

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ



FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VLIV PŘÍDAVKU POLYPROPYLENOVÝCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI BETONŮ

EFFECT OF ADDITION OF POLYPROPYLENE FIBERS ON THE PROPERTIES OF
CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAROSLAV SVOZIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2013



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

Diplomant	Bc. JAROSLAV SVOZIL
Název	Vliv přídatku polypropylenových vláken na vlastnosti betonů
Vedoucí diplomové práce	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

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

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

Podklady a literatura

Bodnárová, L.: Kompozitní materiály (CJ02). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST

Hela R.: Technologie betonu I (BJ09). Technologie betonu II (BJ15). Studijní opory, Vysoké učení technické v Brně, FAST

Fialová M.: Plasmová úprava polypropylenových vláken, Diplomová práce Masarykova universita, Brno, 2010

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2007-2012), České a zahraniční technické normy.

Zásady pro vypracování

Předmětem práce je posouzení vlivu přídavku polypropylenových vláken na vlastnosti betonu. Klíčovým je porovnání různých povrchových úprav polypropylenových vláken bez statické funkce. Jedná se o ověření účinnosti plazmové úpravy vláken. Tato metoda úpravy vláken pomocí nízkoteplotního plazmatického výboje v běžné atmosféře je zkoumaná v rámci spolupráce Vysokého učení technického, Masarykovy university a firmy KrampeHarex CZ.

V rámci řešení diplomové práce proveďte:

Přípravu zvolených receptur betonů s různými typy polypropylenových vláken (s komerční povrchovou úpravou, bez povrchové úpravy a vlákna plazmově upravená).

Testování vlastností čerstvých betonů (vliv přídavku vláken na zpracovatelnost betonu a na obsah vzduchu, bleeding).

Testování objemových změn betonů

Sledujte náchylnost betonu k tvorbě smršťovacích trhlinek.

Proveďte sledování fyzikálně-mechanických vlastností betonu (testování pevnosti betonu v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu, stanovení statických modulů pružnosti betonu).

Proveďte porovnání vlastností betonů s polypropylenovými vlákny s různou povrchovou úpravou.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt:

Práce se zabývá posouzením vlivu přídavku polypropylenových vláken na vlastnosti betonu. Jedním z hlavních prvků je porovnání různých povrchových úprav polypropylenových vláken bez statické funkce včetně plazmové úpravy nízkoteplotním plazmatem. Hlavními poznatky práce je testování vlastností čerstvých betonů s těmito vlákny, dále pak testování objemových změn a v poslední řadě testování těchto betonů na fyzikálně mechanické vlastnosti.

Klíčová slova

Beton

Objemové změny

Polypropylenová vlákna

Povrchová úprava vláken

Abstract:

The thesis evaluates the influence of the addition of polypropylene fibers on the properties of concrete. One of the major elements is to compare different finishes polypropylene fibers without static functions, including low temperature plasma treatment plasma. The main work is to test the knowledge of the properties of fresh concrete with these fibers, as well as testing volume changes and finally testing these concretes on physical and mechanical properties

Key words

Concrete

Volume changes

Polypropylene fibers

Surface treatment of fibers

Bibliografická citace VŠKP

SVOZIL, Jaroslav. *Vliv přídavku polypropylenových vláken na vlastnosti betonů*. Brno, 2013. 84 str. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D..

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Lence Bodnárové Ph.D. a Ing. Danielovi Kopkáněmu a Ing. Jaroslavovi Nováčkovi za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat dalším zaměstnancům ústavu THD za pomoc při vypracování.

Obsah:

Obsah:	8
I. Teoretická část	10
1. Úvod	10
2. Složky betonu	11
2.1. Kamenivo	11
2.2. Cement	11
2.2.1. Vliv cementu na objemové změny	13
2.3. Příměsi	13
2.4. Přísady	14
2.4.1. Přísady zamezující smrštění	15
2.4.2. Rozpínavé přísady	15
2.5. Voda	17
2.6. Vytužování betonu	17
2.6.1. Rozptýlená vlákna	17
3. Vláknobeton	19
3.1. Polymerní vlákna	20
3.1.1. Povrchová úprava polymerních vláken	21
3.2. Polypropylenové vlákna	21
3.2.1. Zlepšení vlastností polypropylenových vláken	23
3.2.2. Plazmová úprava polypropylenových vláken	23
3.2.3. Další možná využití polypropylenových vláken v betonech	25
4. Vlastnosti betonu	26
4.1. Smršťování betonu	26
4.1.1. Plastické smrštění	27
4.1.2. Smrštění vysycháním	27
4.1.3. Autogenní smrštění	28
5. Měření objemových změn betonů	29
5.1. Bezkontaktní subpixelová metoda – Principy snímání dilatačních posunů	29
5.2. Důležitost zkoumání vlastnosti prostředí v okolí vzorku	32

II. Experimentální část	34
6. Cíl bakalářské práce.....	34
7. Použité suroviny.....	36
7.1. Cement.....	36
7.2. Kamenivo.....	36
7.3. Voda	36
7.4. Plastifikátor.....	37
7.5. Rozptýlená výztuž	37
8. Návrh receptur	39
9. Výsledky jednotlivých zkoušek.....	40
9.1. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu.....	40
9.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu.....	41
9.4. Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu.....	48
9.5. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles.....	49
9.6. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	55
9.7. Stanovení hloubky průsaku.....	59
9.8. Stanovení pevnosti v příčném tahu	60
9.9. Statický modul pružnosti betonu	62
9.10. Stanovení odolnosti proti CHRL	63
9.11. Zkoumání samoošetřovací funkce vláken.....	66
9.12. Stanovení objemových změn zatvrdlého betonu.....	69
10. Závěr.....	75
11. Seznam tabulek	79
12. Seznam grafů.....	80
13. Seznam obrázků.....	81
14. Seznam použité literatury.....	82

I. Teoretická část

1. Úvod

V dnešním moderním světě, kdy vznikají stále nové konstrukční možnosti řešení stavebních konstrukcí, se stále více zvětšují nároky na vlastnosti materiálů. Proto máme snahu zlepšovat vlastnosti jednotlivých stavebních materiálů.

