



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

EFEKT APLIKACE JEMNÝCH ORGANICKÝCH VLÁKEN DO KOMPOZITŮ S CEMENTOVOU MATRICÍ

THE EFFECT OF APPLICATION OF FINE ORGANIC FIBERS TO CEMENT
COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Kavka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Lukáš Kavka
Název	Efekt aplikace jemných organických vláken do kompozitů s cementovou maticí
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

Hela, R. Technologie betonu I, II. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

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

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

České a zahraniční technické normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V cementových kompozitech je využíváno široké spektrum vláken. Volba vláken je dána očekávaným přínosem k výsledným vlastnostem kompozitu. Celulózová vlákna představují jako vlákna z obnovitelných zdrojů zajímavou variantu k běžně užívaným polymerním vláknům. V bakalářské práci se zaměřte na možnosti využití celulózových a polypropylenových vláken do cementových kompozitů. V teoretické části bakalářské práce proveďte rešerši informací o použití jemných organických vláken v cementových kompozitech. Zaměřte se zejména na celulózová vlákna a na vlákna polypropylenová. Uveďte konkrétní příklady aplikace celulózových a polypropylenových vláken v cementových kompozitech. V praktické části bakalářské práce připravte cementové kompozity s celulózovými vlákny a s polypropylenovými vlákny. Ověřte rozmísení vláken v cementové matici, stanovte základní vlastnosti cementového kompozitu s vlákny, především pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Dokumentujte přítomnost jemných vláken v kompozitu s využitím optické mikroskopie.

Předpokládaný rozsah práce 40-50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje efekt použití jemných organických vláken do kompozitů s cementovou matricí. V teoretické části práce byl definován kompozitní materiál a popsány jeho jednotlivé složky. Následně byla provedena rešerše informací o organických vláknech se zaměřením na přírodní vlákna. Byly popsány základní parametry celulózových a polypropylenových vláken, efekt na vlastnosti cementových kompozitů a jejich konkrétní aplikace. V praktické části byl vytvořen referenční beton a 3 druhy betonu s přídavkem různých typů organických vláken. Byl zkoumán vliv přídavku vláken na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Dalším úkolem praktické části bylo sledování odolnosti celulózových vláken v kyselém a zásaditému prostředí, ve kterém byla celulózová vlákna uložena. Byl sledován vývoj pH roztoků v čase.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cementový kompozit, organická vlákna, celulózová vlákna, polypropylenová vlákna, aplikace vláken, pevnost v tlaku, pevnost v tahu, odolnost proti abrazi, alkalická odolnost

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the effect of using fine organic fibers in cement composites. In the theoretical part of bachelor thesis a composite material was defined and his individual components were described. Then was created a research of information about organic fibers focused on natural fibers. The basic parameters of cellulosic fibers and polypropylene fibers, the effect on the properties of cement composites and their application in practice were described. In the practical part there were created a reference concrete and 3 types of concrete with the addition of various types of organic fibers. The influence of fiber addition on the properties of fresh and hardened concrete were investigated. Another task of practical part was monitored the resistance of cellulose fibers in acidic and alkaline media in which the tested fibers were deposited. The development of pH solutions was examined over time.

KEYWORDS

Cement composite, organic fibers, cellulose fibers, polypropylene fibers, fiber applications in practice, compressive strength, tensile strength, abrasion resistance, alkaline resistance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lukáš Kavka *Efekt aplikace jemných organických vláken do kompozitů s cementovou matricí*. Brno, 2019. 71 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Efekt aplikace jemných organických vláken do kompozitů s cementovou matricí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

Lukáš Kavka
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Efekt aplikace jemných organických vláken do kompozitů s cementovou maticí* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Lukáš Kavka
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D., za její ochotu a odbornou pomoc při vypracování. Mé velké poděkování také patří Ing. Martinovi Ťažkému za odbornou pomoc při přípravě receptur a provádění zkoušek na betonu. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	12
TEORETICKÁ ČÁST	13
1 Kompozitní materiály	13
1.1 Definice kompozitních materiálů	13
1.2 Rozdělení kompozitních materiálů	13
1.2.1 Podle materiálu matrice:	13
1.2.2 Podle druhu dispergovaného pevného komponentu:	13
1.3 Hlavní složky vláknových kompozitů s cementovou matricí	14
1.3.1 Cement	14
1.3.2 Kamenivo	14
1.3.3 Voda	15
1.3.4 Přísady	15
1.3.5 Příměsi	16
1.3.6 Výztuž	16
2 Vláknobeton	17
3 Anorganická vlákna	19
4 Organická vlákna	21
4.1 Přírodní vlákna	21
4.1.1 Konopná vlákna	22
4.1.2 Bambusová vlákna	23
4.1.3 Kokosová vlákna	24
4.1.4 Lněná vlákna	25
5 Celulózová vlákna	26
5.1 Celulóza	26
5.2 Hemicelulóza	27
5.3 Lignin	28
5.4 Výroba celulózových vláken	28
5.4.1 Mechanický způsob	29
5.4.2 Chemický způsob	29
5.4.3 Recyklovaná celulóza	30
6 Polypropylenová vlákna	31
6.1 Dělení podle způsobu výroby:	31
6.1.1 Monofilamentní vlákna	31
6.1.2 Fibrilovaná vlákna	31
7 Vlastnosti cementových kompozitů ovlivněné vlákny	32

7.1.1	Omezení smršťovacích trhlin při hydrataci cementu.....	32
7.1.2	Samoošetřování betonu.....	32
7.1.3	Odolnost betonu proti působení vysokých teplot	32
7.1.4	Zvýšení odolnosti proti abrazi	32
8	Konkrétní použití celulóзовých a polypropylenových vláken	33
8.1	Celulóзовá vlákna.....	33
8.2	Polypropylenová vlákna.....	34
	PRAKTICKÁ ČÁST	35
9	Cíl práce	35
10	Metodika práce	36
11	Použité suroviny	37
12	Navržené receptury	39
13	Výroba zkušebních těles	39
14	Seznam prováděných zkoušek na betonu	40
14.1	Zkoušky betonu v čerstvém stavu	40
14.2	Zkoušky betonu v zatvrdlém stavu.....	40
15	Výsledky provedených zkoušek a diskuze výsledků.....	40
15.1	Konzistence a objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu	40
15.2	Objemová hmotnost a pevnost v tlaku betonu	41
15.3	Stanovení pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku po 28 dnech.....	42
15.4	Stanovení odolnosti proti obrušování.....	44
15.5	Vodotěsnost a nasákavost betonu.....	47
16	Mikroskopie vláken v cementové matrici.....	49
17	Měření pH roztoků s celulóзовými vlákny.....	51
18	Závěr.....	60
	Seznam obrázků.....	63
	Seznam tabulek.....	69
	Seznam grafů	70
	Seznam příloh	71

ÚVOD

Stavební průmysl je významným spotřebitelem energie, nerostných surovin a půdy a také významně přispívá k ekologickému znečištění. Snahou dnešního stavitelství je snížit negativní vliv na přírodu a ovzduší, začít využívat ve větší míře recyklovatelné materiály, druhotné produkty při výrobě a výrobky založené na přírodní bázi. V cementových kompozitech je používána široká škála vláken. Volba vlákna je dána očekávaným přínosem k výsledným vlastnostem kompozitu. Bakalářská práce se zabývá možnostmi použití organických vláken v cementových kompozitech. V praktické části je sledován vliv vláken na vybrané vlastnosti betonu. Jsou testována strukturovaná vlákna ze směsi polypropylenu a polyethylenu, monofilamentní polypropylenová vlákna a také vlákna celulózová. Celulózová vlákna jsou přírodním polymery a tvoří zajímavou alternativu k běžně používaným vláknům na trhu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Kompozitní materiály

1.1 Definice kompozitních materiálů

„Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací.“ [1]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

1.2.1 Podle materiálu matrice:

- kompozity s polymerní matricí,
- kompozity s kovovou matricí,
- kompozity s keramickou matricí,
- kompozity se silikátovou matricí (beton).

1.2.2 Podle druhu dispergovaného pevného komponentu:

- kompozity zpevněné vlákny,
- kompozity zpevněné whiskery,
- částicové kompozity,
- disperzně zpevněné kompozity,
- eutektické kompozity. [1,2]

1.3 Hlavní složky vláknových kompozitů s cementovou matricí

1.3.1 Cement

Jedná se o jemně mleté hydraulické anorganické pojivo, které je vyráběno pálením určitého poměru hornin (s oxidy CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) do slinutí a následného pomletí s přidavkem regulátoru tuhnutí (sádrovec) a dalších příměsí (vysokopecní struska, pucolány, popílký).

Různé cementy dávají kompozitu různé vlastnosti. Kvalita cementové matrice kompozitu závisí zejména na poměru vody a cementu (vodním součiniteli). Menší dávka vody zajistí dosažení vyšších fyzikálně mechanických vlastností.

Cementy pro obecné použití (EN 197-1) se rozlišují podle směsnosti: I. portlandský, II. portlandský směsný, III. vysokopecní, IV. pucolánový, V. směsný. Cementy se dále dělí do třídy normalizovaných pevností 32,5 MPa, 42,5 MPa, 52,5 MPa.

Hydraulické tvrdnutí je důsledkem hydratace kalciumsilikátů (C_3S -alit, C_2S -belit) a kalciumaluminátů (C_3A -trikalciumaluminát, C_4AF -brownmillerit). [3, 5]

1.3.2 Kamenivo

Přírodní nebo umělé kamenivo je zrnitý materiál, který je obvykle chemicky neaktivní. Kamenivo nejčastěji tvoří dvě až tři čtvrtiny objemu betonu a dává mu důležité fyzikálně mechanické vlastnosti jako pevnost, trvanlivost a objemovou stabilitu. Tvoří pevnou kostru kompozitu a snaží se o dosažení co nejnižší mezerovitosti. Použití kameniva vede ke snížení výsledné ceny kompozitu, jelikož cena kameniva je výrazně nižší než cena cementu.

Kamenivo se rozděluje na přírodní a umělé. Přírodní kamenivo se dále dělí podle původu na těžené a drcené. Podle velikosti zrn a jejich skladby se rozlišuje:

- hrubé kamenivo s velikostí zrn 4–125 mm (štěrk, drt')
- drobné kamenivo s velikostí zrn do 4 mm (písek)
- jemné kamenivo do velikosti zrn 0,25 mm (filer).

Všechno kamenivo použité pro přípravu betonu podle ČSN EN 206+A1 musí být deklarováno podle ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu. Norma ČSN EN 12620+A1 je pouze deklarací, nikoli hodnoticí. [4, 5]

1.3.3 Voda

Voda v betonu plní hydratační funkci. Podmiňuje hydrataci cementu a vytváří společně s cementem tuhou kostru cementového tmelu. Další její funkce je reologická. Umožňuje vytvoření tvárného čerstvého betonu ve spojení s dalšími složkami.

Technologicky se voda dělí na záměsovou, která se podle receptury dává přímo při mísení směsi. Další je voda ošetřovací, která se dodává po několik dní zatvrdnutému betonu. Musí se zamezit vysoušení povrchu betonu, tím se omezí tvorba smršťovacích trhlin. Zdrojem vody je obvykle vodovodní řád, jenž poskytuje pitnou vodu, která je použitelná bez laboratorních zkoušek. Lze využít i recyklovanou vodu, již používanou v uzavřeném cyklu při výrobě v betonárce. Recyklovaná voda se nesmí použít pro betony vystavené prostředí XF1–XF4 (působení mrazu). Další podmínkou použití recyklované vody je denní kontrola objemové hmotnosti, která má být do 1 050 kg/m³. Chemické složení se často kontroluje po dobu prvního měsíce používání, později se kontroluje pouze jednou za měsíc. Přírodní povrchová voda musí být laboratorně vyzkoušena před prvním použitím. Mořská voda je použitelná pro prostý beton, ale je nevhodná pro železobeton, protože obsahuje chloridové ionty, které způsobují korozi ocelové výztuže. Splašková voda je nepoužitelná. [4, 5]

1.3.4 Přísady

Jsou to chemické látky, které se přidávají při mísení betonu v množství zpravidla do 5 % hmotnosti cementu.

Moderní technologie výroby betonu vyžaduje pravidelné používání plastifikačních přísad. Plastifikační přísady zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu a snižují množství záměsové vody, čímž snižují vodní součinitel. Důsledkem snížení vodního součinitele dochází k zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu.

Výčet v praxi běžně používaných typů přísad v praxi:

- plastifikační a superplastifikační
- stabilizační
- provzdušňující
- urychlující tuhnutí
- urychlující tvrdnutí
- zpomalovače tuhnutí. [4]

1.3.5 Příměsi

Jedná se o anorganické nebo organické látky, které se přidávají při mísení betonu v množství zpravidla nad 5 % hmotnosti cementu. Velikost zrn je obvykle do 0,025 mm (případně 0,125 mm). Do betonu se přidávají k docílení požadovaných nebo zvláštních vlastností a kvůli zlepšení některých vlastností. Příměsi se dělí na dva typy: inertní (typ I), které jsou nereaktivní s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a na pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II).

Výčet běžně používaných typů přísad v praxi:

- popílek
- křemičité látky (mikrosilika, struska)
- filery, odprašky
- barevné pigmenty. [4, 5]

1.3.6 Výztuž

Prostý beton jako materiál má nedostatek, jímž je jeho křehkost. Vyznačuje se nízkou pevností v tahu za ohybu proti pevnosti v tlaku. Hodnota pevnosti betonu v tahu za ohybu je jen asi 10 % pevnosti v tlaku. Beton se nejčastěji vyztužuje vnitřně. Výztužná látka přebírá tahová napětí vzniklá v konstrukci, vzniklá zatížením nebo smršťováním betonu při hydrataci.

Hlavní dělení výztuže:

- betonářská ocel
- předpínací výztuž
- rozptýlená výztuž.

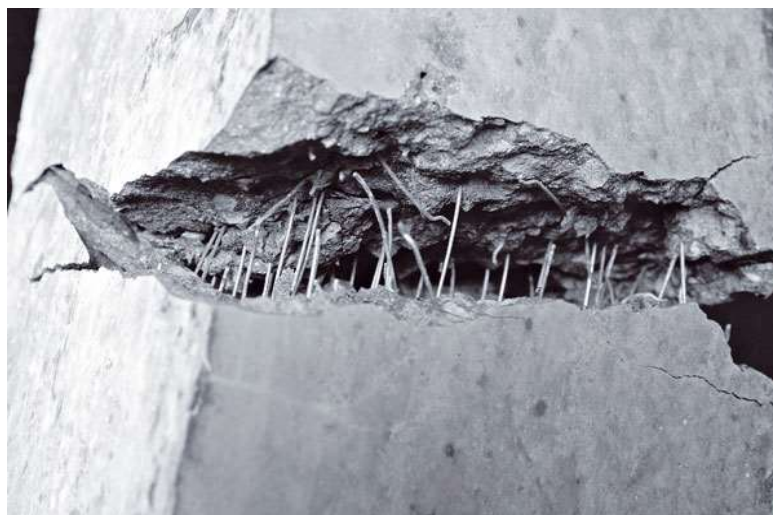
Předpoklady k správné funkci výztuže:

- modul pružnosti výztuže musí být vyšší než matrice
- pevnost v tahu výztuže musí být větší než matrice
- soudržnost výztuže s matricí by měla být co nejvyšší
- výztuž nesmí v konstrukci korodovat
- hodnota teplotní roztažnost výztuže a matrice by se měla co nejvíce rovnat. [4]

2 Vláknobeton

První aplikace předchůdců současně používaných vláken byly v historii využity na hliněné, na slunci sušené cihly (vepřovice), který byly vyztužené slámou. Časem se začala používat další organická vlákna jako koňské žíně, lidské vlasy nebo rákosí. Ve 20. století se rozšířilo používání azbestových vláken. Po zjištění jejich negativního vlivu na lidské zdraví začal intenzivní výzkum nových druhů rozptýlené výztuže, který vedl k používání ocelových vláken jako rozptýlené výztuže ve stavební praxi.

Důležitou funkcí kovové rozptýlené výztuže je změna z křehkého na pevný charakter betonu a omezení deformací tvořených smrštěním. Použití drátků snižuje zpracovatelnost čerstvého betonu, ale výrazně zvyšuje pevnosti v prostém a příčném tahu a v tahu za ohybu. Další velkou výhodou je zvýšení absorpce energie ve formě nárazů nebo vibrací. Správný výběr vláken do kompozitu závisí na dosažení požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností betonů. [4, 6]



Obrázek 1: Porušený betonový sloup s rozptýlenou ocelovou výztuží [7]

Dělení podle druhu vláken:

- anorganická:
 - kovová
 - minerální
- organická:
 - přírodní
 - syntetická. [4]

Dělení podle použité výztuže:

- prostý vláknobeton
- vláknobeton vyztužený ocelářskou výztuží
- vláknobeton vyztužený předpínací výztuží. [4]

Vlákna do betonu jsou charakterizována:

- chemickým složením
- délkou a průměrem
- tvarem vlákna
- hmotností vláken použité na 1 m³ betonu. [3]

Tabulka 1: Vlastnosti některých vláken používaných v betonu [2, 15]

Typ vlákna	Průměr [μm]	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Akryl	20–350	1,16–1,18	0,2–1,0	14–19	10–50
Aramid (Kevlar)	10–12	1,44	2,3–3,5	63–120	2–4,5
Uhlík	8–9	1,6–1,7	2	200–500	0,6–1,5
Celulóza	20–450	1,5	0,4–0,6	6,9	10–25
Čedič	1–3	2,8	4,7	100	–
Nylon	23–400	1,14	0,75–1	4,1–5,2	16–20
Polyester	10–200	1,34–1,39	0,23–1,2	10–18	10–50
Polyetylen	25–1000	0,92–0,96	0,08–0,60	5	3–100
Polypropylen	20–400	0,9–0,95	0,45–0,76	3,5–10	15–25
Ocel	100–1000	7,84	0,5–2,6	210	0,5–3,5
Sklo	14	2,68	3,5	72	–
PVA	14–650	1,3	0,8–1,5	29–36	5,7
Cementová matrice	–	2,5	3,7	10–45	10–45

3 Anorganická vlákna

Mezi anorganická vlákna patří vlákna vyrobená na bázi minerálů nebo kovů. V praxi jsou nejpoužívanější kovová vlákna (výhradně ocelová), z nich je vyráběn drátkobeton. Ocelová vlákna mají vysoký modul pružnosti (210 GPa), významně zlepšují houževnatost a pevnost betonu v tahu. Díky těmto vlastnostem je drátkobeton odolnější vůči rázům, a proto je využíván u dynamicky namáhaných konstrukcí. Rozšířil se u plošných konstrukcí jako průmyslové podlahy a základové desky. V současnosti se jeho vlastností využívá také při betonování ostění tunelů, tenkostěnných konstrukcí a vodohospodářských konstrukcí. [3, 7, 12]

Další anorganická vlákna použitelná do betonu jsou skleněná. Na počátku bylo použití skleněných vláken problematické z důvodu jejich nízké odolnosti vůči alkalickému prostředí. Proto byla vyvinuta alkalivzdorná skleněná vlákna, která jsou použitelná i do cementových kompozitů s pH 12,4. Do kompozitů s cementovou matricí jsou vhodná vlákna E, ECR, AR. Obsahují přes 16 % zirkonu, který zlepšuje jejich odolnost v alkalickém prostředí. Speciálním typem kompozitu je sklovláknobeton s vysokými dávkami skleněných vláken (až 80 kg/m³). Vhodně využívá kombinaci pevnosti cementové matrice, křemičitého písku a pevnosti v tahu skleněných vláken. Sklovláknobeton je nehořlavý, hygienicky nezávadný, mrazuvzdorný a odolává atmosférickým vlivům. [2, 6, 15]



Obrázek 2: Skleněná vlákna typu E [8]

Čedičová vlákna také patří do skupiny anorganických vláken a mají podobné vlastnosti jako skleněná. Čedičová vlákna jsou vyráběna z čedičových hornin, které jsou roztaveny při 1 400 °C. Disponují vysokým modulem pružnosti (100 GPa) a nízkou hmotností. Čedičová vlákna jsou ekologicky nezávadná, netoxická a mají dobré tepelně izolační vlastnosti. Jejich nevýhody jsou podobné jako u skleněných vláken, vykazují nízkou odolnost v alkalickém prostředí.

