne na svou minimální hodnotu totožnou s 3. dnem. Koncentrace Na po zmíněném poklesu se mezi 3. a 7. dnem ustálí, do 21. dne se zvýší a poté do 28. dne klesne. Vzhledem k vysokým koncentracím těchto dvou prvků, se ono kolísání jeví spíše jako chyba a koncentrace je víceméně neměnná.

Z uvedeného popisu chování roztoku během 28. dní a grafu je patrné chování jednotlivých koncentrací prvků, které není jednoduše popsatelné. Jediný podobným znakem je dosažení maximální koncentrace u 4 prvků z 6. do 21. dne expozice. Dalším poznatkem z tohoto prostředí se jeví jeho inertnost, popřípadě nízká agresivita k prvkům Mg a Ti, které se v analýze simulovaného prostředí neobjevují.



Obrázek 98: Změny koncentrací 2 prvků v prostředí SPS

H₂O

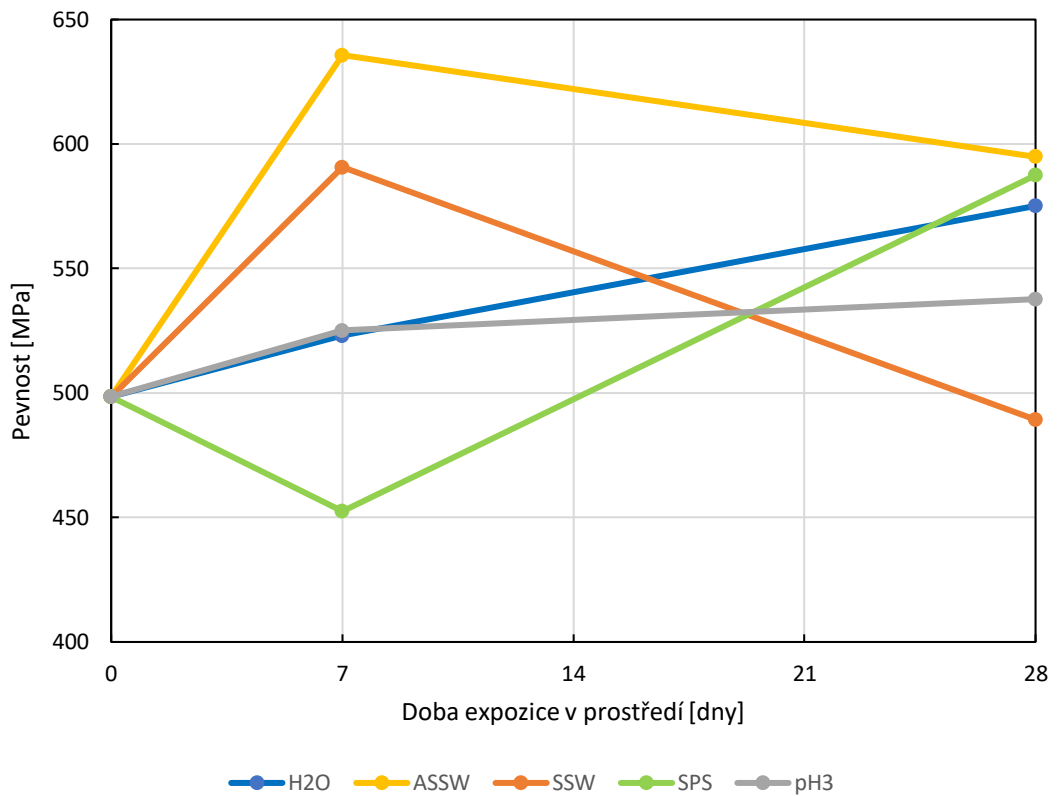


Obrázek 99: Změny koncentrací 6 prvků v prostředí H₂O

Při pohledu na Obrázek 99 zobrazující koncentrace prvků v prostředí H₂O je možné pozorovat absenci prvků Ti a Al. Koncentrace Si v roztoku od prvního dne stoupá, což naznačuje jeho pozvolné uvolňování z vláken. Koncentrace prvků Fe, Mg a Ca je v prvních 7 dnech rostoucí, kde poté následuje podobné chování pouze s jinou intenzitou. Mezi 7. a 21. dnem dochází k poklesu koncentrací a následně mezi 21. a 28. dnem dochází k nárůstu koncentrací těchto prvků. Při porovnání výsledků z prvního a posledního měření je u prvků Ca, Fe, Mg, Na a Si viditelné zvýšení koncentrace, což dokládá uvolňování těchto prvků z vláken do roztoku, pouze se liší tempo a průběh v mezidobí. Koncentrace prvku Na v roztoku nejdříve klesá, poté stoupne a opět klesne až na nulovou koncentraci po 21 dnech. Následně ovšem dojde do 28 dnů skoro k totožné koncentraci jako z měření po 7 dnech. Pozoruhodné je chování koncentrace K, který byl v simulovaných prostředích naměřen pouze po 1 dni. Dá se tedy předpokládat, že se

tento prvek v prostředí H₂O během 1 dne z vláken uvolní a následně se do 3 dnů zpět naváže. Je otázkou, zda-li je nejvyšší koncentrace dosažena po 1 dni expozice nebo například po 2. Další možnou příčinou tohoto ojedinělého výskytu je kontaminace vzorku z okolí při manipulaci, což je více pravděpodobné.

4.1.7 Pevnost v tahu



Obrázek 100: Vlákna vystavená simulovaným prostředím

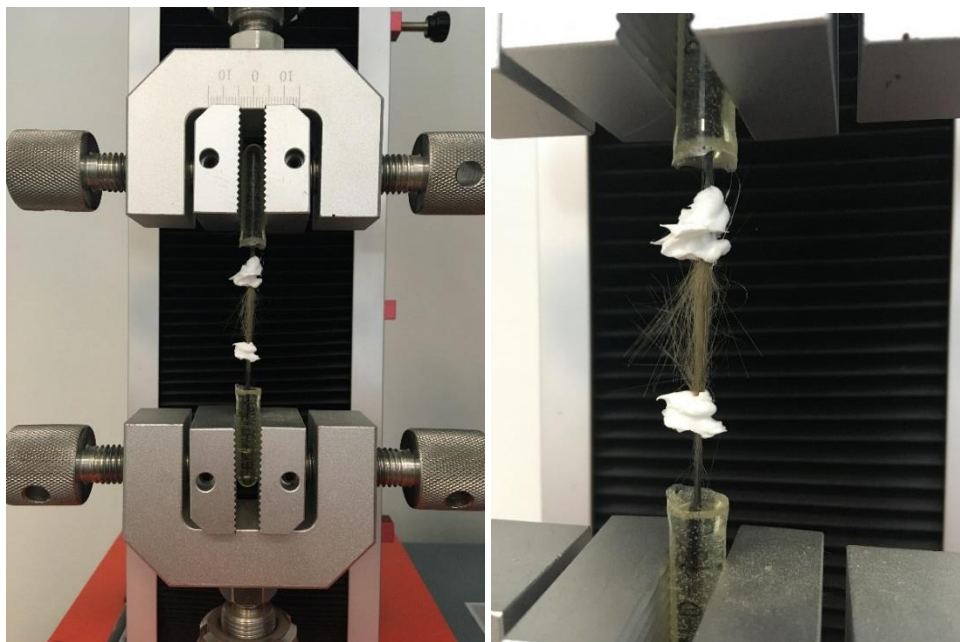
Tabulka 48: Vlákna vystavená simulovaným prostředím, hodnoty

Prostředí	Vývoj pevnosti ve dnech [MPa]		
	0	7	28
H ₂ O	498,5	523,0	575,1
ASSW	498,5	635,7	594,9
SSW	498,5	590,7	489,3
SPS	498,5	452,5	587,5
pH3	498,5	525,2	537,7

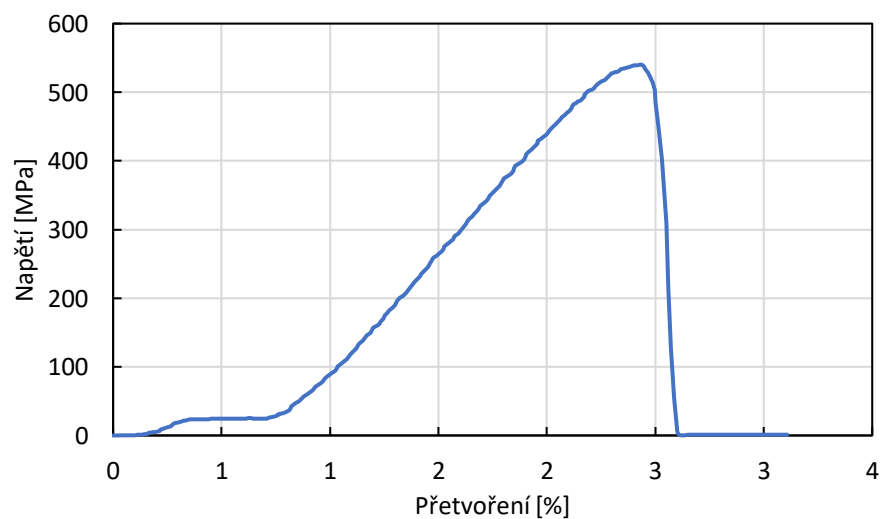
Vývoj pevností v tahu čedičových vláken by se dal rozdělit do 3 kategorií podle průběhu pevnosti v čase patrném z obrázku 100.

- Během celé doby expozice dochází k nárůstu pevnosti, která je po 28 dnech maximální. Průběh nárůstu se může lišit a je takřka lineární (H_2O), nebo se nárůst pevnosti s dobou expozice zmenšuje (pH3).
- V prvních 7 dnech expozice dochází k nárůstu pevnosti na maximální hodnotu. Poté mezi 7 a 28 dnem dochází k poklesu pevnosti, která může dosáhnout buďto nižší hodnoty než referenční (SSW) nebo vyšší (ASSW).
- Pevnost v prvních 7 dnech klesne na minimální hodnotu a poté mezi 7 a 28 dnem stoupne na svou maximální hodnotu (SPS).

Po 28 dnech expozice vykázala vlákna z prostředí ASSW, H_2O , PSP a pH3 větší hodnoty pevnosti než vlákna neexponovaná. Pevnost nižší, než hodnota referenční vykázala vlákna z prostředí SSW.



Obrázek 101 a 102: Typické poškození vláken v tahu a Detail porušení



Obrázek 103: Typický pracovní diagram čedičových vláken

4.2 BFRP tyče

4.2.1 Typ kotevního materiálu a kotevní délka

Pro korektní provedení tahových zkoušek referenčních i exponovaných tyčí, bylo potřeba zajistit vhodnou kotevní délku a její provedení. Při zkouškách na lisu s hydraulickými čelistmi docházelo k poškození trubek, navíc i k prokluzu vzorku tyče. Čelisti nedokázaly uchopit celou kotevní délku. Vizuálně bylo patrné, které kotevní délky a kotevní materiály se nedeformují pod zatížením. Kotevní délka 200 mm byla hraniční, kdy některé vzorky byly porušeny prokluzem a jiné se řádně přetrhly v tyči. Proto byla stanovena kotevní délka 225 mm. Jako nejlepší typ kotevního materiálu byla vyhodnocena vinylesterová chemická malta *FIS VL 300 T* a to na základě vizuálních poruch ostatních kotevních materiálů. Současně s tím vzorky s vytvořenými otvory v trubkách vykazovaly lepší chování. Na tomto základě jsou v dalších vzorcích vždy minimálně 4 otvory.