Mezi jednu z možností, která zlepšuje vlastnosti stavebních materiálů, nejčastěji betonu, který je nejpoužívanější stavební materiál, je použití polymerních (polypropylenových) vláken. Tyto vlákna mají především pozitivní vliv na omezování vzniku trhlin v raných fázích hydratace, je ovšem nutné zkoumat i další vlastnosti betonů s těmito vlákny, především reologické vlastnosti čerstvých betonů a fyzikálně mechanické vlastnosti betonů ztvrdlých.



Obr. č. 1. Cementová pasta s polymerními vlákny

Jeden z hlavních pozitivních vlivů je omezování vzniku trhlin, tento efekt je úzce spjatý se soudržností vláken s cementovou maticí. Samotná

polypropylenová vlákna nemají příliš dobrou soudržnost s cementovou matricí, mají ji dokonce horší než vlákna kovová a proto se povrch vláken dále upravuje. Nejčastější úprava povrchu vláken u nás je tkz. „mokrý“ chemická úprava vláken, neboli - lubrikace vláken, která spočívá ve zvýšení povrchové energie vláken. Kromě lepší vazby s cementovou matricí má také pozitivní vliv na rovnoměrné rozmíchání vláken v betonu. Lubrikace vláken má nevýhodu v nutnosti přesného nastavení technologického procesu. V případě nedostatečné lubrikace může dojít ke zplstnatění vláken a špatnému rozmísení v betonové směsi, anebo v opačném případě na sebe lubrikované vlákna navážou příliš vody ze směsi. Díky těmto vlastnostem snaha o vývin kvalitnější a levnější metody úpravy vláken vyústila v metodu úpravy povrchu vláken nízkoteplotním plazmatem.

V práci je tedy snahou experimentálně zjistit chování betonů s polypropylenovými vlákny, které mají různou povrchovou úpravu, především na objemové změny v prvních dnech hydratace betonu, dále pak na reologických vlastnostech čerstvých betonů a v neposlední řadě na fyzikálně mechanických vlastnostech těchto betonů.

2. Složky betonu

2.1. Kamenivo

Kamenivo tvoří v betonu kostru a zaujímá 75-80% objemu. Mísíme různé frakce zrn, abychom dosáhli co nejmenší mezerovitosti. Kamenivo rozdělujeme dle petrografie (původu), velikosti zrn, zdali je těžené nebo drcené a podle pórovitosti. [6] [27]

2.2. Cement

Je to anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, ta tuhne a tvrdne díky hydratačním procesům. Po zatvrdnutí uchovává svoji pevnost a stálost i ve vodě. [5]

Fyzikální vlastnosti cementů

- počátek a doba tuhnutí – zjišťuje se Vicatovým přístrojem, počátek je minimálně 45-60 min, ale obvykle bývá 3-5 hodin. Doba tuhnutí je maximálně 12 hodin, ale bývá 4-6 hodin. Doba tuhnutí se dá ovlivnit obsahem vody nebo teplotou,
- objemová stálost – prokazuje se pomocí Le Chatelierovi objímky za 24 hodin při 20 °C a nesmí být větší než 10 mm. Smrštění cementového kamene za 28 dní je 0,5-0,8 mm/m,
- objemová a sypaná hmotnost – objemová hmotnost 3050-3150 kg/m³, sypaná hmotnost volně loženého cementu je 900-1300 kg/m³ a pytlovaného 1200-1700 kg/m³,
- měrný povrch cementu – běžný cement má obvykle měrný povrch 300 m²/kg, čím větší měrný povrch, tím rychleji a úplněji cement hydratuje, ale jeho výroba je energeticky náročnější, beton má větší smrštění a pro smáčení povrchu cementu je potřeba více vody,
- hydratační teplo – je projev hydratace cementu, v průběhu hydratace se teplo vyvíjí rozdílnou intenzitou: 8 hodin 35-100 kJ/kg, 24 hodin 130-280 kJ/kg, 28 dní 330-550kJ/kg.

[6]

Druhy cementů:

- portlandský
- portlandský směsný
- vysokopecní
- pucolánový
- směsný.

Dále se cementy dělí podle třídy normalizované pevnosti (v tlaku v MPa):

- 32,5
- 42,5
- 52,5

Cementy s vysokými počátečními pevnostmi se označují R (rapid).

