



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ**
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM EFEKTU PŘÍDAVKU
CELULÓZOVÝCH VLÁKEN NA VYBRANÉ
VLASTNOSTI BETONU**

STUDY OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF THE CELLULOSE FIBERS
ON THE SELECTED PROPERTIES OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lukáš Blaha

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Blaha
Název	Studium efektu přidavku celulózových vláken na vybrané vlastnosti betonu
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Designing Concrete Structures for Fire Safety, ACI, SP-255

Bradáčová, I. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. ERA group, s.r.o. Brno 2007. ISBN 978-80-7366-090-1.

Hela R.: Technologie betonu I (BJ09). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST

Hela R.: Technologie betonu II (BJ15). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST

Bodnářová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Celulózová vlákna představují vedle již tradičně používaných vláken ocelových, polymerních a skleněných perspektivní skupinu vláken pro aplikace do cementových kompozitů.

V teoretické části diplomové sumarizujte informace o vlastnostech celulózových vláken a o možnostech jejich použití, zejména v cementových kompozitech. Definujte požadavky pro sledování odolnosti celulózových vláken vůči alkalickému prostředí. Vyhledejte informace o konkrétních aplikacích celulózových vláken do betonů.

V experimentální části diplomové práce proveďte experiment s cílem sledování odolnosti celulózových vláken vůči alkalickému prostředí. Připravte beton s přídavkem celulózových vláken. Sledujte vliv celulózových vláken na vlastnosti čerstvého betonu (zpracovatelnost, obsah vzduchu v čerstvém betonu) a na vlastnosti ztvrdlého betonu (pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu ohybem). Proveďte zatížení betonů s celulózovými vlákny na teplotu 600 °C a 800 °C a popište efekt přídavku celulózových vláken na vlastnosti betonů po působení těchto teplot. Zhodnoťte změny fyzikálních vlastností betonů a změny vzhledu betonů po teplotním zatížení. Dokumentujte přítomnost celulózových vláken v cementové matici pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu. Předpokládaný rozsah diplomové práce min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Lenka Bodnářová, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje chování betonů s celulózovými vlákny. V teoretické části jsou popsány základní informace o celulózových vláknech, způsobech jejich výroby, vlastnostech a možnostech použití v betonu. Na základě rešerší z odborné literatury je popsán vliv vysokých teplot na mechanické a fyzikální vlastnosti betonu s celulózovými vlákny a také porovnání s ostatními vlákny používanými do betonu. Dále jsou uvedeny informace o konkrétních celulózových vláknech a jejich použití. V experimentální části diplomové práce jsou navrženy receptury betonu s celulózovými vlákny CHRYSO a GREENCEL. Byl zkoumán vliv přídatku různých typů celulózových vláken na vlastnosti betonu v čerstvém a zatvrdlém stavu. Byl sledován vliv vysokých teplot 600 °C a 800 °C na pevnost betonu s celulózovými vlákny na objemovou hmotnost, deformace a vizuální změny. Dále byla sledována odolnost celulózových vláken sledováním vývoje pH prostředí (od pH 4 do pH 12) při dlouhodobém uložení různých typů celulózových vláken v těchto prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, celulózová vlákna, deformace, vysoká teplota, změna pH roztoků s celulózovými vlákny, změna fyzikálních a mechanických vlastností

ABSTRACT

This dissertation describes the behavior of cellulose fiber reinforced concrete. In the theoretical section one can find basic information on cellulose fiber and its methods of production and usage in concrete structures. One can find the information about the effect of high temperature on the mechanical and physical attributes of cellulose fiber reinforced concrete, and also a comparison with other fibers used in concrete based on the research done using scientific literature. Furthermore the details about particular cellulose fibers are provided. In the experimental section the formulas for CHRYSO and GREENCEL concrete are designed. The influence of the addition of various types of cellulose fibers into both liquid and solid states of concrete was researched. Tests were also done on the effect of high temperatures (600 °C and 800 °C) on the firmness and density of concrete, its deformations and visual changes. Furthermore, the resistance of cellulose fibers was monitored by monitoring the development of the pH environment (from pH 4 to pH 12) with long-term deposition of different types of cellulose fibers in these environments.

KEYWORDS

Concrete, cellulose fiber, deformations, high temperature, changing pH of solutions with cellulose fibers, change of physical and mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lukáš Blaha *Studium efektu přídavku celulóзовých vláken na vybrané vlastnosti betonu*.
Brno, 2018. 105 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 11. 1. 2018

Bc. Lukáš Blaha
autor práce

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval:

Vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za její ochotu, cenné rady a odbornou pomoc při vypracování mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, za podporu a lásku po celou dobu mého studia.

ÚVOD.....	11
TEORETICKÁ ČÁST	13
1 Základní informace o celulóзовých vláknech a celulóze	13
1.1 Celulóza	13
1.2 Hemicelulóza	14
1.3 Lignin.....	14
2 Výroba celulózy.....	16
2.1 Sulfátová výroba celulózy.....	16
2.2 Sulfitová výroba celulózy	17
2.3 Mechanická výroba celulózy	18
2.4 Emise a odpady	20
3 Efekt celulóзовých vláken v betonu při působení vysokých teplot	21
3.1 Odolnost betonu s přidavkem dutých celulóзовých vláken při působení vysokých teplot	21
3.1.1 Prováděné zkoušky	24
3.1.2 Vyhodnocení a diskuze	24
3.1.3 Vliv teploty na pórovitost betonu	35
3.1.4 Vliv celulóзовých vláken na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot	36
3.2 Účinek směsi vláken z různých materiálů na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot	36
3.2.1 Experiment.....	36
3.2.2 Probíhající měření.....	37
3.2.3 Beton s PP vlákny	39
3.2.4 Beton s celulóзовými vlákny.....	39
3.2.5 Beton s ocelovými vlákny.....	40
3.2.6 Měření na elektronovém mikroskopu	41
3.2.7 Namáhání různých typů vláken v ohybu za vysokých teplot	41

3.2.8	Odprýskávání povrchu betonu při různém typu vláken a různé teploty	44
3.2.9	Vliv směsi vláken na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot	45
3.3	Konkrétní použití celulózových vláken	45
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST		47
4	Vlastnosti vstupních surovin.....	47
4.1	Cement	47
4.2	Kamenivo	47
4.3	Přísky.....	49
4.4	Vlákná	49
4.4.1	Vlákná GREENCEL	50
4.4.2	Vlákná CHRYSO – Fiber UF - 500	50
5	Sledování pH celulózových vláken	52
5.1	Měření pH celulózových vláken	52
5.1.1	Postup.....	52
5.1.2	Výsledky zkoušek z měření pH celulózových vláken vystavených alkalickému a kyselému prostředí	53
5.2	Mikroskopie celulózových vláken	59
5.2.1	Snímky vláken z optického mikroskopu.....	59
6	Složení betonů	62
7	Provádění zkoušky	63
7.1	Zkoušky prováděné na čerstvém betonu	63
7.1.1	Zkouška konzistence metodou sednutí kužele	63
7.1.2	Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu	65
7.1.3	Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu.....	67
7.2	Zkoušky prováděné na zatvrdlém betonu	68
7.2.1	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	68
7.2.2	Pevnost v tlaku zkušebních těles.....	69

7.2.3	Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles – čtyřbodový ohyb.....	70
7.3	Zatížení referenčního betonu a betonu s celulóзовými vlákny při vysokých teplotách	73
8	Výsledky zkoušek	74
8.1	Výsledky zkoušek na čerstvém betonu	74
8.2	Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu	76
8.3	Výsledky zkoušek na betonech vystavených vysokým teplotám	81
8.3.1	Vyhodnocení maximálních deformací	87
8.3.2	Vyhodnocení fyzikálně mechanických vlastností.....	88
8.3.2.1	Vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost.....	88
8.3.2.2	Vliv vysokých teplot na pevnost v tlaku	89
8.3.3	Vizuální posouzení zkušebních těles	90
	Závěr	98
	Seznam obrázků	101
	Seznam tabulek	103
	Seznam grafů	104

ÚVOD

Použití celulóзовých vláken jako rozptýlené výztuže není v České republice dosud příliš běžné. V 90. letech 20. století byly experimentálně ověřovány některé typy celulóзовých vláken do betonu, ale jejich použití v praxi se běžně nerozšířilo, naopak v zahraničí se v praxi celulóзовá vlákna používají mnohem více. Například v Číně se využívaly betony modifikované celulóзовými vlákny (dále CRFC betony). Stavěly se z nich vysokorychlostní železnice, podzemní tunely nebo městské podzemní potrubí, kde byla využita vysoká trvanlivost a odolnost betonů s celulóзовými vlákny proti prasknutí. [8][9] CFRC betony mají uplatnění především v místech možného výskytu požáru. Zvyšující se teplota může způsobit nebezpečné explozivní odprýskávání povrchových vrstev betonu. Explozivní odprýskávání je způsobené vypařující se vodou uvnitř betonu. Zvyšující se tlak vypařující vody způsobuje odprýskávání povrchových vrstev betonu. Odprýskáváním může dojít k odhalení krycí vrstvy výztuže. Při působení vysoké teploty výztuž rychle ztrácí svoji únosnost a může dojít k rychlému zhroucení celé konstrukce. Odprýskávající vrstvy betonu jsou nebezpečné také při evakuaci osob a pro zasahující záchranné složky. Celulóзовá vlákna při působení vysoké teploty vyhořívají a vytvoří prázdné prostory pro pozvolnější odpařování vody.

V literatuře [8][9] jsou uváděny pozitivní vlastnosti betonu s celulóзовými vlákny. Zkušenosti na českém trhu nejsou dostačující, proto je třeba sledovat tento trend a doplnit znalosti o betonech s celulóзовými vlákny. Touto problematikou se zabývá moje diplomové práce.

CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části diplomové práce je sumarizace informací o vlastnostech celulóзовých vláken a o možnostech jejich použití včetně konkrétních aplikací.

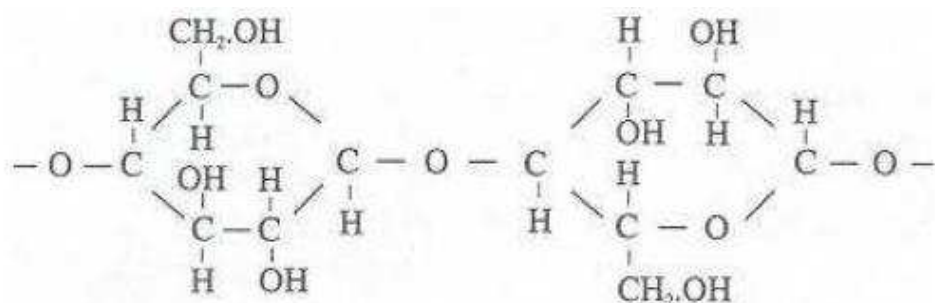
Cílem praktické části diplomové práce je experimentální sledování odolnosti celulóзовých vláken vůči alkalickému prostředí. Jsou uvedeny podmínky pro sledování odolnosti celulóзовých vláken vůči alkalickému prostředí. Dalším úkolem byla příprava betonu s přídavkem celulóзовých vláken a sledování vlivu těchto vláken na vlastnosti čerstvého betonu (zpracovatelnost, obsah vzduchu v čerstvém betonu) a na vlastnosti ztvrdlého betonu (pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu ohybem), včetně sledování chování betonů s celulóзовými vlákny pro zatížení při teplotách 600 °C a 800 °C, a zhodnocení vlastností betonů při působení těchto teplot. Práce zhodnocuje změny fyzikálních vlastností betonů a změny vzhledu betonů po teplotním zatížení.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Základní informace o celulózových vláknech a celulóze

1.1 Celulóza

Celulóza vzniká v přírodě polykondenzací beta-glukózy, která se tvoří při asimilačním procesu z oxidu uhličitého a vody. Jednotlivé glukózové jednotky jsou spojeny vazbou β 1,4 a tvoří dlouhé, nerozvětvené řetězce, které jsou zcela nerozpustné ve vodě. Celulóza je společně s ligninem, hemicelulózou a pektiny základem buněčné stěny rostlin a spolu s ligninem se podílí na stavbě sekundárních buněčných stěn. Celulóza je nejrozšířenějším biopolymerem na zemském povrchu, ročně jí vzniká až 10^{11} tun. Získává se z nich buď sulfitovým způsobem (reakcí s kyselým siřičitanem sodným), nebo sulfátovým způsobem (reakcí s roztokem hydroxidu nebo sirníku sodného). Celulóza se vyrábí ze dřeva po odstranění ostatních složek (lignin, hemicelulóza aj.) nebo se vyrábí z mladého smrkového dřeva, které obsahuje málo ligninu a jiných necelulózových látek, popřípadě se použije sláma, rákos apod. Celulóza je polysacharid sestávající z beta-glukózy, jehož vzorec lze schematicky znázornit takto: [1][3]

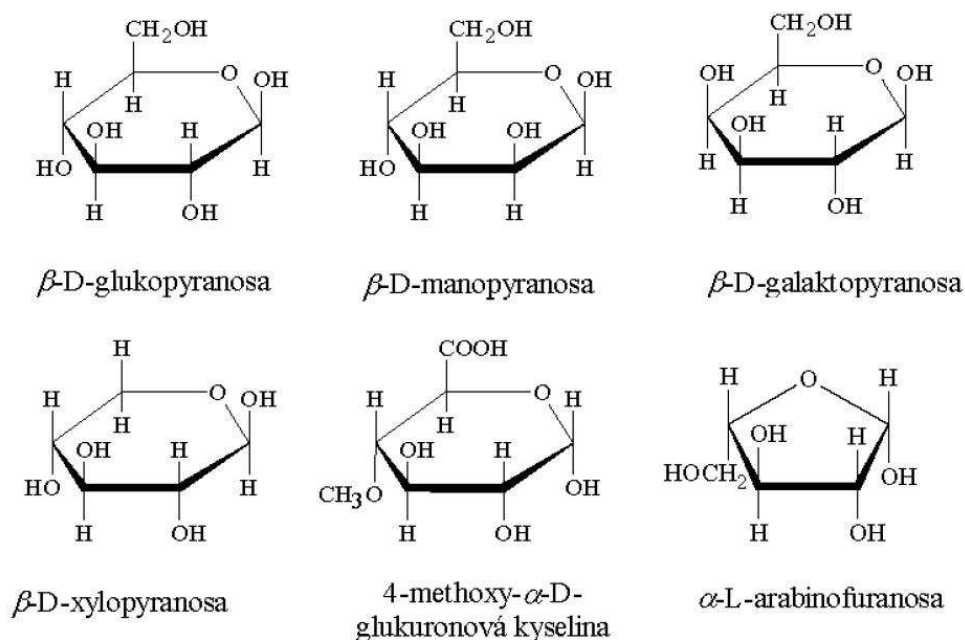


Obrázek 1 Schematický vzorec polysacharidu [3]

V buněčných stěnách rostlin jsou jednotlivá celulózová vlákna dále spojena vodíkovými můstky a zanořena do sacharidové matice. Tím získají buněčné stěny nutnou tuhost a pevnost. Polymer celulózy se nevětví ani nekroučí, ale zůstává ve formě dlouhých rovných řetězců. [1]

1.2 Hemicelulóza

Jedná se o lineární polysacharidy s kratšími řetězci než má celulóza (obvyklá hodnota je v rozmezí 150 až 250 jednotek monomerů). Hemicelulózy mají heterogenní stavbu, protože vykazují kratší i boční řetězce a obsahují molekuly různých monosacharidů oproti celulóze.



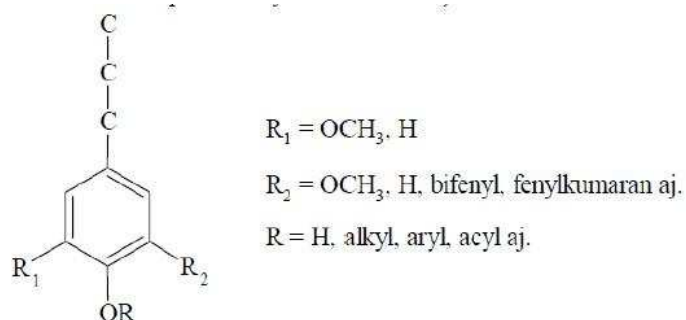
Obrázek 2 Základní stavební jednotky hemicelulóz [4]

První čtyři monosacharidy tvoří převážně kostru hemicelulóz, naproti tomu kyselina 4-methoxy- α -D-glukuronová, resp. α -D-glukuronová, a α -L-arbinosa se vyskytují jen v bočních řetězcích. Struktura hemicelulóz je převážně lineární nebo s krátkými bočními řetězci. Napojení bočních řetězců přitom probíhá zejména přes $1 > 2$ a $1 > 6$ glykosidickou vazbu, která vzniká reakcí poloacetalového polysacharidu. Jen některé druhy (např. arabinogalaktany) jsou více rozvětvené a vytvářejí trojrozměrnou strukturu, ve které není možné určit hlavní řetězec. [4]

1.3 Lignin

Lignin je jednou ze složek dřeva, která má aromatický charakter molekul oproti celulóze a hemicelulóze. V závislosti na druhu dřeva se jeho obsah pohybuje v rozmezí od 15-35 % (u jehličnanů je vyšší obsah jak u listnatých dřevin) a je druhým nejvíce zastoupeným polymerem v buněčné stěně. Lignin je polymer sestávající se z jednotek

zahrnující benzenové jádro s propanovým bočním řetězcem, fenolické a methoxylové skupiny. Druh a množství funkčních skupin vázaných na základní jednotku charakterizují jednotlivé druhy ligninu. Prostor je vyplňovaný ligninem mezi jednotlivými fibrilami celulózy v buněčné stěně. Lignin je majoritním odpadním produktem při zpracování dřeva na celulózu, papír a v neposlední řadě na celulózová vlákna. Z dřeva se vylučuje ve formě ligninsulfonanu sodného, který je rozpustný ve vodě. Celulózová vlákna se používají jako plastifikační přísada do betonu. [4]



Obrázek 3 Strukturní vzorec ligninu [4]

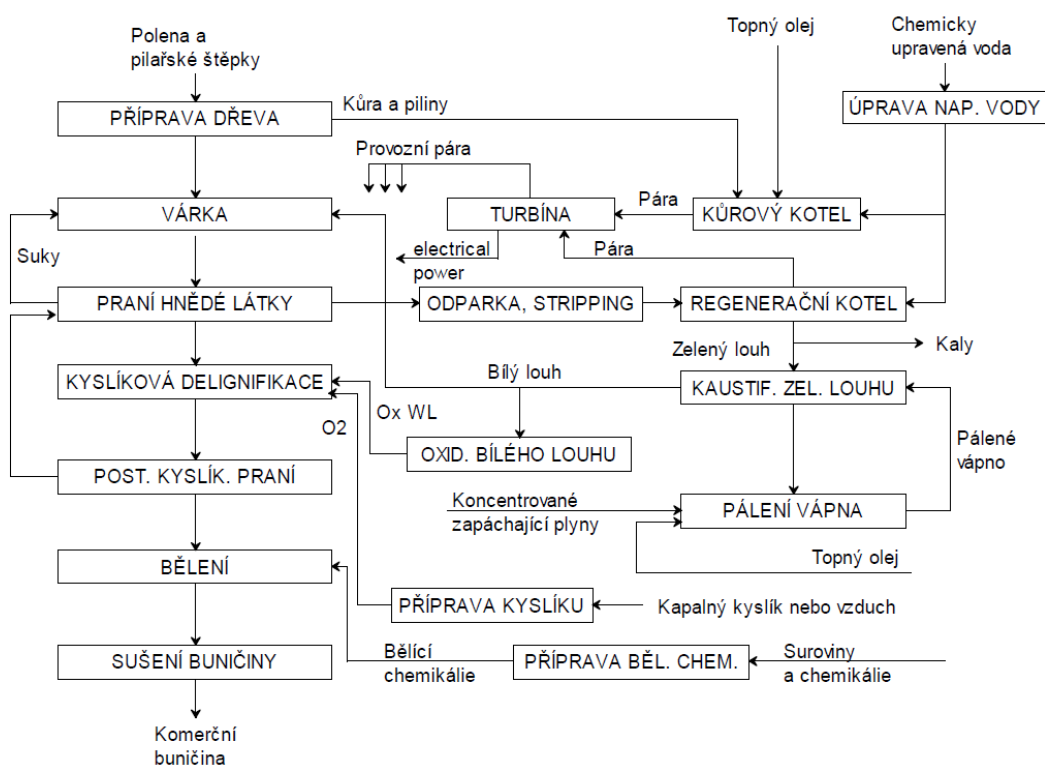
2 Výroba celulózy

2.1 Sulfátová výroba celulózy

Mezi základní kroky sulfátové výroby celulózy patří:

- chemická defibrace (delignifikace) - je navrhována s téměř uzavřeným energetickým a chemickým systémem,
- bělírna (otevřený vodní systém) a regenerační systém,
- koncová čistírna odpadních vod,

Proces výroby je znázorněný na obrázku č. 4. [5]



Obrázek 4 Proces sulfátové výroby celulózy [5]

Dřevo potřebné na výrobu celulózy může být buď ve formě štěpek, nebo ve formě polen. Štěpky jsou většinou bez kůry, u kterých postačí třídění a praní. Polena musí projít procesem odkornění a nasekání na přibližně stejně velké štěpky. Kůra se podrtí a díky svému dobrému výhřevu se použije jako palivo v kúrovém kotli. Odkorněná polena jsou naštipaná a roztříděná. Přibližná velikost štěpků zajistí vyšší kvalitu buničiny a sníží spotřebu surovin. Štěpky nevyhovující svojí velikostí se vrací zpět do sekačky, popřípadě do drtiče.

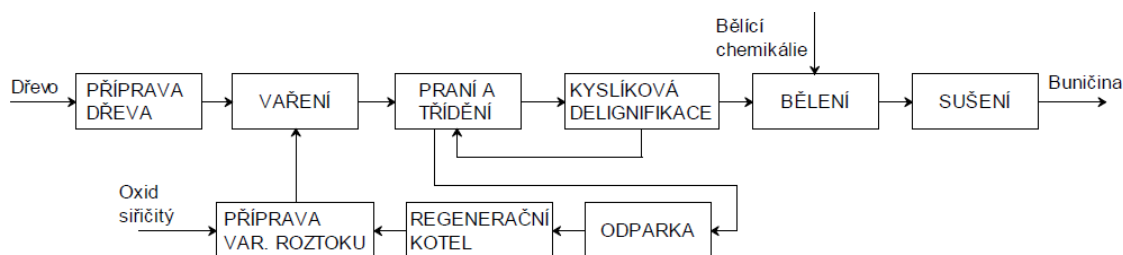
Působením chemického roztoku jsou štěpky rozvlákněny ve vařáku – bílý louh, který obsahuje hydroxid sodný (NaOH) a sulfid sodný (Na_2S). Při vaření vzniká buničina hnědé barvy, která se postupně mění v rozpuštěné organické látky a použité varné chemikálie. Várka může probíhat v kontinuálních hořácích a rozpustí se přibližně polovina dřeva. Z vařáků se získá buničina obsahující vlákno a sulfátový výluh, neboli černý louh obsahující anorganické chemikálie a velké množství organických látek. Louh je od vláken oddělený a odváděný do regeneračního systému – přidružený cyklus, kde se regenerují organické látky a použité varné chemikálie z kterých se získává energie. Následují vibrace, filtrace v tlakových třídících apod. pro odstranění nepříznivých svazků vláken, suků a příměsí v buničině. Výpliv z třídění představuje další odpad, se kterým je potřeba počítat. Ve střední fázi praní celulózy je kyslíková delignifikace, probíhající v alkalickém prostředí, kde se používá bílý oxidovaný louh. Následuje bělení, které odstraní z buničiny zbylý lignin a nečistoty a docílí se vyšší kvality, pevnosti, bělosti, čistoty apod. Bělení probíhá ve čtyřech až pěti krocích a používají se následující chemikálie: ozón, kyslík, peroxid vodíku a oxid chloričitý (ClO_2). Oxid chloričitý je nestabilní chemikálie, a proto musí být vyráběn spolu s ozónem v celulóze. Nabělená buničina následuje do sušicího stroje, kde je odvodněna, vysušena, rozřezána a balena k exportu. [5]

2.2 Sulfitová výroba celulózy

V posledních letech význam sulfitové výroby stále klesá (pouze 10 % ze světové produkce). Klasický proces výroby sulfitové buničiny je kyselý díky siřičitanu hořečnatému ve varném roztoku pobíhající při pH 1 – 2. Při procesu výroby je varný proces založen na hořčíkové bázi a je používán vyšší rozptyl pH (pH 3 - 5). Výsledná buničina dosahuje lepších mechanických vlastností. Mezi vstupní suroviny patří dřevo, voda a chemikálie pro vlastní várku a bělení. Základními výrobními kroky jsou:

- linka vláken
- regenerace chemikálií
- externí koncová čistírna odpadních vod

Dělení výrobního procesu je znázorněno na následujícím obrázku č. 5 [5]



Obrázek 5 Proces sulfitové výroby celulózy [5]

Příprava dřeva je totožná se sulfátovým procesem výroby. Vaření štěpků probíhá za zvýšené teploty a tlaku v diskontinuálním vařáku. Při výrobě se používá siřičitan hořečnatý a kyselý siřičitan hořečnatý pro odstranění zbytkového ligninu. Z vařáků se buničina zpracovává v expanzní nádrži, odkud pokračuje do bubnových praček nebo do šnekových lisů. Dále se tlakově třídí nebo čistí ve vířivých hydrocyklónech, protože buničina obsahuje nežádoucí svazky vláken, příměsí, suku apod. Varný roztok obsahuje rozpuštěné dřevité látky. Po vytrídění je roztok oddělený od buničiny a stává se z něj výluh, který je odváděný do regeneračního systému. Následují kyslíková delignifikace a bělení probíhající v jednom nebo ve dvou stupních. Principem bělení je použití chemikálií: kyslík, peroxid vodíku a oxid siřičitý. Po druhém stupni bělení se buničina rozředí vodou a provede se další praní. Po bělení následuje konečné třídění, sušení, rozřezání a balení a exportování. [5]

2.3 Mechanická výroba celulózy

Dřevina obsahuje vyšší jemný podíl a poškozená vlákna dávají vláknině jak dobré optické vlastnosti, tak i dobré povrchové vlastnosti. Při postupnému přerušování vazeb se oddělují jednotlivé svazky a úlomky vláken. Principem mechanického rozvláknování je zachování vysoké výtěžnosti vláken a požadované pevnosti a bělosti vláken. Nevýhoda mechanické výroby je nízká odolnost proti stárnutí, proto se nezachová bělost celulózy.

Mechanická výroba se dělí na dva hlavní procesy:

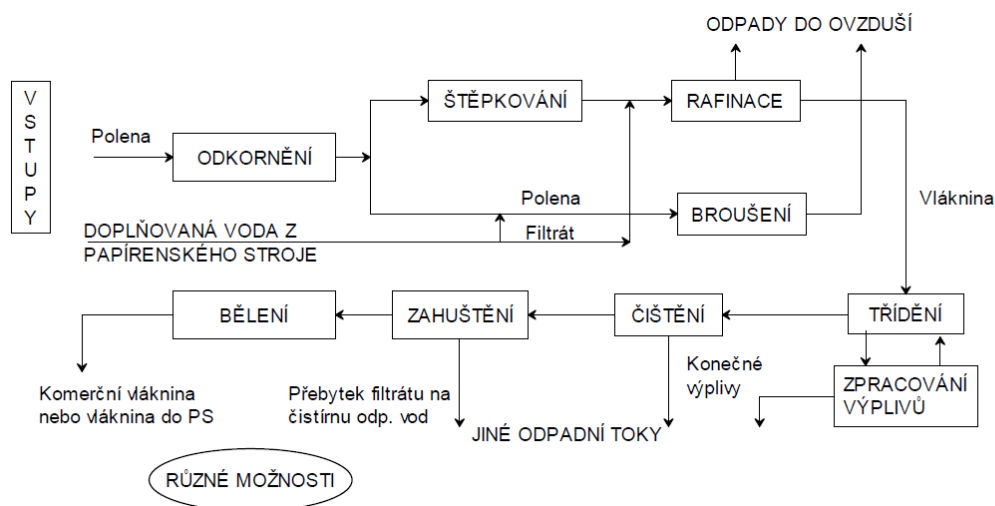
- Broušení,
- rafinace.

Broušení

Příprava dřeva před broušením je důležitá. Dřevo musí být skladované při požadované vlhkosti, která se docílí pravidelným zkrápěním nebo uložením dřeva ve vodě. Dále musí dojít k odkornění v rotačních bubnech včetně propírání dřeva. Samotná výroba spočívá v odvláknování. Prvně jsou polena přitlačena na rotující brusný kámen, který se posouvá souběžně s osou vlákna dřeva. Energie potřebná při broušení se z většiny promění na teplo, proto musí být brusné kameny ochlazované vodou, která se později použije na rozmělnění vláken. Mechanická vláknina se dále třídí a zbavuje se hrubých a nedostatečně rozmělněných uzlíků a úlomků vytvořených z několika svazků vláken. Výstupem je vytríděná a vyčištěná mechanická vláknina, která se zahušťuje a skladuje.

Rafinace – termomechanický způsob výroby vlákniny

Principem rafinace je drcení štěpků mezi žebrovanými ocelovými disky za zvýšené teploty a tlaku. Štěpky se rozpadají na jednotlivá vlákna, svazky a úlomky vláken. Teplo uvolněné třením odvádí ze štěpků vlhkost. Výsledkem je rafinovaná vláknina s vyšší pevností a s nižším obsahem uzlíků. [5]



Obrázek 6 Proces mechanické výroby celulózy [5]

Bělení mechanických vláknin

Podstatou bělení mechanické vlákniny je šetření ligninu. Bělení se dělí:

- U redukčního bělení se používá jako bělicí činidlo dithioničitan sodný ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$).
- U oxidačního bělení se používá jako bělicí činidlo peroxid vodíků (H_2O_2). [5]

2.4 Emise a odpady

Největším problémem při výrobě celulózy je znečištění odpadních vod ovlivňující vodní organismy, spotřeba energie a emise plynů do ovzduší, včetně zapáchajících látek. Při výrobě mohou také vznikat i pevné odpady. Při bělení se používá chlór, konkrétně to jsou organické chlórované sloučeniny, měřené jako halogenované organické sloučeniny. Důležité je snížit obsah chlórovaných i nechlórovaných organických látek v odpadních vodách. Nejlepší dostupné možnosti je použití techniky aplikující se přímo při výrobě celulózy jako je čištění odpadních vod papírny, či skupiny papíren a příslušné obce. [5]

3 Efekt celulózových vláken v betonu při působení vysokých teplot

Proces rozkladu celulózových vláken při působení teploty se označuje jako karbonizace. Dle výzkumu lze proces karbonizace celulózy klasifikovat do čtyř hlavních etap. [6][7]

Tabulka 1 *Karbonizace celulózy klasifikovaná ve čtyřech stádiích* [6][7]

Fáze	Proces
I.	Fyzikální desorpce vody (25 °C – 150 °C)
II.	Dehydratace celulózových jednotek (150 °C – 240 °C)
III.	Tepelné štěpení glykozidové vazby C-O a C-C pomocí reakcí volných radikálů (240 °C – 400 °C)
IV.	Aromatizace (nad 400 °C)

3.1 Odolnost betonu s přidavkem dutých celulózových vláken při působení vysokých teplot

Liping Guo, a kolektiv navrhli CFRC (beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny) vysokohodnotný beton třídy C30 zaměřený převážně na nepropustnost, odolnosti proti prasknutí a vyšší odolnosti v ohybu.