V minulosti byla hojně využívána azbestová vlákna. Azbest je označení pro přirozeně vzniklé vláknité křemičitanové minerály. Azbestové minerály se ze 40–60 % skládají z křemíku. Zbylou část tvoří oxidy železa, hořčíku a ostatních kovů. Azbestová vlákna jsou odolná vůči vysokým teplotám a většině chemikálií a mají vysokou pevnost v tahu. Eternit je výrobek vytvořený z cementu, přídavku okolo 10 % azbestových vláken a vody. Tento výrobek našel rozsáhlé využití ve stavebnictví. Byl využíván ve střešních a podlahových krytinách, v plášti lehkých příček, ve ventilačních rourách, dlaždicích, vodovodních a odpadních trubkách, podhledech či fasádách. Postupem času se zjistilo, že azbest je nebezpečný pro lidské zdraví. Při mechanickém nebo tepelném namáhání azbestových materiálů se uvolňují ostrá vlákna. Jejich největší nebezpečí představuje inhalace do plic. Vlákna mohou vyvolat azbestózu, fibrózu plic, zesílení pohrudnice a následně rakovinu plic. [1]



Obrázek 3: Eternitová střešní krytina [14]

4 Organická vlákna

4.1 Přírodní vlákna

Stavební průmysl není jen významným spotřebitelem energie, nerostných surovin a půdy, ale také zásadně přispívá k ekologickému znečištění. Snahou dnešního stavitelství je snížit negativní vliv na přírodu a ovzduší. Začít využívat ve větší míře recyklovatelné materiály, druhotné produkty z výroby a výrobky založené na přírodní bázi. Přírodní vlákna jsou nízkonákladové a obnovitelné materiály, snadno dostupné i v méně rozvojových částech světa. Jejich příznivá cena dává možnost jejich využití k vytvoření méně finančně náročných kompozitních materiálů. Další výhodou je jejich nízká objemová hmotnost, proto jsou vhodné jako plnivo do lehkých a tepelně izolačních konstrukcí.

V případě použití některých organických vláken s vysokým obsahem sacharidů je třeba dbát na to, že sacharidy způsobují zpomalování hydratace cementu a je nutná jejich mineralizace. Mineralizace je proces, při kterém jsou vlákna na několik dní uložena do prostředí s vápenným mlékem nebo s nízkokoncentrovaným vodním sklem a poté se z nich stane anorganické plnivo.

Nevýhodou přírodních vláken je jejich nehomogenita, která je způsobena odlišnými podmínkami růstu a způsobuje vysoký výkyv mechanických vlastností. [15, 21]

Základní dělení podle původu přírodních vláken:

rostlinný:

- ze stonku,
- z listu,
- z kůry,
- ze dřeva.

živočišný:

- srst zvířat,
- sekret hmyzu. [20]

4.1.1 Konopná vlákna

Konopí obvykle roste rychle a snadno, s minimální údržbou a bez použití umělých hnojiv. Vyskytuje se téměř v každém klimatu celé Evropy a Asie. To dosvědčuje nárůst jeho pěstitelských ploch v klimaticky odlišných zemích jako je Španělsko, Německo nebo Finsko. Po druhé světové válce nastal úpadek pěstování konopí v důsledku převahy produkce bavlny a umělých vláken. Svoji roli sehrála i protidrogová kampaň.

Konopná vlákna se získávají ze stonků rostlin konopí setého (*Cannabis sativa*). Stonek se skládá z dřevěného jádra, který je obklopen lýkem. Zpracováním stonků vznikají dva typy vláken:

- konopné pazdeří–75 %
- konopná vlákna–25 %.



Obrázek 4: Konopné pazdeří (vlevo), konopná vlákna (vpravo) [13]

Konopí jako stavební materiál není novinkou. Bylo potvrzeno použití konopných vláken při stavbě mostu již v 6. století před naším letopočtem. Nejčastěji se konopná vlákna používají pro výrobu izolačních produktů. V zahraničí vznikla alternativa pro běžně používaný beton. Konopný beton, někdy zvaný hempercrete je biokompozitní směs konopného pazdeří, vápenného pojiva a vody. Samotný cement se nedoporučuje jako pojivo, především z enviromentálních aspektů. Ve srovnání s hydraulickým vápnem použití cementu významně nezvyšuje mechanickou pevnost. Konopný beton je lehký materiál, jehož hmotnost je oproti klasickému asi osminová. Lze ho použít pro konstrukci stěn, podlah i střech. Materiál se může lít do bednění, nanášet stříkáním, případně lze využít prefabrikovaných dílců (cihly, panely). [9, 10, 11, 12,]

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti konopných vláken [15]

Typ vlákna	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Konopná	1,48	0,69	70	1,6



Obrázek 5: Konopný beton [16]

4.1.2 Bambusová vlákna

Bambus je obrovská, travnatá rostlina s dřevnatými stonky. Většina druhů bambusů roste v tropických a subtropických oblastech. Vyskytují se i druhy rostoucí v mírném podnebném pásmu. Bambus je bohatý přírodní zdroj v Asii, střední a jižní Americe.

Bambusová vlákna lze extrahovat mechanickým nebo chemickým způsobem. Pro mechanický způsob je typické enzymové zpracování rozdrceného bambusu, které způsobí rozvláknění bambusu a vytvoření houbovitě hmoty, z níž jsou pomocí mechanického hřebenu získána jednotlivá vlákna. Chemickým způsobem jsou získávána vlákna z rozdrceného bambusu alkalickou hydrolýzou za pomoci NaOH a následného bělení. Mechanický proces je ekonomicky a časově náročnější než chemický, ale je šetrnější k životnímu prostředí.

Bambus je jedním z nejstarších stavebních materiálů lidstva. V zemích původu je využíván jako lešení, materiál pro stavbu mostů a také jako náhrada prutové ocelové výztuže. Bambusová vlákna nabízejí řadu výhod, kterými jsou velká dostupnost, nízká cena a ekologická šetrnost. Přítomnosti bambusových vláken se hlavně využívá v textilním průmyslu. [19, 21, 22,]

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti bambusových vláken [15]

Typ vlákna	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Bambusová	0,6–1,11	0,14–0,23	11–17	–



Obrázek 6: Bambusová vlákna [23]

4.1.3 Kokosová vlákna

Kokosové skořápky jsou ve velkém množství k dispozici v mnoha tropických zemích (Indie, Vietnam, Srí Lanka) jako odpadní produkt po zpracování kokosové vody a dužiny. Jedná se o krátká hrubá vlákna, která se získávají z vláknité skořápky kokosu. Nejdříve se odstraní skořápka kokosu, jež se uloží na několik měsíců do nádrže s vodou. Dalším krokem je rozvlákňování, při němž se rozmáčené kůry ručně tlučou nebo strojně melou. Oddělování vláken od dřeviny se zakončuje vypráním od zbytků nečistot. Existují dva typy kokosových vláken—hnědá vlákna z vyzrálých kokosových ořechů a bílá získaná z nezralých kokosových ořechů. Hnědá vlákna jsou silná a odolná proti oděru. Bílá vlákna jsou vhodná k barvení nebo bělení. Jsou také hladší a jemnější, což způsobuje jejich menší pevnost.

Využití kokosových vláken k výrobě lan je známo už od 11. století. V dnešní době mají uplatnění v textilním průmyslu při výrobě rohožek, sítí, kobereců nebo geotextilií. Kokosová vlákna mají vysoký obsah celulózy, která dodává materiálům pružnost, pevnost a vysokou trvanlivost. Vlákna jsou odolná proti plísním, houbám a hnilobě. Uvnitř buňky vlákna se nachází dutina (lumen), která snižuje měrnou hmotnost a zvyšuje tepelně izolační a akustické vlastnosti kompozitu. [17, 18, 19]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti kokosových vláken [15]

Typ vlákna	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Kokosová	1,2	0,18	4–6	30



Obrázek 7: Buňka kokosového vlákna [16]

4.1.4 Lněná vlákna

Lněná vlákna jsou získávána ze lnu setého (*Linum usitatissimum* L.), který pochází z území mezi východním Středomořím a Indií. Byl pěstován ve velkém již ve starověkém Egyptě. Len je připravený ke sklizení, když začne žloutnout stonek a semena zhnědnou. Na některých farmách se sklízí už před růstem semen, což způsobuje výjimečnou jemnost vláken, ale ponechává pěstitele bez semen pro další výsadbu.

Výroba lněných vláken začíná odstraněním semen z hlav lnu. Dále je len polámán a zbaven pazdeří (obal vlákna). Nakonec se snopy vláken pročešou na hřebenech.

Lněná vlákna jsou měkká, lesklá a pružná. Svazky vláken připomínají lidské vlasy. Hrubší druhy vláken se využívají k výrobě provazů a motouzů. Lněné vlákno má největší využití v textilním průmyslu kvůli jeho pevnosti, lesku, trvanlivosti a absorpci vlhkosti. Dále se využívá ve vysoce kvalitním papírenském průmyslu k tištění bankovek, filtračních papírů a cigaretových papírků. [24, 23]

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti lněných vláken [15]

Typ vlákna	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Lněná	1,5	345–1035	27,6	2,7–3,2

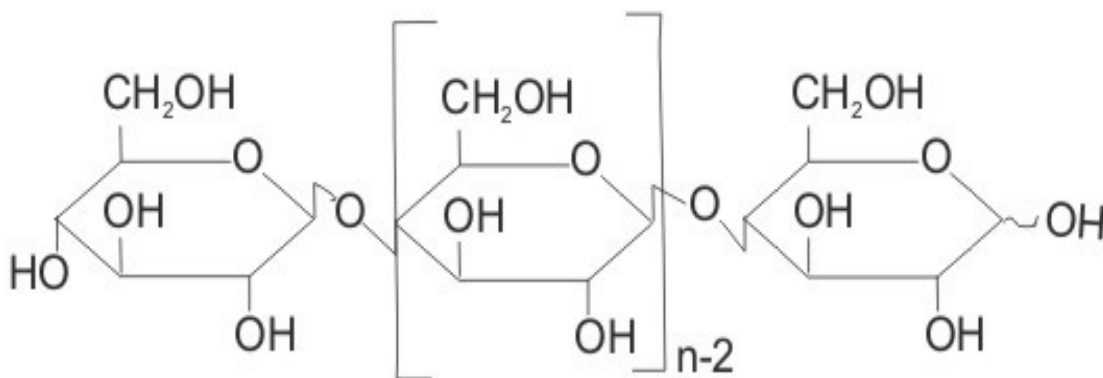
5 Celulózová vlákna

5.1 Celulóza

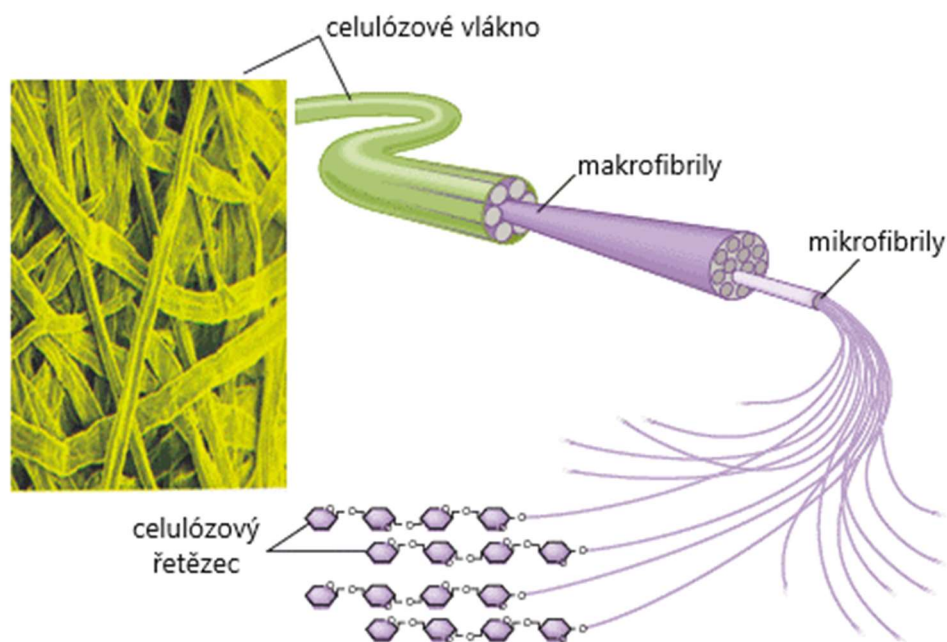
Je nejrozšířenějším přírodním polymerem na Zemi, což ji činí také nejběžnější organickou sloučeninou s chemickým vzorcem $C_6H_{10}O_5$. Její základní jednotkou je β -D-glukopyranosa. Spojení jednotek je glykosidickými vazbami β -1,4 do lineární struktury s množstvím vodíkových můstků. Celulózová vlákna se skládají z makrofibril, která jsou tvořena mikrofibrilami. Jednotlivé mikrofibrily jsou tvořeny celulózovými řetězci.

Je odhadováno, že roční produkce celulózy je 1,5 bilionu tun, což z ní činí důležitý obnovitelný zdroj surovin pro produkty šetrné k životnímu prostředí. Celulóza je obsažena prakticky ve všech rostlinách, záleží ovšem na množství a v jaké formě je obsažena. Rostliny obsahují přibližně 33 %, dřevo přibližně 50 % a bavlna přibližně 90 % celulózy. Nejčastěji se v přírodě nachází společně s hemicelulózou, ligninem, doprovodnými složkami (trísloviny, pektiny, pryskyřice, tuky) a vodou.

Celulóza je bezbarvý, netoxický pevný polymer bez zápachu, který obsahuje některé slibné vlastnosti jako vysokou mechanickou pevnost, biokompatibilitu a vysokou sorpční kapacitu. Celulóza se ve vodě nerozpouští, ale absorbuje ji (je hygroskopická) a zvětšuje svůj povrch. V čisté formě nelze celulózu rozpustit v žádném běžném rozpouštědle. Nelze ji tavit, jelikož nepatří mezi termoplastické polymery. Při vyšších teplotách dochází k její degradaci. Celulóza se primárně používá v papírenském průmyslu (buničina) a v textilním průmyslu. [27, 29]



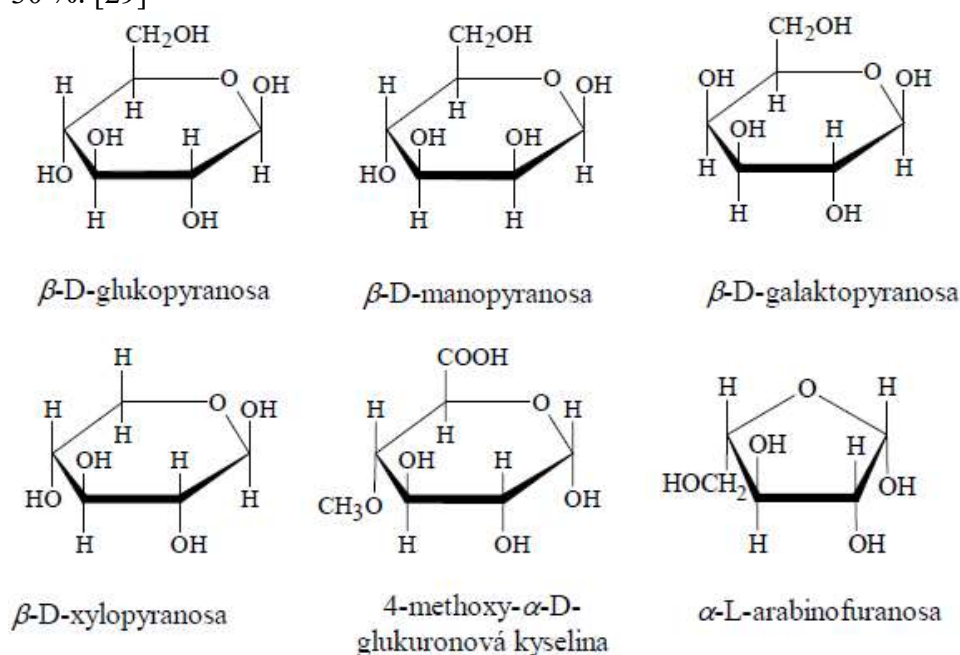
Obrázek 8: Chemická struktura celulózy [26]



Obrázek 9: Struktura celulózového vlákna [30]

5.2 Hemicelulóza

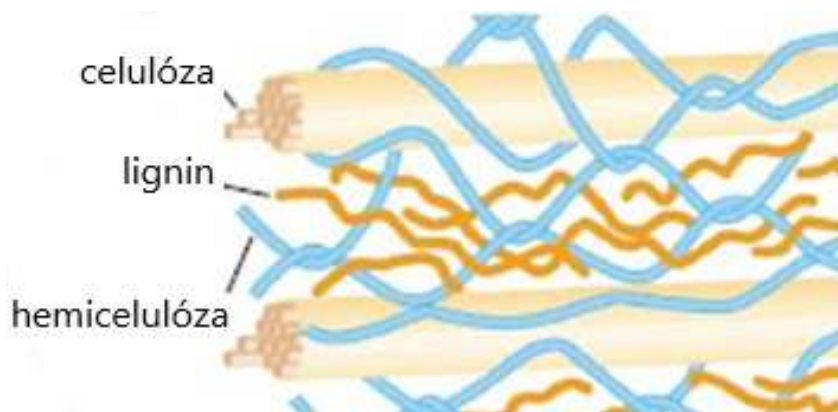
Hemicelulóza je lineární polysacharid s krátkými bočními řetězci. Složený ze základních jednotek, které tvoří 6 monosacharidů (viz obrázek 10). Hemicelulóza vyplňuje prostor mezi vlákny celulózy. Chemicky je méně odolná kvůli své nižší molekulové hmotnosti než celulóza, proto se při zpracování rozpustí a vyplaví. Podíl hemicelulózy ve dřevě je asi 20–30 %. [29]



Obrázek 10: Základní stavební monosacharidy hemicelulózy [29]

5.3 Lignin

Jedná se o složitou makromolekulární látku, která dodává dřevu pevnost a tvrdost. Po celulóze je nejzastoupenějším polymerem v buněčných stěnách rostlin. Lze jej z dřevní hmoty odstranit pouze chemickým způsobem. Odstranění ligninu z vlákniny je žádoucí, protože spojuje polysacharidy uvnitř dřevní hmoty. Lignin je mimořádně náchylná látka na chemické a mechanické působení. Při extrakci se vždy změní, a poté ho nazýváme izolovaným ligninem. Lignin je hlavní odpadní produkt při zpracování dřeva na celulózu. Uvolňuje se ve formě ligninsulfonátu sodného, který se například používá jako plastifikační přísada do betonu. Podíl hemicelulózy ve dřevě je asi 15–35 % (u jehličnanů je vyšší než u listnatých dřevin). [28, 29]



Obrázek 11: Schéma dřevní hmoty: celulóza, hemicelulóza a lignin [28]

5.4 Výroba celulózových vláken

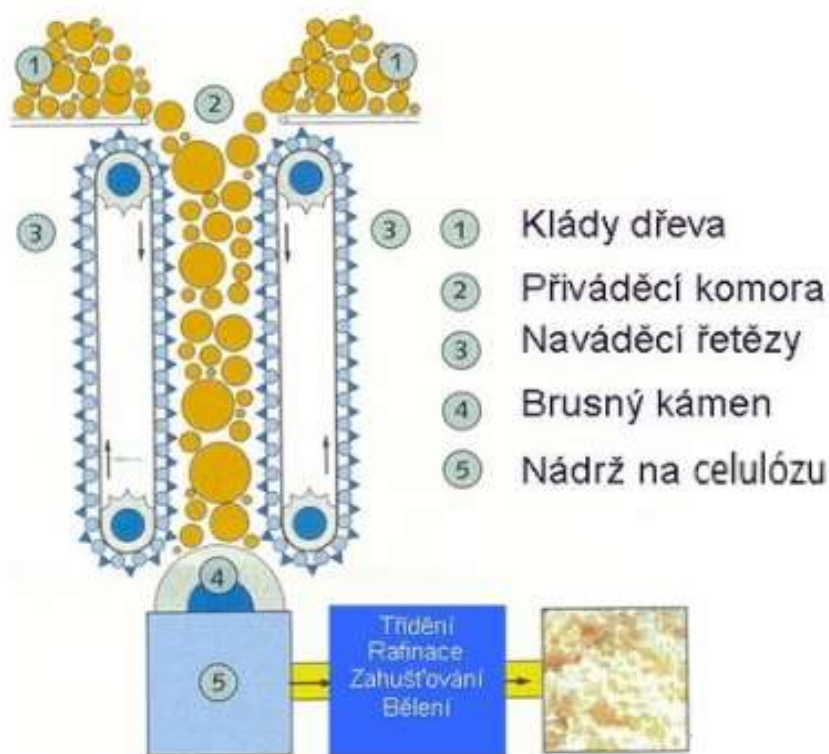
Celulózu lze vyrobit z:

- z jednotlivých rostlin (bavlna, len, konopí, juta),
- z víceletých rostlin (jehličnaté a listnaté dřeviny),
- ze sběrového papíru.