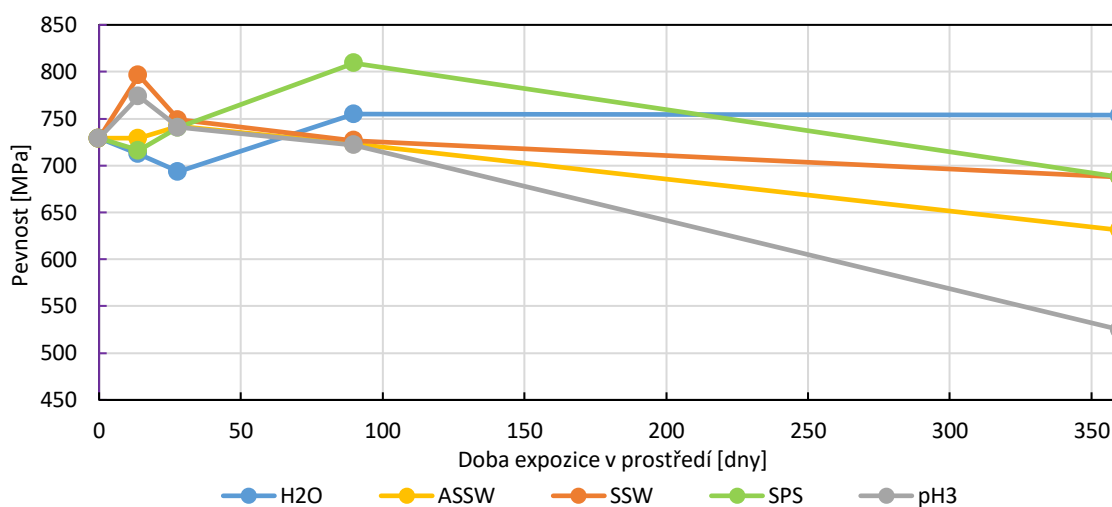


Obrázek 104: Viditelné proklouznutí kotevního materiálu v neděrované trubce

Vyhotovení ocelového rámu, který vytvářel zatížení již u hrdla trubek značně vylepšil proces zkoušení. Čelisti nedeformovaly trubky ze stran a bylo jím zajištěno působení kotevního materiálu v celé délce kotevních délek.

4.2.2 Pevnost v tahu

Z přiloženého obrázku 105 a hodnot v tabulce 49 jsou patrná chování pevností BFRP tyčí, které byly vystaveny jednotlivým simulovaným prostředím.



Obrázek 105: Vývoj pevnosti BFRP v čase a prostředí

Tabulka 49: Hodnoty pevnosti BFRP

Prostředí	Vývoj pevnosti ve dnech [MPa]				
	0	14	28	90	360
H ₂ O	728,9	712,4	693,6	754,9	753,7
ASSW	728,9	728,9	741,9	723,0	631,0
SSW	728,9	796,2	749,0	726,6	687,7
SPS	728,9	716,0	740,7	809,2	687,7
pH3	728,9	773,8	740,7	721,9	524,9

Při prvním pohledu na graf je patrný pokles pevnosti po 360 dnech u všech BFRP tyčí kromě těch vystavených prostředí H₂O. Tyče z tohoto prostředí nevykazují chováním podobnosti s tyčemi z jiných prostředí. Z referenční hodnoty dochází během prvních 28 dní k poklesu pevnosti, která poté až do 90 dní stoupá a překoná i referenční. Hodnota pevnosti naměřená po 360 dnech u tohoto prostředí je v rámci jednotek MPa totožná s hodnotou po 90 dnech expozice.

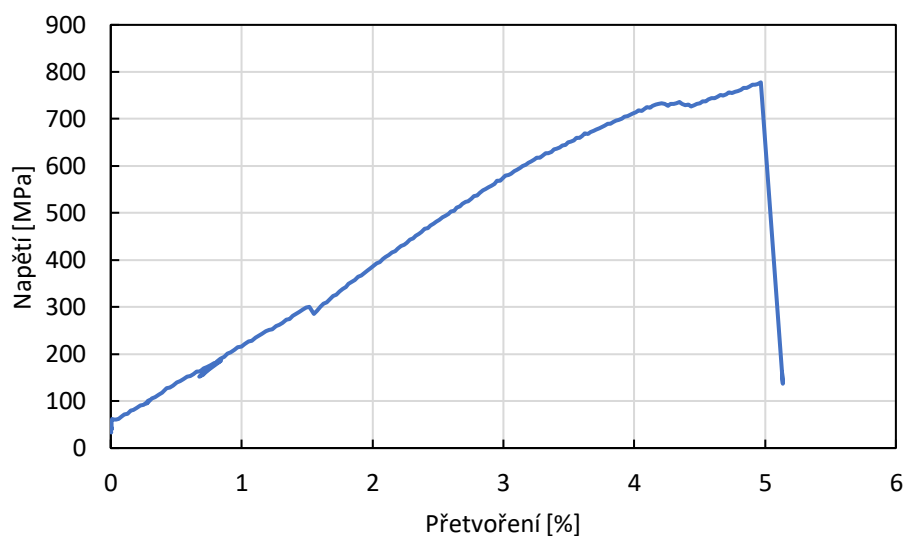
Při bližším pohledu je vidět, že u dvou prostředí s nejnižší hodnotou pH (pH3 a SSW) dochází v prvních 14 dnech k nárůstu pevnosti na maximální hodnoty daného prostředí a poté dochází k poklesům pevností až do konce experimentu. Je nutno dodat, že pevnosti tyčí z prostředí pH3, které má nejnižší hodnotou pH (3,1), má vždy nižší pevnosti oproti tyčím z prostředí SSW, které má druhou nejnižší hodnotou pH (5,65).

Tyče z prostředí s nejvyššími hodnotami pH (ASSW a SPS) nemají podobné chování pevností i přes to, že hodnoty jejich pH (12,73 a 12,91) jsou si velmi blízké. Z toho lze vyvodit, že rozdílné chování způsobuje i rozdílné chemické složení jednotlivých simulovaných prostředí.



Obrázek 106: Druhy porušení BFRP po 360 dnech expozice

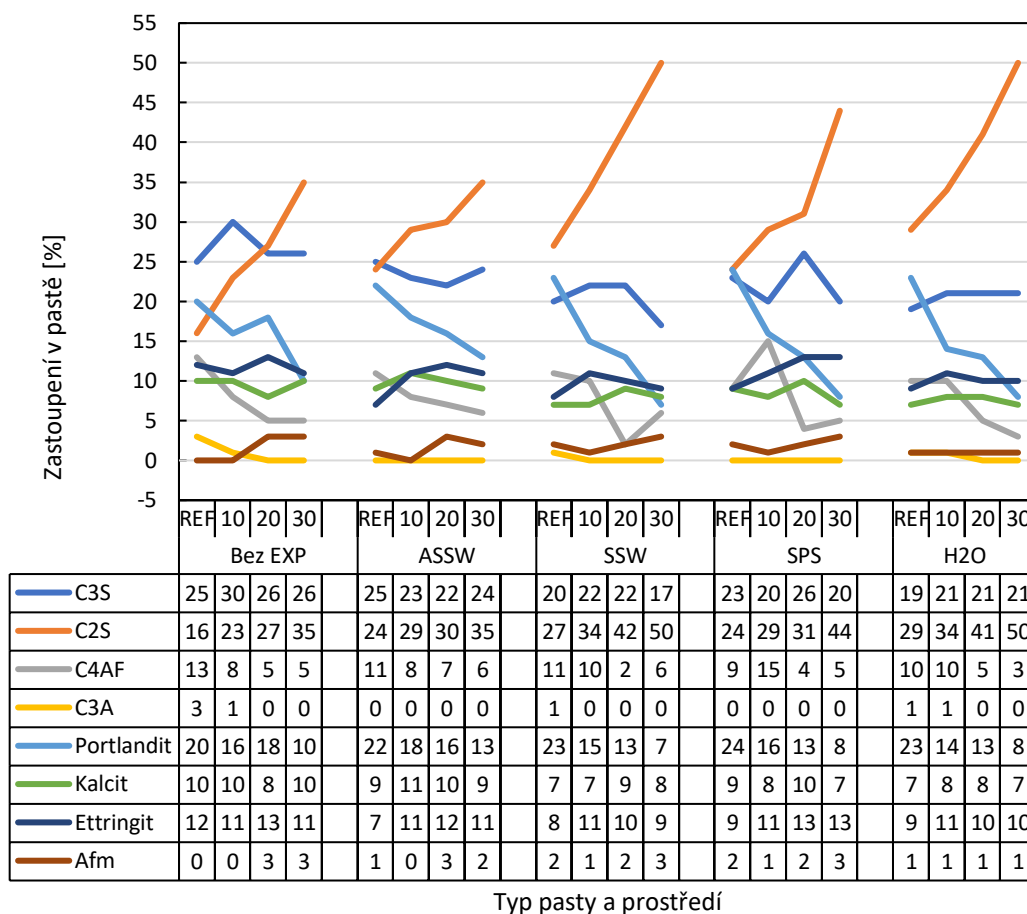
Po roční expozici v jednotlivých simulovaných prostředích došlo na tyčích z prostředí ASSW a SPS k vizuálnímu zesvětlení povrchu. Tyče z těchto dvou prostředí zároveň vykazaly odlišné druhy porušení při zkoušce tahu.



Obrázek 107: Pracovní diagram referenční BFRP tyče

4.3 Beton s čedičovými vlákny

4.3.1 Rentgenová difrakční metoda (XRD)



Obrázek 108: Změny složení past v závislosti na jejich složení a typu simulovaného prostředí po 3-měsíční expozici

Toto měření potvrdilo, že se stoupajícím množstvím mikrosiliky v pastě s čedičovými vlákny klesá obsah Portlanditu. Ten je v cementových pastách hlavním tvůrcem vysokého pH a dá se tedy předpokládat pokles pH s nárůstem podílu mikrosiliky.

4.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých vzorků směsí s čedičovými vlákny jsou zobrazeny na obrázku 109.

