ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STAVEBNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

BC. JAN
MACHOVEC

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Machovec Jméno: Jan Osobní číslo: 399081

Zadávající katedra: Experimentální centrum

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv prostředí na tahovou pevnost textilního betonu

Název diplomové práce anglicky: Influence of the Environment on the Tensile Strength of Textile Concrete

Pokyny pro vypracování:
Zpracování literární rešerše, která bude zaměřena na účinky agresivního prostředí na vybrané vlastnosti betonu. Příprava, realizace a vyhodnocení experimentálního programu se zaměřením na studium vlivu prostředí na mechanické vlastnosti textilního betonu. Závěrem práce bude diskuze dosažených experimentálních výsledků v porovnání v dostupnou zahraniční literaturou.

Seznam doporučené literatury:
M. E. A. Fidelis, et al., The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete, Cement and Concrete Composites 74 (2016) 7-15.
B. Wang, J. Zhao, Q. Wang, Distributed models of self-stress value in textile-reinforced self-stressing concrete, Construction and Building Materials 126 (2016) 286-296.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.2. 2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5. 2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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".

2. 3. 2017
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Pavla Reitermana, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

……

Podpis

Poděkování

Rád bych zde vyjádřil poděkování mému vedoucímu Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za přátelský přístup a ochotu při psaní této diplomové práce. Velký dík patří celé mé rodině, která při mne stála a podporovala mne po celou dobu mých studií. Stejně velké poděkování patří i mé přítelkyni Lucii, se kterou jsme úspěšně přečkali všechny radosti i strasti studentského života.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Experimentální centrum

Vliv prostředí na tahovou pevnost textilního betonu

Influence of the environment on the tensile strength of textile concrete

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Jan Machovec
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

2017

Abstrakt:

Tato diplomová práce pojednává o vlivu agresivního prostředí na tahové vlastnosti textilního betonu. Vedle účinku prostředí také popisuje textilní beton jako takový a uvádí, kde se s ním lze v praxi setkat. Textilním betonem je v této práci myšlena cementová matrice s pevností v tlaku po 28 dnech 100 MPa vyztužená skelnou textilií v jedná či dvou vrstvách, o gramážích 131, 275 nebo 585 g/m^2. Vzorky jsou vystaveny třem typům agresivního prostředí. Jde konkrétně o 10% roztok NaOH, 10% roztok H_2SO_4 a 50, 100 a 150 zmrazovacích cyklů. Z výsledků plyne, že největší negativní vliv mají zmrazovací cykly působící na celý objem vzorku. Vlastnosti jsou zároveň výrazně ovlivněny počtem vrstev a gramáží použité textilie.

Klíčová slova: *textilní beton, tah, kyselina, zásada, zmrazovací cykly, urychlené stárnutí, trvanlivost*

Abstract:

This diploma thesis deals with the influence of aggressive environment on tensile properties of textile concrete. It also describes textile concrete itself and shows, where we can meet with it in a real life. By textile concrete in this work is meant a cementitious matrix with compressive strength after 28 days over 100 MPa reinforced with a glass textile in one or two layers with weight of 131, 275 or 585 g/m^2. Specimens were exposed to three different environments. Specifically, it is 10% NaOH solution, 10% H_2SO_4 solution and 50, 100, 150 freeze-thaw cycles. The biggest negative influence is caused by freeze-thaw cycles, which affect whole volume of specimens. Properties of textile concrete are also influenced by the weight and number of layers of used textile reinforcement.

Keywords: *Textile concrete, tension, acid, alkali, freeze-thaw, accelerated ageing, durability*

OBSAH

1 ÚVOD 2
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY 4
2.1 Popis působení agresivního prostředí na beton 15
3 TEXTILNÍ BETON 18
3.1 Využití textilního betonu v praxi 19
3.2 Materiály pro textilní výztuž 22
4 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM 25
4.1 Použité materiály 25
4.1.1 Cementová matrice 25
4.1.2 Textilní výztuž 29
4.1.3 Zkušební vzorky 32
4.1.4 Výroba vzorků 36
4.2 Použité metody 37
4.2.1 Zkouška pevnosti v tahu ohybem 37
4.2.2 Zkouška pevnosti v tlaku 38
4.2.3 JSCE-E 549-2000 [43] 38
4.2.4 ČSN 73 1322 [44] 40
4.2.5 Výskyt extrémních podmínek v reálném prostředí 41
4.2.6 Uložení vzorků do roztoků a mrazicího boxu 44
4.2.7 Zkoušení vzorků 46
5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ 48
5.1 Vizuální kontrola 48
5.2 Změna hmotnosti a rozměrů 52
5.3 Změna pH roztoku 53
5.4 Tlakové a ohybové zkoušky trámečků 53
5.5 Vyhodnocení dle JSCE-E 549-2000 55
5.6 Tahové zkoušky dog-bone 56
5.6.1 Popis vzorového grafu 57
5.6.2 Výsledné hodnoty napětí 58
5.6.3 Porovnání jednotlivých vzorků 62
6 ZÁVĚR 66
7 BIBLIOGRAFIE 69
8 SEZNAM OBRÁZKŮ 74
9 SEZNAM TABULEK 76
10 SEZNAM PŘÍLOH 77
11 PŘÍLOHY 78

1 ÚVOD

V této diplomové práci jsem se rozhodl zabývat textilním betonem. Toto téma jsem zpracovával už ve své bakalářské práci a to ve mne vyvolalo velký zájem k tomuto modernímu kompozitnímu materiálu. Jde totiž o materiál, který v České Republice není příliš známý, jak je tomu například v sousedním Německu. Rád se chci aktivně podílet na výzkumu něčeho nového a zároveň zajímavého. Textilní beton má velký potenciál v určitých případech nahradit tradiční železobeton a zároveň umožňuje nové využití betonu.

Když jsem se tímto tématem zabýval ve své bakalářské práci v roce 2015, bylo k dispozici relativně malé množství článků pojednávajících o této problematice. Když jsem však hledal podklady pro zpracování této práce, byl jsem překvapen kolik materiálů a článků bylo poslední dobou vydáno, přestože mezi odevzdáním bakalářské práce a začátkem psaní této diplomové práce uplynuly necelé dva roky. Už to svědčí o vzrůstající popularitě textilního betonu. V roce 2016 vyšla i první publikace zaměřená pouze na využití textilních výztuží [1].

Další z motivací pro tuto práci je také skutečnost, že v roce 2015 jsem se s výsledky své bakalářské práce zúčastnil mezinárodního kola SVOČ v Bratislavě, kde jsem byl v rámci obhajoby své práce jedním z porotců dotázán, jaká je životnost výztuže v zásaditém prostředí betonu. Nad touto otázkou jsem se do té doby nezamýšlel, stala se však značnou inspirací pro další můj výzkum v oblasti textilního betonu.

Pro rozsáhlejší praktické použití každého nového materiálu je nutné znát jeho chování v co nejvíce různých, mnohdy i specifických, případech. Stejně tak je tomu i u textilního betonu. Z toho důvodu jsem se rozhodl zjistit, jaký vliv může mít okolní prostředí na mechanické vlastnosti tohoto kompozitu, konkrétně na chování textilního betonu v tahu. Textilním betonem je v této práci nazýván cementový kompozit vyztužený skelnou textilií. Cementový kompozit má vlastnosti vysokopevnostního betonu s krychelnou pevností v tlaku cca 100 MPa po 28 dnech.

Textilní beton jsem vystavil účinkům třem různým prostředím. Prvním bylo ponoření na 60 dnů do 10 % roztoku kyseliny sírové, druhé je ponoření vzorků na 60 dnů do 10 %

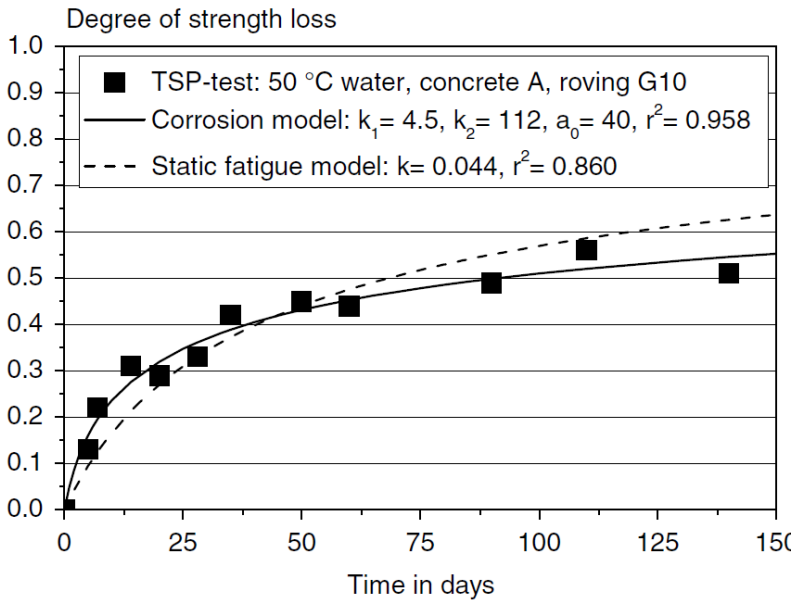
roztoku hydroxidu sodného a třetím prostředím bylo cyklické zatížení mrazem a to po 50, 100 a 150 cyklů.

Konstrukce z textilního betonu jsou velmi subtilní, tloušťky prvků jsou mnohdy pouze 20 mm. Každé, byť drobnější, ztenčení průřezu tak může způsobit zásadní problém se stabilitou. Mezi textilní výztuží a povrchem je krycí vrstva jen pár milimetrů tenká, nesmí proto dojít k rozpouštění směsi a obnažení výztuže.

Jako hlavní cíl této práce jsem si stanovil zjistit, zda textilní beton může být použit i v určitých extrémních podmínkách. Dále chci stanovit, které prostředí má na textilní beton největší negativní vliv a jak se projevují různé typy výztuže společně s množstvím použitých vrstev.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

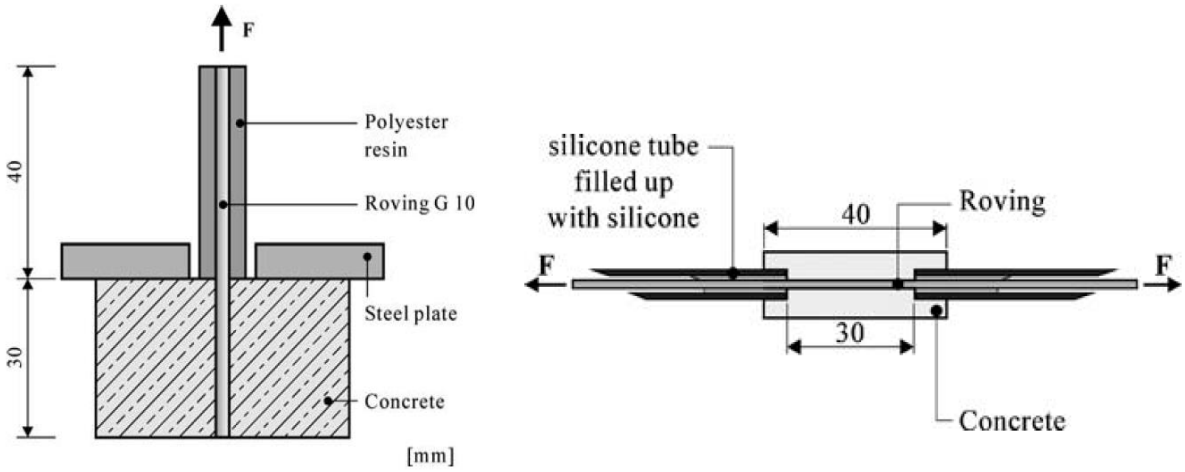
Orlowsky a Raupach [2] se ve své práci zabývají životností skelné výztuže betonu, jež je opatřená povrchovou úpravou, která jí má bránit proti alkáliím. Autoři působící na univerzitě RWTH Aachen zmiňují, že výzkum textilního betonu je v Německu velmi podporován. Textilní beton je inovativní materiál schopný tvořit tenkostěnné konstrukce s velkou nosností a výzkumy se zaměřují především na kvantitativní popsání ztráty únosnosti textilního betonu v závislosti na vlivu okolního prostředí. V práci jsou zkoumány dva různé přístupy k výpočtu životnosti, které jsou založeny na vlivu vlhkosti, teploty a vlastností materiálů. Jejich snahou je popsat další schopnosti tohoto kompozitního materiálu, kde je textilní výztuž vložená do oblastí s největším tahovým napětím, protože takto použitá textilie je mnohem efektivnější, než rozptýlená drátková výztuž byť ze stejného materiálu. Ochrana skelné výztuže z AR skla je způsobena přítomností 15-20% zirkonia v materiálu. Tento výzkum je zaměřen především na měření vlhkosti a teploty na povrchu výztuže uvnitř betonu. Dřívější výzkumy na životnost betonu poukazovaly, že pokles únosnosti je způsoben drobnými trhlinkami ve výztuži, kde se časem kumuluje napětí a dochází k únavovému porušení. Pokles únosnosti podle dalších výzkumů může být také způsoben nerovnoměrným rozmístěním složek (zirkonia a sodíku v textilii), což zapříčiňuje přítomnost slabých míst, která jsou náchylná na porušení. Pro experiment byly použity vzorky tvaru „dog-bone“ a jako zatěžovací prostředí uskladnění vzorků ve vodě o teplotě 50°C. Základem betonu byl portlandský cement a jemné plnivo. Po porovnání experimentálních výsledků došlo k úpravě rovnic, které výpočtem dávají obdobné výsledky v hodnotách procenta ztráty únosnosti v čase. Pro vzorky ponořené do vody o teplotě 50°C po dobu 150 dnů to činí téměř 50% ztráty pevnosti.



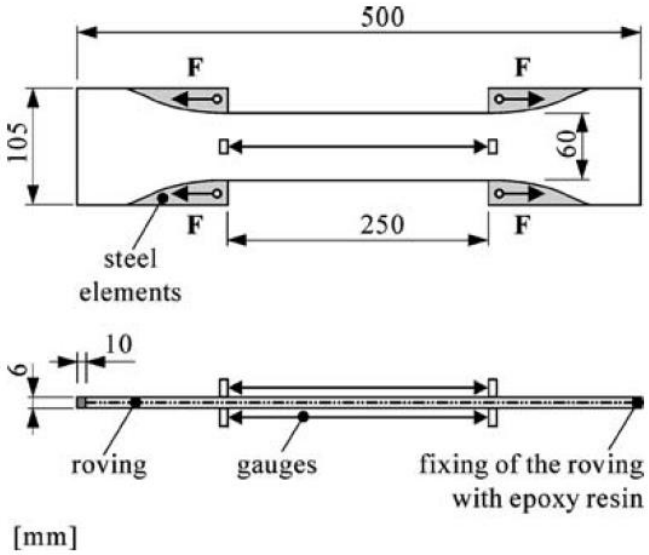
Obr. 1 - Výsledky experimentálního programu v porovnání s výpočtem [2]

Po přepočtu na reálné podmínky (plně saturované vzorky v prostředí o teplotě 13,6°C po dobu 50 let) to tvoří také 50% ztráty únosnosti. Po dobu uskladnění vzorků ve vodě byla měřena teplota a vlhkost uprostřed vzorku pomocí speciálních elektrod s časovým rozestupem měření čtyři hodiny. Závěrem článku je shrnutí, že uvedené ztráty vlastností v čase jsou příliš veliké a vedly by k přílišnému naddimenzování staveb a tím pádem k prodražování a ztrátě pozitiv tohoto kompozitu, je proto nutný další vývoj a výzkum.

Autoři předešlého článku pokračovali v práci na toto téma a provedli experiment [3], kde porovnávali různé typy zkoušek, aby odvodili závislost alkalinity betonu na jeho bezpečnost. Byly použity tři matrice, kde první dvě byly klasické matrice na cementové bázi, třetí však byla speciální směs vyvinutá na University of Brussels. Tato směs obsahuje „inorganic phosphate cement“ (ve zkratce IPC), který po zatuhnutí vytváří nealkalické prostředí. Pro posouzení byly zvoleny tři typy zkoušení. Prvním bylo vytrhávání jednoho pramene z betonu, druhým oboustranné vytahování pramene z betonu (viz. Obr. 2) a třetím tahová zkouška celého kompozitu (viz. Obr. 3).



Obr. 2 – První (vytrhávání jednoho pramene) a druhá metoda zkoušení (oboustranné vytahování textilie z betonu) [3]

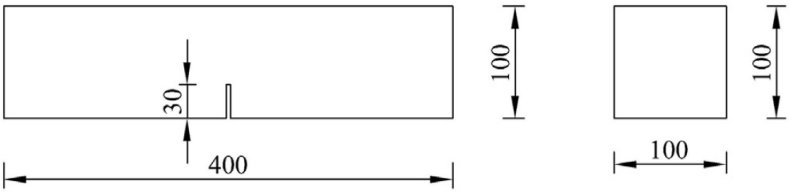


Obr. 3 - Třetí metoda zkoušení (tahová zkouška) [3]

Cílem tohoto výzkumu bylo splnění dlouhodobého plánu, kterým je vytvoření odolnostního modelu pro tento kompozit. Byla sestavena rovnice, která popisuje ztrátu vlastností kompozitu v závislosti na vlivu prostředí v procentech oproti referenční hodnotě. Z výzkumu vyplynulo, že IPC nevykazoval po zatěžovacích cyklech téměř žádný zásadní pokles vlastností (ztráty se pohybují v hodnotách zhruba od 2 do 8 %), zatímco u běžných cementových matricí to činí až 50%. Dalším důležitým poznatkem také je, že čím větší je kontaktní plocha mezi vlákny textilie a pórovým prostředím v betonu, tím větší je ztráta vlastností. Dále lze stanovit kritickou hodnotu vlhkosti ve vzorku, kdy dochází k vnitřní korozi. Tato hodnota je zhruba 80% r. h.. Po překročení této hodnoty pak dále záleží na

teplotě, která určuje rychlost této koroze. Pokusy s vytažením jednoho vlákna ukázaly, že prostředí nemá vliv na její výsledky. Autoři dále zmiňují, že tento způsob zkoušení není vhodný pro stanovení poklesu vlastností, protože dosahované hodnoty zatížení jsou příliš nízké v porovnání s klasickou tahovou zkouškou.

Wang a kol. [4] se zabývali vlivem kyselého prostředí na lomovou houževnatost betonu. Autoři v článku popisují, proč je důležité zabývat se vlivem kyselého prostředí v Číně, kde byl výzkum proveden. Důvodem je, že téměř třetina čínského území je postižena kyselými dešti, které však nejsou jedinou příčinou, kyselé prostředí se také vyskytuje v průmyslovém prostředí, v elektrárnách, v moři i v kyselých půdách. Problém kyselých dešťů je však celosvětový, vlivem kyselého prostředí se již zabývalo mnoho studií a jejich výsledkem byly poznatky, že dochází k úbytku hmoty, poklesu tlakové pevnosti a modulu pružnosti. Hloubka degradace vzorků má lineární závislost na úhrnu srážek v dané oblasti. Pro zkoumání bezpečnosti konstrukcí se zkoumají vlastnosti v lomové mechanice, která popisuje chování materiálu těsně při rozvoji trhliny, což je důležité pro předvídání a ochraně před inženýrskými neštěstími. Pokud se na vzorku nachází již nějaká trhlina, je pro další vývoj důležité znát podmínky ve špičce této trhliny a pro tento účel se používají speciální vzorky s připravenou trhlinou, viz Obr. 4.

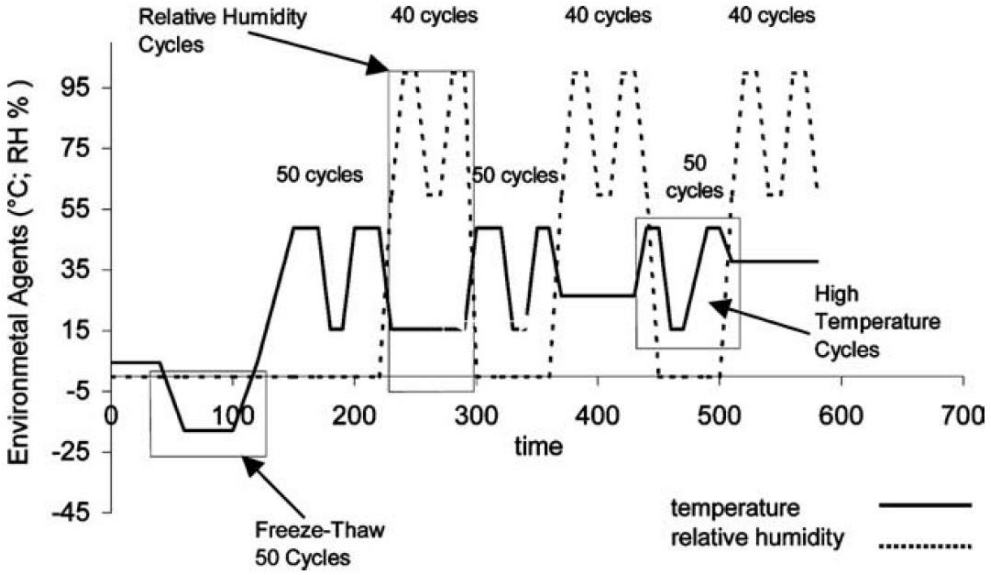


Obr. 4 - Zkušební vzorek s připravenou trhlinou [4]

Ve výzkumu byly vzorky po 28 dnech zrání ve vodním prostředí vystaveny účinkům roztoků o pH 1,5, 2,5 a 3,5, které byly obměňovány každých 5 dnů. Po uplynutí požadované doby (vzorky byly zkoušeny každých 10 dnů, celkem 60 dnů), byly vzorky vyjmuty, očištěny a podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Vzorky po uskladnění v kyselém prostředí zežloutly, povrch se se zvyšující se dobou expozice začal rozpadat, což nakonec vedlo k uvolňování plniva. Výstupem experimentu jsou poznatky, že beton po dlouhém pobytu v kyselém roztoku měkne, povrch se rozvolňuje, dochází ke tvorbě trhlin a k separaci materiálu. Rozhodujícím faktorem je doba vystavení kyselému prostředí. Modul pružnosti E i lomová houževnatost K_{IC} jsou svázány právě s délkou zatížení. V počátečních fázích došlo k mírnému zlepšení obou vlastností, poté už však následovala postupný rozpad studovaných

kompozitů, což koresponduje s průběhem síranové koroze. Hloubka degradace tak může sloužit k určení stupně poškození vzorku.

Micelli a Nanni [5] ve svém článku pojednávají o vlivu pH na další alternativní betonovou výztuž, kterou jsou polymerové tyče (Fiber-Reinforced Polymers = FRP). Stejně jako u textilního betonu se jedná o relativně novou možnost náhrady oceli, což vedlo k potřebě popsat její dlouhodobé chování v zásaditém prostředí betonu. Autoři se zaměřili na vliv vysokého pH pórové vody vytvořené během fáze hydratace, kdy pH uvnitř betonu dosahuje hodnot až 13,5. V experimentu bylo použito celkem pět druhů materiálů tyčí a to tři typy uhlíkové a dvě tyče skelné s různými způsoby povrchové ochrany proti vnějším vlivům (epoxy, termoplastické a z polyesteru). Vzorky byly zkoušeny prostým tahem a tříbodovým ohybem na krátkých vzorcích. Před vlastním testováním byly podrobeny kombinaci akcelerovaných zkoušek, jež měly simulovat klimatické zatížení, tzv. „weathering“. Zimní období bylo simulováno padesáti mrazícími cykly, následovala simulace léta s padesáti cykly vysoké teploty a poté čtyřicet cyklů vysoké vlhkosti (viz. Obr. 5). V průběhu zatěžování teplem a vlhkostí byly vzorky ozařovány UV paprsky.



Obr. 5 - Schéma zatěžování [5]

V průběhu celého zatěžování prostředím byly vzorky ponořeny do roztoku, jehož pH se pohybovalo mezi 12,6 a 13, což simuluje prostředí betonu. Poznatky z uvedeného výzkumu jsou, že smyková únosnost uhlíkových tyčí poklesla po 42 dnech v agresivním prostředí o 20-30%, u skelných tyčí šlo o pokles o téměř 100% a to pravděpodobně kvůli poruchám v ochranné vrstvě tyčí. Tahové vlastnosti u uhlíkových vzorků se téměř nezměnily, naproti tomu u skelných byl pokles na 60-70% hodnot referenčních vzorků. Závěrem autoři dodávají,

že polyesterová krycí vrstva neposkytuje dostatečnou ochranu skelným tyčím, ty totiž vykazovaly velké rozdíly oproti referenčním hodnotám. Naproti tomu termoplastická ochrana působila velmi dobře a v budoucnu by měl jít vývoj tímto směrem. Uhlíkové tyče se jeví jako vhodnější, protože po zatěžovacích cyklech nevykazovaly žádnou výraznou odchylku. Nevýhodou tohoto zkušebního programu byl ale fakt, že vzorky nebyly po dobu zatěžování vystaveny vnějšímu mechanickému napětí, které se v reálných konstrukcích vždy nachází. Proto by se v dalších pokusech mělo používat i vnesené tahové napětí u vzorků ponořených do roztoků.

Butler a kol. [6] se problematikou textilního betonu zabývají dlouhodobě a důvodem pro to jsou hlavně jeho vlastnosti, jako jsou vysoká pevnost a duktilita. Textilní beton může být použit jak v nových konstrukcích, tak i při rekonstrukcích staveb stávajících, oba tyto případy ale vyžadují dlouhou životnost. Pro bezpečné používání každého nového materiálu totiž musíme znát jeho negativní vlastnosti. Negativní jevy u textilního betonu mohou nastat jak ve výztuži, v betonu samotném, tak i na rozhraní obou těchto materiálů. V článku jsou zmíněny tři hlavní příčiny, které vedou k poruchám textilních výztuží. Jsou to:

- Koroze vláken výztuže způsobené přítomností OH^- ionty v pórovém roztoku
- Porucha únavou v důsledku zatížení alkalickým prostředím betonu
- Smršťování matrice a tím zhoršené pouto mezi matricí a výztuží

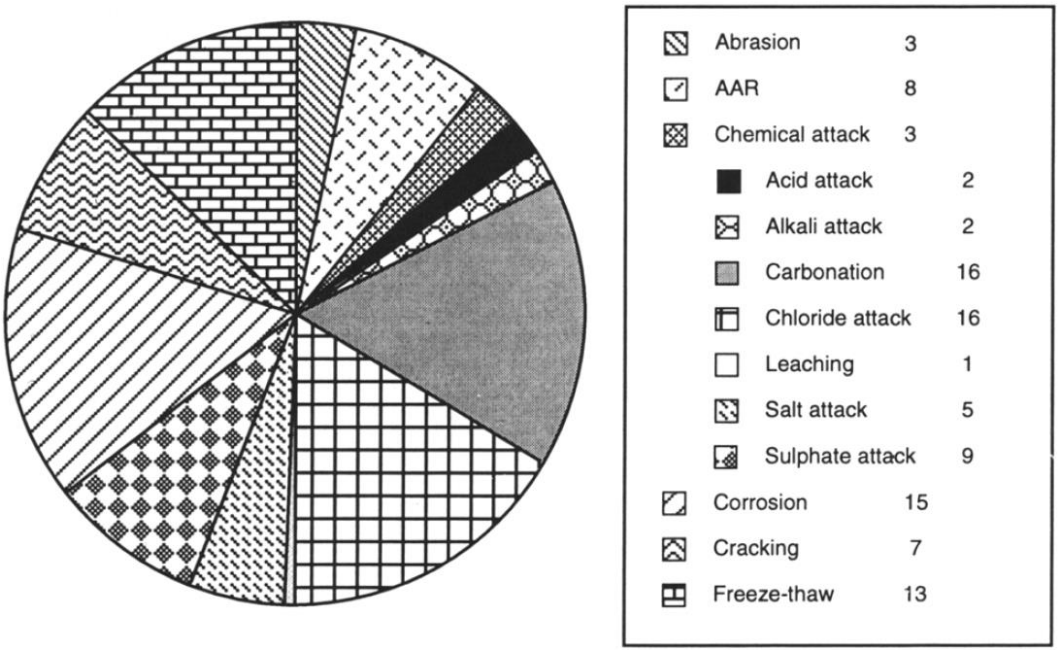
Faktory ovlivňujícími rychlost degradace vzorků jsou hlavně pH prostředí, čas a teplota (čím vyšší, tím rychlejší degradace). Výztuž použitá v této práci je vyrobená ve stejné továrně (Saint Gobain, Litomyšl), jako výztuž v mé diplomové práci. Alkalická ochrana tvořená tenkou vrstvou polymeru je aplikována především z technologických důvodů (zpevňuje režnou tkaninu), má však i další efekty. Zakrývá například drobné trhlinky ve struktuře skla a chrání sklo před působením agresivních látek. V experimentu bylo použito dvou typů textilií a čtyři druhy matrice s mírně odlišným složením. Vzorky byly uskladněny v prostředí s teplotou 40°C a 99% vlhkostí po dobu jednoho roku, což má simulovat stejnou zátěž jako 50 let v běžném středoevropském podnebí. Čtyři různé matrice měly různé složení za účelem dosažení prostředí s různým pH. Vzorky byly poté podrobeny zkoušce v prostém tahu a autoři závěrem shrnují, že vliv okolního prostředí závisí hlavně na vnitřním pórovém prostředí. Dobře v testu obstála ta matrice, která měla ve svém složení metakaolin v kombinaci s popílkem, protože tato kombinace tvoří dlouhodobě stabilní vnitřní prostředí. Vzorky vykazovaly minimální výkyvy oproti referenčním hodnotám. Dalším významným faktorem pro poruchu vzorků byly podle autorů drobné diskontinuity v jednotlivých svazcích

textilie, pokud ale dojde ke korozi a poruše jednoho z vláken svazku, dojde k redistribuci na další. Je to však jen otázka času kdy se postupně poruší všechny a dojde ke kolapsu konstrukce.

Mumenya a kol. [7] ve svém článku zmiňují, že betonové konstrukce jsou vystavovány jak mechanickému, tak i chemickému, případně termickému zatížení, tyto stavy spolu navíc souvisí a vzájemně se ovlivňují. Autoři prováděli výzkum v Africe, kde jsou konstrukce často vystaveny abrazi pískem či erozi. Takový konstrukční prvek je pak náchylnější na další okolní vlivy, snáze může adsorbovat různé agresivní látky a následně může být porušen tepelnými změnami. To vše zapříčiňuje vznik mikrotrhlin. Do konstrukce se také dostávají plyny, které obsahují i CO_2 a ty pak v kombinaci s vlhkostí můžou vyvolat změnu vnitřního pH. V experimentu byla použita polypropylenová textilie, mezi jejíž hlavní výhody patří odolnost vůči chemickému prostředí v betonu, vysoká tažnost, snadná manipulace a nízká pořizovací cena. Pro širší použití v praxi je však nutné nejprve znát její dlouhodobé chování. Autoři zmiňují, že nenašli jasný návod jak simulovat urychlené stárnutí textilního betonu, který je zároveň velmi mladý materiál a z toho důvodu neexistuje ani mnoho reálných zkušeností s dlouhodobým chováním. Vzorky byly podrobeny třem různým prostředím. Prvním byla tepelná komora, kde vzorky ohřívali na 50°C a ochlazovali na 23°C. Další byla vlhkostní komora, kde pomocí vakua dosahovali vysátí vody ze vzorků. U obou komor bylo opakováno shodně 100 cyklů. Vzorky pro karbonataci byly uskladněny v komoře s teplotou 30°C a CO_2 v 10% množství. Stupeň karbonatace se průběžně monitoroval pomocí fenolftaleinových indikátorů. Výsledkem experimentu je, že vzorky podrobené vyšší teplotě i vlhkosti nevykazovaly výrazné změny v testu pro vytažení jednoho svazku. Karbonatované vzorky však jevily pevnější pouto mezi textilií a betonem, což může být zapříčiněno vznikem krystalů $CaCO_3$, které se provázaly s textilií.