Nejčastěji se celulóza získává ze dřeva jehličnatých stromů, tím že se odstraní přebytečné složky (hemicelulóza, lignin, tuky, vosky aj.) [29]

5.4.1 Mechanický způsob

Celulóza je získávána mechanicky (broušením). Klády dřeva jsou přiváděny naváděcími řetězy na rotující brusný kámen. Následuje vaření (rozvláknění) dřevoviny, praní, mletí, třídění, bělení a na závěr sušení. Mechanický způsob má vynikající výtěžnost (více než 90 % dřeva). [28]



Obrázek 12: Mechanický způsob výroby celulózy [28]

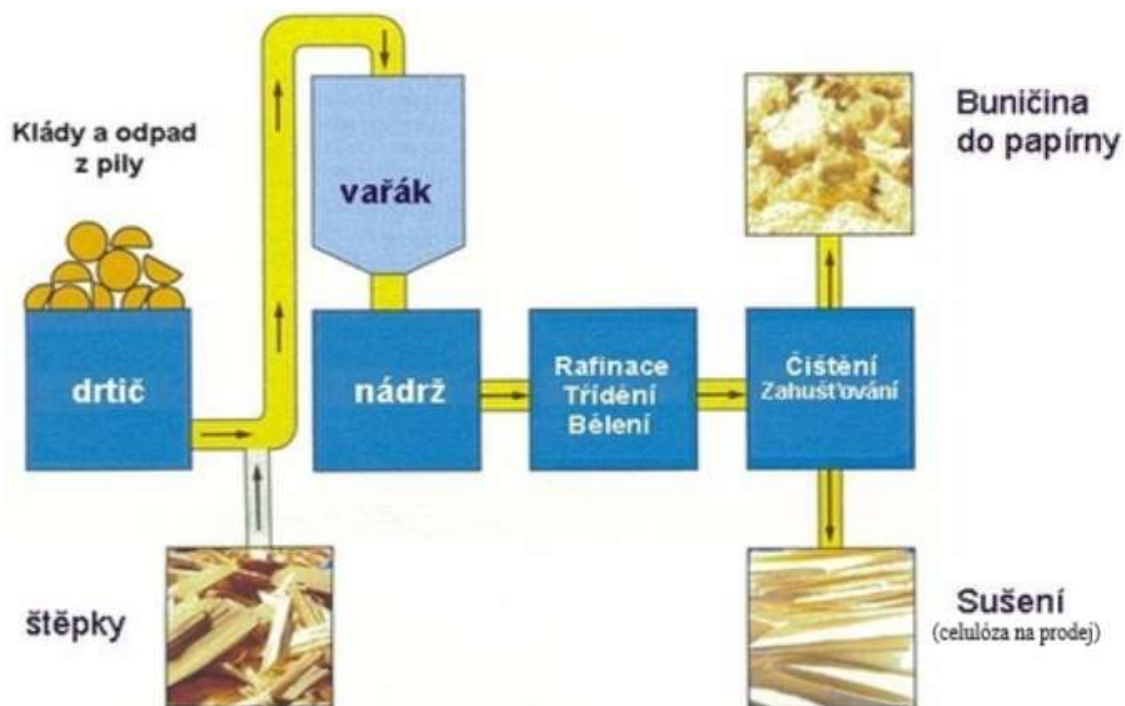
5.4.2 Chemický způsob

Chemické zpracování spočívá ve vaření štěpků dřeva v roztoku chemikálií. Výsledným produktem jsou téměř čistá celulózová vlákna, protože ostatní složky (hemicelulóza, lignin aj.) se chemicky odstraní. Podle typu chemikálií se používají dva způsoby vaření štěpků:

- **Sulfitový způsob** (kyselý) – k vaření dřeva se používá varná kyselina (roztok hydrogensířičitanu vápenatého $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$).
- **Sulfátový způsob** (zásaditý) – k vaření dřeva se používá varný louh (roztok hydroxidu sodného NaOH a sulfidu sodného Na_2S). [28]

5.4.3 Recyklovaná celulóza

Vyrábí se ze starého papíru. Chemickým způsobem se rozvlákní a zbaví nečistot, jako je například tisková barva. Část nečistot však v surovině zůstává, a proto se po rozvláknění tato hmota pere, aby se z ní odstranily zbytky kyseliny či louhu. Následně se třídí, čistí, bělí a nakonec suší. [28]



Obrázek 13: Schéma chemického způsobu výroby celulózy [28]

6 Polypropylenová vlákna

Polypropylenová vlákna (dále jen PP vlákna) jsou vyráběna z vláknotvorných polymerů vznikajících polymerizací z jednoduchých chemických látek (monomerů). Monomer je základní jednotka, ze které jsou vytvářeny dlouhé řetězce (polymery). PP vlákna patří do skupiny polyolefinů. PP vlákna jsou používána do cementových kompozitů k omezení poruch při plastickém smršťování. Dále přispívají k vytvoření houževnatějšího a kompaktnějšího materiálu. Dávka PP vláken se nejčastěji pohybuje od 0,8 do 1,1 kg/m³. Nejčastěji bývají povrchově upravena tzv. lubrikací, která způsobí dokonalé rozdělení vláken při styku s vodou a rozmísení jednotlivých vláken v celém objemu čerstvého betonu. [6]

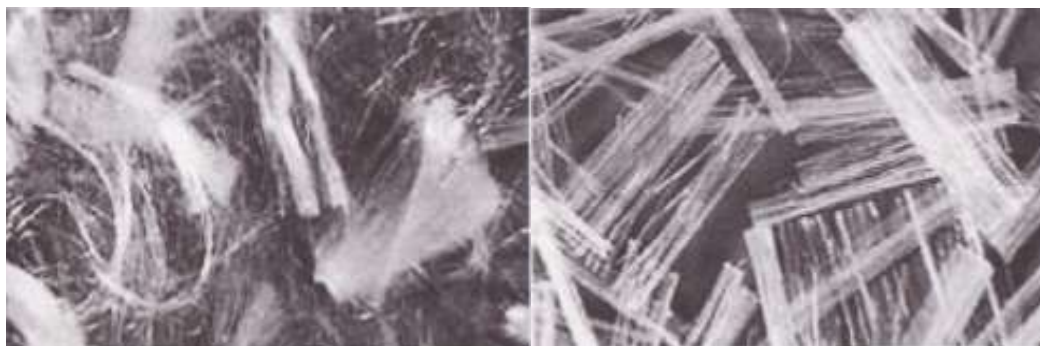
6.1 Dělení podle způsobu výroby:

6.1.1 Monofilamentní vlákna

Jsou vyráběna vytlačováním taveniny tryskou, po němž následuje zachycení a tažení vlákna. Mají kruhový průřez. Jedná se o velmi jemná vlákna o průměru 18 μm, která zaujímají výrazně vyšší počet na hmotnostní jednotku betonu než vlákna fibrilovaná.

6.1.2 Fibrilovaná vlákna

Je vyrobena fólie, ze které jsou vlákna řezána na požadovanou délku. Tento způsob výroby vytváří hranatý průřez a drsnější povrch vláken. Drsnější povrch fibrilovaných vláken způsobuje oproti monofilamentním vláknům zlepšení soudržnosti s betonem. [6, 32]



Obrázek 14: PP monofilamentní vlákna (vlevo), PP fibrilovaná vlákna (vpravo) [6]

7 Vlastnosti cementových kompozitů ovlivněné vlákny

7.1.1 Omezení smršťovacích trhlin při hydrataci cementu

Jemná polymerní vlákna nepřidávají betonu žádnou konstrukční pevnost v tahu ani tlaku, protože mají nízký modul pružnosti (PP vlákna 3,5–10 GPa, celulózoová 7–8,5 GPa). Používají se k snížení tvorby trhlin plastickým smršťováním betonu při hydrataci, tím že se zmenší deformace na povrchu zrn kameniva. [6]

7.1.2 Samoošetřování betonu

Celulózoová vlákna také mohou plnit samoošetřovací funkci. Vlákna v čerstvé betonové směsi na sebe naváží určité množství vody, které postupně v průběhu hydratace uvolňují a snižují tak požadavky na ošetřování betonu.

7.1.3 Odolnost betonu proti působení vysokých teplot

Při použití celulózoových a polypropylenových vláken Ing. Bláha ve své diplomové práci upozoroval zlepšení odolnosti betonu vystavenému vysokým teplotám, která způsobují explozivní odlupování betonu. Po vyhoření celulózoových vláken vznikly spojitě póry, které umožnily odchod chemicky vázané vody, která nezpůsobila tak velké porušení struktury betonu. [33]

7.1.4 Zvýšení odolnosti proti abrazi

Některá jemná vlákna mohou podle technických listů výrobců zvyšovat odolnost proti abrazi betonu. Ve výzkumu, který provedli M. Najimi, F. M. Farahani a A. R. Pourkhorshidi, byl prokázán pozitivní vliv na abrazivzdornost betonu použitím polypropylenových vláken do betonu. Na základě výsledků této bakalářské práce ovšem nelze jednoznačně konstatovat, že přídavek PP vláken měl pozitivní vliv na zvýšení odolnosti betonu vůči abrazi. [31]

8 Konkrétní použití celulózových a polypropylenových vláken

8.1 Celulózová vlákna

- **Betonové prefabrikáty**

Přídavek celulózová vlákna při výrobě prefabrikovaných dílců přispívá k snazšímu odformování a zvýšení manipulačních pevností. [35]



Obrázek 15: Využití celulózových vláken v betonových prefabrikátech [35]

- **Cementovláknité desky**

Jsou vyráběny z cementu, minerálních plniv, celulózy a vody. Jejich použití je vhodné na pohledové fasády, podlahy a stěny. Mezi výhody těchto desek patří mrazuvzdornost, odolnost proti povětrnostním vlivům, třída reakce na oheň A1 a objemová stabilita. [34]



Obrázek 16: Celulózové cementovláknité desky [35]

- **Maltové a omítkové směsi**

Vlákna nebo prášek se používají jako zahušťovadlo k úpravě viskozity malty, ovlivnění reologie a tokových vlastností malty má za následek zvýšení pevnosti. Ovlivnění reologie má vliv na lepší zpracovatelnost a aplikaci malty strojně nebo ručně. Vlákna zlepšují tepelné vlastnosti omítek a také přilnavost malt na suchý i mokrý povrch. [37]

- **Asfaltová směs**

Celulózová vlákna zpracovaná do pelet se využívají jako nosič bitumenu při výrobě asfaltových směsí. Zlepšují stabilitu asfaltové směsi a zabráňují odlučování asfaltového pojiva od kameniva během přepravy na stavbu. [38]



Obrázek 17: Vlákna ve formě pelet určená do asfaltové směsi [38]

8.2 Polypropylenová vlákna

- **Betonové konstrukce**

Monofilamentní nebo fibrilovaná vlákna jsou vhodná pro řadu betonových konstrukcí. Jsou vhodné do klasických i stříkaných betonů pro omezení trhlin způsobených plasticickým smrštěním a sedáním betonu. Díky povrchové úpravě (lubrifikaci) dochází k snadnému rozptýlení vláken v čerstvém betonu. Zvyšují požární odolnost konstrukce snížením povrchového explozivního odlupování betonu. Zmenšují náchylnost k segregaci kameniva a bleedingu betonu. [6]

- **Stěrky, malty, omítky, tmely, živичné směsi**

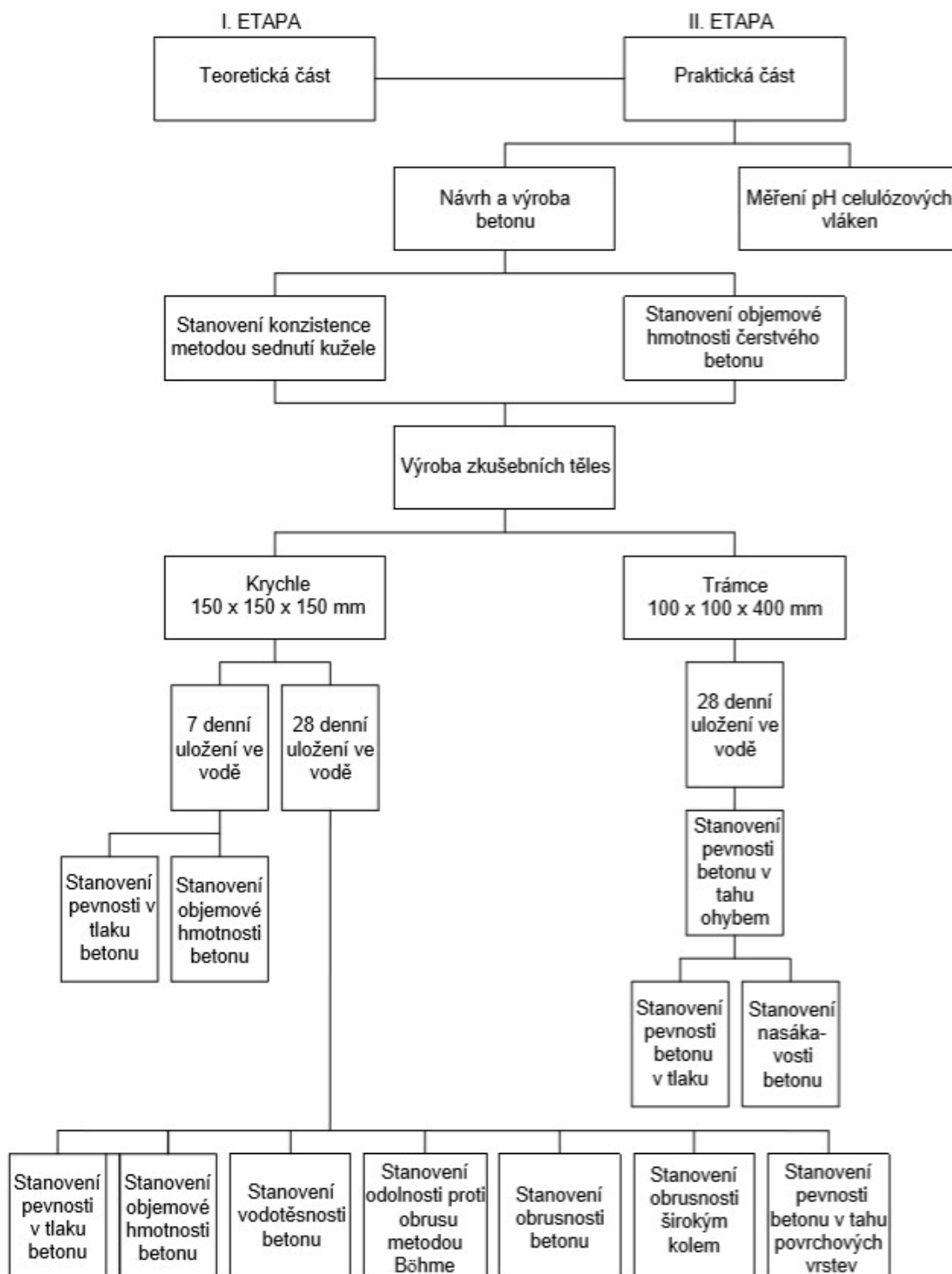
I v tomto případě se využívá vláken k omezení vzniku smršťovacích trhlin a dosažení houževnatější a spolehlivější struktury materiálu. Vlákna zlepšují přilnavost malt na podkladní povrch. [37]

PRAKTICKÁ ČÁST

9 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je sledování vlivu jemných organických vláken na vybrané vlastnosti betonu v čerstvém a zatvrdlém stavu. Cílem teoretické části je sumarizace informací o vláknových kompozitech s organickými vlákny se zaměřením na přírodní, celulózová a polypropylenová vlákna. Jsou uvedeny vlastnosti betonu ovlivněné jemnými organickými vlákny a konkrétní aplikace celulózových a polypropylenových vláken. Cílem experimentální části práce je sledování vlivu přídavku vláken na vybrané vlastnosti betonu. Po 7 dnech je na zatvrdlém betonu určována objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Po 28 dnech je zjišťována objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost tahu ohybem, pevnost v tahu povrchových vrstev, odolnost proti abrazi, vodotěsnost a nasákavost. Také je mikroskopicky sledováno rozmísení celulózových vláken v cementové matrici. V praktické části jsou navrženy a vyrobeny 4 druhy betonu (referenční, s celulózovými vlákny, se strukturovanými polymerními a monofilamentními polypropylenovými vlákny). Vlákná jsou dávkována v množství podle doporučení výrobců (0,5 kg, 0,9 kg a 1 kg na 1 m³ betonu). Na čerstvém betonu je sledována konzistence metodou sednutí kužele a objemová hmotnost. V recepturách je měněna dávka plastifikační přísady, dávka cementu a strusky, aby bylo dosaženo stejné konzistence čerstvých betonů (S4, 180 a 190 mm). Kromě požadavku na zajištění rovnoměrného rozmísení vláken v betonu je důležité zajištění trvanlivosti vláken v cementové matrici, ve které může dojít k degradaci vláken vlivem rozdílného pH (pH vláken je ± 6). Proto je zkoumána odolnost vybraných celulózových vláken. Je sledována změna pH roztoků (od pH 4 do pH 12) s celulózovými vlákny určenými do betonu (CON) a celulózovými vlákny, která nejsou primárně určená do betonu (W1, W2, W3), ale vznikají jako vedlejší produkty výroby.

10 Metodika práce



Obrázek 18: Schéma metodiky práce

11 Použité suroviny

Cement

Ve všech recepturách byl použit cement:

- CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá.

Kamenivo

Ve všech recepturách bylo použito následující kamenivo:

- DTK (drobné těžené kamenivo), lokalita Žabčice, frakce 0–4 mm, živcový písek,
- HDK (hrubé drcené kamenivo), lokalita Želešice, frakce 8–16 mm, amfibolit,
- HDK, lokalita Želešice, frakce 11–22 mm, amfibolit.

Příměs a přísada

Dále byly použity:

- příměs: jemně mletá vysokopecní struska z Dětmovic,
- přísada: superplastifikátor MC Powerflow 2695 na bázi polykarboxylátu.

Vlákna

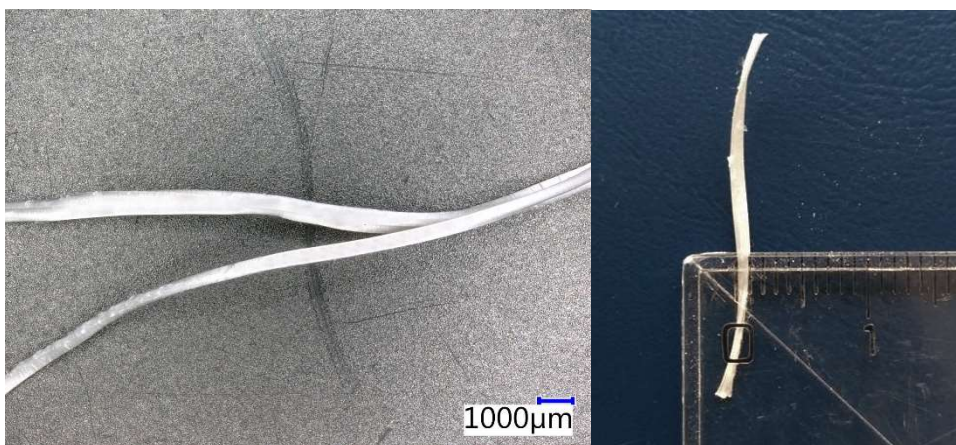
- **Celulózová vlákna CHRYSO Fibre UF–500**
 - použité v receptuře CEL,
 - délka: 1,9–2,3 mm,
 - průměr: 14–19 μm ,
 - pevnost v tahu: 600–900 MPa,
 - modul pružnosti v tahu: 8,5 GPa.



Obrázek 19: Celulózová vlákna CHRYSO Fibre UF–500 (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 20 $\times$ zvětšeno)

- **Polymerní strukturovaná vlákna CHRYSO S 25**

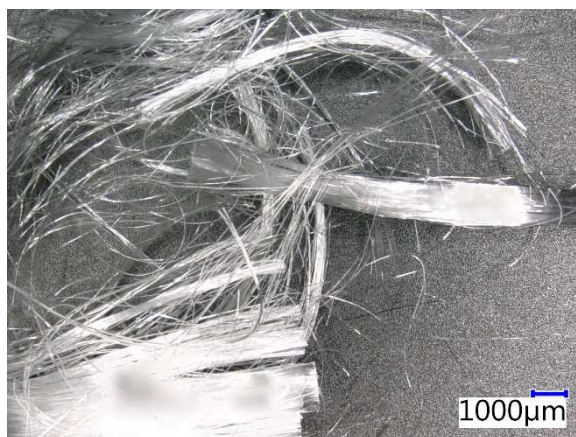
- použité v receptuře PP+PE,
- délka: 25 mm,
- průměr: cca 1 mm,
- pevnost v tahu: 600–900 MPa,
- modul pružnosti v tahu: 5 GPa.



Obrázek 20: Polymerní strukturovaná vlákna CHRYSO S 25 (vlevo fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F (20× zvětšeno), vpravo porovnání tloušťky vlákna s pravítkem)

- **Polypropylenová vlákna Fibrin 23 D**

- použité v receptuře PP-MONO,
- délka: 12 mm,
- průměr: 18 µm,
- pevnost v tahu: 557 MPa,
- modul pružnosti v tahu: 4,1 GPa.