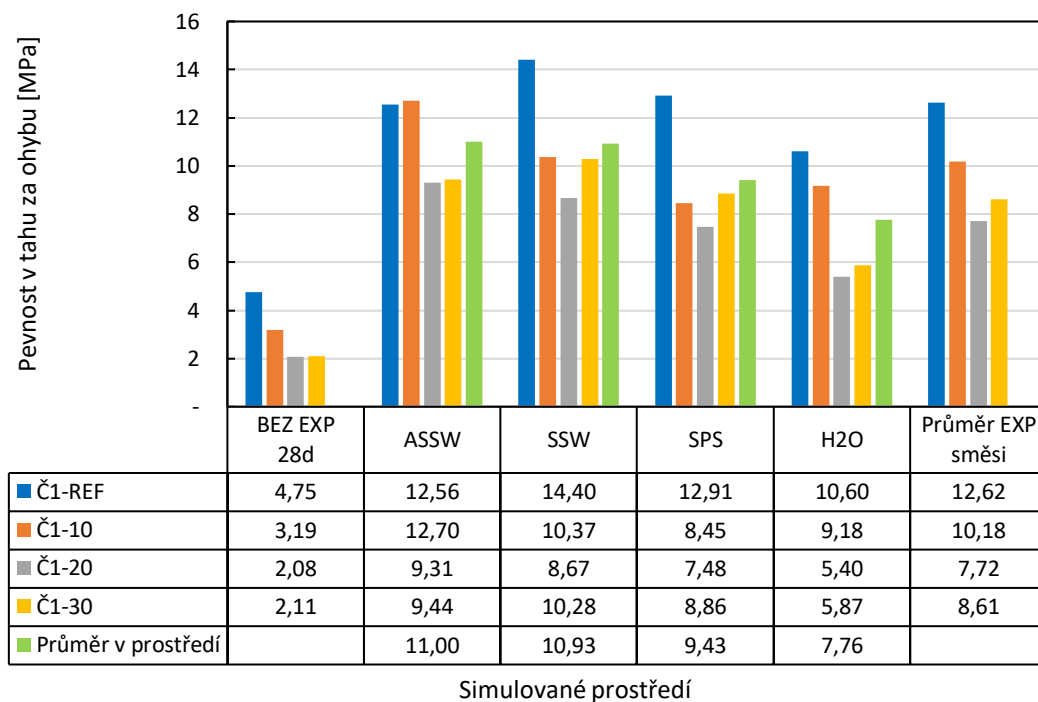
Jak je z hodnot patrné, nejvyšších průměrných hodnot pevnosti dosáhla směs Č1-REF bez náhrady cementu mikrosilikou, kdy tato směs dosáhla i nejvyšších absolutních hodnot v jednotlivých prostředích, vyjma prostředí ASSW, kde je pevnost této směsi pouze o 0,14 MPa nižší nežli Č1-10. Z vyhodnocení variačního rozpětí a jeho hodnoty 3,80 MPa u této směsi, lze prohlásit, že pevnost v simulovaných prostředích je nejméně proměnná. Lze usoudit, že příměs mikrosiliky má drobný efekt na zvyšování různorodosti pevnosti směsí napříč prostředími, což dokazují i nepatrně vyšší hodnoty variačního rozpětí u směsí s mikrosilikou.

Nejmenší průměrné i absolutní pevnosti v tahu za ohybu byly naměřeny u směsi Č1-20 ve všech prostředích. Pro tuto směs byla nejnižší naměřená absolutní hodnota 5,40 MPa v prostředí H₂O a naopak nejvyšší hodnota 9,31 MPa v prostředí ASSW.

Předpokládalo se, že se zvyšováním podílu mikrosiliky, a tím i snižováním pH v pastách bude docházet k poklesu degradace vláken, a ty budou moci přenášet větší zatížení. Z naměřených hodnot je patrné, že se zvyšováním podílu mikrosiliky, kromě prostředí ASSW a směsi Č1-10, dochází oproti směsi Č1-REF k poklesu pevnosti. Snižování hodnoty pH tedy nemá tak zásadní efekt na pevnosti vláken, aby byla vlákna schopna kompenzovat zvyšující se množství mikrosiliky která snižuje pevnost.

pH jednotlivých prostředí měla efekt poškozování vláken urychlit nebo naopak zpomalit. V roztoku s nejvyšší hodnotou pH (SPS) není nejnižší hodnota průměru v prostředí a současně v roztoku s nejnižší hodnotou pH (SSW) není naměřena nejvyšší hodnota průměru v prostředí.

Při porovnání směsi Č1-20 a Č1-30 je zvýšením mikrosiliky dosaženo vyšší pevnosti v tahu za ohybu. Průměrná hodnota pevnosti směsi Č1-30 napříč prostředím je i tak nižší, než pro směs Č1-REF. Není zcela jisté, jestli toto navýšení pevnosti souvisí s poklesem degradace vláken.



Obrázek 109: Pevnost v tahu za ohybu po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích

4.3.3 Pevnost v tlaku

Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků směsí s čedičovými vlákny jsou zobrazeny i s hodnotami na obrázku 110.

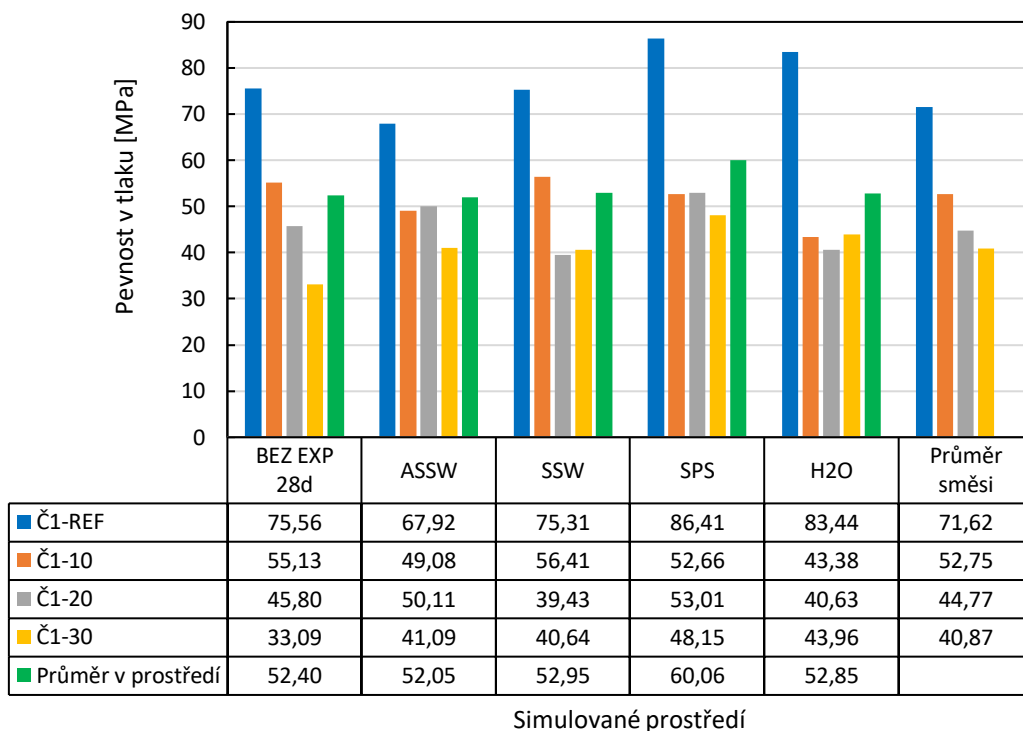
Nejvyšších průměrných i absolutních hodnot pevnosti dosáhla směs Č1-REF ve všech simulovaných prostředích, přičemž hodnota pevnosti byla vždy alespoň o 25 % vyšší než pevnostně následující směsi. Nejvyšší hodnotu pevnosti (86,41 MPa) měla směs v prostředí SPS a naopak nejnižší (67,92 MPa) v prostředí ASSW.

Pevnosti jednotlivých směsí mohou, podle průměrných hodnot směsi naznačovat, že s nahrazováním cementu mikrosilikou dochází k stejnoměrnému poklesu pevnosti. To ovšem není pravda, pokles pevnosti se s ohledem na vystavené prostředí mění a není lineární. I tak lze ale říct, že mikrosilika má negativní dopad na pevnost v tlaku. Rozdílné chování v prostředích by mohla být způsobena přítomností čedičových vláken a jejich rozdílným chováním. Variační rozpětí pevnosti v tlaku je u směsi Č1-REF nejvyšší (18,49 MPa), z čehož lze vyvodit, že nahrazování cementu mikrosilikou snižuje nejen pevnost, ale i rozdíly ve výsledné pevnosti napříč prostředími. To dokládá i pokles variačních rozptylů u směsí s mikrosilikou. Například hodnota variačního rozptylu 7,51 MPa u směsi Č1-30 je nejnižší ze všech ostatních směsí.

Nejvyšší průměrné hodnoty pevnosti v prostředí a hodnoty absolutní pevnosti byly dosaženy v prostředí SPS, vyjma směsi Č1-10. V ostatních prostředích jsou průměrné hodnoty pevnosti v prostředí nižší, ale v malém vzájemném rozsahu (52,05; 52,85 a 52,95 MPa).

Nejnižší průměrné pevnosti bylo dosaženo v prostředí H₂O, kde i směs Č1-10 vykázala svou nejnižší absolutní hodnotu pevnosti oproti ostatním prostředím. Směsi Č1-20 a Č1-30 naopak vykázaly nejnižší absolutní pevnost v prostředí SSW.

V prostředí s nejvyšší hodnotou pH (SPS) se předpokládalo dosažení nejnižších hodnot pevnosti kvůli zvýšené degradaci vláken. Z průměrných hodnot v prostředí je patrný pravý opak.



Obrázek 110: Pevnost v tlaku po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích

4.3.4 Hmotnostní nasákavost

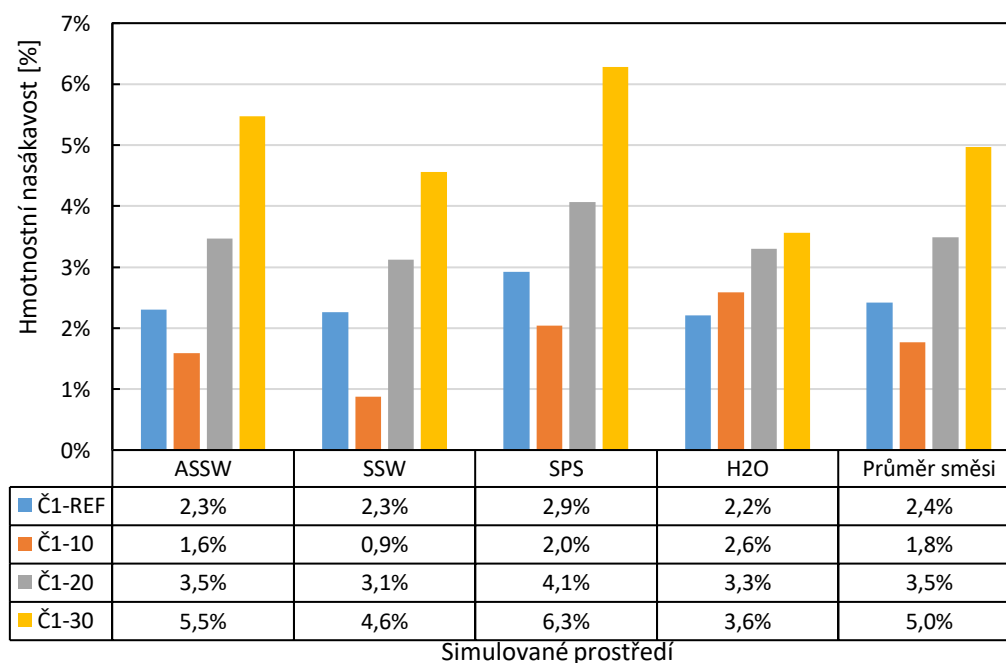
Hmotnostní nasákavost past s čedičovými vlákny a s rozdílným množstvím mikrosiliky je zobrazena na obrázku 111.