Byl proveden experiment chování CFRC betonů během vysokých teplot (300, 600, 800 1050 °C) na izotermické výdrži – 2,5, 4 a 5,5 hodiny. Sledovalo se odprýskávání povrchu betonu, ztráta stability, relativní dynamický elastický modul a pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Poškození betonu bylo zkoumáno pomocí mikroanalytické metody, diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), rtuťové analytické porozimetrie (MIP) a rentgenového mikroskopu (XRD). Dále jsou v článku znázorněny vlastností vytvrzování a bod tání jednotlivých celulózových vláken. [9]

Materiály a vstupní suroviny:

- PC 42,5, Portlandský cement (PC), měrný povrch je $370 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$
- Popílek, hustota $3,1 \text{ g. cm}^{-3}$, měrný povrch je $455 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$, ztráta žíhání je 2,5 %, hustota je $2,35 \text{ g.cm}^{-3}$.

Jako frakce 0 - 4 byl použit říční písek s velikostí zrn 0,15 – 2,36 mm, zdánlivá objemová hustota byla 2650 kg/m^3 . Dále byl použit drcený vápenec jako hrubá frakce s velikostí zrn 5 - 20 mm a zdánlivá objemová hustota byla 2720 kg/m^3 .

Navrhnutá receptura CFRC betonu je představena v tabulce č. 2.

Tabulka 2 Receptura PC a CFRC [9]

	Cement [kg/m ³]	Popílek [kg/m ³]	Jemná frakce [kg/m ³]	Hrubá frakce [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Plastifikátor [kg/m ³]	Vlákna [kg/m ³]
PC	266	114	760	1050	155	3,04	0
CFRC	266	114	760	1050	155	3,04	0,9

PC – beton s portlandským cementem, referenční, bez vláken

CFRC – beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny.

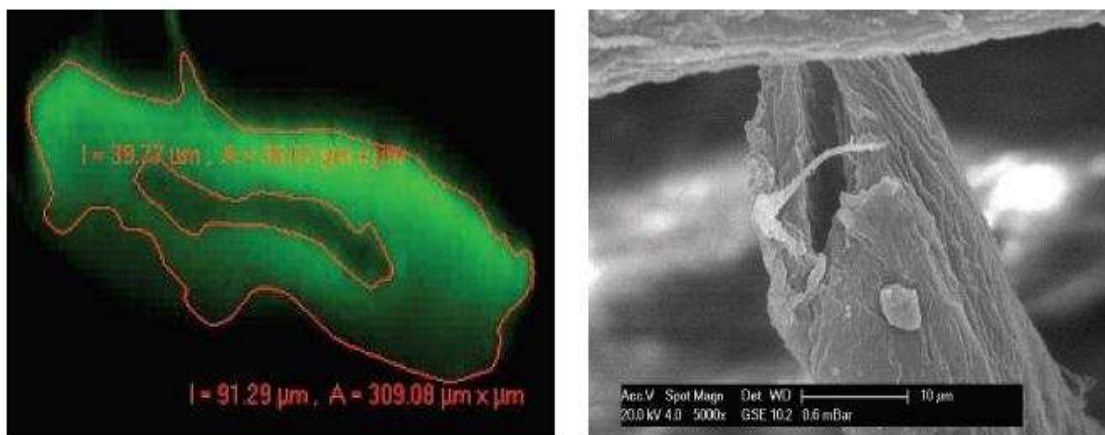
Byly použity superplastifikátory – polykarboxyláty (PS). Použitím PS se ušetřilo přibližně 25 % vody. Ztráta konzistence byla méně než 80 mm po jedné hodině.

Fyzikální a mechanické vlastnosti modifikovaných celulóзовých vláken (CF) jsou znázorněny v tabulce č. 3.

Tabulka 3 Fyzikální a mechanické vlastnosti celulóзовých vláken [9]

Maximální pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Maximální prodloužení [%]	Ekvivalentní průměr[μm]	Střední délka [mm]	Hustota [g/cm ³]
600 – 900	9,0 – 10,0	3,5	15 – 20	2,1 – 5,3	1,1

Použité CF ve studii mají velmi speciální mikrostrukturu a dutý průřez. Výhoda dutých vláken spočívá v zadržování vody ve prospěch hydratace cementu a dále pro lepší homogenizaci, hustší mikrostrukturu a pro dokonalejší vytvrzování CFRC betonů. Na obrázku č. 7 je znázorněná mikrostruktura pomocí konfokálního (LSCM) a autoemisního rastrovacího (FESEM) mikroskopu. Obrázek vlevo znázorňuje průřez CF vlákno napuštěné fluorescenčním činidlem a vpravo je totožné vlákno bez fluorescenčního činidla. Vnější rozměry zkoušených CF vláken jsou $309 \mu\text{m}^2$ a vnitřní rozměry jsou $37 \mu\text{m}^2$, respektive tloušťka stěny je 3 až 5 μm . Podle předchozích studií bylo zjištěno, že optimální dávkování vláken z hlediska ekonomiky a vysoké trvanlivosti do CFRC betonů je $0,9 \text{ kg/m}^3$. [9]



Obrázek 7 Průřez celulózovým vláknem. Vlevo – snímek z mikroskopu LSCM, vpravo - FESEM [9]

Je pozoruhodné sledovat míchání betonu s CF vlákny, protože se musí aktivovat jejich vlastnosti a proto je míchání náročnější než u solidnějších vláken – polyvinylalkoholové nebo polypropylenové. (nenasákavá vlákna, vlákna plného průřezu, nikoli vlákna dutého průřezu)

Vzhledem ke struktuře celulózového vlákna (dutý profil vlákna) a nasákavosti mají vlákna výrazný efekt na zpracovatelnost betonu (větší adsorpce vody než u vláken nenasákavých polypropylenových a polyvinylalkoholových). Zajímavostí je, že dle provedených studií absorpce vody celulózovými vlákny může dosahovat až 239 % (viz. Tabulka č. 4).

Tabulka 4 Poměr absorpce vody u celulózových vláken [9]

Označení vzorku	Hmotnost v suchém stavu [g]	Nasyčená hmotnost [g]	Rozdíl hmotností [g]	Absorpce vody [%]
CF - 1	1,01	3,44	2,42	240
CF – 2	0,98	3,31	2,33	238
CF – 3	1,00	3,40	2,40	240
CF – 4	1,02	3,45	2,43	238
CF – 5	1,01	3,43	2,43	241
Střední hodnota	1,00	3,41	2,40	239

Absorpce vody byla provedena dle japonské normy (Test Method for water Absorption of Textils). Vodní nasákavost se určuje pomocí sáčku z netkané textilie. Na zkoušku je potřeba 1 gram celulózových vláken uložených do sáčku, který se ponoří do destilované vody na 30 minut. Po uplynutí času se vzorek vytáhne z vody a provede se

filtrování přes filtrační papírek a sleduje se okamžik, až filtrační papírek nepropustí žádnou kapku vody. [9]

Studie znázorňuje schopnost vláken vázat na sebe vodu a zadržovat vodu a z toho vyplývající výhody zajišťující tekutost čerstvé směsi CFRC. Hydratace cementu a nárůst pevnosti CFRC betonu trvá déle jak 28 dní (vyšší obsah vody v celulóзовých vláknech), ale při déle trvající a postupnější hydrataci dojde k vytvoření rovnoměrnější struktury v CFRC betonu. Při hydratování zbylých dutých prostorů dochází u vláken ke zdrsňování vzájemného rozhraní mezi celulóзовými vlákny a zrny slínkových minerálů cementu. Tato skutečnost je způsobena postupným vypařováním vody u hydratovaného cementu umožňující vyšší odolnost CFRC betonu vůči vyšším teplotám. [9]

3.1.1 Prováděné zkoušky

Beton byl zkoušený za vysokých teplot s dosaženou maximální teplotou 1200 °C v odporové peci (SXO-5-12A, Nanjing, China). Maximální teploty dosáhl průměrným nárůstem teploty 15 °C/ min při počáteční teplotě zkušební tělesa 20 °C. Zkušební tělesa byly ohřívány na teploty 300, 600, 800 nebo 1050 °C při udržení konstantní teploty v peci po dobu 2,5; 4 nebo 5,5 hodiny. Následně byla zkušební tělesa postupně ochlazována na laboratorní teplotu. [9]

3.1.2 Vyhodnocení a diskuze

Dle zkoušek na čerstvém betonu byly zjištěny hodnoty sednutí 180 ± 20 mm a obsah vzduchu v rozmezí 2 až 3 %. Rozměry zkušebních těles byly krychle o délce hrany 100 mm. Zkušební tělesa byla vyrobena v ocelových formách a po 24 hodinách odformována a uložena v laboratorním prostředí. [9]

Vliv zvyšující se teploty na fyzikálně – chemické vlastnosti betonu

K největším výše zmíněným změnám docházelo v rozmezí 300 – 600 °C nezávisle na době působení teploty. Fyzikálně chemické vlastnosti betonu postupně degradovaly se zvyšující se teplotou. Ohřátí na teplotu 600 °C dochází k rozkladu hydroxidu vápenatého, bílá pára zmizí a beton je téměř dehydratovaný. Vypařování vody a dehydratace má za následek postupné ztráty hmotnosti betonu. [9]

Dále vypařování vody způsobí při vysokých teplotách expanzi uvnitř materiálu a může poškodit mikrostrukturu betonu a popřípadě způsobit odprýskávání povrchu

betonu. Stupeň degradace betonu vystavený různým teplotám lze zjistit pomocí dynamického ultrazvukového indikátoru. Zkušební tělesa vystavené rozdílným teplotám v různých časových dobách jsou představeny na obrázku č. 8. [9]



Obrázek 8 Porovnání referenčního betonu bez vláken PC (nalevo) a betonu s celulózovými vlákny CFRC (napravo) po ohřátí na různé teploty a různé doby ohřevu [9]

Na obrázku č. 8 lze pozorovat zkušební tělesa PC při teplotě 600 °C, která náhle explodovala a rozpadla se na menší úlomky, ale zkušební tělesa CFRC se nerozpadla ani při dosažení teploty 1050 °C. Vzhled těles se postupně měnil se vzrůstající se teplotou. PC tělesa se měnila z tmavě šedé do cihlově červené, zatímco CFRC tělesa se měnila z tmavě šedé do mléčné barvy. [9]

Při konstantním ohřívání na teplotu 300 °C při různé době ohřevu byly pozorovány změny barvy jak u PC tak u CFRC bez vzniku trhlinek. Při ohřevu na 600 °C bylo pozorováno u těles PC po dobu 2,5 a 4 hodin větší množství trhlinek a pórů, avšak po ohřevu na 5,5 hodiny se začala zkušební tělesa rozpadat. V porovnání s CFRC tělesy při 600 °C nedošlo k porušení, protože CF obsahovaly duté průřezy po vyhoření.

Dosažením teploty 800 °C v různých časových úsecích zahřívání došlo u PC těles k vnitřnímu pnutí a tím pádem k nenávratnému poškození. Při stejných podmínkách u CFRC těles došlo pouze k síti trhlinek na povrchu a vytvoření volných prostorů na povrchu, ale nedošlo k narušení soudržnosti zkušebních těles. Dosažením teploty 1050 °C se CFRC tělesa změnila na mléčnou barvu, síť trhlinek se zvětšila, také byly porušeny rohy těles, ale nedošlo k jejich rozpadu. [9]

Ztráta mechanických vlastností a úbytek hmotnosti jsou znázorněny v tabulce č. 5.

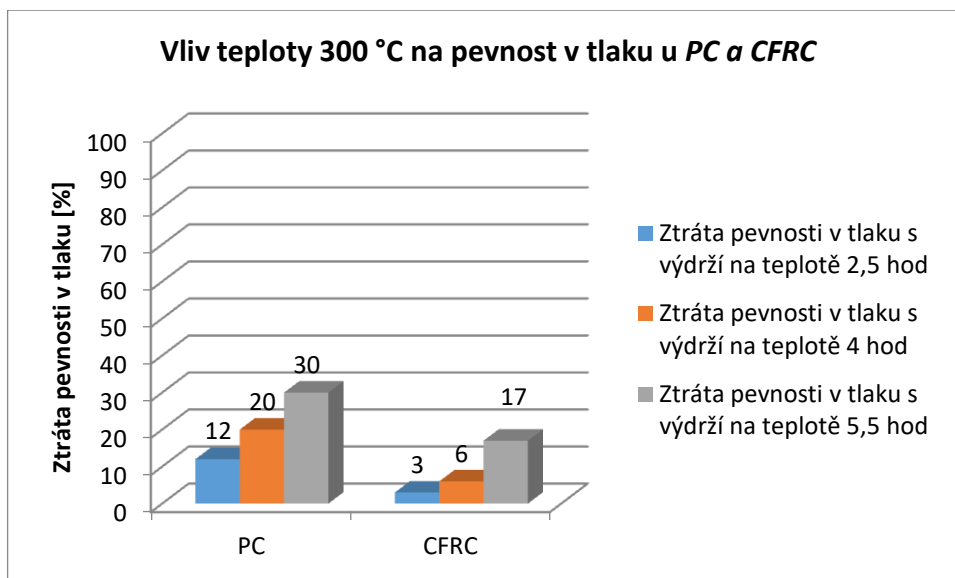
Tabulka 5 *Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu* [9]

Typ betonu	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [hod]	Ztráta pevnosti v tlaku [%]	Úbytek hmotnosti [%]	Ztráta pevnosti v tahu [%]
PC	20	-	-	-	-
	300	2,5	12	3,6	2
		4	20	6,2	20
		5,5	30	7,6	34
	600	2,5	65	8,5	48
		4	68	11,7	67
		5,5	70	12,7	83
CFRC	20	-	-	-	-
	300	2,5	3	3,4	2
		4	6	4,8	3
		5,5	17	5,6	29
	600	2,5	47	6,2	52
		4	54	6,5	65
		5,5	60	7,5	72
	800	2,5	78	10,5	77
		4	82	12,3	81
		5,5	80	14,3	80
	1050	2,5	87	20,5	91
		4	90	22,1	93
		5,5	92	28,4	95

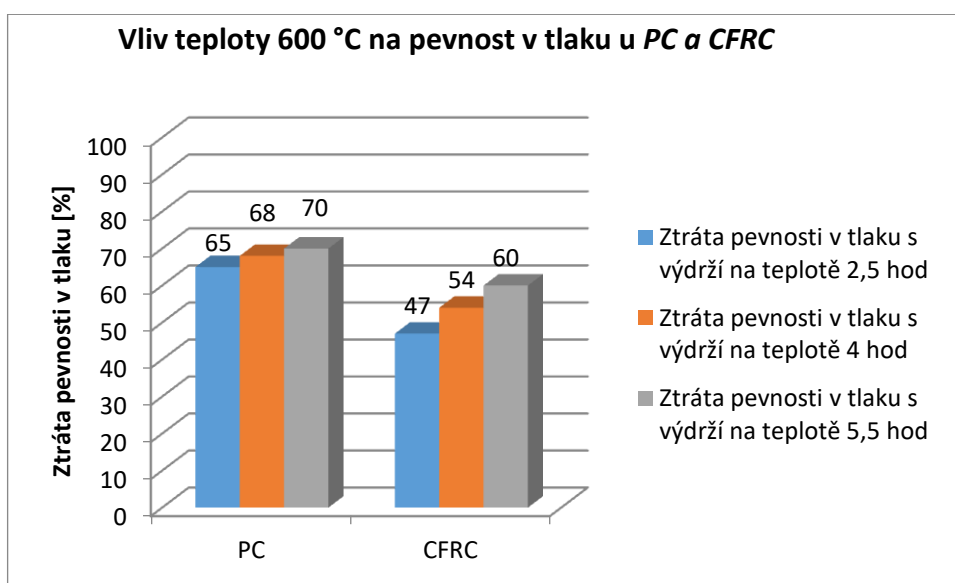
PC – beton s portlandským cementem, referenční, bez vláken

CFRC – beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny

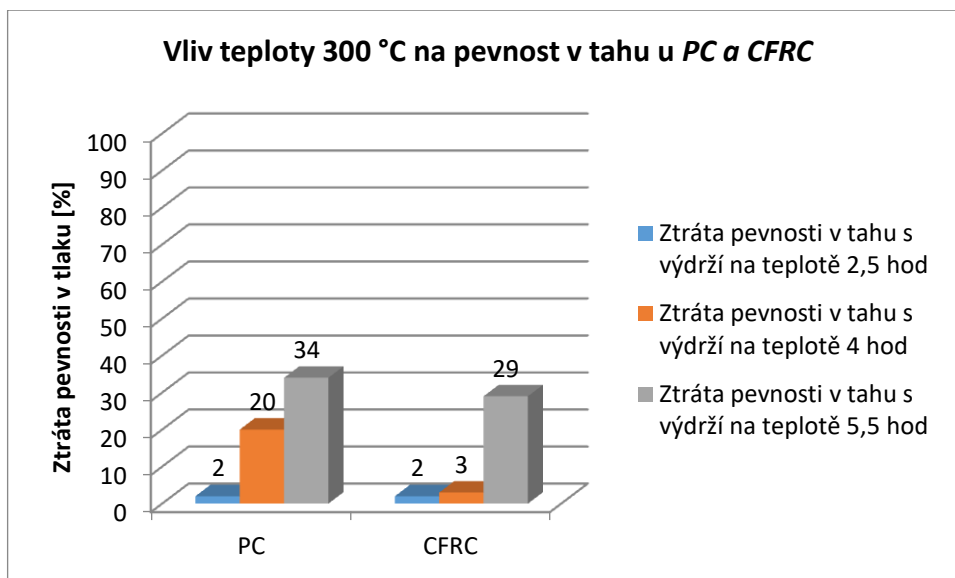
Na následcích grafech 1 - 6 jsou znázorněny hodnoty vlivu zvyšující se teploty na referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC) a na beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC).



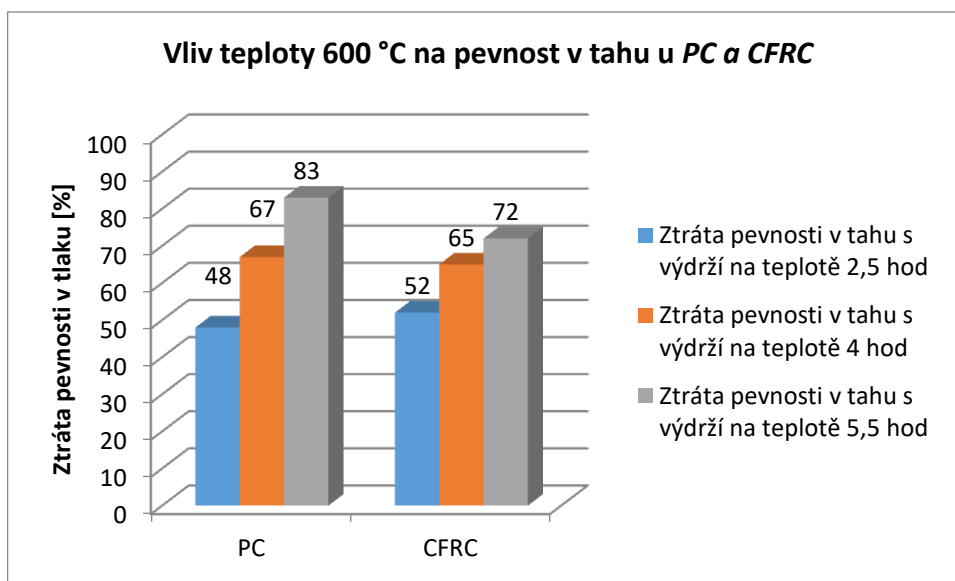
Graf 1 *Vliv teploty 300 °C na pevnost v tlaku – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC)[9]*



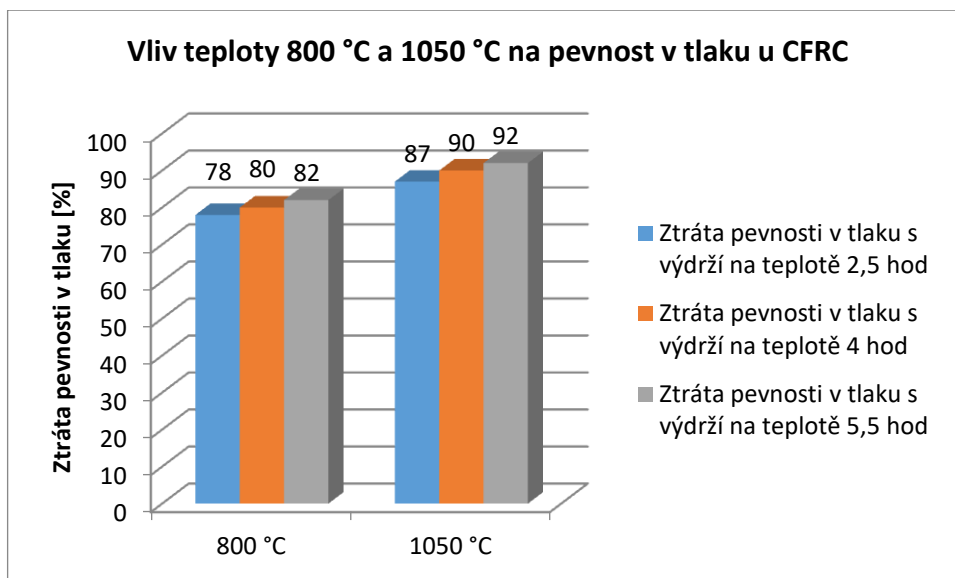
Graf 2 *Vliv teploty 600 °C na pevnost v tlaku – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC) [9]*



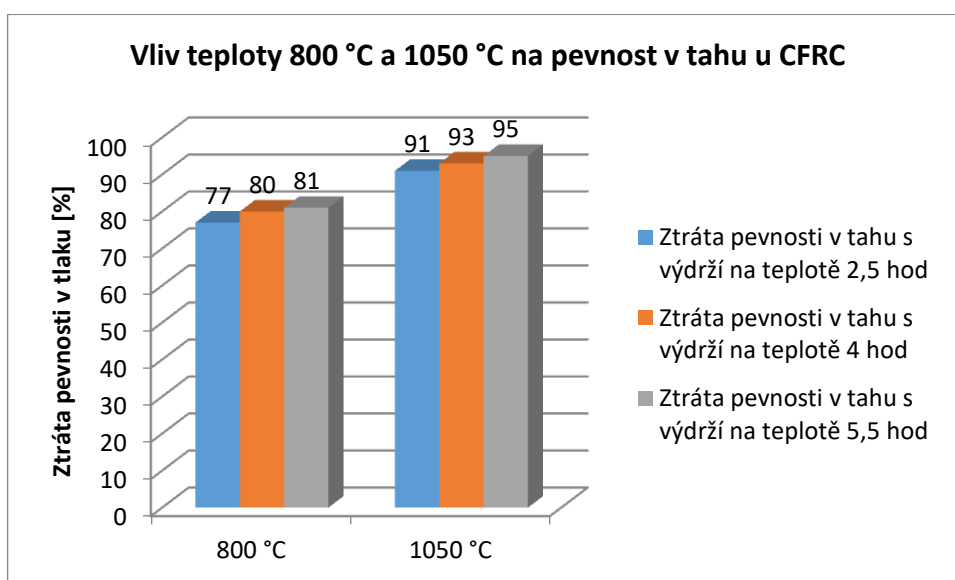
Graf 3 *Vliv teploty 300 °C na pevnost v tahu – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC) [9]*



Graf 4 *Vliv teploty 600 °C na pevnost v tahu – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC) [9]*



Graf 5 Vliv teploty 800 °C a 1050 °C na pevnost v tlaku – beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC), PC nezkoušený – destrukce při 600 °C [9]



Graf 6 Vliv teploty 800 °C a 1050 °C na pevnost v tahu – beton s portlandským cementem a celulóзовými vlákny (CFRC), PC nezkoušený – destrukce při 600 °C [9]

Vliv zvyšující se teploty na úbytek hmotnosti betonu

Tabulka č. 5 ukazuje hmotnostní ztrátové poměry u PC a CFRC těles v závislosti na době ohřívání. Prvně byla tělesa ohřívána na 300 °C, kdy bylo dosaženo 6 % úbytku hmotnosti. PC tělesa dosáhla těchto hodnot po 2,5 hodinách, ale CFRC tělesa dosáhla totožných hodnot až po 5,5 hodiny. Mikrostruktura zkoušeného betonu, která měla splňovat požadavky inženýrských aplikací, byla mírně poškozená. Dále byla tělesa vystavena ohřevu na 600 °C, kdy bylo dosaženo hmotnostního ztrátového poměru méně

než 10 %. PC zkušební tělesa vydržela ohřev 2,5 hodiny a CFRC tělesa 5,5 hodiny, ale na povrchu CFRC těles se začala objevovat síť malých trhlinek. PC tělesa ohřívána na 800 °C už nevydržela vysokou teplotu a rozpadla se, ale CFRC tělesa se ještě dokázala udržet pohromadě s velkou sítí trhlin. [9]

Vliv zvyšující se teploty na mechanické vlastnosti betonu

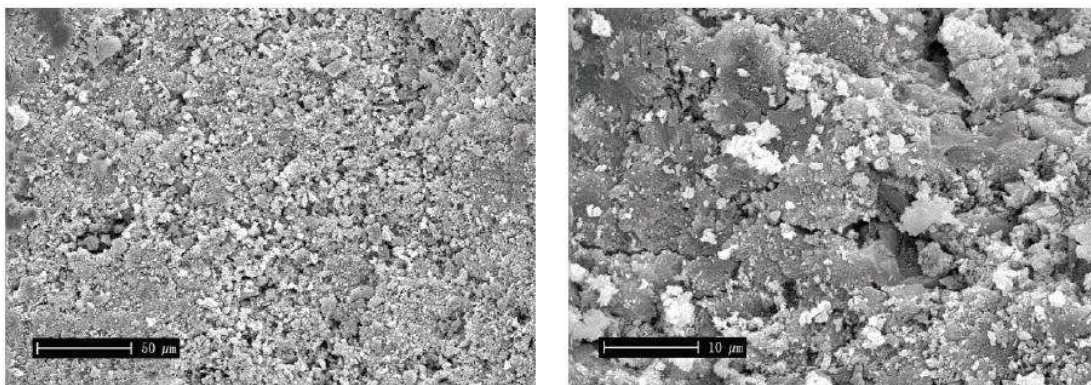
Při ohřevu na 300 °C a setrvání po různou dobu se zjistilo, že průměrný pokles pevnosti v tlaku byl jak u PC těles tak u CFRC těles menší jak 30 %, avšak rozdíl nastal při různých časech ohřevu. U CFRC těles byl pokles menší jak 10 % po dobu 2,5 a 4 hodiny, ale tělesa PC ztratila v průměru pevnost v tlaku o 1/4 až o 1/3. Setrvání ohřevu na 5,5 hodiny byla u CFRC těles ztráta pevnosti v tlaku na 50 % referenčních hodnot a u těles PC byla průměrná ztráta pevnosti v tlaku 60 % (stejných hodnot bylo dosaženo u těles CFRC při teplotě 600 °C).

Podobně probíhaly i ztráty pevnosti v tahu. Při ohřevu na teplotu 800 °C došlo u těles PC k nenávratnému poškození, kdežto zkušební tělesa CFRC byla poškozena bez ztráty soudržnosti a ztratila až 80 % pevnosti v tlaku. Změna nastala při dosažení teploty 1050 °C, kdy byla zkušební tělesa CFRC úplně poškozena. [9]

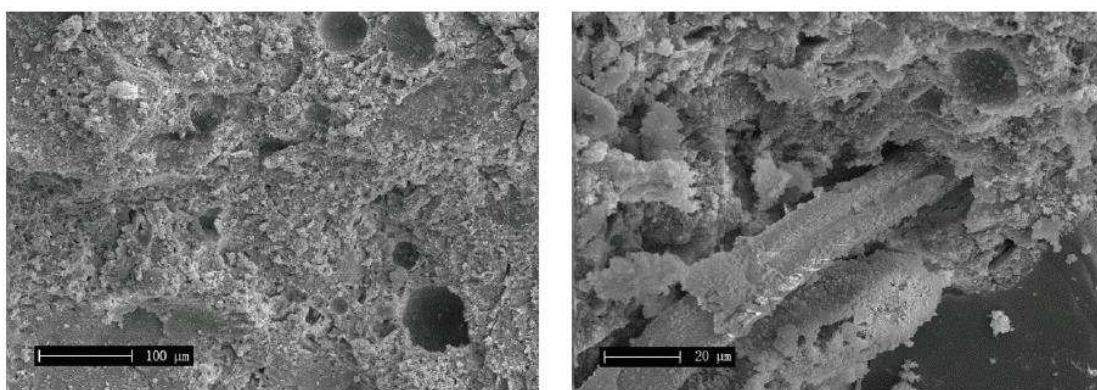
Vliv zvyšující se teploty na mikrostrukturu

Beton vystavený vysokým teplotám byl vyšetřován mikroskopem FESEM a snímky jsou znázorněny na následujících obrázcích. Na obrázcích lze pozorovat zkušební vzorky zkoušené při laboratorní teplotě 20 °C. Mezi vzorky CFRC a PC je znatelný rozdíl, kdy vzorky CFRC mají mnohem hustší a jednotnější strukturu. Hrubší hydroxid vápenatý a jehlovitý etringit je viditelný u PC těles, ale u CFRC těles je už těžší ho zpozorovat. [9]

Ohřev PC těles můžeme vidět na obrázku č. 9 a ohřev CFRC těles můžeme vidět na obrázku č. 10. V obou případech se jedná o ohřev na 300 °C po dobu 2,5 hodiny. Celulózová vlákna byly částečně roztavená a byla ohřívána po dobu 4 hodiny. [9]

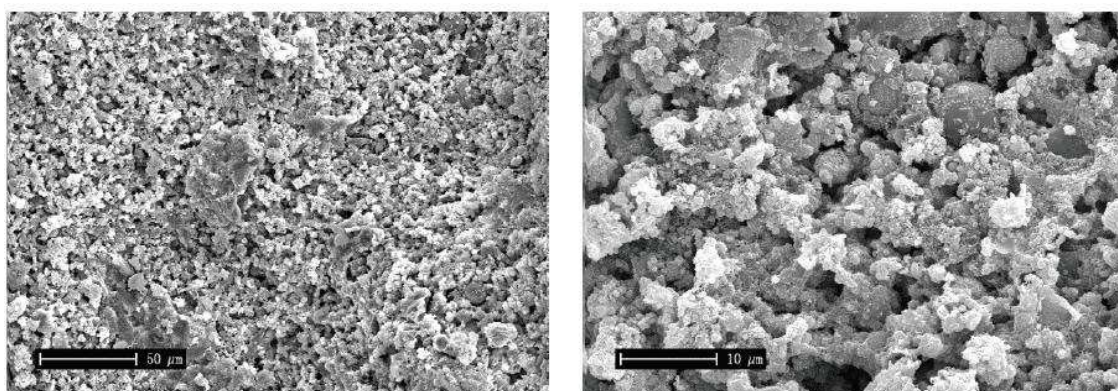


Obrázek 9 Referenční beton bez vláken PC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 1000x a vpravo je zvětšení 5000x [9]



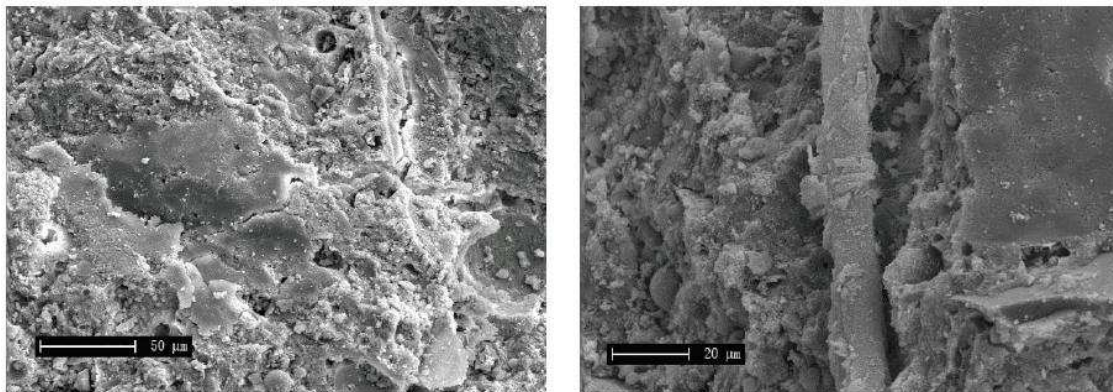
Obrázek 10 Beton s celulóзовými vlákny CFRC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 500x a vpravo zvětšení 2000x [9]

PC tělesa byla ohřívána na 300 °C po 4 hodiny (Obr. 11). U PC těles byla přeměna hydrátů, oddělení částic a větší propojení mikrotrhlin, což způsobilo degradaci.