Obrázek 21: Polypropylenová vlákna Fibrin 23 D (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 20× zvětšeno)

12 Navržené receptury

Tabulka 6: Složení jednotlivých receptur betonu na 1 m³ v kg

Receptura	REF	CEL	PP+PE	PP-MONO
Třída betonu	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Konzistence	S4	S4	S4	S4
CEM I 42,5 R	270	275	275	275
Struska	90	95	95	95
DTK 0–4 Žabčice	810	805	800	805
HDK 8–16 Želešice	620	615	610	615
HDK 11–22 Želešice	390	390	385	390
Voda	170	170	175	170
MC Powerflow 2695	1,7	1,8	1,8	1,8
Vlákna	—	0,5	0,9	1,0

Vlákna jsou dávkována v množství podle doporučení výrobců (informace v technických listech). Cílem návrhu složení betonu je dosažení stejné konzistence čerstvých betonů, proto je v recepturách měněna dávka plastifikační přísady, dávka cementu a strusky.

13 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa

Z každé receptury bylo namícháno a vyrobeno v laboratorním prostředí:

- 8 krychlí o velikosti 150 x 150 x 150 mm
- 2 trámce o velikosti 100 x 100 x 400 mm.

Zkušební tělesa byla další den po vyrobení odformována a uložena do vodního prostředí po dobu 7 a 28 dní.

14 Seznam prováděných zkoušek na betonu

14.1 Zkoušky betonu v čerstvém stavu

- Stanovení konzistence zkouškou sednutí – ČSN EN 12350 – 2 [40]
- Stanovení objemové hmotnosti betonu – ČSN EN 12350 – 6. [41]

14.2 Zkoušky betonu v zatvrdlém stavu

- Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu – ČSN EN 12390 – 7 [42]
- Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles – ČSN EN 12390 – 3 [43]
- Stanovení pevnosti v tahu ohybem – ČSN EN 12390 – 5 [44]
- Stanovení nasákavosti – ČSN 73 1316 [45]
- Stanovení vodotěsnosti betonu (HV8) – ŘVC TKP 1 [46]
- Stanovení pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev – ČSN 73 1318 [47]
- Stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme – ČSN EN 13892 – 3 [48]
- Stanovení obrušnosti betonu – ČSN 73 1324 [49]
- Stanovení obrušnosti širokým kolem – ČSN EN 1338, ČSN EN 1339, ČSN EN 1340. [50, 51, 52]

15 Výsledky provedených zkoušek a diskuze výsledků

15.1 Konzistence a objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu

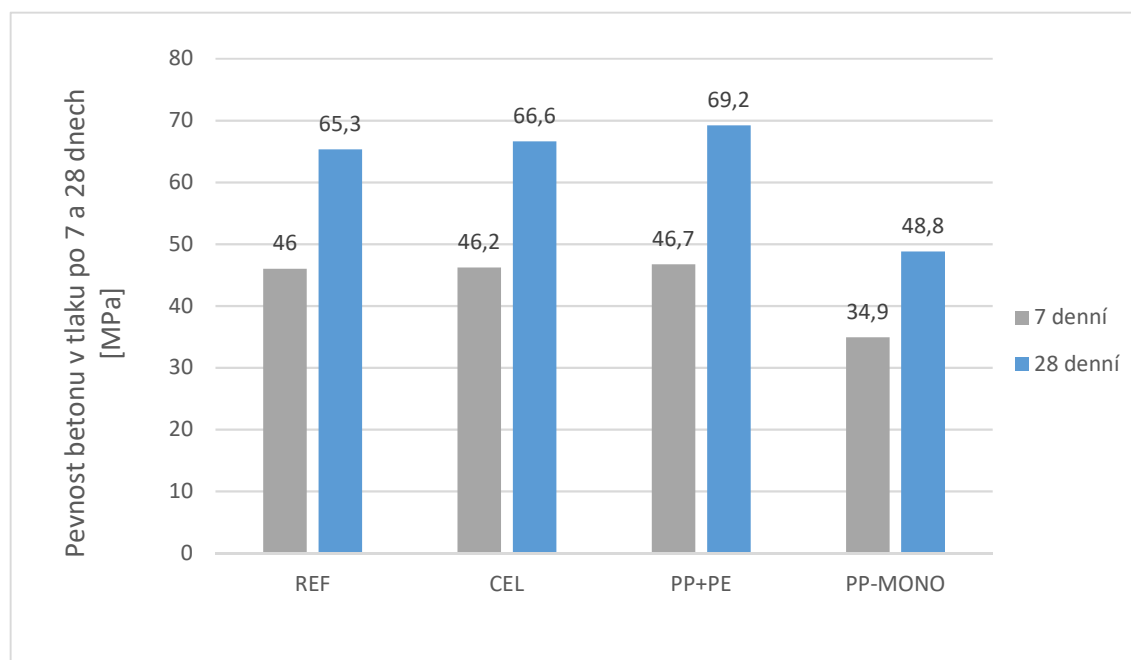
Tabulka 7: Vlastnosti čerstvého betonu (konzistence a objemová hmotnost)

Receptura	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Sednutí kužele [mm]
REF	2460	180
CEL	2440	190
PP+PE	2480	190
PP-MONO	2370	180

15.2 Objemová hmotnost a pevnost v tlaku betonu

Tabulka 8: Objemová hmotnost a pevnost v tlaku betonu po 7 a 28 dnech

Receptura	7denní		28denní	
	Objemová hmotnost betonu [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost betonu [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
REF	2460	46,0	2470	65,3
CEL	2440	46,2	2470	66,6
PP+PE	2470	46,7	2480	69,2
PP-MONO	2400	34,9	2390	48,8



Graf 1: Pevnost betonu v tlaku po 7 a 28 dnech

V tabulce 8 jsou uvedeny objemové hmotnosti a pevnosti betonu v tlaku po 7 a 28 dnech. Z výsledků je vidět, že betony s celulóзовými a strukturovanými polymerními vlákny dosáhly podobných hodnot jako referenční beton a přidání těchto vláken nemělo vliv na pevnost betonu v tlaku. Beton s PP monofilamentními vlákny měl nejmenší objemovou hmotnost. Výrobce v technickém listu udává, že při použití doporučené dávky vláken je obsaženo 273 milionů vláken v 1 m³ betonu. Velké množství jemných vláken mohlo způsobit navázání vzduchu na jejich povrch při mísení betonu, a zároveň vnesení vzduchu mohlo způsobit snížení pevnosti v tlaku proti ostatním betonům.

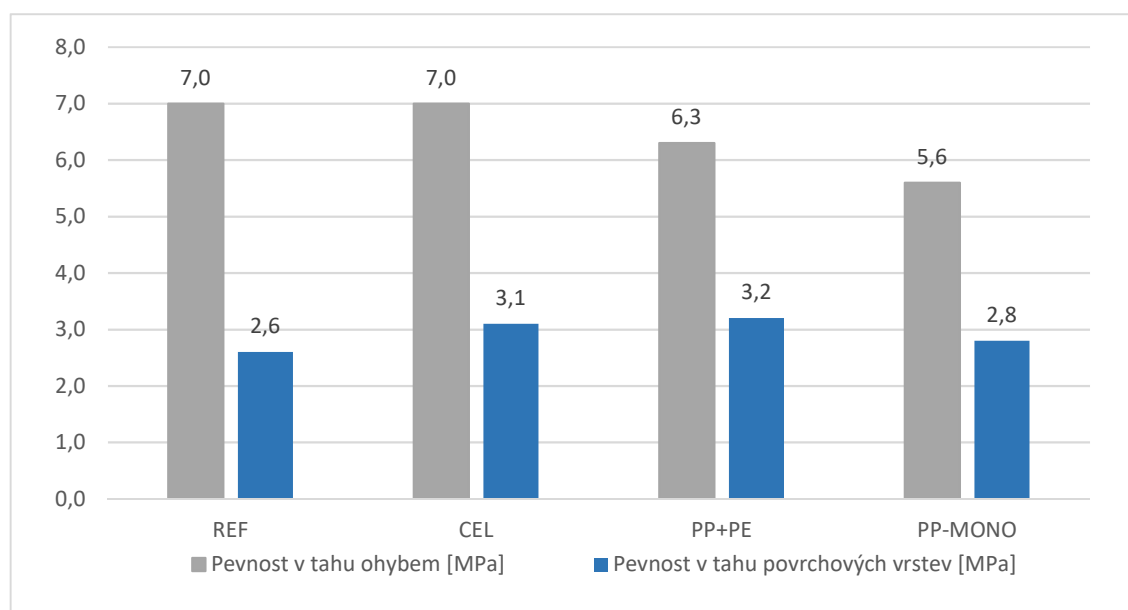
15.3 Stanovení pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku po 28 dnech

Tabulka 9: Objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku betonu na zlomcích trámů

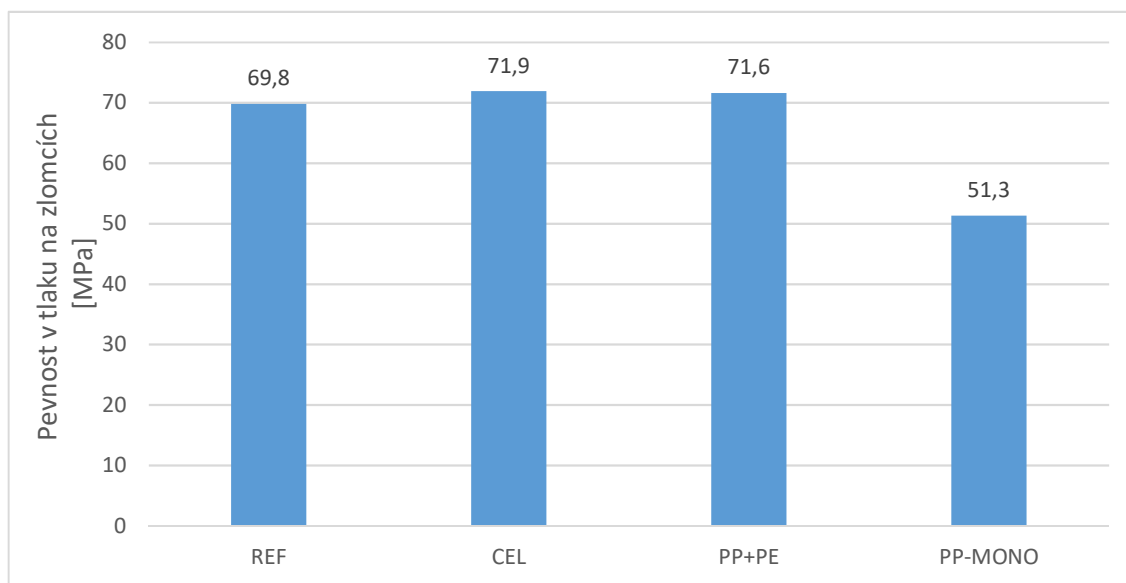
Receptura	Objemová hmotnost zatvrdlého betonu [kg/m ³]	Pevnost v tlaku (na zlomcích) [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]
REF	2430	69,8	7,0	2,6
CEL	2410	71,9	7,0	3,1
PP+PE	2420	71,6	6,3	3,2
PP-MONO	2320	51,3	5,6	2,8



Obrázek 22: Připravené vzorky na zkoušku pevnosti v tahu povrchových vrstev



Graf 2: Pevnost v tahu ohybem a pevnost v tahu povrchových vrstev



Graf 3: Pevnost v tlaku na betonových zlomcích trámů po 28 dnech

V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty pevnosti zkušebních trámů v tahu ohybem a v tlaku po 28denním zrání. Testovaná vlákna nezvyšují pevnosti betonu v tahu ohybem, protože mají nižší modul pružnosti v tahu než cementová matrice. Dochází k jejich vytržení nebo přetržení dříve, než dojde k porušení cementové matrice. Přídavek celulózových a strukturovaných polymerních vláken neměl významný vliv na výslednou pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku. Přídavek monofilamentních PP vláken způsobil výrazné snížení pevnosti v tlaku a snížení pevnosti v tahu ohybem o 1,4 MPa oproti referenčnímu betonu (tj. 20 %). Snížení pevností mohlo opět způsobit navázání vzduchu na jemná monofilamentní vlákna.

Dále byla zjišťována pevnost povrchových vrstev betonu. Z výsledků vyplývá, že přídavek jemných organických vláken měl pozitivní vliv na pevnost povrchových vrstev. Nejlepšího výsledku dosáhl beton se strukturovanými polymerními vlákny (PP+PE). Možným důvodem je větší průměr (cca 1 mm) strukturovaných polymerních vláken oproti ostatním testovaným vláknům.

15.4 Stanovení odolnosti proti obrušování

Byl sledován vliv vláken na obrušnost betonu. Byla využita zkouška stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme a stanovení obrušnosti betonu. Také bylo provedeno stanovení obrušnosti širokým kolem.

Stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme – ČSN EN 13892 – 3

Podstatou zkoušky stanovení odolnosti metodou Böhme, je zmenšení objemu tělesa, který se vypočítá z úbytku hmotnosti a tloušťky zkušební tělesa. Zkušební tělesa jsou krychle o délce hrany $71 \pm 1,5$ mm. Každé zkušební těleso se před zkouškou zváží a změří. Měří se šířka, délka a výška. Následně se zkušební těleso upne do přístroje a zatíží se silou 294 ± 3 N. Na brusný kotouč přístroje se nasype 20 g brusiva (korund). Brusný kotouč se uvede do chodu. Po každém cyklu, který trvá 22 otáček, se brusný kotouč očistí od použitého brusiva. Zkušební těleso se otočí o 90° a na brusný kotouč se nasype nové brusivo. Po každých 4 cyklech se měří výška a hmotnost zkušební vzorku. Tímto způsobem se zkušební těleso zkouší po dobu 16 cyklů. [48]

Stanovení obrušnosti betonu – ČSN 73 1324

Podstatou zkoušky je zjištění úbytku hmotnosti zkušební tělesa po 20 cyklech. Zkušební tělesa jsou krychle o hraně $71 \pm 1,5$ mm. Každé zkušební těleso se před zkouškou vysuší při teplotě $105\text{--}110^\circ\text{C}$ do konstantní hmotnosti, následně se těleso zváží a změří. Pro zkoušku obrušnosti se používá Böhmův přístroj. Dále zkouška probíhá stejně jako u zkoušky stanovení odolnosti metodou Böhme. Broušení zkušební tělesa je ukončeno po 20 cyklech (440 otáčkách). Po ukončení zkoušky se zkušební těleso zváží a změří. [49]

Stanovení obrušnosti širokým kolem – ČSN EN 1338, ČSN EN 1339, ČSN EN 1340

Podstatou zkoušky, je zjištění šířky rýhy, která vzniká při zkoušce obrušnosti širokým kolem. Zkušební těleso má rozměry 100×70 mm. Před zkouškou se očistí a nastříká barvou. Brusivo, které se sype do násypky přístroje je korund. Upínací vozík se odsune od brusného kola a vloží se zkušební těleso, které je následně ve styku s brusným kolem. Poté se otevře násypka a současně se spustí motor přístroje. Zkušební těleso je obrušováno širokým brusným kolem po dobu 75 otáček. Po 75 otáčkách se zastaví stroj a zkušební těleso se vyndá z upínacího vozíku a měří se tloušťka rýhy s přesností na 0,1 mm. Na každé straně zkušební tělesa se provádí dvě rýhy. [50, 51, 52]

Tabulka 10: Hodnoty stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme a metodou širokého kola

Receptura	Stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme [cm ³ /50cm ²]	Stanovení obrušnosti betonu [%]	Stanovení obrušnosti širokým kolem (výrobní strana) [mm]	Stanovení obrušnosti širokým kolem (strana řezu) [mm]
REF	11,10	3,7	19,4	17,6
CEL	10,38	3,3	18,0	18,1
PP+PE	12,15	3,9	17,8	17,9
PP-MONO	12,58	4,1	18,7	17,2

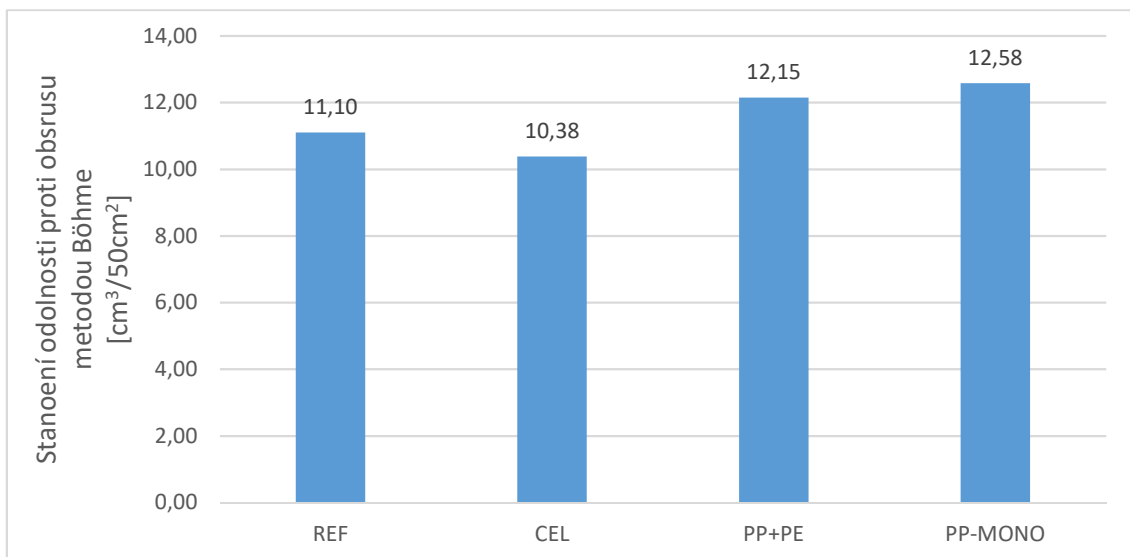
U provedených zkoušek všechny betony dosahovaly podobných výsledných hodnot. Rozdíl mezi nimi je zanedbatelný. Lze tedy konstatovat, že žádnou z použitých metod se nepodařil prokázat pozitivní vliv testovaných vláken na odolnost proti abrazi. Pro další výzkum navrhuji sledování vlivu přídatku jemných vláken do betonu na odolnost proti abrazi vlivem proudících kapalin.