[3]

2.2.1. Vliv cementu na objemové změny

Z délkových změn bylo zjištěno, že vyšší pevnostní třída cementu se vyznačuje většími objemovými změnami v počáteční fázi tuhnutí cementu, v době kdy je směs velmi náchylná ke vzniku a rozvoji trhlin z důvodu nízkých hodnot pevností v tahu. Tento jev je pravděpodobně způsoben minerály v cementu, a to nejvíce C_3S a C_4AF . Ještě k vyšší náchylnosti, k tvorbě trhlin přispívají příměsi. Objemové změny v době tuhnutí jsou způsobeny především autogenním smršťováním. [13]

2.3. Příměsi

Především práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo docílení zvláštních vlastností. Rozdělujeme je na dva typy: typ I inertní příměsi fillery atd. a typ II aktivní (pucolány nebo latentně hydraulické látky). Příměs by neměla nepříznivě ovlivnit vlastnosti betonu (trvanlivost, koroze výztuže). [6] [27]

Druhy příměsí

1. Létavý popílek- vzniká spalováním uhlí v práškovém stavu, který se zachytává v odlučovačích. Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu, ale díky adsorpci vody na povrchu zrn zvyšuje vodní součinitel. Hydraulicky aktivní popílek zvyšuje dlouhodobě pevnost betonu. Příměs snižuje hloubku karbonatace betonu a má pozitivní vliv na reversibilní smrštění. [3] [6]
2. Křemičité úlety, mikrosilika - křemičité úlety jsou odpadem při hutnické výrobě, nebo se vyrábí uměle a v tom případě se nazývají mikrosilika. Tento druh příměsí zlepšuje vlastnosti čerstvého betonu jako je: odmísení, bleeding, čerpatelnost. Příměs však zvyšuje potřebné množství vody přibližně 1 l na 1 kg. Mikrosilika vyplňuje prostor v betonu mezi zrny cementu a zhutňuje cementový kámen. Optimální dávka je 5-10% z hmotnosti cementu. [3]

3. Jemné podíly tuhých částic - jsou to jemné práškovité látky do velikosti zrn 0,125 mm. Jemné podíly zvyšují soudržnost betonu, zvyšují vodní součinitel, částečně snižují pevnost betonu a zvyšují jeho smrštění. [6]
4. Barevné pigmenty - používají se k probarvení betonu. Obvyklá dávka pigmentu je 5% hmotnosti cementu. [6]

2.4. Přísady

Materiál, který upravuje vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu přidávaný během míchání betonu v malém množství v poměru k hmotnosti cementu. Vhodnost přísad je prokázána, pokud vyhoví EN 934-2. [27]

Obecně jsou to chemické sloučeniny. Přidávají v množství 0,2-5% hmotnosti cementu. [5]

Druhy přísady

1. **Plastifikátory a superplastifikátory** - jsou nejpoužívanější přísadou v betonu. Redukují množství vody při dosažení stejné zpracovatelnosti. Doporučené dávkování je 1-3% z hmotnosti cementu. Používají se pro následující vlastnosti:
 1. zlepšení zpracovatelnosti betonu, s čímž souvisí i použití intenzivní vibrace,
 2. snížení množství záměsové vody, což má za následek zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu,
 3. snížení množství vody a cementu, které mají za důsledek snížení dotvarování a smrštění. [6]
2. **Provzdušňovací přísady** - po přidání do čerstvého betonu vytváří ve velkém počtu uzavřené účinné vzduchové póry o velikosti 25 až 300 μm (celkový rozsah je od 10 μm do 1 mm), důležitým faktorem je součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů (spacing faktor), ten by měl být menší než 0,25 mm. Betony obsahující tyto póry lépe odolávají mrazu a mořské vodě. [3] [6]

3. **Stabilizační a těsnící přísady** - stabilizační přísady redukují odmísení vody v čerstvém betonu, které způsobuje sedimentace tuhých částic. [6]
4. **Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu** - urychlovač tuhnutí - zkracuje dobu, kdy čerstvý beton přechází z plastického stavu do stavu tuhého; urychlovač tvrdnutí- zrychlují vývoj počátečních pevností. [6]
5. **Retardační přísady** - zpomalují přechod z čerstvého betonu do tuhé látky, používají se k prodloužení doby manipulace, a omezují vznik trhlin. [3]

Mezi další přísady patří: hydrofobizační (odpuzující vodu), pěnotvorné, plynotvorné, odpěňovací, expanzní, adhezní, protikorozi, biocidní. [3]

2.4.1. Přísady zamezující smrštění

Pro snížení autogenního smrštění a vysychání se používají přísady zamezující smrštění na bázi neo-pentyl glykolu a tyto chemické přísady se dávkuje v množství 1-2% z hmotnosti cementu. Přísada nezabrání odpařování vody z betonu na suchém vzduchu.

Přísady fungují na principu snížení povrchového napětí vody a tím poklesu kapilárního tlaku, jenž je vyvolán tvorbou menisků v kapilárních pórech a ty nesou odpovědnost za smrštění cementové pasty.

Bohužel přísada zvyšuje cenu betonu a přitom smrštění plně neodstraní. Pro zvýšení účinnosti se používá s kombinací s polymerními mikrovlnky, nebo s rozpínavými přísadami na bázi CaO. [2]

2.4.2. Rozpínavé přísady

Collepari definuje rozpínavé přísady následovně. Jsou to zvláštní anorganické látky, které zvětšují svůj objem reakcí s vodou. Ideální expanzní přísada pro kompenzaci smrštění betonu, musí expandovat teprve poté, co beton začal tvrdnout, teprve tehdy vzniká pevná vazba mezi betonem a výztuží a ta je schopná tolerovat stav koexistence dvojího napětí. V tuhém kompozitu

musí být expanze zachycena vhodně rozloženou výztuží. Čím vyšší je množství výztuže tím menší je expanze.