Basheer a kol. [8] popisují vlivy prostředí, které mohou ovlivnit vlastnosti betonových konstrukcí. Autoři provedli rozsáhlou rešerši na základě více než 400 článků vydaných mezi lety 1985 a 1995 za účelem sestavení žebříčku příčin, které způsobují poruchy betonových konstrukcí. Největším problémem je vnikání vlhkosti do betonu, které s sebou nese další problémy. Permeabilita betonových konstrukcí proto může sloužit jako měřítko životnosti konstrukcí, s průsakem vody se totiž do betonu dostávají další látky. Autoři vyčíslili, že až 54% poruch bylo způsobeno právě chemickými reakcemi, z toho většina karbonatací (16%), koroze způsobená chloridy (16%), kyseliny a zásady způsobily potíže shodně u 2 %

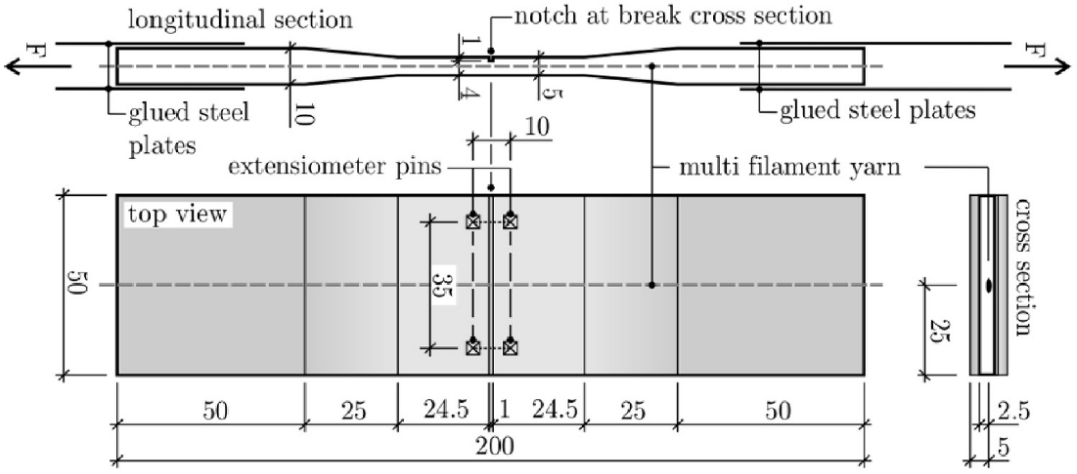
konstrukcí. Kromě chemických problémů se na degradaci betonu významně podílel mráz a to v 13 % případů. Další příčiny jsou zobrazeny na Obr. 6.



Obr. 6 - Příčiny poruch betonových konstrukcí v procentech [8]

Naopak lidský podíl na degradaci betonu je tvořen především nevhodnou směsí betonu pro ten daný účel konstrukce. U cyklických období mrazu je problém způsoben zvýšeným hydraulickým tlakem v kapilárách, difuze gelové vody do kapilár a zvýšení osmotického tlaku z mrznutí roztoků obsahující soli v kapilárách. Kyseliny beton narušují tím, že rozpouští CH a CSH části, které jsou následně vymývány pryč a beton se tak stává pórovitější a tím pádem i náchylnější k další degradaci.

Fidelis s kolegy [9] zkoumají životnost betonu vyztuženého jutou. Vzorky byly uloženy v prostředí s teplotou 40°C a relativní vlhkostí 99% po dobu jednoho roku a v průběhu roku se vždy část vzorků použila pro průběžné zkoušky. Z předešlých studií zjistili, že přírodní vlákna v zásaditém prostředí znatelně degradují, z toho důvodu připravili vzorky ze dvou směsí. Jedna byla složená z portlandského cementu, ve druhé byla část nahrazena pucolánovým cementem a metakaolinem. Textilie byla opatřena styrene-butadien polymerovou ochrannou vrstvou. Použili však i vzorky bez této ochrany, která se jinak běžně používá i pro skelná a karbonová vlákna.



Obr. 7 - Tvar testovaných vzorků [9]

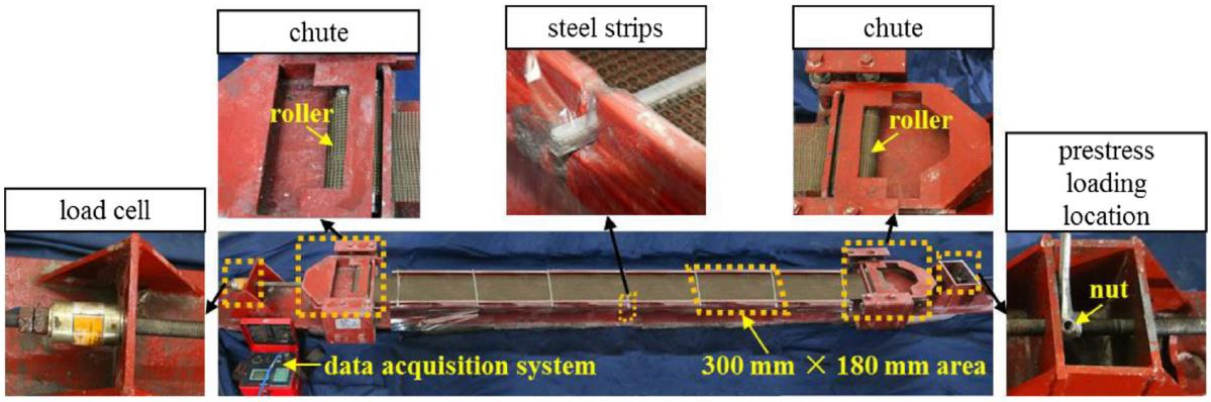
Výsledkem tohoto pokusu je, že vzorky s matricí z portlandského cementu a ochrannou vrstvou textilie už při zkoušení po 180 dnech ztratily všechnu duktilitu a vzorky ke zkoušení po 365 se dokonce rozpadly. Domněnka k tomu je taková, že došlo k reakci mezi ochrannou vrstvou a $Ca(OH)_2$, zatímco druhá matrice neumožnila vznik této sloučeniny. U vzorků z druhé matrice navíc došlo k zlepšení vlastností u vzorků s ochrannou vrstvou oproti vzorkům bez ní. U vzorků s ochrannou vrstvou byla také zaznamenána vyšší tuhost. Vzorky byly také zkoumány elektronovým mikroskopem, kdy u vzorků z první matrice bylo zjištěno prorůstání krystalů portlanditu mezi vlákna textilie, naproti tomu u druhé směsi nedošlo k narušení vláken textilie.

Nobili ve své práci [10] zkoumal vliv zásaditého a mořského prostředí na mechanické vlastnosti kompozitu cementové matrice a skelné textilní výztuže. Vzorky byly ponořeny po dobu 1000 hodin do zásaditého prostředí s pH 10 a do prostředí odpovídající mořské vodě (salinita 3,5%, což je průměrná salinita světových moří). Experiment byl prováděn na tenkých plátcích (prostý tah) a zkušebních trámečcích. Výsledkem bylo, že vzorky ze zásaditého i slaného prostředí vykazují shodně pokles v tahové pevnosti o 11%, zatímco ve zkoušce tříbodovým ohybem pokles činil u matrice jednoho složení 24% a u druhé matrice až 53%.

Marko se spolupracovníky [11] se zabýval vlivem složení samotné cementové matrice na životnost cementového betonu. Byly posuzovány tři matrice různého složení se snahou o rozdílné vnitřní pH. Matrice, kde bylo použito pucolánové pojivo, vykazovala snížení hladiny pH s časem a to z 12,4 na 11,8 po 360 dnech. Naproti tomu u matrice pouze s portlandským cementem mělo pH stálou úroveň 12,7. Třetí matrice byla mixem mezi první a druhou a stejně tak vykazovala i úroveň pH mezi první a druhou. Vzorky byly po odbednění uchovávány

v klimatické komoře za teploty 40°C a relativní vlhkosti 99% po dobu 28, 56, 90, 180 a 360 dnů. Výsledkem tahových zkoušek byly tyto poznatky: Referenční vzorky s portlandským cementem vykazovaly větší pevnost než vzorky s pucolánem. Vysvětlení pro to je, že došlo k rychlé hydrataci v počáteční fázi tuhnutí a tím pádem k homogenní struktuře CSH fáze a to zapříčinilo mnohem lepší pouto mezi matricí a výztuží. Oproti tomu podobné vzorky, které podstoupily urychlené stárnutí, projevily snížení mechanických vlastností. Vliv na to pravděpodobně měla stále vysoká hladina pH, která byla zapříčiněna vznikem portlanditu ve vlhkém prostředí klimatické komory. Zatímco u matrice s pucolánovým pojivem byl portlandit „konzumován“ při tvoření CSH a CAH fází. Závěrem se dá tvrdit, že vhodná matrice pro textilní beton by měla obsahovat pucolány, které snižují množství portlanditu, což přispívá k delší životnosti tohoto kompozitu.

Du s kolegy ve své práci [12] zkoumali vliv počtu vrstev (0 až 5 vrstev) bazaltových textilií a přítomnosti ocelových drátků na mechanické chování textilního betonu v tahu. Zároveň bylo zkoumáno, zda lze textilní výztuž předepnout (viz. Obr. 8) a jaký to následně bude mít vliv. Textilní výztuž se rozhodli předepínat z toho důvodu, že duktilita je u textilního betonu vítanou vlastností a v praxi je pro bezpečné a příjemné používání konstrukcí nutné co nejvíce omezit průhyby prvků, které se docílí včasnou aktivací výztuže.



Obr. 8 - Zařízení pro vnášení předpětí do textilní výztuže [12]

V experimentu byla použita matrice podobného složení jako v mé práci. Všechny vzorky měly tvar kvádru o rozměrech 250 x 40 x 12 mm. Výsledkem experimentu je, že u vzorků s jednou a dvěma vrstvami výztuže nedošlo k zvýšení napětí při vzniku první trhliny, zato u vzorků se třemi a více vzorky byl přínos patrný. Zároveň vznikalo mnohem více drobnějších trhlinek. U vzorků s vneseným předpětím došlo opět k nárůstu napětí při vzniku první trhliny, ne však ke zvýšení celkové únosnosti a navíc došlo ke snížení počtu trhlin a zvýšení vzdálenosti mezi nimi. Byla navíc snížená celková duktilita vyčerpáním určité části

protažení výztuže už před betonáží. Přítomnost drátků měla mírně rozdílný efekt u nepředepjatého a předpjatého betonu. U nepředpjatého betonu došlo k pouze zvýšení napětí při vzniku první trhliny a celkového napětí, zatímco u předepjatého betonu vzrostla navíc i kapacita deformace (strain capacity).

Zargaran s kolegy [13] se zaměřili na vliv stupně vyztužení textilního betonu. Ve výzkumu proto bylo použito čtyř stupňů vyztužení a to 0,16%, 0,32%, 0,64% a 1,28%. Jako výztuž byla zvolena nylonová textilie a to čtyř různých typů (88, 180, 205 a 430 tex) a vyráběné dvěma způsoby (přímé a zapletené) s dvěma různými velikostmi ok sítě. Zároveň bylo použito dvou tlouštěk vzorků a to 15 a 25mm. Pro zkoušení byla zvolena zkouška tahem při čtyřbodovém ohybu. Při výzkumu autoři došli k velmi zajímavému poznatku spojeného s vlastnostmi nylonové výztuže. Očekávali totiž, že textilní beton vykáže změny oproti referenčním vzorkům pouze po vzniku první trhliny. Dodatečným experimentem zjistili, že nylonová vlákna se v zásaditém prostředí smršťují. Z toho důvodu po zalití do zásadité matrice působila nylonová vlákna jako předpínací výztuž a zvýšila hodnotu napětí před dosažením první trhliny. Dalším logickým poznatkem bylo, že i ta nejhorší výztuž výrazně pomohla v duktilním chování vzorku. Dále vyšlo najevo, že u vzorků se stejným stupněm vyztužení, ale u sítí s různými velikostmi ok (5 mm a 10 mm) vykazovalo lepší maximální únosnost vzorky s menšími oky, tedy 5 mm. Dále u vzorků se stejnými rozměry ok ale různými tloušťky svazků bylo dosaženo lepších výsledků u tlustších vláken. Důvodem pro to může být lepší pouto mezi matricí a ochranou většího množství vláken nylonu před působením zásaditého prostředí betonu. Zvýšení průřezu vzorku o 40% pak zvýšilo pevnosti vzorků až o 100%. Zapletená vlákna mají nižší účinnost než vlákna přímá, za což pravděpodobně může fakt, že vlákna jsou zohýbaná a nepřenáší tak tlak rovnoměrně. Na druhou stranu u zapletených vláken je dosaženo lepšího pouta s matricí.

Roy s kolegy [14] se zabývali vlivem příměsí na odolnost betonu vůči agresivnímu prostředí. Klasický cement nahradili mikrosilikou, metakaolinem nebo popílkem v různém množství a zkoumali vliv různých kyselin (H_2SO_4, HCl, HNO_3, H_3PO_4, CH_3COOH) na změnu hmotnosti, tlakové pevnosti a pH roztoků po 28 dnech. U většiny 1% roztoků kyselin došlo ke změně pH ze zhruba 1,4 na hodnoty přes pH 11. U 5% roztoku H_2SO_4 však byl nárůst pouze na 6,95 a u 1% roztoku H_3PO_4 na 4,59. U všech vzorků došlo k poklesu hmotnosti vzorků o jednotky procent. Obecně se dá říci, že všechny příměsi zlepšily odolnost betonu proti kyselinám.

Wang a kol. [15] se ve své práci zabývají zcela novým kompozitem s označením TRSSC (Textile Reinforced Self-Stressing Concrete). Tento kompozit je zvláštní především kvůli své matrici. Jako pojivo je použit sírano hlinitanový (sulfo-aluminate) samopředpínavý cement. Tato směs se sama dokáže předepnout až na 1-3 MPa, což ho dělá kompaktnější a odolnější proti vniknutí cizích látek. V této práci je poprvé použit v kombinaci s textilní výztuží. Ukázalo se, že tento materiál má zvýšenou odolnost proti vzniku trhlin oproti běžnému textilnímu betonu.

2.1 Popis působení agresivního prostředí na beton

Vědní obor zabývající se životností betonových konstrukcí je stále relativně mladý. Náročnější betonové konstrukce se navrhují běžně na životnost 100 let, paradoxně však ještě neexistuje mnoho staveb, které by tohoto stáří dosáhly. Je proto velmi důležité znát procesy, které se v betonu odehrávají, když se dostane do styku s agresivním prostředím. Totéž platí i pro textilní beton.

Kyselé prostředí

Neville ve své knize [16] píše, že beton tvořený převážně portlandským cementem má velmi zásadité vnitřní prostředí, což velmi zvyšuje jeho náchylnost vůči účinku kyselin. Použití portlandského cementu bychom se proto měli vyhnout v prostředí, kde se očekává výskyt kyselin. Napadení pak vypadá tak, že roztok kyselin rozkládá produkty hydratace a utváří nové sloučeniny, které jsou následně vymývány. Nejohroženějšími produkty hydratace pak jsou $Ca(OH)_2$ a C-S-H gel, který je navíc nositelem mechanických vlastností. Plnivo většinou ohroženo není, to se však netýká vápenatého plniva (plnivo na bázi vápence však v určitých případech může být použito záměrně, například do potrubí, kde je nežádoucí drsný povrch utvořený z neporušeného plniva). Beton může být ohrožen roztoky s pH nižším než 6,5, závažné poškození ale nastává u roztoků s pH nižším než 5,5 a od hodnoty 4,5 už je účinek velmi závažný. Rychlost poškozování je přirovnatelná k druhé odmocnině času a to z toho důvodu, že útočící látka musí postupně pronikat i skrze výsledky reakce s $Ca(OH)_2$ na povrchu betonu. Záleží tedy také na rychlosti přenosu iontů. Rychlost se také snižuje, když se roztok dostane k plnivu, tím se výrazně snižuje plocha působení kyseliny.

Chemické reakce odehrávající se ve styku betonu a kyseliny sírové popisují následující rovnice [17]:

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \quad (3)$$

$$CaO \cdot SiO_2aq. + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + SiO_2aq. \quad (4)$$

Před působením vlivu kyselin na beton se dá chránit správnou volbou cementové směsi a hlavně kvalitou cementu. Dále je vhodné nechat beton dostatečně vyschnout, než bude vystaven kyselinám. Dle Beddoe a Dornera [18] však odolnost proti kyselinám není nutně dosažena aplikací pevnostních kritérií jako vysoké množství cementu a nízký poměr w/c. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo ve směsích s křemenným plnivem s maximalizací zaplnění pórů, což způsobilo nižší obsah pojiva. Rychlost koroze je ovlivněna velkým množstvím faktorů jako chemickým složení směsi, reaktivitě matrice i plniva, zrnitostní křivkou atd.

Zásadité prostředí

Zásadité prostředí je pro beton přirozené, zaměřím se tedy na vliv zásad na textilní výztuž.

Dle Micelli [19] se na povrchu textilní výztuže vytváří ochranná vrstvička, která je tvořená za přítomnosti Ca^{2+} iontů, které se naváží na Si-O skupinu a vytvoří vrstvu chránící textilii před OH^- ionty. Tento jev však nenastává v prostředí, kde se vyskytují ionty Na^+ nebo K^+. U skleněných vláken velmi záleží na typu použitého materiálu. E-sklo má povrchovou ochranu ze styren-butadienu, která se však manipulací může porušit a umožnit tak vniku iontů OH^-, které poškozují vlákna. V případě AR skla je ochrana tvořena přítomností 15-20% oxidu zirkoničitého, který působí jako chemická bariéra zpomalující působení OH^- iontů.

Sim s kolegy [20] ponořili skelná vlákna (S-glass[1]) do jedno-molárního roztoku NaOH na dobu 28 dnů při zvýšené teplotě 40 °C a následně zkoušeli tahovou pevnost. Po sedmi dnech byla ztráta 50%, po 28 dnech až 80%.

Zmrazovací cykly

V této části popíši efekt mrazu na již ztvrdlý beton. Vliv mrazu na čerstvý beton je jiná problematika. Neville ve své knize [16] vysvětluje, že poškozování betonu vlivem mrazu je spjato hlavně s přítomností vody v pórech betonu. Velké vnitřní póry, které jsou vyplněné

[1] S-glass = vysokopevnostní sklo

vzduchem v důsledku špatného hutnění, tím pádem nejsou předmětem této problematiky (pokud se do nich případnou trhlinou voda nedostane). Velikost pórů je z druhé strany omezena póry v C-S-H gelu, které jsou totiž tak malé, že neumožňují vznik zárodků krystalů ledu. Cyklické zmrazování je kumulativní proces, úroveň poškození se tak s rostoucím počtem cyklů zvětšuje. Samotný proces degradace betonu je způsoben tím, že voda při přeměně na led zvětší svůj objem o zhruba 9%, což je doprovázeno vznikem velkého tlaku na stěny pórů. Druhým poškozujícím mechanismem je difuze vody uvnitř betonu způsobené osmotickým tlakem způsobeným oddělením zmrzlé vody od vody pórové. Vlhkost v betonu je proto významným faktorem při poškození betonu mrazem. Z toho důvodu se doporučuje umožnit betonovým konstrukcím důkladné vyschnutí před vystavením mrazu. Při každém mrazicím cyklu dojde ke vzniku drobných trhlinek v pórovém systému betonu, do kterých se po rozmrazení dostane voda, která opět zmrzne a může způsobit další škody. Hlavním degradačním procesem u vysokopevnostních betonů je právě osmotický tlak vzniklý v důsledku migrace nezmrzlé vody v gelových pórech. [21]

3 TEXTILNÍ BETON

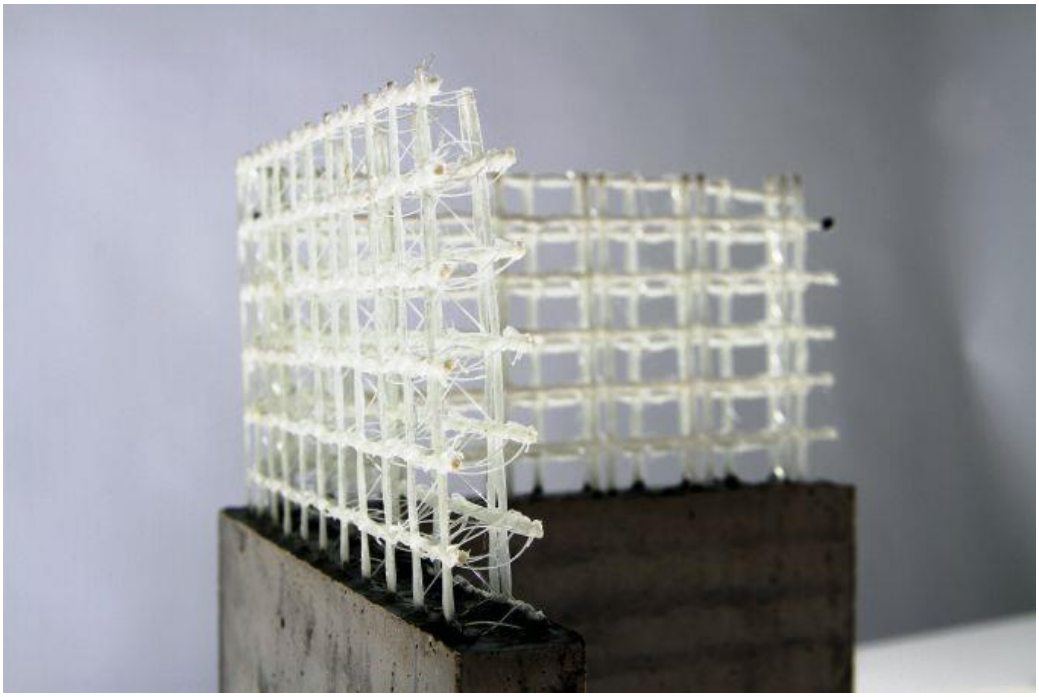
Textilní beton se v poslední době stává stále častěji používaným materiálem a to jak v klasickém stavebnictví, tak i pro výrobu různých designových doplňků do domácnosti. Pojem „textilní výztuž“ není v současné době na legislativní úrovni řešen. Z toho důvodu chybí ucelený návod nebo popis jakou textilní výztuž do betonu použít, čemu se vyvarovat, jak to technologicky provést a jaké metody pro zkoušení vlastností zvolit. To však nabízí širokou škálu možností a variant.

V nedávné době se velmi rozmohlo zkoumání všech různých alternativních příměsí do betonu, které by zvýšily jeho pevnost a zlepšily další vlastnosti. Příkladem tomu jsou betony s příměsi z recyklátů nebo vláknobetony, kde se jako rozptýlená výztuž používají krátká vlákna z různých materiálů (plast, ocel, sklo, uhlík, …), takto použitá vlákna však mohou působit velmi neekonomicky, protože jsou rozptýleny v celé hmotě a v místech výskytu tlakového napětí nejsou téměř potřeba. Textilní výztuž je z tohoto pohledu velmi perspektivní. Díky její snadné manipulovatelnosti jí lze snadno vmístit do míst, kde je jí opravdu potřeba. Vlastnosti textilní výztuže se odvíjí často podle tloušťky svazků, které se kvantifikují podle jednotky tex, která udává hmotnost jednoho kilometru svazku v gramech (g/km).

První výzkumy zaměřené na vývoj textilního betonu pochází z roku 1980 [22]. Textilní beton je založen na klasickém principu železobetonu, kde tlakové napětí přenáší beton a tahové výztuž. V běžném železobetonu se jedná buďto o prutovou či síťovou výztuž z ocelových prutů kruhového průřezu, další možností je výztuž předepnutá a to jak předem, tak dodatečně. U předpjatého i nepředepjatého betonu se však musíme potýkat s určitými nepříjemnostmi. Jedná se hlavně o nutnost zajištění krycí vrstvu betonu tak, aby nedocházelo ke korozi ocelové výztuže. Další nepříjemností je náročná manipulace s těžkými ocelovými prvky. Poslední nepříjemnost je ekologická náročnost výroby ocele. Tento argument však může být použit i proti textilní výztuži v závislosti na materiálu a jejím použití.

Textilní výztuž je schopná všechna tato negativa minimalizovat. Textilní výztuž nekoroduje a dle Shipinga [23] stačí vrstva pouze 2-3 mm tenká. S výztuží se také snadno manipuluje, dá se stříhat obyčejnými nůžkami a snadno se tvaruje do jakýchkoliv tvarů. Výztuž může být pouze jednoúrovňová (2D), případně i 3D, tedy dvojvrstvá (viz. Obr. 9). 3D výztuž má tu výhodu, že i když je vytvořena pouze minimální krycí vrstva, nehrozí odchlípnutí textilní výztuže od konstrukce, protože druhá vrstva je ukotvená hlouběji v betonu

a drží vrstvu u povrchu [24]. Další z uváděných výhod je odolnost skelných textilií proti požáru a propustnost vodní páry [10].



Obr. 9 - 3D textilní výztuž [25]

3.1 Využití textilního betonu v praxi

Vogel ve svém článku [22] popisuje do té doby známé využití textilního betonu. Ten se využívá například k budování lávek pro pěší, tenkostěnné potrubí, skořepiny či fasádní panely. První betonová lávka byla postavena za spolupráce TU Dresden a stavební společnosti Betonwerk Ochatz. Lávka byla dlouhá 8,6 m a 2,5 m široká při tloušťce jednotlivých prvků 3 cm. V roce 2010 už byla však ve městě Albstadt postavena lávka délky 100 m (viz Obr. 10), což jí učinilo nejdelší stavbou svého typu a doby na světě. V lávce je pouze předpínací a textilní výztuž. Lávka je přitom údajně o 50 % lehčí, než kdyby byla z klasického železobetonu.

Obr. 10 - Lávka pro pěší ve městě Albstadt [26]

Novotná a kolektiv [24] se ve své práci zaměřili především na využití textilního betonu pro fasádní panely, které tvoří významný díl ve využití tohoto kompozitu. Například v Holandsku použili 10 000 m^2 fasádních panelů z textilního betonu při stavbě nové budovy ROC Leiden Community College. V Drážďanech použili 1070 m^2 fasádních panelů při výstavbě nové části TU Dresden, panely byly použity také na RWTH Aachen a na mnoha dalších stavbách převážně v Německu.

Obr. 11 - Budova Ballet am Rhein v Dusseldorfu s fasádními panely z textilního betonu [27]

Mimo nové konstrukce se textilní beton využívá také k zesilování konstrukcí stávajících, jako obalování zděných sloupů či zesilování železobetonových stropů. Ortlepp a Ortlepp [28] v článku popisují využití textilního betonu při zesilování železobetonových sloupů. Při experimentu ovázali 2 m vysoké sloupy o průřezu 140 x 140 mm textilním betonem se skelnou textilií. Před aplikací byly rohy sloupů zaobleny a povrch zdrsněn opískováním, aby došlo k lepšímu přilnutí textilního betonu. U vzorků bylo použito různého množství vrstev textilie (2,3,4). U vzorků došlo k nárůstu únosnosti o 34 až 85%, dle typu vyztužení sloupu a počtu vrstev textilní výztuže.

Brückner s kolegy [29] použili textilní beton ke zvýšení smykové a ohybové únosnosti železobetonových nosníků. U nosníků zatěžovaných za účelem vzniku maximální smykové síly dosáhli nárůstu až 45% únosnosti proti srovnávacím vzorkům. U vzorků zatěžovaných pro vznik co nejvyššího ohybového momentu dosáhli více než dvojnásobné únosnosti za menších průhybů.

Verbruggen a kol. [30] se zaměřili na zpevnění železobetonových nosníků externím obalením uhlíkovou textilií. Po obalení bylo dosaženo až 20 - 40 % zvýšení únosnosti před vznikem první trhliny. Zvýšil se také celkový počet vzniklých trhlin a s tím spojené zmenšení jednotlivých trhlin. Celkový závěr je takový, že externí vyztužení textilií se vyplatí u konstrukcí, kde je důležité omezení průhybu a oddálení vzniku trhlin.

Dalším využitím je například skořepinové zastřešení stojanů na kola v kampusu univerzity RWTH Aachen v Německu. Tloušťka této skořepiny je pouze 20 mm a je vyztužená šesti vrstvami uhlíkové textilie. [31]

Obr. 12 - Přístřešek na kola v kampusu RWTH Aachen [31]

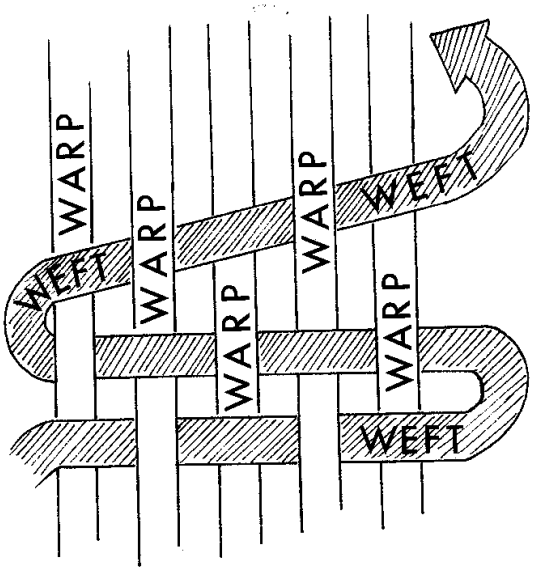
Kromě klasického využití ve stavebnictví se však textilní beton dá použít i v interiéru při výrobě svítidel (Obr. 13), stolů, kuchyňských linek a podobně.

Obr. 13 - Lampa z textilního betonu [32]

3.2 Materiály pro textilní výztuž

Jednou z hlavních výhod textilních výztuží je jejich velmi snadná manipulovatelnost a tvarování, materiály použité pro výrobu textilií by tedy toto specifikum měly splňovat. Textilie zároveň mají vysokou pevnost v porovnání ke své váze. Textilní výztuž však musí být schopna odolávat zásaditému prostředí, kterému bude v betonu vystavena po celou dobu životnosti. Některé materiály jsou odolné bez dalších zásahů, jiné potřebují aplikovat dodatečnou ochrannou vrstvu.