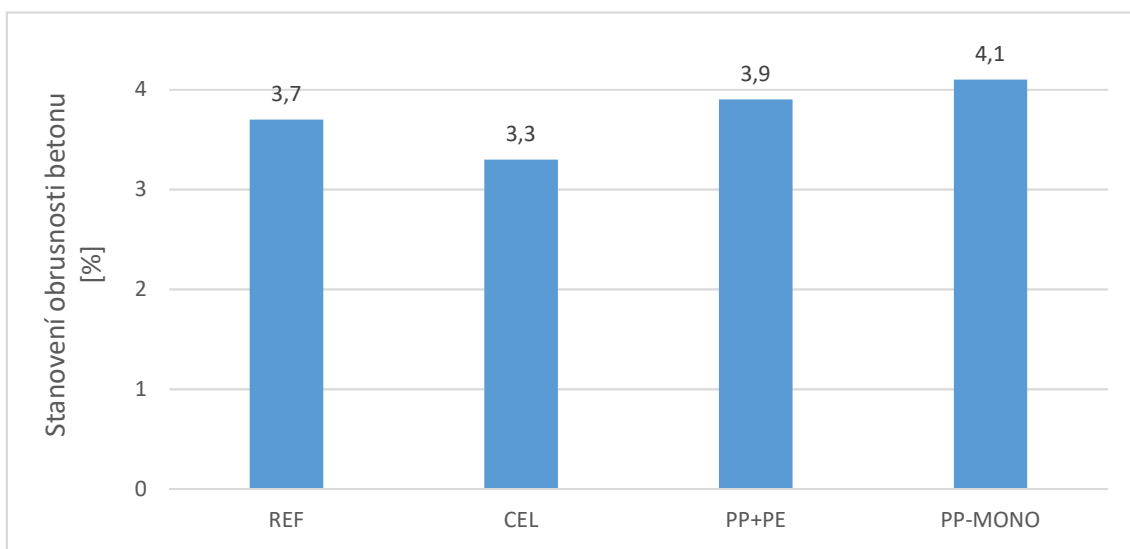
Obrázek 23: Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo) stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme



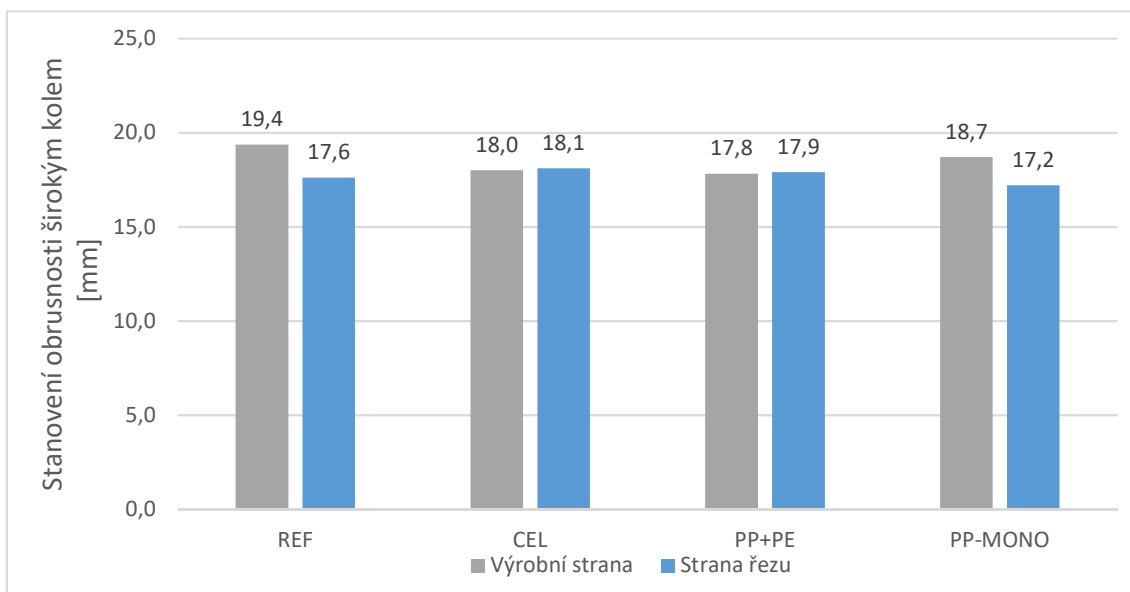
Obrázek 24: Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo) stanovení obrušnosti širokým kolem



Graf 4: Stanovení odolnost proti obrusu metodou Böhme



Graf 5: Stanovení obrusnosti betonu



Graf 6: Stanovení obrusnosti širokým kolem

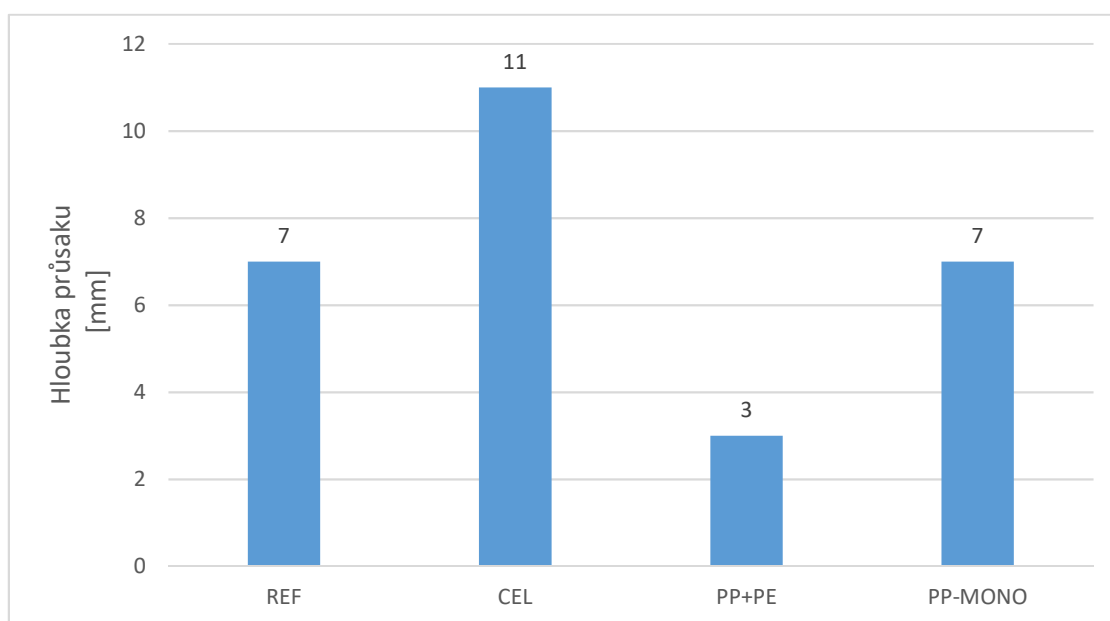
15.5 Vodotěsnost a nasákavost betonu

Tabulka 11: Výsledky vodotěsnosti, nasákavosti betonu

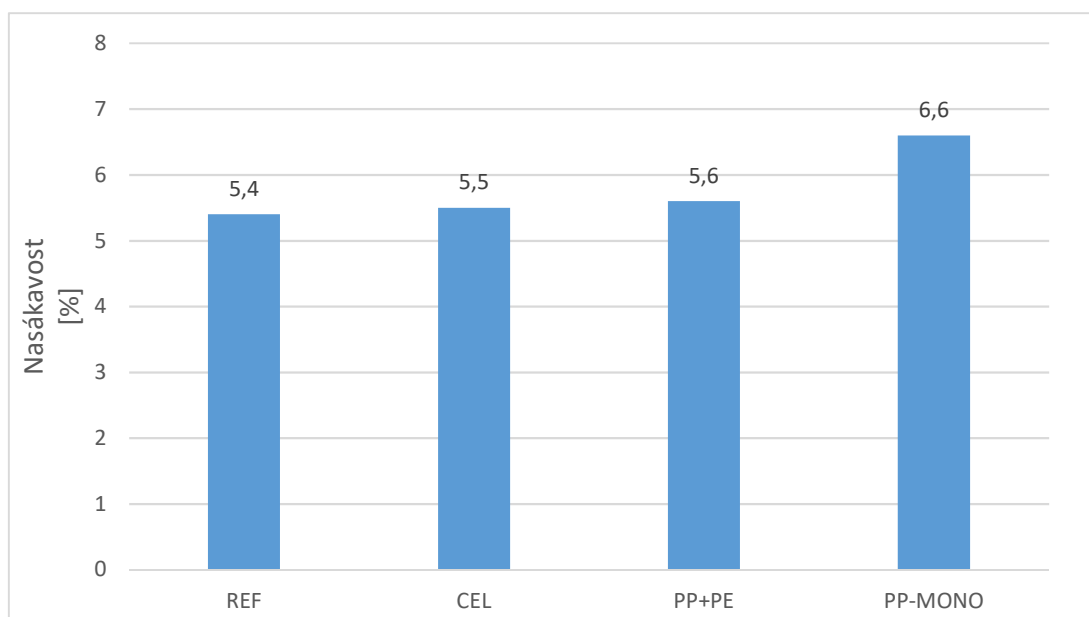
Receptura	Vodotěsnost HV8 [mm]	Nasákavost [%]
REF	7	5,4
CEL	11	5,5
PP+PE	3	5,6
PP-MONO	7	6,6



Obrázek 25: Vzorek po zkoušce vodotěsnosti



Graf 7: Vodotěsnost betonu



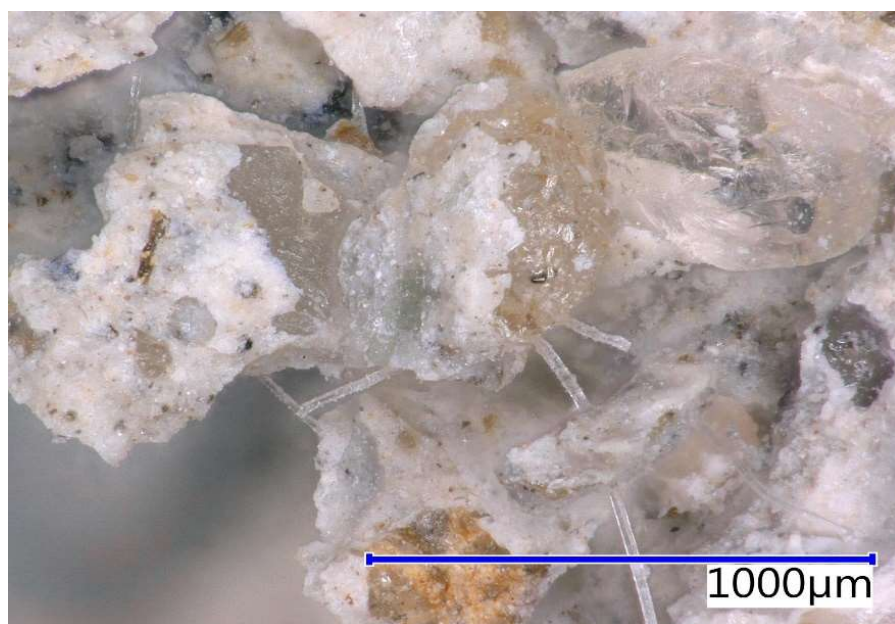
Graf 8: Nasákavost betonu

Pro odolnost betonu proti působení tlakové vody je důležité zajistit nepřítomnost otevřených kapilár do velikosti 10^{-7} m, kterými se dokáže pohybovat voda. Menšími póry (mikropóry) se voda již pohybovat nemůže. U všech receptur byl průsak vody po provedení zkoušky minimální, což nasvědčuje tomu, že se jednalo o kvalitní betony, které se dají klasifikovat jako vodotěsné. Přídavek celulózových a strukturovaných polymerních vláken neprokázal vliv na nasákavost. Beton s těmito vlákny dosáhl stejné hodnoty nasákavosti jako referenční beton. Monofilamentní PP vlákna způsobila zvětšení nasákavosti betonu cca o 1 % oproti ostatním recepturám. Zvýšení nasákavosti mohl způsobit větší obsah vzduchu, který do betonu při mísení mohla vnést jemná vlákna. [5]

16 Mikroskopie vláken v cementové matrici



Obrázek 26: Celulózová vlákna CHRYSO Fibre UF-500 v betonu (fotografie z optického mikroskopu VHX-950 F, 200× zvětšeno)



Obrázek 27: Polypropylenová vlákna Fibrin 23 D v betonu (fotografie z optického mikroskopu VHX-950 F, 200× zvětšeno)



Obrázek 28: Polymerní strukturované vlákno CHRYSO S 25 v betonu, fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F (vlevo 20× zvětšeno, vpravo 200× zvětšeno)

K ověření rozmísení vláken byl použit optický mikroskop VHX–950 F. Důležité bylo ověřit rozmísení celulózových vláken CHRYSO Fibre UF–500 a monofilamentních PP vláken Fibrin 23 D v betonu. Tato vlákna jsou spolu již z výroby spojena (viz obrázek 19 a 21). Pro jejich rozvláknění je potřeba rozmísení s kamenivem větším než 8 mm. Polymerní strukturovaná vlákna jsou dodávána jako jednotlivá vlákna a není potřeba je od sebe dělit. Na obrázku 26 a 28 jsou vidět jednotlivá celulózová a monofilamentní PP vlákna. Lze tedy konstatovat, že došlo k rozvláknění celulózových vláken a z předchozího tvaru čtverečků se stala jednotlivá vlákna. Také monofilamentní PP vlákna se z předchozích svazečků rozdělila na jednotlivá vlákna.

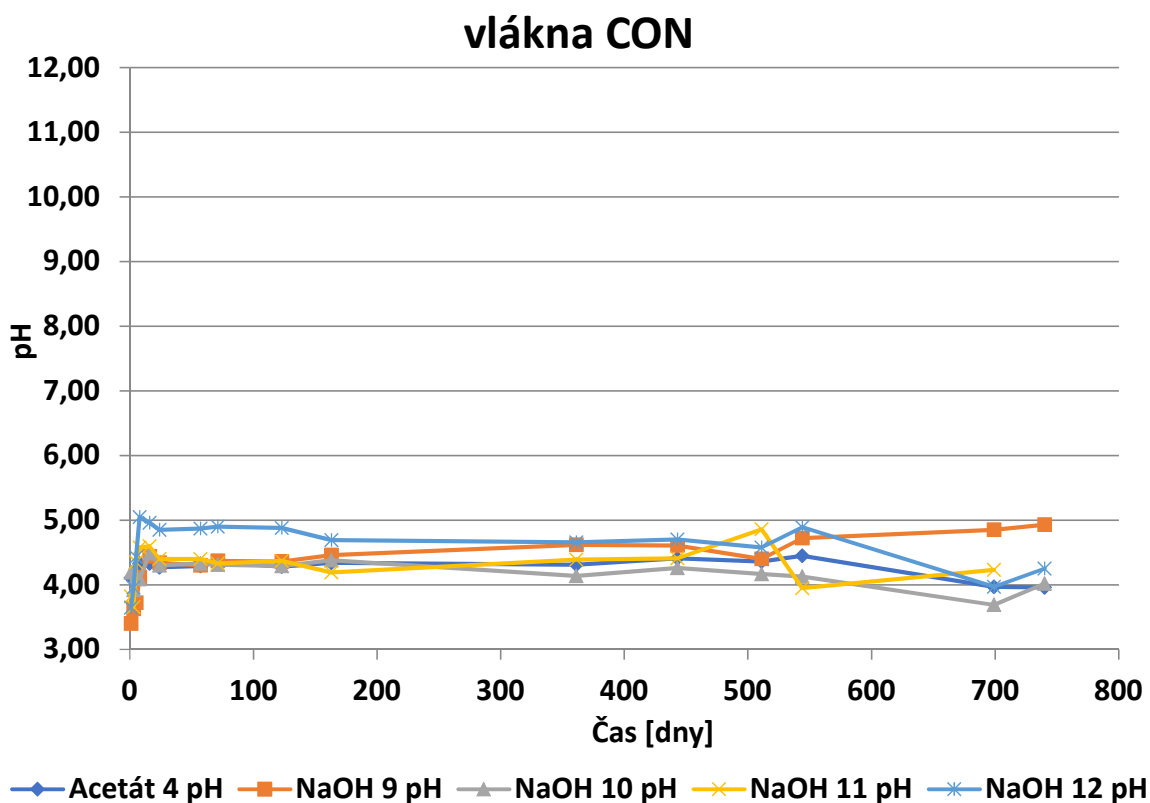
17 Měření pH roztoků s celulózovými vlákny

Byla sledována odolnost celulózových vláken v kyselém a v alkalickém prostředí. Kromě požadavku na zajištění rovnoměrného rozmísení celulózových vláken v betonu je také důležité zajištění trvanlivosti celulózových vláken v cementové matrici, kdy může dojít k degradaci vláken vlivem rozdílného pH (pH celulózových vláken je 6 ± 1 , kdežto pH zdravého betonu je 12,4). V současné době se objevuje snaha o využití celulózových vláken z různých typů výrob, jež nejsou primárně určena k použití do betonu a cementových kompozitů, ale jsou výstupem nebo odpadem ze zpracování celulózy, např. při výrobě papíru (vlákna W1, W2 a W3). V experimentu byla testována tato celulózová vlákna:

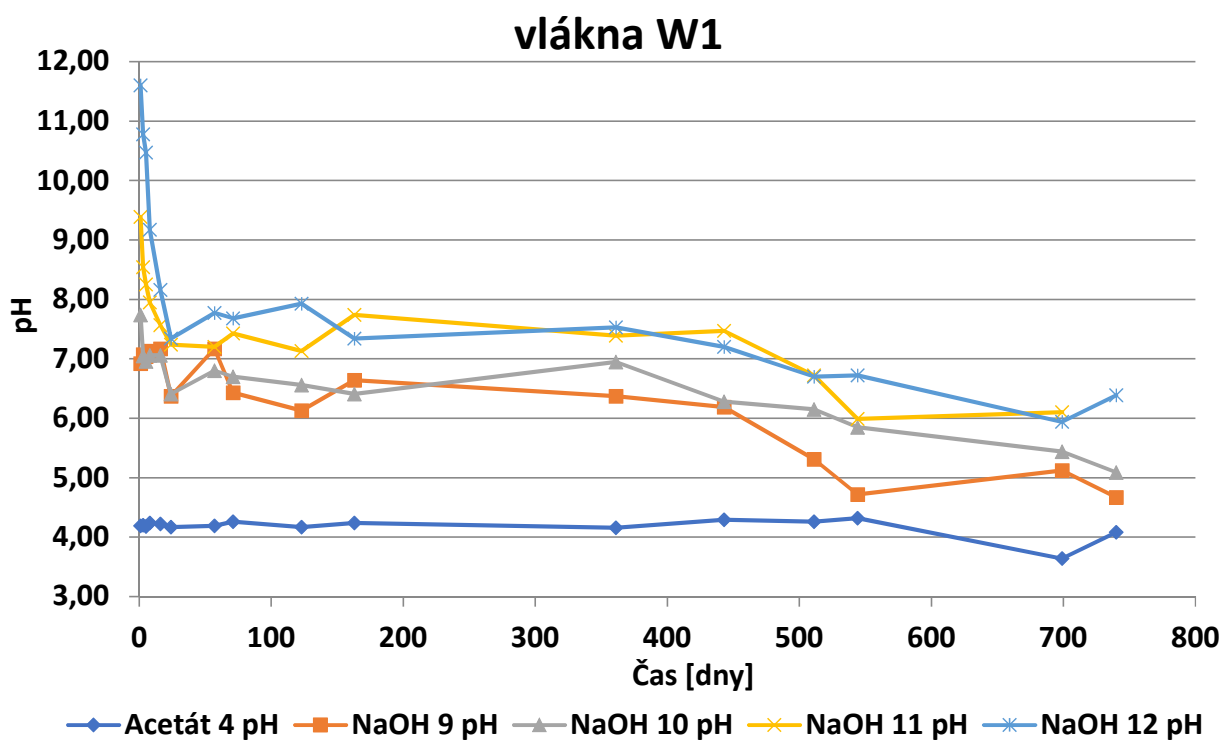
- 1 druh vláken, který je primárně určený do cementových kompozitů (CON)
- 3 druhy vláken, která nejsou určeny do cementových kompozitů, ale jsou produktem při zpracování celulózy (W1, W2, W3).

Byly připraveny roztoky s různým pH. Výchozí pH roztoků na začátku experimentu bylo 4, 9, 10, 11 a 12. Do roztoků byla přidána celulózová vlákna. V intervalu 740 dní se sledovala změna pH roztoků s celulózovými vlákny. Výzkumné práce zde prezentované navazují na výzkum zahájený v předchozích letech doc. Ing. Lenkou Bodnárovou, Ph.D., a na některé výsledky diplomové práce Ing. Dvořáka. V následujících grafech jsou uvedeny výsledky měření v čase uložených vláken v roztocích o určitém pH. [34]

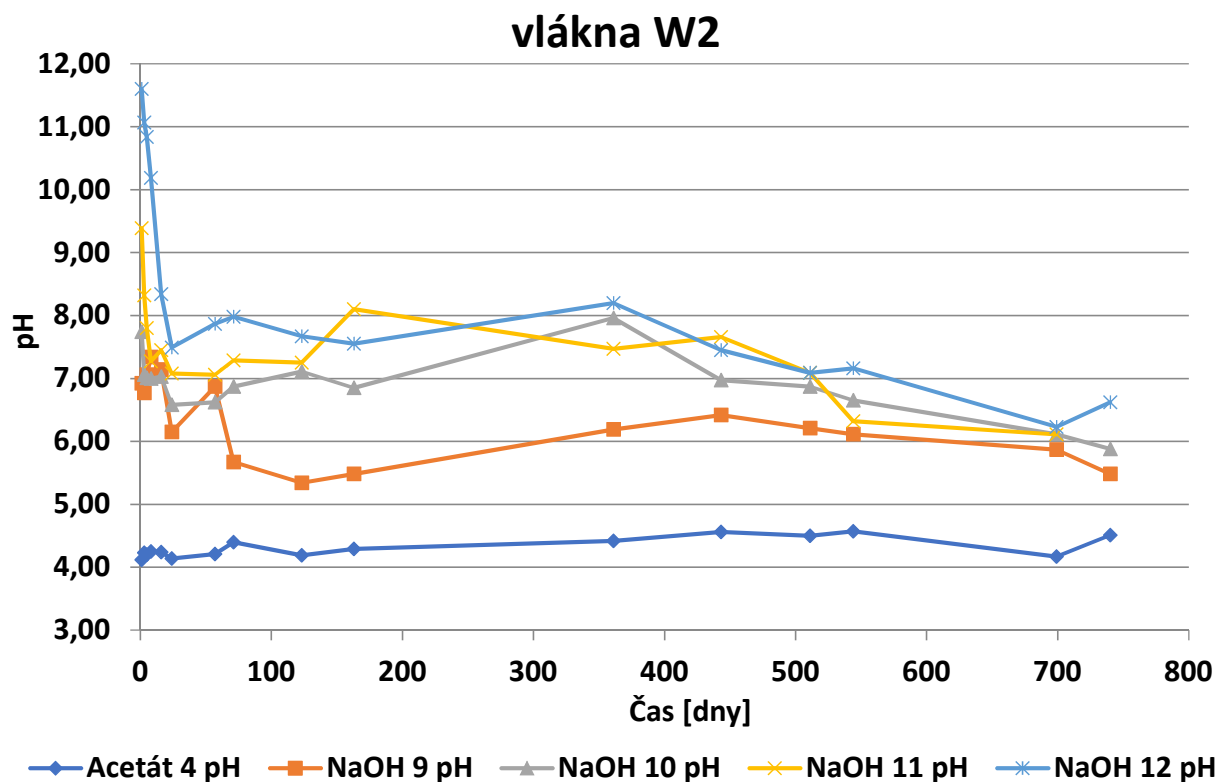
Na základě dlouholetého měření lze konstatovat, že celulózová vlákna určená pro aplikaci do betonu (CON) si po uložení do silně zásaditých roztoků uchovala své pH (6 ± 1), přestože byly roztoky silně zásadité. Tento jev byl nejpravděpodobněji způsoben výrobním zpracováním vláken. Vlákna jsou vysoce odolná vůči zásaditému prostředí. U všech vláken, která nejsou speciálně upravena pro aplikaci do betonu (W1, W2 a W3) můžeme pozorovat podobný vývoj hodnot. V zásaditém prostředí roztoků se pH ustálilo v rozmezí 5,5 až 7,0 a v kyselém prostředí se hodnoty pH držely téměř bez změny na hodnotě 4,2.