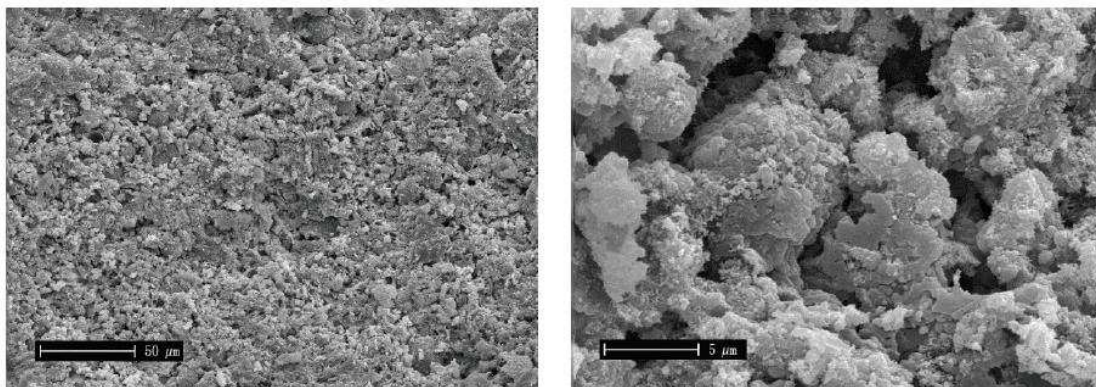
Obrázek 11 Mikrostruktura referenčního betonu bez vláken PC těles na SEM mikroskopu, vlevo zvětšení 1000x a vpravo zvětšení 5000x [9]

CFRC tělesa byla ohřívána na 300 °C po 5,5 hodiny. Jak můžeme vidět na obrázku č. 12, celulózová vlákna jsou více roztavená, vytvářejí více volného prostoru a tím pádem je větší prostor mezi celulózovými vlákny a betonovou matricí.



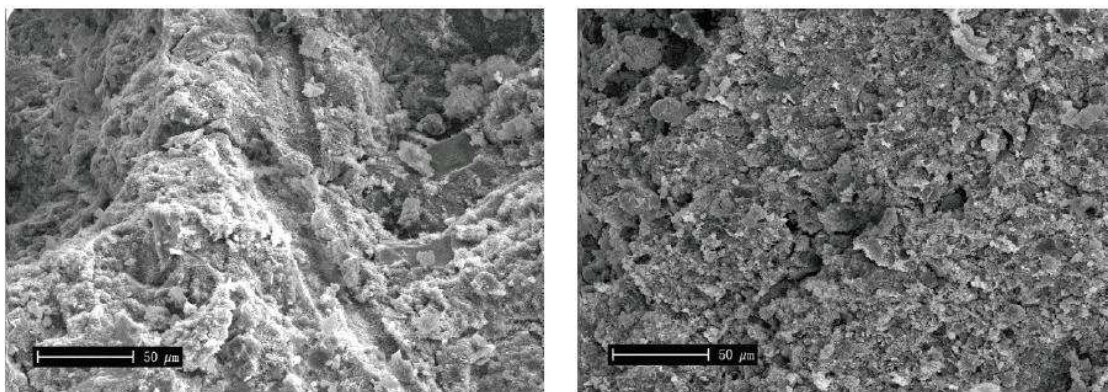
Obrázek 12 Beton s celulózovými vlákny CFRC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení těles 1000x a vpravo 2000x [9]

Mikrostruktura je u PC těles více pórovitá (obr. 13), hydráty se rozkládají a to je důvod, proč výrazně klesnou mechanické vlastnosti. PC tělesa jsou ohřívána na 300 °C po 5,5 hodiny.



Obrázek 13 Mikrostruktura referenčního betonu bez vláken PC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 1000x a vpravo je zvětšení 10 000x [9]

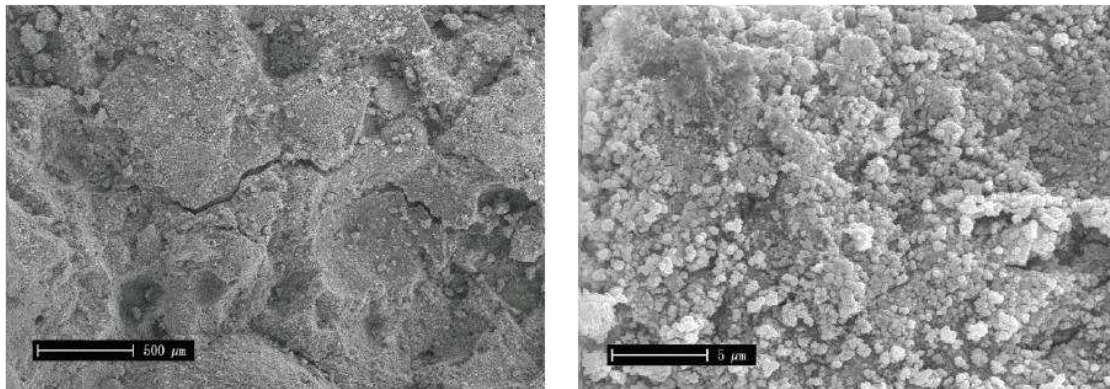
CFRC a PC tělesa jsou ohřívána na 600 °C po 4 hodiny (obr. 14). Většina vláken je rozložená a vytvářejí volný prostor. Některé cementové hydráty jsou rozložené a mechanické vlastnosti jsou na 50 % původních hodnot.



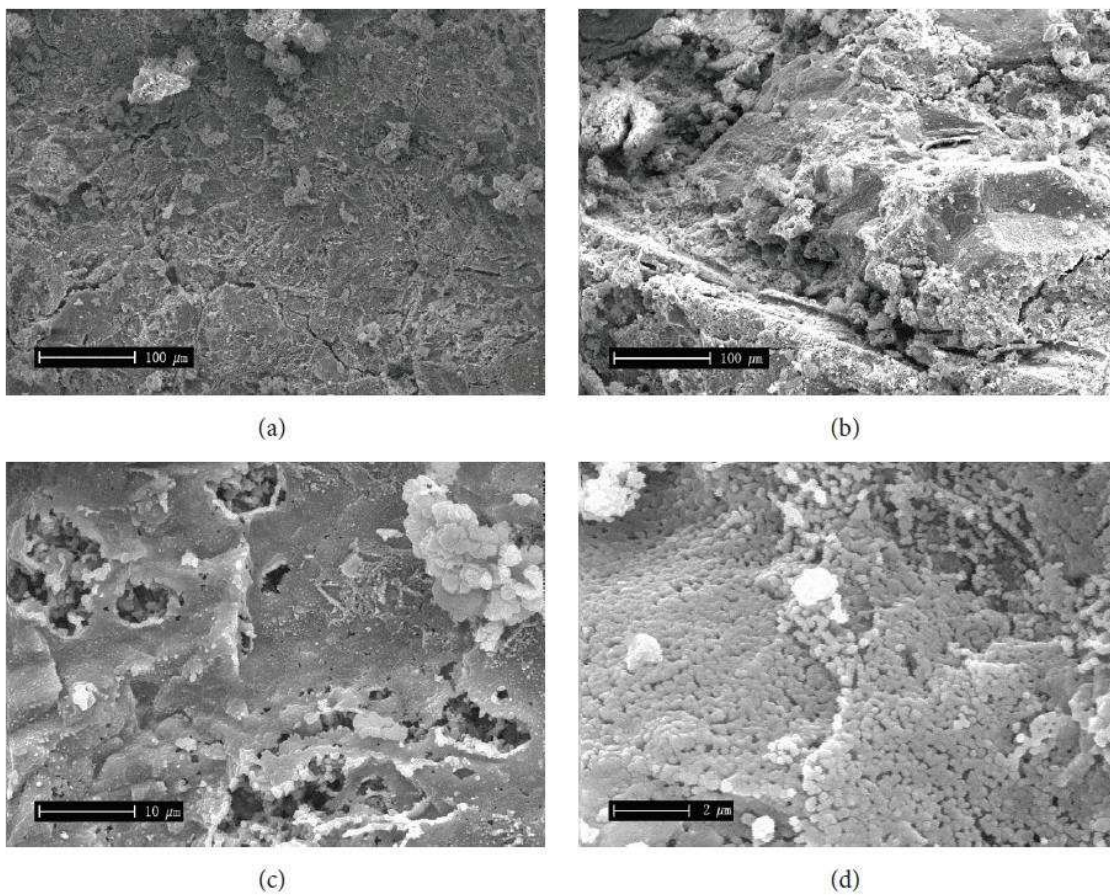
Obrázek 14 Mikrostruktura betonu s celulózovými vlákny CFRC (vlevo) a referenčního betonu bez vláken PC (vpravo) na SEM mikroskopu, zvětšeno 1000x [9]

Změny mikrostruktury CFRC těles vystavených působení teploty 800 °C (obr. 15) mají podobný průběh jako změny u těles z referenčního betonu PC, která byla ohřátá na 300 °C (obr 11).

Při teplotě nad 1050 °C se C-S-H gel rozložil, mechanické vlastnosti betonu se dramaticky zhoršily. Při teplotách nad 1050 °C dochází k rozpadu vazeb, vzniká skelná fáze.



Obrázek 15 Mikrostruktura betonu s celulózovými vlákny CFRC znázorněná na SEM mikroskopu (vlevo) je zvětšení 100x a vpravo je zvětšení 10 000x [9]



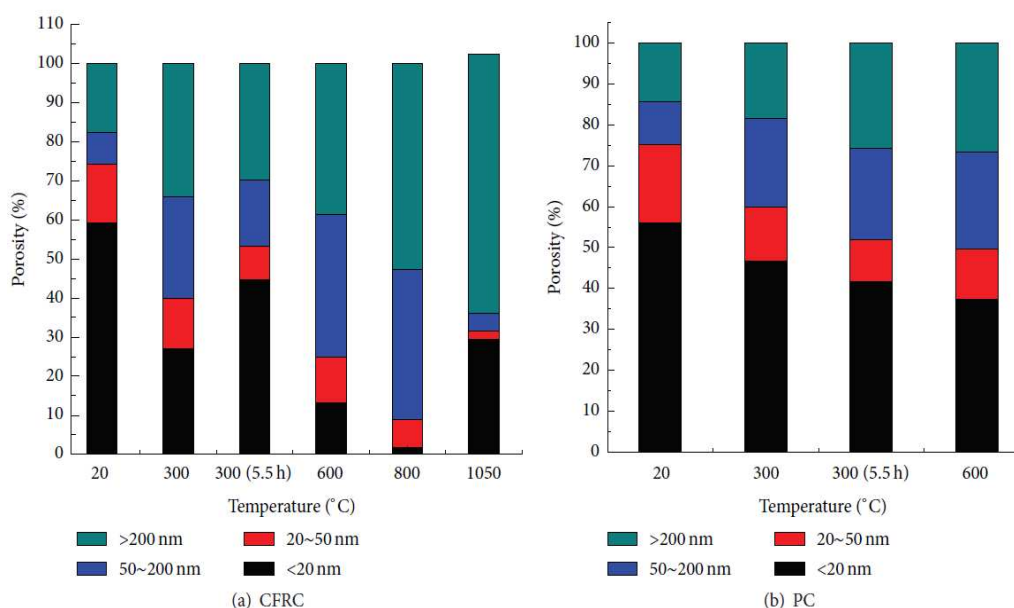
Obrázek 16 Snímky betonu s celulóзовými vlákny CFRC ohřátých na 1050 °C po dobu 4 hodin znázorněné na SEM mikroskopu, (a) zvětšení 500x, (b) zvětšení 500x, (c) 5000x, (d) zvětšení 20 000x [9]

3.1.3 Vliv teploty na pórovitost betonu

Pórová struktura byla měřena u PC a CFRC těles vystavených zvyšující se teplotě a při výdrži na konkrétní teplotě. Pomocí rtuťové porozimetrie byla měřena velikost pórů od 2,5 nm do 100 μm . Velikost pórů je klasifikována u betonu ve čtyřech kategoriích:

- < 20 nm – póry v betonu jsou neškodné.
- 20 – 50 nm - póry v betonu jsou mírně nebezpečné.
- 50 – 200 nm - póry v betonu jsou nebezpečné.
- > 200 nm - póry v betonu jsou velmi nebezpečné. [9]

Mechanické vlastnosti betonu jsou optimální při velikosti pórů do 50 nm. Při velikosti pórů nad 100 nm mechanické vlastnosti betonu postupně klesají. Porozimetrie CFRC tělesa byla provedena u těles vystavených teplotě od 20 do 800 $^{\circ}\text{C}$. Při 20 $^{\circ}\text{C}$ byla pórovitost 5 %, při 300 $^{\circ}\text{C}$ byla pórovitost 20 %, při 600 $^{\circ}\text{C}$ byla pórovitost 25 % a při 800 $^{\circ}\text{C}$ byla pórovitost 30 %. U PC těles byla pórovitost přibližně u každé teploty vyšší o 10 až 15 % vyšší. Při teplotě 1050 $^{\circ}\text{C}$ se razantně zvýšila pórovitost na 45 %. Vliv teploty na pórovitost betonu lze pozorovat na obrázku č. 17. U PC těles má nejhorší vliv na pórovitost teplota 300 $^{\circ}\text{C}$. V porovnání s CFRC tělesy má nejhorší vliv na pórovitost teplota 600 $^{\circ}\text{C}$. [9]



Obrázek 17 Vliv teploty na velikost pórů u betonu s celulózovými vlákny a) CFRC a u normálního betonu b) PC [9]

3.1.4 Vliv celulózových vláken na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot

Závěrem lze říci, že modifikovaná celulózová vlákna (CF) pozitivně zlepšují odolnost betonu proti explozivnímu odprýskávání a chování betonu během vysokých teplot. Při porovnání mechanických a fyzikálních vlastností PC a CFRC těles lze říci, že celulózové vlákna zvýší teplotní odolnost o 250 °C. Dále dle studie byly získány informace o mechanických vlastnostech (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu). Při teplotě 600 °C modifikovaná celulózová vlákna snížila ztrátu pevnosti v tlaku přibližně o 8 %. Bylo ukázáno, že duté celulózové vlákna mají svoje opodstatnění a využití v betonových konstrukcích při vypuknutí požáru. Celulózová vlákna se podílejí na prodloužení času potřebného k evakuaci budovy, popřípadě při včasném uhašení požáru je možné i betonovou konstrukci zachránit a ještě v lepším případě zamezit odprýskávání betonu na povrchu konstrukce. [9]

3.2 Účinek směsi vláken z různých materiálů na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot

Studie se zabývá zkoumáním vlastností materiálů, jako je směs vláken, ocelové vlákna, polymerní a celulózové vlákna při působení vysokých teplot (150, 500, 800 °C). Zjišťovali se informace o pevnostech v tlaku a odolnosti proti vysokým teplotám. Postupně se měnil poměr a množství cementu a vláken. Používali se elektronový mikroskop SEM a termogravimetrická analýza TG/ DTA – MS. [8]

3.2.1 Experiment

Použitá receptura betonu je znázorněna v tabulce č. 6 [8]

Tabulka 6 Receptura betonu [8]

Materiál	Typ	Složení na 1 kg/m ³
Kamenivo	Frakce 0 – 4 mm (45 %)	824
	Frakce 4 - 8 mm (55 %)	1008
Cement	CEM I 42,5 N	380
Vlákna	Ocel. Vlákna (1.0 V%)	78,5
	Polymerní vlákna, PP (0,1 nebo 0,2 V %)	0,91 nebo 1,82
	Celulózové vlákna (0,1 nebo 0,2 V%)	1.5 nebo 3,0
Voda	$m_w/m_c = 0,43$	163
Přísada	Glenium C300 (max 0,7 m _c %)	max 2,66

Konzistence byla navrhována v kategorii F4 při konstantním dávkování přísady. Složení cementu je rozepsáno v tabulce č. 7.

Tabulka 7 Procentuální složení cementu [8]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl
8,99	0,48	0,04	1,87	0,39	0,24	0,28	0,08	0,46	0,89	0,038

V následující tabulce č. 8 jsou rozepsány všechny používané vlákna ve studii včetně jejich parametrů.

Tabulka 8 Vlastnosti zkoušených vláken[8]

Ozn. vláken	Materiál	Délka vláken [mm]	Průměr vláken [μm]	Hustota [kg/m ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Teplota vznícení [°C]
S	Ocel	13	200	7850	3 000	-
P	Polymer - PP	12	20	910	400 - 500	400
Ce	Celulóza	12	12	1500	-	460

Byly vytvořeny referenční směsi a směsi s různými typy vláken znázorněny v tabulce č. 9 a následně zkoušeny.

Tabulka 9 Procentuální složení vláken u receptur S1 – S8 [8]

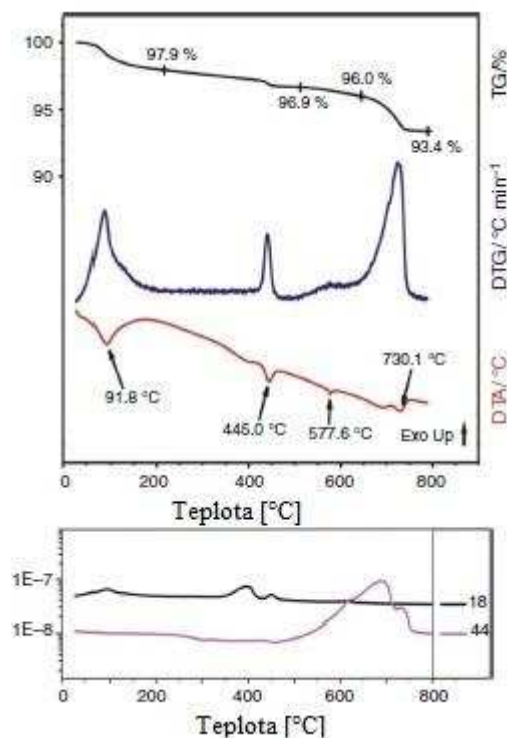
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Ocelové	-	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Polymerní	-	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-
Celulóзовé	-	-	0,1	-	-	-	0,1	0,2

Vytvořené vzorky byly odformovány a uloženy sedm dní ve vodě. Po 28 dnech byly vzorky vystaveny působením teplot (150, 500, 800 °C) s následným pozvolným ochlazením na laboratorní teplotu. [8]

3.2.2 Probíhající měření

Měření betonu probíhalo na přístrojích STD 2960, DTA/ TGA (TA Instruments Inc) s náběhem teplot 10 °C za minutu. Termobalance byly vyčištěna vzduchem (130 mL/min). Morfologie byla zjišťována na snímcích z elektronového mikroskopu SEM na přístroji JEOL JSM-5500LV. Dále byla prováděna zkouška na třídodovém ohybu s tělesy 70x70x250 mm při rychlosti zatížení 1 mm/ min. [8]

Na obrázku č. 18 je znázorněný referenční beton bez vláken, u betonu došlo k masivní ztrátě objemu. [8]

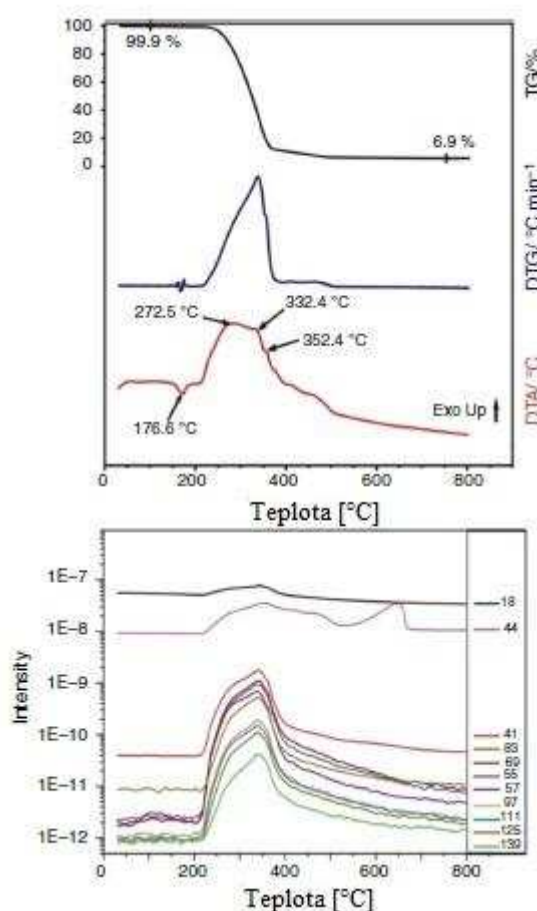


Obrázek 18 Teplotní degradace referenčního betonu [8]

Průběh zatěžování při vysoké teploty probíhal ve čtyřech krocích. Ohříváním na teplotu 150 – 400 °C došlo k uvolnění volně vázané vody z etringitu a hydrátu křemičitanu vápenatého. V důsledku vyšší teploty 420 – 460 °C proběhla hydratace hydroxidu vápenatého. Společně ve třetím a čtvrtém kroku při teplotě 480 až 750 °C došlo k postupnému uvolňování CO_2 z CaCO_3 . Všechny zkušební vzorky byly žihány na teplotu 150, 500 a 800 °C. [8]

3.2.3 Beton s PP vlákny

Rozklad polypropylenových vláken je zaznamenán na obrázku č. 19.



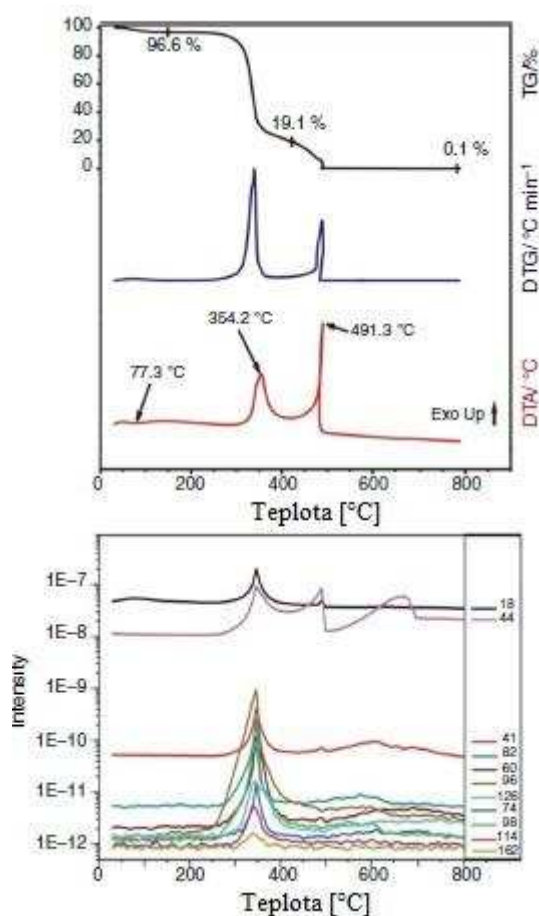
Obrázek 19 Degradace polypropylenových vláken za vysokých teplot [8]

Beton s celulóзовými vlákny byl vystavený zvyšující se teplotě, při dosažení 177 °C došlo k roztavení polypropylenových vláken. V rozmezí teplot 230 – 500 °C došlo k úplnému rozložení a spálení PP vláken. Ztrátu stability a úbytek hmotnosti způsobilo uvolňování vody, oxidu uhličitého (CO₂) a mnoho dalších prvků. Uvolňování CO₂ probíhalo v rozmezí 550 - 680 °C a zaznamenávalo se na hmotnostní spektrometr. [8]

3.2.4 Beton s celulóзовými vlákny

Rozklad celulóзовých vláken za vysokých teplot je znázorněn na obrázku č. 20. V prvním kroku se uvolnila fyzikálně vázaná voda. Rozklad celulózy probíhal v rozmezí teplot 250 – 400 °C v doprovodu vzniku nových nestálých druhů. Při teplotě 450 – 500 °C byly spáleny poslední zbylé vlákna a plyn CO₂ ve struktuře dále zůstával.

Z důvodů oxidace vzduchu byly DTA píky endotermické. CO₂ se uvolnilo z kapilár při teplotě 550 °C. [8]



Obrázek 20 Degradace celulózových vláken za vysokých teplot[8]

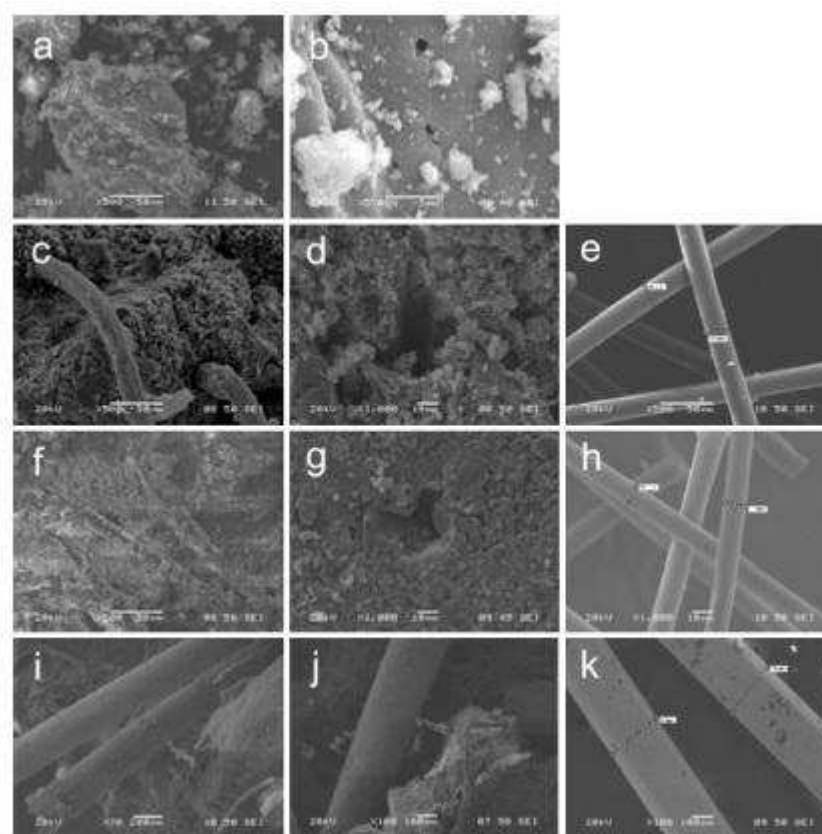
3.2.5 Beton s ocelovými vlákny

Jako poslední byl vysokým teplotám vystaven beton s ocelovými vlákny. Vlákná nebyla poškozena, dokud nedosáhly teploty 800 °C a tím pádem nejsou jejich termoanalytické křivky prezentovány na TG/DT-MS mikroskopu. [8]

Z termoanalytických výzkumů vyplývá, že referenční beton, beton s PP vlákny a celulózovými vlákny se může rozložit, když ztratí veškerou absorbovanou vodu při dosažení 150 °C. Při teplotě 500 °C došlo k rozkladu PP a celulózových vláken a k úplnému rozkladu betonu došlo při 800 °C. [8]

3.2.6 Měření na elektronovém mikroskopu

Na obrázku č. 21 jsou snímky typy vláken S1 – S4 před a po ohřevu na 800 °C a také morfologie samotných vláken. Před samotným ohřevem byly vlákna ve směsích jasně viditelná.