Textilie může být v podstatě vyrobená z kteréhokoliv materiálu, který to technologicky umožňuje. Rozhodující je však proces, kterým textilie vzniká, tedy tkaní. Výsledkem tkaní je navzájem kolmá soustava dvou nití (útky a osnovy, viz Obr. 14). Princip tkaní je takový, že mezi rovně natažené nitě osnovy se provlékají útky po celé šíři textilie. Při ruční výrobě textilií se osnova provlékala pomocí posouvání člunky pod některými zvednutými osnovami, v současné době je však výroba převážně automatická s mechanickým pohonem. Útek se provléká pomocí jehel, proudu vzduchu nebo vody [33].



Obr. 14 - Princip tkaní textilie (weft = útek; warp = osnova) [49]

V současné době se jako výztuž do textilních betonů využívá textilie z různých materiálů, které mají své výhody i nevýhody. Zde je výběr několika možných materiálů pro textilní výztuž:

Sklo

Má velmi vysokou pevnost, v zásaditém prostředí však ztrácí vlastnosti, proto je nutná ochrana. Skelné textilie mají pevnost podobnou speciálním ocelím, ale za třetinové hmotnosti. [3; 34] Pro výrobu skelných textilií lze použít směs, která už díky svému složení poskytuje odolnost vůči alkáliím. Tato směs je však drahá a používá se pro zvláštní účely (tzv. AR-glass). Skelná textilie v mé práci je vyrobená z E-glass[2] materiálu. Dále existuje C-glass[3], ta je však méně kvalitní a výrobky z tohoto materiálu pochází převážně z Číny.

Uhlík

Tato vlákna vynikají především svou nízkou hmotností (1,6 - 2,2 kg/m^3), vysokou teplotní a chemickou odolností [19] a vysokým modulem pružnosti. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena. [34]

Polypropylen (PP)

Levný materiál s příznivými vlastnostmi jako chemická odolnost v zásaditém prostředí, odolnost vůči vlhkému prostředí, vysoká tažnost a snadná manipulovatelnost. Nevýhodou je však nízký bod tání, který omezuje použití PP [7; 34]

[2] E-glass – materiál původně používaný jako izolace elektroinstalací. Mělo však výborné mechanické vlastnosti, tak se začalo používat jako výztužná vlákna. [47]

[3] C-glass – korozivzdorné sklo používané v kyselých prostředích. [48]

Juta

Jde o přírodní a tedy ekologický materiál, v zásaditém prostředí však degraduje a je proto nutné ho impregnovat polymery, čímž z části ztrácí svou ekologičnost. Juta je také citlivá na přítomnost vlhkosti, tu do sebe nasakuje a jako důsledek je pokles pevnosti [9]. V zemích jako je Indie je produkce juty velmi vysoká a proto se nabízí jako alternativní materiál do mnoha dalších odvětví. Preferována je kvůli nízké pořizovací ceně a ekologičnosti, pevnost je však méně než třetinová oproti uhlíkovým a skelným textiliím. [35]

Bazalt (Čedič)

Bazaltová (čedičová) vlákna mají výborné mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti. Jejich výroba je ekologická a zdraví nezávadná. [36; 34] Při výrobě nejsou použity žádné další příměsi, jde o čistý čedič, což snižuje náklady na výrobu. Čedič je také velmi odolný při požáru. [20]

Nylon

V zásaditém prostředí dochází ke smršťování těchto vláken, má ale nižší modul pružnosti a nižší pevnost než vlákna skleněná či uhlíková. [13]

4 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Experimentální programy zaměřené na zkoumání životnosti materiálů jsou typické svou časovou náročností. Vzorky musí být vystaveny agresivnímu prostředí po dobu několika týdnů či měsíců. Celý experimentální program tak probíhal v rozmezí půl roku od vyrobení prvního vzorku. Práce na experimentu probíhala v následujícím pořadí: výroba vzorků; zrání do požadovaného stáří; uložení do agresivního prostředí na požadovanou dobu; samotné zkoušení; vyhodnocení.

4.1 Použité materiály

Matrice pro textilní beton se vyznačuje svou velmi jemnou strukturou, která je nutná pro provázání skrz oka textilie. Druhou nezbytnou součástí je textilní výztuž, v této práci byla použita skelná výztuž.

4.1.1 Cementová matrice

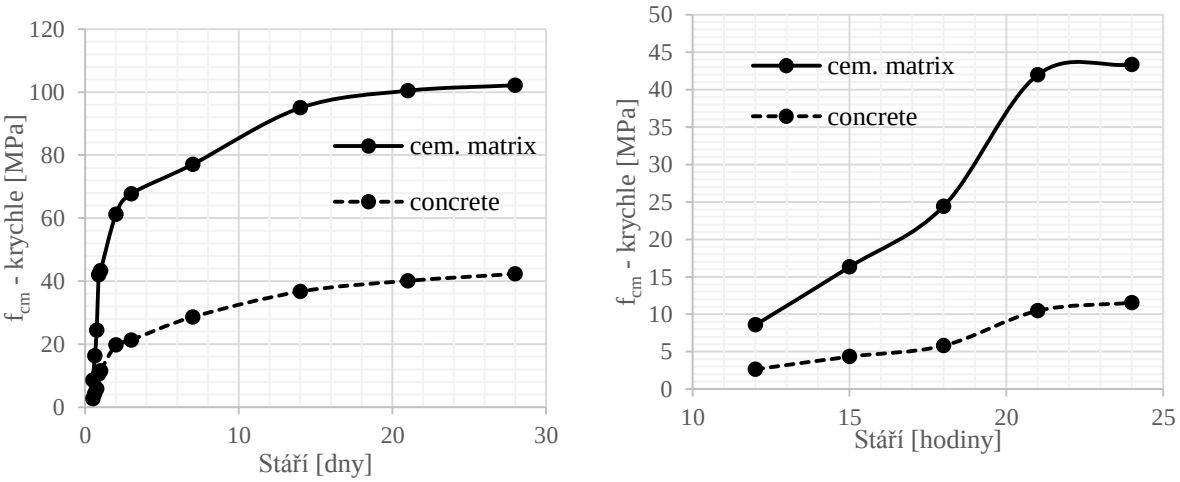
Pro můj experiment byla použita již sestavená matrice, která je využívána i k jiným výzkumům v laboratoři Experimentálního Centra FSv ČVUT [37]. Jedná se o matrici s vlastnostmi podobnými vysokopevnostním betonům. Rozdíl oproti klasickému betonu je především v absenci plniva větších rozměrů. Průměr největšího zrna v této směsi je pouze 1,2 mm (křemičitý písek). I přes přítomnost superplastifikátoru však směs velmi rychle tuhne. Z toho důvodu je vyžadována rychlá manipulace při odlévání zkušebních vzorků.

Vysokopevnostní beton se vyznačuje svojí velkou hutností, která je dána velkým obsahem částic s velmi malou střední velikostí zrna. Nejjemnější póry jsou zaplněny mikrosilikou společně s křemennou moučkou a z této směsi tak vytváří hmotu velmi odolnou proti vniknutí vody. Přítomnost těchto látek má však i negativní vliv na teoretické využití s klasickou ocelovou výztuží. Přítomnost mikrosiliky má za následek snížení vnitřního pH, což může zapříčinit korozi použité ocelové výztuže. Toto je však z části vyváženo vysokou vodonepropustností, která ale může být narušena vznikem trhlin. Tab. 1 zobrazuje soupis všech použitých složek matrice a jejich hmotnostní podíl.

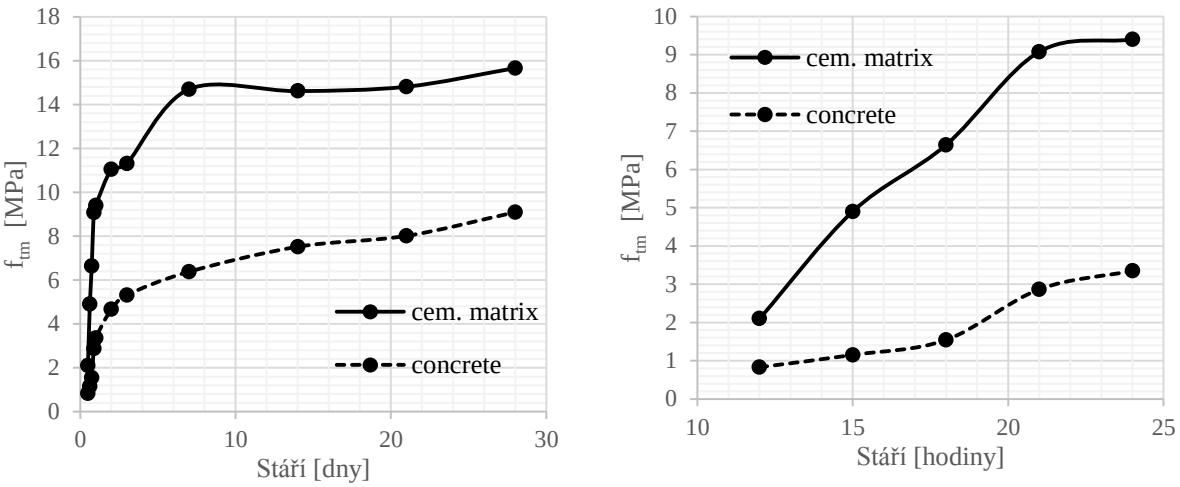
Tab. 1 - Hmotnostní složení matrice

Složka	Hmotnostní podíl	Hmotnost složky
	[-]	[kg/m3]
Cement CEM I 42,5 R	1	680
Mikrosilika	0,19	129
Křemičitý písek 0,1/0,6	0,48	326
Křemičitý písek 0,3/0,8	0,5	340
Křemičitý písek 0,6/1,2	0,38	258
Křemenná moučka	0,48	326
Superplastifikátor	0,011	7,5
Voda	0,35	238

Vogel a kol. [37] zkoumali vývoj mechanických vlastností této směsi v čase na krychlích (100 x 100 x 100 mm) a trámečcích (160 x 40 x 40 mm). Parametry byly zkoumány v různém stáří v řádech hodin i dnů. Výsledky tohoto experimentu jsou patrné z Obr. 15 (plnou čarou jsou znázorněny hodnoty cementové matrice, čárkovaně jsou pro srovnání hodnoty běžného betonu třídy C 30/37). Střední pevnost v tahu za ohybu je znázorněna na Obr. 16 (plná čára opět znázorňuje cementovou směs, čárkovaná srovnávací beton).

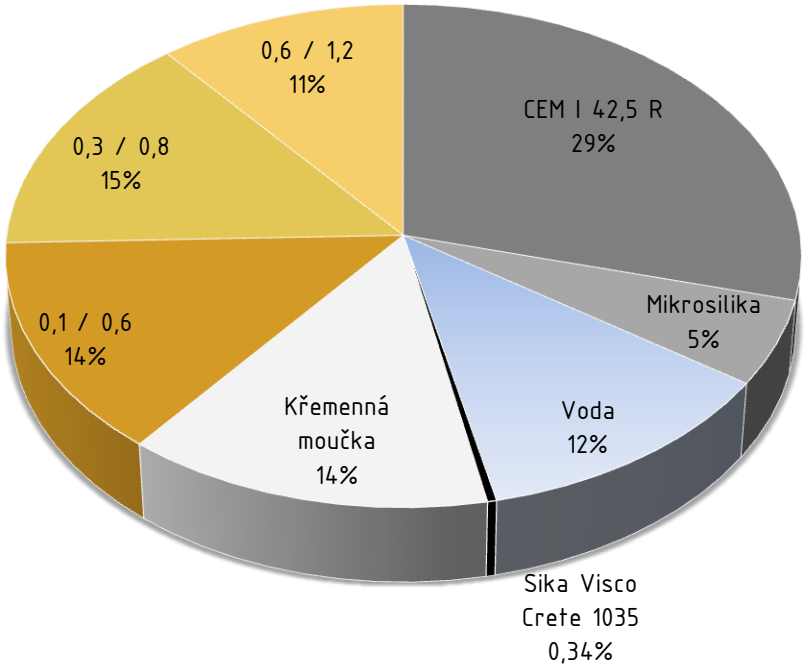


Obr. 15 - Vývoj střední krychelné pevnosti matrice v čase [37]



Obr. 16 - Vývoj střední pevnosti v tahu za ohybu v čase [37]

Pro textilní beton je vysoce nevhodné použít klasický beton s plnivem s rozměry v řádech centimetrů. Kvůli tvaru textilie je nutné, aby všechny části matrice byly schopné projít okem textilie, aby bylo možné dosáhnout úplného provázání dvou betonových vrstev oddělených textilií.



Obr. 17 – Grafické znázornění hmotnostních podílů složení cementové matrice

CEM I 42,5 R

Portlandský cement dodávaný společností Českomoravský cement, a.s. Výrobce uvádí, že cement je určen pro betony běžných a vyšších pevnostních tříd s rychlým nárůstem pevnosti a vysokou konečnou pevností. Pevnost v tlaku dle EN 196-1 po 28 dnech je 61 MPa, pevnost v tahu za ohybu 9 MPa. Cement je vhodný pro použití do všech stupňů prostředí dle ČSN P 73 2404. [38]

Mikrosilika

Jedná se o příměs dodanou společností Stachema, která slouží k zaplnění nejmenších pórů betonu a tím ke zlepšení mechanických vlastností (např. pevnost v tlaku, nasákavost vody). Je to důležitá složka u vysokopevnostních betonů. Nereaguje přímo s vodou, ale s dalšími produkty hydratace cementu. Je také zodpovědná za nárůst pevnosti v raném stáří směsi. [17]

Voda

Pro směs byla použita voda z vodovodního řádu bez dalších úprav či filtrace.

Křemenná moučka

Mikromletý písek neboli křemenná moučka je dodávána společností Sklopísek Střeleč. Zrna moučky mají střední velikost 16 μm a zrnitostní rozsah 0 – 0,063 mm. Moučka se vyrábí suchým mletím a tříděním pomocí větrných třídičů. Používá se buď jako surovina pro výrobu dalších produktů (smalty, glazury, skelná vlákna), nebo jako plnivo umělých hmot či maltových směsí. [39]

Křemičitý písek různých frakcí

Písky dodává stejná společnost jako křemennou moučku (Sklopísek Střeleč, a.s.). Písky se vyznačují vysokým obsahem SiO_2 a jsou používány především ve vodárenství k filtrování vody, dále jako plnivo ve stavebnictví či jako hasivo do pojistek vysokého napětí. [39]

Superplastifikátor Sika Visco Crete 1035

Tato přísada se do směsi přidává v procesu míchání až s vodou a významně zlepšuje zpracovatelnost směsi. Jde o vysoce účinný superplastifikátor určený převážně pro transportbetony. Mimo to se užívá pro betony se stupni konzistence F4 – F6, samozhutnitelné betony a vysokohodnotné betony. Dle výrobce funguje na principech prostorového rozptýlení jemných podílů směsi, zlepšuje dispergaci a smáčení zrn cementu, snižuje třecí síly uvnitř

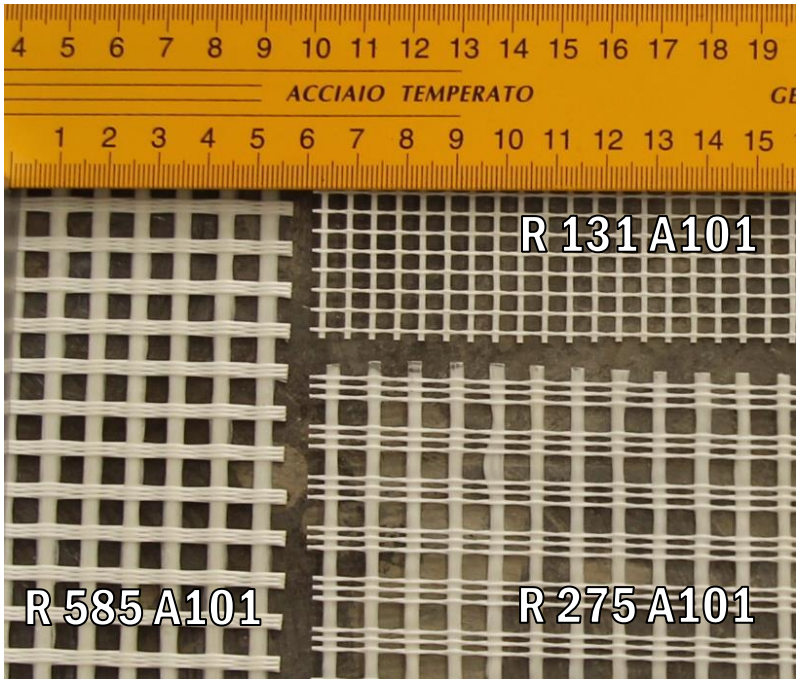
směsi a snižuje potřebu záměsové vody. Tato směs je na chemické bázi vodného roztoku modifikovaných polykarboxylátů. Objemová hmotnost je 1,06 kg/l a hodnota pH 4,5 ± 0,5. Běžně se užívá v množstvích 0,2 – 1,7 % na hmotnost cementu. [40]

4.1.2 Textilní výztuž

V této práci byla použita textilní výztuž dodaná firmou Adfors od společnosti Saint Gobain Litomyšl. Tato výztuž byla vybrána z několika důvodů. Za prvé kvůli jejím dobrým mechanickým vlastnostem, dále kvůli dostupnosti, a finálně k umožnění srovnání s výsledky z předešlé práce [41], kde by použit stejný typ výztuže.

Pro experiment byly vybrány celkem 3 typy výztuže, které se liší především svojí gramáží a v důsledku i svojí pevností. Všechny tyto typy výztuže se používají především jako výztužné síťoviny do omítek. Mají však povrchovou ochranu, proto jsou vhodné i pro použití do betonu.

Použité výztuže mají označení R 131 A101, R 275 A101 a R 585 A101. První písmeno označuje typ tkaniny (v tomto případě „R“ = pletivo), následující trojčíslí udává plošnou hmotnost textilie bez povrchové úpravy. Poslední údaj značí typ povrchové úpravy („A101“ = odolné alkáliím). Všechny důležité mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2 na straně 32.

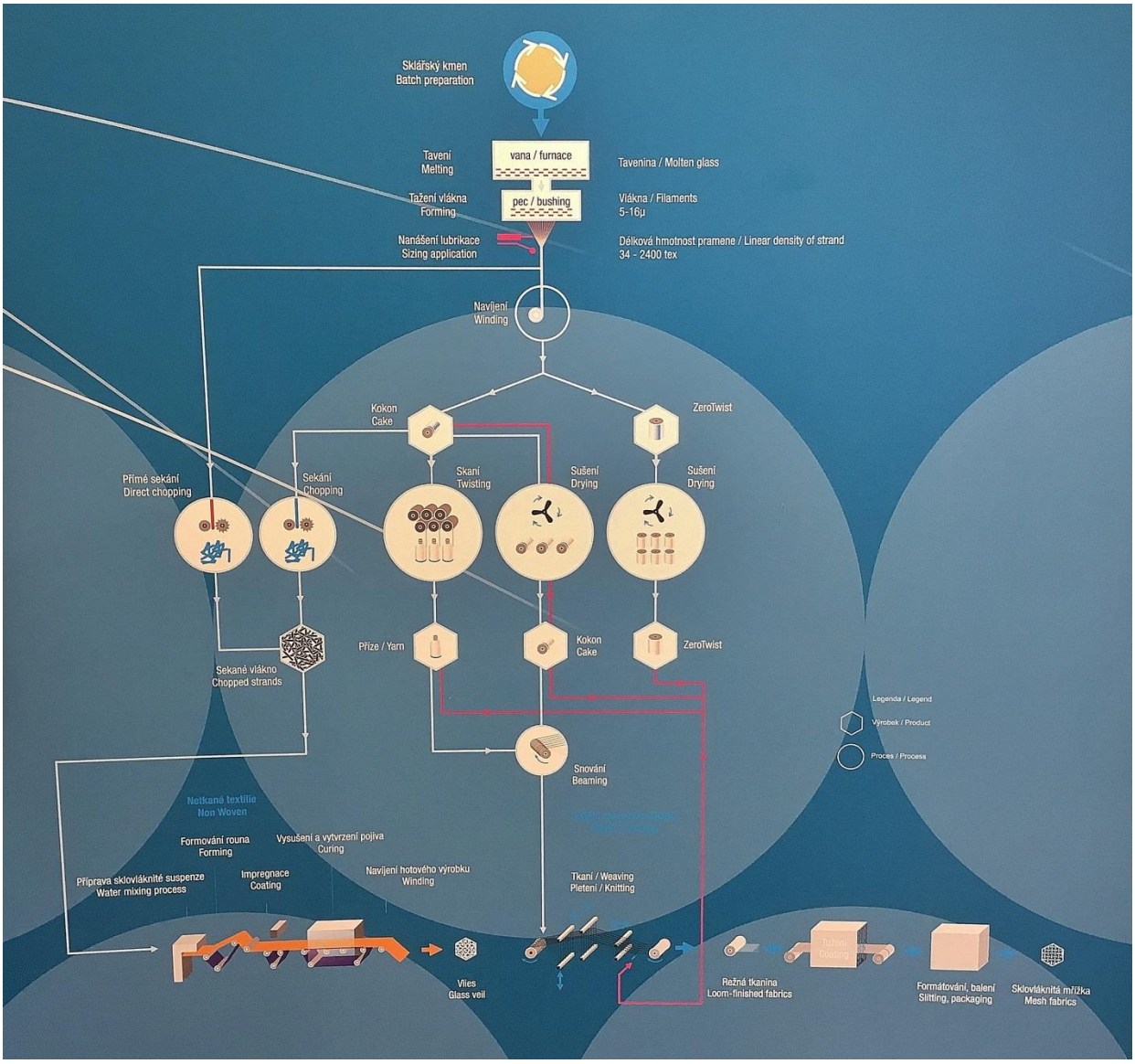


Obr. 18 - Fotografie použitých textilií [41]

Výroba textilie – návštěva Adfors Saint-Gobain Litomyšl

Dne 11.5.2017 navštívil autor této práce továrnu na výrobu textilní výztuže Adfors v Litomyšli. Výroba probíhá v rozlehlé továrně o nepřetržitém provozu. Je to jedna z největších továren na výrobu tohoto typu materiálu na světě a hlavní dodavatel v Evropě. I přes to však 8% produkce zůstane v České Republice. Společnost pro výrobu používá především lokální suroviny z České republiky, konkrétně křemennou moučku od společnosti Sklopísek Střeleč.

Schéma výroby je naznačené na Obr. 19. Výroba začíná roztavením sklářského kmenu ve vaně, kde teplota dosahuje až 1 500 °C. Z této pece následně gravitací stéká roztavená skelná hmota, která je lubrikována a zachycena na navinovací mechanismus, který si rychlostí navinování určuje tloušťku jednotlivých vláken (tloušťka se pohybuje v řádech mikrometrů). Z těchto svazků jsou navinuty kokony, které se dále používají buď na výrobu netkaných textilií, nebo pro tkané textilie. Po navinutí pak kokony před dalším použitím několik hodin schnou, poté následuje proces snování vláken a následné tkaní. Útek je mezi osnovu zasouván buď mechanicky pomocí dvou protějších jehel, nebo profukováním tlakem vzduchu z jedné strany na druhou. Po tomto kroku vzniká režná tkanina, která pouze drží tvar, ale není únosná. Pevnosti a soudržnosti útku a osnovy se dosáhne po dalším kroku, tužení. Při tužení se na režnou textilii nanáší vrstva povrchové úpravy, takzvaný coating, který zároveň dodává textilii ochranu proti alkáliím. Coating je v tomto případě tvořen směsí styren butadienu. Výztuže jsou primárně určeny pro využití do omítkových systémů, kde je alkalické prostředí. Adfors nabízí také tkaninu s odlišnou povrchovou úpravou, určenou přímo pro vyztužování betonu ve vnitřním prostředí (tzn. především jako výztuž do podlah). Takové textilie pak mají modrou barvu a jsou tak lehce odlišitelné od ostatních textilií.



Obr. 19 - Schéma výroby textilní výztuže

Ačkoliv se jedná o energeticky náročnou výrobu, tak má společnost Adfors dokázáno, že pokud je textilie použita v zateplovacích systémech ETICS, pomůže ušetřit více energie z vytápění, než bylo použito na výrobu této textilie.

Továrna na mne zapůsobila velmi profesionálním dojmem společně s vysokou technologickou náročností.

Mechanické vlastnosti výztuže

V následující tabulce je uveden popis důležitých mechanických parametrů o této textilní výztuži. Vysvětlení pojmů útek a osnova je k nalezení na Obr. 14 na straně 23.

Tab. 2 - Mechanické vlastnosti použité výztuže [42]

		R 131 A 101		R 275 A 101		R 585 A 101	
		osnova	**útek**	**osnova**	**útek**	**osnova**	**útek**
rozměry ok sítě	**mm**	3,5	3,8	6	6	5,5	4,5
typ skla	**-**	E		E		E	
povrchová úprava	**-**	alkali resistant		alkali resistant		alkali resistant	
hmotnost textilie bez povrchové úpravy	**g/mm^2**	131		275		585	
hmotnost s povrchovou úpravou	**g/mm^2**	160		330		653	
tloušťka síťoviny	**mm**	0,52		0,9		1,3	
pevnost za standardních podmínek	**N/5cm**	2300	2400	4400	5300	8500	6500
protažení za standardních podmínek	**%**	3,8	3,8	4,5	4,5	4,5	4,5
pevnost po 28 dnech testu ETAG[4]	**%**	70	65	70	70	70	70

Ochrana textilie proti zásaditému prostředí

Skelné textilie mohou být proti vlivu zásaditého prostředí chráněny dvěma způsoby v závislosti na materiálu, ze kterého je sklo tvořeno. V případě AR-skla je ochrana provedena přídavkem 16 - 20% oxidu zirkoničitého. Jeho přítomnost má za důsledek vzniku tenké hydratované vrstvy na povrchu vláken. Tato vrstva zpomaluje difuzi OH^- iontů. Úplná trvalá ochrana však není možná, protože rychlost degradování roste s vyšším pH a rostoucí teplotou. [11]. U jiných typů skel (E nebo C) je ochrana tvořena takzvaným coatingem převážně na bázi styren butadienu, který je i použitý na výztuži použité v této práci.

4.1.3 Zkušební vzorky

V této práci byly použity vzorky určené pro zkoušky prostým tahem, takzvané „dog-bone“ a sady referenčních trámečků. Celkově bylo pro experimentální program vyrobeno 81 kusů typu dog-bone a 20 kusů referenčních trámečků.

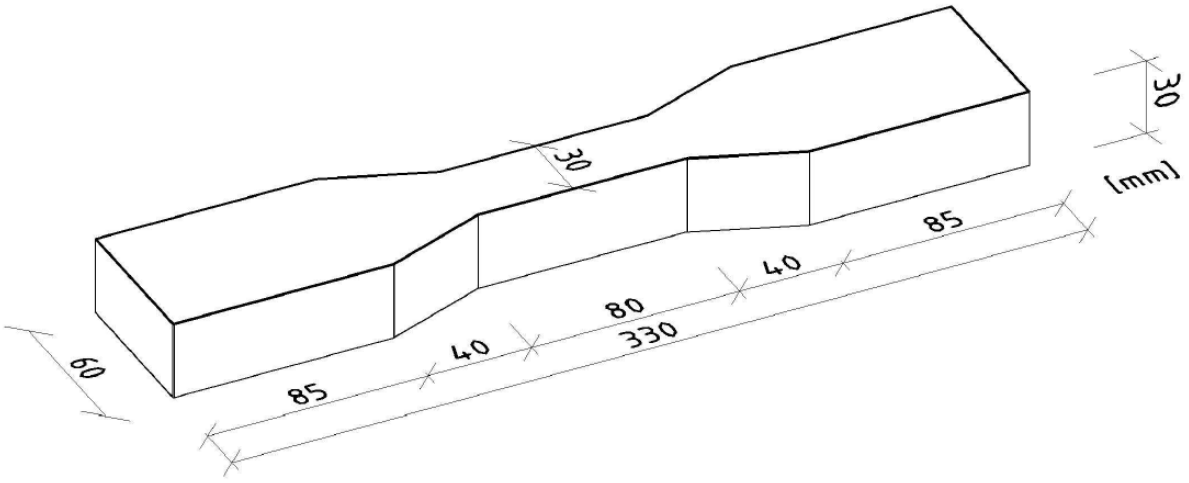
Po namíchání směsi a naplnění forem následovala technologická přestávka 2 dny, po které byly vzorky odbedněny. Po odbednění vzorky po dobu 28 dnů zrály a po uplynutí této doby byly vzorky zváženy a změřeny. Dalším krokem bylo uložení buď do boxů s roztoky,

[4] ETAG testy jsou normované testy zkoumající změnu mechanických vlastností materiálu po naložení v zásaditém prostředí

nebo do mrazicí komory, podle toho na co byly vzorky určeny. Následovala předepsaná doba, po kterou byly vzorky vystaveny agresivnímu prostředí. Po skončení této doby byly vzorky vyndány z nádob/komory a po oschnutí následně zváženy a změřeny. Následovalo samotné zkoušení vzorků v prostém tahu a trámečků v ohybu a tlaku pro získání referenčních hodnot pevnosti v tlaku a v tahu ohybem.

Dog-bone

V tomto experimentu byly použity vzorky tvaru „dog-bone“ (psí kost), případně „dumbell“ (činka). Vzorky jsou uzpůsobeny pro zkoušku prostým tahem. Pro zkušební stroj byl k dispozici speciální pár čelistí přímo pro tento tvar vzorků. Celkem bylo vyrobeno 81 kusů těchto vzorků s různým typem vyztužení. Tyto vzorky byly využity i v předcházející autorově práci [41], kde však byly použity i mnohem delší vzorky (délka 750 mm). Ty se však ukázaly jako méně vhodné především kvůli jejich rozměrům. Vzorky byly náročné na manipulaci a rychlost jejich výroby byla navíc mnohem nižší, jelikož v laboratoři jsou k dispozici formy pro výrobu pouze tří kusů v jednom okamžiku. U vzorků použitých v této práci však byly formy pro výrobu až devíti kusů najednou.



Obr. 20 - Zkušební vzorek – dog-bone

Referenční trámečky

Při každé betonáži byla vyrobena i sada referenčních trámečků o standardních rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Tyto trámce sloužily pro zkoušku tahu za ohybu a pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196-1. Nejprve byla na trámcích změřena pevnost v tahu za ohybu tříbodovým ohybem a na vzniklých úlomcích následně změřena pevnost v tlaku. Trámečky nebyly ničím vyztuženy, jednalo se o měření referenčních vlastností matrice. Trámce byly vystaveny stejným podmínkám jako vzorky dog-bone.

Seznam vzorků

Celkový počet 81 vzorků se dá rozdělit na několik podskupin.

Hlavní podskupiny jsou odlišeny prostředím, kterému byly vzorky vystaveny. První jsou vzorky, které byly uloženy v 10% NaOH, dále vzorky z 10% roztoku H_2SO_4, třetím jsou vzorky podrobené padesáti, sto a sto padesáti zmrazovacím cyklům a poslední hlavní skupinou jsou vzorky referenční.