Existuje několik skupin expanzivních činidel:

- Nejznámější je založena na kalcium-sulfo-aluminátu (C_4A_3S), ze kterého následně vzniká ettringit. Jedná se o takzvaný primární ettringit, který vzniká v časovém intervalu minut nebo hodin po smíchání cementu s vodou, je neškodný a působí jako regulátor tuhnutí C3A a C4AF, kterým hydrataci zpomaluje. Ovšem pokud vzniká ettringit, později jedná se o sekundární ettringit a ten má škodlivé účinky, díky jeho heterogenní expanzi porušuje cementovou matici.

Použití rozpínavých přísad na bázi ettringitu je relativně staré, ovšem je nutné udržovat beton ve vlhkém uložení po relativně dlouhou dobu 4-7 dnů pro fungování rozpínavé přísady. Takto dlouhé ošetřování je vysoce nákladné, proto odrazuje investory a používá se jen zřídka.

- Jako další levná skupina činidel se používá mrtvě pálené CaO a MgO za vzniku vápenného hydrátu a brucitu. Běžně pálené CaO a MgO na 900°C nejsou vhodné, jelikož jejich přeměna je rychlá a produkty vznikají ještě v době, kdy je beton ještě čerstvý.

Použití mrtvě páleného CaO je vhodnější než MgO. Betony s kompenzací smrštění na bázi CaO se dají vyrábět snadněji a spolehlivěji než s přísadami sulfoaluminátů. Proto je častější i jejich produkce.

Zatímco ettringit potřebuje 7 dní vlhkého ošetřování k plné expanzi, mrtvě pálenému vápnu postačují pouze 3 dny.

Nečekaně dobrých výsledků pro rozpínavé přísady dosahují přísady založené na CaO s použitím přísady zamezující smrštění, kdy dojde k redukci smrštění kolem 50%. Což je lepší výsledek než při použití samotného CaO. Mimo nižšího smrštění zde dochází také k expanzi, pokud je beton chráněn nepropustnou fólií. Je tedy možné vytvářet betony s kompenzací smrštění bez vlhkého ošetřování. Uplatnění takových betonů najdeme například u průmyslových podlah, u

pohledového betonu, kde se eliminuje tvorba trhlin a bylo by možné omezit dilatační spáry

[2]

2.5. Voda

Voda plní v betonu dvě funkce:

1. hydratační - způsobuje hydrataci cementu a tím vytváří tuhou strukturu betonu, na hydrataci je potřeba minimálně 23-25%.
2. reologickou - způsobuje plastičnost betonu, která umožňuje jeho manipulaci

[3] [6]

Voda do betonu musí splňovat kritéria dle normy ČSN EN 1008
Záměsová voda do betonu.

2.6. Vyztužování betonu

Beton je relativně křehký, má nízkou pevnost v tahu oproti pevnosti v tlaku. Výztuž pak přebírá tahové napětí.

Beton vyztužujeme výhradně vnitřně. Aby výztuž přebírala tahové napětí, musí splňovat tyto kritéria:

1. výztuž musí mít vyšší modul pružnosti než beton
2. plastická (trvalá) deformace musí být menší a tažnost při zlomu větší než v betonu
3. pevnost v tahu výztuže musí být větší než betonu
4. soudržnost betonu s výztuží by měla být co největší
5. výztuž nesmí být zkorodována
6. teplotní roztažnost výztuže musí být podobná teplotní roztažnosti betonu

[3]

2.6.1. Rozptýlená vlákna

Princip rozptýlené výztuže je, že v betonu jsou náhodně rozmístěna vlákna. Vlákenná výztuž změní křehký charakter betonu a vytvoří duktilní konstrukční materiál s omezenými deformacemi a smrštěním. Nejde o

nahrazení klasické ocelové výztuže, nýbrž o zlepšení některých vlastností betonu.

Běžné dávkování je od 0,1-2 % objemu betonu. Tento objem však jen málo zlepšuje pevnost v tahu, ale výrazně pomáhá proti objemovým změnám při počátečním tuhnutí a tvrdnutí betonu.

Výhody vláken v betonu:

- v místech konstrukcí, kde dochází k všesměrnému namáhání (podlahy, desky)
- při náhradě smykové výztuže
- u tenkostěnných deskových prvků
- vlákna zvyšují odolnost proti mechanickému namáhání dynamickými rázy
- omezují křehkost betonu
- zvyšují houževnatost a pevnost v rázu
- zvyšují odolnost k prudkým teplotám
- zvyšují únavovou pevnost.

[3]

Typy vláken:

1. Ocelová vlákna - bývají používány v délkách 12-60 mm, tloušťky 0,25 -1 mm. Vlákna mohou mít rozdílnou úpravu, jenž jim má zajišťovat dostatečné kotvení (mohou být zalomeny, zploštělé na koncích, profilované).
Dávkuje se 30 -100 kg do 1 m³ betonu. Je prokázán částečný nárůst pevnosti v tahu ohybem proti referenčnímu betonu bez drátků. [6]
2. Skleněná vlákna - průměr vláken je 14 μm a různé délky 5 - 12 mm. Na 1 kg připadá 200 miliónů vláken. Díky alkalickému prostředí betonu se skelná vlákna upravují složením a lubrikací, jinak by hrozil jejich rozpad. Vlákna minimalizují rozměšování čerstvého betonu, zabraňují vzniku smršťovacích trhlin a zvyšují pevnost v rázu. [3] [6]

3. Polypropylenová vlákna - mají především zamezovat vzniku trhlin při smršťování, jak při počátečním tuhnutí a tvrdnutí, tak ve ztvrdlém betonu. Současně zvyšují pevnost v rázu. Délka vláken se pohybuje 6 -12 mm, objemová hmotnost 910 -1010 kg/m³, Dávkování 0,6 - 2 kg/m³ betonu. [6]