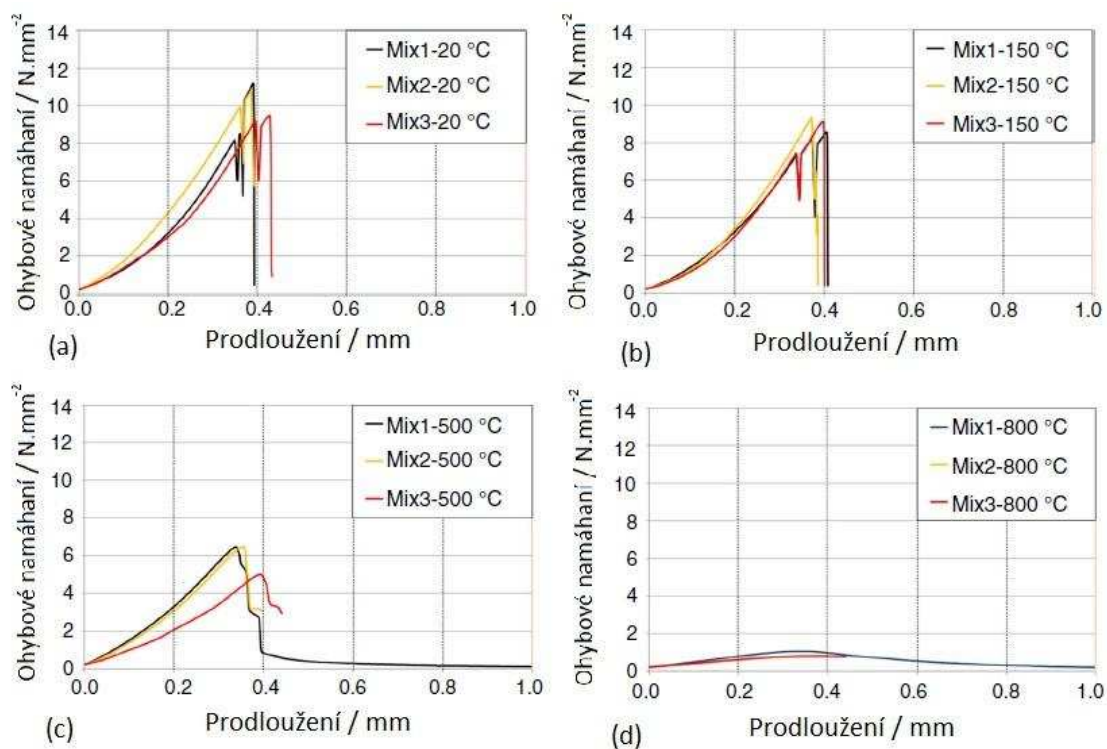
Obrázek 21 Snímky na SEM mikroskopu, (a) S 1, (b) S 2 po ohřevu na 800 °C, (c) S 2, (d) S 2 po ohřevu na 800 °C, (e) zvětšení polypropylenových vláken, (f) S 3, (g) S 3 ohřátý na 800 °C, (h) zvětšení celulóзовých vláken, (i) S 4, (j) S 4 ohřátý na 800 °C, (k) zvětšení ocelových vláken [8]

Na mikroskopu jsou vidět otvory a trhliny na povrchu zkušebních těles způsobené nestálým rozkladem produktů v betonu. V případě receptury S2 a S3, polymerní a celulóзовé vlákna bez problémů vyhořely. Menší vlákna, která se přesunula do větších otvorů na místo původních vláken, tak ve větších otvorech zůstaly i po hoření. U ocelových vláken nebyly pozorovány, žádné změny. [8]

3.2.7 Namáhání různých typů vláken v ohybu za vysokých teplot

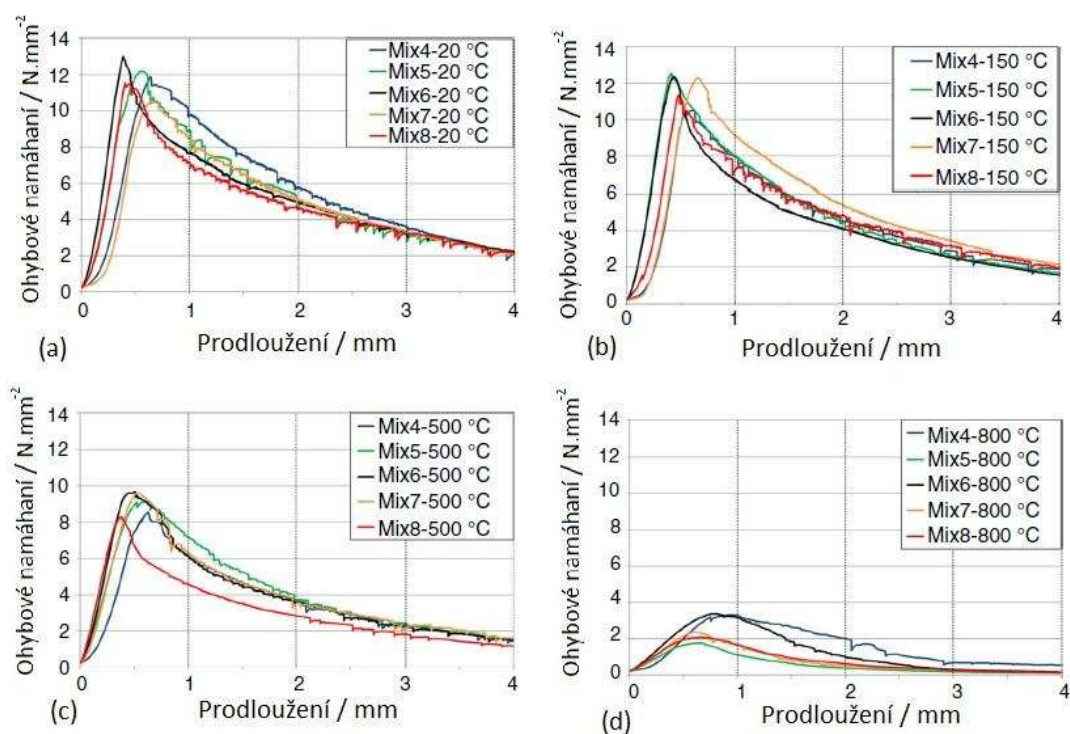
Na obrázku č. 22 jsou znázorněné křivky při namáhání těles v tříbodovém ohybu. Jsou porovnávány tělesa s celulóзовými (S2) a polymerní vlákny (S 3). Vlákna

až tak výrazně nepřispívají v pevnostech v tahu za ohybu jak při běžné teplotě tak i při zvýšené teplotě (150, 500 nebo 800 °C). [8]



Obrázek 22 Křivky od těles namáhaných v třibodovém ohybu [8]

Prováděné zkoušky u receptur S4 - S8 na trácích v třibodovém ohybu jsou graficky znázorněny na obrázku č. 23. Receptura S4 má dávku 1 % ocelových vláken na 1 m³. Receptura S5 - S6 obsahuje ocelová vlákna při dávce 1 % na 1 m³ polymerní vlákna při dávce 0,1 kg (S5) a 0,2 kg/m³ (S6). U S7 a S8 jsou opět ocelové vlákna se stejným dávkováním, ale polymerní vlákna jsou nahrazena celulóзовými a jejich dávkování je stejné jako u předchozích polymerních vláken. Z obrázků č. 22 a č. 23 vyplývá, že největší vliv na zkoušky v ohybu u zkušebních vzorků mají ocelová vlákna při dávce 1,0 kg na 1 m³. Z grafů je dále patrné, že přidání celulóзовých a polymerních vláken do betonu nemá zásadní vliv na pevnosti v tahu za ohybu. [8]



Obrázek 23 Křivky od těles namáhaných v tříbodovém ohybu s ocelovými vlákny (při dávce 1 % na 1 m³), polymerní (při dávce 0,1 % na 1 m³), nebo celulózní vlákna (při dávce 0,2 % na 1 m³) [8]

Když se ještě jednou vrátíme k obrázku č. 22 a č. 23, tak při zatěžování zkušebních těles v tříbodovém ohybu je velmi značný pokles pevností v tahu za ohybu v teplotní oblasti 500 až 800 °C. Možným důvodem poklesu pevností v ohybu je dehydratace $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementu a rozklad hydrátů křemičitanů vápenatého (C-S-H gely) a rozklad CaCO_3 . [8]

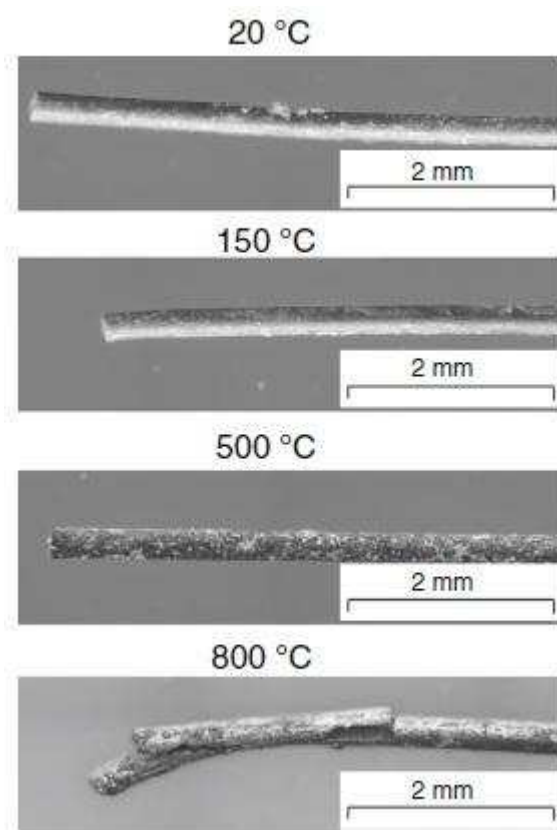
Na dalším obrázku č. 24 je zajímavé pozorovat barevné změny zkušebních vzorků doprovázené chemickými reakcemi při narůstajících teplotách. [8]



Obrázek 24 Zbarvení těles FRC při nabíhacích teplotách od 20 do 800 °C [8]

Závěrem lze říci, že na pokles pevností v tahu za ohybu se podílí jak chemické reakce v betonu, tak modifikace ocelových vláken při zvyšující se teplotě. Při zkoušení do teploty 500 °C nedošlo k poškození struktury, ale při překročení 800 °C ocelová vlákna nevydržela již tak vysokou teplotu a došlo k poškození struktury zkušebních těles.

Pořízené obrázky z optického mikroskopu ukazují ocelová vlákna, jak se deformují při zvyšující se teplotě. [8]

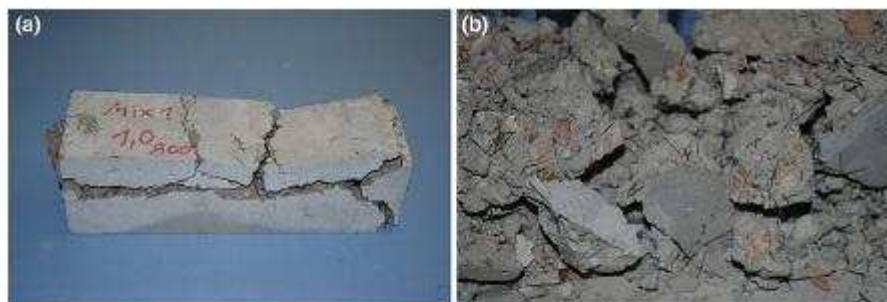


Obrázek 25 Ocelová vlákna odebraná z těles vystavená různým teplotám (od 20 - 800 °C) [8]

3.2.8 Odprýskávání povrchu betonu při různém typu vláken a různé teploty

V této studii bylo ukázáno, že kombinace ocelových, celulóзовých a polymerních vláken má vliv na odprýskávání povrchu betonu při zatěžování v maximální teplotě 800 °C. Stejný účinek měl pozitivní vliv kombinace ocelových vláken s celulóзовými vlákny při dávce 0,1 nebo 0,2 kg na 1 m³, nebo kombinace ocelových vláken s polymerními vlákny při dávce 0,1 nebo 0,2 kg na 1 m³. Ovšem nebylo prozkoumáno, jaký má vliv na odprýskávání povrchu betonu použití samotných ocelových vláken, bez přidání celulóзовých nebo polymerních vláken. Na obrázku č. 26

lze zpozorovat, co se stane s betonem vystaveným 800 °C při použití pouze samotných ocelových vláken. [8]



Obrázek 26 SFRC tělesa vystavená 800 °C s dávkou 1 % ocelových vláken [8]

3.2.9 Vliv směsi vláken na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot

Tato studie měla za úkol zjistit optimální složení betonu, aby zvládl odolávat vysokým teplotám. Byly použity mikroskopy SEM, DTA-MS. Za pomoci DTA-MS mikroskopu bylo vyšetřováno vypařování volně vázané vody, dále byl zkoumán vliv celulóзовých a polymerních vláken při dosažení teploty 800 °C. Na základě tříbodového ohybu byly zkoumány zkušební tělesa s obsahem 1 kg ocelových vláken na 1 m³, které měly pozitivní vliv na pevnosti v tahu za ohybu. Struktura zkušebních těles s celulóзовými nebo polymerními vlákny nebyla tak porušena. Dále byl zjišťován vliv ocelových vláken na odprýskávání povrchu betonu. Ocelové vlákna bohužel nezajistila soudržnost povrchových vrstev betonu, tak jako celulóзовé nebo polymerní vlákna. [8]

3.3 Konkrétní použití celulóзовých vláken

Celulóзовé vlákna mají široké uplatnění ve stavebním průmyslu. Využívají se skrz pozitivní vlastnosti a zlepšují reologii, viskozitu, zahuštění, zpevnění, absorpci oleje, zamezují vzniku trhlin, snižují smrštění a zajišťují tixotropii a částečně mohou zlepšit pevnost v tahu. [18]



Obrázek 27 Průmyslová celulózní vlákna [18]



Obrázek 28 Využití celulózních u asfaltových střešních nátěrů [18]



Obrázek 29 Využití celulózních vláken u betonových odlitků [18]



Obrázek 30 Využití celulózních vláken jako protipožární nátěr [18]



Obrázek 31 Přidání celulózních vláken do betonových směsí u vrtných pilot [18]



Obrázek 32 Přidání celulózních vláken do omítek pro zlepšení struktury [18]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 Vlastnosti vstupních surovin

4.1 Cement

Jako cement byl použit portlandský směsný cement CEM I 42,5 R od společnosti Českomoravský cement, a.s. [20]

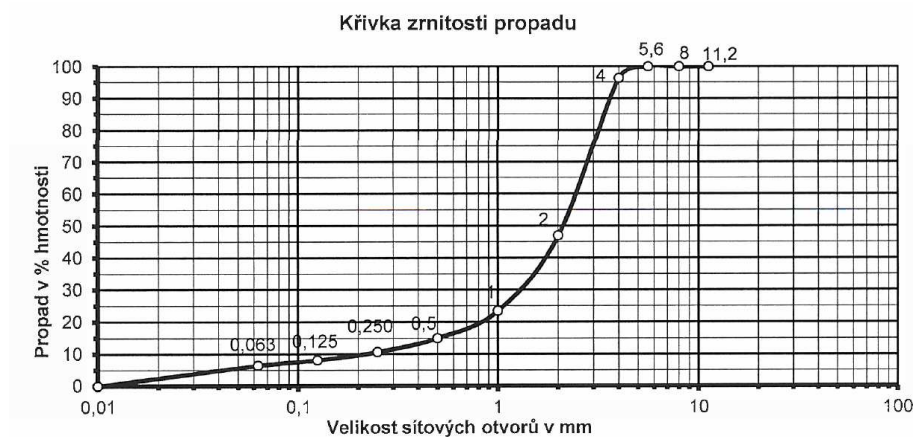
Tabulka 10 Vlastnosti CEM I 42,5 R [20]

Vlastnost	Jednotka	CEM I 42,5 R
Měrný povrch	m ² /kg	377
Objemová stálost	mm	0,9
Normální konzistence	%	28,3
Pevnost v tlaku - 28 dní	N/mm ²	61
Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní	N/mm ²	9
Ztráta žíháním	%	3
Obsah síranů (jako SO ₃)	%	2,9
Obsah Cl	%	0,06
Obsah K ₂ O	%	0,75
Obsah Na ₂ O	%	0,17

4.2 Kamenivo

V diplomové práci bylo použito čedičové kamenivo ve frakcích 0-4, 4-8, 8-16 mm. Kamenivo bylo dovezeno z kamenolomu Bílčice. [19]

Drcené kamenivo frakce 0/4 [19]



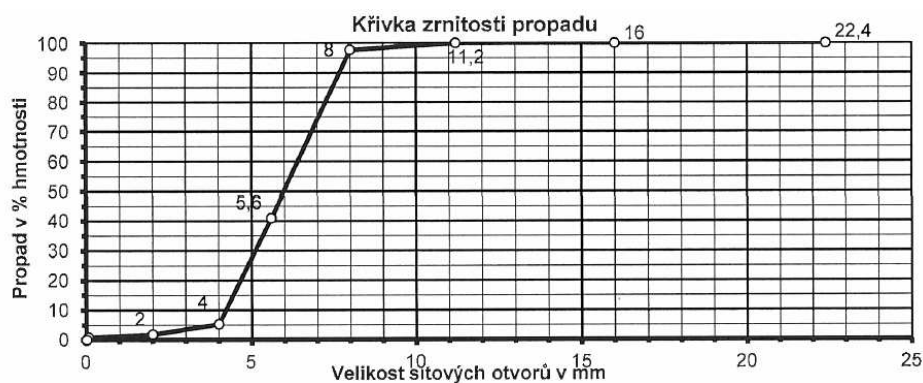
Obrázek 33 Křivka zrnitosti propadu frakce 0/4

Vybrané vlastnosti čedičového kameniva frakce 0/4 jsou znázorněny v tabulce č. 11.

Tabulka 11 *Vlastnosti čedičového kameniva 0/4*

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah jemných částic f	% hm.	6,4
Obsah chloridových solí	% hm.	< 0,001
Obsah síry S	% hm.	0,016
Nasákavost WA_{24}	% hm.	0,9
Objemová hmotnost	kg/m^3	2950
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	kg/m^3	1650
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	kg/m^3	2000
Mezerovitost volně sypaná	%	44,0
Mezerovitost setřesená	%	32,1

Hrubé drcené kamenivo frakce 4/8 [19]



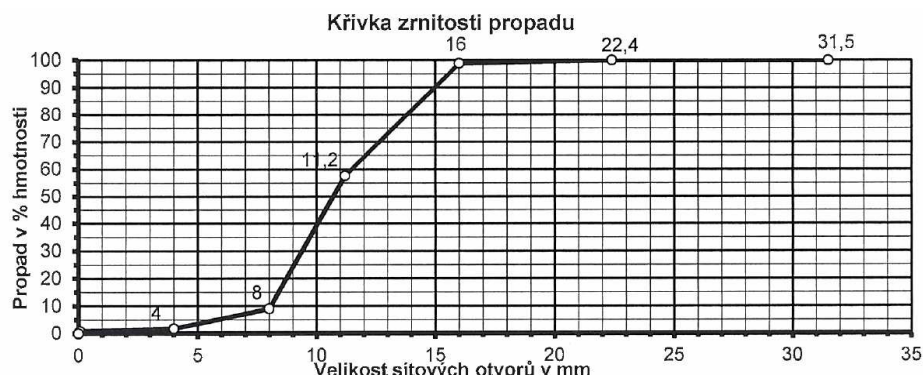
Obrázek 34 Křivka zrnitosti propadu frakce 4/8

Vybrané vlastnosti čedičového kameniva frakce 4/8 jsou znázorněny v tabulce č. 12.

Tabulka 12 *Vlastnosti čedičového kameniva 4/8*

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah jemných částic f	% hm.	0,9
Obsah chloridových solí	% hm.	< 0,001
Obsah síry S	% hm.	0,016
Nasákavost WA_{24}	% hm.	0,9
Objemová hmotnost	kg/m^3	2940
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	kg/m^3	1350
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	kg/m^3	1610
Mezerovitost volně sypaná	%	54,1
Mezerovitost setřesená	%	45,5

Hrubé drcené kamenivo frakce 8/16 [19]



Obrázek 35 Křivka zrnitosti propadu frakce 8/16

Vybrané vlastnosti čedičového kameniva frakce 8/16 jsou znázorněny v tabulce č. 13.

Tabulka 13 Vlastnosti čedičového kameniva 8/16 [19]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah jemných částic f	% hm.	0,8
Obsah chloridových solí	% hm.	< 0,001
Obsah síry S	% hm.	0,016
Nasákavost WA_{24}	% hm.	0,8
Objemová hmotnost	kg/m ³	2940
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	kg/m ³	1420
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	kg/m ³	1660
Mezerovitost volně sypaná	%	51,7
Mezerovitost setřesená	%	43,6

4.3 Přísady

Byla použita vodoredukující/ plastifikační přísada STACHEMENT 2050 (FM) od firmy STACHEMA CZ s.r.o. Rozsah dávkování se pohybuje v rozmezí 0,4 – 1,4 kg/ 100 kg cementu. Maximální obsah chloridů – 0,1 % hm. Maximální obsah alkálií 8 % ekv. Na_2O . Tato přísada vyhovuje normě EN 934-2. Dávkuje se do betonové směsi po přidání kameniva a cementu společně s vodou.

4.4 Vlákná

V práci byla použita vlákna od slovenské firmy GREENCEL s.r.o. a vlákna CRYSO Fibre UF-500 od americké firmy Buckeye. Pro zkoušení betonu za vysokých teplot byly použity konkrétní vlákna GREENCEL GW-A/1 a vlákna CHRYSO Fiber UF – 500.

4.4.1 Vlákná GREENCEL

Celulózové vlákna patří do skupiny přírodních materiálů, které se získávají z dřeva, nebo rostlin. Celulózové vlákno je vyrobené chemickým a mechanickým zpracováním dřeva a dalších obnovitelných materiálů. Jsou šetrné k životnímu prostředí a nejsou nebezpečné pro zdraví člověka. Jak uvádí výrobce, vlákna GREENCEL nejsou primárně určena do betonu, ale jako zahušťovadlo, plnidlo nebo jako tvarový stabilizátor. [11]

Tabulka 14 Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken GREENCEL [10]

Vlastnost	Jednotka	GW-A/1	GW-A	GW-A/2
Obsah celulózy	[%]	99,5	99,5	99,5
Maximální délka vlákna	[μm]	2000	2000	2000
Sušina	[%]	93	93	93
Objemová hmotnost	[g.l^{-1}]	35 – 55	55 – 75	35 – 55
Obsah popelu	[%]	0,5	0,5	0,5
Absorpce vody	[%]	770	-	730
Barva	[-]	Bílá	Bílá	Bílá
pH vláken	[-]	6 ± 1	6 ± 1	6 ± 1
Síťová analýza podle AJS (STN EN ISO 4610)		$> 300 \mu\text{m}$ max. 80 %	$> 300 \mu\text{m}$ max. 80 %	$> 300 \mu\text{m}$ max. 70 %
		$< 71 \mu\text{m}$ min. 20 %	$< 32 \mu\text{m}$ min. 10 %	$< 71 \mu\text{m}$ min. 10 %

4.4.2 Vlákná CHRYSO – Fiber UF - 500

Vlákná Buckeye Ultra Fiber 500 jsou z produkce Buckeye Technologies Inc. (USA).

Materiálem je speciálně upravený celulózový polymer, který je vyroben z přírodních zdrojů borovice karibské při zastoupení 45 % celulózy, 27 % ligninu, 0,2 % minerálů, 24 % hemicelulózy, 3 % výtažků a další složkou je patentovaný pevný alkalický nátěr.

Vlákná jsou z 95 % buněčná a z 5 % tvoří přísady (dvě přísady, jež mají dezintegrační a fluidní vlastnosti). Základní vlákno je vyrobené z jednoho nejvíce pevných celulózových vláken – borovice karibské. Vlákno je plně kompatibilní s veškerými betonovými složkami a přísadami a neovlivňuje jejich vlastnosti.

Vlákná Buckeye Ultra Fiber 500 jsou formovány do bílých kostek, jež jsou bez zápachu, při kontaktu s ohněm hoří (spaliny se skládají převážně z uhlíku, vodíku,

kyslíku). Výroba těchto „kostek“ je provedena krájením velkých lisovaných pásů. Každá kostka s vlákny má rozměry 5x6 mm a obsahuje okolo 33 000 vláken. Použití těchto „kostek“ umožňuje velkou smísitelnost a velký rozptyl vlákna ve směsi a také v neposlední řadě snadné dávkování a manipulaci s vlákny. Nevýhodou je však nutnost tyto „kostky“ řádně rozmělnit. Celulózová vlákna dočasně akumulují vodu, kterou postupně uvolňují.

Vlákno je užíváno pro zabránění vzniku teplotních a smršťovacích trhlin v betonu v minimálním množství 0,1% objemu (0,6-0,9 kg/m³). Pro běžná dávkování jsou dostupná balení vláken po 0,45 a 0,68 kg. Pro automatizovaná dávkování se dodávají balení po 9,1 kg. Absorpce vody až 80 % z hmotnosti vlákna. Vysoká odolnost proti alkáliím (dle ASTM D 6942 – Standardní metoda pro určení stability buněčných vláken v alkalickém prostředí). [10]

Tabulka 15 *Chemické a fyzikální vlastnosti vláken Buckeye Ultra Fiber 500* [10]

Vlastnosti vláken	Jednotka	Hodnota
Barva	[-]	Bílá
Hustota	[kg/m ³]	1100
Délka	[mm]	1,9 – 2,3
Průměr	[μm]	14 – 17
Počet vláken	[kus.g ⁻¹]	~ 1,6 milionu
Měrná plocha vláken	[cm ² .g ⁻¹]	25 000
Pevnost v tahu	[MPa]	600 – 900
Youngův modul pružnosti	[MPa]	8 500
Specifická hmotnost	[g.cm ⁻³]	1,1
Bod tání	[°C]	135

5 Sledování pH celulózových vláken

V první fázi experimentu bylo provedeno sledování odolnosti různých typů celulózových vláken vůči působení prostředí s různým pH.

5.1 Měření pH celulózových vláken

Naměřené hodnoty vychází z aktuálního měření pro tuto diplomovou práci a také z předchozího výzkumu měření pH různých roztoků s celulózovými vlákny. Byl sledován vývoj jednotlivých prostředí a vliv pH prostředí na jednotlivé typy celulózových vláken.

5.1.1 Postup

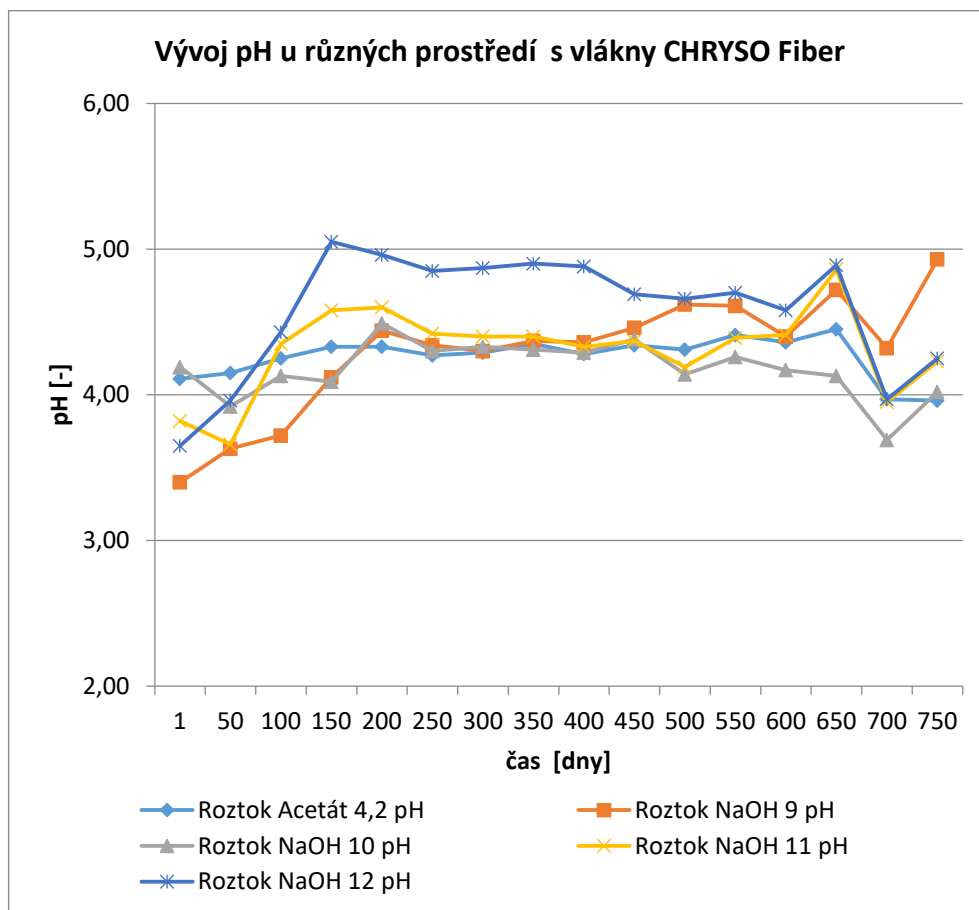
Na měření pH roztoků s celulózovými vlákny se použil pH metr HQ 11d a pH elektroda HC 7 05 A. Celulózová vlákna CRYSO Fibre UF-500 byla uložena v roztoku připraveném smísením kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , pH výsledného roztoku bylo 4.2. Vlákna GREENCEL byla uložena v roztocích NaOH s různým pH – 9, 10, 11, 12. Hodnota pH je definována jako záporný dekadický logaritmus aktivity vodíkových iontů, $\text{pH} = -\log a(\text{H}^+)$. Měření bylo provedeno ve 20ti různých variantách prostředí a vláken. V každé nádobě bylo 250 ml roztoku a 10 gramů vláken. Před samotným měřením proběhla kalibrace sondy v kalibračním roztoku o pH 4. Celulózová vlákna byla uložena v konkrétním roztoku ve skleněné nádobě. Pro měření pH roztoku se vždy roztok přelil do nádobky, aby nebyl společně s vlákny. Elektroda se vždy očistila destilovanou vodou a poté se vložila do jednotlivých roztoků bez vláken a započalo měření. Stejný postup se opakoval u každého roztoku.



Obrázek 36 pH metr HQ 11d a pH elektroda HC 7 05 A

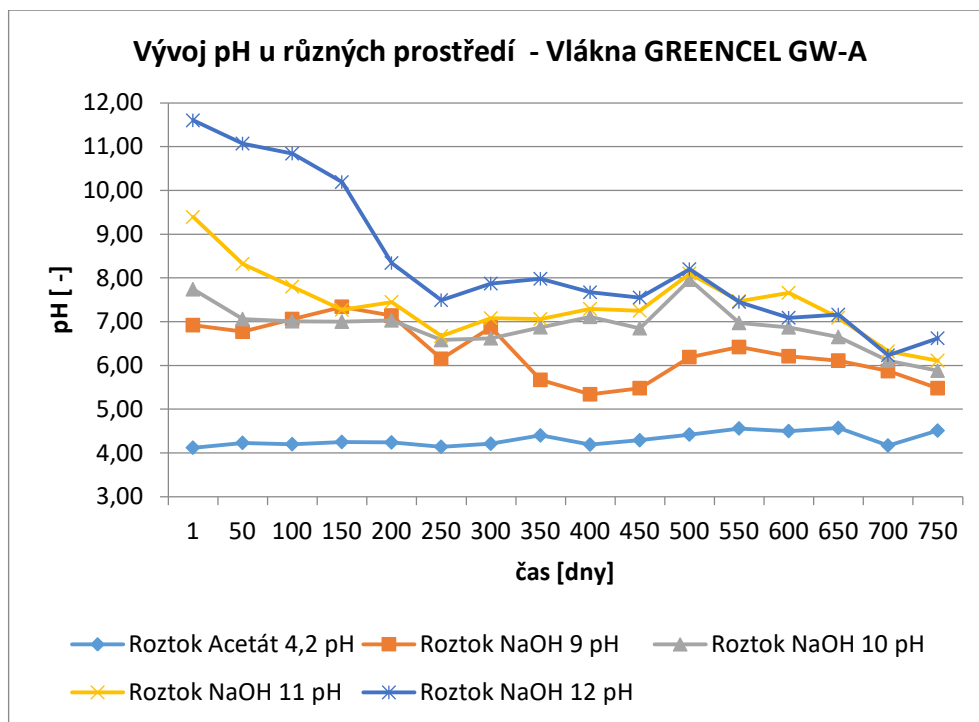
5.1.2 Výsledky zkoušek z měření pH celulózových vláken vystavených alkalickému a kyselému prostředí

Na následujících grafech (7 - 10) je znázorněný dlouhodobý vývoj pH jednotlivých prostředí v čase 1 – 750 dní s celulózovými vlákny.