Část grafu zobrazující průměrné hodnoty nasákavosti jednotlivých směsí v simulovaných prostředích vypovídá, že při nahrazení 10 % cementu mikrosilikou dojde průměrně k poklesu nasákavosti o 1,8 % napříč prostředími. Při detailním pohledu na graf, k poklesu nasákavosti u této směsi opravdu dochází, ovšem až na prostředí H₂O, kde v jakožto jediném dochází k nárůstu nasákavosti, oproti směsi bez mikrosiliky, a to o 0,4 %. Fakt, že v tomto prostředí jako v jediném dochází k nárůstu nasákavosti, může mít příčinu v absenci jakýchkoli prvků, které jinak v ostatních simulovaných prostředích reagují s prvky z vláken. Reakce může vytvářet krystaly nebo nějaké formy gelu, které zabraňují prostupu vody do trámečku, nebo vyplňují póry v trámečcích a to může zabraňovat jejich vyplnění vodou. Tato domněnka se současně opírá o vizuální a hmatatelné rozdíly evidované při vyjímání trámečků ze simulovaných prostředí. Plastová

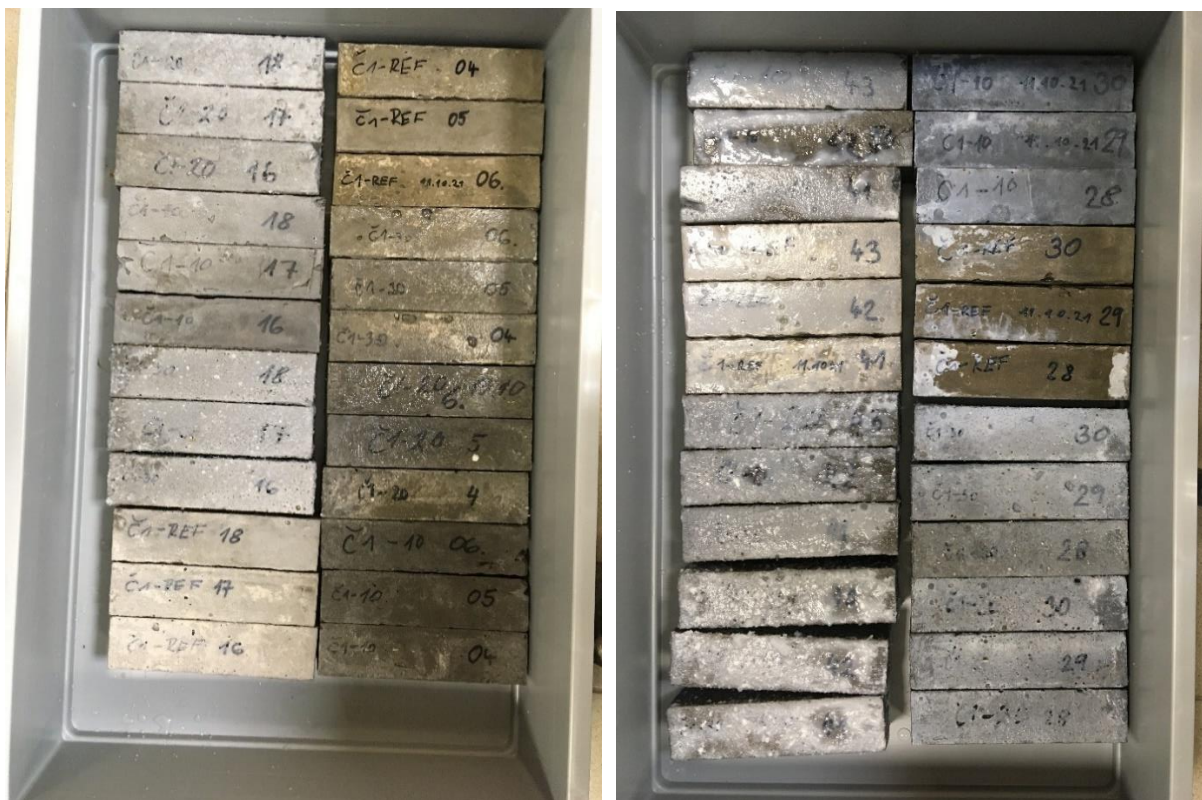
bedýnka s H₂O byla nejméně znečištěna a zakalena. V ostatních prostředích byly trámečky pokryty různými konzistencemi gelovité kaše, na některých trámečkách byly i hmatatelné produkty krystalizace. Zmíněný 1,8 % pokles nasákavosti může být připsán rozměrovým vlastnostem mikrosiliky. Ta do určitého množství ve směsi vyplní mezery mezi cementovými zrny, které by jinak byly nevyplněny a potenciálně přístupny vodě. Dochází k vylepšení křivky zrnitosti dané směsi. Při překročení určitého množství, v našem případě oněch 10 %, dochází k opačnému efektu, vzniká větší počet menších pórů. Současně, samotná mikrosilika je schopna přijímat více vody než cement.

Nejvyšších hodnot nasákavostí pro každý typ směsi bylo dosaženo v prostředí SPS s průměrnou hodnotou 3,83 %. Vyjma nasákavosti směsi Č1-10, ta byla nejvyšší v prostředí H₂O. Naopak nejmenší průměrnou hmotnostní nasákavost mělo prostředí SSW s průměrem 2,70 %.

Souhrnně lze tedy říci, že nahrazení cementu do 10 % mikrosilikou v pastách s čedičovými vlákny má snižující dopad na nasákavost v prostředích ASSW, SSW a SPS. V prostředí H₂O je variační rozpětí nasákavosti roven 1,4 % což je oproti ostatním prostředím s hodnotami 3,7 % - 4,2 % nejmenší hodnota. Z toho lze vyvodit že v tomto prostředí jsou si směsi nejvíce podobné s ohledem na nasákavost.



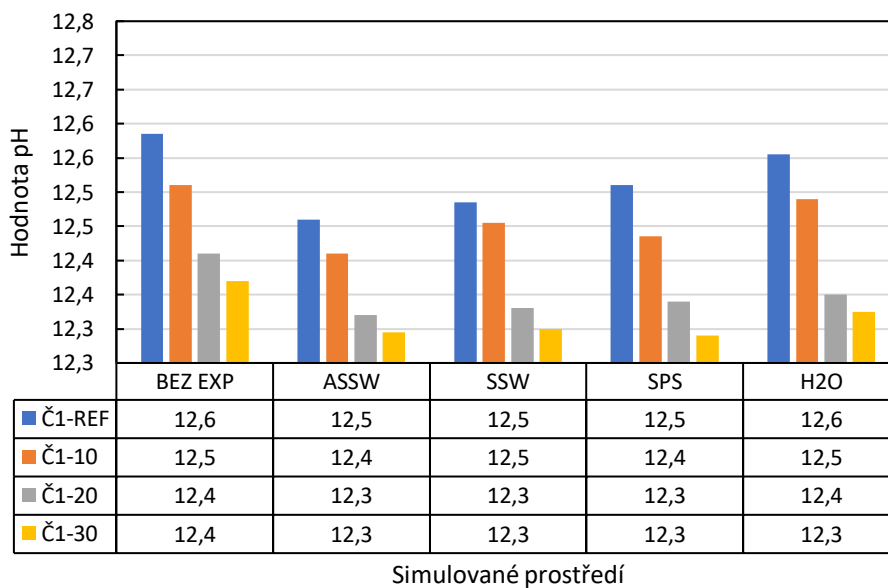
Obrázek 111: Hmotnostní nasákavosti pastových směsí s čedičovými vlákny po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích



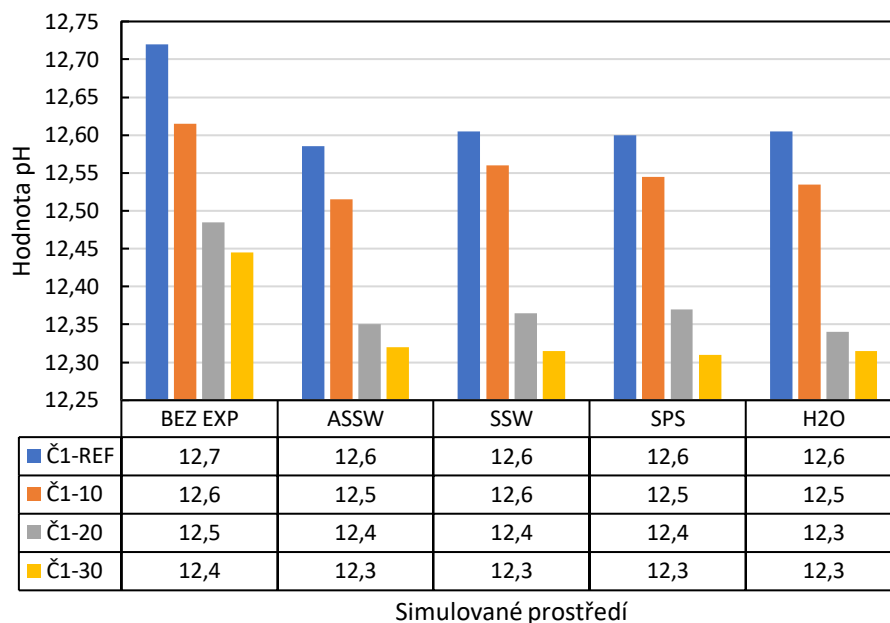
Obrázek 112 a 113: Trámečky po vyjmutí ze simulovaných roztoků a opláchnutí

4.3.5 Hodnota pH

Na základě měření hodnot pH jsou vyhotoveny 2 přiložené grafy. Měření proběhlo na vzorku interagujícího prášku s destilovanou vodou. Obrázek 114 zobrazuje naměřené průměrné hodnoty po 1 hodině vzájemné interakce, Obrázek 115 zobrazuje naměřené průměrné hodnoty po 24 hodinách interakce.



Obrázek 114: Průměrné hodnoty pH po 1 hodině



Obrázek 115: Průměrné hodnoty pH po 24 hodinách

Při pohledu na oba grafy jsou vidět totožné znaky, jako je pokles hodnoty pH se zvyšující se koncentrací mikrosiliky bez ohledu na to, kterému prostředí byla směs vystavena, byla-li vůbec. To má vysvětlení v dějích spojených s hydratací cementu. Alkalický portlandit je spotřebováván reakcemi s mikrosilikou, čímž klesá obsah hlavního tvůrce vysokého pH. Dalším společným znakem je, že hodnoty pH pro vzorky směsí nevystavených simulovaným prostředím mají vyšší hodnoty, než-li směsi vystavené.

Jednotlivá simulovaná prostředí tedy společně s mikrosilikou snižují pH past s čedičovými vlákny při jejich tříměsíční expozici.