Další podskupinu tvoří typ vyztužení. Práce navazuje na předchozí výzkum a z toho důvodu bylo zvoleno stejné vyztužení. Byly použity stejné tři typy výztuže a také jedna nebo dvě vrstvy výztuže. Vzhledem k velké časové náročnosti jak samotného betonování vzorků, tak následného zpracování a zkoušení vzorků byl stejný model vyztužení použit pouze u vzorků ponořených do roztoků kyseliny sírové a hydroxidu sodného. U vzorků vystavených účinků mrazem byly všechny vzorky vyztuženy jednou vrstvou výztuže R 585 A101.

V Tab. 3 je uveden soupis vzorků použitých v této práci (detailní soupis, včetně hmotností a rozměrů je v příloze 1). Tabulka je rozdělena do šesti sloupců a to podle prostředí, kterému byly vzorky vystaveny. První dva sloupce značí 10 % roztoky NaOH a H_2SO_4. Další tři sloupce jsou pro vzorky z mrazicích boxů, označeny počtem zmrazovacích cyklů. Poslední sloupec obsahuje soupis referenčních vzorků s jednou vrstvou výztuže. Pod tabulkou se nachází vysvětlení popisu označených vzorků.

Mimo těchto vzorků byly do práce použity i vzorky z bakalářské práce [41] určené pouze pro porovnání výsledků. Označení těchto vzorků je patrné z příloh 16, 19 a 22.

Tab. 3 - Soupis vzorků

NaOH	H_2SO_4	50 cyklů	100 cyklů	150 cyklů	referenční
1_5x1_N	24_-_H	46_5x1_50	52_5x1_100	58_5x1_150	73_5x1_-
2_5x1_N	25_-_H	47_5x1_50	53_5x1_100	59_5x1_150	74_5x1_-
3_5x1_N	26_-_H	48_5x1_50	54_5x1_100	60_5x1_150	75_5x1_-
4_2x1_N	27_-_H	49_5x1_50	55_5x1_100	61_5x1_150	76_2x1_-
5_2x1_N	28_1x1_H	50_5x1_50	56_5x1_100	62_5x1_150	77_2x1_-
6_2x1_N	29_1x1_H	51_5x1_50	57_5x1_100	63_5x1_150	78_2x1_-
7_1x1_N	30_1x1_H				79_1x1_-
8_1x1_N	31_2x1_H	64_-_50	67_-_100	70_-_150	80_1x1_-
9_1x1_N	32_2x1_H	65_-_50	68_-_100	71_-_150	81_1x1_-
10_5x2_N	33_2x1_H	66_-_50	69_-_100	72_-_150	
11_5x2_N	34_5x1_H				T9_-
12_5x2_N	35_5x1_H	T12_50	T15_100	T18_150	T10_-
13_2x2_N	36_5x1_H	T13_50	T16_100	T19_150	T11_-
14_2x2_N	37_1x2_H	T14_50	T17_100	T20_150	
15_2x2_N	38_1x2_H				
16_1x2_N	39_1x2_H				
17_1x2_N	40_2x2_H				
18_1x2_N	41_2x2_H				
19_-_N	42_2x2_H				
20_-_N	43_5x2_H				
21_-_N	44_5x2_H				
22_-_N	45_5x2_H				
T1_N	T5_H				
T2_N	T6_H				
T3_N	T7_H				
T4_N	T8_H				

Typ vyztužení

1 = R 131 A101

2 = R 275 A101

5 = R 585 A101

- = bez výztuže

Počet vrstev výztuže

Jedna, dvě nebo žádná

39_1x2_H

Pořadové číslo vzorku

- rozmezí 1-81
- vzorky s „T“ na začátku jsou trámečky, jsou bez výztuže

Typ agresivního prostředí

N = 10 % roztok NaOH

H = 10 % roztok H_2SO_4

50 = 50 zmrazovacích cyklů

100 = 100 zmrazovacích cyklů

150 = 150 zmrazovacích cyklů

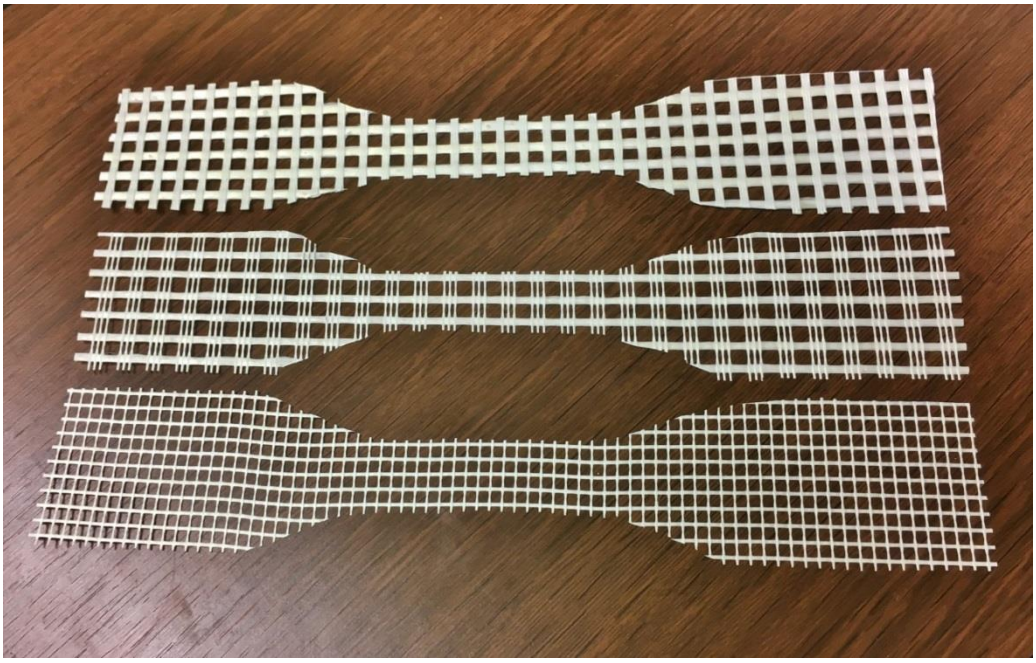
- = laboratorní prostředí

4.1.4 Výroba vzorků

Výroba vzorků byla zahájena na podzim roku 2016 a bylo při ní potřeba celkem 9 výrobních cyklů (z důvodu dostupnosti forem pro betonáž pouze devíti vzorků najednou). Betonování vzorků bylo provedeno v prostorách Experimentálního centra na Fakultě Stavební Českého Vysokého Učení Technického v Praze.

Příprava textilní výztuže

Textilní výztuž byla před vložením do forem nastříhána přesně podle tvaru dog-bone a byl kladen důraz na to, aby ve směru namáhání byl vždy silnější svazek textilie a zároveň aby každá výztuž měla v nejslabším místě vzorku vždy stejný počet svazků (u R 275 A101 i R 585 A101 3 svazky a u R 131 A101 5 svazků).



Obr. 21 - Výztuž nastříhaná podle tvaru vzorků

Betonáž

Příprava čerstvé směsi probíhala v laboratorní maltové míchačce umožňující regulaci otáček. Jednotlivé složky byly dávkovány od nejhrubších po ty nejjemnější. Tato suchá směs byla míchána přibližně 2 minuty, aby bylo dosaženo optimální homogenity. Následně byla přidána záměsová voda společně se superplastifikátorem. Po dosažení požadované konzistence proběhla vlastní výroba vzorků. Při betonáži byla pozorována poměrně rychlá ztráta zpracovatelnosti, jež je častým průvodním jevem u směsí s vysokými dávkami mikrosiliky a plastifikátorů na bázi polykarboxylátů.

Do každé formy se nejprve nalila polovina (případně třetina) výšky, následně se forma zavibrovala na vibračním stole. Když byla matrice dostatečně zvibrovaná, vložila se do formy první vrstva textilie a byla zatlačena tak, aby matrice protekla skrz oka textilie a došlo k úplnému spojení dvou vrstev betonu oddělených výztuží. Po vložení výztuže se nalila další vrstva matrice (druhá polovina, případně další třetina). Následovalo další vibrování a zahlazení, případně vložení druhé vrstvy výztuže. Po finálním uhlazení betonu bylo nutné formy přikrýt folií pro zabránění odpařování vody.

Vzorky byly ve formě ponechány dva dny. Po této době se formy odbednily a vzorky uskladnily dle předepsaných podmínek. Vzorky určené pro cyklické zmrazování byly uskladněny ve vodní lázni po dobu 28 dnů a vzorky určené pro ponoření do roztoků zrály v prostředí laboratoře (23°C a RH 50 %) po dobu 28 dnů.

4.2 Použité metody

Vzorky byly podrobeny třem různým zatěžovacím zkouškám, které simulují podmínky, které se mohou vyskytnout v reálném prostředí. Pro simulaci těchto podmínek byl použit postup uvedený v japonské normě JSCE-E 549-2000 [43] pro agresivní kyselé i zásadité prostředí a českou normu ČSN 73 1322 pro cyklické zatěžování mrazem. Vzorky byly následně vyzkoušeny na pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a pevnost v prostém tahu.

4.2.1 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Referenční trámečky byly nejprve vyzkoušeny v pevnosti v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5 na zkušebním stroji EU 40, kde byla dle vzorce (1) stanovena výsledná pevnost.

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot d_2} \quad (1)$$

Kde: f_{cf} … pevnost betonu v tahu ohybem (MPa)

F … maximální zatěžovací síla (N)

l … vzdálenost mezi podpěrnými válečky (mm)

d_1 … šířka příčného řezu tělesa (mm)

d_2 … výška příčného řezu tělesa (mm)

4.2.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku navazuje na zkoušku pevnosti v tahu ohybem. Úlomky trámečků se umístí do stroje mezi tlačné destičky a vyhodnotí se pevnost v tlaku dle následujícího vzorce (2):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \tag{2}$$

Kde: R_c … pevnost betonu v tlaku (MPa)

F_c … nejvyšší zatížení při porušení (N)

1600 … plocha vymezená tlačnými destičkami (mm^2)

4.2.3 JSCE-E 549-2000 [43]

Tato japonská norma, jejíž anglický název je „Test method for water, acid and alkali resistance of continous fiber sheets“ pojednává o zkoušení vlastností textilního betonu ve třech různých prostředích.

Tři předepsaná zkoušená prostředí jsou:

- 10% roztok kyseliny H_2SO_4
- 10% roztok NaOH
- destilovaná voda

Důvody, proč tato norma uvádí tyto tři prostředí, jsou následující. Beton je silně zásadité prostředí, z toho důvodu je nutné znát, jak se bude textilní výztuž v tomto prostředí chovat a uložením vzorků do roztoku se stárnutí urychlí. Textilní beton je často využíván jako forma rekonstrukce stávajících konstrukcí, které jsou v náročném prostředí (např. kanalizace), kde i nadále působí agresivní vlivy a proto tato norma popisuje zkoumání vlivu kyselých i zásaditých prostředí a destilované vody. Pro tento experiment byly zvoleny případy výskytu kyselého a zásaditého prostředí. Destilovaná voda byla v tomto experimentu nahrazena zmrazovacími cykly, kde se vzorky rozmrazují nalitím vody a tím pádem jsou vzorky vystavené extrémním podmínkám spojených s přítomností vody. Norma je určená pro beton vyztuženou kontinuální vláknitou výztuží, což textilie použitá v této práci splňuje. Vyhodnocení normy spočívá ve dvou hlavních číselných údajích:

- Ztráta hmotnosti u vzorků po uložení ve zkušebním roztoku. Udáváno v procentech.
- Poměr síly potřebné k dosažení daného přetvoření a síly u referenčních nezatížených vzorků. Udáváno v procentech.

Norma také specifikuje vzorky, na kterých se mají zkoušky optimálně provádět, z technologických důvodů a vybavenosti laboratoře byl zvolen výše popsaný typ vzorků. Po dobu uložení vzorků by teplota prostředí neměla kolísat o více než ±2 °C s tím, že teplota při začátku zkoušky by měla být 20 ± 5 °C. Doba uložení vzorků v prostředí činí 60 dnů. Všechny vzorky musí být celé ponořené do roztoku po celou dobu experimentu a musí být zajištěno, aby nedocházelo k vypařování vody z nádoby se vzorky. Vzorky se před uložením zváží a změří a vizuálně se zkontrolují a popíše barva povrchů. Dále se změří pH obou roztoků. Po vyndání vzorků z roztoků se každý kus opláchne vodou, osuší a znovu zváží a změří. Po uplynutí 60 ti dnů se opět změří pH roztoku a opět popíše povrch vzorku. Je také možné vzorky rozříznout a průřez prozkoumat mikroskopem.

JSCE-E 549-2000 - Rovnice pro změnu hmotnosti

Norma definuje rovnici, která popisuje výpočet změny hmotnosti:

$$\alpha = \frac{w_0 - w_e}{w_0} \cdot 100 \tag{3}$$

Kde α … změna hmotnosti (%)

w_0 … hmotnost před ponořením (g)

w_e … hmotnost po vynoření (g)

JSCE-E 549-2000 - Rovnice pro změnu sil

Druhá rovnice popisuje změnu napětí pro referenční vzorky a vzorky vystavené zatížení prostředí:

$$R_{ett} = \frac{f_{fue}}{f_{fu0}} \cdot 100 \tag{4}$$

Kde R_{ett} … změna napětí (%)

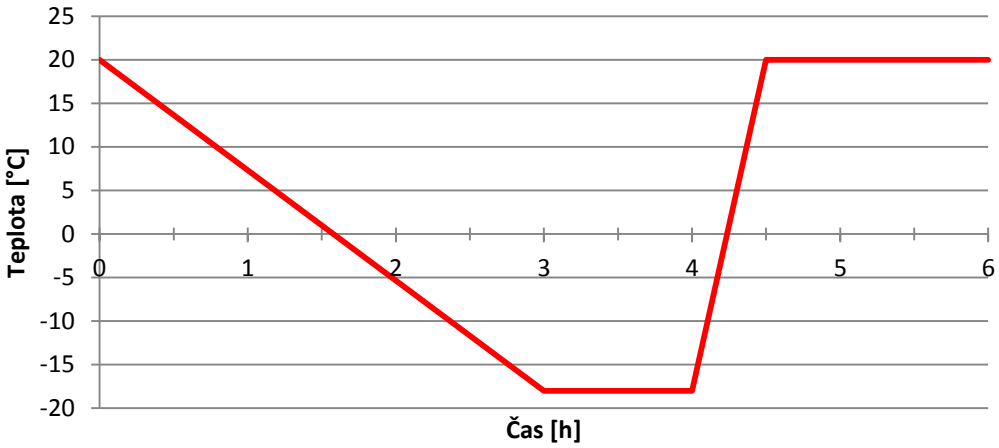
f_{fu0} … napětí u referenčních vzorků (N/mm^2)

f_{fue} … napětí u vzorků po vyjmutí z roztoků (N/mm^2)

4.2.4 ČSN 73 1322 [44]

Tato norma z roku 1968 slouží k určení mrazuvzdornosti betonu, která se určí pomocí cyklického zmrazování betonových vzorků. Norma je určená především pro zkoušení betonu v tlaku, tento výzkum je však zaměřen na tahové vlastnosti a z toho důvodu byly použity vzorky určené zkoušku v prostém tahu.

Zmrazovací cyklus se skládá z ochlazení prostoru mrazicího boxu na -20 °C, při této teplotě zůstane po 4 hodiny. Po této době se prostor zalije předehřátou vodou o teplotě +20°C a dále se vyhřívá na +20°C. Tento stav trvá půl hodiny (viz. Obr. 22).



Obr. 22 - Graf jednoho zmrazovacího cyklu

Vzorky byly rozděleny na celkem 3 skupiny, které podstoupily různý počet zmrazovacích cyklů a to 50, 100 a 150. Přístroj byl nastaven na provedení 25 cyklů, což se rovná době jednoho týdne. Po 25 ti cyklech byla provedena vizuální kontrola a následovalo spuštění dalších cyklů. Obr. 23 znázorňuje mrazicí box KD 20, ve kterém bylo cyklické zatěžování mrazem provedeno.

Obr. 23 - Mrazicí komora KD 20

Všechny vzorky určené pro zmrazovací cykly byly před zkoušením uloženy 28 dní ve vodě. Po vyndání z vody byly osušeny, zváženy a změřeny. Následovalo vložení vzorků do mrazicí komory a po uplynutí požadovaného počtu cyklů byly vyndány, opět osušeny, zváženy a změřeny.

4.2.5 Výskyt extrémních podmínek v reálném prostředí

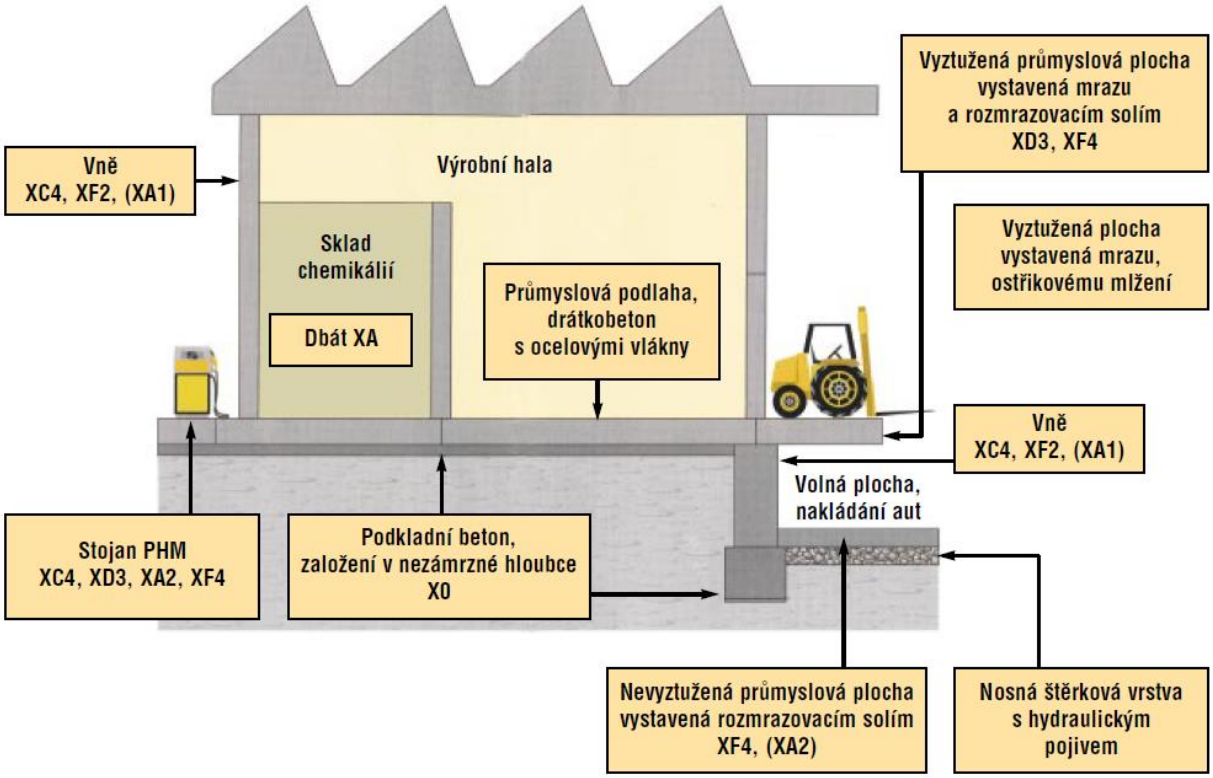
Každé ze tří zkoušených prostředí se může vyskytnout v reálném prostředí v menší či vyšší míře. Použité roztoky pak spíše slouží jako akcelerace skutečného prostředí, jež působí ve výrazně nižších koncentracích, avšak dlouhodobě. Každé prostředí má svá specifika a vyžaduje jiné vlastnosti cementové matrice.

Stupně vlivu prostředí dle ČSN P 73 2404

Nejlepší návod pro určení zatěžovacího prostředí udává norma ČSN P 73 2404. Specifikuje nejenom co to je beton, ale i věci, na které by se při návrhu správného složení měl dát pozor. V úvodní části popisuje prostředí, kterému můžou být konstrukce z betonu vystaveny, jedná se o:

- X0 – Bez nebezpečí koroze nebo narušení
- XC1-XC4 – Koroze vlivem karbonatace
- XD1-XD3 – Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody
- XS1-XS3 – Koroze vlivem chloridů z mořské vody
- XF1-XF4 – Působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
- XA1-XA3 – Chemické působení
- XM1-XM3 – Koroze vlivem mechanického působení (obrus)

Prostředí simulované v této práci lze přirovnat k XF1-XF4 a XA1-XA3. Uvedené případy chemického působení se mohou vyskytnout například v podzemních vodách či v zemině. Působení mrazu lze najít u všech venkovních konstrukcí, kde dochází k poklesu teplot pod bod mrazu. Nejedná se pouze venkovní prostředí, kde je pokles teplot zapříčiněn změnou počasí. Prostředí s teplotou pod bodem mrazu se také mohou vyskytnout v různých technologicky náročných procesech, kde je z nějakých důvodů nutné udržovat teplotou pod bodem mrazu (například mrazírny, zimní stadiony). Na Obr. 24 lze vidět, kde se můžeme s agresivním prostředím setkat na ukázkové konstrukci výrobní haly.



Obr. 24 - Zobrazení výskytu některých agresivních prostředí na konstrukci [45]

Kyselina sírová – H_2SO_4

Kyselé roztoky s nízkým pH se vyskytují v různých formách, kdy nejrozšířenější jsou kyselé deště, kde úroveň pH může klesnout až k 4,0. Kyselé prostředí se dále vyskytuje v zemědělství, kde se pro produkci uskladňují a zpracovávají různá hnojiva a další chemické produkty. Další možný výskyt je v kanalizaci. Splašková voda je sice převážně zásaditá, při zvýšených teplotách však anaerobní bakterie rozkládají její složky na H_2S, které se poté se vzdušnou vlhkostí usadí na povrchu ohroženého betonu paradoxně nad samotnou tekoucí splaškovou vodou. H_2S je následně oxidována aerobními bakteriemi a finálním produktem je právě kyselina sírová. [16]

Hydroxid sodný – NaOH

Hydroxid sodný je důležitá látka pro průmysl, používá se jako silná anorganická zásada. Zásadité prostředí je prostředí, se kterým se musí potýkat všechna výztuž, která se do betonu vloží. Zásadité prostředí je výsledkem hydratace cementu. V tomto experimentu je simulováno urychlení působení prostředí betonu.

Zmrazovací a rozmrazovací cykly

Zmrazovací a rozmrazovací cykly se vyskytují v těch podnebných pásech, kde se v zimním období vyskytují teploty klesající pod bod mrazu, betonové konstrukce v exteriéru jsou tedy ohroženy mrazem v každém zimním období. V Norsku a dalších chladných přímořských oblastech se vyskytuje významné množství mostů, které jsou vystaveny jak působení mrazu, tak i mořské vodě a teoreticky i chemickým rozmrazovacím látkám. Kromě vnějšího prostředí může být beton vystaven zmrazovacím cyklům na zimních stadionech, kde také může docházet k cyklickému rozmrazování při rozmrazení ledu v létě a obnovení ledu po určité přestávce. Neposledním případem jsou chladné podmínky v průmyslových provozech požadujících teploty pod bodem mrazu, příkladem mohou být haly zastřešených lyžařských sjezdovek, kde je kromě nízké teploty i vysoká vlhkost nutná pro udržení kvality sněhu.

4.2.6 Uložení vzorků do roztoků a mrazicího boxu

Vzorky určené pro pobyt v roztocích byly uloženy do plastových nádob a vzorky pro mrazicí cykly do pro tento účel určené klimatické komory.

Vzorky v roztocích

Všechny kusy byly do nádob naskládány tak, aby mezi sebou měly vždy alespoň 1 cm mezeru a zároveň aby se nedotýkaly stěn nádoby, což je nezbytné pro rovnoměrné vystavení celé plochy vzorku roztoku. Vzorky byly do nádoby pokládány na svou užší stranu, takže díky tvaru vzorku se tekutina dostala k většině povrchu vzorků a zúžený střed byl tekutinou zcela obklopen ze všech stran. Po obvodě nádoby bylo poznamenáno, v jakém pořadí jsou vzorky uvnitř uloženy. Vzhledem k agresivní povaze kyseliny sírové bylo totiž očekáváno poškození povrchu vzorku a s tím spojená ztráta popisků vzorků. Bylo zvoleno takové množství, aby všechny vzorky byly zcela ponořeny a hladina nad nejvyšším bodem nejvýše uloženého vzorku byla alespoň 20 mm. Na Obr. 25 jsou vyfoceny vzorky uložené do nádoby těsně před nalitím roztoku.

Obr. 25 - Vzorky v nádobě před nalitím roztoku a zapečetěním

Po nalití potřebného množství roztoku byla nádoba hermeticky uzavřena, jak ukládá použitý předpis. Norma nepředepisuje, aby se roztoky obměňovaly, na začátku a na konci testu se stanovuje hodnota pH. Vzorky tedy zůstaly uzavřeny po celou dobu šedesáti dnů.

Vzorky v mrazicí komoře

Vzorky byly do mrazicí komory vloženy všechny najednou. Na dně nádoby se nachází ocelový rošt, díky kterému jsou vzorky ochlazovány ze všech stran stejně. Mrazicí série byly nastaveny na 25 cyklů. Vždy po uplynutí 25 cyklů byla provedena vizuální kontrola vzorků a spuštěna nová série dalších 25 cyklů. Když uplynulo 50 (následně 100) cyklů, byl odebrán potřebný počet vzorků a zbytek pokračoval v ochlazování.

Obr. 26 - Vzorky v mrazicí komoře

4.2.7 Zkoušení vzorků

Finální fáze výzkumu probíhala na jaře roku 2017 zkoušením vzorků v laboratořích Experimentálního centra.

Referenční trámečky

Zkoušení referenčních trámečků bylo provedeno na stroji EU 40. Trámečky byly nejprve zkoušeny v pevnosti v tahu ohybem a následně byla na vzniklých úlomcích vyzkoušena pevnost v tlaku.

Vzorky dog-bone

Všechny vzorky dog-bone byly postupně vyzkoušeny na zkušební sestavě, kde hlavní částí tvoří zkušební stroj MTS QTEST 100 (viz. Obr. 27). Sestava se dále skládala ze zkušebního stroje osazeného čelistmi určenými pro zkoušení dog-bone. Stroj byl propojen s počítačem, ve kterém je nainstalován software pro ovládání a zpracování výsledků ze zkoušení. Na vzorku byl osazen extenzometr.

Obr. 27 - Zkušební sestava pro zkoušení dog-bone

Následující fotografie zobrazuje zkušební čelisti na stroji včetně vzorku a umístěného extenzometru značky Epsilon (viz. Obr. 28).

Obr. 28 - Vzorek v čelistech s extenzometrem

Zatěžovací rychlost byla nastavena na hodnotu 0,5 mm/min. Při této rychlosti trvala každá zkouška zhruba 10 minut. Na jeden vzorek však bylo nutné počítat spíše minut 15-20 a to kvůli náročnému upevňování do zkušebních čelistí. Vždy se muselo povolit 16 matic, vyndat vzorek a opět všechny matice utáhnout a vzorek usadit do správné svislé polohy a zajistit, aby se v čelistech nepohyboval a držel pevně na svém místě. Při počtu 81 vzorků se tak jedná zhruba o 24 hodin čistého času zkoušení. Celý proces zkoušení byl rozdělen do 4 dnů.

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vzhledem k velkému množství výsledků je náročné stanovit obecné tvrzení o působení agresivního prostředí. Vyhodnocení experimentu tedy probíhalo na základě několika sledovaných kritérií.

5.1 Vizuální kontrola

Vždy po skončení určitého cyklu experimentu (uplynutí šedesáti dnů u vzorků v roztocích, případně 50/100/150 mrazicích cyklů) byla zhodnocena změna povrchů vzorků.

Změna povrchu

Při vizuální kontrole vzorků vyndaných z roztoku kyseliny sírové bylo zřejmé, že došlo k výraznému porušení povrchu vzorků. Kyselina rozpustila cementový tmel na povrchu a vzorky tak byly velmi hrubé, protože povrch byl tvořen pouze plnivem. Zároveň došlo ke změně barvy na světle šedou, po uschnutí se barva měnila ze žluté na bílou.

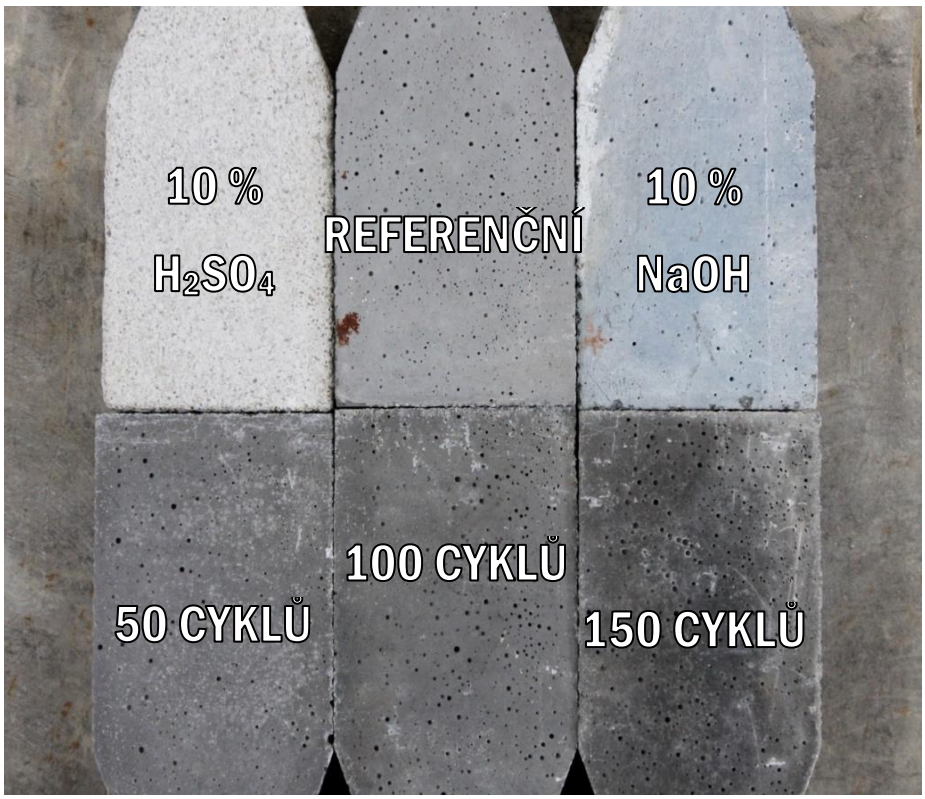
Zbytek rozpuštěného tmelu se nacházel na dně nádoby ve formě husté kaše. Zmíněná kaše je zřetelná i na vzorku na Obr. 29 převážně na hraně na levé straně fotografie.

Obr. 29 - Vzorek vyjmutý z kyseliny sírové se zbytky cementového tmelu

Oproti tomu vzorky vystavené působení roztoku NaOH nejevily žádné známky poškození. Jejich povrch byl pouze pokryt tenkým modro-fialovým filmem, který je patrný na Obr. 30. Tato vrstvička se dala odstranit pouhým přejetím prstem po vzorku. Vrstva byla pravděpodobně tvořená uvolněnou mikrosilikou.