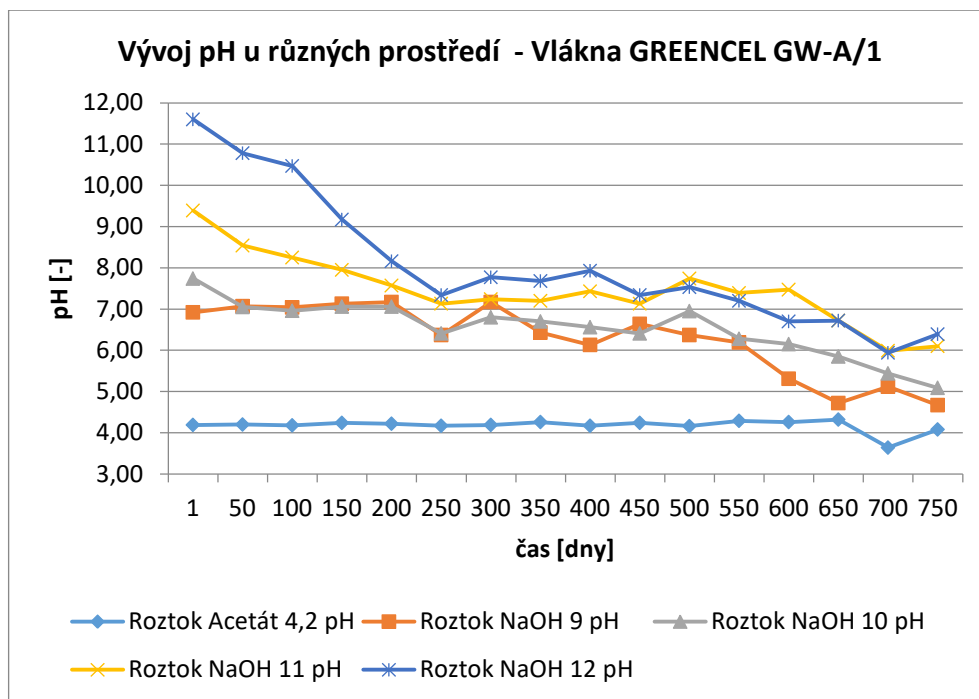
Graf 7 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny CHRYSO Fiber

U grafu č. 7 jsou znázorněny jednotlivá prostředí, ve kterých jsou uloženy vlákna CHRYSO Fiber. Dle předpokladu byla u vláken uložených v roztoku kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa naměřena hodnota blízká původnímu pH roztoku. U silně zásaditých roztoků NaOH se tato skutečnost nepředpokládala. Vlákna CHRYSO Fiber způsobily v roztocích NaOH výsledky pH v kyselém spektru po celou dobu měření. Z dlouhodobého hlediska se hodnoty pH u roztoků s vlákny pohybovaly v rozmezí 4 -5.



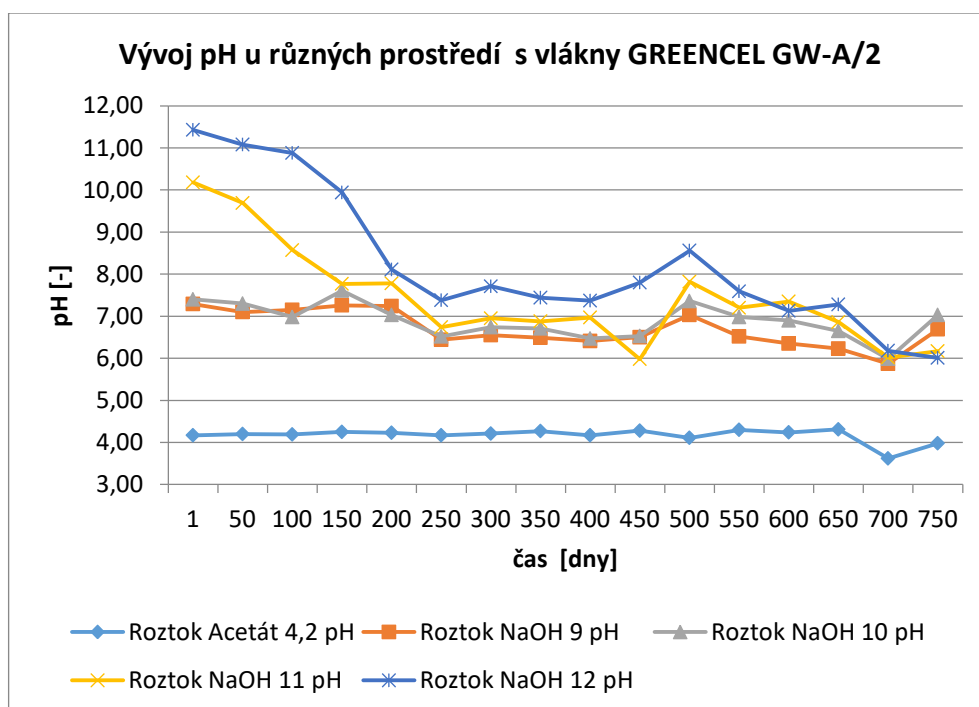
Graf 8 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A

Počáteční naměřené hodnoty pH u všech prostředí odpovídá pH původních roztoků. Nejvýraznější pokles pH byl u roztoku NaOH, pH 12 o 35 % a roztoku, pH 11 o 29 %. Dále byl dlouhodobý vývoj v okolí neutrálních hodnot. U roztoku NaOH, pH 9 byl sinusový průběh naměřených hodnot. Ke konci měření se začala zvyšovat kyselost roztoků, ale o kolik by ještě klesala hodnota pH, nebo jestli se hodnota ustálí, by mohlo být součástí dalšího výzkumu.



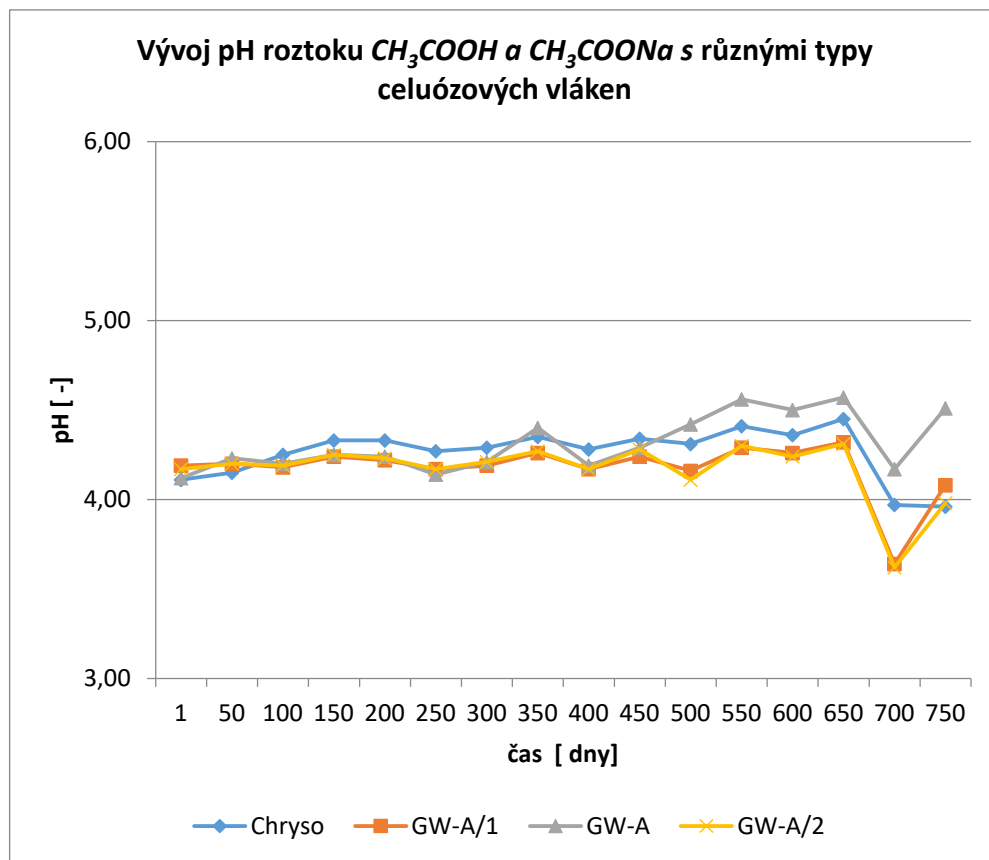
Graf 9 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A/1

Vývoj pH u prostředí s vlákny GREENCEL GW.A/1 a GW-A/2 byl velmi podobný vývoji pH s vlákny GW-A.



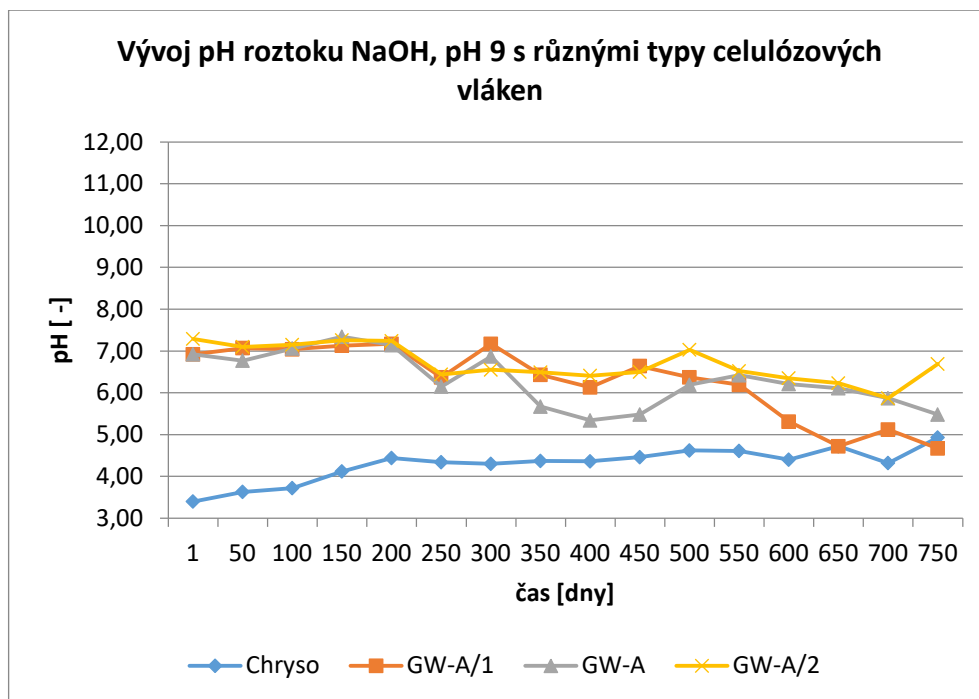
Graf 10 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A/2

Na následujících grafech (11 - 15) jsou představeny jednotlivé prostředí, ve kterých jsou uložena celulózní vlákna.

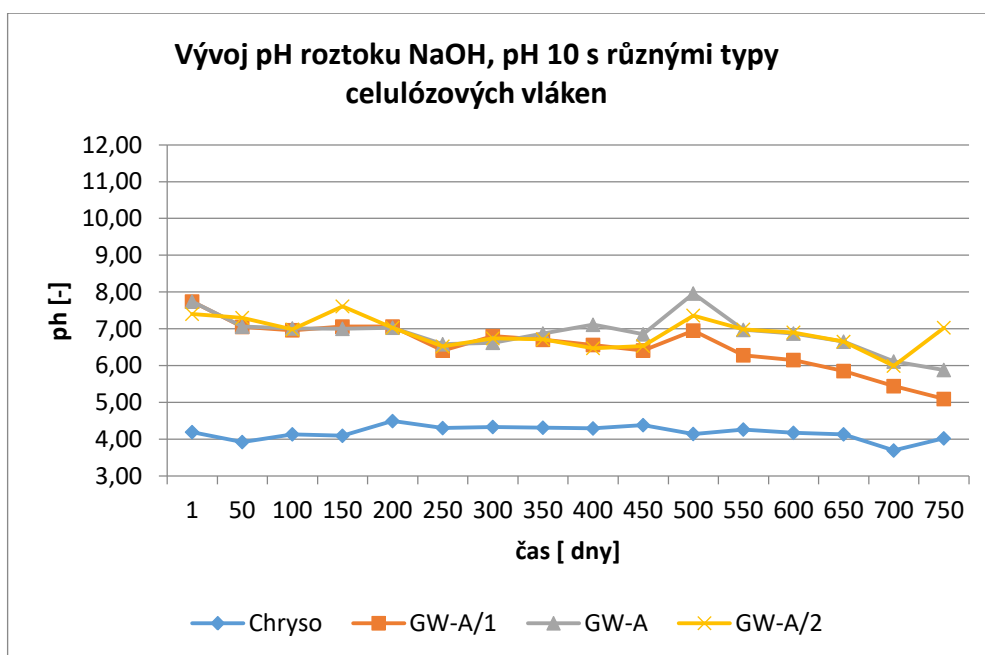


Graf 11 Vývoj pH roztoku kyseliny octové CH_3COOH a octanu sodného CH_3COONa , pH 4,2 s různými typy celulózních vláken v čase

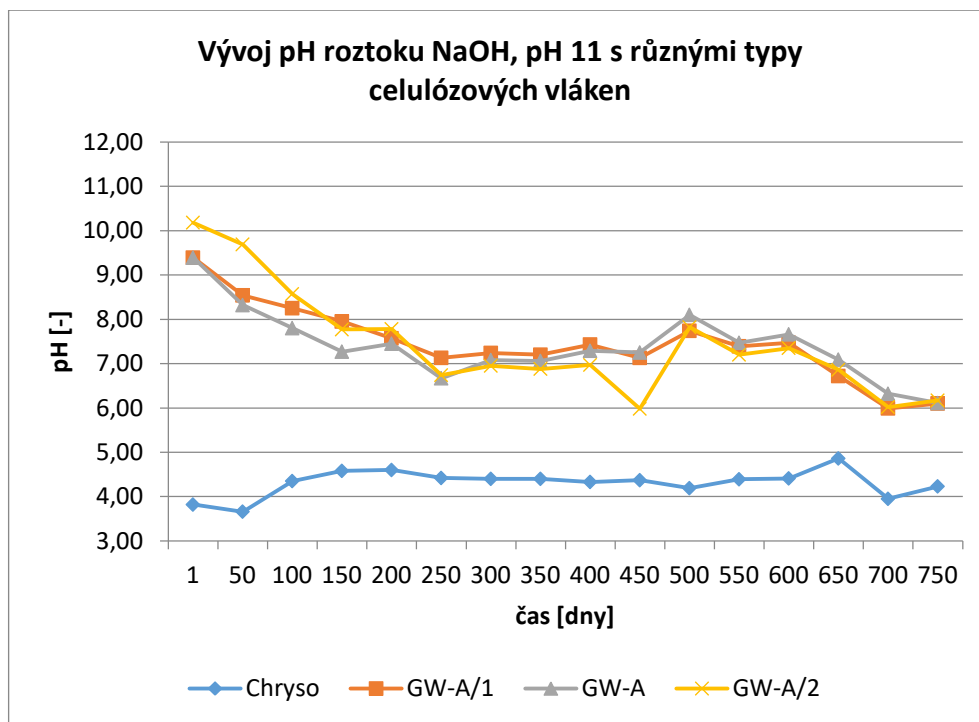
U CH_3COOH a CH_3COONa byl vývoj pH u roztoku s celulózními vlákny velmi podobný. Naměřené hodnoty pH se pohybovaly okolo hodnoty 4,2 a nejvyšší naměřené hodnoty pH 4,6 bylo dosaženo u roztoku s vlákny GW/A. Na následujících grafech (12 - 15) jsou znázorněny sodné roztoky. S vyšší zásaditostí roztoků NaOH také dle předpokladů rostou hodnoty pH u roztoků s celulózními vlákny. Nejvyšší pokles pH o 30 % je u zásaditých roztoků NaOH, 11 a 12. Dále už se naměřené hodnoty u roztoků pohybují v neutrálních hodnotách.



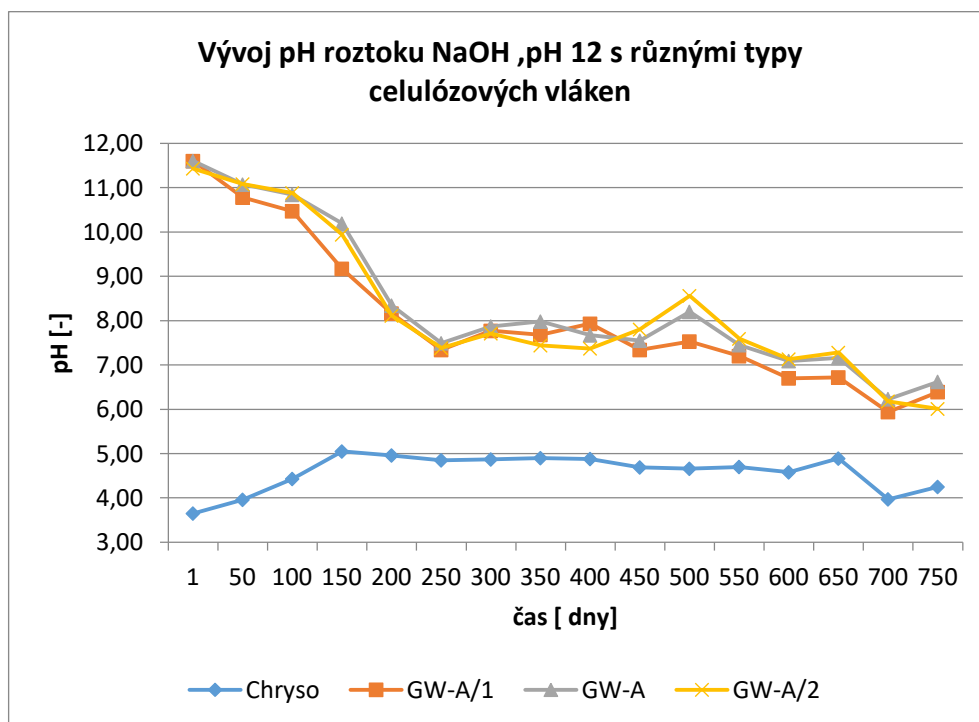
Graf 12 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 9 s různými typy celulóзовých vláken v čase



Graf 13 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 10 s různými typy celulóзовých vláken v čase



Graf 14 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 11 s různými typy celulózových vláken v čase



Graf 15 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 12 s různými typy celulózových vláken v čase

Na základě dlouhodobého měření a pozorování celulózových vláken vystavených alkalickému a kyselému prostředí lze říci, že všechny čtyři typy vláken odolaly působení agresivního prostředí. U roztoků s vlákny GREENCEL se projevil

vývoj naměřených hodnot dle předpokladu, naopak u roztoků s vlákny CHRYSO Fiber se hodnoty pH u všech roztoků pohybovaly v kyselém spektru a to i přesto, že byly roztoky NaOH silně zásadité.

5.2 Mikroskopie celulóзовých vláken

Pomocí optického mikroskopu Leica DM4000 M LED ve výzkumné instituci AdMaS byly pořízeny snímky celulóзовých vláken GREENCEL GW-A/1 a CHRYSO Fibre UF-500. Mikroskop umožňuje pozorování jak v odraženém, tak i prošlém světle. Polarizace v prošlém světle umožňuje studium mineralogického složení tenkých výbrusů např. omítek, betonů a jiných stavebních materiálů. V odraženém světle je pak možné pozorování ve světlém i tmavém poli a rovněž přístroj umožňuje fluorescenční pozorování při excitaci UV, modrým a zeleným světlem. Součástí mikroskopu je ovládací software s modulem pro analýzu obrazu a zařízení pro přípravu leštěných nábrusů a výbrusů. [22]



Obrázek 37 Optický mikroskop Leica DM4000 M LED [22]

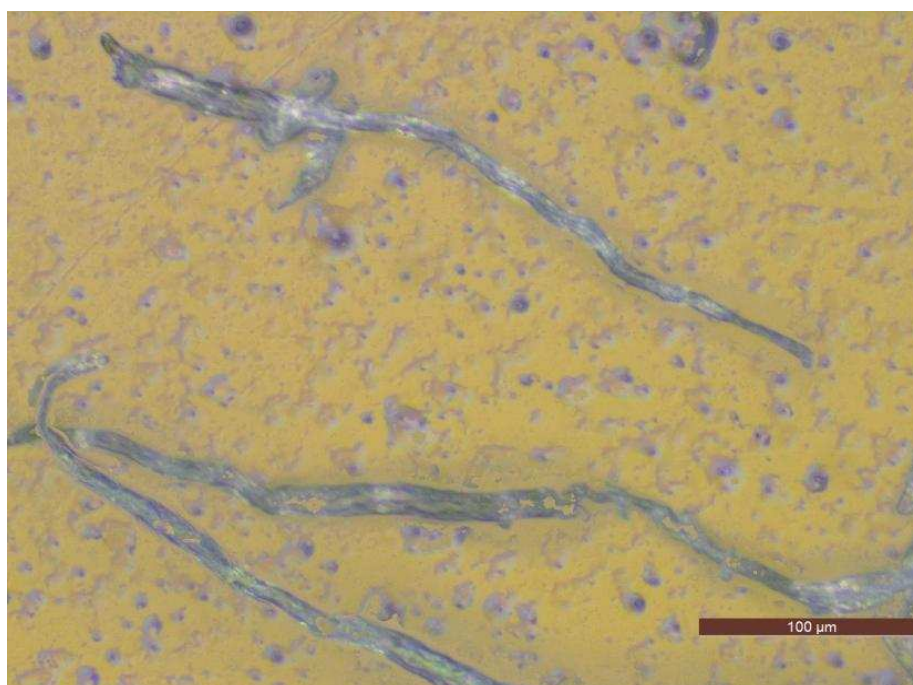
5.2.1 Snímky vláken z optického mikroskopu

Vlákna GREENCEL GW-A/1 a CHRYSO Fibre UF-500 byly podrobeny analýze optickým mikroskopem. Zkoumaná celulóзовá vlákna nebyla před měřením použita.

Snímky vláken GREENCEL GW-A/1 jsou znázorněny na obrázcích 38 – 39. Vlákná jsou vláknitého tvaru o průměrné tloušťce 22 μm a průměrné délce 75 μm .

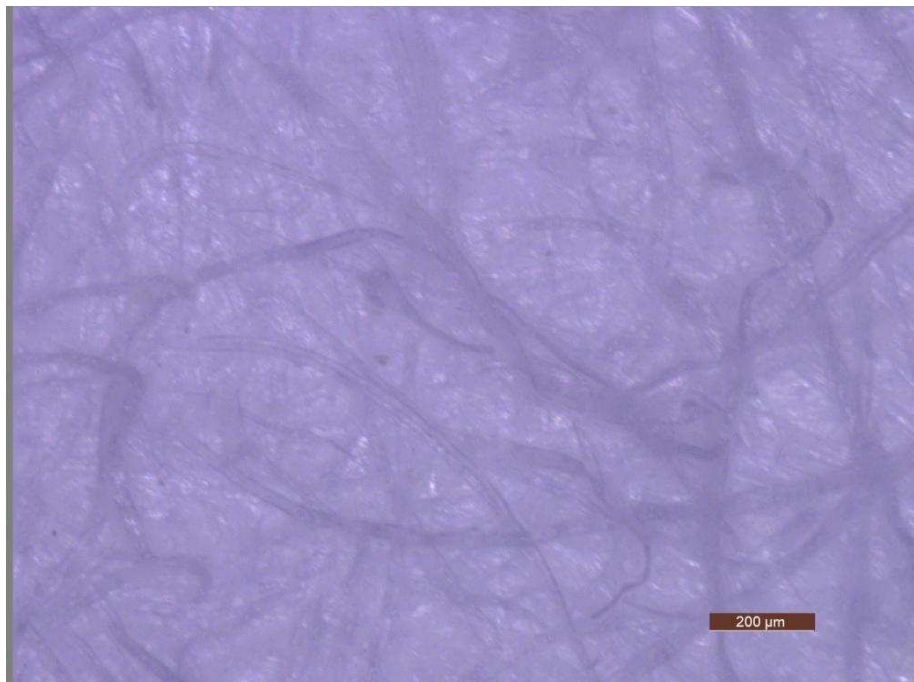


Obrázek 38 Snímek celulózových vláken GREENCEL GW-A/1 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 200 μm

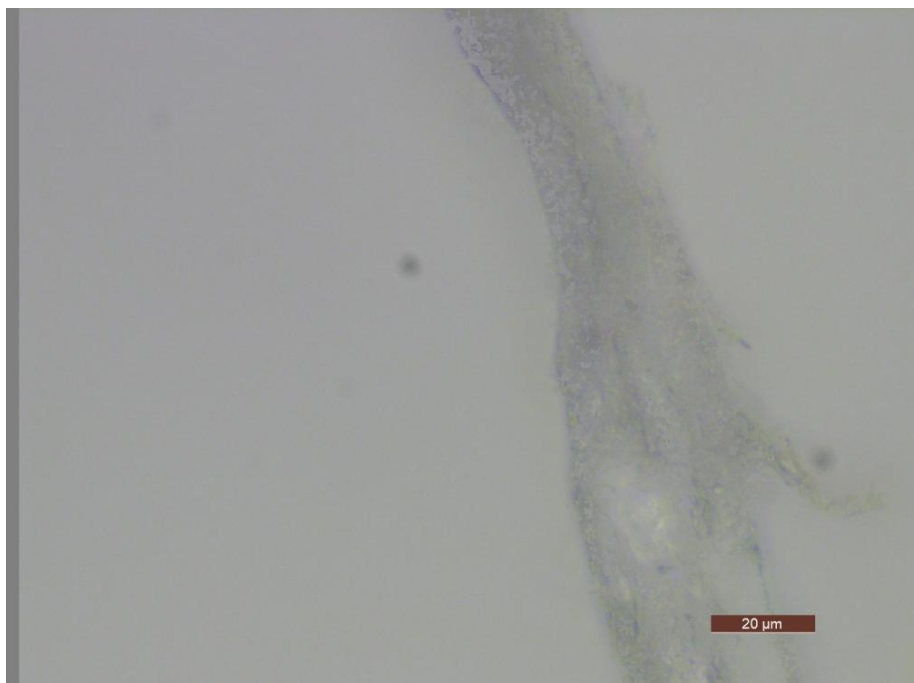


Obrázek 39 Snímek celulózových vláken GREENCEL GW-A/1 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 100 μm

Snímky vláken CHRYSO Fibre UF-500 jsou znázorněny na obrázcích 40 - 41. Vlákná dosahují délky 150 μm a průměrné tloušťky 20 μm .



Obrázek 40 Snímek celulóзовých vláken CHRYSO Fibre UF-500 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 200 μm



Obrázek 41 Snímek celulóзовých vláken CHRYSO Fibre UF-500 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 20 μm

6 Složení betonů

V další fázi bylo provedeno sledování vlivu přídavku celulóзовých vláken na vlastnosti betonu. Jako referenční REF byl vyroben beton bez vláken, beton GR obsahoval vlákna GREENCEL GW-A/1 v dávce 1 kg na 1 m³, beton CHR obsahoval vlákna CHRYSO Fibre UF-500 s dávkováním 1 kg na 1 m³. Složení betonu jednotlivých receptur je znázorněno v následující tabulce.

Tabulka 16 Receptura: referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GW-A/1 s beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

Složka	REF	GR	CHR
	1 m ³ [kg]	1 m ³ [kg]	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5	340	340	340
Drobné čedičové kamenivo 0-4	1217	1217	1217
Hrubé čedičové kamenivo 4-8	391	391	391
Hrubé čedičové kamenivo 8-16	537	537	537
Voda	160	160	160
Plastifikátor STACHEMENT 2050 (FM)	3,4	3,4	3,4
Celulóзовé vlákna GREENCEL GW-A/1	-	1	1
Celulóзовé vlákna CHRYSO Fibre UF-500	-	1	1

Použitá celulóзовá vlákna GREENCEL GW-A/1 a CHRYSO Fibre UF-500. v experimentální části jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 42 Použitá celulóзовá vlákna v experimentální části, vlákna GREENCEL GW-A/1 (vlevo), vlákna CHRYSO Fiber UF-500 (vpravo)

7 Provádění zkoušky

7.1 Zkoušky prováděné na čerstvém betonu

7.1.1 Zkouška konzistence metodou sednutí kužele

Podstatou zkoušky je zhutnění betonu ve formě tvaru komolého kužele. Plynulým zvednutím komolého kužele nahoru se změří vzdálenost, o kterou beton poklesl. Ze vzdálenosti poklesu se zařídí do tabulky konzistence betonu. Zkouška sednutí vychází z evropské normy ČSN EN 12 350 – 2.

Zkušební zařízení:

- Forma vytvářející zkušební těleso,
 - Průměr dolní základny: 200 ± 2 mm,
 - Průměr horní základny: 100 ± 2 mm,
 - Výška: 300 ± 2 mm.
- Propichovací tyč,
- Násypka,
- Pravítko,
- Podkladní deska/ povrch,
- Lopata,
- Vlhký hadřík.

Postup zkoušky:

Připraví se navlhčená forma s podkladní deskou. Forma se položí na podkladní desku a po celou dobu zkoušky musí být forma pevně spojená s podkladní deskou. Použije se násypka pro snadnější plnění formy. Forma se plní čerstvou betonovou směsí ve třech vrstvách a hutní se 25 vpichy propichovací tyčí. Po zhutnění první vrstvy je nutno propichovací tyč mírně naklonit a asi polovina vpichů je rozložena spirálovitě ke středu. Zhutňování první vrstvy musí probíhat, aniž by se propichovací tyč dotýkala podkladní desky. Zhutňování druhé a třetí vrstvy probíhá stejně jako u první s tím rozdílem, že vpichy zasahují mírně do vrstvy předcházející. U třetí vrstvy se čerstvý beton naplní více přes okraj formy. Odstraní se násypka a forma se zarovná a poté se plynule zvedá forma po dobu 2 až 5 sekund. Forma se postaví vedle sednutého

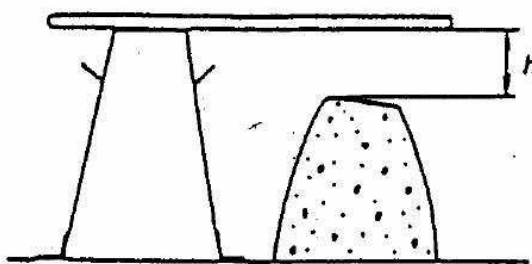
zkušebního vzorku a změří se rozdíl výšek mezi nejvyšším bodem sednutého zkušebního vzorku a formou.

Výsledek zkoušek:

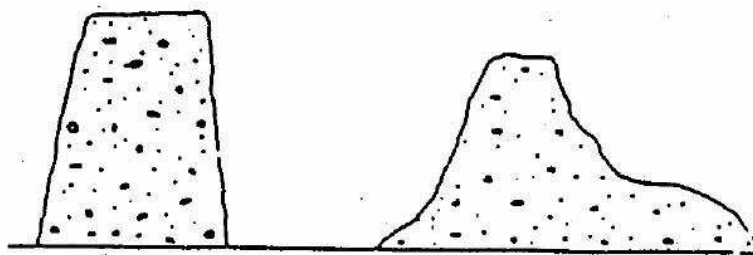
- Dojde-li ke skutečnému sednutí, tzn., že beton zůstal neporušen a kužel je symetrický, výsledek zkoušky je platný
- Jestliže se těleso zborší, musí se odebrat jiný vzorek a postup opakovat,
- Jestliže dojde k následnému usmýknutí betonu zkušebního tělesa, pak beton nemá dostatečnou plasticitu a soudržnost a je nevhodný pro zkoušku sednutí.
- Zaznamená se skutečné sednutí (h) s přesností na 10 mm,
- Sednutí kužele se zařídí podle stupňů konzistence: S0 – směs velmi tuhá, S1 – směs tuhá, S2 – směs plastická, S3 – směs měkká, S4 – směs velmi měkká, S5 – směs tekutá.[12]

Tabulka 17 Klasifikace podle sednutí kužele

Stupeň	Sednutí S [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220



Obrázek 43 Měření sednutí



Obrázek 44 Tvary sednutí, vlevo správné sednutí, vpravo usmyknuté sednutí

7.1.2 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

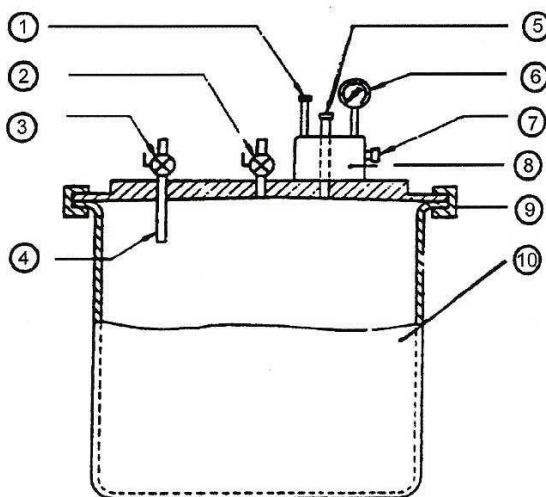
Pro stanovení obsahu vzduchu čerstvého betonu se používají dvě metody – Metoda vodního sloupce a tlakoměrná metoda a zkušební zařízení se nazývají měřicí přístroj s vodním sloupcem a tlakoměrný přístroj. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu vychází z evropské normy ČSN EN 12 350 – 7.