4.4 Stručné shrnutí výsledků

Díky provedeným měřením je možné vyvodit následující poznatky pro čedičová vlákna:

- Vlákna mohou z procesu výroby na svém povrchu přenášet kontaminace prvky nebo sloučeninami. To se projevilo především přítomností S a NaCl.
- Při expozici vláken prostředím simulující beton dochází na jejich povrchu v místech bez korozních prvků pouze k drobným změnám v zastoupení oxidů prvků. Na vláknech dochází k vzniku korozních prvků obohacených o oxidy Ca a S. Koncentrace v prostředí u hlavních prvků (Fe, Al, Si) do 21. dne stoupá a poté dojde k obratu. Prvek Ca v prostředí nejdříve drobně zvýší koncentraci, která se poté až do konce experimentu snižuje.
- V prostředí vody nebyl na vláknech nalezen korozní produkt. Na povrchu těchto vláken dochází k poklesu množství oxidů hojně zastoupených prvků (Si, Al, Na a Mg) a naopak k nárůstu množství oxidů prvků méně zastoupených ve vláknech (Ca a Fe). Vlákna si v prostředí drží svou hmotnost. Prvek Al nebyl v roztoku po celou dobu naměřen, oproti tomu koncentrace Si jednoznačně v čase stoupá. Koncentrace prvků Ca, Fe, Mg a Na v čase rozdílně kolísají, ve výsledku ale koncentrace v roztoku stoupá.
- Kontakt vláken s prostředím kyseliny způsobuje na povrchu vláken bez korozních produktů zvýšení množství oxidů prvků hojně zastoupených (Si, Al, Na a Mg) a naopak snížení množství oxidů prvků méně zastoupených (Ca, Fe, K). Vlákna v prostředí svou hmotnost ztrácí. Koncentrace prvků v roztoku s vlákny se u všech s dobou naložení zvyšuje.
- Na povrchu vláken vystavených prostředí alkalické mořské vody nedochází k zásadním změnám. Drobné změny oxidů prvků na povrchu vláken vykazují stejné chování jako v prostředí vody. Hmotnost vláken z prostředí je vždy vyšší než referenční, do 7 dní má rostoucí trend, který začne klesat. V roztoku se s dobou naložení vláken zvyšuje koncentrace Al, Si a jednorázově i Fe.
- Při expozici vláken prostředím mořské vody je patrné zvýšení koncentrace oxidů Ca, především ale oxidů Fe, jak na povrchu vláken, tak v místech korozních produktů. Průběh hmotnostní retence je stejný jako u prostředí alkalické mořské vody, pouze hodnoty jsou nižší. V roztoku se s dobou naložení vláken koncentrace Ca, K, Mg a Na pohybuje víceméně v konstantních hodnotách, koncentrace Fe v roztoku stoupá od 21. dne.
- Čedičová vlákna mají pouze v simulovaných prostředích kyseliny a simulovaného betonu tendenci vytvářet zárodky krystalové mřížky křemene.
- Vývoj pevností v tahu čedičových vláken po expozici by se dal rozdělit do 3 skupin. Vlákna z prostředí vody a kyseliny mají rostoucí vývoj pevnosti v čase a liší se maximální hodnotou po 28 dnech a průběhem v čase. Pevnost vláken z prostředích alkalické mořské vody a mořské vody má do 7 dní prudký nárůst na maximální hodnoty pevnosti a poté následuje pokles různě intenzivní. Vlákna z prostředí simulující beton vykazují v prvních 7 dnech pokles pevnosti následovaný jejím zvýšením. U tohoto prostředí je zajímavé že jeho složení je z části shodné s prostředím alkalické mořské vody, díky čemuž možná po 28 dnech dochází k získání velmi podobné hodnoty pevnosti v tahu.

Poznatky pro BFRP tyče:

- Se zkoušením BFRP tyčí byla nutně spojena výroba speciálního ocelového rámu a společně i testování vhodné kotevní délky a materiál na ni použitý. Takto vyrobená sestava zaručila rovnoměrné zatěžování vzorků bez deformací spojených s prokluzem v čelistech trhačského stroje.
- Jednotlivé tyče ze simulovaných prostředí nevykázaly na svém povrchu po 14, 28 ani 90 dnech viditelné změny. Tyče po 360 dnech v prostředí simulující beton a alkalickou mořskou vodu vykázali zesvětlení povrchu a místy drobné třepení vláken.
- Změny v mechanických vlastnostech BFRP po expozici mají příčinu v korozním chování matrice se simulovanými prostředími.
- Z hodnot po 360 dnech expozice je patrné, že v prostředí vody dojde k nárůstu pevnosti, který je předtím ustálený, a naopak v prostředích simulující beton, kyselinu, alkalickou mořskou vodu a mořskou vodu dojde k poklesu tahové pevnosti.

Společným znakem expozice vláken a tyčí v simulovaných prostředích alkalické mořské vody, simulovaného betonu a kyseliny je po 28 dnech zvýšení pevnosti v tahu.

Poznatky pro cementové pasty s čedičovou rozptýlenou výztuží:

- Zvyšováním podílu mikrosiliky v pastách s čedičovými vlákny dochází ke snižování hodnoty pH a dosahuje změn v řádech jednotkách desetin.
- Malé změny pH u vytvořených past nemají vliv na chování vláken v takové míře, aby se projevily ve výsledných pevnostech.
- Vystavení cementových past s vlákny kapalným simulovaným prostředím způsobuje drobný pokles pH bez ohledu na typ prostředí.
- U past Č1-30 bylo dosaženo vyšších pevností v tahu za ohybu než u směsi Č1-20 ve všech prostředích.
- Simulovaná prostředí způsobují změny v průběhu pevnosti v tlaku i tahu za ohybu.

5 Závěr

Teoretická část práce měla informovat o způsobech využití čediče a jeho kompozitů ve stavebnictví. Z uvedené rešerše je patrné rozsáhlé využití čediče ve stavebním průmyslu a tendence zvyšování jeho využití v nových podobách.

Se zvyšováním využití materiálů z čediče je spojeno i zvyšování kontaktů s korozními prostředími, v kterých nebylo korozní chování pro stavebnictví dosud jednotně popsáno. Což je patrné z další části teoretické práce.

Problematika, kterou se tato diplomová práce zabývá je rozsáhlá a vyvodit stručné konkrétní závěry po časově krátkém výzkumu, by bylo neobjektivní.

Stručné závěry pro jednotlivé typy zkušebních těles, lze formulovat v následujících bodech.

Krátká čedičová vlákna:

- zkoušky provedené na krátkých čedičových vláknech jsou s drobnými odchylkami ve vzájemné korelaci
- typ korozního prostředí ovlivňuje chování vláken
- pH není jediným faktorem, který ovlivňuje hodnoty pevnosti v tahu čedičových vláken
- vlastnosti krátkých čedičových vláken se v korozních prostředích v čase různě mění a mají proměnný trend
- změny ve složení oxidů prvků na povrchu vláken se odvíjí od typu prostředí, kterému byla vlákna vystavena
- korozní produkty mohou vznikat, záleží ale na typu korozního prostředí

BFRP tyče:

- BFRP tyče své pevnostní chování mění s dobou expozice a toto chování má rozdílné trendy průběhu
- BFRP tyče z prostředí vody mají po 360 dnech expozice, jako jediné, vyšší pevnost oproti referenční
- referenční BFRP tyče dosahují pevnosti průměrně 730 MPa a průběh pevnosti je víceméně lineárního trendu
- pevnost BFRP tyčí se podle typu vystaveného prostředí mění se závislostí na čase
- BFRP tyče dosahují průměrně o cca 230 MPa vyšších hodnot pevnosti v tahu než čedičová vlákna
- expozice vláken a BFRP tyčí v prostředích simulujících alkalickou mořskou vodu, beton a kyselinu po dobu 28 dní zvýšila jejich pevnost v tahu

Cementové pasty:

- drobné snižování pH v pastách s příměsí mikrosiliky nemá zásadní vliv na zvyšování pevnosti past

- byl vyvrácen předpoklad, že zvyšováním obsahu mikrosiliky bude vždy klesat degradace vláken, která se projeví nárůstem pevnosti past
- drobné snižování pH, které se měnilo s navyšujícím obsahem mikrosiliky nemělo dostatečný efekt na pevnost vláken, tzn. snížení degradace nebylo tak razantní, aby dokázalo kompenzovat snižování pevnosti mikrosilikou
- simulovaná prostředí měla stejný efekt na pokles hodnoty pH past
- pasty zrající v prostředích měly po 3 měsících nižší hodnoty pH než pasty zrající na vzduchu

Tato diplomová práce přinesla nové poznatky, které naplňují stanovené cíle a současně vypovídají o rozsahu problematiky použití čedičových vláken ve stavebním průmyslu. Problematika je na tolik rozsáhlá, že se nedá na základě časově krátkého výzkumu rozhodnout o jednoznačném výsledku jednoduše charakterizujícím chování vláken. Je patrné, že čedičová vlákna podléhají v různých prostředích různým změnám, které jsou ovlivněny vlastnostmi prostředí i vlastnostmi samotných vláken. Z těchto důvodů bych doporučoval se problematikou dále zabývat, zvyšovat počet provedených měření a postupně podrobovat tyto materiály dalšímu výzkumu s využitím i dalších testovacích metod.

6 Poznámky

Pozn. 1: Do hodnot není započtena hodnota z kategorie LULUCF (land use, land use change, and forestry) a „memo items“. Tato hodnota se mnohdy nezapočítává, protože mají ve většině států zápornou hodnotu. Zeleň pohlcuje skleníkové plyny a má pozitivní efekt na ovzduší. [10] V grafu jsou započteny hodnoty z mezinárodní dopravy.

Pozn. 2: V grafu jsou zobrazeny pouze poměrné hodnoty pro oxid uhličitý. Pod pojmem „nepřímé“ se rozumí emise vyprodukované pro výrobu např. elektřiny na svícení nebo vytápění.

Pozn. 3: Kenozoikum je označení pro poslední geologické období Země. Trvalo zhruba 65 mil. let a vzhled zemského povrchu dosáhl dnešní podoby [17]

Pozn. 4: *„Těžbou a další úpravou čedičové suroviny dochází k jejímu zprůměrování. Slabě zvýšený průměrný obsah MgO může pouze poněkud zvýšit rychlost rekrystalizace a vyloučení vyššího podílu Mg-olivínu v rekrystalizovaném odlitku“ [22]. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty podle Kovářika (1956) zaokrouhleny na desetiny. [22]*

Pozn. 5: Tento popis výroby je obecnějšího charakteru. Každý výrobce se může v technologii výroby drobně lišit a také chrání své know-how. Například firma ROCKWOOL uvádí, že pro vytvoření taveniny používají teploty 1500 °C a nezmiňuje vznik granálií [29]. Díky různým postupům mohou vznikat i odlišnější vlákna. Kupříkladu podle publikace „A short review on Basalt Fiber“ od autora Kunal Singha vznikají Junkersovou metodou vlákna průměrů 8 – 20 μm a délkou 60 -100 mm [37].

Pozn. 6: Modul kyselosti se určí na základě rovnice (1).