Obr. 30 - Vzorek vyjmutý z NaOH

Na Obr. 31 je srovnání všech povrchů. Z obrázku je zřejmé, že vzorky z kyseliny sírové utrpěly nejvýraznější poškození povrchu oproti referenčním vzorkům. Povrch byl téměř bílý. Povrch u vzorků z roztoku NaOH zůstal celistvý, znatelně však změnil barvu do modrých odstínů. Vzorky vyjmuté z mrazicího boxu jevily minimální povrchové poškození. Nedošlo k žádnému znatelnému odlamování částí povrchu či hran. Je však patrné, že čím více zmrazovacími cykly vzorky prošly, tím tmavší povrch je (viz. Obr. 31). Může to být způsobeno vnesenou vlhkostí, která se do vzorků postupně dostávala při rozmrazování, které probíhalo nalitím teplé vody do nádoby se vzorky.



Obr. 31 - Porovnání povrchů po akcelerovaném stárnutí

Stav porušených vláken

Všechny vzorky byly zkoušeny až do přetržení, aby bylo možné posoudit jak se bude lišit poškození u jednotlivých typů výztuží. Dá se říci, že mechanismus porušení výztuže se lišil pouze podle typu výztuže, nikoli podle typu agresivního prostředí, kterému byly vystaveny.

Z Obr. 32 je patrné, že svazky textilie R 585 A101 se neporušily přetržením v jednom bodě, ale došlo k postupnému vytrhávání jednotlivých vláken. To je důvod, proč tato vlákna poskytují duktilnější chování než ostatní textilie.

Obr. 32 - Roztržená vlákna výztuže R 585 A101

Obr. 33 Zobrazuje porušení vláken výztuže R 275 A101. Opět je zde patrné vytrhávání jednotlivých vláken, nyní však v menší míře.

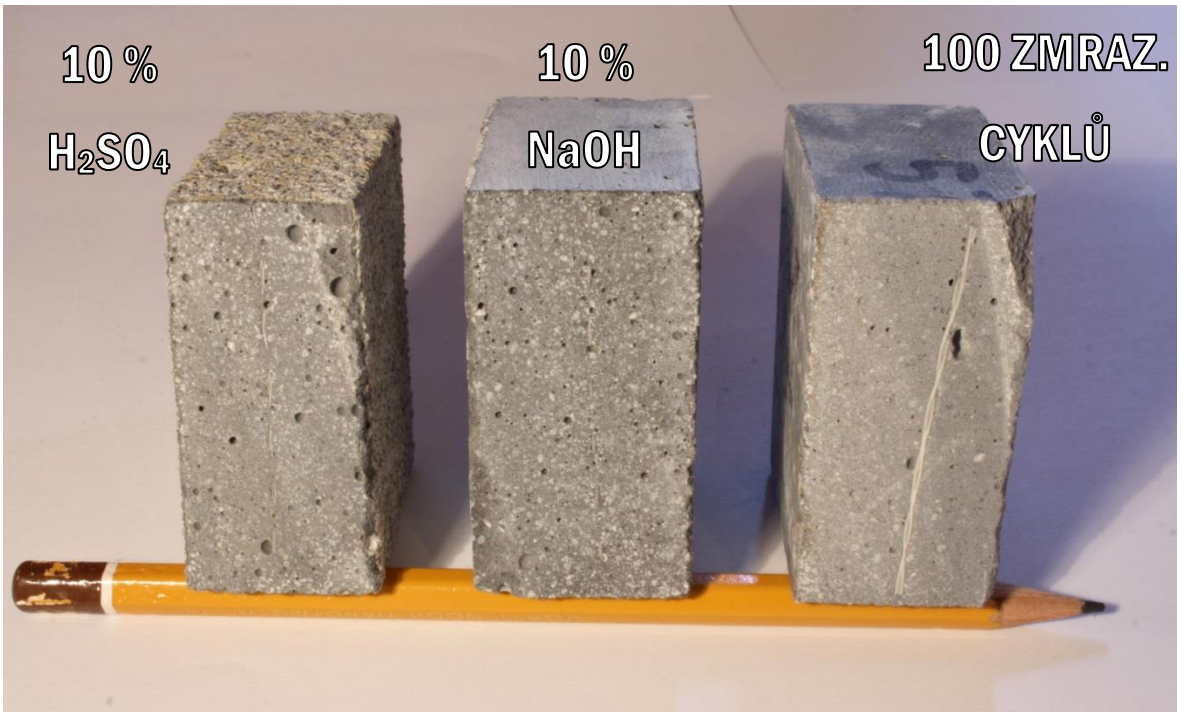
Obr. 33 - Roztržená vlákna výztuže R 275 A101

Textilní výztuž R 131 A101 se však chovala odlišně. Nedošlo k vytrhávání jednotlivých vláken jako u předchozích typů textilie. Přetržení bylo většinou čisté a v jednom bodě. Tento efekt je patrný také z výsledných grafů (viz např. Příloha 4).

Obr. 34 - Roztržená vlákna výztuže R 131 A101

Zhodnocení řezu vzorkem

Po odzkoušení všech vzorků byly vzorky příčně rozříznuty (Obr. 35), aby bylo dosaženo čisté rovné plochy a bylo tak možné zhodnotit efekt agresivního prostředí na tento kompozit.



Obr. 35 - Příčný řez vzorky

Z vizuálního porovnání řezu více vzorky je patrné, že vzorky po zmrazovacích cyklech vykazují mnohem hustší matrici, menší množství okem rozeznatelných pórů a mnohem světlejší povrch než vzorky uložené v roztocích. U více vzorků také bylo zpozorováno, že největší množství větších pórů (póry s průměrem 0,5 - 2 mm) se vyskytuje v těsné blízkosti výztuže. Ta při betonáži pravděpodobně tvoří bariéru pro unikající vzduch.

5.2 Změna hmotnosti a rozměrů

Hmotnostní změny se dají rozdělit do tří typů a to podle zatěžovacího prostředí. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 4. Největší změna proběhla u vzorků ponořených do kyseliny sírové a v tomto případě se jednalo o úbytek hmoty. U zkušebních trámečků byl úbytek přes 9% a u dog-bone téměř 10,5% z původní hmotnosti. Vzorky ponořené do NaOH naopak hmotnost zvětšily. U trámečků byl nárůst o 1,3% a u dog-bone o 1,5%. U vzorků ze zmrazovací komory došlo pouze k velmi malému poklesu hmotnosti a to ve většině případů o výrazně méně než 1%.

Tab. 4 - Změny hmotnosti

	Změna hmotnosti trámečků	**Směrodatná odchylka**	**Změna hmotnosti dog-bone**	**Směrodatná odchylka**	**Průměr celkový**	**Směrodatná odchylka**
H_2SO_4	-9,35%	1,84%	-10,41%	1,69%	-10,24%	1,75%
NaOH	1,31%	0,23%	1,56%	0,23%	1,52%	0,25%
50 cyklů	0,20%	0,04%	0,09%	0,05%	0,12%	0,07%
100 cyklů	-0,91%	0,14%	-0,02%	0,07%	-0,24%	0,39%
150 cyklů	0,05%	0,07%	0,00%	0,00%	0,03%	0,04%

Drobné rozdíly ve změnách hmotností mezi trámečky a dog-bone si vysvětluji především rozdílným tvarem a s tím spojeným rozdílným poměrem mezi plochou vystavenou účinkům prostředí a objemem.

Výsledky všech vzorků jsou v tabulce v příloze 3.

5.3 Změna pH roztoku

Změnu pH roztoku byla zmapována podle JSCE-E 549 a to změřením pH roztoků těsně před vložením vzorků do roztoků a následně těsně před jejich vyndáním.

Hodnota pH 10% roztoku H_2SO_4 při začátku experimentu byla na úrovni 0,20, po 60 dnech se hodnota změnila na 3,39.

Zásaditý 10% roztok NaOH měl na začátku pH 13,26, na konci 13,22, v tomto případě tedy nedošlo k téměř žádné změně a zůstalo na úrovni silné zásady.

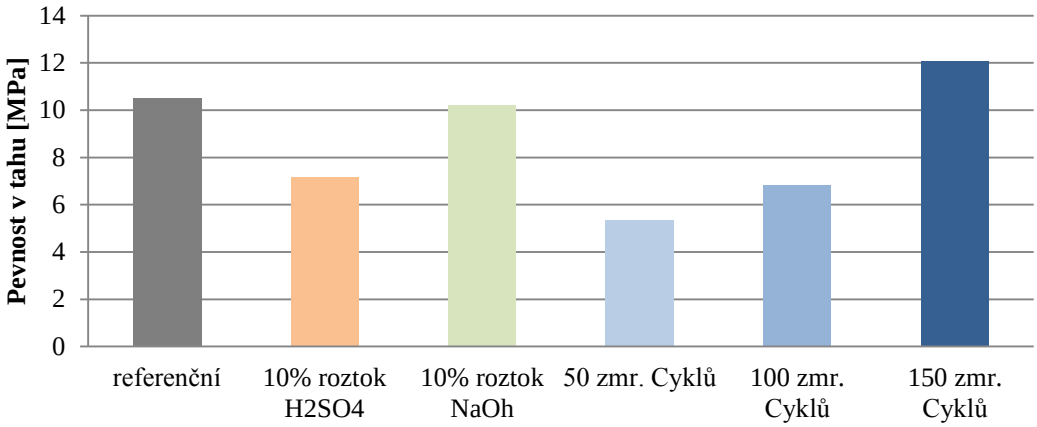
5.4 Tlakové a ohybové zkoušky trámečků

Všechny trámce byly podrobeny stejnému prostředí jako dog-bone. V roztocích kyseliny sírové a hydroxidu sodného byly uloženy shodně 4 kusy, v mrazících zařízeních bylo v součtu 9 kusů, to činí 3 kusy na každý zatěžovací cyklus. Referenčních trámečků byly k dispozici také 3 kusy

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

U vzorků z kyselého prostředí došlo k poklesu pevnosti v tahu ohybem o 31,5% (3,3 MPa) oproti referenčním vzorkům. Vzorky ze zásaditého prostředí nezaznamenaly téměř žádnou změnu. Napětí v průměru pokleslo o 2,89% (0,3 MPa).

U vzorků z mrazicího boxu však došlo k zajímavému efektu. U vzorků, které byly podrobeny padesáti zmrazovacím cyklům, pokleslo napětí o 58,9% (5,1 MPa), zatímco u sto-cyklových to bylo jen 35% (3,7 MPa), ale u vzorků po 150 cyklech napětí naopak vzrostlo, a to o 14,8% (1,6 MPa). Uvedené hodnoty jsou znázorněny na Obr. 36.

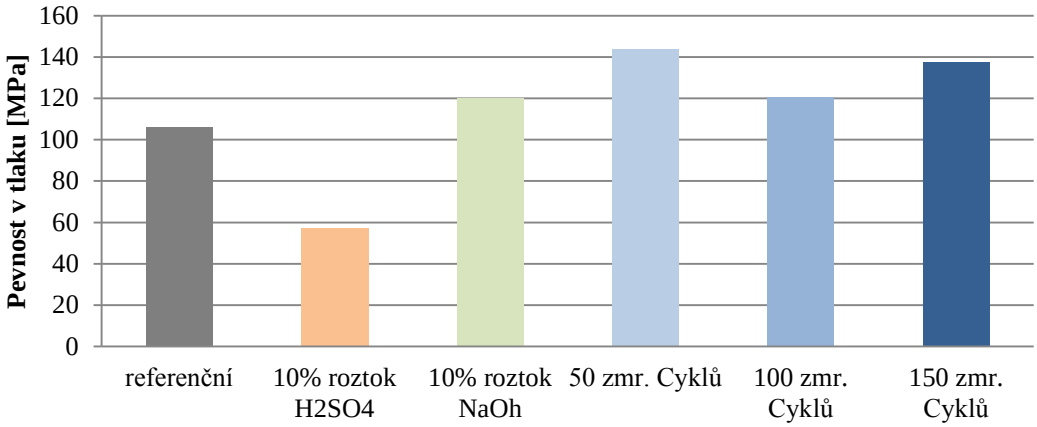


Obr. 36 – Pevnost v tahu ohybem trámečků

Tlakové zkoušky

Na úlomcích, které zůstaly po zkoušce ohybem, byla následně provedena zkouška pevnosti v tlaku. U zkoušek v tlaku byl efekt u zmrazovaných prvků téměř opačný. Vzorky po padesáti zatěžovacích cyklech vykazovaly významné zvýšení pevnosti oproti referenčním vzorkům a to o 35,7 % (37,9 MPa). Vzorky po sto zatěžovacích cyklech vydržely pouze o 13,9 % (14,7 MPa) více. Vzorky po sto padesáti cyklech však mají pevnost vyšší o 29,7 % (31,5 MPa). Důvod pro nárůst tlakové pevnosti u vzorků po mrazicích cyklech souvisí se samotnou podstatou použité cementové matrice. V matrici je velké množství cementu a přirovnatelně k tomu malé množství vody. To způsobuje, že některá zrna ve směsi nezhydratují a jsou obalena hydratačními produkty od zhydratovaného cementu. Při zatěžování mrazem však dochází k drobným vnitřním změnám v důsledku roztažnosti vody při mrznutí. Tato mrznoucí voda tedy ničí strukturu drobných pórů a látek kolem sebe, kde se uvolňují i zrna nezhydratovaného cementu. Po rozmrznutí však tato voda se zrny cementu reaguje a dochází tak k samoléčení betonu. Tím pádem se zmenšuje i množství pórů v betonu a roste jeho pevnost.

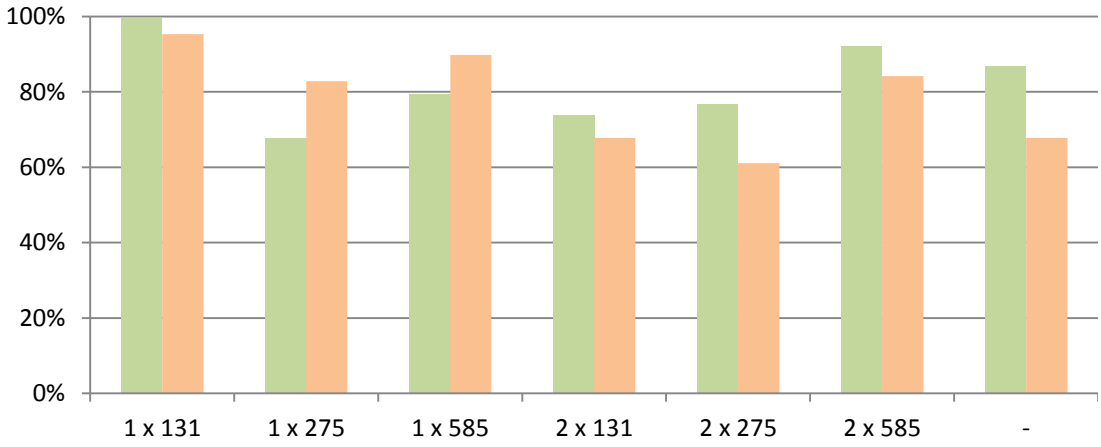
U vzorků z kyselého prostředí nastal očekávaný výsledek a to výrazné snížení pevnosti, ta byla o 45,9 % (48,6 MPa) nižší. Zásadité prostředí však mělo na tlakovou pevnost pozitivní vliv, vzrostlo o 13,5 % (14,3 MPa). Všechny uvedené výsledky jsou graficky znázorněny na Obr. 37.



Obr. 37 – Pevnost v tlaku trámečků

5.5 Vyhodnocení dle JSCE-E 549-2000

V následujícím grafu (Obr. 38) a tabulce (Tab. 5) jsou vypočítány výsledné hodnoty dle rovnic (2) a (3). Rovnice se zabývají výpočtem změny hmotnosti vzorků a napětí, při kterém došlo k poručení vzorků. Všechny výsledky jsou shrnuty v tabulce v příloze 3.



Obr. 38 - Změna napětí při vzniku první trhliny dle JSCE-E 549-2000

Z grafu je patrné, že výsledky záleží na stupni vyztužení. Pokud je ve vzorku pouze jedna vrstva výztuže, tak vzorky z kyseliny sírové vykazují lepší výsledky, zatímco u vzorků se dvěma vrstvami jsou hodnoty lepší u vzorků z NaOH.

Tab. 5 - Výsledky dle JSCE-E 549-2000

Typ agresivního prostředí	Typ výztuže	Změna hmotnosti	Směrodatná odchylka	Změna napětí	Směrodatná odchylka
10 % NaOH	1 x 131	-1,62%	0,12%	99,54%	8,86%
	1 x 275	-1,42%	0,12%	67,70%	7,10%
	1 x 585	-1,44%	0,05%	79,32%	1,48%
	2 x 131	-1,74%	0,10%	74,01%	8,93%
	2 x 275	-1,84%	0,17%	76,47%	0,80%
	2 x 585	-1,70%	0,15%	92,06%	9,42%
	-	-1,26%	0,03%	86,98%	11,20%
10 % H2SO4	1 x 131	8,28%	0,60%	95,31%	10,32%
	1 x 275	9,04%	1,32%	82,79%	31,17%
	1 x 585	11,02%	0,49%	89,77%	14,50%
	2 x 131	10,92%	0,91%	67,81%	6,81%
	2 x 275	11,61%	0,96%	61,10%	5,44%
	2 x 585	12,40%	0,21%	84,16%	12,64%
	-	6,27%	4,64%	67,77%	14,47%

5.6 Tahové zkoušky dog-bone

V následující části jsou zobrazeny výsledky samotných tahových zkoušek vzorků. Vzhledem k velkému množství vzorků, typů vyztužení a zatěžkávacích podmínek jsou výsledky rozděleny do několika částí, pro jejichž lepší pochopení slouží vzorový graf na Obr. 39 na straně 57. Jednotlivé skupiny výsledků jsou zároveň rozděleny barevně pro snadnější orientaci dle následujícího klíče:

Šedá - referenční vzorky

Oranžová - vzorky z 10 % roztoku H_2SO_4

Zelenožlutá - vzorky z 10 % roztoku NaOH

Odstíny modré - vzorky z mrazicího boxu

Všechny mezi sebou porovnatelné grafy mají stupnici na vodorovné i svislé ose ve stejném rozmezí, což usnadňuje vzájemné porovnání mezi více grafy.

5.6.1 Popis vzorového grafu

Výsledné grafy z tahových zkoušek textilního betonu mají specifický tvar, který je zobrazen na Obr. 39, kde jsou jednotlivé části zároveň popsány. Graf je rozdělen na 2 části A a B a zároveň jsou v něm vyznačeny čtyři důležité body. Vysvětlení těchto částí je následující:

A - Část, kde v tahu působ převážně betonu. Po dosažení tohoto pevnosti v tahu betonu dochází k jeho přetržení a k hlavní aktivaci textilní výztuže

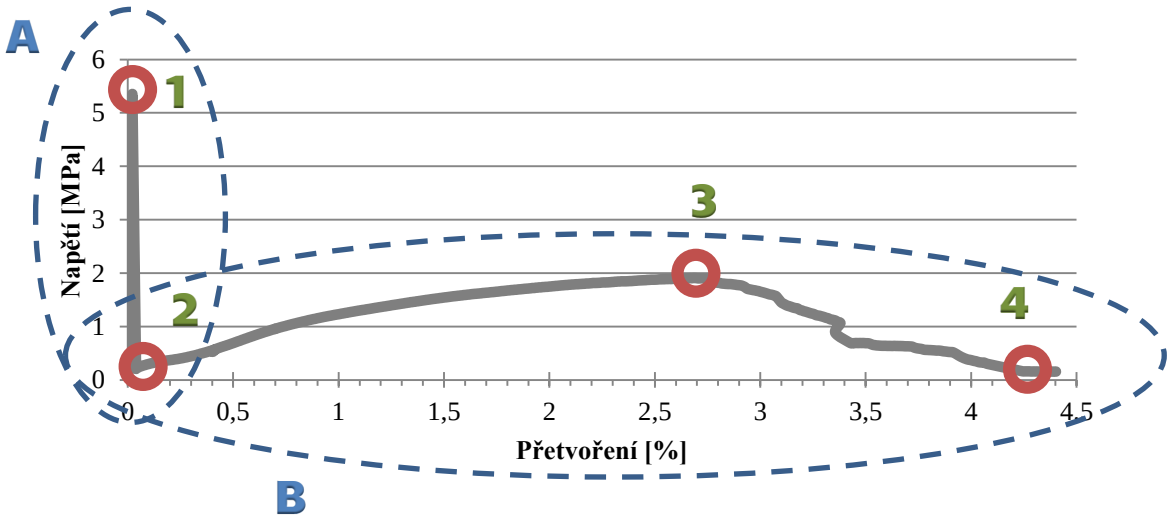
B - Část zkoušky, kdy je zatížení v bodě trhliny přenášeno textilní výztuží

1 – Dosažení tahové pevnosti betonu

2 - Dochází k zachycení zatížení textilní výztuží (≠ 0 MPa)

3 - Maximální dosažená únosnost textilní výztuže

4 - Bod ztráty únosnosti textilní výztuže



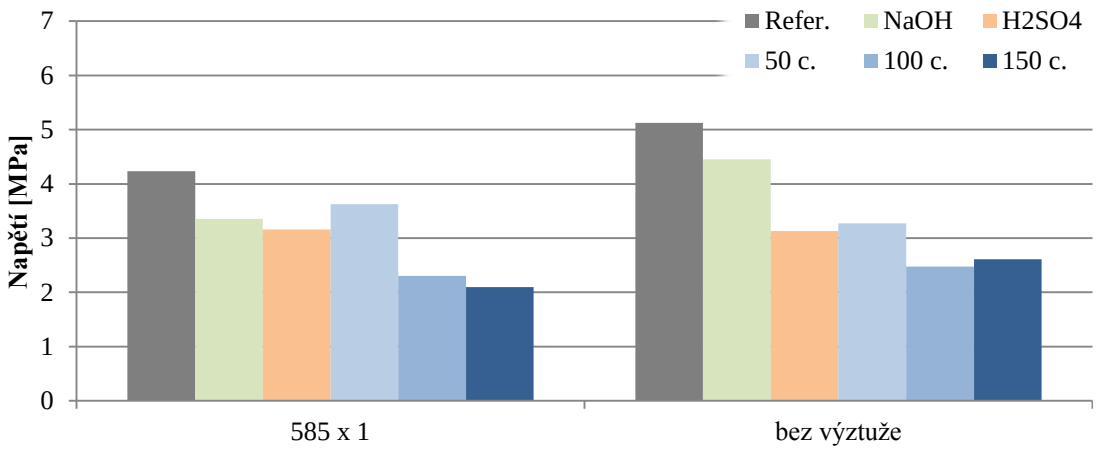
Obr. 39 - Popis referenčního grafu

5.6.2 Výsledné hodnoty napětí

V této části jsou zobrazeny grafy s výsledky odečtenými ze získaných grafů. Jsou zde grafy znázorňující celkem 4 zkoumané hodnoty. Pozornost je kladena na body vyznačené v Obr. 39. Konkrétně jde o napětí při vzniku první trhliny v betonu, napětí při aktivaci textilní výztuže, maximální sílu v textilní výztuži a šířku trhliny mezi aktivací výztuže a jejím přetržení. Ze vzájemného srovnání lze vyčíst vliv agresivního prostředí na vzorky v porovnání s referenčními kusy.

Napětí při vzniku trhliny

Tato hodnota popisuje, při jakém napětí došlo k porušení strukturu matrice a vzniku první trhliny. Z grafů je patrné, že zatěžovací prostředí má na beton značný vliv, i když se to na první pohled podle porovnání povrchů nezdá. Největší efekt na únosnost mají zmrazovací cykly, kde při 150 cyklech a jedné vrstvě výztuže byl pokles o 59% oproti referenčním vzorkům.

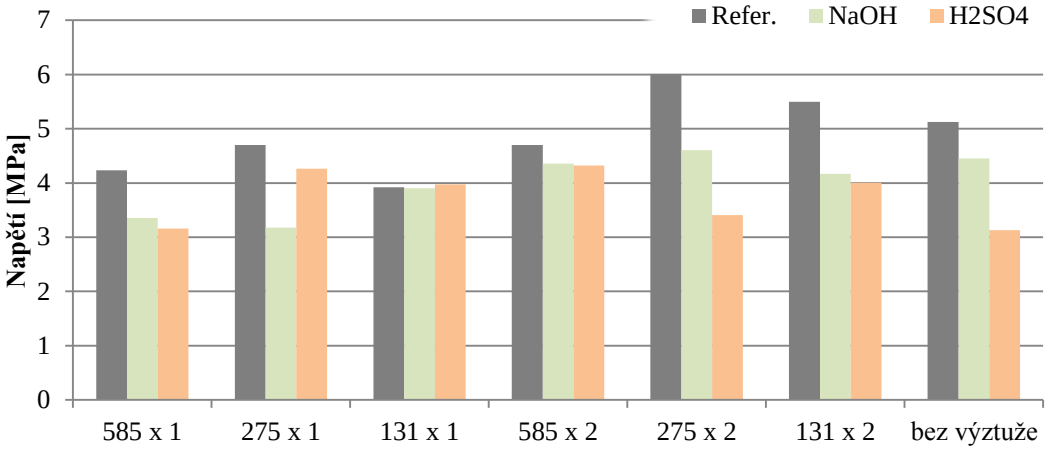


Obr. 40 – Napětí při vzniku trhliny - vzorky včetně mrazicích cyklů

Z výsledků je patrné, že agresivní prostředí má na tahovou pevnost matrice negativní vliv. Největší pokles pevnosti oproti referenčním vzorkům nastal u prvků, které prošly zmrazovacími cykly, pokles je téměř 50%. Tyto vzorky jsou totiž vystaveny účinky mrazu v celém svém objemu, dojde proto k poškození i vnitřní struktury. U vzorků z roztoků je však agresivnímu prostředí vystaven pouze povrch, postup degradace tak je pomalejší.

U vzorků ze zásaditého i kyselého prostředí je trend ztráty pevnosti oproti referenčním vzorkům v průměru o 20%. Pevnost referenčních vzorků se však pohybuje v blízkosti pevnosti čisté matrice bez výztuže.

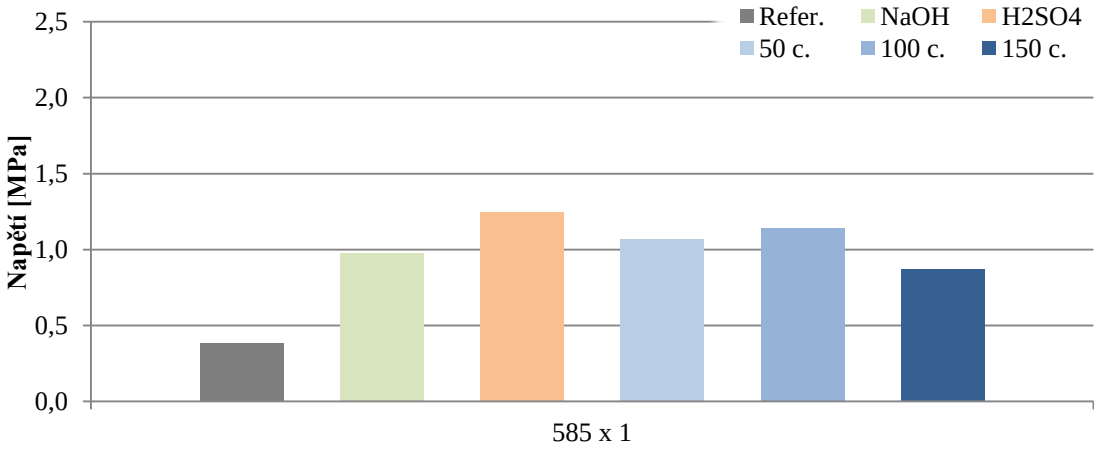
Je však obtížné najít systémové odůvodnění. K tomu by bylo potřeba mít více vzorků pro vyšší statistickou přesnost. Jediným zjednodušením se může jevit, že vzorky s jednou vrstvou výztuže projeví spíše zmenšení pevnosti oproti čisté matrici, zatímco u vzorků se dvěma vrstvami pevnost mírně roste.



Obr. 41 – Napětí při vzniku trhliny - všechny typy vyztužení

Napětí při zachycení výztuží

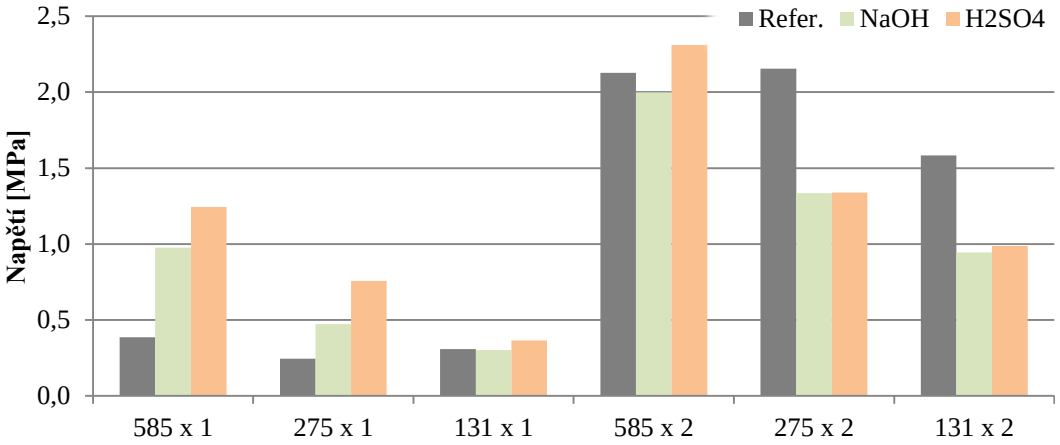
Následující grafy popisují bod číslo 2 zobrazený na Obr. 39. Jde o okamžik, ve kterém se do přenosu zatížení zapojuje především textilní výztuž.