V diplomové práci jsem používal tlakoměrnou metodu, která je popsána níže.

Tlakoměrná metoda.

Zkušební přístroj se skládá:

- Nádobu – jedná se o válcovou nádobu z oceli nebo jiného tvrdého kovu, který nesmí reagovat s cementovou kaší, s objemem nejméně 5 l. S poměrem průměru k výšce v rozmezí 0,75 – 1,25. Vnější okraje a vnitřní povrch nádoby musí mít hladký povrch. Nádobu musí být vodotěsná a kromě toho musí být nádoba i víko odolné na zkušební tlak přibližně 0,2 MPa.
- Víko – tuhé víko opatřené přírubou, zhotovené z oceli nebo z jiného tvrdého kovu, který nesmí reagovat s cementovou kaší. U víka musí být povrch hladce opracovaný a příruba s víkem musí zajistit, aby s nádobou neunikal žádný vzduch.
- Tlakoměr – připevněný k víku, nastavený tak, aby mohl měřit obsah vzduchu od 0 % do 8 % a přednostně až do 10 %. Stupnice musí být dělena rozdílně a to, s dílky po 0,1 % pro rozsah 0 – 3 %, s dílky po 0,2 % pro rozsah 3 – 6 % a s dílky po 0,5 % pro rozsah 6 – 10 %.
- Vzduchová hustilka – zabudovaná do víka. [13]



Obrázek 45 Přístroj pro tlakovou metodu

Legenda

- | | |
|--|-------------------------|
| 1) Hustilka (kompresor) | 6) Tlakoměr |
| 2) Ventil B | 7) Odvzdušňovací ventil |
| 3) Ventil A | 8) Vzduchová komora |
| 4) Prodlužovací hadička trubice pro kalibrační zkoušky | 9) Svorky |
| 5) Hlavní vzduchový ventil | 10) Nádoba |

Postup zkoušky

Nádoba se naplní v jedné nebo více vrstvách čerstvým betonem a hutní se buď ponorným vibrátorem, na vibračním stole, propichovací tyčí nebo pomocí zhutňovací tyčí. Obvykle beton s konzistencí sednutí stupně S3 nebo větší bude vyžadovat pouze jednu vrstvu. V případě samozhutnitelného betonu se nepoužívají žádné metody zhutňování.

Naplněná a zhutněná nádoba s čerstvým betonem se zarovná a očistí se okraje, aby došlo k dokonalému kontaktu mezi nádobou a víkem. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavře a otevřou se ventily A a B. Přístroj se naplní vodou tak, že se voda vstříkuje pryžovou stříčkou do ventilu A nebo B, tak dlouho, dokud nevytéká voda z druhého ventilu. Paličkou se lehce poklepe po stěnách nádoby, aby se odstranily vzduchové bubliny. Ventil na vypouštění vzduchu ze vzduchové komory se uzavře a do vzduchové komory se pumpuje vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Vzduch se ponechá po několik sekund stlačený, aby se vyrovnala jeho teplota s okolní teplotou. Pokud je to potřeba, nastaví se poloha ručičky tlakoměru na

počáteční hodnotu tlaku vypouštěním nebo připumpování vzduchu, popřípadě se tlakoměr lehce poklepe. Ventily A a B se uzavřou a otevře se hlavní ventil vzduchu. Na tlakoměru se odečte hodnota tlaku, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu A1 v procentech. Před otevřením víka se otevřou ventily A a B, aby se uvolnil tlak. [13]

7.1.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Podstatou zkoušky je čerstvý beton, který je zhutněn v tuhé a vodotěsné nádobě známého objemu a hmotnosti a následně je zvážen. Objemová hmotnost byla stanovena dle evropské normy ČSN EN 12 350 – 6.

Zkušební zařízení:

- Nádobu,
- Plnicí nástavec,
- Vybavení na zhutnění betonu,
- Váhy,
- Srovnávací pravítko,
- Lopatka,
- Ocelová zednická lžice nebo hladítko,
- Nádobu na promíchání,
- Lopata,
- Palička.

Postup zkoušky:

K zjištění hmotnosti nádoby (m_1) se nádoba zváží a zaznamená. V závislosti na konzistenci betonu a metodě zhutňování se nádoba plní ve dvou nebo více vrstvách, aby se docílilo úplného zhutnění, s výjimkou samozhutnitelných betonů. Beton se zhutňuje ihned po vložení do nádoby tak, aby se dosáhlo úplného zhutnění betonu bez nadměrné segregace a bez odlučování vody. [14]

Beton se zhutňuje pomocí:

- Zhutňování ponorným vibrátorem,
- Zhutňování na vibračním stole,
- Ruční zhutňování, propichovací nebo zhutňovací tyčí,

Po zhutnění horní vrstvy se zarovná povrch betonu do roviny s horním okrajem nádoby ocelovou zednickou lžící nebo hladítkem. Přebytečný beton se odstraní srovnávacím pravítkem a nádoba se na vnějším povrchu očistí. Naplněná nádoba se zváží, aby se zjistila její hmotnost (m_2) a tato hodnota se zaznamená.

Výpočet objemové hmotnosti

Objemová hmotnost se vypočte z následujícího vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

D objemová hmotnost čerstvého betonu, v kg/m^3

m_1 hmotnost prázdné nádoby, v kg

m_2 hmotnost naplněné nádoby, v kg

V objem nádoby, v m^3

Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 . [14]

7.2 Zkoušky prováděné na zatvrdlém betonu

7.2.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Tato norma uvádí metodu pro stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu. Je použitelná pro lehký, obyčejný i těžký beton. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu vychází z evropské normy ČSN EN 12390 -7.

Rozlišuje se objemová hmotnost ztvrdlého betonu v následujících krocích:

- jak byl dodán.
- nasycen vodou.
- vysušen v sušárně.

Stanoví se hmotnost a objem zkušebního tělesa ze ztvrdlého betonu a vypočítá se objemová hmotnost.

Zkušební zařízení

- posuvná měřítka a pravítka,
- váhy.

Nejmenší objem zkušebního tělesa musí být 0,785 litrů. Jestliže jmenovitý největší rozměr frakce kameniva ve zkušebním tělese, betonovaném do formy, je větší než 25

mm, pak nejmenší objem nesmí být menší než $50 D^3$, kde D je jmenovitá největší velikost zrna hrubého kameniva. Běžně se používá pro stanovení celé zkušební těleso, jak bylo dodáno. Jestliže tvar nebo velikost tělesa jsou takové, že není možné ho použít celé, může se z původního tělesa odlomit nebo odříznout menší zkušební těleso. Tělesa upravená koncováním se nesmí použít. [15]

Postup zkoušky

Postup stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu jak bylo těleso dodáno:

Zváží se těleso, jako bylo dodáno (m_r), s přesností na 0,01 % hmotnosti tělesa. Zaznamená se zjištěná hodnota, v kg. Objem zkušební tělesa V se vypočítá z rozměrů zkušební tělesa změřených v souladu s EN 12390-1, v m^3 , zaokrouhleny na čtyři platné číslice.

Objemová hmotnost se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$D = \frac{m}{V}$$

D	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, v kg/m^3
m	Hmotnost zkušební tělesa, v kg
V	Stanovený objem, v m^3

7.2.2 Pevnost v tlaku zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu, který vyhovuje EN 12390-4. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa se zaznamená a vypočte se pevnost betonu v tlaku. Pevnost v tlaku zkušebních těles je stanovena podle evropské normy ČSN EN 12390 -3.

Zkušební těleso musí být krychle, válec nebo vývrt, vyhovující požadavkům EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 nebo EN 12504-1.

Postup zkoušky

Na tlačných deskách lisu se očistí dotykové plochy, jako jsou úlomky betonu nebo jiný uvolněný materiál z povrchu zkušební tělesa. Zkušební těleso se umístí na tlačnou desku do zkušební lisu. Mezi těleso a tlačné desky zkušební lisu se nesmí

použít žádná podložka, kromě přídatných desek nebo středících bloků (viz. EN 12939-4).

Při zatěžování se nastaví konstantní rychlost od $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Po nastavení počátečního zatížení, které přibližně není větší než 30 % zatížení při porušení, zatěžuje se plynule, bez nárazu, a nepřerušit se zvyšuje stanovenou konstantní rychlostí s přípustnou odchylkou ± 10 % až do porušení.

Pokud se používá zkušební lis ručně ovládaný, je třeba upravovat vhodným kontrolním zařízením tendenci ke snižování stanovené rychlosti zatěžování před porušením tělesa. Zaznamená se dosažené maximální zatížení v KN.

Vyjádření výsledků

Pevnost v tlaku je dána následujícím vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

f_c	Pevnost v tlaku, v MPa (N.mm ⁻²),
F	Maximální zatížení při porušení, v N,
A_c	Průřezová plocha zkušební tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená ze jmenovité velikosti tělesa.

7.2.3 Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles – čtyřbodový ohyb

Hranolová zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Největší dosažené zatížení se zaznamená a vypočte se pevnost v tahu ohybem. Pevnost v tahu ohybem vychází z evropské normy ČSN EN 12390 – 5.

Zkušební zařízení

- Zkušební lis – zkouška se musí provádět ve zkušebním lisu, který vyhovuje EN 12390-4.

Zatěžování

Zařízení pro zatěžování musí sestávat z:

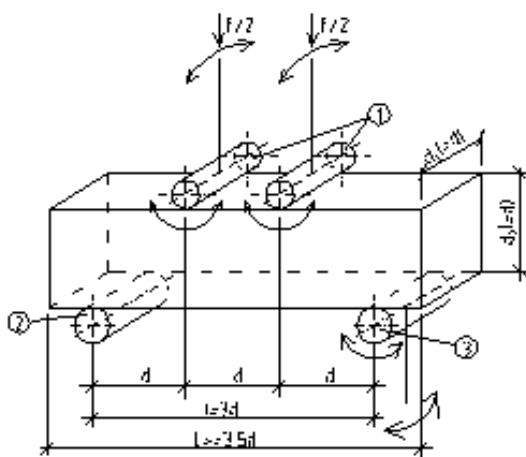
- dvou podpěrných válečků

- dvou horních zatěžovacích válečků, kloubově připojených k příčnému závěsu, který rozděluje zatížení z lisu stejnoměrně mezi oba válečky

Všechny válečky musí být vyrobeny z oceli s kruhovým průřezem o průměru 20 mm až 40 mm. Musí být nejméně o 10 mm delší, než je šířka zkušební tělesa. Tři válečky, včetně dvou horních, se musí volně otáčet kolem svých os a být výkyvné v rovině kolmé k podélné ose zkušební tělesa. Vzdálenost mezi podpěrnými válečky musí být rovna $3d$, kde d je šířka tělesa. Vzdálenost mezi zatěžovacími válečky musí být rovna d . Zatěžovací válečky musí být umístěny uprostřed mezi podpěrnými válečky.

Postup zkoušky

Zkušební těleso – hranol se umístí na dva podpěrné válečky do zkušební lisu. Zkušební těleso musí být umístěné tak, aby byla stejná vzdálenost u od obou podpěrných válečků na hranu zkušební tělesa – hranolu. Podpěrné válečky musí být od sebe ve vzdálenosti $3d$. Na zkušební těleso se umístí přípravek s horními zatěžovacími válečky. Zatěžovací válečky jsou od sebe ve vzdálenosti d . Zatěžování může začít, jakmile jsou všechny válečky správně umístěny. Nastaví se konstantní rychlost zatěžování v rozsahu od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s. Po začátečním působení zatížení, nepřesahujícím asi 20 % předpokládaného zatížení při porušení zatěhuje se plynule, bez nárazu, a zatížení se nepřetržitě zvyšuje stanovenou konstantní rychlostí $\pm 1\%$ až do porušení.[17]



Obrázek 46 Uspořádání zatěžování zkušební tělesa (zatěžování dvěma břemeny)

Legenda

- 1 Zatěžovací válečky (otočné a výkyvné)
- 2 Podpěrný váleček
- 3 Podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

Vyjádření výsledků

Pevnost v tahu ohybem je dána následujícím vztahem:

$$f_{cf} \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_1^2}$$

- | | |
|---------------|--|
| f_{cf} | Pevnost v tahu ohybem, v MPa |
| F | Maximální zatížení, v N |
| l | Vzdálenost mezi podpěrnými válečky, v mm |
| d_1 a d_2 | Rozměry příčného řezu tělesa, v mm |

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.[17]

7.3 Zatížení referenčního betonu a betonu s celulózovými vlákny při vysokých teplotách

Pro názornější simulování jak se chová beton vystavený vysokým teplotám, se použila pec Clasic s.r.o. U zkušebních těles se zkoumaly mechanické vlastnosti – pevnost v tlaku, fyzikální vlastnosti – deformační změny a také vizuální změny. Ke zkoušce se použily krychle 100 x 100 x 100 mm. Krychle byly ohřívány na teploty 600 °C a 800 °C s výdrží na teplotě 1 hodinu a plynulým náběhem teploty 10 °C/ min. Dále se u nich měřily deformační změny. Pro záznam deformací slouží měřící zařízení skládající se z tyče neměnnící svoje rozměry i při vysokých teplotách. Z vnější části pece k tyči náleží měřící zařízení, které snímá deformace v rozsahu 4000 µm, jak v kladných tak záporných hodnotách a naměřené hodnoty jsou zasílány do PC. Pro záznam naměřených hodnot se použil program VUT Brno Laboratorní pec 1.0 na PC.



Obrázek 47 Laboratorní pec Clasic a počítač pro zaznamenání hodnot

8 Výsledky zkoušek

8.1 Výsledky zkoušek na čerstvém betonu

Vlákna GREENCEL GW-A/1 byla přidána po zamíchání kameniva s pískem a cementem. Vlákna se musí dávkovat postupně do zapnuté míchačky, aby se snížila pravděpodobnost shlukování vláken. Pozorováním bylo zjištěno, že se vlákna po delší době rovnoměrně rozmíchávají do celého objemu a nedochází ke shlukování. Po přidání vody s postupným dávkováním plastifikační přísady nedocházelo k výraznému ulpívání vláken na stěny míchačky. U vláken CHRYSO Fibre UF-500 nedojde k tak dokonalému vmísení vláken do kameniva. Vlákna CHRYSO Fibre UF-500 nejsou tak kompaktní s kamenivem jako vlákna GREENCEL GW-A/1. Výhoda vláken CHRYSO Fibre UF-500 je jejich lepší manipulovatelnost, protože jsou ve formě čtverečků a tudíž se neshlukují. Pro rozmíchání vláken CHRYSO Fibre UF-500 je důležité použít minimální zrno kameniva 8 mm, pokud bychom použili pouze písek frakce 0/4 mm, nedojede k rozrušení čtverečků, do kterých jsou celulózová vlákna slisována – viz obr. 48. Na obrázcích č. 48 lze porovnat zamíchání výše zmíněných vláken s pískem.



Obrázek 48 Zamíchaná vlákna GREENCEL GWA/ 1 s pískem (vlevo) a vlákna CHRYSO Fibre UF-500 s pískem (vpravo)

U všech receptur byly provedeny u čerstvého betonu zkoušky sednutí a měření obsahu vzduchu. V tabulce č. 18 jsou vyhodnoceny zkoušky na čerstvém betonu.

Tabulka 18 *Výsledky zkoušek na čerstvém betonu*

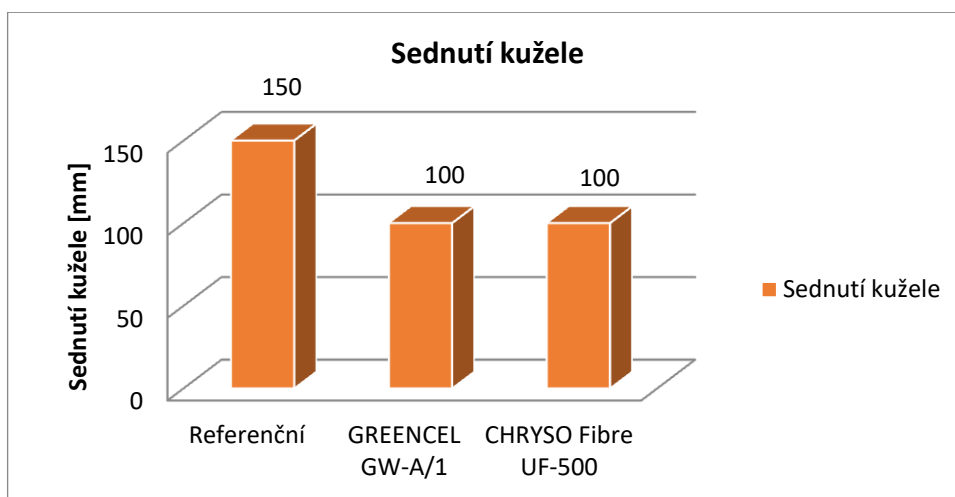
Prováděná zkouška	REF	GR	CHR
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2560	2540	2540
Zkouška sednutí [mm]	150	100	100
Obsah vzduchu [%]	2,5	2,1	2,2

REF – Referenční beton

GR - Beton s vlákny GREENCEL GW-A/1

CHR - Beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

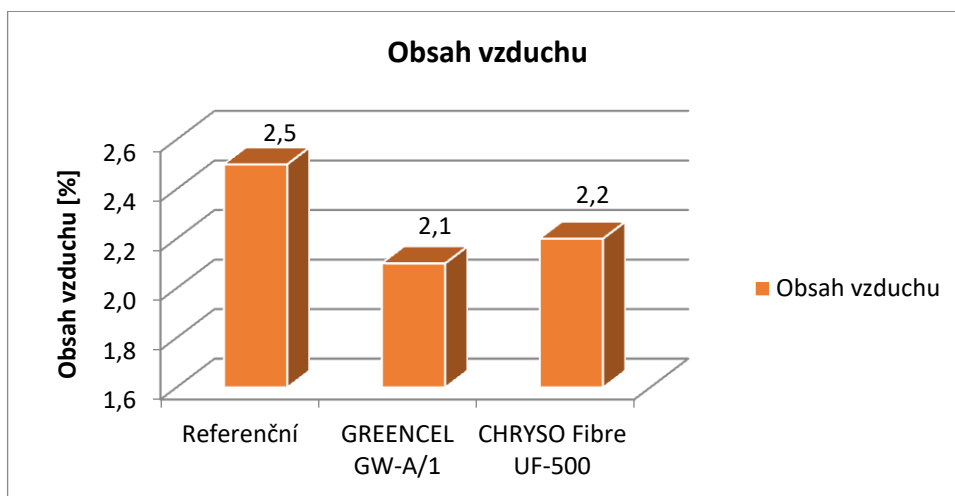
U referenčního betonu byla zkouška sednutí provedena dvakrát, protože při prvním pokusu byl beton ještě plastický, tak se znovu zamíchal a přidalo se 0,55 litrů vody. Zkoušku sednutí se zopakovala a tentokrát se beton klasifikoval do kategorie S3, tedy směs měkká. U receptury s vlákny GREENCEL GW-A/1 se podařilo stanovit vhodnou konzistenci na poprvé. Naopak u receptury s vlákny CHRYSO Fibre UF-500 se nepodařilo odhadnout odpovídající množství vody, tak se zkouška sednutí prováděla dvakrát.



Graf 16 *Srovnání sednutí kužele mezi jednotlivými recepturami; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500*

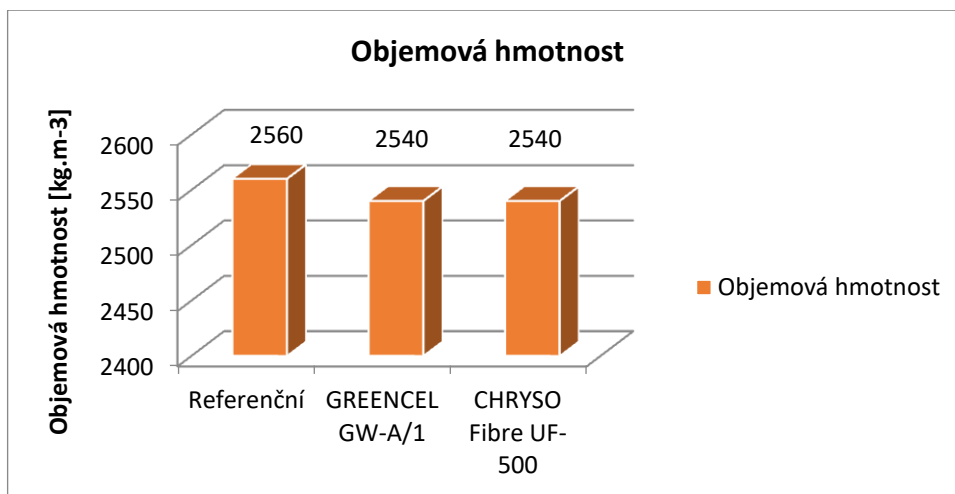
Při stanovení obsahu vzduchu bylo důležité dostatečně poklepat paličkou nádobu, aby se vytěsnil vzduchové bubliny a také důkladně očistit přírubu nádoby s víkem. Pozorováním grafu je patrný rozdíl mezi referenčním betonem a betonem s přidanými vlákny. Vlákna GREENCEL GWA/1 a CHRYSO Fibre UF-500 se podílejí

na vyplnění menších pórů a proto je jejich obsah vzduchu v betonu 2,1 a 2,2 %. Nižší hodnota obsahu vzduchu se také podílí na vyšší odolnosti proti mrazuvzdornosti.



Graf 17 Srovnání obsahu vzduchu mezi jednotlivými recepturami; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

Při provádění zkoušky došlo k velmi nepatrnému snížení objemové hmotnosti u betonů s vlákny oproti referenčnímu betonu. Bylo ukázáno, že různé druhy vláken nemají vliv na snížení objemové hmotnosti.



Graf 18 Srovnání objemové hmotnosti mezi jednotlivými recepturami; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

8.2 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu

Zkoušky na ztvrdlém betonu se prováděly po 28 dnech zrání při laboratorních podmínkách. Byly vytvořeny krychle o délce hrany 150 mm na zkoušení pevnosti

v tlaku a trámce 100 x 100 x 400 mm na zkoušení pevnosti v tahu za ohybu. Na ztvrdlém betonu byly prováděny zkoušky: Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a stanovení objemové hmotnosti. Zkoušky se prováděly dle norem uvedené v kapitole 9.2.2 a 9.2.3. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zpracovány v následující tabulce.

Tabulka 19 *Vyhodnocení zkoušek na ztvrdlém betonu*

Prováděná zkouška	REF	GR	CHR
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2540	2480	2540
Pevnost v tlaku [MPa]	40,1	41,2	39,7
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	4,2	4,3	4,5

REF – Referenční beton

GR - Beton s vlákny GREENCEL GW-A/1

CHR - Beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

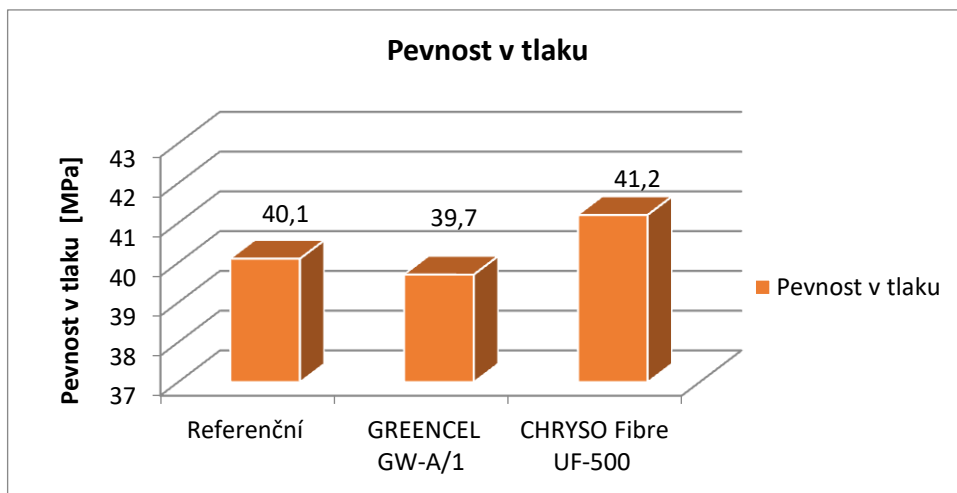
Pevnost v tlaku byla provedena na zkušebním lise Toni Technik.



Obrázek 49 *Zkušební lis Toni Technik*

U betonu s vlákny CHRYSO došlo k nárůstu pevnosti v tlaku oproti referenčnímu betonu o 3 %. Jedná se o velmi malý nárůst pevnosti, tak nelze s určitostí

říct, zda ho způsobila přidaná vlákna, nebo třeba dokonalejší zhutnění betonu. Pokles pevnosti u betonu s vlákny CHRYSO je velmi minimální.



Graf 19 Srovnání pevnosti v tlaku mezi jednotlivými recepturami; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla provedena na zkušebním lise VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig.

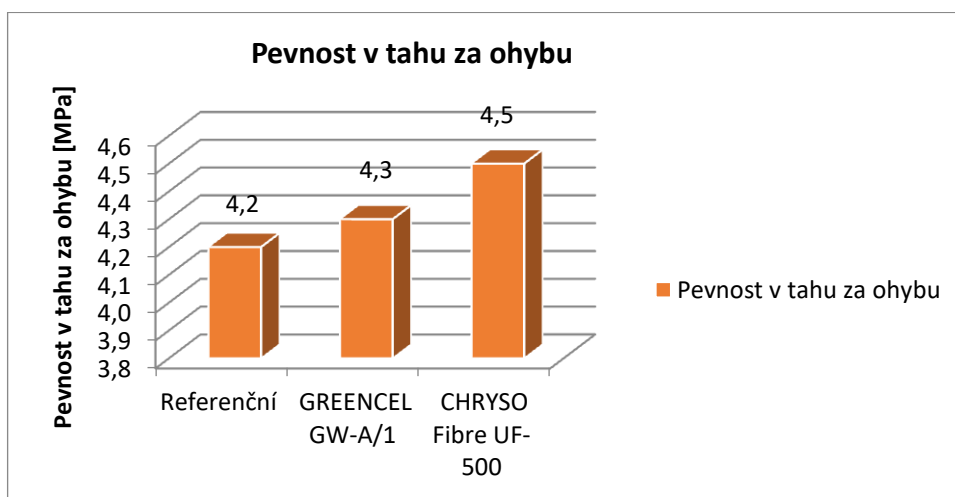


Obrázek 50 Zkušební lis VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig

Při vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu je patrný nárůst pevností o 8 % u trámců s vlákny CHRYSO Fibre-UF 500 oproti referenčnímu betonu. Jak udává výrobce, vlákna mohou zvyšovat pevnost v tahu za ohybu. [11] Na obrázku č. 51 lze pozorovat rovnoměrné rozložení všech složek kameniva v lomové ploše u trámce.



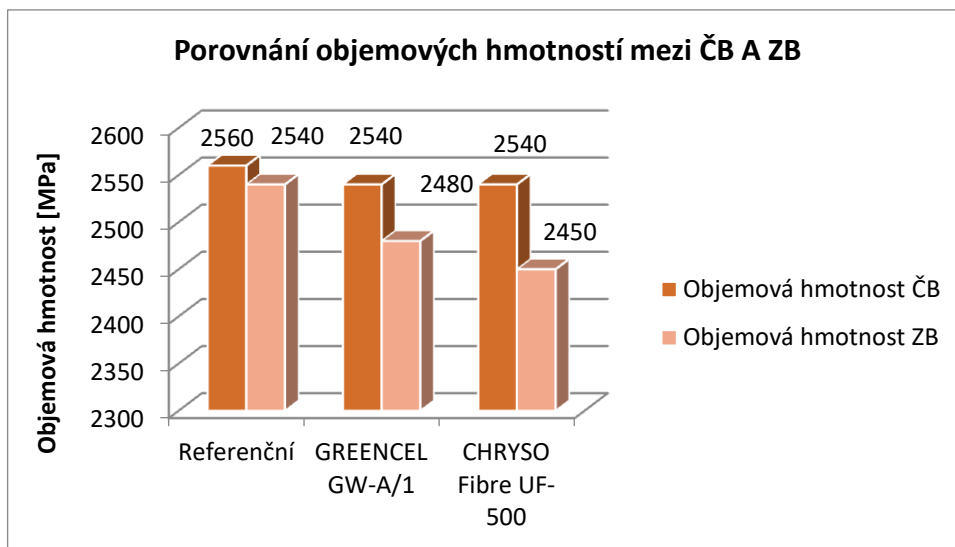
Obrázek 51 Lomová plocha u trámce po provedení zkoušky v tahu za ohybu



Graf 20 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu mezi jednotlivými recepturami; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

Porovnání objemových hmotností mezi ČB a ZB je znázorněný na následujícím grafu. Dle předpokladu došlo ke snížení objemové hmotnosti u ZB. Nejvýraznější

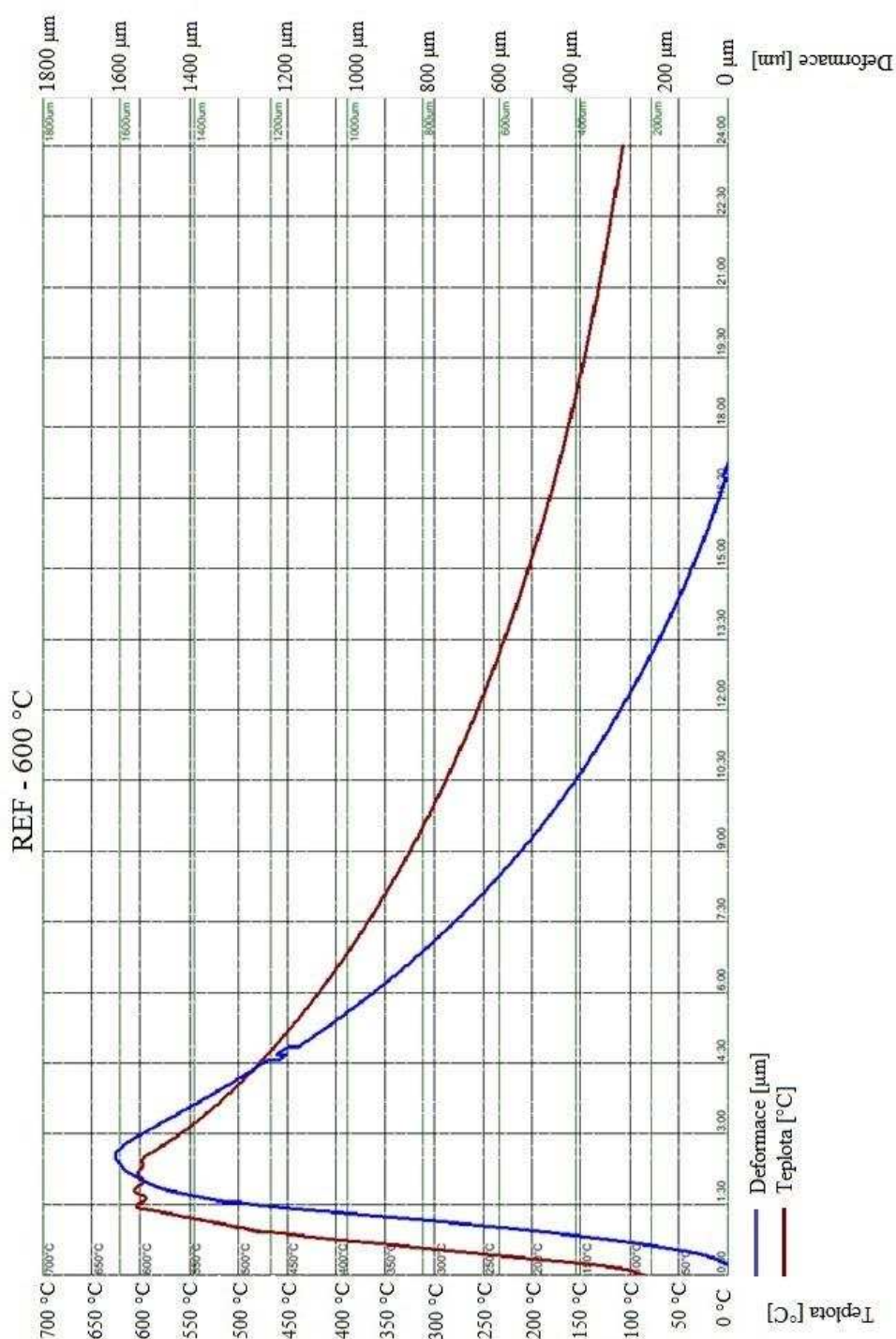
pokles je u betonu s vlákny CHRYSO o 4 %. Z poklesu objemových hmotností je patrný vliv přidanych vláken.