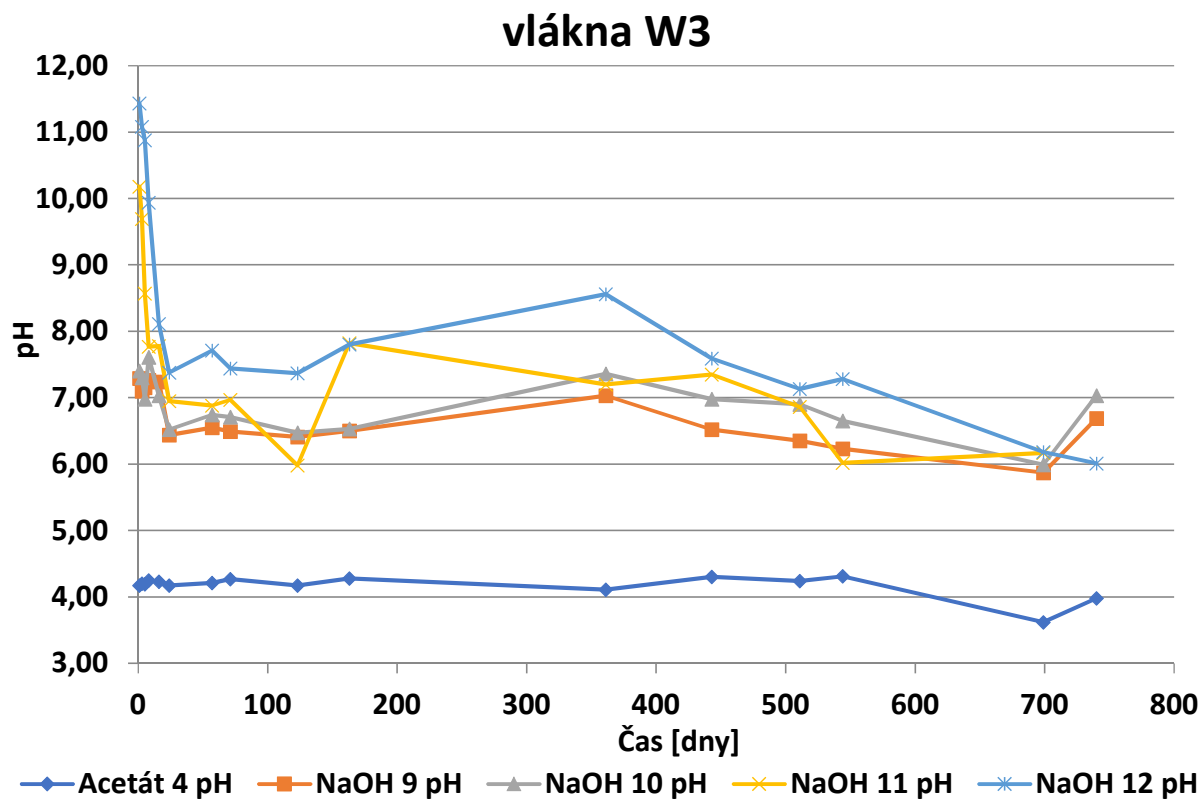
Graf 9: Vývoj pH roztoků s vlákny CON v čase



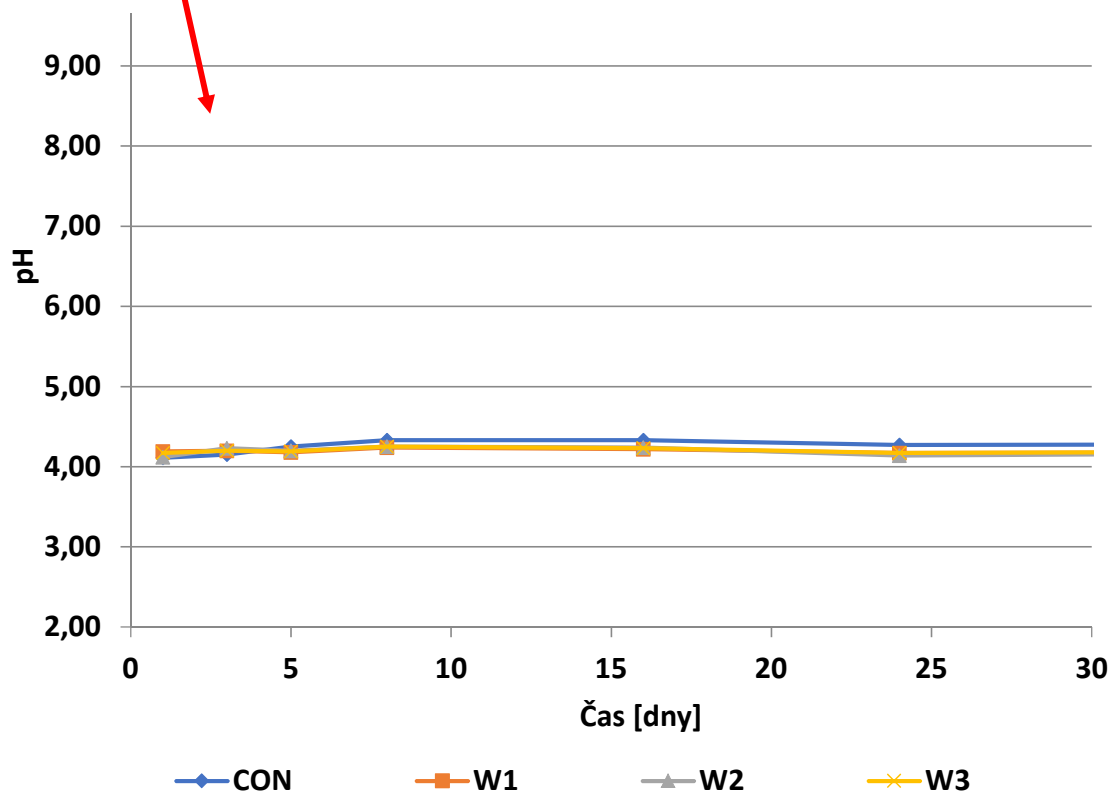
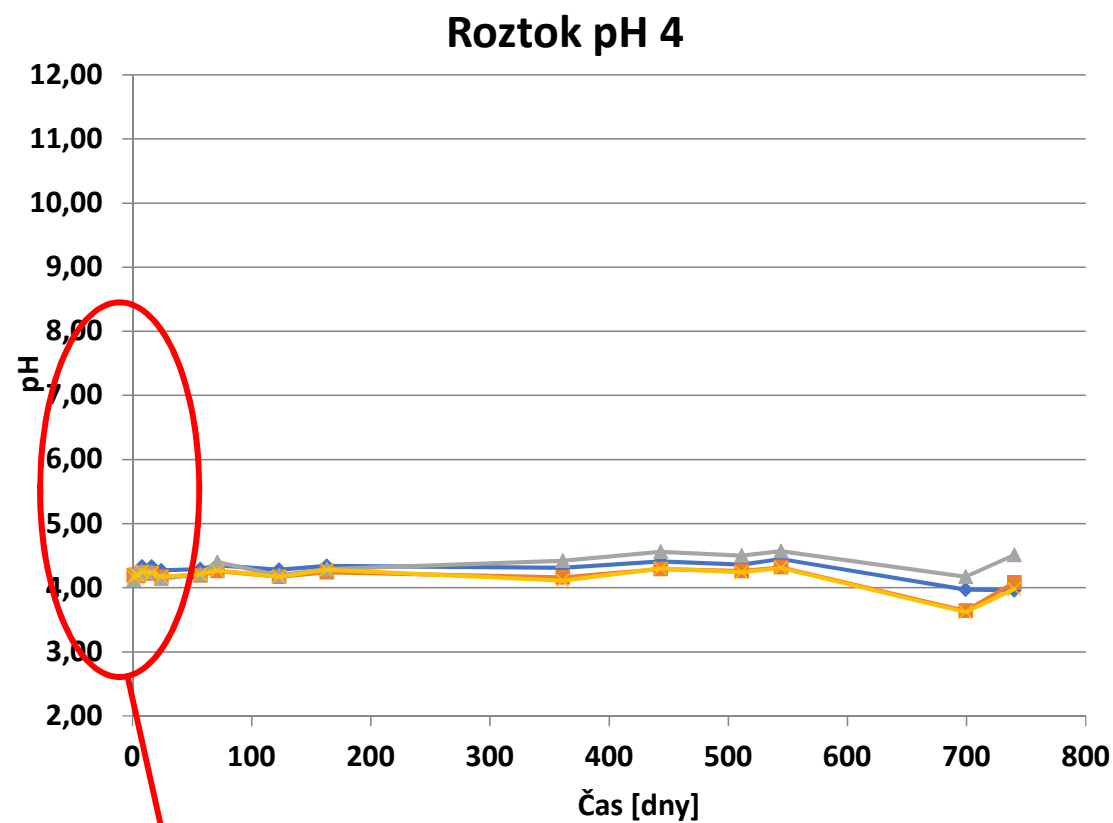
Graf 10: Vývoj pH roztoků s vlákny W1 v čase



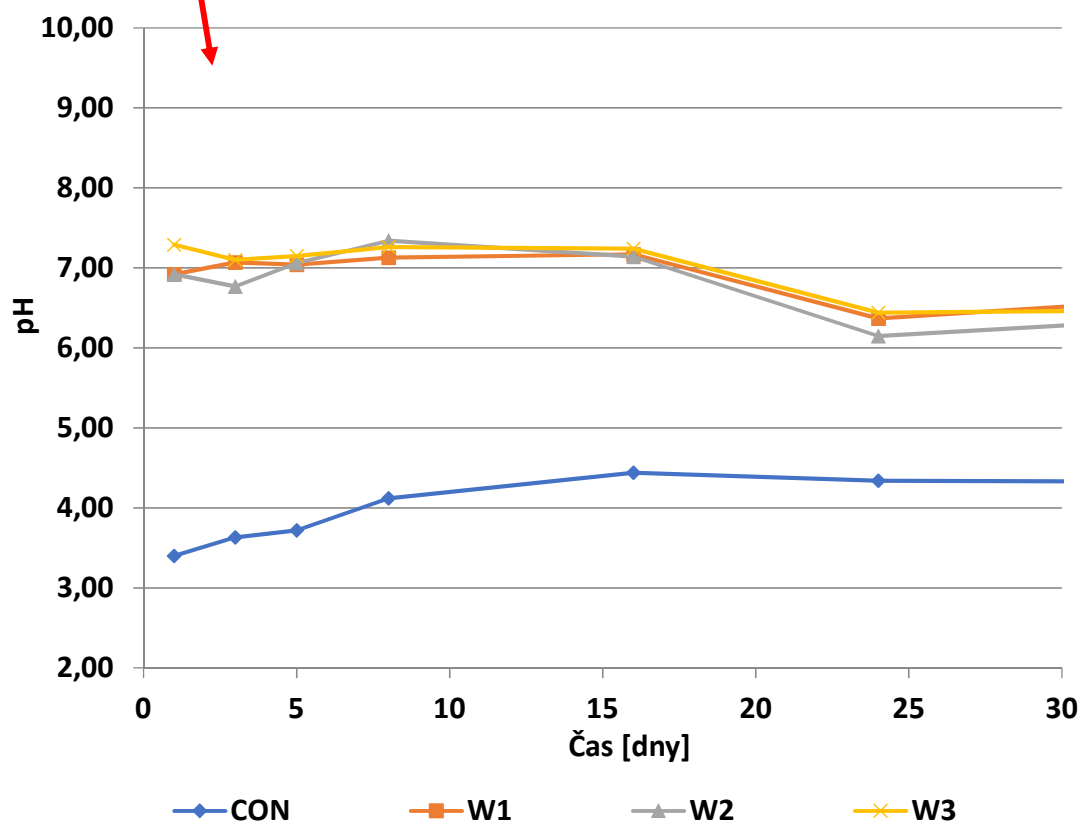
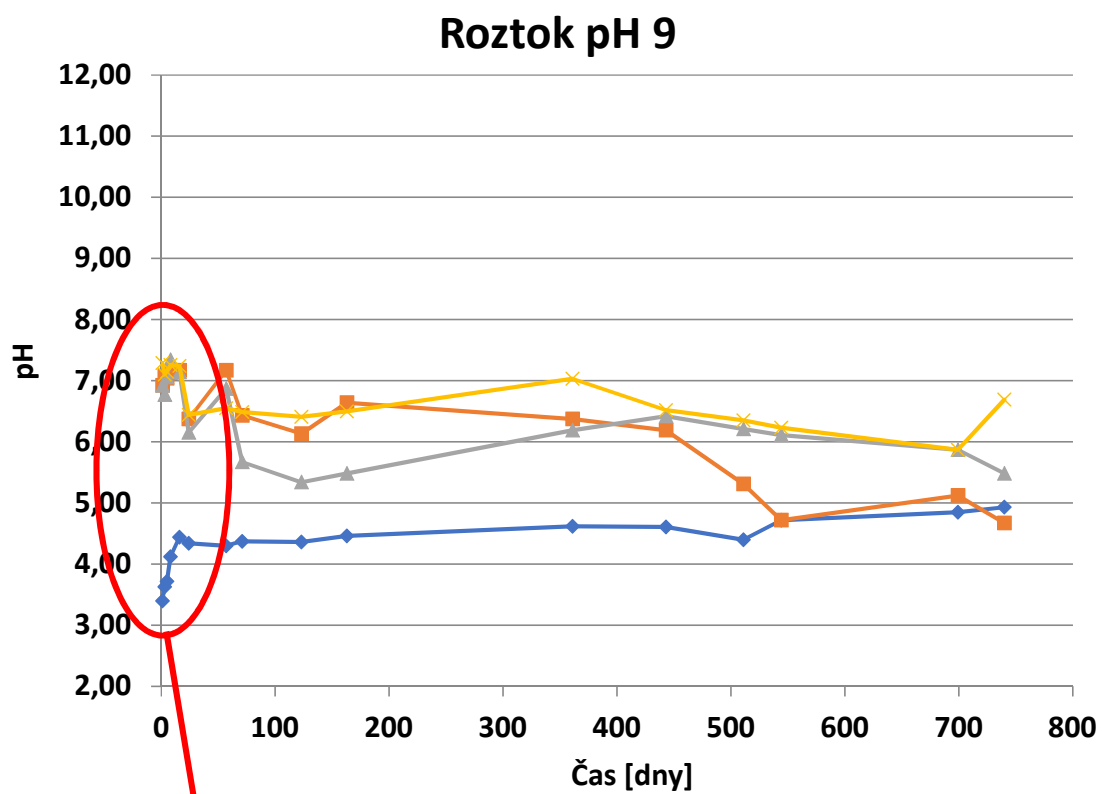
Graf 11: Vývoj pH roztoků s vlákny W2 v čase



Graf 12: Vývoj pH roztoků s vlákny W3 v čase

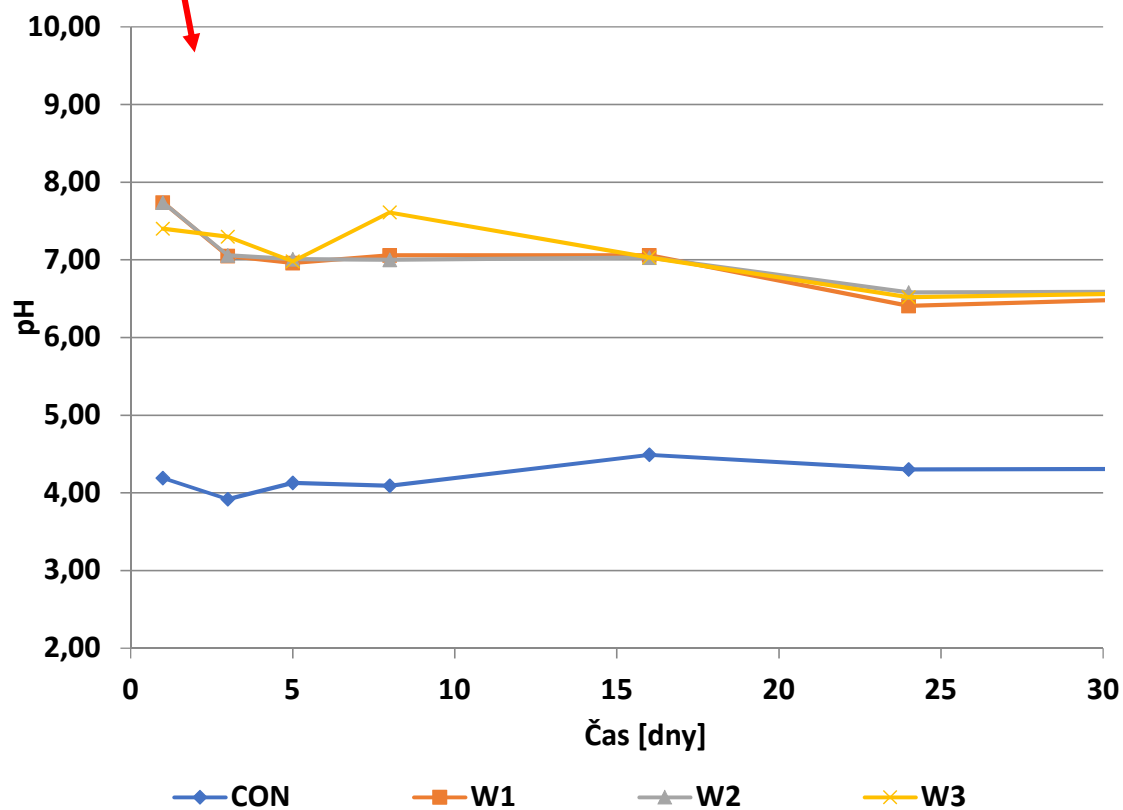
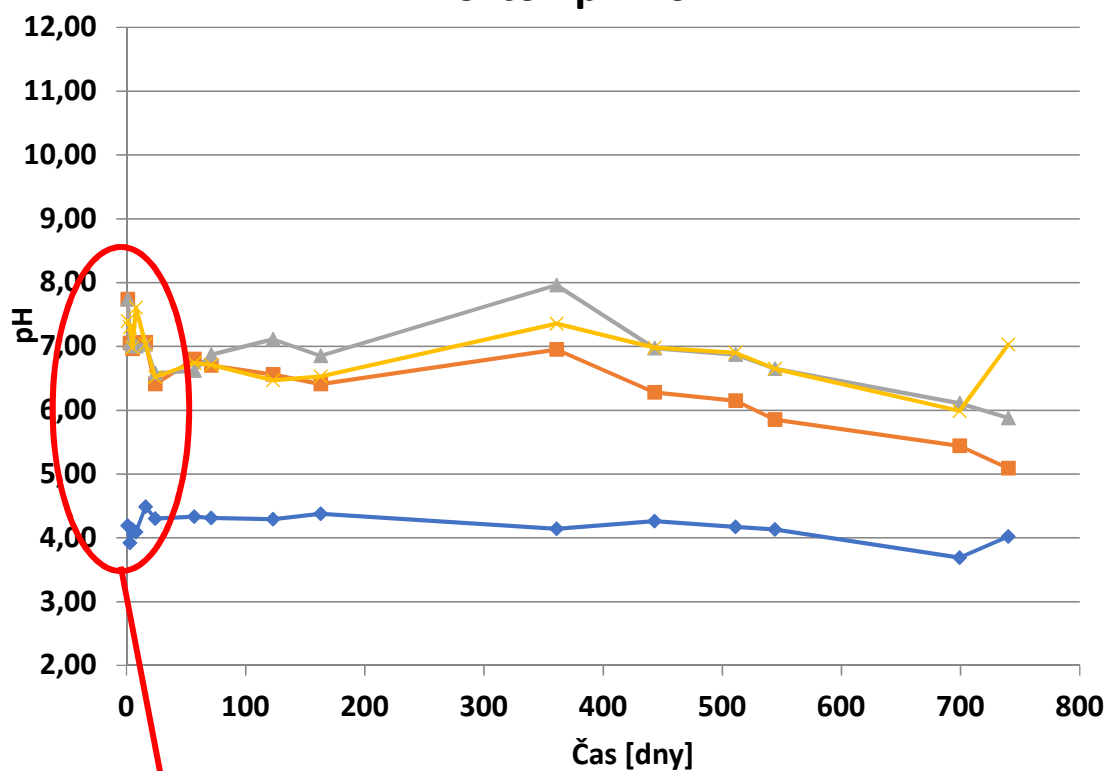