Vlastnosti a další typy vláken:

Tab. č. 1. Vlastnosti vláken do betonu [3]

Materiál a typ vlákna	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Měrná hmotnost [kg/m ³]
Ocelová	210	1500-3600	7850
Skleněná (ARS)	70	1500-3800	2500
Polypropylénová (PP)	3-18	200-800	910
Polyvinilalkoholová (PVA)	40-60	1600-2500	1300
Uhlíková (vysokopevnostní)	200-250	2000-3100	1900
Uhlíková (vysokomodulová)	400-700	1700-2100	1900
Wolframová	414	4200	19300
Beryliová	240	1300	1830

3. Vlákno-beton

Je to moderní kompozit vytvořený spojením betonové matrice a v ní dispergované krátké výztuže. Samotná vlákna zaujmají jen malou část objemu.

Prostý beton má poměrně vysokou pevnost v tlaku, ovšem je křehký, má malou pevnost v tahu za ohybu a pevnost ve smyku. Rozptýlená výztuž má za úkol především zachycovat tahové namáhání a zabraňovat vzniku mikrotrhlin, zvýšit lomovou a rázovou houževnatost, zvýšit odolnost vůči dynamickému namáhání, snížení obrusnosti a případně další speciální vlastnosti. Přidáváním vláken vyztužujeme celou konstrukci, nenahrazujeme tím ale klasickou výztuž.

[9]



Obr. č. 2. Suchá betonová směs s polypropylenovými vlákny

3.1. Polymerní vlákna

Mají svou definici v normě ČSN EN 14889-2, která specifikuje požadavky na polymerová vlákna do betonu, malty a injektážní malty pro použití se statickou funkcí nebo bez statické funkce

Dle technologie výroby jsou vlákna fibrilovaná nebo monofilamentární (jemnější a při stejné hmotnosti je jich více).

Klasifikace polymerních vláken

Klasifikována výrobcem podle fyzického tvaru dle normy ČSN EN 14889 – 2 Vlákna do betonu – Část 2: Polymerní vlákna – Definice, specifikace a shoda

Třída Ia: Jednovláknitá (monofilamentická) mikrovlákna s průměrem menším než 0,30 mm.

Třída Ib: Vlákňitá (fibrilovaná) mikrovlákna s průměrem menším než 0,30 mm.

Třída II: Makrovlákna s průměrem větším než 0,30 mm.

Vlákna třídy *Ia* a *Ib* jsou vlákna bez statické funkce v betonu. Vlákna třídy *II* jsou vlákna se statickou funkcí v betonu, použití těchto vláken je tam, kde je přidávání vláken určeno ke zvýšení únosnosti betonových dílců.

[15]



Obr. č. 3. Polymerní vlákna

3.1.1. Povrchová úprava polymerních vláken

Přidáváním chemikálii za účelem vytvoření povlaku vlákna, vytváříme kluzkou povrchovou úpravu tkz. „spin finish“. Tento povlak má za účel snadnější rozptýlení vláken v čerstvém betonu a také aby netvořily chuchvalce. Nebezpečí při používání chemikálií k vytváření povlaků je to, že může dojít ke vnášení vzduchu do čerstvého betonu, což má za následek snížení pevností. I proto je nutné kontrolovat všechny povrchové úpravy vláken.

[12]

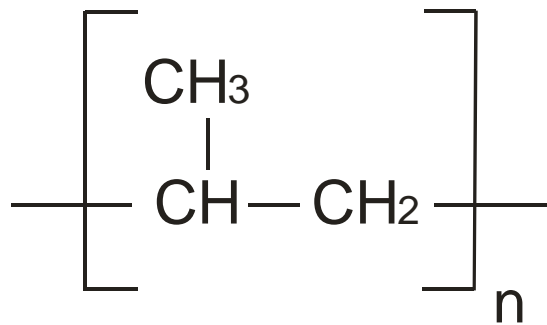
3.2. Polypropylenové vlákna

Polypropylen je termoplastický polymer, vznikající polymerizací propylenových molekul. Pro výrobu vláken je vhodnější izotaktický polypropylen, který má všechny methylové skupiny natočeny stejným směrem. Tento polypropylen má podstatně lepší mechanické vlastnosti.

[12]

Polypropylen je v porovnání s jinými polymery tuhý, pevný, má vyšší teplotu měknutí a nízkou hustotu. Jeho teplota tání je mezi 160 - 170°C, hustota je kolem 900 kg/m³. Pevnost polypropylenu se pohybuje mezi 22 – 23 MPa. Jeho chemický vzorec je C₃H₆.

[11]



Obr. č. 4. Vzorec propylenu

Polypropylenová vlákna se nejčastěji vyrábí v délkách 5 – 15 mm o průměru 10 – 20 μm. Dávkování do betonů je 0,6 – 1 kg na 1 m³, v případě protipožárních konstrukcí se může dávkovat ve vyšším množství až 2 kg na 1 m³. Díky vlastnostem polypropylenu dochází při zatížení v betonu k protažení vláken, a proto mají vlákna nejčastější uplatnění k zachycení vzniku mikrotrhlin v raných fázích hydratace cementu, přibližně do dvou dnů. Polypropylenová vlákna v pozdějších fázích hydratace nemají už zásadní vliv, nenahrazují vliv ocelových vláken, která v dalších fázích přebírají napětí. Vlákna mají pozitivní vliv na ohnivzdornost. Udává se i zvýšená odolnost při zkoušce CHRL, což by mohly mít za následek zachycené kousky betonu na vláknech, které při samostatné zkoušce stříčka není schopná opláchnout a tím se snižuje množství odpadu.