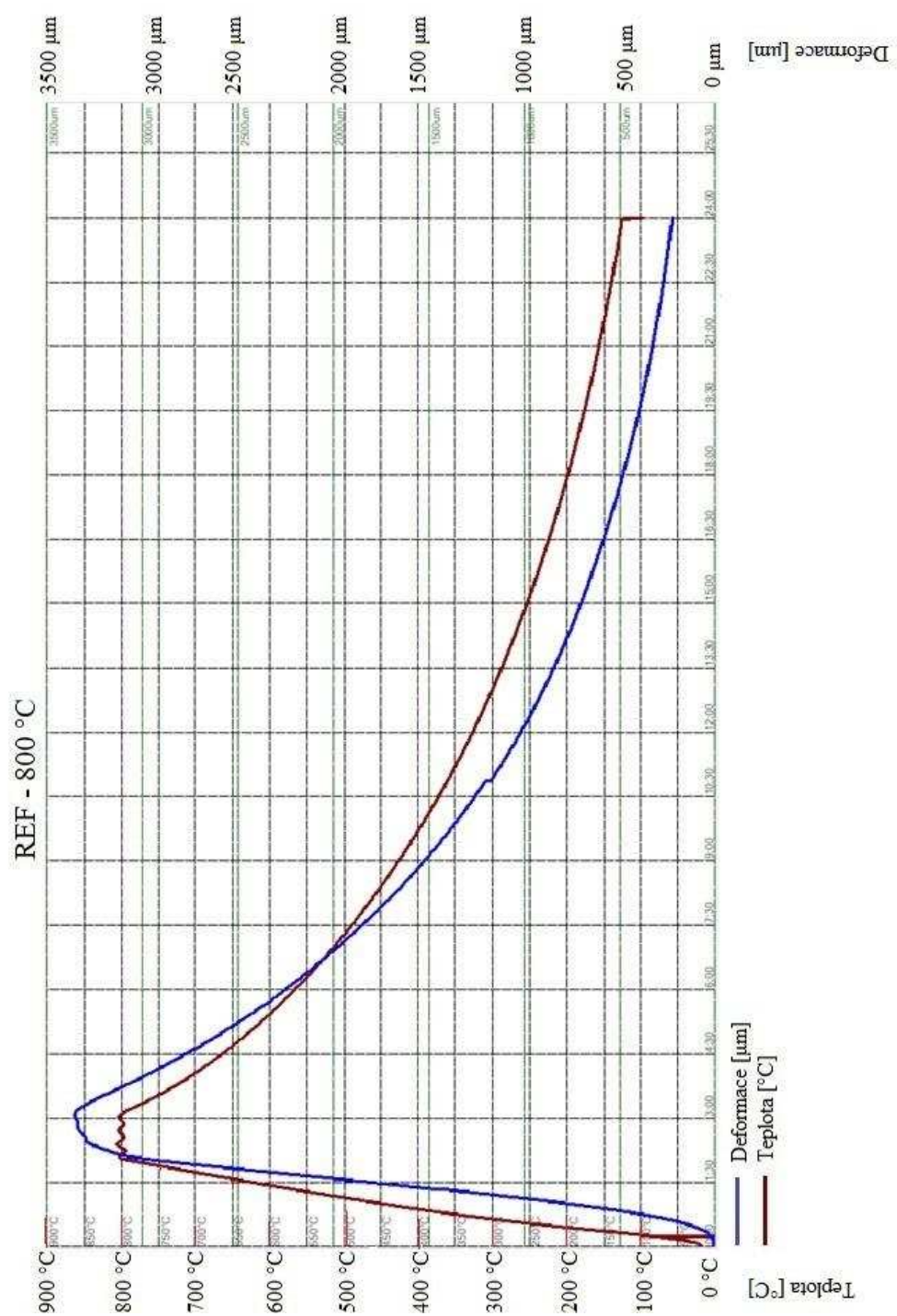
Graf 21 Srovnání objemové hmotnosti ČB a ZB u jednotlivých receptur; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500

8.3 Výsledky zkoušek na betonech vystavených vysokým teplotám

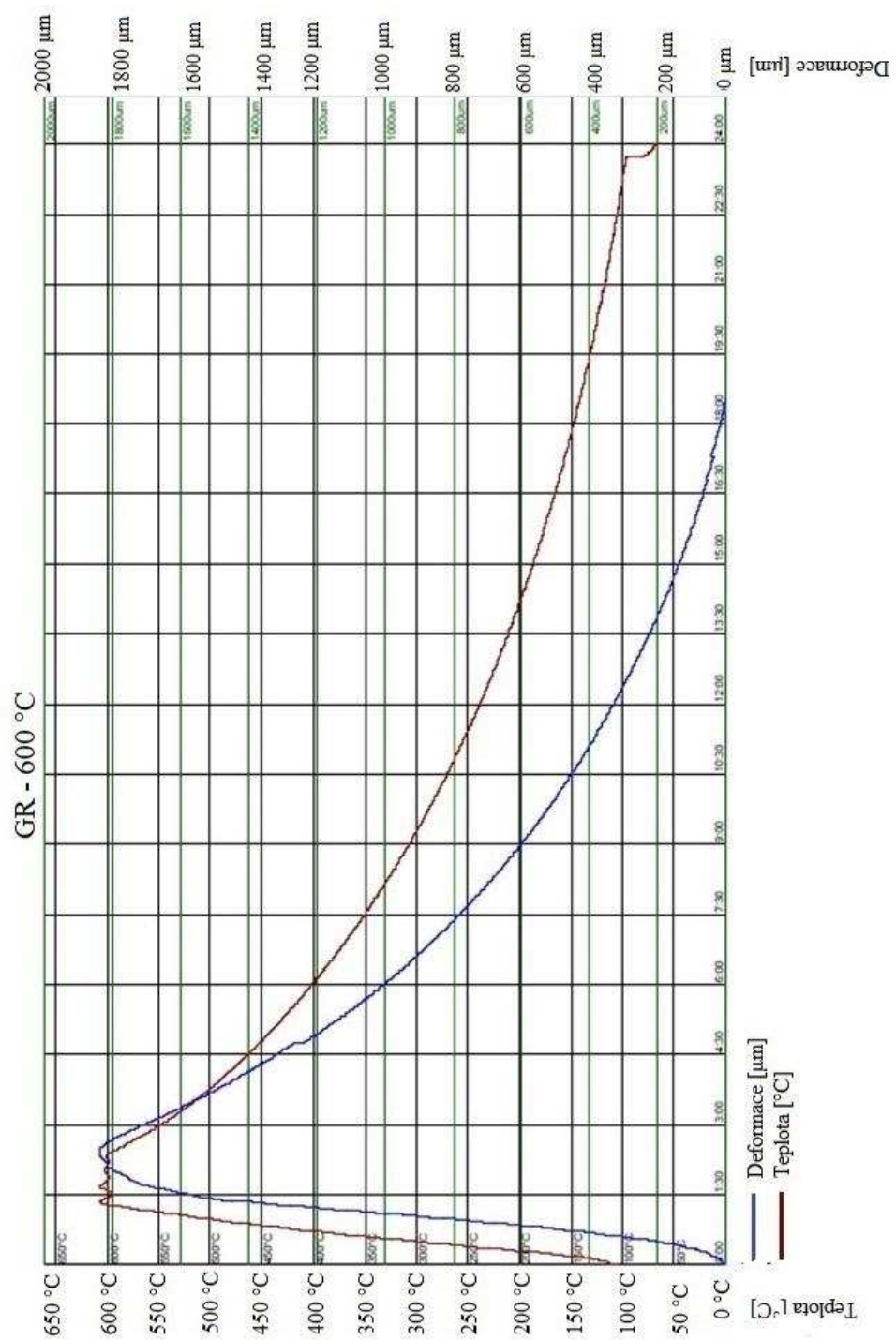
Zkušební tělesa byla vystavená vysokým teplotám 600 °C a 800 °C při současném měření deformací. Na následujících obrázcích (obr. 52 – 57) jsou grafy zkušebních těles. Na ose x je znázorněná doba zatěžování 24 hod, na ose y vlevo je znázorněná teplota ve °C a na ose y vpravo jsou znázorněny deformace v μm .



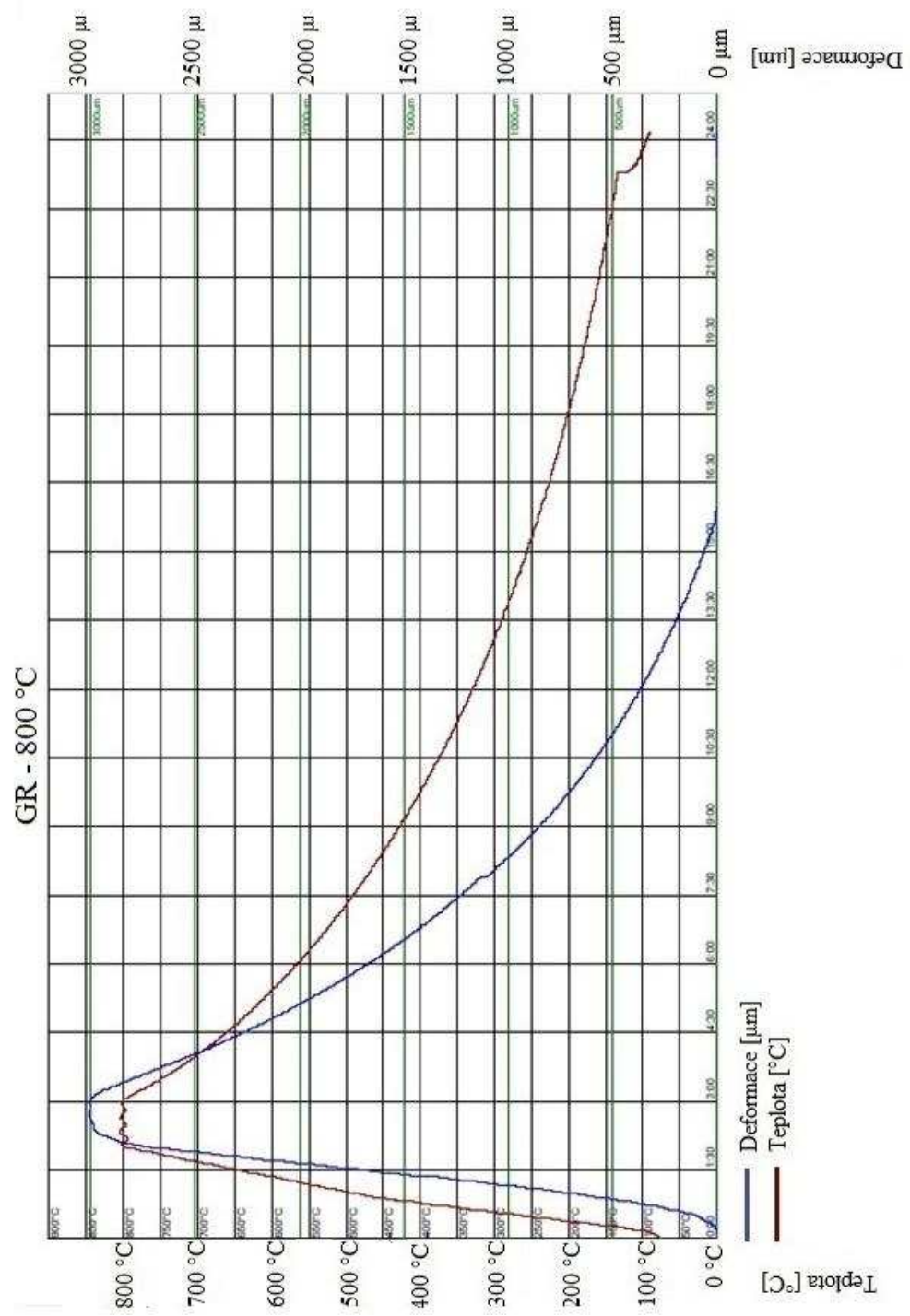
Obrázek 52 Zatížení referenčního betonu bez vláken na 600 °C



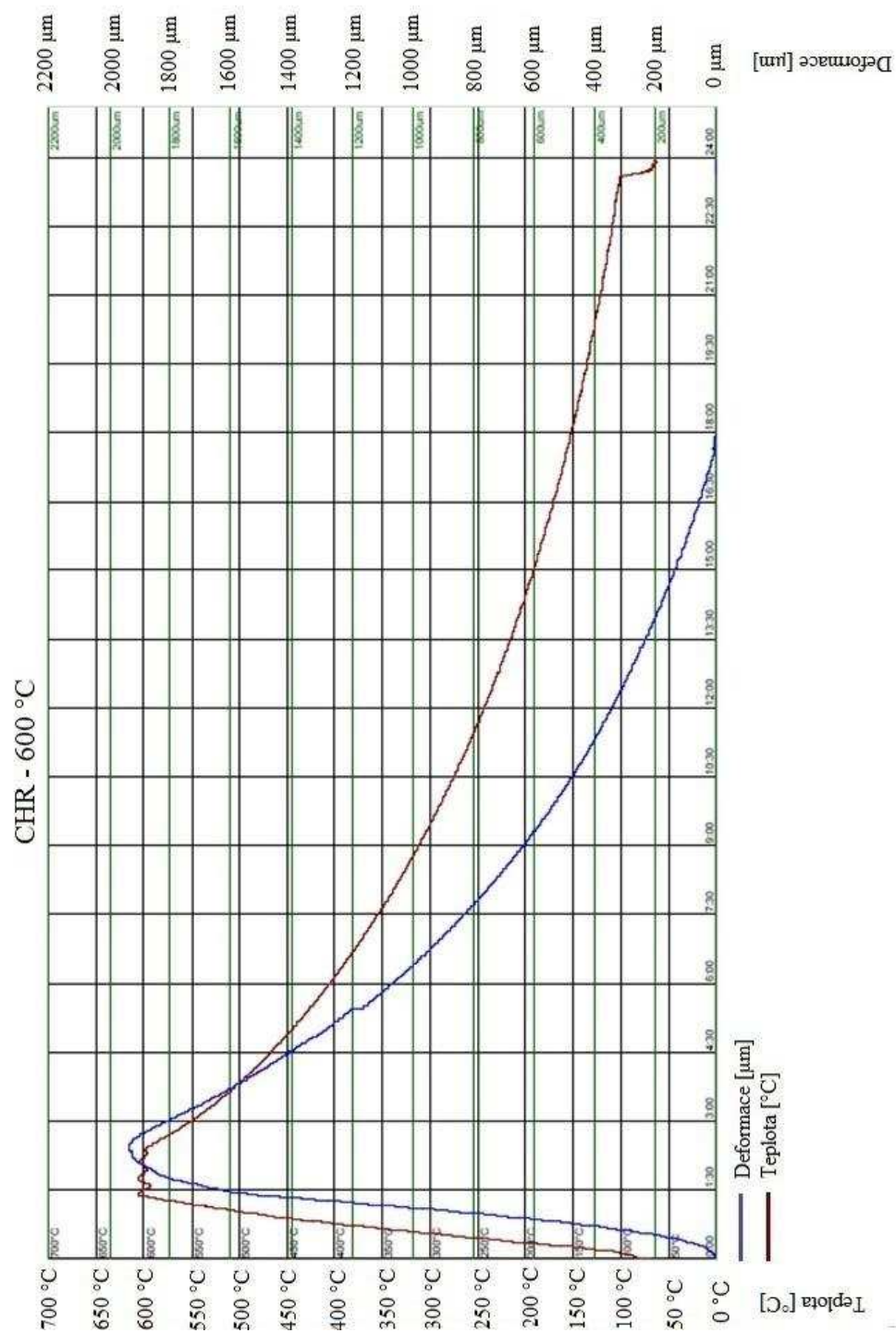
Obrázek 53 Zatížení referenčního betonu bez vláken na 800 °C



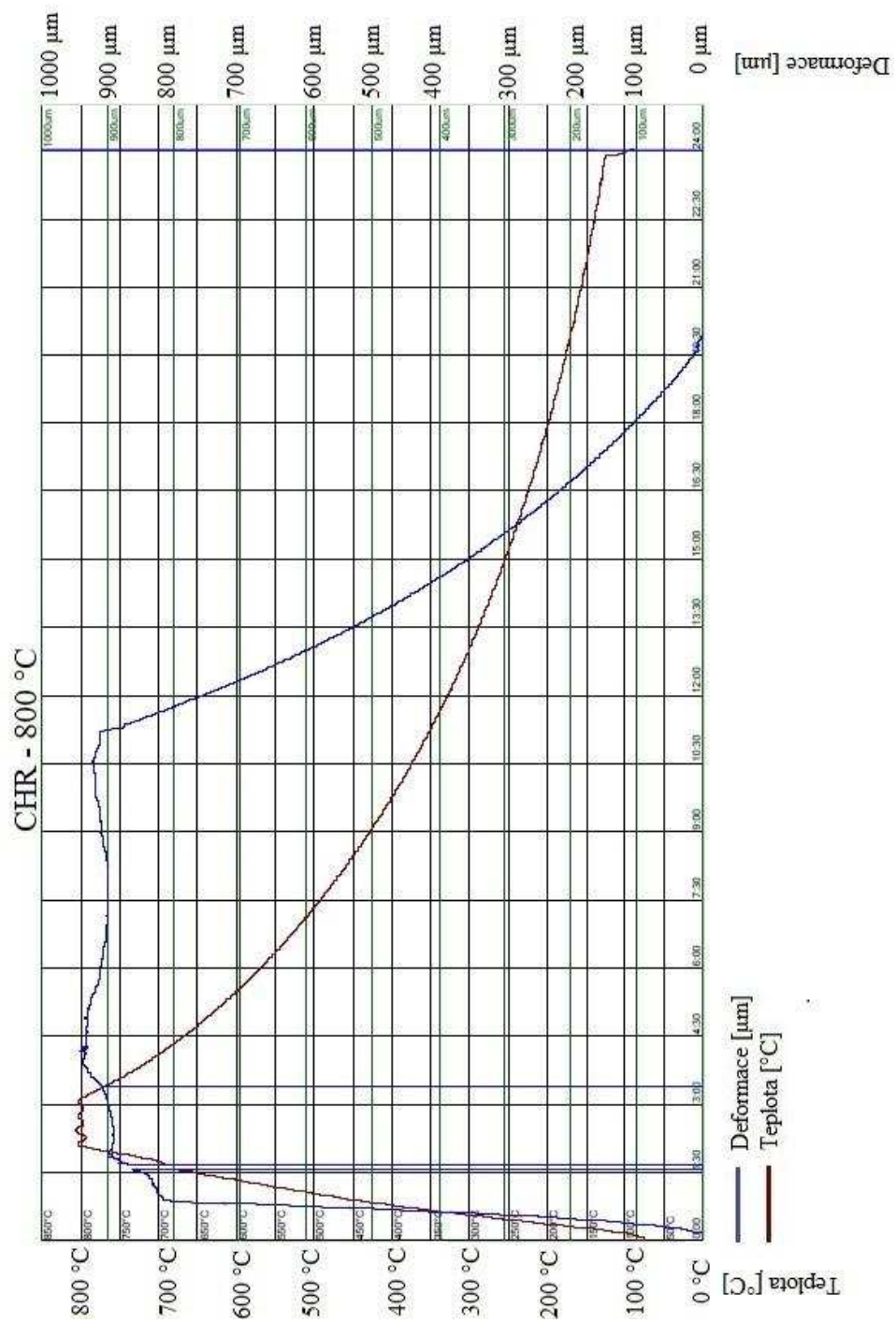
Obrázek 54 Zatížení betonu s vlákny GREENCEL GW-A1 na teplotu 600 °C



Obrázek 55 Zatížení betonu s vlákny GREENCEL GW-A1 na teplotu 800 °C



Obrázek 56 Zatížení betonu s vlákny CHRISO FIBER UF-500 na teplotu 600 °C



Obrázek 57 Zatížení betonu s vlákny CHRISO FIBER UF-500 na teplotu 800 °C, deformace nebyly naměřeny

8.3.1 Vyhodnocení maximálních deformací

V tabulce jsou vyhodnoceny dosažené maximální deformace u zkušebních těles vystavené vysokým teplotám.

Tabulka 20 Maximální deformace u zkušebních těles dosažené při vysokých teplotách

Receptura	Maximální deformace [μm]	
	600 °C	800 °C
REF	1609	3355
GR	1822	3009
CHR	1918	nezměřeno

REF - referenční beton, bez vláken

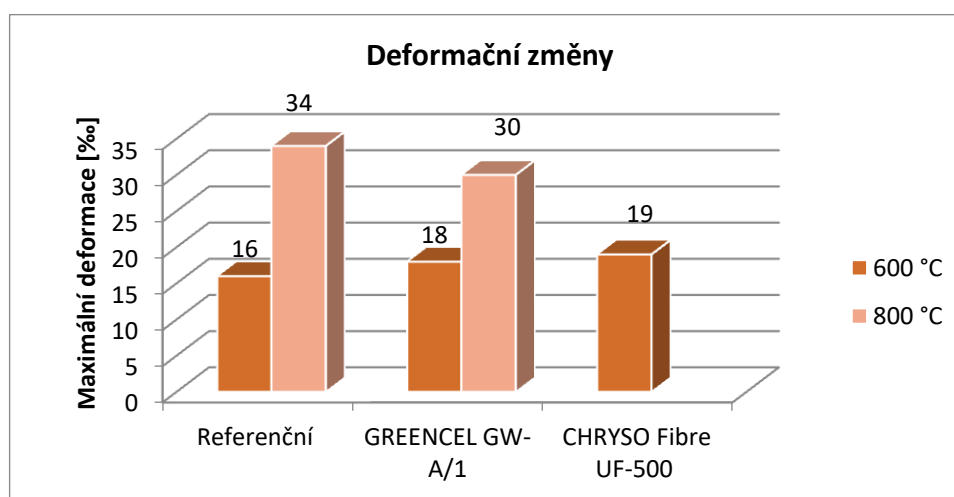
GR - beton s celulóзовými vlákny GREENCEL GW-A/1

CHR - beton celulóзовými vlákny CHRYSO Fibre UF-500 ‰

V další tabulce jsou převedeny deformace v μm na promile. ‰

Tabulka 21 Maximální deformace u zkušebních těles dosažené při vysokých teplotách

Receptura	Maximální deformace [‰]	
	600 °C	800 °C
REF	16	33
GR	18	30
CHR	19	nezměřeno



Graf 22 Maximální deformace u zkušebních těles vystavených vysokým teplotám, při teplotě 800 °C nebyly deformace u receptury CHR změřeny

Se zvyšující teplotou rostou i deformace zkušebních těles. Z grafu lze pozorovat, že teplota 800 °C má výrazný vliv na deformace. Nejvyšší nárůst deformací byl 47 % u referenčního betonu v porovnání mezi ohřevem těles na teplotu 600 °C a 800 °C.

8.3.2 Vyhodnocení fyzikálně mechanických vlastností

Byly vytvořeny zkušební tělesa 100 x 100 x 100 mm, které byly zahřáté na teplotu 600 °C a 800 °C.

8.3.2.1 Vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost

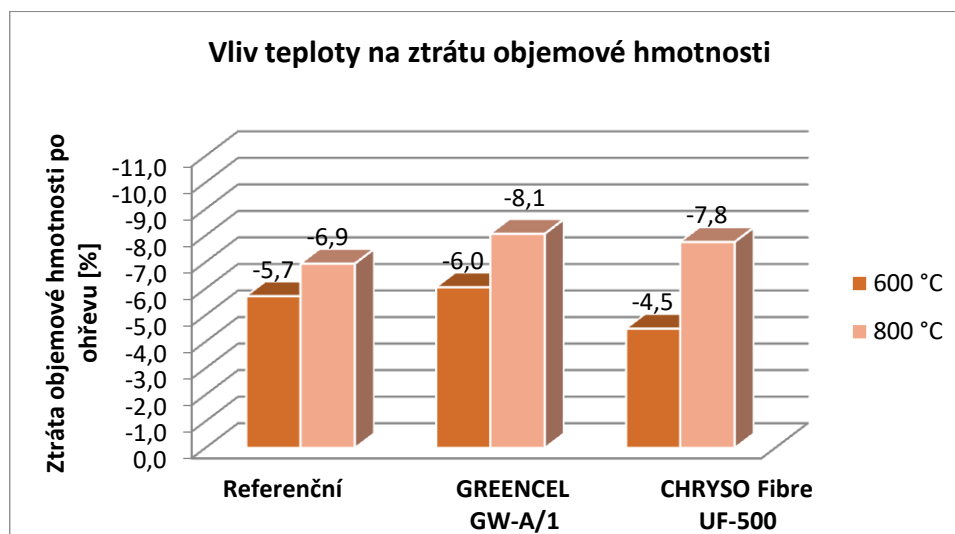
Tabulka 22 Změna objemové hmotnosti u betonu vystavený vysokým teplotám

Označení receptury	Teplota [°C]	Před ohřevem [kg/m ³]	Po ohřevu [kg/m ³]	Změna objemové hmotnosti [%]
REF	600 °C	2450	2310	-5,7
	800 °C		2280	-6,9
GR	600 °C	2480	2330	-4,0
	800 °C		2280	-8,1
CHR	600 °C	2450	2340	-4,5
	800 °C		2260	-7,8

REF - referenční beton, bez vláken

GR - beton s celulóзовými vlákny GREENCEL GW-A/1

CHR - beton celulóзовými vlákny CHRYSO Fibre UF-500



Graf 23 Vliv vysoké teploty 600 °C a 800 °C na objemovou hmotnost

Pozorováním grafu je patrný vliv celulóзовých vláken v betonu. U referenčního betonu není příliš výrazný rozdíl ve ztrátě objemové hmotnosti mezi teplotou ohřevu 600 °C a 800 °C, ale u betonu s vlákny CHRYSO Fibre UF-500 lze pozorovat rozdíl 3,3 %. Z grafu je patrné, že rozdíl 2 % mezi referenčním betonem a betonem s vlákny CHRYSO mohla způsobit vlhkost v nich obsažená.

8.3.2.2 Vliv vysokých teplot na pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku při působení vysokých teplot byla prováděna na zkušebních tělesech o rozměrech 100 x 100 x 100 mm. Tělesa byla vystavena teplotám 600 °C a 800 °C. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou představeny v tabulce č. 22.

Tabulka 23 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky pevnosti v tlaku u těles vystavených vysokým teplotám

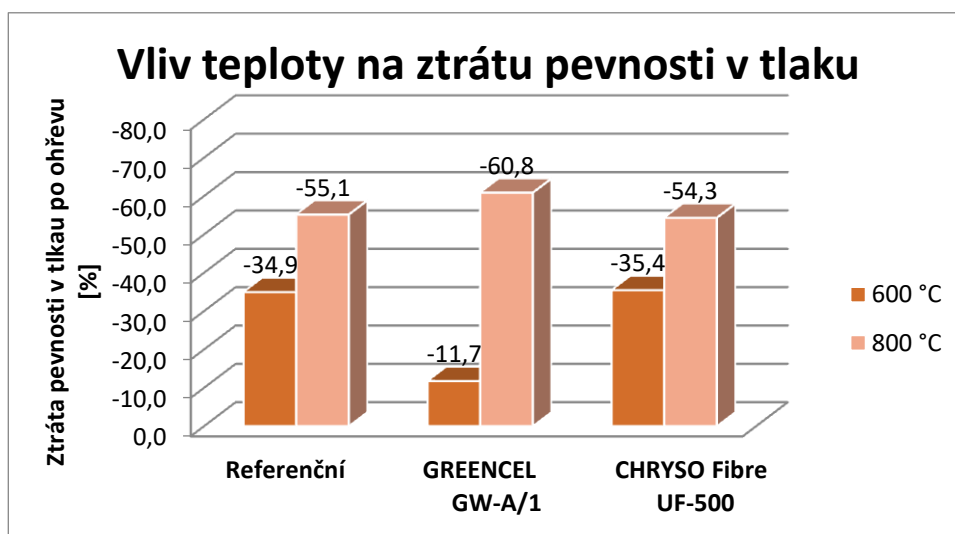
Označení receptury	Teplota [°C]	Pevnost v tlaku před ohřevem [kg/m ³]	Pevnost v tlaku po ohřevu [kg/m ³]	Změna pevnosti v tlaku [%]
REF	600 °C	40,1	26,1	-34,9
	800 °C		18,0	-55,1
GR	600 °C	41,2	35,0	-11,7
	800 °C		15,5	-60,8
CHR	600 °C	39,7	26,6	-35,4
	800 °C		18,8	-54,3

REF - referenční beton, bez vláken

GR - beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1

CHR - beton celulózovými vlákny CHRYSO Fibre UF-500

Můžeme sledovat pozitivní vliv vláken GREENCEL v betonu vystaveném vysokým teplotám, zejména při teplotě 600 °C. Při teplotě 600 °C způsobily vzniklé vyhořelé prostory od celulózových vláken pozvolnější uvolnění vody, a proto pevnosti poklesly jen o 11,7 %. Beton s vlákny CHRYSO dosáhl podobných hodnot, jako referenční beton.