Obr. 42 - Napětí při zachycení výztuží - vzorky včetně mrazicích cyklů

Z grafu na Obr. 43 je patrné, že u vzorků s jednou vrstvou výztuže se po vzniku trhliny výztuž zapojila do přenosu zatížení až při výrazně nižším zatížení než vzorky se dvěma vrstvami a to téměř při nulovém zatížení. Zároveň s tím, akcelerované vzorky se zapojily mnohem dříve. Jedno z možných vysvětlení je, že agresivní prostředí oslabilo vnitřní prostředí betonu a tím pádem provázání betonu a výztuže. Když se pak začal beton natahovat, protahovala se současně i výztuž, která pak při porušení betonu byla „předepnutá“ a začala

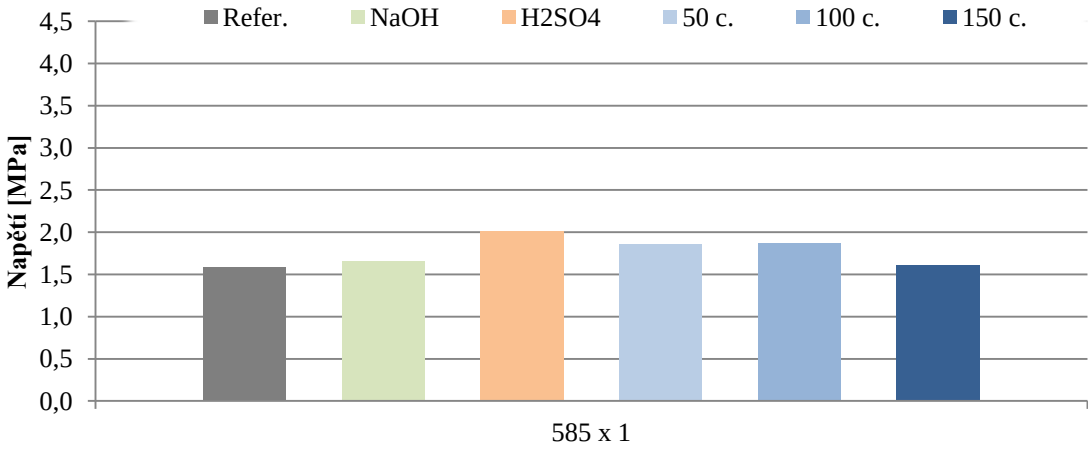
působit mnohem dříve než u referenčních neporušených vzorků. Pokud jsou však ve vzorku dvě výztuže, je aktivace mnohem rychlejší a to zhruba při poloviční hodnotě napětí, než při kterém vznikla první trhlina. Vlivem stupně vyztužení se výztuž aktivovala rychleji než u vzorků s jednou vrstvou.



Obr. 43 - Napětí při zachycení výztuží - všechny typy vyztužení

Maximální napětí po vzniku trhliny

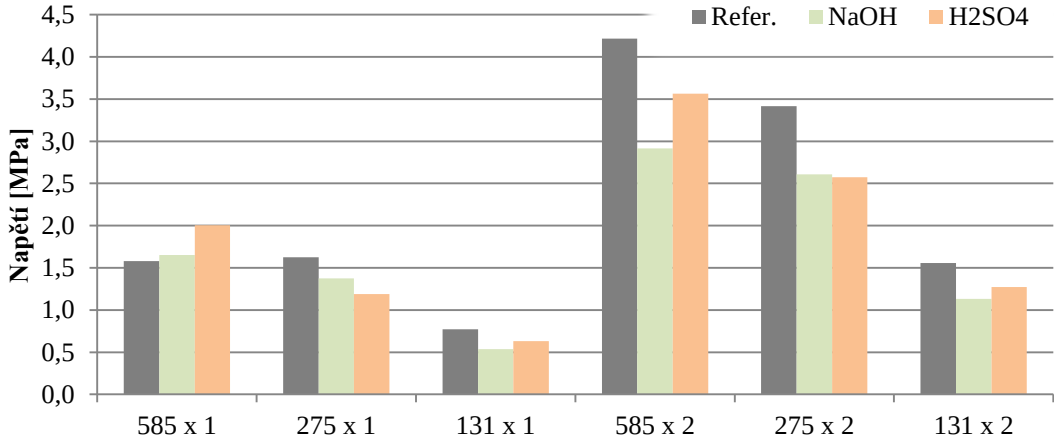
Následující grafy ukazují, jakých maximálních sil bylo dosaženo po vzniku první trhliny v betonu (tzn. bod 3 na grafu na Obr. 39). V těchto případech se maximální síla referenčních vzorků a akcelerovaných vzorků liší pouze o pár procent. Z toho lze usoudit, že agresivní prostředí nemá velký vliv na samotnou textilní výztuž, ale především na matrici, se kterou je spojená.



Obr. 44 - Maximální napětí po vzniku trhliny - vzorky včetně mrazicích cyklů

Tento efekt může souviset s podstatou použité matrice. Matrice obsahuje velké množství drobných částic, které vyplňují i nejjemnější póry. To z matrice dělá velmi hutný a nepropustný systém, ve kterém nedochází k šíření agresivního prostředí a ovlivňování

vnitřních částí. Výztuž tak není ovlivněna. Výztuž je také chráněna povrchovou ochranou, která jí chrání především před alkáliemi. Výztuž má tedy slabiny hlavně v částech, kde byla při zpracování při výrobě ustřihnutá a tím bylo vytvořeno místo pro vstup agresivních látek do její vnitřní struktury. Další případ, kdy může dojít k porušení celistvosti povrchové úpravy je při nepřiměřeném ohýbání. Může při tom dojít k popraskání nanesené vrstvy a vzniku další „vstupní brány“ pro agresivní látky.

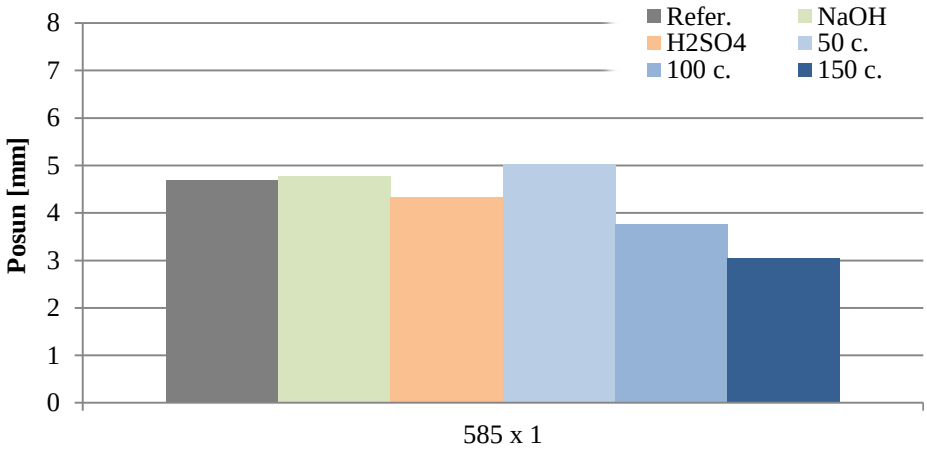


Obr. 45 - Maximální napětí po vzniku trhliny - všechny typy vyztužení

Největší vliv na únosnost textilie má však zásadité prostředí, což koresponduje s popisem textilie, jejíž největší slabinou je právě odolnost vůči zásaditému prostředí.

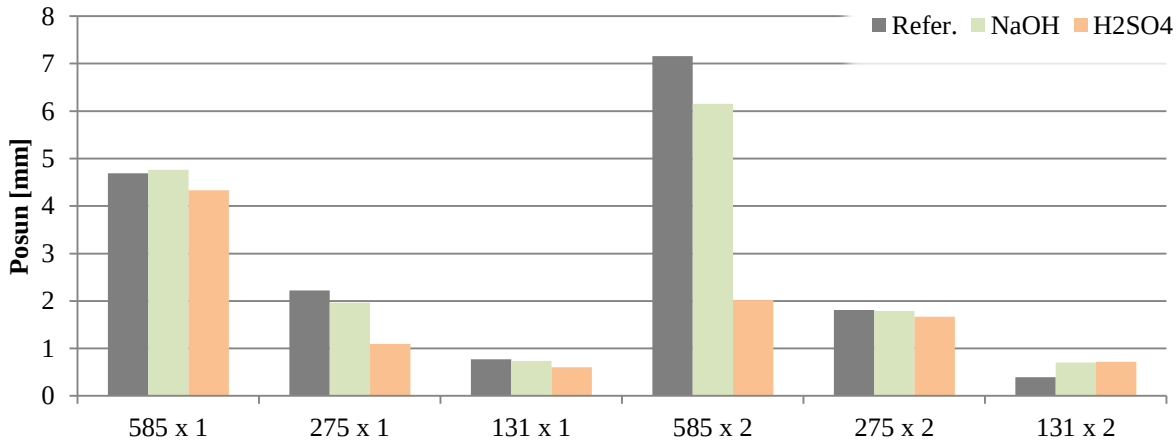
Přetvoření mezi první trhlinou a porušením

Následující grafy vypovídají o míře duktilního chování. Zobrazují vzdálenost mezi body 2 a 4 vyznačených na vzorovém grafu na straně 57.



Obr. 46 - Přetvoření mezi první trhlinou a porušením – vzorky včetně mrazicích cyklů

Z následujících grafů je patrné, že typ textilie má zásadní vliv na chování kompozitu. V případě výztuže R 131 A101 není rozdíl mezi vzorky s jednou a dvěma vrstvami téměř žádný. Při dosažení pevnosti textilie dojde k jejímu okamžitému přetržení, což koresponduje s typem roztržení výztuže na Obr. 34. Největší přínos v tomto hledisku má výztuž R 585 A101. V případě jedné i dvou výztuží vykazuje více než dvojnásobné protažení než zbylé dva typy výztuže. Vzorky z roztoku kyseliny sírové se dvěma vrstvami R 585 A101 sice vykazují výrazně nižší přetvoření, z grafů v příloze 24 je však patrné, že byly zaznamenány dva různé průběhy zkoušek. Je tedy potřeba více statistických údajů pro objektivní zhodnocení tohoto případu.



Obr. 47 - Přetvoření mezi první trhlinou a porušením - všechny vzorky

5.6.3 Porovnání jednotlivých vzorků

Kvůli zvýšení přehlednosti grafů je použito zjednodušení v tom smyslu, že u všech grafů je zobrazena pouze ta část experimentu, když už došlo k trhlině v cementovém kompozitu. Tato část je pro výzkum nejdůležitější a velmi to usnadní vzájemné porovnání. Zkoušky všech vzorků měly podobný průběh první části, který se podobá vzorovému grafu na Obr. 39. V zobrazení výsledků tedy zobrazím grafy počínajíc bodem 2.

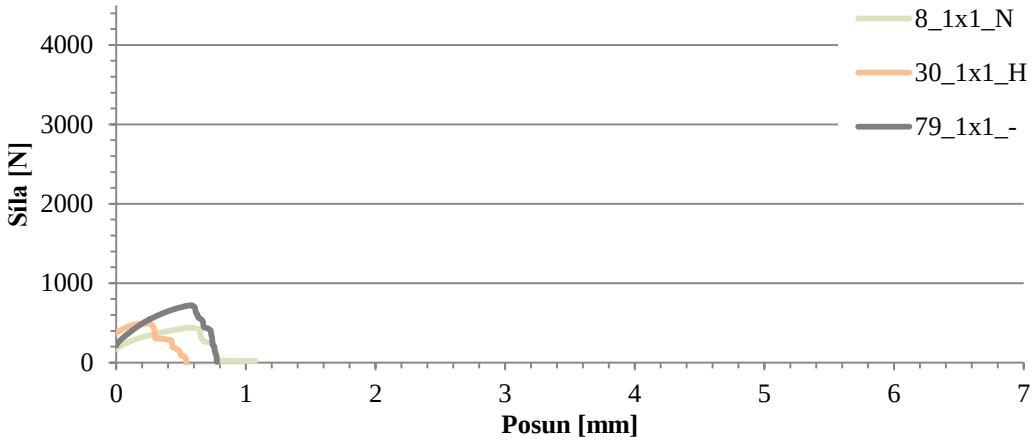
Na celkem šesti grafech je mezi sebou porovnáno 6 typů vyztužení (3 grafy se vzorky s jednou vrstvou a 3 grafy se vzorky se dvěma vrstvami výztuže). V každém grafu se nachází jeden reprezentativní vzorek za všechny vzorky z uvedeného agresivního prostředí.

Na vodorovné ose grafů je znázorněna hodnota posunu v milimetrech a svislá osa udává vynaloženou sílu v N. Tyto grafy nejsou určené pro porovnání dosažených pevností, ale

k zobrazení průběhu zkoušek. Všechny grafy mají pro snadné vzájemné porovnání stejné měřítko. Maximální hodnota posunu na grafech činí 7 mm a maximální síla 4500 N.

1 x R 131 A101

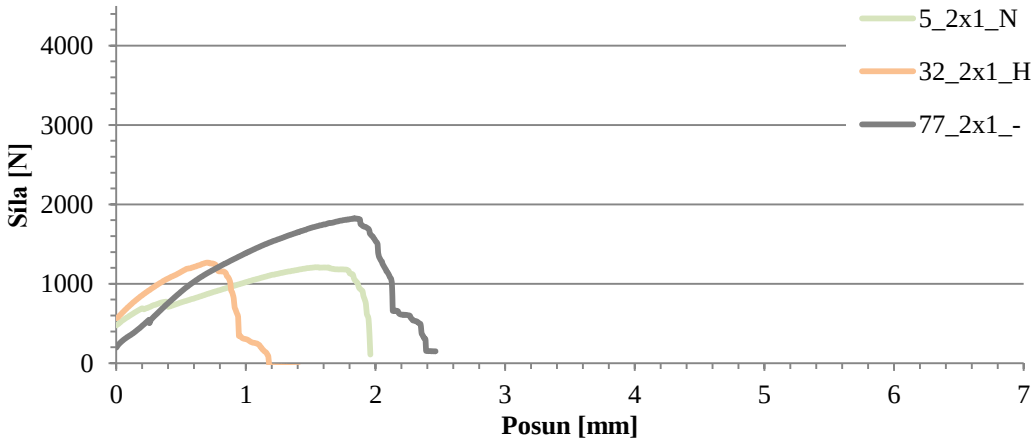
V tomto grafu se nachází vzorky s jednou vrstvou té nejslabší výztuže. Je proto očekávatelné, že vzorky budou vykazovat nejmenší duktilitu. Všechny vzorky skončily velmi podobně a to brzkým porušením. Tento průběh je popsán i v předchozích částech vyhodnocení.



Obr. 48 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 131 A101

1 x R 275 A101

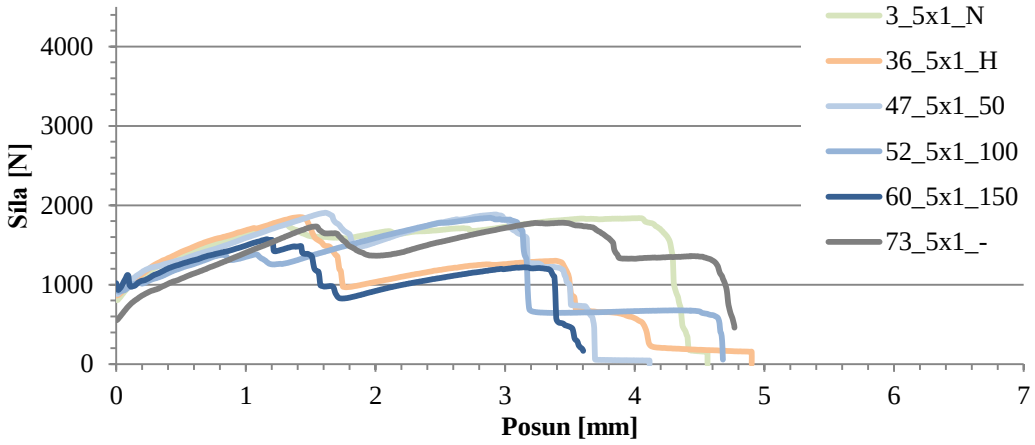
Vzorky s jednou vrstvou výztuže R 275 A101 mají znatelně větší výdrž a to jak téměř dvojnásobnou pevnost, tak i dvojnásobnou tažnost než textilie s nižší gramáží. Tvar křivky je však velmi podobný.



Obr. 49 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 275 A101

1 x R 585 A101

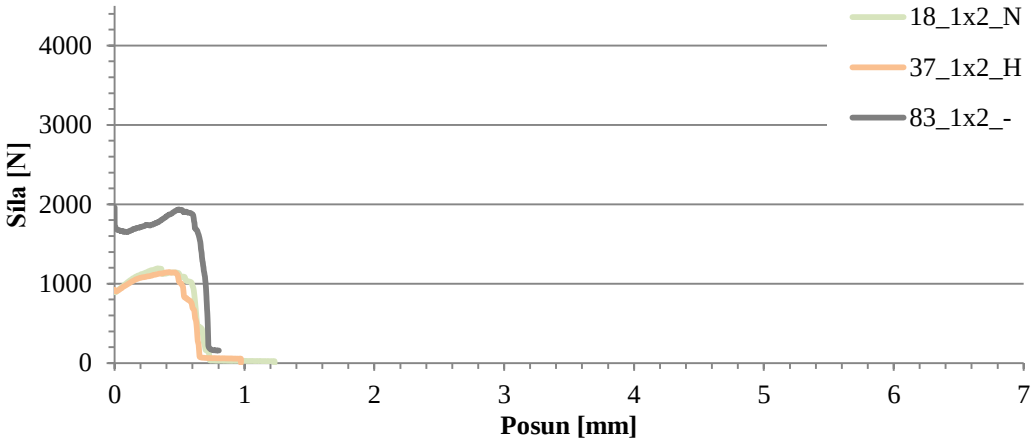
Vzorky s tímto vyztužením byly podrobeny všem agresivním prostředím včetně zmrazovacím cyklům. Ze zobrazených grafů nelze usoudit, že by některé prostředí mělo na vlastnosti vzorků výraznější vliv než ostatní. To podporuje mou myšlenku, že agresivní prostředí má na samotnou textilii minimální vliv.



Obr. 50 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 585 A101

2 x R 131 A101

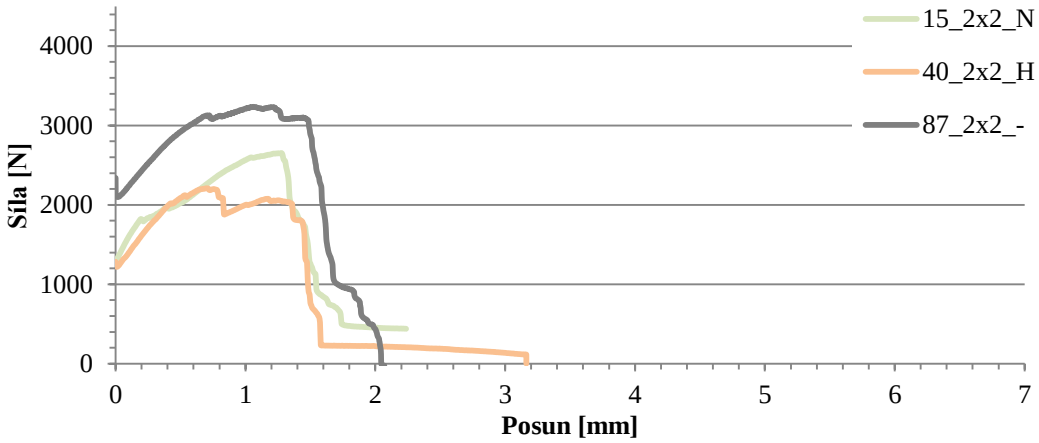
Následující graf zobrazuje vzorky, které jsou vyztuženy dvěma vrstvami R 131 A101. Výsledky vzorků z roztoků vykazují pouze nižší pevnost, maximální přetvoření je však téměř totožné s referenčními vzorky. V porovnání se vzorky s jednou výztuží jsou zde dosaženy více než dvojnásobné hodnoty únosnosti za stejného přetvoření.



Obr. 51 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 131 A101

2 x R 275 A101

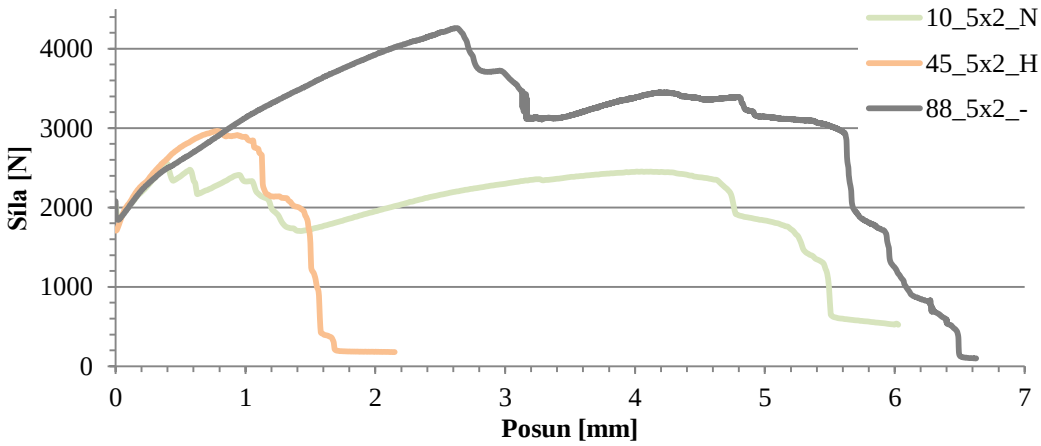
Trend u vzorků s touto gramáží je obdobný jako v předešlém případě. Přetvoření zůstává podobné jako při jedné výztuži, maximální dosažená síla je ale opět dvojnásobná.



Obr. 52 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 275 A101

2 x R 585 A101

Vzorky se dvěma vrstvami nejtěžší výztuže vykazují nejlepší dosažené vlastnosti. Maximální dosažené napětí „Papírově nejlepší“ vzorky dokazují své vlastnosti a v reálném srovnání. Vzorky jsou nejúnosnější a jsou schopny dosáhnout největšího přetvoření.



Obr. 53 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 585 A101

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o vlivu agresivního prostředí na tahové vlastnosti textilního betonu. Textilní beton je relativně nový kompozitní materiál, v české legislativě zatím neexistují návody jak zkoumat jeho vlastnosti. Z toho důvodu byla pro zkoušení použita Japonská norma JSCE-E 549 2000 a Česká norma ČSN 73 1322 určená pro běžný beton. Cementová matrice měla složení odpovídající vysokopevnostním betonům s pevností v tlaku po 28 dosahující 100 MPa. Jako textilní výztuž byla zvolena skelná textilie dodaná společností Adfors Saint-Gobain Litomyšl, v práci byly použity celkem 3 gramáže výztuže v jedné či dvou vrstvách. Tahové zkoušky byly provedeny na vzorcích ve tvaru dog-bone, které byly vystaveny třem různým agresivním prostředím. Jednalo se o 10 % roztok H_2SO_4, 10% roztok NaOH a zmrazovací cykly (50, 100 a 150 cyklů). Na referenčních trámečcích byla zároveň zkoumána pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Vyhodnocení vzorků probíhalo dle více kritérií. Hodnotila se změna hmotnosti, změna barvy a struktury povrchu a mechanické vlastnosti z tahových zkoušek. Samotné tahové zkoušky byly prováděny stálou zatěžovací rychlostí 0,5 mm/min až do úplného porušení vzorku včetně textilní výztuže. Vzhledem k velkému množství vzorků a variant vyztužení i zatížení nelze jednoduše shrnout výsledky. Vyhodnocení tedy proběhne podle typu agresivního prostředí.

10% roztok H_2SO_4

Tyto vzorky jako jediné zaznamenaly výrazný pokles hmotnosti a to v průměru o 10%. Povrch byl výrazně poškozen rozpuštěním hydratačních produktů, zbělal a zdrsněl (na povrchu došlo k obnažení plniva).

Došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 31,5% oproti referenčním vzorkům a došlo také k významnému poklesu tlakové pevnosti vzorků a to o 45,9 % (ze 106 MPa na 48,6 MPa). Jde o největší pokles ze všech akcelerovaných prostředí.

Při zkoušení vzorků v tahu kleslo napětí při vzniku první trhliny v průměru o 21,5 % oproti referenčním hodnotám. Po porušení se však chování lišilo dle počtu vrstev. V případech vzorků s jednou vrstvou bylo napětí průměrně o 149 % větší než u referenčních vzorků. Možné vysvětlení je, že ve vzorku došlo vlivem agresivního prostředí ke snížení spolupůsobení mezi textilií a matricí, čímž byla výztuž aktivována mnohem dříve než u referenčních vzorků. Vzorky se dvěma vrstvami však byly významně ovlivněny vyšším stupněm vyztužení, napětí při aktivaci výztuže bylo sice vyšší než u jedné vrstvy, zato však byla hodnota v průměru o 22% horší než u referenčních kusů. Maximální dosažená hodnota

napětí ve výztuži byla o 12,7% nižší, což je ale v nepoměru s předešlými hodnotami. Z toho vyplývá, že nejzásadnější poškození proběhlo v samotné matrici a textilie byla poškozená v menším rozsahu. Gramáž textilie má na výsledky také významný vliv.

10% roztok NaOH

Zde došlo k drobnému nárůstu hmotnosti a to v průměru o 1,5%. Povrch vzorků nedoznal žádného poškození, jedinou změnou bylo zbarvení do odstínů modré.

Zásadité prostředí má na textilní beton obdobný efekt jako prostředí kyseliny, negativní efekt je však menší. Pokles napětí při vzniku trhliny byl průměrně 17,3 %. V případě zapojení výztuže je trend opět obdobný. U jedné vrstvy je dosaženo nárůstu o 81 % a v případě dvou vrstev došlo k poklesu pevnosti o 28%. Maximální síla ve výztuži je o 20,5 % nižší než v případě referenčních vzorků. I přes výrobci deklarovanou náchylnost ke ztrátě vlastností v zásaditém prostředí však nedošlo k žádným zásadním změnám oproti referenčním vzorkům.

Zmrazovací cykly

Vzorky ve zmrazovací komoře obsahovaly pouze jednu vrstvu výztuže R 585 A101. Tyto vzorky neutrpěly žádnou změnu v hmotnosti, pouze v rámci statistické chyby. Jedinou změnou na povrchu bylo drobné ztmavnutí s přibývajícími cykly. Z řezu vzorky bylo patrné, že vzorky mají výrazně nižší okem rozeznatelnou pórovitost než ostatní vzorky. To je patrně způsobeno dodatečnou hydratací způsobenou rozrušováním vnitřního prostředí krystalky ledu, které následně uvolňují nezhydratovaná zrna cementu. Ta pak ve fázi rozmrzání hydratují a zaplňují uvolněné prostory.

U vzorků z mrazicí komory však došlo k největšímu poklesu všech hodnot oproti referenčním vzorkům. Příčinou pro to pravděpodobně je fakt, že při zmrazování dochází k porušení materiálu v celém objemu a ne převážně na povrchu, jak tomu bylo u vzorků z roztoků. Napětí při vzniku první trhliny postupně pokleslo o 25/48/49% při 50/100/150 cyklech. Aktivace výztuže nastala opět při vyšší hodnotě než v případě referenčních vzorků a to o 176/194/124 %. Maximální napětí ve výztuži opět nebylo významněji ovlivněno, úbytek činil pouze 17/18/1,9 %. U těchto vzorků však jako u jediných byl znát klesající trend duktility výztuže. Vzorky po padesáti cyklech sice vykázaly nárůst tažnosti o 7%, u sto cyklů už však bylo zhoršení o 19%, po sto padesáti dokonce o 34,8 %. Opět to může souviset s porušováním vzorku v celém jeho objemu. Krystalky ledu mohou narušovat vnitřní

strukturu vláken a zároveň i porušit jejich ochrannou vrstvu, což pak činí výztuž náchylnější k degradaci.

Shrnutí

Největší vliv na textilní beton měly zmrazovací cykly. To z toho důvodu, že při zmrazování je ovlivněn celý objem matrice. Zmrznutí vody se projeví jak na povrchu vzorku, tak i v jeho středu, čímž porušení nastává v mnohem větším rozsahu. Tlaková pevnost vzorků sice roste, tahové vlastnosti však doznaly největšího zhoršení v porovnání se vzorky z kyselých a zásaditých roztoků. Zatímco u vzorků vystavených agresivním prostředím docházelo k jejich narušení převážně u povrchu. Obecně se dá říci, že výztuž nebyla výrazněji ovlivněna díky hutnosti a nepropustnosti cementové matrice. Látky agresivního prostředí tak do vnitřní struktury pronikají mnohem pomaleji než u klasických betonů. Největší změny oproti referenčním vzorkům totiž nastaly v parametrech, kde se zapojuje převážně matrice.

Dalším důležitým aspektem je typ a množství výztuže. Výztuž s nejnižší gramáží se ukázala jako nevyhovující, při porušení nevykazovala výrazné přetvoření a ke kolapsu došlo brzo po vzniku první trhliny. Vzorky se dvěma vrstvami navíc nevykazovaly téměř žádný nárůst pevnosti po vzniku trhliny oproti vzorkům s jednou vrstvou.

Naproti tomu vzorky se dvěma vrstvami výztuže s největší gramáží projevovaly několikanásobně větší přetvoření než ostatní výztuž. Maximální dosažené napětí navíc bylo více než dvojnásobné oproti vzorkům s jednou vrstvou.

7 BIBLIOGRAFIE

[1] TRIANTAFILLOU, Thanasis. *Textile fibre composites in civil engineering*. ISBN 978-1-78242-446-8.

[2] ORLOWSKY, J. a M. RAUPACH. Durability model for AR-glass fibres in textile reinforced concrete. *Materials and Structures* [online]. 2008, 41(7), 1225-1233 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1617/s11527-007-9321-2. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-007-9321

[3] ORLOWSKY, J. a M. RAUPACH. Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete. *Materials and Structures* [online]. 2007-8-15, 39(6), 635-643 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1617/s11527-006-9100-5. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-006-9100-5

[4] WANG, Zhihong, Zheming ZHU, Xin SUN a Xiaomeng WANG. Deterioration of fracture toughness of concrete under acid rain environment. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2017, **77**, 76-84 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.02.013. ISSN 13506307. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630717302601

[5] MICELLI, Francesco a Antonio NANNI. Durability of FRP rods for concrete structures. *Construction and Building Materials* [online]. 2004, 18(7), 491-503 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061804000601

[6] BUTLER, Marko, Viktor MECHTCHERINE a Simone HEMPEL. Experimental investigations on the durability of fibre–matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2009, 31(4), 221-231 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.005. ISSN 09589465. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946509000274

[7] MUMENYA, S.W., R.B. TAIT a M.G. ALEXANDER. Mechanical behaviour of Textile Concrete under accelerated ageing conditions. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2010, 32(8), 580-588 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.007. ISSN 09589465. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946510000934

[8] BASHEER, P.A.M., S.E. CHIDIACT a A.E. LONG. Predictive models for deterioration of concrete structures. *Construction and Building Materials* [online]. 1996, 10(1), 27-37 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/0950-0618(95)00092-5. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0950061895000925

[9] FIDELIS, Maria Ernestina Alves, Romildo Dias TOLEDO FILHO, Flávio de Andrade SILVA, Viktor MECHTCHERINE, Marko BUTLER a Simone HEMPEL. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2016, 74, 7-15 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.09.002. ISSN 09589465. Dostupné z:

http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516305066

[10] NOBILI, A. Durability assessment of impregnated Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix (GFRCM) composites in the alkaline and saline environments. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 105, 465-471 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.173. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308448

[11] BUTLER, Marko, Viktor MECHTCHERINE a Simone HEMPEL. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition. *Materials and Structures* [online]. 2010, 43(10), 1351-1368 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1617/s11527-010-9586-8. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-010-9586-8

[12] DU, Yunxing, Mengmeng ZHANG, Fen ZHOU a Deju ZHU. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 138, 88-100 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.083. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817301198

[13] ZARGARAN, Mojdeh, Nader K.A. ATTARI, Saeid ALIZADEH a Parisa TEYMOURI. Minimum reinforcement ratio in TRC panels for deflection hardening flexural performance. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 137, 459-469 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.091. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817301228

[14] ROY, D.M, P ARJUNAN a M.R SILSBEE. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2001, 31(12), 1809-1813 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00548-8. ISSN 00088846. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601005488

[15] WANG, Boxin, Jianyu ZHAO a Qing WANG. Distributed models of self-stress value in textile-reinforced self-stressing concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 126, 286-296 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.149. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816310947

[16] NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. 4th and final ed. Harlow: Longman Group, 1995. ISBN 978-0-582-23070-5.