Pozn. 7: Referenční hodnota g/kg odpovídá poměru hmotnosti expoziční látky a hmotnosti krys [40].

Pozn. 8: Označení výztuže 10M náleží ocelové tyči o nominálním průměru 11,3 mm [45].

Pozn. 9: Chemické označení ve vzorcích se po nahrazení vzorců nahradí procentuálním zastoupením nebo hmotností sloučeniny v minerální vatě

7 Použitá literatura

- [1] *World Population Dashboard | United Nations Population Fund* [online]. [accessed. 2021-12-07]. Available at: <https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard>
- [2] *Human Development Index (HDI) | Human Development Reports* [online]. [accessed. 2021-12-07]. Available at: <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi>
- [3] KEELING, Charles D., Stephen C. PIPER, Robert B. BACASTOW, Martin WAHLEN, Timothy P. WHORF, Martin HEIMANN and Harro A. MEIJER. *Atmospheric CO₂ and ¹³C₂O Exchange with the Terrestrial Biosphere and Oceans from 1978 to 2000: Observations and Carbon Cycle Implications* [online]. B.m.: Springer-Verlag, 2005 [accessed. 2022-01-19]. Available at: doi:10.1007/0-387-27048-5_5
- [4] *Trends in atmospheric concentrations of CO₂ (ppm), CH₄ (ppb) and N₂O (ppb), between 1800 and 2017 — European Environment Agency* [online]. [accessed. 2021-12-08]. Available at: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5/#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CO2%20\(ppm\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5/#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CO2%20(ppm)%22%5D%7D%7D)
- [5] *Eurostat - Data Explorer* [online]. [accessed. 2021-12-10]. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?wai=true&dataset=demo_pjan
- [6] *Eurostat - Data Explorer* [online]. [accessed. 2021-12-10]. Available at: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_air_gge&lang=en
- [7] *U.K. Population (2022) - Worldometer* [online]. [accessed. 2021-12-10]. Available at: <https://www.worldometers.info/world-population/uk-population/>
- [8] *The Paris Agreement | UNFCCC* [online]. [accessed. 2021-12-10]. Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [9] Pařížská dohoda. no date.
- [10] *Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů detailně* [online]. [accessed. 2021-12-10]. Available at: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr-detail>
- [11] ENERGY AGENCY, International. *2019 Global Status Report for Buildings and Construction Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector* [online]. no date [accessed. 2021-12-11]. Available at: www.iea.org
- [12] *Tracking Buildings 2020 – Analysis - IEA* [online]. [accessed. 2021-12-12]. Available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020>
- [13] *Jak vznikají skleníkové emise v ocelářském průmyslu - Ocelářská Unie* [online]. [accessed. 2021-12-12]. Available at: <https://www.ocelarskaunie.cz/jak-vznikaji-sklenikove-emise-v-ocelarskem-prumyslu/>

- [14] *Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně?* [online]. [accessed. 2021-12-12]. Available at: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>
- [15] *bazalt - Geologická encyklopedie* [online]. [accessed. 2021-12-15]. Available at: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>
- [16] MORSE, S. A. *Basalts and Phase Diagrams* [online]. B.m.: Springer New York, 1980. Available at: doi:10.1007/978-1-4612-6081-3
- [17] *Historická geologie pro GTM* [online]. [accessed. 2021-12-15]. Available at: <http://geologie.vsb.cz/GMT/HISTGMT/textova%20cast/9.%20Kenozoikum.htm>
- [18] SCHAEFER, Lauren N., Jackie E. KENDRICK, Thomas OOMMEN, Yan LAVALLÉE and Gustavo CHIGNA. Geomechanical rock properties of a basaltic volcano. *Frontiers in Earth Science* [online]. 2015, **3** [accessed. 2022-01-19]. ISSN 22966463. Available at: doi:10.3389/FEART.2015.00029/ABSTRACT
- [19] *Dekorační kameny, vápence a vybrané písky ČR - Soutěsky* [online]. [accessed. 2021-12-19]. Available at: <http://kamenolomy.fzp.ujep.cz/index.php?page=record&id=340&tab=fyz>
- [20] EUTIT S.R.O. *EUTIT Historie přetavená v úspěch* [online]. [accessed. 2021-12-20]. Available at: <https://www.eutit.cz/files/katalogy/eutit-cz-nahled.pdf>
- [21] KOPECKÝ, Lubomír. *Krystalizace tavených hornin*. B.m.: ČSAV, 1959.
- [22] ČTYROKÝ, Václav. *Ložiska nerudných surovin ČSR*. 1. vyd. B.m.: Univerzita Karlova, 1983.
- [23] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty. 4 přeprac. a dopl. vyd.* 2018.
- [24] Tavený čedič KATALOGOVÝ LIST [online]. no date [accessed. 2021-12-23]. Available at: <http://www.eutit.cz>
- [25] OSNOS, D. ZHANG, Z. LI and P. SERGEY. The production method of continuous fiber with basalt. App No.: 03147337.7.
- [26] CHEN, Xingfen, Yunsheng ZHANG, David HUI, Meirong CHEN and Zhishen WU. Study of melting properties of basalt based on their mineral components. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, **116**, 53–60 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 1359-8368. Available at: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2017.02.014
- [27] LEHNER, Jan. *Skleněná, horninová a strusková vlákna*. B.m.: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [28] *Využití odpadních materiálů z výroby minerální vlny do stavebních hmot - TZB-info* [online]. [accessed. 2021-12-26]. Available at: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11827-vyuziti-odpadnich-materialu-z-vyroby-mineralni-vlny-do-stavebnich-hmot>
- [29] *Výroba kamenné vlny | ROCKWOOL | Izolace z kamenné vlny* [online]. [accessed. 2021-12-26]. Available at: <https://www.rockwool.com/cz/odborne-rady-a-inspirace/vyhody-kamenne-vlny/obnovitelnost-a-jak-se-vyrabi-kamenna-vlna/>
- [30] IPBÜKER, Cagatay, Helena NULK, Volodymyr GULIK, Alex BILAND and Alan Henry TKACZYK. Radiation shielding properties of a novel cement–basalt mixture for nuclear energy applications. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2015, **284**, 27–37

- [accessed. 2022-01-19]. ISSN 0029-5493. Available at: doi:10.1016/J.NUCENGDES.2014.12.007
- [31] *Kanalizace z čediče - EUTIT - slévárna čediče* [online]. [accessed. 2021-12-27]. Available at: <https://www.eutit.cz/kanalizace.html>
- [32] *Trouby pro ražení IN LINE - délka 0,5 metru - EUTIT - slévárna čediče* [online]. [accessed. 2021-12-27]. Available at: <https://www.eutit.cz/trouby-pro-razeni-in-line.html>
- [33] 72 7308. *Minerální vlna: Technické požadavky*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1989.
- [34] ČSN EN 13162+A1. *Tepelněizolační výrobky pro budovy- Průmyslově vyráběné výrobky z minerální vlny (MW) - Specifikace*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [35] *Požární ochrana stavebních konstrukcí a budov* [online]. [accessed. 2022-01-19]. Available at: <https://www.rockwool.com/cz/produkty-a-reseni/protipozarni-izolace/>
- [36] *Zofi fasádní vata* [online]. [accessed. 2021-12-29]. Available at: <https://eshop.zofi.cz/admin/photos/ModuleItem/731/frontrock-max-e-fasadni-vata-na-zatepleni-5d131d550f202.png>
- [37] SINGHA, Kunal. A Short Review on Basalt Fiber. *International Journal of Textile Science* [online]. 2012, **2012**(4), 19–28 [accessed. 2021-12-29]. Available at: doi:10.5923/j.textile.20120104.02
- [38] REGAR, Madan Lal and Akhtarul Islam AMJAD. Basalt Fibre – Ancient Mineral Fibre for Green and Sustainable Development. *Tekstilec* [online]. 2016, **59**(4), 321–334 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 23503696. Available at: doi:10.14502/TEKSTILEC2016.59.321-334
- [39] FIORE, V., T. SCALICI, G. DI BELLA and A. VALENZA. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, **74**, 74–94 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 1359-8368. Available at: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.034
- [40] KOGAN, F M and O v NIKITINA. Solubility of Chrysotile Asbestos and Basalt Fibers in Relation to their Fibrogenic and Carcinogenic Action. *Environ Health Perspect*. 1994, **102**(5), 205–206.
- [41] MCCONNELL, E. E., O. KAMSTRUP, R. MUSSELMAN, T. W. HESTERBERG, J. CHEVALIER, W. C. MILLER and P. THEVENAZ. Chronic Inhalation Study of Size-Separated Rock and Slag Wool Insulation Fibers in Fischer 344/N Rats. <http://dx.doi.org/10.3109/08958379409003042> [online]. 2008, **6**(6), 571–614 [accessed. 2021-12-30]. ISSN 08958378. Available at: doi:10.3109/08958379409003042
- [42] *Basalt scale* [online]. [accessed. 2021-12-31]. Available at: <http://basaltm.com/en/bnv/basalt-scale.html>
- [43] DUIC, Jason, Sara KENNO and Sreekanta DAS. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **176**, 470–481 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 0950-0618. Available at: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.208
- [44] MENG, Qingfei, Chengqing WU, Jun LI, Zhongxian LIU, Pengtao WU, Yekai YANG and Zhongqi WANG. Steel/basalt rebar reinforced Ultra-High Performance Concrete

components against methane-air explosion loads. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, **198**, 108215 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 1359-8368. Available at: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108215

[45] *Reinforcing Bar Sizes of ASTM, BS, CSA Standards* [online]. [accessed. 2022-01-01]. Available at: <https://www.reinforcing-bar.com/technology/reinforcing-bar-sizes.html>

[46] *Basalt Fibre* [online]. [accessed. 2022-01-01]. Available at: <https://www.final-materials.com/gb/297-basalt-fibre>

[47] *Basalt Woven Textile - MaterialDistrict* [online]. [accessed. 2022-01-01]. Available at: <https://materialdistrict.com/material/basalt-woven-textile/>

[48] *Geogrid made with basalt fibers - German Basalt fibers* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://www.deutsche-basalt-faser.de/en/products/geogrid/>

[49] *Basalt Fiber Geogrid* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://www.basaltfiber-cn.com/basalt-fiber-product-p00051p1.html>

[50] *Technical Data Sheet BG 418940* [online]. no date [accessed. 2022-01-02]. Available at: https://www.basaniteindustries.com/uploads/1/2/5/7/125724203/basamesh__tds__18940.pdf

[51] *Reinforcing Mesh - Basalt Fiber Tech Products* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://www.basaltft.com/products/rm.htm>

[52] *Basalt Geogrid 220 25x25 - Basaltex - PDF Catalogs | Documentation | Boating Brochures* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/basaltex/basalt-geogrid-220-25x25/39172-103717.html>

[53] *Non-Woven - Basalt Fiber Tech Products* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://www.basaltft.com/products/non.htm>

[54] AJMERI, J. R. and C. J. AJMERI. Developments in nonwoven as geotextiles. *Advances in Technical Nonwovens* [online]. 2016, 339–363 [accessed. 2022-01-02]. Available at: doi:10.1016/B978-0-08-100575-0.00012-7