Graf 13: Roztok pH 4 v čase



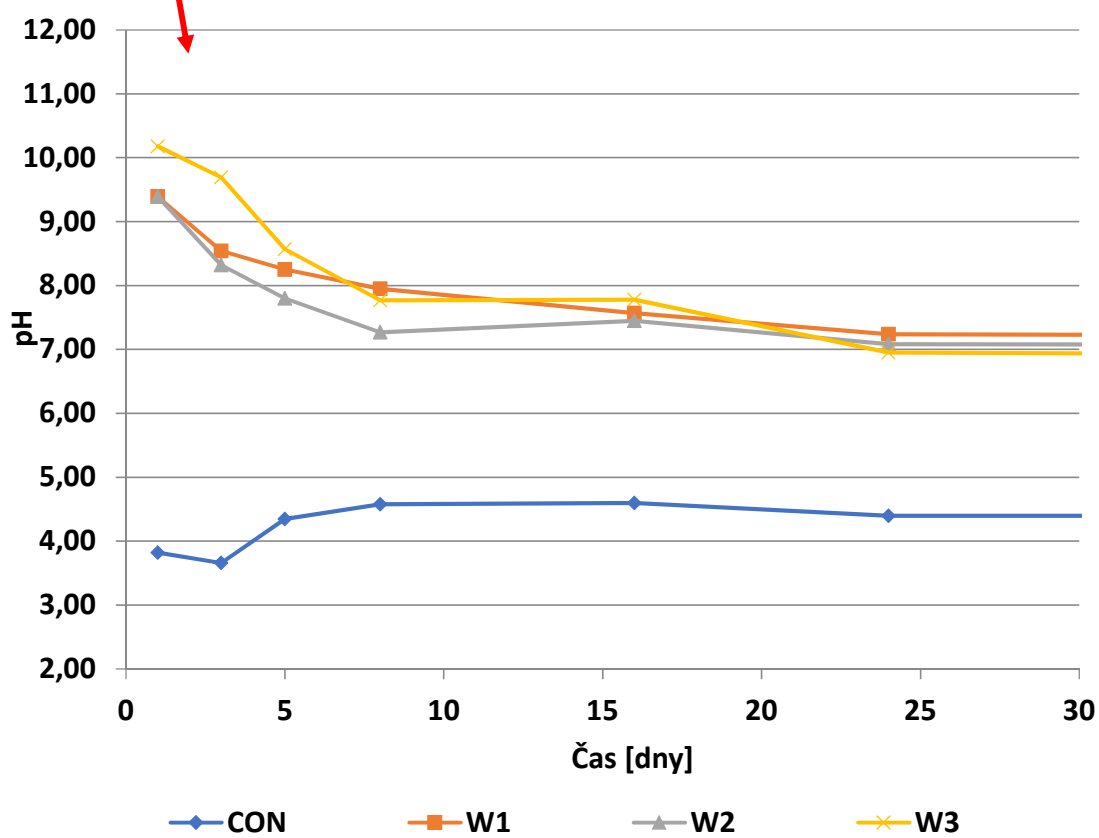
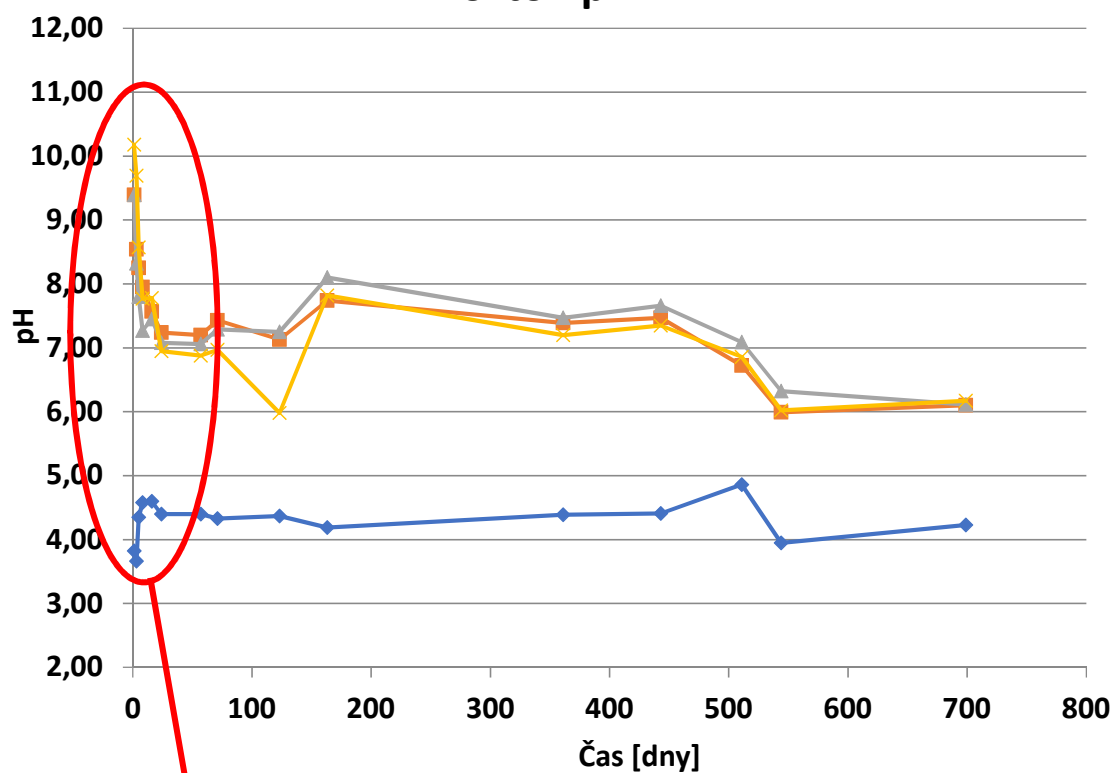
Graf 14: Roztok pH 9 v čase

Roztok pH 10

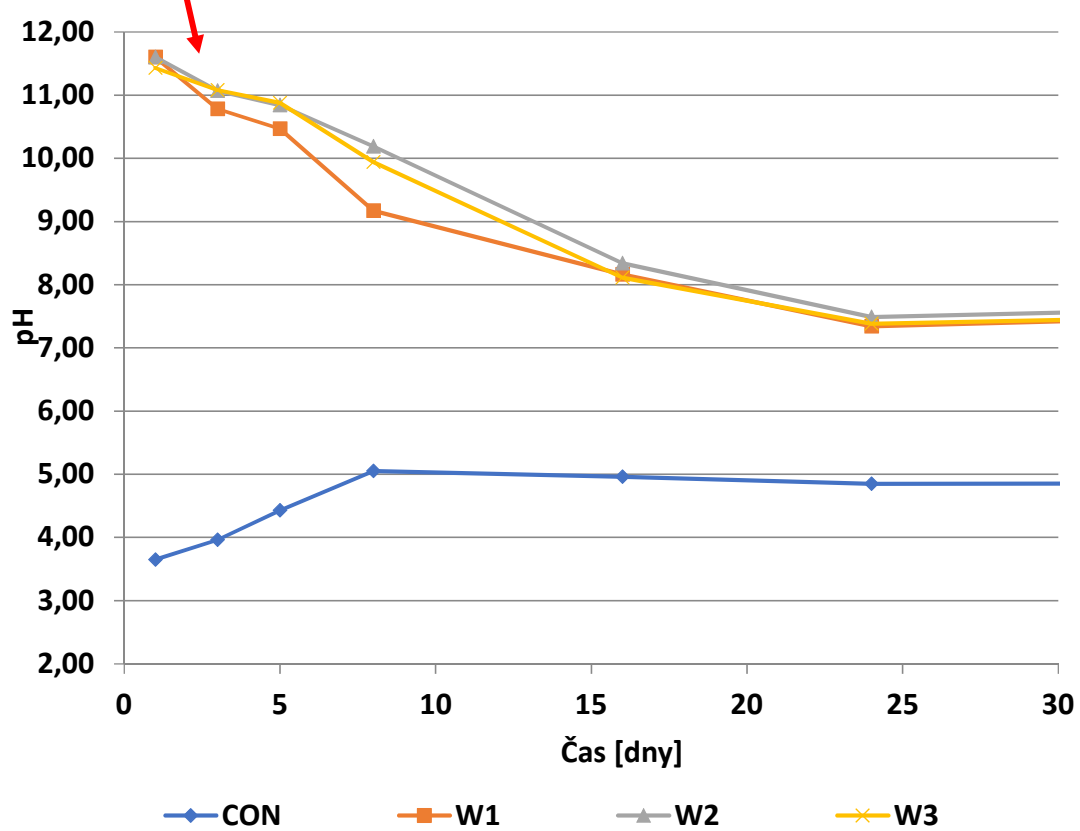
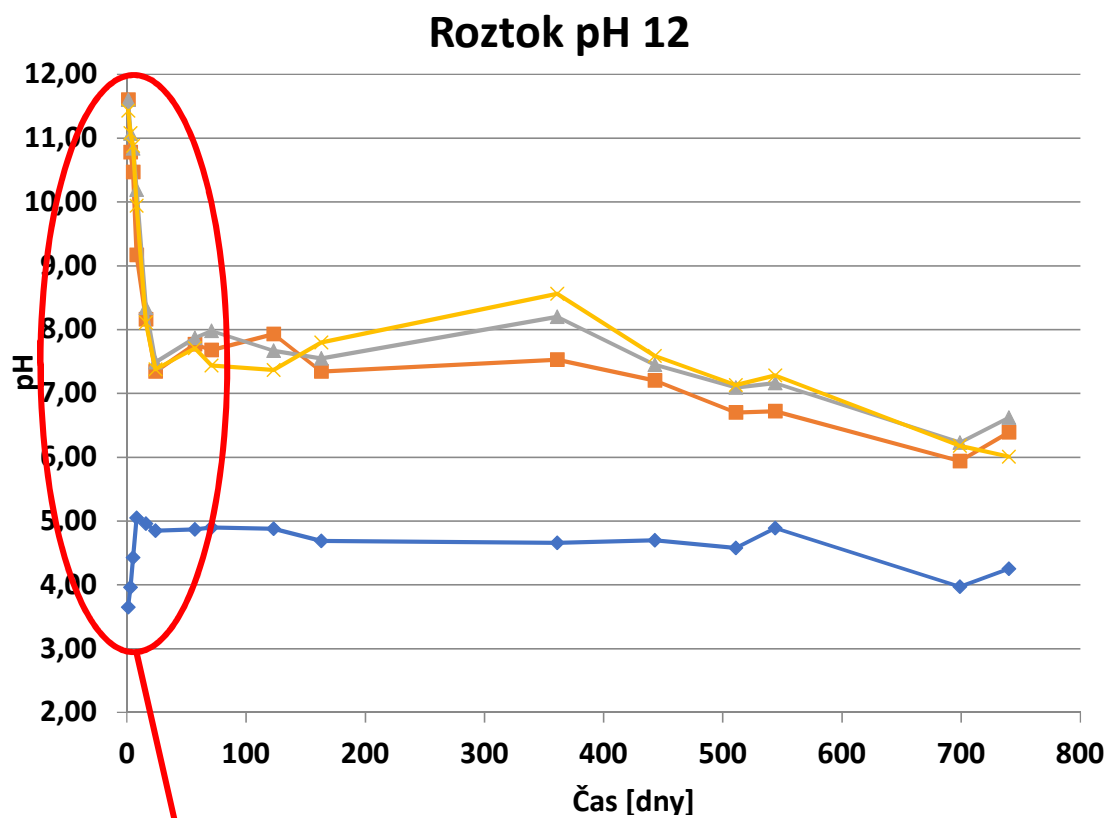


Graf 15: Roztok pH 10 v čase

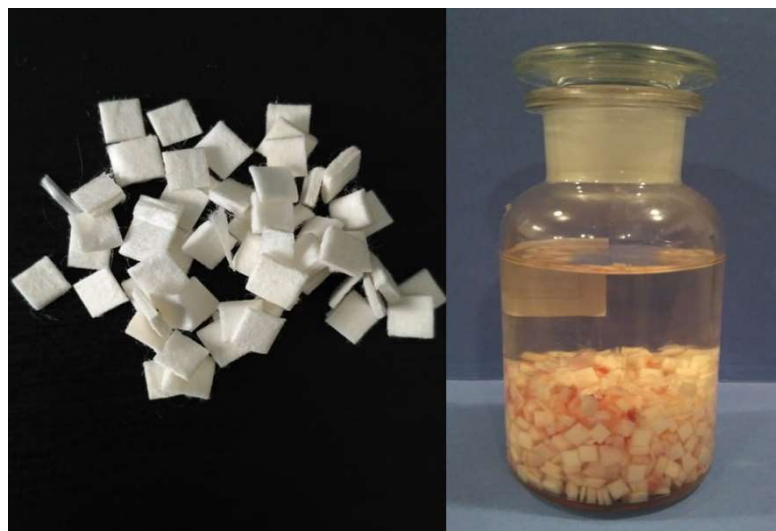
Roztok pH 11



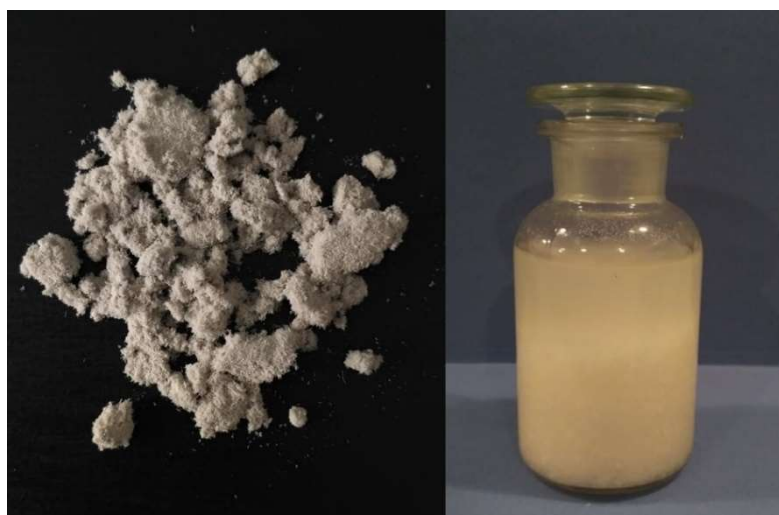
Graf 16: Roztok pH 11 v čase



Graf 17: Roztok pH 12 v čase



Obrázek 29: Celulózová vlákna CON
(vlevo před vložením do roztoku a vpravo v roztoku po 740 dnech)



Obrázek 30: Celulózová vlákna W1
(vlevo před vložením do roztoku a vpravo v roztoku po 740 dnech)

Na obrázku 29 je vizuálně rozeznatelné, že i po dlouhodobém uložení vláken CON v roztocích nedošlo k rozvláknění ani porušení tvaru čtverečků. K rozvláknění těchto vláken je třeba míchání se zrny kameniva od velikosti 8 mm. Ani u vláken W1, W2, W3 (obrázek 30) vlivem zásaditých nebo kyselých prostředí postupem času nedošlo k makroskopicky viditelné změně tvaru vláken. Všechna testovaná vlákna odolala agresivním prostředím bez zásadních vizuálních změn. [25]

18 Závěr

V teoretické části bakalářské práce byl definován kompozitní materiál a popsány jeho jednotlivé složky. Následně byla provedena rešerše informací o anorganických a organických vláknech se zaměřením na přírodní, celulózová a polypropylenová vlákna. Byly popsány základní parametry celulózových a polypropylenových vláken, jejich vliv na použití v cementových kompozitech a aplikaci vláken v praxi.

V praktické části bakalářské práce byl vyroben referenční beton a 3 betony s jemnými organickými vlákny (celulózová, strukturovaná polymerní a monofilamentní polypropylenová vlákna). Vlákna byla dávkována v množství podle doporučení výrobců (v dávkách 0,5 kg, 0,9 kg a 1 kg na 1 m³ betonu). Byla sledována konzistence metodou sednutí kužele a objemová hmotnost čerstvého betonu. V recepturách byla měněna dávka plastifikační přísady, dávka cementu a strusky, aby bylo dosaženo stejné konzistence čerstvých betonů (S4). Byla sledována objemová hmotnost a pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech. Výsledky pevností v tlaku po 7 a 28 dnech spolu korespondují. Po 28 dnech betony s přídavkem celulózových vláken v dávce 0,5 kg/m³ a strukturovaných polymerních vláken v dávce 0,9 kg/m³ betonu dosahovaly srovnatelných objemových hmotností (2 460 kg/m³) a pevností (65–70 MPa) jako beton referenční. Nejnižší pevnost v tlaku (48,8 MPa) a objemová hmotnost (2 390 kg/m³) byla zjištěna u betonu s přídavkem monofilamentních polypropylenových vláken. Těmto výsledkům odpovídá i zjištěná pevnost v tlaku na zlomcích trámů. Snížení pevnosti mohlo způsobit vnesení většího obsahu vzduchu jemnými monofilamentními polypropylenovými vlákny při mísení betonu. Nasvědčuje tomu snížená objemová hmotnost oproti ostatním betonům.

Přídavek celulózových a strukturovaných polymerních vláken neměl vliv na výslednou pevnost v tahu ohybem. Přídavek monofilamentních vláken způsobil výrazné snížení pevnosti v tahu ohybem (o 1,4 MPa) oproti referenčnímu betonu (7 MPa). Snížení pevností mohlo být opět způsobeno navázáním vzduchu na jemná monofilamentní polypropylenová vlákna. Z výsledků vyplývá, že testovaná vlákna nezvyšují pevnost betonu v tahu ohybem, protože tato vlákna mají nižší modul pružnosti v tahu než cementová matrice, dochází k jejich vytržení nebo přetržení dříve, než je porušena cementová matrice. Přídavek jemných organických vláken měl pozitivní vliv na pevnost v tahu povrchových vrstev. Nejlepšího výsledku dosáhla strukturovaná polypropylenová vlákna (3,2 MPa), ale i u ostatních testovaných vláken byl zaznamenán pozitivní přínos k pevnosti v tahu povrchových vrstev oproti referenčnímu betonu bez vláken.

Byl sledován vliv přídatku jemných vláken na odolnost betonu vůči abrazi. V technických listech testovaných vláken je uvedeno, že vlákna zvyšují odolnost proti abrazi. Všechny betony s testovanými vlákny dosahovaly podobných hodnot jako referenční beton bez vláken, a to u zkoušky stanovení odolnosti proti obrusu metodou Böhme, zkoušky stanovení obrusnosti betonu i zkoušky stanovení obrusnosti širokým kolem. Tyto zkoušky neprokázaly výrazný pozitivní vliv vláken na odolnost betonu proti abrazi.

Dále byl testován vliv vláken na vodotěsnost a nasákavost betonu. U všech betonů byl průsak vody po provedení zkoušky minimální. Testované betony lze klasifikovat jako vodotěsné. Přídavek celulózových a strukturovaných polymerních vláken neprokával vliv na nasákavost betonu. Betony dosahovaly podobných hodnot nasákavosti jako referenční (5,5 %). Monofilamentní polypropylenová vlákna způsobila zvětšení nasákavosti betonu cca o 1 % oproti ostatním recepturám. Zvýšení nasákavosti mohl způsobit větší obsah vzduchu v betonu, který mohl být vnesen jemnými vlákny při mísení betonu.

Pomocí optické mikroskopie byl sledován vzhled a distribuce vláken v betonu. Ke sledování byl použit optický mikroskop VHX–950 F. Z provedeného pozorování lze konstatovat, že všechna použitá vlákna (celulózová, strukturovaná polymerní a monofilamentní polypropylenová vlákna) jsou rovnoměrně rozmísena v cementové matrici a netvoří shluky. Došlo k rozdužení celulózových a monofilamentních polypropylenových vláken. Celulózová vlákna jsou dodávána slisovaná ve formě čtverečků (viz obrázek 19) a monofilamentní polypropylenová vlákna ve formě svazečků vláken (viz obrázek 21). Polymerní strukturovaná vlákna jsou dodávána jako jednotlivá vlákna a není potřeba je od sebe dělit. Z obrázku 28 je vidět, že se strukturovaná polymerní vlákna vlivem míchání společně s kamenivem na koncích roztřepila.