[17] MLINÁRIK Lilla. a Katalin KOPECSKÓ, The Influence of Combined Application of Two SCMs on the Corrosion and Acid Attak Durability of Mortars, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, č. 61, pp. 313-321, 2016.

[18] BEDDOE, Robin E. a Horst W. DORNER. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research* [online]. 2005, 35(12), 2333-2339 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.04.002. ISSN 00088846. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884605001031

[19] MICELLI, Francesco a Maria Antonietta AIELLO. Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, , - [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.03.005. ISSN 13598368. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816331109

[20] SIM, Jongsung, Cheolwoo PARK a 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 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002. ISSN 13598368. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836805000454

[21] YU, Hongfa, Haoxia MA a Kun YAN. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 137, 104-116 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.042. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817300557

[22] VOGEL, Filip. Production and Use of the Textile Reinforced Concrete. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, 982, 59-62 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.982.59. ISSN 1662-8985. Dostupné z: http://www.scientific.net/AMR.982.59

[23] YIN, Shiping, Shilang XU a Hedong LI. Improved mechanical properties of textile reinforced concrete thin plate. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. 2013, 28(1), 92-98 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1007/s11595-013-0647-z. ISSN 1000-2413. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11595-013-0647-z

[24] NOVOTNÁ, Magdaléna, Michaela KOSTELECKÁ, Julie HODKOVÁ a Miroslav VOKÁČ. Use of Textile Reinforced Concrete – Especially for Facade Panels. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, 923, 142-145 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.923.142. ISSN 1662-8985. Dostupné z: http://www.scientific.net/AMR.923.142

[25] [Online]. Dostupné z: http://www.bi-constructionnews.com/en_article_Carbon_instead_of_Steel___Textiles_revolutionize_the_Construction_Sector.news [Přístup získán 22 04 2017].

[26] [Online]. Dostupné z: https://structurae.de/bauwerke/fussgaengerbruecke-lautlingen [Přístup získán 22 04 2017].

[27] 22 04 2017. [Online]. [Přístup získán 22 04 2017]. Dostupné z: https://www.heringinternational.com/en/nc/news/article/betoshellR-textile-reinforced-concrete-facade-for-the-rehearsal-building-ballett-am-rhein-in-dusse/

[28] ORTLEPP, Regine a Sebastian ORTLEPP. Textile reinforced concrete for strengthening of RC columns: A contribution to resource conservation through the preservation of structures. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 132, 150-160 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.133. ISSN 09500618 Dostupné z:

http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181631902X

[29] BRÜCKNER, A., R. ORTLEPP a M. CURBACH. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Materials and Structures* [online]. 2006, 39(8), 741-748 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1617/s11527-005-9027-2. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-005-9027-2

[30] VERBRUGGEN, Svetlana, Tine TYSMANS a Jan WASTIELS. Bending crack behaviour of plain concrete beams externally reinforced with TRC. *Materials and Structures* [online]. 2016, 49(12), 5303-5314 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1617/s11527-016-0861-1. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1617/s11527-016-0861-1

[31] SHAREI, E., A. SCHOLZEN, J. HEGGER a R. CHUDOBA. Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell. *Composite Structures* [online]. 2017, 171, 505-514 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.069. ISSN 02638223. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026382231730394X

[32] „Dragos Motica," 22 04 2017. [Online]. Dostupné z: http://www.dragosmotica.ro/portfolio/slash-lamp/. [Přístup získán 22 04 2017].

[33] „Tkaní," [Online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tkan%C3%AD [Přístup získán 07 05 2017].

[34] KOSTELECKÁ Michaela, Nekovová vlákna a jejich vliv na vybrané vlastnosti vláknocementových desek, Praha: Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, 2014.

[35] SEN, Tara a H.N. JAGANNATHA REDDY. Strengthening of RC beams in flexure using natural jute fibre textile reinforced composite system and its comparative study with CFRP and GFRP strengthening systems. *International Journal of Sustainable Built Environment* [online]. 2013, 2(1), 41-55 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.ijsbe.2013.11.001. ISSN 22126090. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212609013000265

[36] WANG, Zike, Xiao-Ling ZHAO, Guijun XIAN, Gang WU, R.K. SINGH RAMAN, Saad AL-SAADI a Asadul HAQUE. Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 139, 467-489 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817302258

[37] VOGEL, Filip, Ondřej HOLČAPEK a Petr KONVALINKA. Mechanické vlastnosti cementové matrice pro textilní beton. In: 11. konference Speciální betony. Speciální betony 2014. Bystřice nad Pernštejnem, 16.10.2014 - 17.10.2014. Praha: Sekurkon. 2014, s. 43-47. ISBN 978-80-86604-64-0

[38] Českomoravský cement, Produktový katalog, *CEM I 42,8 R, Portlandský cement, EN 197-1,* 2016.

[39] Sklopísek Střeleč, *Katalog produktů,* duben 2017.

[40] Sika CZ, Produktový katalog, *Sika ViscoCrete-1035 CZ,* 2016.

[41] MACHOVEC Jan, Experimentální a numerická analýza cementové matrice pro textilní beton, Praha: Bakalářská práce; Fakulta Stavební, ČVUT v Praze, 2015.

[42] Produktový katalog, *Vertex - Glass fibre mesh fabrics,* Litomyšl: SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o..

[43] „TEST METHOD FOR WATER, ACID AND ALKALI RESISTANCE OF CONTINUOUS FIBER SHEETS (JSCE-E 549-2000),“ [Online]. Dostupné z: http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/FRP-sheet/2-10.pdf . [Přístup získán 15 4 2017].

[44] *ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu,* 1968.

[45] *Průvodce novou betonářskou normou,* Svaz výrobců betonu ČR, 2004.

[46] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.

[47] „E-glass Fibre,“ [Online]. Dostupné z: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764 [Přístup získán 19 05 2017].

[48] „Glass Fiber Differences and Properties,“ [Online]. Dostupné z: http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.vSWm5PGi.dpbs [Přístup získán 19 05 2017]

[49] .[Online]. Dostupné z: https://i.ytimg.com/vi/vK-G0g4YjFM/maxresdefault.jpg . [Přístup získán 20 05 2017].]

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Výsledky experimentálního programu v porovnání s výpočtem [2] 5
Obr. 2 – První (vytrhávání jednoho pramene) a druhá metoda zkoušení (oboustranné vytahování textilie z betonu) [3] 6
Obr. 3 - Třetí metoda zkoušení (tahová zkouška) [3] 6
Obr. 4 - Zkušební vzorek s připravenou trhlinou [4] 7
Obr. 5 - Schéma zatěžování [5] 8
Obr. 6 - Příčiny poruch betonových konstrukcí v procentech [8] 11
Obr. 7 - Tvar testovaných vzorků [9] 12
Obr. 8 - Zařízení pro vnášení předpětí do textilní výztuže [12] 13
Obr. 9 - 3D textilní výztuž [25] 19
Obr. 10 - Lávka pro pěší ve městě Albstadt [26] 20
Obr. 11 - Budova Ballet am Rhein v Dusseldorfu s fasádními panely z textilního betonu [27] 20
Obr. 12 - Přístřešek na kola v kampusu RWTH Aachen [31] 21
Obr. 13 - Lampa z textilního betonu [32] 22
Obr. 14 - Princip tkaní textilie (weft = útek ; warp = osnova) 23
Obr. 15 - Vývoj střední krychelné pevnosti matrice v čase [37] 26
Obr. 16 - Vývoj střední pevnosti v tahu za ohybu v čase [37] 27
Obr. 17 – Grafické znázornění hmotnostních podílů složení cementové matrice 27
Obr. 18 - Fotografie použitých textilií [41] 29
Obr. 19 - Schéma výroby textilní výztuže 31
Obr. 20 - Zkušební vzorek – dog-bone 33
Obr. 21 - Výztuž nastříhaná podle tvaru vzorků 36
Obr. 22 - Graf jednoho zmrazovacího cyklu 40
Obr. 23 - Mrazicí komora KD 20 41
Obr. 24 - Zobrazení výskytu některých agresivních prostředí na konstrukci [45] 43
Obr. 25 - Vzorky v nádobě před nalitím roztoku a zapečetěním 45
Obr. 26 - Vzorky v mrazicí komoře 45
Obr. 27 - Zkušební sestava pro zkoušení dog-bone 46
Obr. 28 - Vzorek v čelistech s extenzometrem 47
Obr. 29 - Vzorek vyjmutý z kyseliny sírové se zbytky cementového tmelu 48
Obr. 30 - Vzorek vyjmutý z NaOH 49

Obr. 31 - Porovnání povrchů po akcelerovaném stárnutí 49
Obr. 32 - Roztržená vlákna výztuže R 585 A101 50
Obr. 33 - Roztržená vlákna výztuže R 275 A101 50
Obr. 34 - Roztržená vlákna výztuže R 131 A101 51
Obr. 35 - Příčný řez vzorky 51
Obr. 36 – Pevnost v tahu ohybem trámečků 54
Obr. 37 – Pevnost v tlaku trámečků 55
Obr. 38 - Změna napětí při vzniku první trhliny dle JSCE-E 549-2000 55
Obr. 39 - Popis referenčního grafu 57
Obr. 40 – Napětí při vzniku trhliny - vzorky včetně mrazicích cyklů 58
Obr. 41 – Napětí při vzniku trhliny - všechny typy vyztužení 59
Obr. 42 - Napětí při zachycení výztuží - vzorky včetně mrazicích cyklů 59
Obr. 43 - Napětí při zachycení výztuží - všechny typy vyztužení 60
Obr. 44 - Maximální napětí po vzniku trhliny - vzorky včetně mrazicích cyklů 60
Obr. 45 - Maximální napětí po vzniku trhliny - všechny typy vyztužení 61
Obr. 46 - Přetvoření mezi první trhlinou a porušením – vzorky včetně mrazicích cyklů 61
Obr. 47 - Přetvoření mezi první trhlinou a porušením - všechny vzorky 62
Obr. 48 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 131 A101 63
Obr. 49 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 275 A101 63
Obr. 50 – Pracovní diagramy vzorků s jednou vrstvou R 585 A101 64
Obr. 51 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 131 A101 64
Obr. 52 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 275 A101 65
Obr. 53 – Pracovní diagramy vzorků se dvěma vrstvami R 585 A101 65

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Hmotnostní složení matrice 26
Tab. 2 - Mechanické vlastnosti použité výztuže [42] 32
Tab. 3 - Soupis vzorků 35
Tab. 4 - Změny hmotnosti 52
Tab. 5 - Výsledky dle JSCE-E 549-2000 56

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Soupis zkušebních vzorků 78
Příloha 2 - Soupis zkušebních trámečků 80
Příloha 3 – Vyhodnocení změny hmotnosti a pevnosti dle JSCE-E 549-2000 81
Příloha 4 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, referenční vzorky 82
Příloha 5 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, 10 % roztok NaOH..... 82
Příloha 6 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, 10 % roztok H_2SO_4 82
Příloha 7 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, referenční vzorky 83
Příloha 8 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, 10 % roztok NaOH..... 83
Příloha 9 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, 10 % roztok H_2SO_4 83
Příloha 10 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, referenční vzorky..... 84
Příloha 11 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 10 % roztok NaOH 84
Příloha 12 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 10 % roztok H_2SO_4..... 84
Příloha 13 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 50 mrazicích cyklů..... 85
Příloha 14 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 100 mrazicích cyklů..... 85
Příloha 15 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 150 mrazicích cyklů..... 85
Příloha 16 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, referenční vzorky [41]..... 86
Příloha 17 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, 10 % roztok NaOH..... 86
Příloha 18 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, 10 % roztok H_2SO_4 86
Příloha 19 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, referenční vzorky [41]..... 87
Příloha 20 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, 10 % roztok NaOH..... 87
Příloha 21 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, 10 % roztok H_2SO_4 87
Příloha 22 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, referenční vzorky [41]..... 88
Příloha 23 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, 10 % roztok NaOH..... 88
Příloha 24 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, 10 % roztok H_2SO_4 88

11 PŘÍLOHY

Příloha 1 - Soupis zkušebních vzorků

Číslo vzorku	Zatěžovací prostředí	typ výztuže	počet vrstev	Hmotnost	Šířka	Výška	Hmotnost	Šířka	Výška
				po 28 dnech			po ukončení akcelerovaného stárnutí		
				g	mm	mm	g	mm	mm
1_5x1_N	10% roztok NaOH	585	1	1092,5	30,4	30,6	1107,5	30,2	30,6
2_5x1_N				1010,5	29,7	30,6	1025,5	29,7	30,6
3_5x1_N				1088,0	30,3	30,4	1104,0	30,2	30,1
4_2x1_N		275	1	1098,0	29,9	30,5	1114,0	29,9	30,5
5_2x1_N				1115,0	31,5	31,1	1129,0	31,5	31,1
6_2x1_N				1062,5	30,0	29,4	1079,0	30,1	29,5
7_1x1_N		131	1	1035,0	30,2	29,9	1053,0	30,3	29,9
8_1x1_N				1099,0	31,6	31,5	1115,0	31,6	31,5
9_1x1_N				1045,0	29,9	29,5	1062,5	30,0	29,5
10_5x2_N		585	2	1057,0	30,3	30,0	1073,0	30,3	30,1
11_5x2_N				1075,5	30,2	31,0	1094,0	30,3	31,0
12_5x2_N				1065,0	30,5	30,6	1085,0	30,5	30,7
13_2x2_N		275	2	1064,0	29,9	30,2	1086,0	29,9	30,2
14_2x2_N				1085,0	30,5	30,7	1103,0	30,6	30,8
15_2x2_N				1054,0	29,8	30,1	1073,0	29,9	30,1
16_1x2_N		131	2	1061,0	30,5	30,9	1078,0	30,5	31,0
17_1x2_N				1099,0	30,7	31,4	1119,0	30,8	31,5
18_1x2_N				1107,0	30,2	31,5	1127,0	30,2	31,6
19_-_N		-	-	1050,0	29,8	30,1	1063,0	29,9	30,2
20_-_N				1073,0	30,5	29,8	1086,0	30,5	29,8
21_-_N				1085,0	29,9	30,4	1099,0	29,9	30,4
22_-_N				1085,0	30,8	30,9	1099,0	30,9	30,9
23_-_	-	-	-	1055,0	29,6	30,2	1072,5	29,6	30,3
24_-_H	10% roztok H2SO4	-	-	1057,0	29,9	29,8	956,0	29,0	28,4
25_-_H				1076,0	30,7	30,5	974,0	28,9	29,1
26_-_H				1051,0	29,8	29,9	970,0	28,5	27,5
27_-_H				1068,0	30,1	31,9	976,0	28,0	29,0
28_1x1_H		131	1	1046,0	30,2	30,2	954,0	28,9	28,0
29_1x1_H				1075,0	30,1	30,9	995,0	28,9	29,7
30_1x1_H				1073,0	30,7	30,9	996,0	30,0	29,6
31_2x1_H		275	1	982,0	30,1	29,7	886,0	29,6	26,8
32_2x1_H				1014,0	29,7	29,6	911,0	29,1	27,1
33_2x1_H				1055,0	30,2	30,2	946,0	30,0	28,5
34_5x1_H		585	1	1024,0	30,0	29,7	907,0	28,0	27,7
35_5x1_H				1017,0	30,2	29,5	902,0	28,9	27,5
36_5x1_H				1051,0	30,5	30,3	948,0	29,3	28,1
37_1x2_H		131	2	1070,0	31,2	30,5	953,0	29,7	29,0
38_1x2_H				1098,0	30,9	30,5	966,0	28,7	28,8
39_1x2_H				1093,0	31,1	30,6	959,0	28,8	29,6

40_2x2_H	10% rozt. H2SO4	275	2	1112,0	31,2	29,9	998,0	28,1	29,9
41_2x2_H				1103,0	31,3	30,1	967,0	28,2	29,1
42_2x2_H				1105,0	31,4	30,9	965,0	29,0	29,3
43_5x2_H		585	2	1077,0	31,4	29,8	946,0	28,5	29,0
44_5x2_H				1076,0	30,3	30,0	943,0	28,3	28,8
45_5x2_H				1068,0	30,7	30,5	936,0	28,9	28,7
46_5x1_50	50 zmrazovacích cyklů	585	1	1059,5	29,7	30,1	1059,5	29,7	30,0
47_5x1_50				1084,0	30,5	30,1	1084,9	30,4	30,1
48_5x1_50				1087,0	30,0	30,1	1088,1	30,0	30,1
49_5x1_50				1086,0	29,9	29,7	1086,8	29,9	29,9
50_5x1_50				1090,5	30,1	30,4	1091,2	30,3	30,3
51_5x1_50				1095,5	30,0	30,0	1096,1	30,1	30,1
52_5x1_100	100 zmrazovacích cyklů	585	1	1072,5	30,0	30,0	1071,5	30,0	29,7
53_5x1_100				1084,5	30,3	30,0	1084,5	30,2	29,9
54_5x1_100				1057,0	29,8	29,7	1056,5	29,7	29,5
55_5x1_100				1058,5	29,8	29,9	1058,0	29,8	29,5
56_5x1_100				1063,0	30,4	29,7	1062,5	30,3	29,6
57_5x1_100				1062,0	29,9	30,4	1061,5	29,8	30,5
58_5x1_150	150 zmrazovacích cyklů	585	1	1068,0	29,8	30,0	1068,0	29,8	30,0
59_5x1_150				1066,0	30,2	30,2	1066,0	30,2	30,2
60_5x1_150				1074,5	30,1	30,2	1074,5	30,1	30,2
61_5x1_150				1064,0	29,8	29,9	1064,0	29,8	29,9
62_5x1_150				1079,0	30,6	30,1	1079,0	30,6	30,1
63_5x1_150				1096,0	30,0	30,4	1096,0	30,0	30,4
64_-_50	50 zmr. Cyklů	-	-	1032,0	29,9	29,3	1033,5	30,0	29,2
65_-_50				1058,0	30,1	29,1	1060,0	30,1	29,1
66_-_50				1058,0	30,0	29,2	1059,1	30,2	29,2
67_-_100	100 zmr. Cyklů	-	-	1084,0	30,0	29,9	1085,2	29,9	29,8
68_-_100				1077,5	30,3	29,8	1078,3	30,1	29,6
69_-_100				1083,0	29,9	30,1	1082,1	29,9	30,0
70_-_150	150 zmr. Cyklů	-	-	1042,0	30,2	29,5	1042,0	30,2	29,5
71_-_150				1079,0	29,7	30,2	1079,0	29,7	30,2
72_-_150				1065,0	29,8	30,0	1065,0	29,8	30,0
73_5x1_-	-	585	1	-	-	-	1044,5	29,9	30,1
74_5x1_-				-	-	-	1056,5	30,3	30,8
75_5x1_-				-	-	-	1059,0	30,0	30,6
76_2x1_-		275	1	-	-	-	1019,5	29,9	29,6
77_2x1_-				-	-	-	1078,5	30,5	31,4
78_2x1_-				-	-	-	1044,0	30,0	30,4
79_1x1_-		131	1	-	-	-	1077,0	29,8	30,8
80_1x1_-				-	-	-	1099,5	30,2	31,7
81_1x1_-				-	-	-	1071,5	30,3	30,8

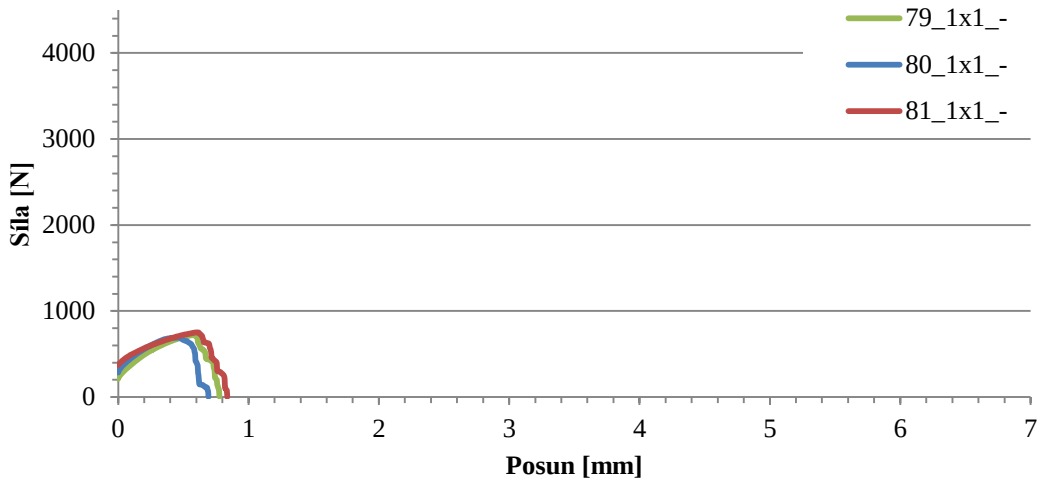
Příloha 2 - Soupis zkušebních trámečků

Číslo vzorku	Zatěžovací prostředí	Hmotnost	Šířka	Výška	Délka	Hmotnost	Šířka	Výška	Délka
		po 28 dnech				po ukončení akcelerovaného stárnutí			
		g	mm	mm	mm	g	mm	mm	mm
T1_N	10% roztok NaOh	533,0	39,9	38,3	159,2	540,0	40,0	38,3	159,3
T2_N		546,0	40,1	40,1	159,5	552,0	40,1	40,1	159,6
T3_N		573,5	41,1	40,4	159,4	580,0	40,8	40,4	159,5
T4_N		565,5	41,0	40,2	162,8	575,0	40,5	39,8	162,8
T5_H	10% roztok H2SO4	591,0	40,6	41,2	162,7	531,0	40,5	39,7	160,5
T6_H		564,0	40,0	40,0	162,7	507,0	38,8	38,8	160,8
T7_H		590,5	41,6	42,0	162,5	526,0	39,4	41,3	161,6
T8_H		579,0	40,7	40,7	163,0	543,0	38,6	39,7	162,1
T9_-	referenční	-	-	-	-	551,5	40,6	39,2	163,4
T10_-		-	-	-	-	552,5	40,5	40,1	159,9
T11_-		-	-	-	-	520,0	40,6	38,3	159,3
T12_50	50 zmr. Cyklů	593,5	40,5	40,0	163,2	594,6	40,5	40,0	163,1
T13_50		592,0	40,1	40,6	163,0	593,0	40,3	40,5	163,0
T14_50		579,0	40,2	39,6	161,9	580,5	40,1	39,6	162,0
T15_100	100 zmr. Cyklů	573,0	40,5	38,9	162,6	567,5	40,2	38,8	162,6
T16_100		557,0	40,0	38,8	161,1	553,0	40,0	38,8	161,1
T17_100		578,5	40,1	39,8	162,2	572,5	40,1	39,9	162,2
T18_150	150 zmr. Cyklů	586,0	40,1	39,8	163,9	586,0	39,7	40,2	163,9
T19_150		597,0	40,4	40,6	163,2	597,9	40,5	40,5	163,2
T20_150		566,0	39,9	39,6	162,4	566,0	40,9	39,6	162,4

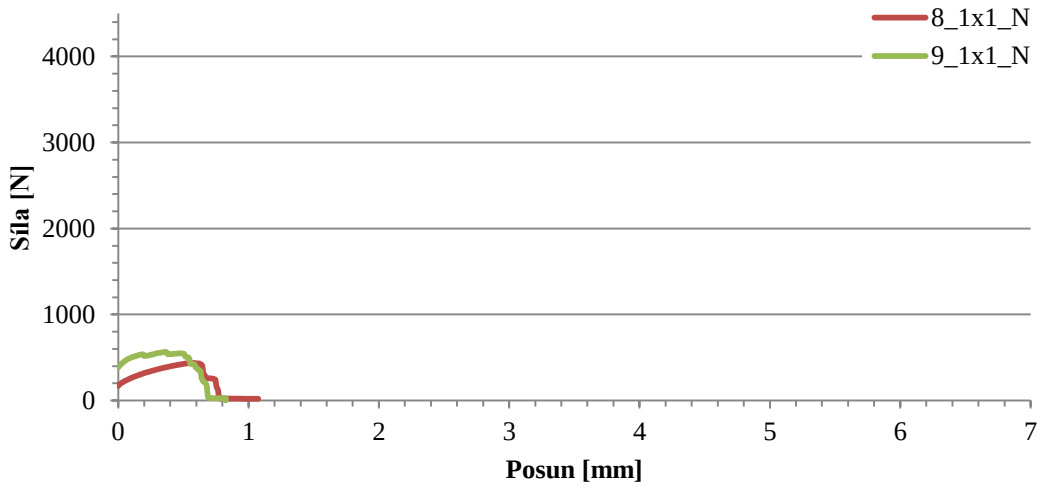
Příloha 3 – Vyhodnocení změny hmotnosti a pevnosti dle JSCE-E 549-2000

	Číslo vzorku	Hmotnost po 28 dnech	Hmotnost po akcel. stárnutí	Změna	Průměrná hodnota	Sm. odchylka od průměru	Napětí po akcel. Stárnutí	Napětí referenční	Změna	Průměrná hodnota	Sm.odchylka
-		g	g	%	%	%	MPa	MPa			
NaOH	1_5x1_N	1093	1108	-1,37%	-1,56%	0,23%	-	4,23		83%	13%
	2_5x1_N	1011	1026	-1,48%			3,42	4,23	80,8%		
	3_5x1_N	1088	1104	-1,47%			3,29	4,23	77,8%		
	4_2x1_N	1098	1114	-1,46%			2,75	4,7	58,4%		
	5_2x1_N	1115	1129	-1,26%			3,25	4,7	69,1%		
	6_2x1_N	1063	1079	-1,55%			3,55	4,7	75,6%		
	7_1x1_N	1035	1053	-1,74%			3,43	3,92	87,6%		
	8_1x1_N	1099	1115	-1,46%			4,26	3,92	108,7%		
	9_1x1_N	1045	1063	-1,67%			4,00	3,92	102,0%		
	10_5x2_N	1057	1073	-1,51%			4,98	4,74	105,0%		
	11_5x2_N	1076	1094	-1,72%			3,92	4,74	82,6%		
	12_5x2_N	1065	1085	-1,88%			4,21	4,74	88,9%		
	13_2x2_N	1064	1086	-2,07%			4,55	6,01	75,7%		
	14_2x2_N	1085	1103	-1,66%			4,67	6,01	77,7%		
	15_2x2_N	1054	1073	-1,80%			4,57	6,01	76,0%		
	16_1x2_N	1061	1078	-1,60%			4,88	5,64	86,5%		
	17_1x2_N	1099	1119	-1,82%			3,69	5,64	65,5%		
	18_1x2_N	1107	1127	-1,81%			3,93	5,64	69,7%		
	19_-_N	1050	1063	-1,24%			4,48	5,12	87,6%		
	20_-_N	1073	1086	-1,21%			4,11	5,12	80,3%		
	21_-_N	1085	1099	-1,29%			3,84	5,12	75,0%		
	22_-_N	1085	1099	-1,29%			5,36	5,12	104,8%		
H2SO4	23_-_	1055	1073	-1,66%	9,77%	2,98%	3,43	5,12	66,9%	78%	20%
	24_-_H	1057	956	9,56%			2,31	5,12	45,2%		
	25_-_H	1076	974	9,48%			3,80	5,12	74,3%		
	26_-_H	1051	970	7,71%			4,33	5,12	84,7%		
	27_-_H	1068	976	8,61%			3,67	3,92	93,5%		
	28_1x1_H	1046	954	8,80%			4,26	3,92	108,8%		
	29_1x1_H	1075	995	7,44%			3,28	3,92	83,7%		
	30_1x1_H	1073	996	7,18%			4,00	4,7	85,2%		
	31_2x1_H	982	886	9,78%			5,63	4,7	119,7%		
	32_2x1_H	1014	911	10,16%			2,04	4,7	43,5%		
	33_2x1_H	1055	946	10,33%			4,45	4,23	105,3%		
	34_5x1_H	1024	907	11,43%			2,98	4,23	70,4%		
	35_5x1_H	1017	902	11,31%			3,96	4,23	93,6%		
	36_5x1_H	1051	948	9,80%			3,88	5,64	68,7%		
	37_1x2_H	1070	953	10,93%			4,27	5,64	75,7%		
	38_1x2_H	1098	966	12,02%			3,33	5,64	59,0%		
	39_1x2_H	1093	959	12,26%			3,37	6,01	56,1%		
	40_2x2_H	1112	998	10,25%			3,52	6,01	58,6%		
	41_2x2_H	1103	967	12,33%			4,13	6,01	68,7%		
	42_2x2_H	1105	965	12,67%			4,70	4,74	99,2%		
	43_5x2_H	1077	946	12,16%			4,03	4,74	85,0%		
	44_5x2_H	1076	943	12,36%			3,24	4,74	68,3%		

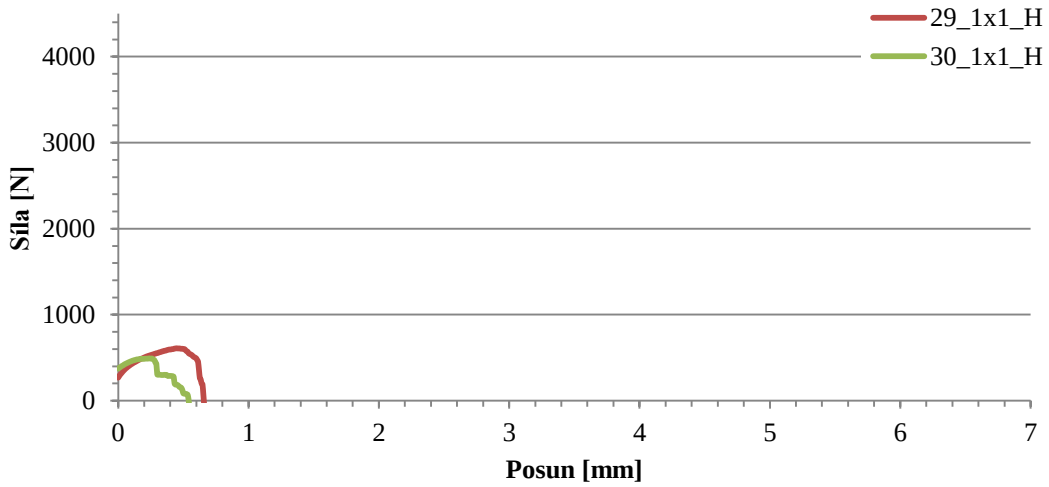
Příloha 4 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, referenční vzorky