[55] *Fabrics - Basalt Fiber Tech Products* [online]. [accessed. 2022-01-02]. Available at: <https://www.basaltft.com/products/fab.htm>

[56] *Tři roky výzkumu odměněny: nové trubky s čedičovým vláknem jsou na světě - Wavin Academy* [online]. [accessed. 2022-01-04]. Available at: <https://www.wavinacademy.cz/tiskove-zpravy/tri-roky-vyzkumu-odmeneny-nove-trubky-s-cedicovym-vlaknem-jsou-na-svete/>

[57] GUO, Yihong, Xinyu HU and Jianfu LV. Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **223**, 142–155 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 0950-0618. Available at: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.06.211

[58] JOHN, Vinotha Jenifer and Brindha DHARMAR. Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete—A review. *Structural Concrete* [online]. 2021, **22**(1), 491–502 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 17517648. Available at: doi:10.1002/SUCO.201900086

- [59] PASTSUK, Vitali, Madis KIISK, Rünno LÖHMUS, Mairo MERISALU, Sergei KOVALJOV, Alex BILAND and Volodymyr GULIK. Selection of basalt fiber with resistance to concrete alkaline environment. *SN Applied Sciences* [online]. 2020, **2**(11), 1–17 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 25233971. Available at: doi:10.1007/S42452-020-03677-Z/FIGURES/16
- [60] JALASUTRAM, Sruthi, Dipti Ranjan SAHOO and Vasant MATSAGAR. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete. *Structural Concrete* [online]. 2017, **18**(2), 292–302 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 17517648. Available at: doi:10.1002/SUCO.201500216
- [61] ADESINA, Adeyemi. Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **266**, 120970 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 0950-0618. Available at: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120970
- [62] CELAURO, C. and F. G. PRATICÒ. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **170**, 245–253 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 0950-0618. Available at: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.058
- [63] ZHAO, Hua, Bowen GUAN, Rui XIONG and Aiping ZHANG. Investigation of the Performance of Basalt Fiber Reinforced Asphalt Mixture. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 1561 [online]. 2020, **10**(5), 1561 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 20763417. Available at: doi:10.3390/APP10051561
- [64] *Chopped Strands - Basalt Fiber Tech Products* [online]. [accessed. 2022-01-07]. Available at: <https://www.basaltft.com/products/cs.htm>
- [65] *Tracking Power 2021 – Analysis - IEA* [online]. [accessed. 2022-01-07]. Available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-power-2021>
- [66] ELSENER, B. and U. M. ANGST. Corrosion of steel in concrete: New challenges. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry* [online]. 2018, 183–191 [accessed. 2022-01-08]. Available at: doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.13435-3
- [67] *The Most Common Types of Building Materials Used in Construction | Stewart Lumber & Hardware* [online]. [accessed. 2022-01-08]. Available at: <https://thestewartlumberco.com/blog/the-most-common-types-of-building-materials-used-in-construction/>
- [68] *Film o výrobě čedičových výrobků ve slévárně EUTIT s.r.o. Stará Voda - YouTube* [online]. [accessed. 2022-01-08]. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=k9qCr_5r_s
- [69] QUAGLIARINI, Enrico, Francesco MONNI, Federica BONDIOLI and Stefano LENCI. Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering. *Journal of Building Engineering* [online]. 2016, **5**, 142–150 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 2352-7102. Available at: doi:10.1016/J.JOBE.2015.12.003
- [70] TOMLINSON, Douglas and Amir FAM. Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2014, **19**(2), 04014036 [accessed. 2022-01-09]. ISSN 1090-0268. Available at: doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491

- [71] BRIK, Vladimir B. Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs Highway Program Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber/BF Composite Rebar Reinforcement Final Report for Highway-IDEA Project 86. 2003.
- [72] OVITIGALA, Thilan, Mustapha A. IBRAHIM and Mohsen A. ISSA. Serviceability and ultimate load behavior of concrete beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal* [online]. 2016, **113**(4), 757–768 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 08893241. Available at: doi:10.14359/51688752
- [73] LAPKO, A. and M. URBAŃSKI. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2015, **15**(1), 223–230 [accessed. 2022-01-19]. ISSN 1644-9665. Available at: doi:10.1016/J.ACME.2014.03.008
- [74] RAMACHANDRAN, B E, V VELPARI and N BALASUBRAMANIAN. *Chemical durability studies on basalt fibres*. 1981.
- [75] SIM, Jongsung, Cheolwoo PARK and Do Young MOON. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2005, **36**(6–7), 504–512. ISSN 13598368. Available at: doi:10.1016/j.compositesb.2005.02.002
- [76] WEI, Bin, Hailin CAO and Shenhua SONG. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials and Design* [online]. 2010, **31**(9), 4244–4250. ISSN 02641275. Available at: doi:10.1016/j.matdes.2010.04.009
- [77] LEE, Jung Jin, Jiyeon SONG and Hodong KIM. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers and Polymers* [online]. 2014, **15**(11), 2329–2334. ISSN 18750052. Available at: doi:10.1007/s12221-014-2329-7
- [78] RABINOVICH, F N, V N ZUEVA and L v MAKEEVA. *AT THE ENTERPRISES AND INSTITUTES STABILITY OF BASALT FIBERS IN A MEDIUM OF HYDRATING CEMENT*. 2001.
- [79] LI, Zhuo, Tongliang XIAO, Qingyan PAN, Junmei CHENG and Shugao ZHAO. Corrosion behaviour and mechanism of basalt fibres in acidic and alkaline environments. *Corrosion Science* [online]. 2016, **110**, 15–22. ISSN 0010938X. Available at: doi:10.1016/j.corsci.2016.04.019
- [80] TANG, Chunhong, Hao JIANG, Xu ZHANG, Guangyao LI and Junjia CUI. Corrosion behavior and mechanism of basalt fibers in sodium hydroxide solution. *Materials* [online]. 2018, **11**(8). ISSN 19961944. Available at: doi:10.3390/ma11081381
- [81] NASIR, V., H. KARIMIPOUR, F. TAHERI-BEHROOZ and M. M. SHOKRIEH. Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid. *Corrosion Science* [online]. 2012, **64**, 1–7. ISSN 0010938X. Available at: doi:10.1016/j.corsci.2012.06.028
- [82] WANG, Mingchao, Zuoguang ZHANG, Yubin LI, Min LI and Zhijie SUN. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2008, **27**(4), 393–407. ISSN 07316844. Available at: doi:10.1177/0731684407084119
- [83] RYBIN, V. A., A. v. UTKIN and N. I. BAKLANOVA. Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **53**, 1–8. ISSN 00088846. Available at: doi:10.1016/j.cemconres.2013.06.002

- [84] RYBIN, V. A., A. v. UTKIN and N. I. BAKLANOVA. Alkali-resistant coating for basalt fibers. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* [online]. 2013, **49**(6), 689–692. ISSN 20702051. Available at: doi:10.1134/S2070205113060142
- [85] AFROZ, Mahzabin, Indubhushan PATNAIKUNI and Srikanth VENKATESAN. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **154**, 191–203. ISSN 09500618. Available at: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.153
- [86] BASHTANNIK, P I, A I KABAK and Yu Yu YAKOVCHUK. *THE EFFECT OF ADHESION INTERACTION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTIC BASALT PLASTICS*. 2003.
- [87] REYES-ARAIZA, J. L., A. MANZANO-RAMÍREZ, J. C. RUBIO-AVALOS, E. GONZÁLEZ-SOSA, J. F. PÉREZ-ROBLES, M. ARROYO-CONTRERAS, C. SIGNORET, E. CASTILLO-CASTAÑEDA and Y. v. VOROBIEV. Comparative study on tensile behavior of inorganic fibers embedded in unsaturated polyester bisphenol "A"-styrene copolymer. *Inorganic Materials* [online]. 2008, **44**(5), 549–554. ISSN 00201685. Available at: doi:10.1134/S0020168508050221
- [88] LIU, Jianxun, Ning LI, Meirong CHEN, Jianping YANG, Biao LONG and Zhishen WU. Durability of basalt fiber-reinforced polymer bars in wet-dry cycles alkali-salt corrosion. *Science and Engineering of Composite Materials* [online]. 2019, **26**(1), 43–52. ISSN 0334181X. Available at: doi:10.1515/secm-2018-0030
- [89] LU, Zhongyu, Lizhu SU, Guijun XIAN, Baihang LU and Jianhe XIE. Durability study of concrete-covered basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars in marine environment. *Composite Structures* [online]. 2020, **234**. ISSN 02638223. Available at: doi:10.1016/j.compstruct.2019.111650
- [90] LIU, Qiang, Montgomery T. SHAW, Richard S. PARNAS, Montgomery T. SHAW, Richard S. PARNAS and Anne Marie MCDONNELL. Investigation of basalt fiber composite aging behavior for applications in transportation. *Polymer Composites* [online]. 2006, **27**(5), 475–483. ISSN 02728397. Available at: doi:10.1002/pc.20215
- [91] BENMOKRANE, Brahim, Fareed ELGABBAS, Ehab A. AHMED and Patrice COUSIN. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2015, **19**(6), 04015008. ISSN 1090-0268. Available at: doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000564
- [92] WU, Gang, Zhi-Qiang DONG, Xin WANG, Ying ZHU and Zhi-Shen WU. Prediction of Long-Term Performance and Durability of BFRP Bars under the Combined Effect of Sustained Load and Corrosive Solutions. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2015, **19**(3), 04014058. ISSN 1090-0268. Available at: doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000517
- [93] WEI, Bin, Hailin CAO and Shenhua SONG. Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science* [online]. 2011, **53**(1), 426–431. ISSN 0010938X. Available at: doi:10.1016/j.corsci.2010.09.053
- [94] QUAGLIARINI, Enrico, Francesco MONNI, Federica BONDIOLI and Stefano LENCI. Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering. *Journal of Building Engineering* [online]. 2016, **5**, 142–150. ISSN 23527102. Available at: doi:10.1016/j.jobbe.2015.12.003

- [95] ALTALMAS, Ahmad, Ahmed EL REFAI and Farid ABED. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **81**, 162–171. ISSN 09500618. Available at: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.036
- [96] SERBESCU, Andreea, Maurizio GUADAGNINI and Kypros PILAKOUTAS. Mechanical Characterization of Basalt FRP Rebars and Long-Term Strength Predictive Model [online]. 2014. Available at: doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614
- [98] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 4: Pevnost v tlaku – Požadavky na zkušební lisy*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [99] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [100] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