Také bylo provedeno ověření odolnosti vybraných celulózových vláken v kyselém a alkalickém prostředí. Je důležité zajistit trvanlivost vláken v cementové matrici, kdy může dojít k degradaci vláken vlivem rozdílného pH. Při dlouhodobém sledování změny pH roztoků s vlákny bylo prokázáno, že nejmenší změny pH vykazují roztoky s vlákny, která jsou určena k aplikaci do betonu (vlákna označena jako CON). Lze je tedy hodnotit jako stabilní jak v zásaditém, tak v kyselém prostředí. Po dlouhodobém uložení vlákna určená do betonu (CON) v roztocích nedošlo k rozvláknění ani porušení tvaru čtverečků. Ani u vláken, která nejsou primárně určená do betonu (W1, W2, W3), nedošlo vlivem zásaditých nebo kyselých prostředí k viditelné změně tvaru vláken. Všechna zkoušená vlákna odolala agresivním prostředím bez zásadních vizuálních změn.

Bakalářské práce byla zaměřena na možnosti použití jemných organických vláken v betonu. Byla sledována přírodní (celulózová) a syntetická (strukturovaná polymerová a monofilamentní polypropylenová vlákna). Byl sledován vliv vláken na vlastnosti betonu. Přídavek vláken zlepšil pevnosti povrchových vrstev v tahu. Neprokázal se výrazný pozitivní vliv vláken na abrazivzdornost betonu při zvoleném způsobu zkoušení (stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme, stanovení odolnosti proti obrušnosti i stanovení obrušnosti širokým kolem). Všechny testované betony (i referenční beton bez vláken) dosahovaly srovnatelných parametrů ve všech sledovaných vlastnostech. Jako další směr výzkumu navrhuji zkoušení abrazivzdornosti betonu s přídavkem vláken nejen pomocí již provedených metod, ale také s ohledem na abrazi způsobenou proudícími kapalinami. K tomuto opotřebení betonu dochází v konstrukcích vodních děl nebo kanalizací. Jako pozitivní hodnotím výsledky dlouhodobého sledování chování celulózových vláken v prostředích s různým pH. Všechna testovaná celulózová vlákna odolala agresivnímu prostředí bez vizuálních změn.

Seznam použité literatury

- [1] BAREŠ, R. A. *Kompozitní materiály*, SNTL, Praha, 1988.
- [2] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2002, 122 stran, ISBN 80-214-2266-1.
- [3] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [5] HELA, R. *Technologie betonu I*. Brno: VUT 2007, STUDIJNÍ OPORY.
- [6] HELA, R. *Technologie betonu II*. Brno: VUT, 2007.
- [7] *Beton s rozptýlenou výztuží*. In: Asb-portal [online]. Praha: Českomoravský beton, 2010 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/beton-s-rozptylenou-vyztuz>
- [8] *12 mm E-Glass Alkali Resistant Fiberglass Chopped Strands*. In: Langhaotrading [online]. Tianjin: 2019 [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: <https://langhaotrading.en.made-in-china.com/product/GXYmKNTzOuRV/China-12mm-E-Glass-Alkali-Resistant-Fiberglass-Chopped-Strands.html>
- [9] MIKULICA, K. a HELA, R. *Konopný beton jako kompozit s využitím přírodního vlákna*. In: *Tzb-info* [online]. Brno: Fakulta stavební VUT, 2016 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/14055-konopny-beton-jako-kompozit-s-vyuzitim-prirodnihho-vlakna>.
- [10] BRÜMMER, M. *Hemp Concrete: A High Performance Material for Green-Building and Retrofitting*. In: *Urbannext* [online]. Německo: Brümmer, 2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://urbannext.net/hemp-concrete>.
- [11] BEDLIVÁ, H. *Výstavba z konopného betonu*. In: *Imaterialy* [online]. Brno: Bedlivá, 2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/technologie/vystavba-z-konopneho-betonu_42566.html.
- [12] MUKHERJEE, A. *Structural benefits of hempcrete infill in timber stud walls*. Kanada, 2012. Diplomová práce. Queen's University Kingston.
- [13] *Hemp fiber*. In: *Naturalfiber* [online]. Litva: Naturalfiber, 2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://naturalfiber.eu/en/products/hemp-fiber>.

- [14] *Eternitová střecha*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-5].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Eternit>
- [15] BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2.
- [16] *Range, finishing options and building with hemcrete blocks*. In: Isohemp [online]. Belgie: Isohemp, 2019 [cit. 2019-05-20].
Dostupné z: <https://www.isohemp.com/en/hemp-blocks-naturally-efficient-masonry>
- [17] AGRAWAL A. R., DHASE S. S. a AGRAWAL K. S. *Coconut Fiber in Concrete to Enhance its Strength and making Lightweight Concrete*. International Journal of Engineering Research and Development [online]. 2014, 9 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://www.academia.edu/5904676/Coconut_Fiber_in_Concrete_to_Enhance_its_Strength_and_making_Lightweight_Concrete
- [18] PRASHANT, Y., GOPINATH C. a RAVICHANDRAN V. *Design and development of coconut fiber extraction machine*. SasTech Journal [online]. 2014, 64-72 [cit. 2019-05-20].
Dostupné z: https://www.academia.edu/29225843/design_and_development_of_coconut_fiber_extraction_machine
- [19] ALI, M. Coconut Fibre – A Versatile Material and its Applications in Engineering. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies* [online]. 2010, 1-14 [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.823.5053&rep=rep1&type=pdf>
- [20] GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete. *Cement & concrete composites*. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002.
- [21] SETHUNARAY, R., CHOCKALINGAM S. a RAMANATHAN R. *Natural Fiber Reinforced Concrete*. Transoirtation Research [online]. 1989, 57-60 [cit. 2019-05-4].
Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1226/1226-008.pdf>
- [22] RASSIAH, K a M. M. AHMAD. *A Review On Mechanical Properties Of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composite*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2013. ISSN 1991-8178.
- [23] MUHAMMAD, A., H. SININ a S. KHAIRUDDIN. *Recent developments in bamboo fiber-based composites*. Polymer Bulletin. 2018.
- [24] *Flax*. Encyclopedia Britannica [online]. Nový Zéland, 2007 [cit. 2019-05-10].
Dostupné z: <https://www.britannica.com/plant/flax>.

- [25] DHIRHI, N., SHUKLA R., PATEL N. M. *Extraction method of flax fibre and its uses*. Plant Archives [online]. 2015, 711-716 [cit. 2019-05-11].
Dostupné z: [http://plantarchives.org/pdf%2015-2/711-716%20\(2973\).pdf](http://plantarchives.org/pdf%2015-2/711-716%20(2973).pdf)
- [26] *Strukturní vzorec celulózy*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-23].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za>.
- [27] GRANSTRÖM, M. *Cellulose Derivatives: Synthesis, Properties and Applications*. Finsko, 2009: Disertační práce. Department of Chemistry Faculty of Science University of Helsinki.
- [28] *Elektronická učebnice*. In: Eluc [online]. Olomouc: Olomoucký kraj [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>.
- [29] VANĚREK, J. *Kovové a dřevěné materiály*. Brno: VUT FAST, 2006.
- [30] *The basic structure and functions of starch, glycogen and cellulose and the relationship of structure to function of these substances in animals and plants*. AS Biology[online].
Anglie: Hannahhelpbiologyas, 2014 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z:
<http://hannahhelpbiologyas.blogspot.com/2014/04/the-basic-structure-and-functions-of.html>
- [31] NAJIMI, M., FARAHANI F.M. a POURKHORSHIDI A.R. *Effect of polypropylene fibers on physical and mechanical properties of concretes*. 3rd International Conference on Concrete & Development [online]. 2009, [cit. 2019-05-15].
Dostupné z: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13842.pdf>
- [32] SVOBODA, L. *Stavební hmoty 3*. vydání. Praha: Luboš Svoboda a kolektiv, 2013
- [33] BLÁHA, L. *Studium efektu přídavku celulóзовých vláken na vybrané vlastnosti betonu*. Brno: Diplomová práce. VUT FAST, 2018.
- [34] Dvořák, R. *Studium efektu aplikace celulóзовých vláken v cementových kompozitech*. Brno: Diplomová práce. VUT FAST, 2016.
- [35] *Možnosti s deskami CEMVIN*. In: Stavebnictví3000 [online]. Hradec Králové: 2017 [cit. 2019-05-4].
Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/nekonecne-moznosti-s-deskami-cemvin>
- [36] *Fibre Cement Boards*. In: Indiamart [online]. Nové Dillí: 2019 [cit. 2019-05-5].
Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/fibre-cement-boards-10574300062.html>
- [37] *Industrial Cellulose Fibers*. Centralfiber [online]. Michigan: [cit. 2019-05-1].
Dostupné z: <http://www.centralfiber.com/applications.php>

- [38] *Cellulose fibres: additive for mortar and renders*. Jelu-werk [online]. Rosenberg: [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <https://www.jelu-werk.com/technical-industry/applications/building-chemicals/cellulose-for-mortar-and-renders/>
- [39] *Topcel. Cff* [online]. Ilmenau: 2018 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.cff.de/en/Products/TOPCEL/TOPCEL>
- [40] ČSN EN 12350 – 2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Říjen, 2009.
- [41] ČSN EN 12350 – 6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Červenec, 2000.
- [42] ČSN EN 12390 – 7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Květen, 2001.
- [43] ČSN EN 12390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Říjen, 2009.
- [44] ČSN EN 12390 – 5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Říjen, 2009.
- [45] ČSN 731316. *Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlakovosti betonu*. Leden, 1989.
- [46] Ředitelství vodních cest ČR. *Technické kvalitativní podmínky staveb ŘVC ČR. Kapitola 1: Provádění betonových a železobetonových konstrukcí*. Praha, 2009.
- [47] ČSN 731318. *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Červen, 1986.
- [48] ČSN EN 13892 – 3. *Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Odolnost proti obrušování metodou Böhme*. Květen, 2015.
- [49] ČSN 73 1324. *Stanovení obrušivosti betonu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření.
- [50] ČSN EN 1338. *Betonové dlažební bloky – Požadavky a zkušební metody. Příloha G: Měření odolnosti proti obrušování*. Prosinec, 2004.
- [51] ČSN EN 1339. *Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody. Příloha G: Měření odolnosti proti obrušování*. Prosinec, 2004.
- [52] ČSN EN 1340. *Betonové obrubníky – Požadavky a zkušební metody. Příloha G: Měření odolnosti proti obrušování*. Prosinec, 2004.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Porušený betonový sloup s rozptýlenou ocelovou výztuží	17
Obrázek 2: Skleněná vlákna typu E	19
Obrázek 3: Eternitová střešní krytina	20
Obrázek 4: Konopné pazdeří (vlevo), konopná vlákna (vpravo).....	22
Obrázek 5: Konopný beton	23
Obrázek 6: Bambusová vlákna	24
Obrázek 7: Buňka kokosového vlákna	25
Obrázek 8: Chemická struktura celulózy	26
Obrázek 9: Struktura celulóзовého vlákna	27
Obrázek 10: Základní stavební monosacharidy hemicelulózy	27
Obrázek 11: Schéma dřevní hmoty: celulóza, hemicelulóza a lignin.....	28
Obrázek 12: Mechanický způsob výroby celulózy	29
Obrázek 13: Schéma chemického způsobu výroby celulózy.....	30
Obrázek 14: PP monofilamentní vlákna (vlevo), PP fibrilovaná vlákna (vpravo)	31
Obrázek 15: Využití celulóзовých vláken v betonových prefabrikátech	33
Obrázek 16: Celulóзовé cementovláknité desky	33
Obrázek 17: Vlákna ve formě pelet určená do asfaltové směsi	34
Obrázek 18: Schéma metodiky práce	36
Obrázek 19: Celulóзовá vlákna CHRYSO Fibre UF–500 (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 20× zvětšeno).....	37
Obrázek 20: Polymerní strukturovaná vlákna CHRYSO S 25 (vlevo fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F (20× zvětšeno), vpravo porovnání tloušťky vlákna s pravítkem)	38
Obrázek 21: Polypropylenová vlákna Fibrin 23 D (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 20× zvětšeno).....	38
Obrázek 22: Připravené vzorky na zkoušku pevnosti v tahu povrchových vrstev	42
Obrázek 23: Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo) stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme	45
Obrázek 24: Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo) stanovení obrušnosti širokým kolem	45
Obrázek 25: Vzorek po zkoušce vodotěsnosti	47

Obrázek 26: Celulózová vlákna CHRYSO Fibre UF–500 v betonu (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 200× zvětšeno).....	49
Obrázek 27: Polypropylenová vlákna Fibrin 23 D v betonu (fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F, 200× zvětšeno).....	49
Obrázek 28: Polymerní strukturované vlákno CHRYSO S 25 v betonu, fotografie z optického mikroskopu VHX–950 F (vlevo 20× zvětšeno, vpravo 200× zvětšeno).....	50
Obrázek 29: Celulózová vlákna CON	59
Obrázek 30: Celulózová vlákna W1	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti některých vláken používaných v betonu	18
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti konopných vláken.....	23
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti bambusových vláken	24
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti kokosových vláken	25
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti lněných vláken	25
Tabulka 6: Složení jednotlivých receptur betonu na 1 m ³ v kg.....	39
Tabulka 7: Vlastnosti čerstvého betonu (konzistence a objemová hmotnost).....	40
Tabulka 8: Objemová hmotnost a pevnost v tlaku betonu po 7 a 28 dnech	41
Tabulka 9: Objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku betonu na zlomcích trámů.....	42
Tabulka 10: Hodnoty stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme a metodou širokého kola.....	45
Tabulka 11: Výsledky vodotěsnosti, nasákavosti betonu	47

Seznam grafů

Graf 1: Pevnost betonu v tlaku po 7 a 28 dnech	41
Graf 2: Pevnost v tahu ohybem a pevnost v tahu povrchových vrstev	42
Graf 3: Pevnost v tlaku na betonových zlomcích trámů po 28 dnech.....	43
Graf 4: Stanovení odolnost proti obruš metodou Böhme	46
Graf 5: Stanovení obrušnosti betonu	46
Graf 6: Stanovení obrušnosti širokým kolem	46
Graf 7: Vodotěsnost betonu	47
Graf 8: Nasákavost betonu.....	48
Graf 9: Vývoj pH roztoků s vlákny CON v čase	52
Graf 10: Vývoj pH roztoků s vlákny W1 v čase.....	52
Graf 11: Vývoj pH roztoků s vlákny W2 v čase.....	53
Graf 12: Vývoj pH roztoků s vlákny W3 v čase.....	53
Graf 13: Roztok pH 4 v čase	54
Graf 14: Roztok pH 9 v čase.....	55
Graf 15: Roztok pH 10 v čase.....	56
Graf 16: Roztok pH 11 v čase.....	57
Graf 17: Roztok pH 12 v čase.....	58

Seznam příloh

Příloha 1: Technický list celulóзовých vláken CHRYSO Fibre UF-500	72
Příloha 2: Technický list strukturovaných PP vláken CHRYSO Fibre S25	73
Příloha 3: Technický list monofilamentních PP vláken Fibrin 23 D	74



CHRYSO® Fibre UF-500

Natural anti-cracking micro-fiber

Description

CHRYSO®Fibre UF-500 is a natural micro-fiber

The coating of CHRYSO®Fibre UF-500 gives an excellent adherence to the cement paste, and even better compared to synthetic fibers, which increase strain capacity.

CHRYSO®Fibre UF-500 slows down the bleeding, reduces the permeability and avoids spalling when removing the form.

CHRYSO®Fibre UF-500 decreases the risk of cracking during the pre-hardening stage. This means the damaging effects of plastic shrinkage are eliminated.

CHRYSO®Fibre UF-500 improves the abrasive resistance, resistance to impacts (surface, joints, angles), resistance to frost/defrost cycle, fire resistance and resistance to chemical attack.

CHRYSO®Fibre UF-500 is not a structural reinforcement of concrete.

Characteristics

- Color: White
- Density: 1,10
- Length: 1,9 – 2,3 mm
- Nominal diameter: 14 - 17 microns
- Tensile strength: 800 - 900 MPa
- Young modulus: 8500 N/mm²

Packaging

Dose of 450g
Box of 40 doses
Pallet of 20 boxes

Applications

- Slabs
- Tanks
- All precasted elements
- Pumped concrete
- Shotcrete
- Grouts

Method of use

The dosage of CHRYSO®Fibre UF-500 is 1 bag of 450g per m³ of concrete.

CHRYSO®Fibre UF-500 can be added directly into the truck mixer, followed by rapid mixing for 5 minutes.



CHRYSO® Fibre S25, S50

Strukturální vlákno

POPIS

CHRYSO® Fibre S25, S50 je syntetické vlákno vyráběné ze směsi surovin s vysokou mechanickou pevností.

CHRYSO® Fibre S25, S50 zlepšuje následující vlastnosti betonu:

- křehkost po vzniku trhlin, houževnatost;
- odolnost vůči rázům a únavě;
- odolnost vůči vzniku smršťovacích trhlin a vůči segregaci.

CHRYSO® Fibre S25, S50 má velmi vysokou přilnavost, která je výsledkem schopnosti se během míchání na koncích vlákna roztřepit.

CHRYSO® Fibre S25, S50 umožňuje snížit výrobní náklady a dobu nutnou k přípravě výztuže.

CHRYSO® Fibre S25, S50 se v betonu rovnoměrně rozprostře a vytvoří systém výztuže ve všech směrech bez povrchové koroze obvyklé u ocelových drátků.

Vlastnosti

- Směs polypropylénu a polyetylénu
- Barva: bílá
- Hustota: 0,92 (920 kg/m³)
- Délka: 25, 50 mm
- Bod tání: 160°C
- Bod vzplanutí: 590°C
- Pevnost v tahu: 650 MPa
- Youngův modul pružnosti: 5 GPa
- Chemická odolnost (alkálie, ...): vysoká

Balení

Prefabrikace:

sáčky 1 kg
palety po 25 krabicích s 15 sáčky

Ostatní:

konzultovat s dodavatelem

POUŽITÍ

Oblast použití

CHRYSO® Fibre S25, S50 může v mnohých případech nahradit svařovanou výztuž nebo ocelové drátky:

- prefabrikace
- nádrže, sila, šachty
- dlažba
- stříkané betony
- čerpané betony

Návod k použití

CHRYSO® Fibre S25, S50 se přidává do betonu v dávce 1 až 8 kg/m³ podle použití, druhu betonu a na základě doporučení CHRYSO

Míchačka

CHRYSO® Fibre S25, S50 se míchá zasucha společně s kamenivem po dobu 30 sekund.

Automatizace

CHRYSO® Fibre S25, S50 se přidá do betonu a míchá cca 10 minut.

CHRYSO® Fibre S25, S50 může způsobit ztrátu zpracovatelnosti, kterou je vhodné kompenzovat plastifikátorem nebo superplastifikátorem.

CHRYSO® Fibre S25, S50 je kompatibilní se všemi přísadami CHRYSO.



Fibrin 23 D

Polypropylenové syntetické vlákno

POPIS

Fibrin 23 D je zvláště polypropylenové vlasové vlákno (monofilamentní).

Vlákna **Fibrin 23 D** jsou povrchově zvláště, jejich přilnavost k cementové pastě je vynikající a zvyšuje jejich odpor k vytržení.

Vlákna **Fibrin 23 D** se velmi rychle rozptýlí a rozloží se rovnoměrně v objemu betonu.

Díky své pevnosti v tahu zabraňují vlákna **Fibrin 23 D** vzniku smršťovacích trhlin, zpomalují počení betonu, snižují propustnost a zabraňují vytrhávání betonu při odbednění.

Ztvrdlý beton s vlákny **Fibrin 23 D** je odolnější vůči abrazi, nárazům, rozmrazovacím cyklům a agresivním prostředím.

Vlákna **Fibrin 23 D** nenahrazují výztuž betonu.

Vlastnosti

- Barva: bílá
- Hustota: $\sim 0,91 \text{ kg/dm}^3$
- Délka: 12 mm
- Průměr: 18 μm
- Pevnost v tahu: 557 MPa
- Youngův modul pružnosti: 4148 MPa
- Chemická odolnost: vysoká
- Tepelná odolnost: 160°C

Balení

sáčky 600 g
krabice po 18 sáčcích
palety po 40 krabicích

sáčky 900 g
krabice po 14 sáčcích
palety po 40 krabicích

POUŽITÍ

- podlahy, průmyslové podlahy, vodorovné plochy
- prefabrikace
- nádrže a sila
- čerpané betony
- stříkané betony
- malty a potěry

Praktická doporučení

Dávkování: 1 sáček na m^3 betonu, to znamená cca 180 milionů vláken na m^3 s **Fibrin 23 D** v sáčku 600 g a 273 milionů vláken v sáčku 900 g

Vlákna **Fibrin 23 D** se přidávají do betonu v kterémkoliv okamžiku míchání, aniž by se změnil čas míchání nebo původní množství záměsové vody.

Vlákna **Fibrin 23 D** mohou být přidána přímo do automichače s podmínkou míchání po dobu 5 min. na vysokou rychlost.