Graf 24 Vliv vysokých teplot na ztrátu pevnosti v tlaku

8.3.3 Vizuální posouzení zkušebních těles

- Krychle

1. Vizuální posouzení zkušebních těles - Referenčních

REF - 20 °C



REF - 600 °C



REF - 800 °C



U referenčních těles vystavených působení teploty 600 °C byla pozorována síť trhlinek na povrchu, rohy zkušebních těles byly narušené a na některých místech odpadly. Naopak při ohřevu referenčních těles na teplotu 800 °C bylo již pozorováno narušení struktury se vznikem odprýskávání povrchu betonu, v některých místech povrch betonu odpadl. Na obrázku vpravo dole je vidět narušení struktury vlivem vypařování vody při vysokých teplotách. Expanze uvnitř materiálu narůstá a způsobí odprýskávání povrchu betonu. Síť trhlinek se rozšiřuje se zvyšující se teplotou. U těles ohřátých na teplotu 600 °C došlo ke tmavšímu zbarvení a při ohřevu na teplotu 800 °C byla barva těles opět světlejší.

2. Vizuální posouzení zkušebních těles s vlákny GREENCEL

GR - 20 °C



GR - 600 °C



GR - 800 °C



Při ohřevu na teplotu 600 °C byla pozorována na povrchu těles síť trhlinek, ovšem ne tak rozšířená jako u referenčních těles ohřátých na stejnou teplotu. Při ohřevu na vyšší teplotu došlo ke světlejšímu zbarvení. Rohy těles byly více poničené oproti tělesům s vlákny CHRYSO.

3. Vizuální posouzení zkušebních těles s vlákny CHRYSO Fiber

CHR - 20 °C



CHR - 600 °C



CHR - 800 °C



Zkušební tělesa s vlákny CHRYSO Fiber nebyly tolik poškozeny oproti tělesům s vlákny GREENCEL. Při teplotě 600 °C nebyla síť trhlinek tak výrazná a rohy těles nebyly tolik narušené. U této receptury nebyly barevné změny tak výrazné. Při teplotě 800 °C bylo ovšem pozorováno, že trhlinky na povrchu nejsou tolik rozšířené jako u těles ohřátých na teplotu 600 °C.

4. Vizuální posouzení referenčních těles se zkušebními tělesy s vlákny GREENCEL

REF – 20 °C



GR - 600 °C



GR – 800 °C



Vizuálním pozorováním referenčních těles s tělesy GR nejsou vidět výrazné barevné změny. Na obrázku vpravo nahoře u jednoho zkušebního tělesa je vidět uštípnutý roh, který může být způsobený špatným zhutněním. Při ohřevu na teplotu 800 °C lze pozorovat větší odprýskání rohů těles, ale trhlinky nebyly na povrchu tolik rozšířené jako u těles ohřátých na teplotu 600 °C.

5. Vizuální posouzení referenčních těles se zkušebními tělesy s vlákny CHRYSO Fiber

REF -20 °C



CHR - 600 °C



CHR - 800 °C



Porovnáním referenčních těles a těles CHR je zbarvení podobné jako u receptury GR. Struktura není tolik narušená, síť trhlinek není tolik rozšířená. Při teplotě ohřevu na 600 °C není vidět odprýskávání betonu oproti referenčním tělesům.

- Trámečky

Kromě sledování změn vlastností betonů s čedičovým kamenivem a s přídavkem celulózových vláken bylo v další etapě provedeno sledování vlivu působení vysokých teplot na malty s křemičitým pískem a s přídavkem celulózových vláken GREENCEL GW-A/1. Do malt a do betonů s maximálním zrnem kameniva menším než 8 mm se nedoporučuje použít vlákna CHRYSO, protože by se zrna kameniva menším než 8 mm nedošlo k dobrému rozdělení čtverečků vláken.

Trámečky byly vyrobeny z cementu 42,5 R při dávce 340 kg/m^3 , křemičitého písku 0/4 při dávce 1998 kg/m^3 . Byl přidán Plastifikátor STACHEMENT 2050 (FM) a vlákna GREENCEL GW-A/1 v množství 1 kg/m^3 . Vodní součinitel byl 0,45.

Z obrázků (58 - 59) jsou lépe viditelné barevné změny při různé teplotě ohřevu. Při ohřevu na teplotu 600°C a 800°C lze pozorovat tmavší zbarvení oproti referenčnímu betonu (beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1, bez ohřevu). Na následujících obrázcích lze pozorovat rozdíl mezi referenčním betonem a betonem ohřátých na teplotu 600°C .



a) Před ohřevem



b) Po ohřevu na 600°C



- c) Po ohřevu na 600 °C –
trhlíčky na povrchu rozšiřují
se od hran trámečku

Obrázek 58 Porovnání trámečků a) referenční trámeček
(beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1, bez
ohřevu), b) c) trámeček po ohřevu na 600 °C

Trámečky ohříváné na 800 °C

U trámečku ohřátých na teplotu 800 °C (obr. 59) byly rozšířené trhlíčky na povrchu a odprýskaný povrch trámečků. Struktura těles byla výrazně narušená.



- a) Před ohřevem



- b) Po ohřevu na 800 °C



- c) Po ohřevu na 800 °C – na více místech u trámečku bylo viditelné odprýskávání povrchu betonu

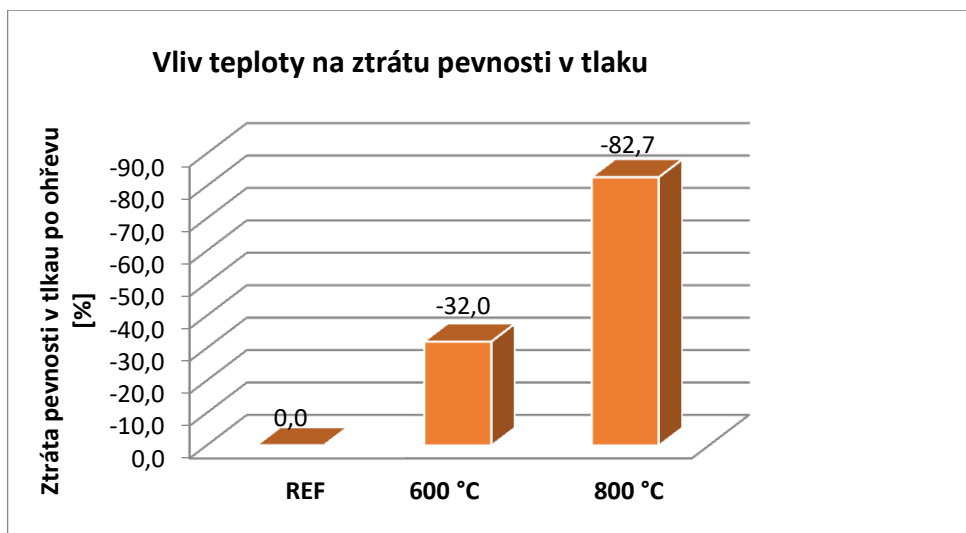
Obrázek 59 Porovnání trámečků a) referenční trámeček (beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1, bez ohřevu), b) c) trámeček po ohřevu na 800 °C

V tabulce č. 24 jsou naměřené a vypočtené hodnoty trámečků vystavených teplotě 600 °C a 800 °C.

Tabulka 24 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušek v pevnosti v tlaku a tahu za ohybu u trámečků vystavených vysokým teplotám

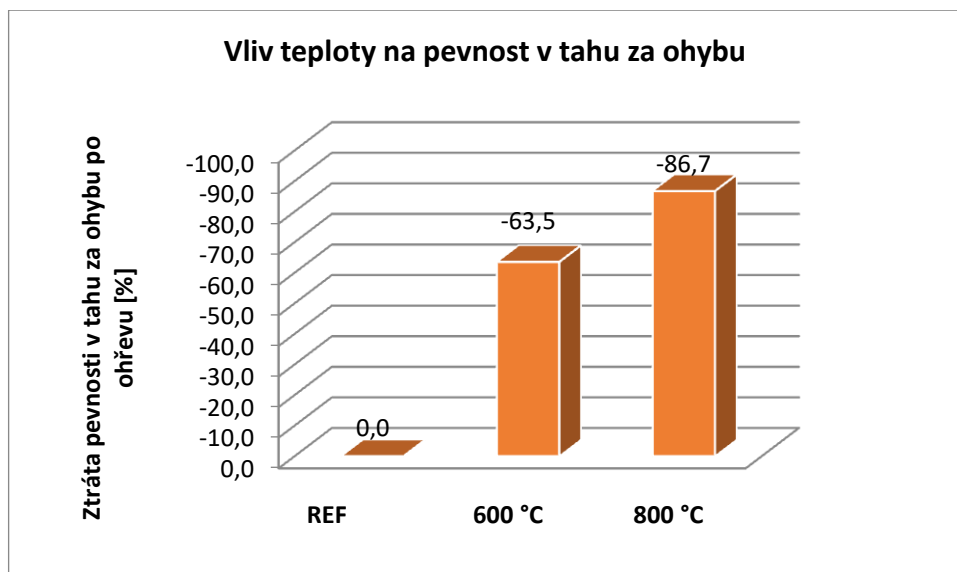
Označení	Pevnost v tlaku [MPa]	Změna pevnosti v tlaku [%]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Změna pevnosti v tahu za ohybu [%]
REF	9,4	0,0	1,3	0,0
GR – 600 °C	6,4	-32,0	0,5	-63,5
GR – 800 °C	1,6	-82,7	0,2	-86,7

Při teplotě ohřevu na teplotu 600 °C pevnost v tlaku poklesla o 32 % a při teplotě 800 °C poklesla o 86,7 %. K výraznějšímu poklesu pevnosti v tlaku došlo vzhledem k rozměrům trámečku 40 x 40 x 160 mm. Trámeček se více prohřál než krychle, která má více než šestinásobný objem, a proto došlo k většímu narušení struktury. Dalším možným důvodem poklesu pevnosti v tlaku je nedostačující homogenizace směsi, ze které jsou trámečky vytvořeny.



Graf 25 Vliv vysoké teploty na pevnost v tlaku

Při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu u trámečků došlo k výraznějším poklesům, kdy při teplotě 600 °C došlo k poklesům pevnosti o 63,5 % a při teplotě 800 °C došlo k poklesu pevnosti o 86,7 %.



Graf 26 Vliv vysoké teploty na pevnost v tahu za ohybu

Závěr

Diplomová práce se věnuje betonům s přídavkem celulóзовých vláken. Použití celulóзовých vláken do betonu není příliš rozšířené, zvláště v České republice a proto se jimi zabývá moje diplomová práce. V teoretické části diplomové práce jsou shrnuty informace o celulóze a o celulóзовých vláknech, způsobech jejich výroby, vlastnostech a možnostech použití v betonu. Na základě rešerší z odborné literatury je popsán vliv vysokých teplot na mechanické a fyzikální vlastnosti betonu s celulóзовými vlákny a také porovnání s ostatními vlákny používanými do betonu. Dále jsou uvedeny informace o konkrétních celulóзовých vláknech a jejich použití.

V experimentální části byl sledován vliv různých typů celulóзовých vláken na vlastnosti betonu. V experimentální části diplomové práce byly navrženy receptury betonu s celulóзовými vlákny CHRYSO a GREENCEL. Byl zkoumán vliv přídavku různých typů celulóзовých vláken na vlastnosti betonu v čerstvém a zatvrdlém stavu. Byla sledována změna konzistence betonu s přídavkem vláken oproti referenčnímu. Při míchání betonu byla pozorována rovnoměrnost rozmísení vláken do ostatních složek. Byl sledován vliv vysokých teplot 600 °C a 800 °C na změny pevností betonu s celulóзовými vlákna, na objemovou hmotnost, deformace a vizuální změny.

Dále byla sledována odolnost celulóзовých vláken sledováním vývoje pH prostředí (od pH 4 do pH 12) při dlouhodobém uložení různých typů celulóзовých vláken v těchto prostředí.

Bylo provedeno pozorování vláken pod optickým mikroskopem. Na základě rešerší informací a výsledků z předchozích výzkumů byla pro experimentální ověřování vybrána celulóзовá vlákna od firmy CHRYSO s.r.o. a to CHRYSO Fiber UF-500 a celulóзовé vlákna GREENCEL GW-A/1 od slovenské firmy GREENCEL s.r.o. Vlákna byla dávkována do betonu v dávce 1 kg na 1 m³. U betonu s vlákny GREENCEL i betonu s vlákny CHRYSO byla hodnota sednutí o 50 mm nižší oproti referenčnímu betonu. Obsah vzduchu v betonu byl očekáván vyšší, ale hodnota u betonu s vlákny GREENCEL byla 2,1 % a u betonu s vlákny CHRYSO byla hodnota 2,2 %. U referenčního betonu byl obsah vzduchu 2,5 %. Porovnáním čerstvého a zatvrdlého referenčního betonu došlo k nepatrnému snížení objemové hmotnosti o 1 %. Pevnost v tlaku dosahovala u referenčních těles 40,1 MPa. Beton s vlákny GREENCEL způsobil nárůst pevnosti v tlaku o 3 % a u betonu s vlákny CHRYSO se pevnost v tlaku snížila o

1 %. U zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byl také rozdíl mezi referenčním betonem a betonem s vlákny, ale opět byl v řádu procent. U betonu s vlákny GREENCEL byl nárůst pevnosti o 2,3 % a u betonu s vlákny CHRYSO byl nárůst pevnosti o 7 %. Zkoušky ukázaly, že přidavek vláken zásadně neovlivňuje pevnost v tlaku a tahu za ohybu u betonu. Při aplikaci celulózových vláken do betonu vzhledem k jejich nízkému modulu pružnosti neočekáváme nárůst pevnosti betonu. Je pozitivní, že přidavek celulózových vláken nesnížil mechanické vlastnosti betonu.

Hlavním cílem diplomové práce bylo sledovat chování betonu a deformací v průběhu zatěžování betonu vysokou teplotou 600 °C a 800 °C. Vliv vysoké teploty 600 °C a 800 °C byl zkoušen na krychlích o délce hrany 100 mm u referenčního betonu, betonu s vlákny GREENCEL GW-A/1 a u betonu s vlákny CHRYSO-Fibre UF-500. Lze pozorovat, že se zvyšující teplotou rostou i deformace. Nejvyšší deformace 34 ‰ byly naměřeny u referenčního betonu při teplotě 800 °C. Porovnáním referenčních těles při ohřevu na 600 °C a 800 °C byl rozdíl deformací 47 %. Vliv vysoké teploty na objemovou hmotnost je patrný u betonu s vlákny oproti referenčnímu betonu. U betonu s vlákny byla ztráta objemové hmotnosti v řádu procent oproti referenčnímu betonu. Dále byl beton vystavený vysokým teplotám zkoušen na pevnost v tlaku. Byl pozorován pozitivní vliv vláken GREENCEL GW-A/1 při ohřevu na teplotu 600 °C, kdy byla ztráta pevnosti v tlaku pouze 11,7 %. Porovnáním referenčního betonu a betonu s vlákny CHRYSO Fibre UF- 500 nedošlo k výraznějším rozdílům ve ztrátě pevnosti v tlaku a nedošlo k výraznému narušení struktury. Ve srovnání s referenčními tělesy nebylo u zkušebních těles s vlákny CHRYSO Fibre UF- 500 tolik trhlinek na povrchu a nedocházelo k odprýskávání. Vizuálním pozorováním zkušebních těles s vlákny GREENCEL GW-A/1 došlo ke světlejšímu zbarvení a menší tvorbě trhlinek, ovšem je zajímavé, že u těles ohřátých na 800 °C nebylo tolik trhlinek na povrchu jako u těles ohřátých na teplotu 600 °C.

Přidáním celulózových vláken byly pozorovány pozitivní vlastnosti na beton vystavený vysokým teplotám. Po vyhoření celulózových vláken vzniknou volné prostory, které umožní pozvolnější uvolňování vody a nedojde tak k velkému porušení struktury. V budoucnu lze navázat na získané informace z diplomové práce v oblasti působení vysokých teplot na betonech s celulózovými vlákny při různém dávkování, použití jiných druhů vláken, nebo také jak zvládne beton s celulózovými vlákny odolávat vyšším teplotám jak 800 °C.

Literatura

- [1] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály (CJ02)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně FAST, 2007.
- [2] HELA, R. *Technologie betonu II (BJ15)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně FAST, 2007.
- [3] DROCHYTKA, R. *Plastické látky(M01)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně FAST, 2007.
- [4] VANĚREK, J. *Kovové a dřevěné materiály (BJ08)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně FAST, 2006.
- [5] KATEŘINA ZEMANOVÁ, *Možnosti zpracování kalu z výroby papíru a celulolózy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6923
- [6] Carbonization of Cellulose Fibers – I. Low Temperatures Pyrolysis, In: Union Carbide Corporation Carbon Products Division, Research Laboratory, Parma, Ohio [online], 1964
- [7] Carbonization of Cellulose Fibers – II. Physical Property Study, In: Union Carbide Corporation Carbon Products Division, Research Laboratory, Parma, Ohio [online], 1964
- [8] CZOBOLY, Olivér, Éva LUBLÓY, Viktor HLAVIČKA, György BALÁZS, Orsolya KÉRI a Imre SZILÁGYI. Fibers and fiber cocktails to improve fire resistance of concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1706, 128(3), 1453-1461 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1007/s10973-016-6038-x. ISSN 1388-6150
- [9] GUO, Liping, Wenxiao ZHANG, Wei SUN, Bo CHEN a Yafan LIU. High-Temperature Performance and Multiscale Damage Mechanisms of Hollow Cellulose Fiber-Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*[online]. Hindawi Publishing Corporation, 2016, 2016 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1155/2016/2503780. ISSN 1687-8434.
- [10] Technický list. BUCKEY, . Alkali Resistance. 2015. Dostupné z: <http://www.ultrafiber500.com/ultrafiber-500/>
- [11] CHRYSO, . CHRYSO Fibre UF-500 [Dokument]. Praha 8: CHRYSO Chemie s.r.o., 2015. [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://greencel.sk/produkty/vlakna-greencel>
- [12] ČSN EN 12 350 – 2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009

- [13] ČSN EN 12 350 – 6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Objemová hmotnost.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [14] ČSN EN 12 350 – 7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Obsah vzduchu.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [15] ČSN EN 12 390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [16] ČSN EN 12 390 – 3/ Z1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2012
- [17] ČSN EN 12 390 – 5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [18] Industrial Cellulose Fibers [cit. 2018-01-02]. Dostupné z : <http://www.centralfiber.com/applications.php>
- [19] Technický list. *Interní materiály: Přehled výsledků zkoušek kameniva – kontrolní zkoušky roční – drcené kamenivo*[cit. 2018-01-04]
- [20] Technický list. *Portlandský cement CEM I 42,5 R.* [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [21] Měřicí přístroj Termo-vlhkoměr KIMO HD 200, [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/termo-vlhkomer-kimo-hd-200-se-zaznamem>
- [22] Mikroskopie celulóзовých vláken, mikroskop Leica DM4000 M LED, [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.admas.eu/vybaveni/leica-dm4000-m-led/>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Schematický vzorec polysacharidu [3]</i>	13
<i>Obrázek 2 Základní stavební jednotky hemicelulóz [4]</i>	14
<i>Obrázek 3 Strukturní vzorec ligninu [4]</i>	15
<i>Obrázek 4 Proces sulfátové výroby celulózy [5]</i>	16
<i>Obrázek 5 Proces sulfitové výroby celulózy [5]</i>	18
<i>Obrázek 6 Proces mechanické výroby celulózy [5]</i>	19
<i>Obrázek 7 Průřez celulóзовým vláknem. Vlevo – snímek z mikroskopu LSCM, vpravo - FESEM [9]</i>	23
<i>Obrázek 8 Porovnání referenčního betonu bez vláken PC (nalevo) a betonu s celulóзовými vlákny CFRC (napravo) po ohřátí na různé teploty a různé doby ohřevu [9]</i>	25

<i>Obrázek 9 Referenční beton bez vláken PC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 1000x a vpravo je zvětšení 5000x [9]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 10 Beton s celulózovými vlákny CFRC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 500x a vpravo zvětšení 2000x [9]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 11 Mikrostruktura referenčního betonu bez vláken PC těles na SEM mikroskopu, vlevo zvětšení 1000x a vpravo zvětšení 5000x [9]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 12 Beton s celulózovými vlákny CFRC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení těles 1000x a vpravo 2000x [9]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 13 Mikrostruktura referenčního betonu bez vláken PC na SEM mikroskopu, vlevo je zvětšení 1000x a vpravo je zvětšení 10 000x [9]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 14 Mikrostruktura betonu s celulózovými vlákny CFRC (vlevo) a referenčního betonu bez vláken PC (vpravo) na SEM mikroskopu, zvětšeno 1000x [9]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 15 Mikrostruktura betonu s celulózovými vlákny CFRC znázorněná na SEM mikroskopu (vlevo) je zvětšení 100x a vpravo je zvětšení 10 000x [9]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 Snímky betonu s celulózovými vlákny CFRC ohřátých na 1050 °C po dobu 4 hodin znázorněné na SEM mikroskopu, (a) zvětšení 500x, (b) zvětšení 500x, (c) 5000x, (d) zvětšení 20 000x [9]</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17 Vliv teploty na velikost pórů u betonu s celulózovými vlákny a) CFRC a u normálního betonu b) PC [9]</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18 Teplotní degradace referenčního betonu [8]</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 19 Degradace polypropylenových vláken za vysokých teplot [8]</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 20 Degradace celulózových vláken za vysokých teplot [8]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 21 Snímky na SEM mikroskopu, (a) S 1, (b) S 2 po ohřevu na 800 °C, (c) S 2, (d) S 2 po ohřevu na 800 °C, (e) zvětšení polypropylenových vláken, (f) S 3, (g) S 3 ohřátý na 800 °C, (h) zvětšení celulózových vláken, (i) S 4, (j) S 4 ohřátý na 800 °C, (k) zvětšení ocelových vláken [8]</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 22 Křivky od těles namáhaných v třibodovém ohybu [8]</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 23 Křivky od těles namáhaných v třibodovém ohybu s ocelovými vlákny (při dávce 1 % na 1 m³), polymerní (při dávce 0,1 % na 1 m³), nebo celulózové vlákna (při dávce 0,2 % na 1 m³) [8]</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 24 Zbarvení těles FRC při nabíhacích teplotách od 20 do 800 °C [8]</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 25 Ocelová vlákna odebraná z těles vystavená různým teplotám (od 20 - 800 °C) [8]</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 26 SFRC tělesa vystavená 800 °C s dávkou 1 % ocelových vláken [8]</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 27 Průmyslová celulózová vlákna [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 28 Využití celulózových u asfaltových střešních nátěrů [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 29 Využití celulózových vláken u betonových odlitků [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 30 Využití celulózových vláken jako protipožární nátěr [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 31 Přidání celulózových vláken do betonových směsí u vrtných pilot [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 32 Přidání celulózových vláken do omítek pro zlepšení struktury [18]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 33 Křivka zrnitosti propadu frakce 0/4</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 34 Křivka zrnitosti propadu frakce 4/8</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 35 Křivka zrnitosti propadu frakce 8/16</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 36 pH metr HQ 11d a pH elektroda HC 7 05 A</i>	<i>52</i>

<i>Obrázek 37 Optický mikroskop Leica DM4000 M LED [22]</i>	59
<i>Obrázek 38 Snímek celulózových vláken GREENCEL GW-A/1 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 200 μm</i>	60
<i>Obrázek 39 Snímek celulózových vláken GREENCEL GW-A/1 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 100 μm</i>	60
<i>Obrázek 40 Snímek celulózových vláken CHRYSO Fibre UF-500 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 200 μm</i>	61
<i>Obrázek 41 Snímek celulózových vláken CHRYSO Fibre UF-500 z optického mikroskopu, znázorněné měřítko je 20 μm</i>	61
<i>Obrázek 42 Použitá celulózová vlákna v experimentální části, vlákna GREENCEL GW-A/1 (vlevo), vlákna CHRYSO Fiber UF-500 (vpravo)</i>	62
<i>Obrázek 43 Měření sednutí</i>	64
<i>Obrázek 44 Tvary sednutí, vlevo správné sednutí, vpravo usmyknuté sednutí</i>	65
<i>Obrázek 45 Přístroj pro tlakovou metodu</i>	66
<i>Obrázek 46 Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa (zatěžování dvěma břemeny)</i>	71
<i>Obrázek 47 Laboratorní pec Clasic a počítač pro zaznamenání hodnot</i>	73
<i>Obrázek 49 Zamíchaná vlákna GREENCEL GWA/ 1 s pískem (vlevo) a vlákna CHRYSO Fibre UF-500 s pískem (vpravo)</i>	74
<i>Obrázek 50 Zkušební lis Toni Technik</i>	77
<i>Obrázek 51 Zkušební lis VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig</i>	78
<i>Obrázek 52 Lomová plocha u trámce po provedení zkoušky v tahu za ohybu</i>	79
<i>Obrázek 53 Zatížení referenčního betonu bez vláken na 600 $^{\circ}$C</i>	81
<i>Obrázek 54 Zatížení referenčního betonu bez vláken na 800 $^{\circ}$C</i>	82
<i>Obrázek 55 Zatížení betonu s vlákny GREENCEL GW-A/1 na teplotu 600 $^{\circ}$C</i>	83
<i>Obrázek 56 Zatížení betonu s vlákny GREENCEL GW-A/1 na teplotu 800 $^{\circ}$C</i>	84
<i>Obrázek 57 Zatížení betonu s vlákny CHRISO FIBER UF-500 na teplotu 600 $^{\circ}$C</i>	85
<i>Obrázek 58 Zatížení betonu s vlákny CHRISO FIBER UF-500 na teplotu 800 $^{\circ}$C, deformace nebyly naměřeny</i>	86
<i>Obrázek 59 Porovnání trámeček a) referenční trámeček (beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1, bez ohřevu), b) c) trámeček po ohřevu na 600 $^{\circ}$C</i>	95
<i>Obrázek 60 Porovnání trámeček a) referenční trámeček (beton s celulózovými vlákny GREENCEL GW-A/1, bez ohřevu), b) c) trámeček po ohřevu na 800 $^{\circ}$C</i>	96

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Karbonizace celulózy klasifikovaná ve čtyřech stádiích [6][7]</i>	21
<i>Tabulka 2 Receptura PC a CFRC [9]</i>	22
<i>Tabulka 3 Fyzikální a mechanické vlastnosti celulózových vláken [9]</i>	22
<i>Tabulka 4 Poměr absorpce vody u celulózových vláken [9]</i>	23
<i>Tabulka 5 Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu [9]</i>	26
<i>Tabulka 6 Receptura betonu [8]</i>	36
<i>Tabulka 7 Procentuální složení cementu [8]</i>	37
<i>Tabulka 8 Vlastnosti zkoušených vláken[8]</i>	37
<i>Tabulka 9 Procentuální složení vláken u receptur S1 – S8 [8]</i>	37

Tabulka 10 Vlastnosti CEM I 42,5 R [20]	47
Tabulka 11 Vlastnosti čedičového kameniva 0/4	48
Tabulka 12 Vlastnosti čedičového kameniva 4/8	48
Tabulka 13 Vlastnosti čedičového kameniva 8/16 [19]	49
Tabulka 14 Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken GREENCEL [10]	50
Tabulka 15 Chemické a fyzikální vlastnosti vláken Buckeye Ultra Fiber 500 [10]	51
Tabulka 16 Receptura: referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GW-A/1 s beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500	62
Tabulka 17 Klasifikace podle sednutí kužele	64
Tabulka 18 Výsledky zkoušek na čerstvém betonu	75
Tabulka 19 Vyhodnocení zkoušek na ztvrdlém betonu	77
Tabulka 20 Maximální deformace u zkušebních těles dosažené při vysokých teplotách	87
Tabulka 21 Maximální deformace u zkušebních těles dosažené při vysokých teplotách	87
Tabulka 22 Změna objemové hmotnosti u betonu vystavený vysokým teplotám	88
Tabulka 23 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky pevnosti v tlaku u těles vystavených vysokým teplotám	89
Tabulka 24 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušek v pevnosti v tlaku a tahu u trámečků vystavených vysokým teplotám	96

Seznam grafů

Graf 1 Vliv teploty 300 °C na pevnost v tlaku – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC) [9]	27
Graf 2 Vliv teploty 600 °C na pevnost v tlaku – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC) [9]	27
Graf 3 Vliv teploty 300 °C na pevnost v tahu – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC) [9]	28
Graf 4 Vliv teploty 600 °C na pevnost v tahu – referenční beton s portlandským cementem, bez vláken (PC), beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC) [9]	28
Graf 5 Vliv teploty 800 °C a 1050 °C na pevnost v tlaku – beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC), PC nezkoušený – destrukce při 600 °C [9]	29
Graf 6 Vliv teploty 800 °C a 1050 °C na pevnost v tahu – beton s portlandským cementem a celulózovými vlákny (CFRC), PC nezkoušený – destrukce při 600 °C [9]	29
Graf 7 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH ₃ COOH a octanu sodného CH ₃ COONa, roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny CHRYSO Fiber	53
Graf 8 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH ₃ COOH a octanu sodného CH ₃ COONa, roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A	54

<i>Graf 9 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH₃COOH a octanu sodného CH₃COONa, roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A/1</i>	<i>55</i>
<i>Graf 10 Vývoj pH u různých prostředí – roztok kyseliny octové CH₃COOH a octanu sodného CH₃COONa, roztok NaOH 9 pH, roztok NaOH 10 pH, roztok NaOH 11 pH a roztok NaOH 12 pH s vlákny GREENCEL GW-A/2</i>	<i>55</i>
<i>Graf 11 Vývoj pH roztoku kyseliny octové CH₃COOH a octanu sodného CH₃COONa, pH 4.2 s různými typy celulózových vláken v čase</i>	<i>56</i>
<i>Graf 12 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 9 s různými typy celulózových vláken v čase</i>	<i>57</i>
<i>Graf 13 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 10 s různými typy celulózových vláken v čase ..</i>	<i>57</i>
<i>Graf 14 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 11 s různými typy celulózových vláken v čase ..</i>	<i>58</i>
<i>Graf 15 Vývoj pH roztoku NaOH, pH 12 s různými typy celulózových vláken v čase ..</i>	<i>58</i>
<i>Graf 16 Srovnání sednutí kužele mezi jednotlivými receptury; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500</i>	<i>75</i>
<i>Graf 17 Srovnání obsahu vzduchu mezi jednotlivými receptury; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500</i>	<i>76</i>
<i>Graf 18 Srovnání objemové hmotnosti mezi jednotlivými receptury; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500</i>	<i>76</i>
<i>Graf 19 Srovnání pevnosti v tlaku mezi jednotlivými receptury; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500</i>	<i>78</i>
<i>Graf 20 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu mezi jednotlivými receptury; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500 ..</i>	<i>79</i>
<i>Graf 21 Srovnání objemové hmotnosti ČB a ZB u jednotlivých receptur; referenční beton, beton s vlákny GREENCEL GWA/1 a beton s vlákny CHRYSO Fibre UF-500 ..</i>	<i>80</i>
<i>Graf 22 Maximální deformace u zkušebních těles vystavených vysokým teplotám, při teplotě 800 °C nebyly deformace u receptury CHR změřeny</i>	<i>87</i>
<i>Graf 23 Vliv vysoké teploty 600 °C a 800 °C na objemovou hmotnost</i>	<i>88</i>
<i>Graf 24 Vliv vysokých teplot na ztrátu pevnosti v tlaku</i>	<i>89</i>
<i>Graf 25 Vliv vysoké teploty na pevnost v tlaku</i>	<i>97</i>
<i>Graf 26 Vliv vysoké teploty na pevnost v tahu za ohybu</i>	<i>97</i>