Seznam obrázků

Obrázek 3: Srovnání produkce skleníkových plynů obyvatel států EU v roce 2018 [5 - 7] (Pozn.1)	9
Obrázek 4: Celkový světový podíl emisí [11] (Pozn. 2)	10
Obrázek 3: Schéma rozvlákňování pomocí zařízení typu Junkers [38]	18
Obrázek 4: Schéma spřádání čedičových vláken [37]	19
Obrázek 5: Hladké čedičové dlažby [20]	19
Obrázek 6: Protiskluzné čedičové dlažby [20]	20
Obrázek 7: Příklady dílů s otěruvzdornou vložkou [20]	20
Obrázek 8: Tvarovky pro kanalizační vejčité stoky [31]	21
Obrázek 9: Schéma [24]	21
Obrázek 10: Speciální odlitky [20]	21
Obrázek 11: Trouby pro ražení IN LINE [32]	22
Obrázek 12: Tepelná izolace z čedičových vláken ROCKWOOL [36]	23
Obrázek 13: Čedičové šupiny [38]	25
Obrázek 14: Pracovní diagram BFRP a ocelové tyče [43] Pozn. 8	27
Obrázek 15: Příklad textilního úpletu [55]	28
Obrázek 16: Čedičové potrubí Wavin [56]	28
Obrázek 17: Uzavřená oka [51]	29
Obrázek 18: Otevřená oka [51]	29
Obrázek 19: Krátká čedičová vlákna [64]	30
Obrázek 20: Zachování hmotnosti svazků BF [79]	23
Obrázek 21: Zachování hmotnosti BF v prostředích [85]	36
Obrázek 22: Efekt stálého zatížení na zachování pevnosti BFRP tyčí ponořených v alkalickém prostředí [92]	38
Obrázek 23: Klubko nekonečného vlákna před výrobou zkušebních pramenů	42
Obrázek 24: Čedičová vlákna	42
Obrázek 25: Délkové varianty vláken	42
Obrázek 26: 6 mm BRFP tyče	43
Obrázek 27: Žebrování na tyčích	43
Obrázek 28: Difraktogram použitého cementu	44
Obrázek 29: Granulometrie mikrosiliky	45
Obrázek 30: Monitory elektronového mikroskopu se zobrazenými vlákny	46
Obrázek 31: Elektronový mikroskop s podstavcem	47
Obrázek 32: Čedičová vlákna na hliníkovém terčíku a uhlíkové pásce	48
Obrázek 33: Heliový pyknometr	48
Obrázek 34: Třepačka s inkubátorem	49
Obrázek 35: Baňky v třepačce	49
Obrázek 36: Analytická váha	50
Obrázek 37: Sušárna Memmert	50
Obrázek 38: Zafóliované baňky roztoků s vlákny	50
Obrázek 39: Pohled do sušárny se vzorky	50
Obrázek 40: Emisní spektrometr a autosampler	51

Obrázek 41: Univerzální trhací stroj	52
Obrázek 42: Čelisti se vzorkem	52
Obrázek 43: Svazky před výrobou zakončení	53
Obrázek 44: Aranžovací hmota se vzorky aretovanými kolíčky	53
Obrázek 45: Plastové bedýnky s podstavci se zkušebními vzorky	54
Obrázek 46: Různé kotevní délky	55
Obrázek 47: BFRP tyče s vytvořenou kotevní délkou	56
Obrázek 48: Svařovaný ocelový rám se vzorkem	56
Obrázek 49: Uchycení vzorku v lisu s vsazeným ocelovým rámem	57
Obrázek 50: Míchačka <i>ALBA RE 24</i>	58
Obrázek 51: Lis pro mechanické zkoušky	58
Obrázek 52: Směs ve formách před zhutněním	59
Obrázek 53: Trámečky po odbednění	59
Obrázek 54: Trámečky naložené v simulovaných prostředích	60
Obrázek 55: Čelisti pro třibodový tah za ohybu	60
Obrázek 56: Lis se vzorkem	61
Obrázek 57: Rozdrcený vzorek po zkoušce	61
Obrázek 58: Přístroj pro XRD analýzu	62
Obrázek 59: Vzorky v příslušných sáčcích	63
Obrázek 60: Vzorek ve formičce	63
Obrázek 61: Přístroj na měření pH <i>FiceEasy plus</i> a vzorky ve váženkách	63
Obrázek 62: Nádoby na simulované roztoky a destilovaná voda	54
Obrázek 63: Difraktogram vláken	66
Obrázek 64: Vlákna nevystavená simulovanému prostředí	67
Obrázek 65: Místa detailní analýzy složení	67
Obrázek 66: Vlákna vystavená SPS	69
Obrázek 67: Místa detailní analýzy složení korozního produktu	69
Obrázek 68: Detail vlákna	72
Obrázek 69: Ca filtr	72
Obrázek 70: K filtr	72
Obrázek 71: Místa detailní analýzy složení korozního produktu	72
Obrázek 72: Detail vlákna s jiným korozním produktem	75
Obrázek 73: Ca filtr	75
Obrázek 74: Mg filtr	75
Obrázek 75: Si filtr	75
Obrázek 76: S filtr	75
Obrázek 77: Vlákna vystavená H ₂ O a místa detailní analýzy	76
Obrázek 78: Poškozené vlákno vystavené pH3 a místa detailní analýzy	78
Obrázek 79: Depozit NaCl na povrchu vlákna	79
Obrázek 80: Vlákna vystavená SSW	81
Obrázek 81: Místa detailních analýz	81
Obrázek 82: Vlákna vystavená ASSW	85
Obrázek 83: Místa detailních analýz	85
Obrázek 84: Místa detailních analýz s depozitem NaCl	87

Obrázek 85: Místa detailních analýz s naleptaným povrchem	89
Obrázek 86: Hmotnosti čedičových vláken vystavených expozici simulovaných prostředí	93
Obrázek 87: Chování čedičových vláken v prostředí ASSW a SSW	93
Obrázek 88: Přischlá vlákna v hrdle baňky	94
Obrázek 89: Nasátý shluk vláken v sušárně	94
Obrázek 90: Rozptýlená vlákna v roztoku	94
Obrázek 91: Shluk vláken zachycený filtračním papírem	94
Obrázek 92: Změny koncentrací 6 prvků v prostředí ASSW	95
Obrázek 93: Změny koncentrací 2 prvků v prostředí ASSW	96
Obrázek 94: Změny koncentrací 4 prvků v prostředí SSW	97
Obrázek 95: Změny koncentrace 1 prvku v prostředí SSW	98
Obrázek 96: Změny koncentrací 8 prvků v prostředí pH3	98
Obrázek 97: Změny koncentrací 4 prvků v prostředí SPS	99
Obrázek 98: Změny koncentrací 2 prvků v prostředí SPS	100
Obrázek 99: Změny koncentrací 6 prvků v prostředí H2O	101
Obrázek 100: Vlákna vystavená simulovaným prostředím.....	102
Obrázek 101: Typické poškození vláken v tahu	103
Obrázek 102: Detail porušení	103
Obrázek 103: Typický pracovní diagram čedičových vláken	103
Obrázek 104: Viditelné proklouznutí kotevního materiálu v neděrované trubce	104
Obrázek 105: Vývoj pevnosti BFRP v čase a prostředí	105
Obrázek 106: Druhy porušení BFRP po 360 dnech expozice	106
Obrázek 107: Pracovní diagram referenční BFRP tyče	106
Obrázek 108: Změny složení past v závislosti na jejich složení a typu simulovaného prostředí po 3-měsíční expozici	107
Obrázek 109: Pevnost v tahu za ohybu po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích	109
Obrázek 110: Pevnost v tlaku po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích	110
Obrázek 111: Hmotnostní nasákavosti pastových směsí s čedičovými vlákny po 3-měsíční expozici v simulovaných prostředích	111
Obrázek 112: Trámečky po vyjmutí ze simulovaných roztoků a opláchnutí	111
Obrázek 113: Trámečky po vyjmutí ze simulovaných roztoků a opláchnutí	111
Obrázek 114: Průměrné hodnoty pH po 1 hodině	111
Obrázek 115: Průměrné hodnoty pH po 24 hodinách	113

Seznam tabulek

Tabulka 4: Srovnání emisí na 1 tunu produktu [13, 14]	10
Tabulka 5: Chemické složení kenozoického čediče, průměr z 2413 analýz [16] Pozn. 3 .13	
Tabulka 6: Vybrané fyzikální vlastnosti kamene z lomu Soutěsky [19]	14
Tabulka 4: Ideální složení petrurgického čediče [22]	15
Tabulka 5: Průměrné chemické složení kamene ze Slapan [22] Pozn. 4	15
Tabulka 6: Základní vlastnosti taveného čediče [24]	16
Tabulka 7: Doporučené hodnoty chemického složení taveniny pro vlákna [25]	17
Tabulka 8: Fyzikálně-chemické vlastnosti minerální vlny podle ČSN 73 0810 [33] Pozn. 6	24
Tabulka 9: Hlavní specifikace čedičových šupin [42]	25
Tabulka 10: Technická data čedičové geomříže 220 25 x 25 [52]	29
Tabulka 11: Chemické složení vláken od výrobce ARMBAS	41
Tabulka 12: Naměřené zastoupení jednotlivých délek vláken	43
Tabulka 13: Mineralogické složení použitého cementu	44
Tabulka 14: Složení vyrobených pastových směsí	45
Tabulka 15: Složení jednotlivých simulovaných prostředí	65
Tabulka 16: Složení povrchu vlákna, bod 1	68
Tabulka 17: Složení povrchu vlákna, bod 2	68
Tabulka 18: Složení povrchu vlákna po expozici SPS, bod 2	70
Tabulka 19: Složení korozního produktu, bod 1	70
Tabulka 20: Složení korozního produktu, bod 3	71
Tabulka 21: Složení korozního produktu, bod 4	71
Tabulka 22: Složení jiného korozního produktu, bod 1	73
Tabulka 23: Složení jiného korozního produktu, bod 2	73
Tabulka 24: Složení jiného korozního produktu, bod 3	74
Tabulka 25: Složení jiného korozního produktu, bod 4	74
Tabulka 26: Složení produktu- ulpělá nečistota, bod 1	76
Tabulka 27: Složení- NaCl, bod 2	77
Tabulka 28: Složení povrchu vlákna po expozici H ₂ O, bod 3	77
Tabulka 29: Složení v místě poškození, bod 1	78
Tabulka 30: Složení povrchu vlákna po expozici pH3, bod 2	79
Tabulka 31: Složení depozitu NaCl, bod 1	80
Tabulka 32: Složení povrchu, bod 2	80
Tabulka 33: Možná kontaminace nebo korozní produkt, bod 1	82
Tabulka 34: Bod 2	82
Tabulka 35: Bod 3	83
Tabulka 36: Složení povrchu vlákna po expozici SSW, bod 4	83
Tabulka 37: Bod 5	84
Tabulka 38: Bod 6	84
Tabulka 39: Bod 1	86
Tabulka 40: Depozit CaCO ₃ , bod 2	86
Tabulka 41: Bod 3	87

Tabulka 42: Povrch vlákna po expozici ASSW, bod 1	88
Tabulka 43: Depozit NaCl, bod 2	88
Tabulka 44: Povrch vlákna po expozici ASSW, bod 1	89
Tabulka 45: Naleptaný povrch, bod 2	90
Tabulka 46: Produkty, bod 3	90
Tabulka 47: Chemické složení vláken od výrobce <i>ARMBAS</i>	91
Tabulka 48: Vlákna vystavená simulovaným prostředím, hodnoty	102
Tabulka 49: Hodnoty pevnosti BFRP	105