Účinek vláken je ovlivněn především rozmístěním v betonové matrici a povrchovou úpravou, která zaručuje dobrou soudržnost s cementovou matricí. Ocelová vlákna mají lepší soudržnost s matricí než vlákna polypropylenová. Polypropylenová vlákna jsou častěji vytržena z matrice než vlákna ocelová.

Kromě aplikace do betonů lze polypropylenové vlákna použít i do malt, omítek, tmelů, atd.

[11] [28]

3.2.1. Zlepšení vlastností polypropylenových vláken

Polypropylenové vlákna bez úpravy mají nízkou soudržnost s cementovou matricí, což je dáno nejen jejich hladkým povrchem, ale i faktem, že polypropylen je ze své podstaty hydrofobní materiál. Polypropylenová vlákna do betonu u nás prodáváná jsou nejčastěji upravena aviváží.

Metody úpravy povrchu vláken

- A) Mechanické zdrsňení povrchu – Nevýhodou je poměrně technicky komplikované mechanicky působit na vlákna. Další nevýhodou je, že tímto neovlivníme pouze povrchovou vrstvu vláken, ale i zhoršíme mechanické vlastnosti vlákna.
- B) Chemické zdrsňení povrchu – Stejně jako u mechanického zdrsňení povrchu ovlivňujeme mechanické vlastnosti vláken nepříznivým směrem.
- C) Lubrikace povrchu - Vlákna s lubrikací vykazují dobrou smáčitelnost a rozmísitelnost. Nevýhodou metody je nutnost přesného nastavení, aby nebyla vlákna nedostatečně, nebo příliš mnoho lubrikována. Navíc vytváření povlaku aviváží probíhá pomocí chemikálií, což z ekologického hlediska není příliš vhodné.
- D) Úprava povrchu plazmatem – Metoda proti ostatním metodám nová a je ekologičtější než předchozí metody.

[4] [7] [23]

3.2.2. Plazmová úprava polypropylenových vláken

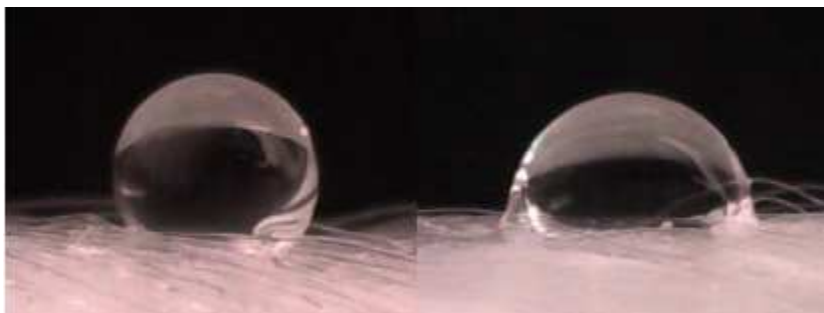
Obecně se plazma nazývá soubor nabitých i neutrálních částic v různých kvantových stavech, jejichž prostorový náboj je přibližně roven nule.

Rozlišujeme plazma izotermické a neizotermické. Vznik izotermického je v přírodě běžný, neizotermické samovolně zaniká a musí se udržovat uměle. Mezi druhy plazmových výbojů patří: obloukový výboj, jiskrový výboj, koróna, doutnavý výboj.

Podstatou oplazmování vláken je náhrada vodíkových atomů hydroxylovými (OH) nebo karboxylovými (COOH) skupinami, které jsou na rozdíl od vodíkových atomů hydrofilní.

Používá se k tomu povrchový bariérový výboj za atmosférického tlaku. Tento výboj generuje velké množství elektronů s vysokou energií, proti těžkým částicím, které mají podstatně nižší energii (odpovídající teploty pod 100 °C). Je to tedy „studené“ plazma vhodné pro povrchovou úpravu materiálů, které jsou citlivé na vyšší teploty. Díky tomu, že jako pracovní plyn je zvolen vzduch odpadá nutnost vzduchotěsného uzavření a je možno dobu opracování zkrátit na sekundy.

Na povrchu vláken se po úpravě vytvoří struktura o rozměrech desítky až stovky nanometrů, která má vliv na smáčivost povrchu těchto upravených vláken. Tím že úprava působí pouze v povrchové vrstvě o tloušťce několik nanometrů, působí pouze tam kde je to žádoucí. Autor ve článku [26] se snaží popsat efekt „stárnutí“ plazmové úpravy za modifikace vláken za atmosférického tlaku. Stárnutí povrchové plazmové úpravy je problém, který se obecně projevuje u polymerů. Tento problém je způsoben tím, že navázané polární skupiny mají tendenci se otáčet dovnitř polypropylenového řetězce a tím snížit povrchovou energii.