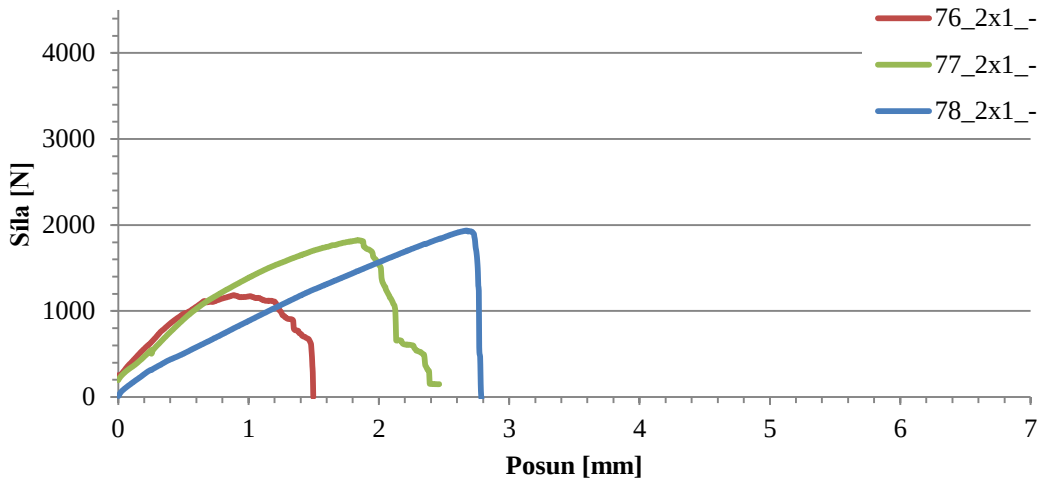
Příloha 5 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, 10 % roztok NaOH



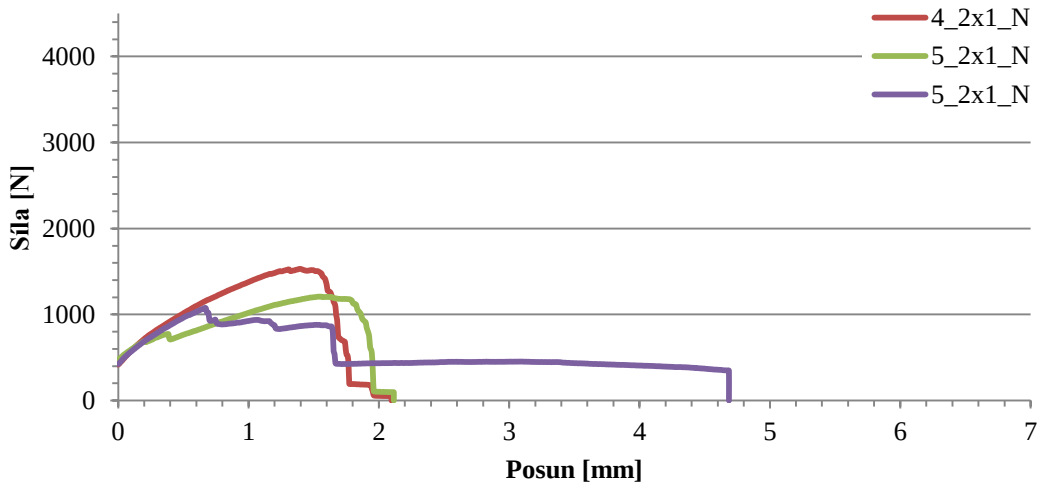
Příloha 6 – Vzorky s jednou vrstvou R 131 A101, 10 % roztok H_2SO_4



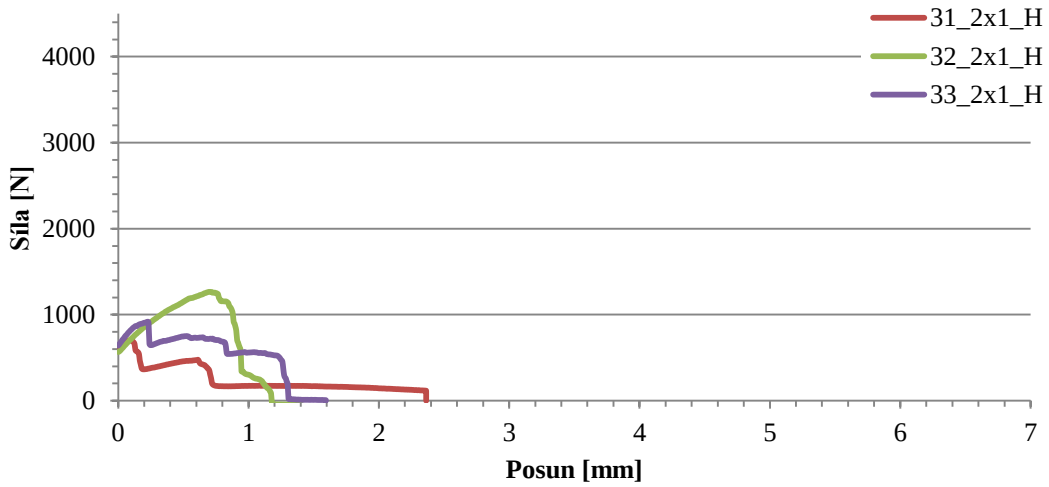
Příloha 7 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, referenční vzorky



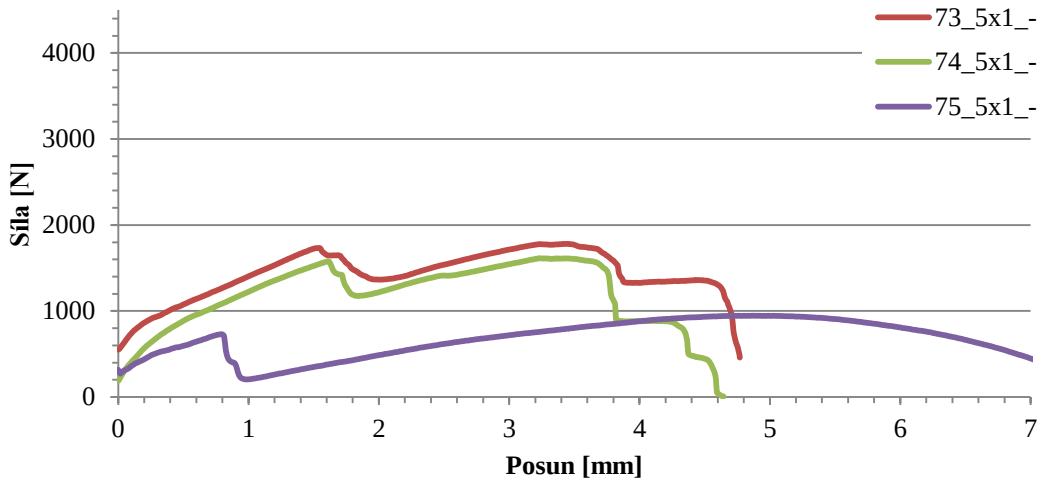
Příloha 8 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, 10 % roztok NaOH



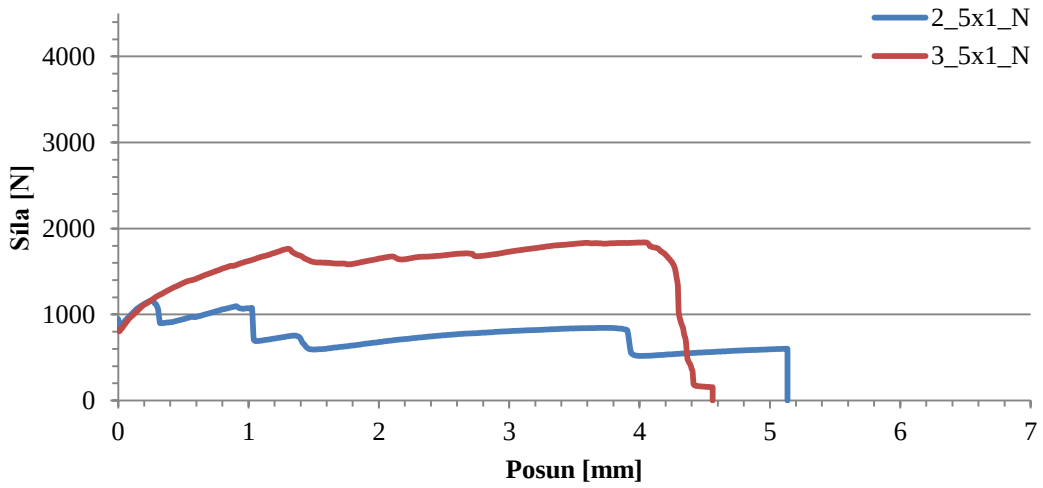
Příloha 9 – Vzorky s jednou vrstvou R 275 A101, 10 % roztok H_2SO_4



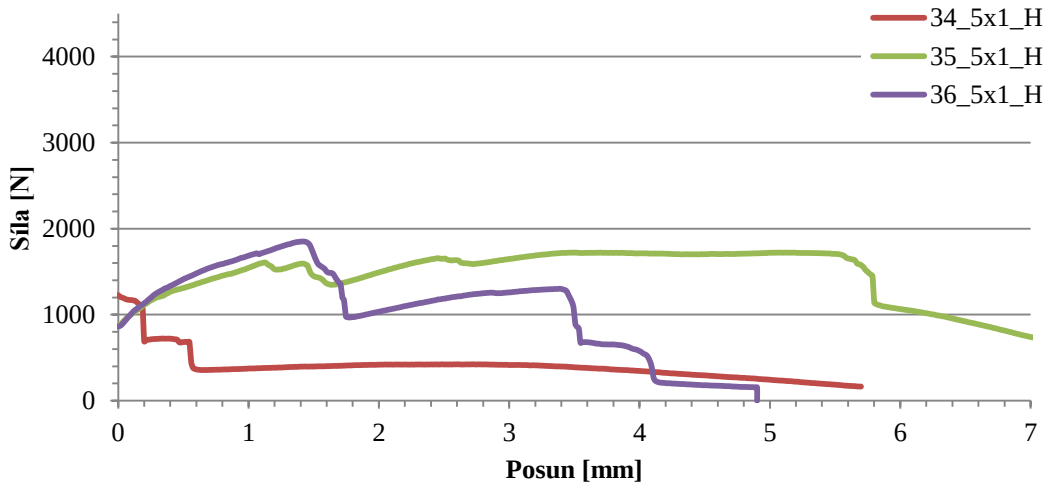
Příloha 10 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, referenční vzorky



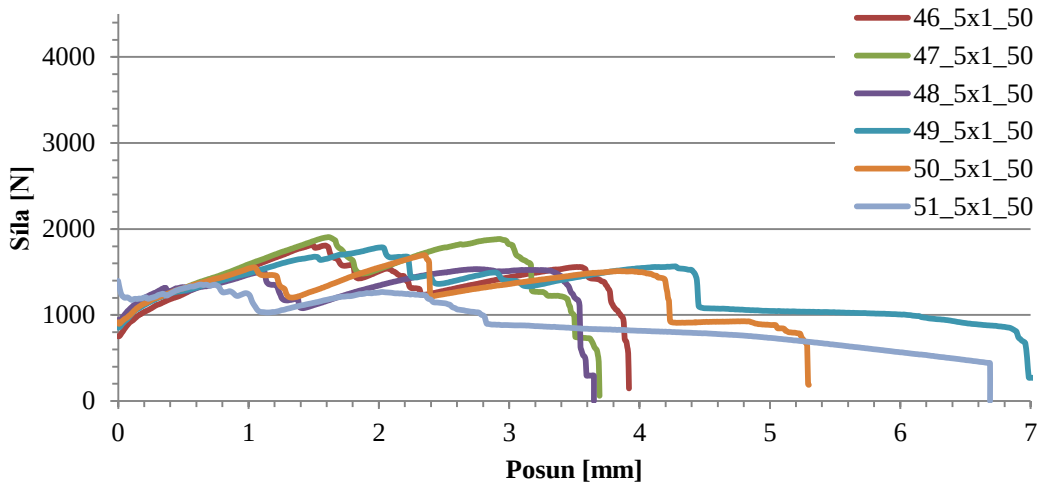
Příloha 11 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 10 % roztok NaOH



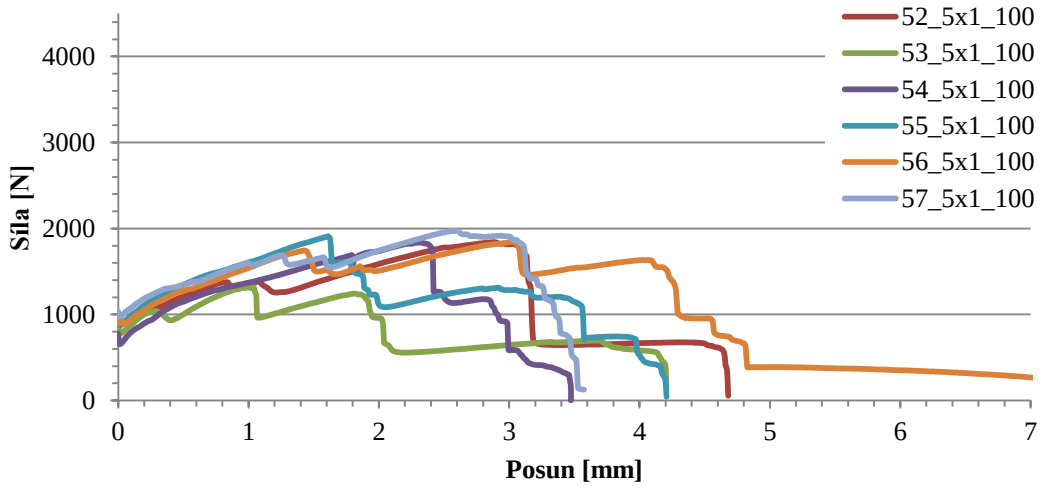
Příloha 12 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 10 % roztok H_2SO_4



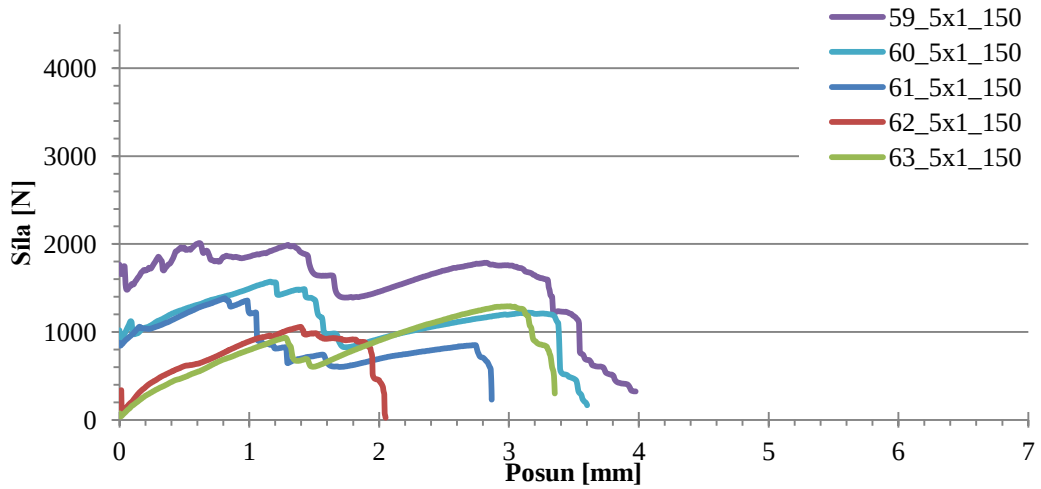
Příloha 13 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 50 mrazicích cyklů



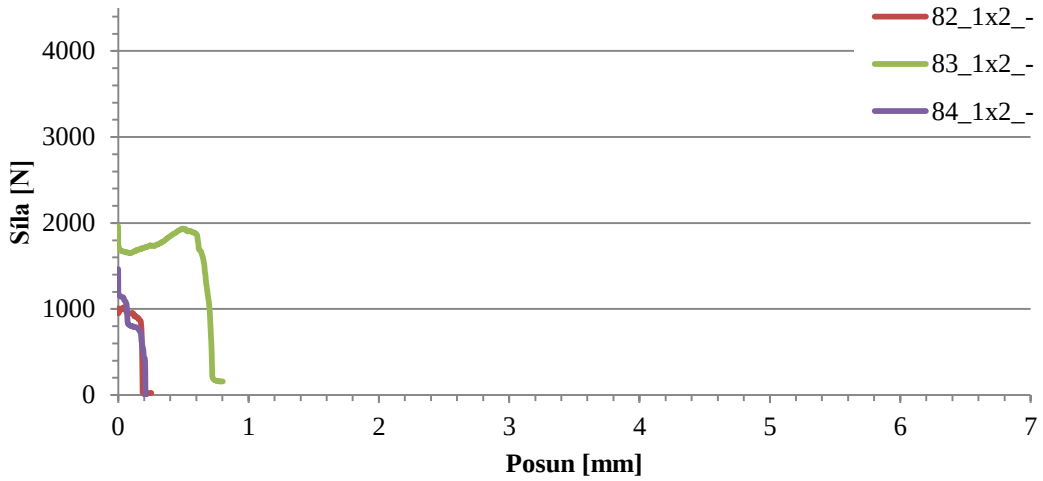
Příloha 14 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 100 mrazicích cyklů



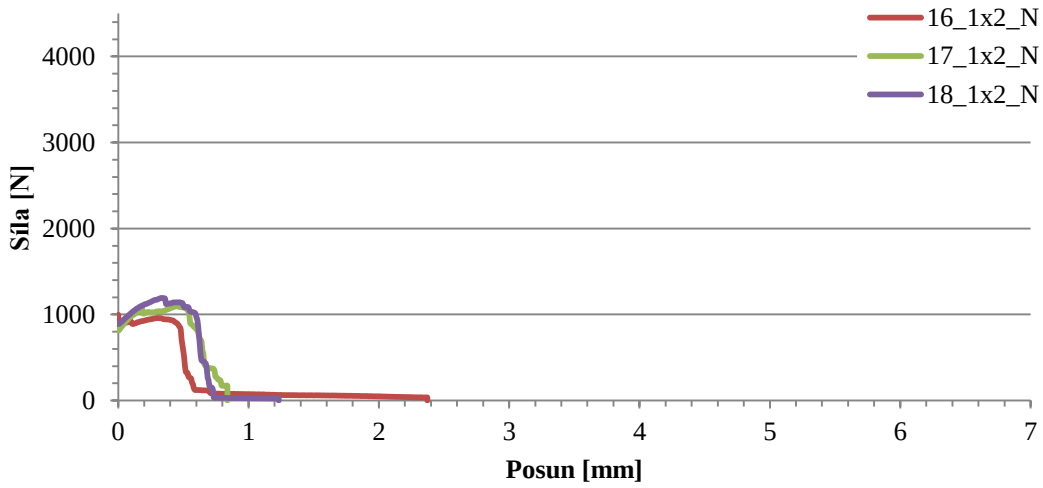
Příloha 15 - Vzorky s jednou vrstvou R 585 A101, 150 mrazicích cyklů



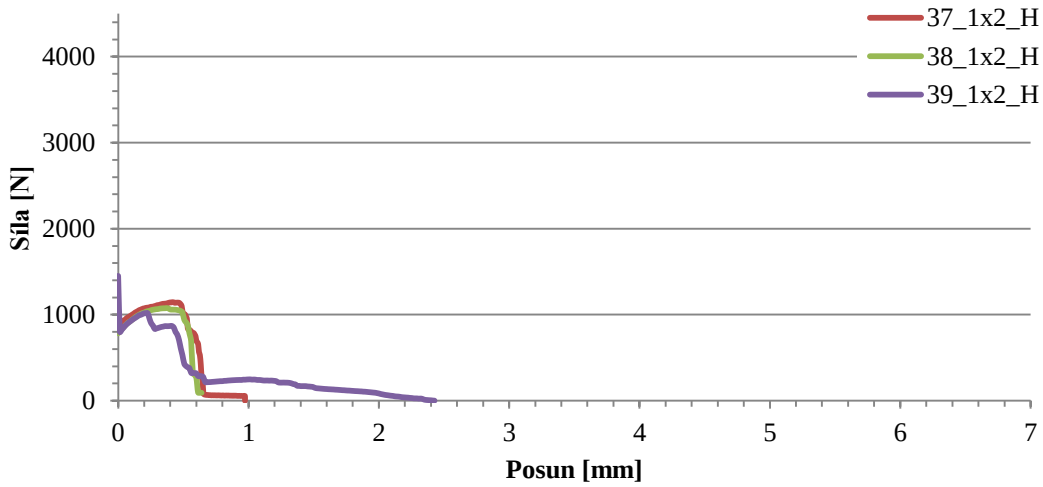
Příloha 16 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, referenční vzorky [41]



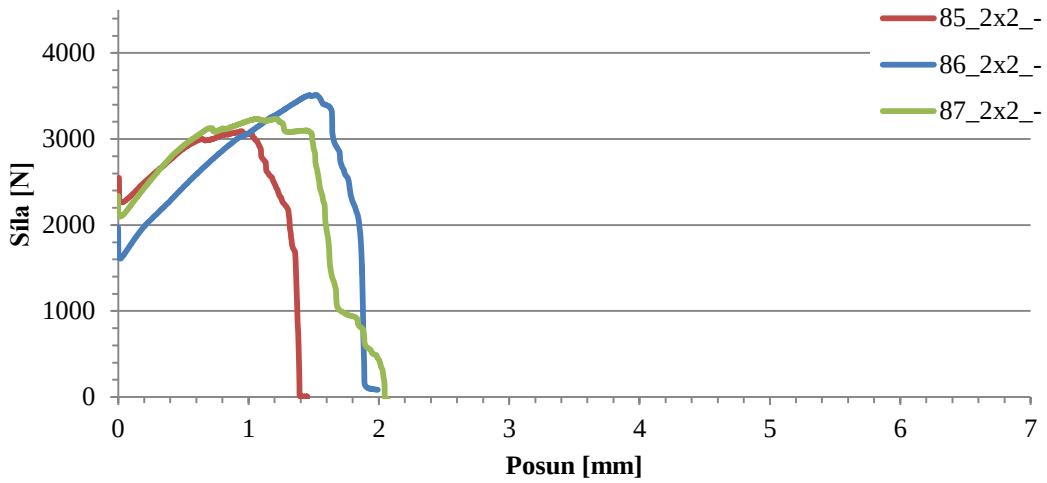
Příloha 17 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, 10 % roztok NaOH



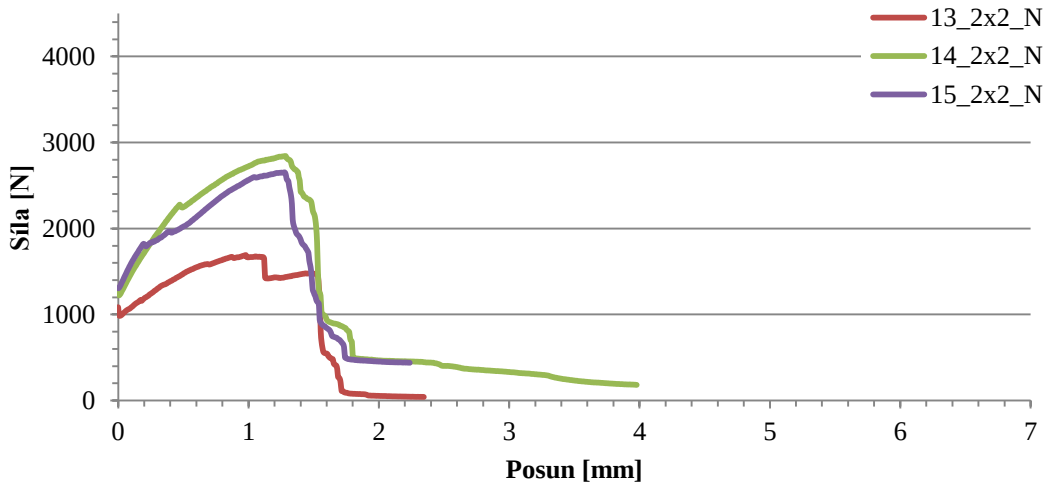
Příloha 18 - Vzorky se dvěma vrstvami R 131 A101, 10 % roztok H_2SO_4



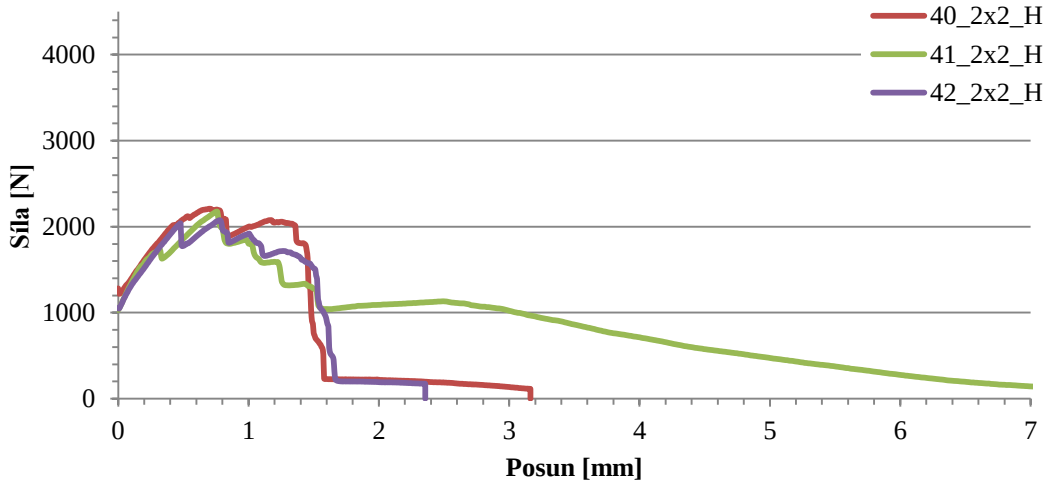
Příloha 19 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, referenční vzorky [41]



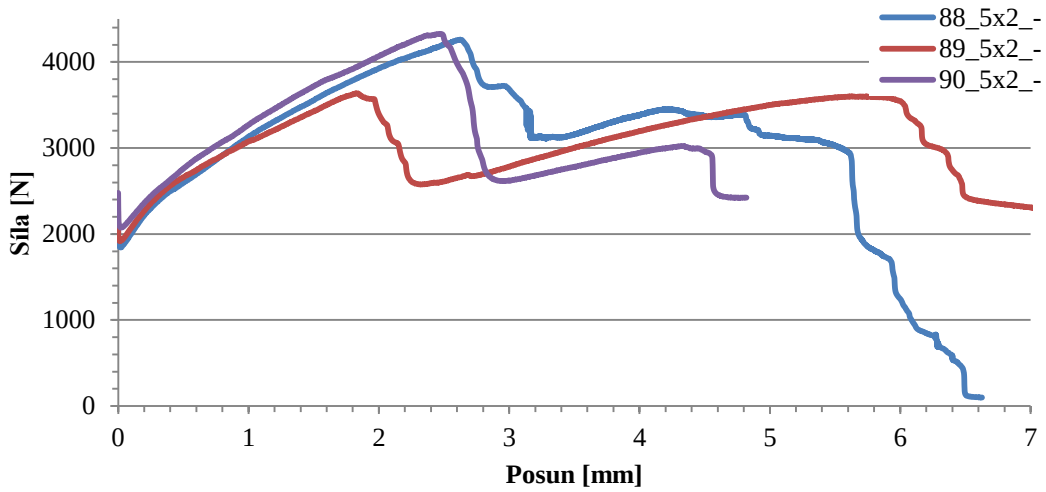
Příloha 20 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, 10 % roztok NaOH



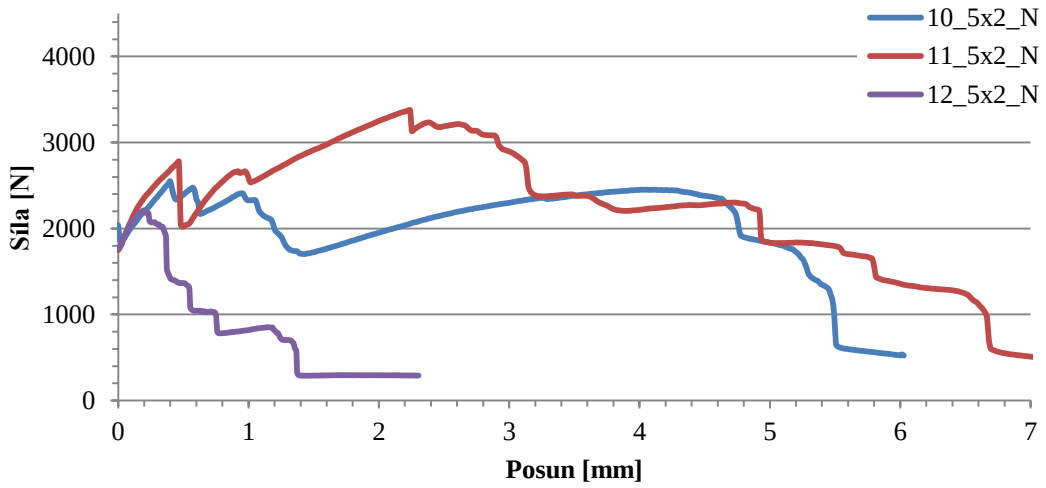
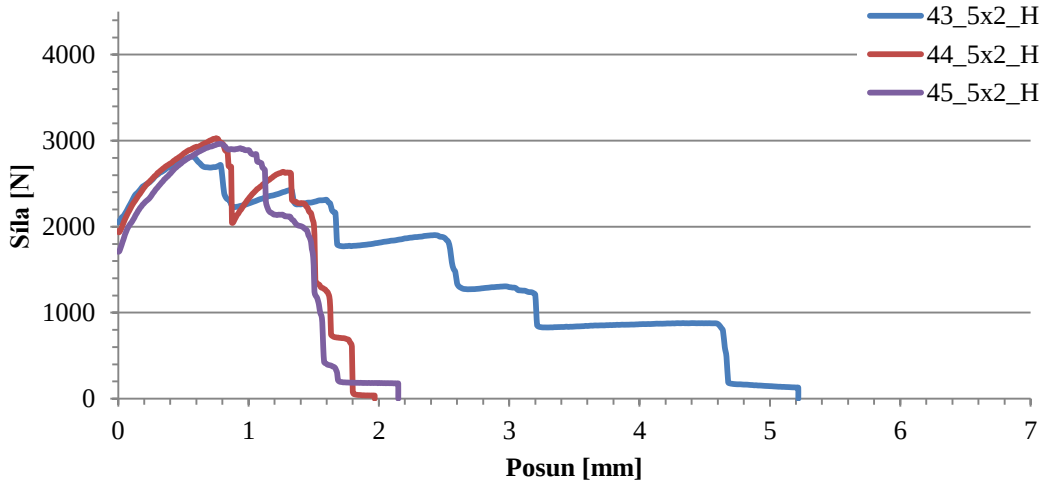
Příloha 21 - Vzorky se dvěma vrstvami R 275 A101, 10 % roztok H_2SO_4



Příloha 22 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, referenční vzorky [41]



Příloha 23 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, 10 % roztok NaOH



Příloha 24 - Vzorky se dvěma vrstvami R 585 A101, 10 % roztok H_2SO_4