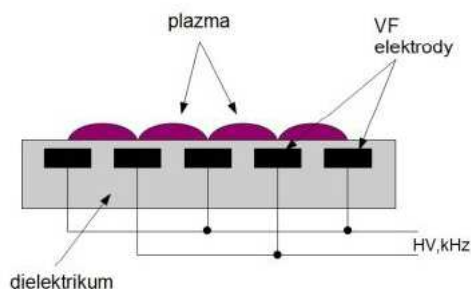


Obr. č. 5. Změna chování PP vláken – nalevo vlákna před úpravou; napravo PP vlákna po úpravě [7]

Vlákna, použitá v experimentální části, byla upravena plazmovým zdrojem, s koplanárním uspořádáním, to znamená, že zařízení je uspořádáno v jedné rovině. Toto zařízení bylo vyvinuto na Masarykově universitě v Brně ve spolupráci s Universitou Komenského v Bratislavě. Tento plazmový zdroj umožní získat makroskopicky homogenní tenkou vrstvu „studeného“ plazmatu,

kteřá umožní povrchové úpravy především polymerních materiálů. Výboj hoří na povrchu keramiky, v nichž jsou zapuštěny elektrody. To spolu s vhodným napětím umožní vznik makroskopicky homogenní tenké vrstvy plazmatu. Plazmovou vrstvu pak tvoří plazma na povrchu keramiky a hustá síť filamentárních výbojů, které se velkou rychlostí pohybují podél elektrod. K zapálení koplánárního výboje lze použít libovolný plyn.

[4] [7] [11] [24] [25] [26]



Obr. č. 6. Fotografie aparatury s DCSBD a detailní schéma elektrody [7]

3.2.3. Další možná využití polypropylenových vláken v betonech

Jednou z dalších možností, jak použít polypropylenová vlákna, je přídavek do betonu kde se požaduje vyšší odolnost abrazivního opotřebení betonu u hydrotechnických staveb.

Tento erozivní účinek je dlouhodobý proces, ale může být v řádech centimetrů někdy i více, což může ohrozit stabilitu konstrukce. Erozivní účinek je sice dlouhodobí, ale provádí se na zrychlených testech, jako jeden ze způsobu se provádí test abrazivním vodním paprskem, který je tvořen jako směs vody a pevných částic pohybující se velkou rychlostí.

Odolnost betonu závisí na několika parametrech: receptura, pevnost v tlaku, druh a množství cementu, přidaná vlákna, podmínky při vytvrzování, povrchová úprava, ale studie ukazují, že hlavní je pevnost betonu v tlaku. Z toho důvodu se vysokopevnostní betony dají používat jako betony s vyšší odolností proti abrazivním účinkům. Vysoké množství cementu u těchto betonů způsobuje zvýšení teplot, což vytváří předpoklad vzniku trhlin. Ze stejného

důvodu se cement nahrazuje například: popílkem, vysokopecní struskou nebo mikrosilikou, v těchto betonech pak mají vlákna snížit množství trhlin v počátcích tvrdnutí betonu. Přidáním vláken lze také zlepšit hydrataci cementu snížením separace vody z čerstvého betonu. V zatvrdlém betonu vlákna zvyšují odolnost proti oděru, tato vlastnost je připisována vlastnosti vláken absorbovat vysoké množství energie když jsou odděleny, Polypropylenová vlákna snižují nasákavost a propustnost betonu proti tekutinám.

[7]

4. Vlastnosti betonu

4.1. Smršťování betonu

"Die Powerse, Brunauera a Wittmanna smrštění betonu souvisí s molekulami vody, které jsou mezi hydratujícími zrny cementu. Svoji roli zde hraje kapilární kondenzace a povrchové napětí. Ale podle Feldmanna a Seredova jsou nejdůležitější molekuly vody nacházející se ve struktuře C-S-H gelu a mezi jeho vrstvami, které během vysychání unikají." [1]

„Smrštění betonu ovlivňují tyto technologické faktory:

- Pórovitost cementového kamene a jeho vlastnosti
- Složení betonu
- Rozměr, tvar betonové konstrukce a její vyztužení
- Vnější podmínky (teplota, vlhkost) a čas“

[1]

„V různých fázích zrání betonu o různých složení dochází ke třem typům smrštění, ovšem vždy záleží jestli dochází k výměně vody mezi betonem a prostředím.

- Plastické smrštění
- Smrštění vysycháním
- Autogenní smrštění“

[1]

4.1.1. Plastické smrštění

„Dochází k němu dokud je beton v plastickém stavu a z jeho povrchu se může odpařovat voda. Nedochozí k němu pokud odpařovanou vodu doplňuje voda, která vystoupila na povrch v důsledku rozmíšení. Smrštění nastává do 10-12 hodiny po uložení betonu a to jen tehdy je-li beton na vzduchu s relativní vlhkostí pod 95%, působí na něj vítr a vysoká teplota. Tyto tři vlivy způsobují plastické smrštění.

Smrštění se dá omezit ocelovou výztuží nebo třením mezi ukládaným beton a podkladem.

V praxi můžou díky určitým povětrnostním podmínkám vznikat mikrotrhliny na povrchu vysychajícího betonu. Abychom omezili tvorbu mikrotrhlin můžeme:

- a) Chránit povrch betonu před přímým kontaktem se vzduchem například nepropustnou membránou nebo vlhčenou rohoží. Tento případ zabraňuje vysychání, čímž se sníží napětí pod tahovou pevnost, a proto nevznikají trhliny.
- b) Přidat do betonu polymerní mikrovlákná, čímž se zvýší pevnost cementové matrice. Nastává sice plastické smrštění, ale nedojde k vzniku trhlin.“

[1]

4.1.2. Smrštění vysycháním

„Pokud beton vysychá v prostředí s vlhkostí méně než 95 %, dochází ke smršťování a to se nazývá smrštění vysycháním a probíhá v betonu celou dobu jeho životnosti (pokud je vlhkost pod 95%).

Z hlediska smrštění vysycháním není možné prokázat pozitivní vliv dlouhé doby ošetřování betonu (třeba do stáří 28 dnů). Je to tím, že dlouhé ošetřování snižuje množství nehydratovaných cementových zrn, které působí jako překážky smrštění.

Stálá ochrana betonových konstrukcí (obklady, nátěry, atd.) může snižovat smrštění vysycháním.

Pokud je beton uložen pod vodou bude naopak bobtnat, což způsobují molekuly vody, které se dostávají mezi vrstvy C-S-H gelu, toto rozpínání však nevede ke vzniku trhlin díky malé expanzi a malému tlakovému napětí.

Jak ovlivňují složky betonu smrštění vysycháním:

- Cement - pokud obsahuje méně regulátoru tuhnutí, může být smrštění vysycháním menší
- Voda - pokud neobsahuje škodlivé látky tak smrštění ovlivňuje pouze hodnota vodního součinitele
- Kamenivo - ovlivňuje smrštění významně, působí totiž jako překážka, která zabraňuje hydratujícím cementovým zrnům se smršťovat. Čím hutnější je kostra, tím menší je smrštění
- Superplastifikátory - mohou smrštění výrazně snížit až o 5%
- Minerální příměs i- zvyšují smrštění pokud jsou použity ke zvýšení objemu cementového tmele“

[1]

4.1.3. Autogenní smrštění

„Autogenní smršťování bylo potvrzeno když se začaly používat betony s nízkým vodním součinitelem, které se dají označit za vysokohodnotné betony. Pokud obalíme beton nepropustnou fólií, aby nedocházelo k výměně vody s okolím a nedocházelo tedy k plastickému smrštění a smrštění vysycháním dochází tedy ke smrštění, které nazýváme autogenní a jediným způsobem jak tomuto smršťování zbránit je po co nejdelší dobu ošetřovat beton vodou.

Autogenní smrštění u betonů s vodním součinitelem nad 0,45 je zanedbatelné, ovšem u betonů se součinitelem kolem 0,2 může dosahovat hodnot kolem 700 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Protože vznikající póry nejsou zaplněny vodou, dochází k migraci vody z kapilárních pórů do nově vzniklých pórů a v kapilárách se tvoří menisky, které mají snahu kapiláry uzavírat. To je příčinou smrštění od vysychání a společně s chemickým smrštěním (hydratace slínekových minerálů) představuje autogenní smrštění.“

[1]

5. Měření objemových změn betonů

Pro měření objemových změn hydratujících staviv ve fázi tuhnutí je používáno několik metod, mezi tyto metody patří:

Kontinuální sledování čistě autogenních a chemických projevů

- hydrostatické vážení
- metoda vlnovce

Kontinuální sledování za účasti všech projevů

- metoda žlabová (kontaktní, výsledky ovlivnění třením o stěny žlabu, možnost snímání změny výšky hladiny)
- metoda kužele (bezkontaktní, 1D snímač laser, možnost temperování kužele)
- metoda rozlivu v tenké vrstvě (bezkontaktní, 1D snímač laser, 2D snímač mikroskop, možnost kontinuálního vážení směsi)

Alternativní metody sledování projevů objemových změn

- sledování vzniku trhlin v dvojitém ocelovém prstenci
- smrštění malty v prostém trojhranném korytě
- tvarová deformace deskového vzorku malty s vloženou výstužnou sítí

[19]

5.1. Bezkontaktní subpixelová metoda – Principy snímání dilatačních posunů

V experimentální části byla pro měření objemových změn použita metoda vyvinutá na našem ústavu ve spolupráci s ústavem geologie. Tuto metodu vyvinul kolektiv pracovníků, mezi které patřili: prof. RNDr. Ing. Šťastník Stanislav, CSc; Ing. Kopkáně Daniel; Ing. Nováček Jaroslav; Ing. Kalvoda Petr, Ph.D.

Důvod vzniku

Vývoj současných maltovinných pojiv si žádá podrobnější zkoumání a znalosti objemových změn v počátečních stádiích tuhnutí těchto pojiv. V této fázi totiž dochází ke vzniku mikrostruktury těchto směsí a ta je rozhodující pro výsledné mechanické vlastnosti.

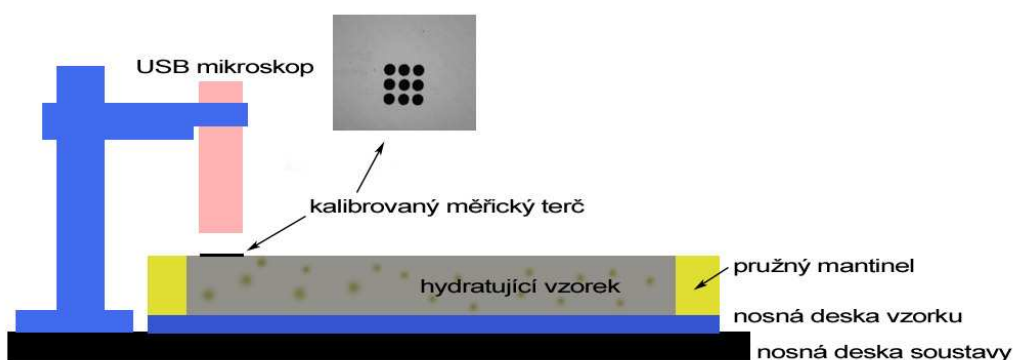
Pro měření objemových změn se obecně používají měřicí systémy, které mají vysoké pořizovací náklady. Ceny měřidel se mohou pohybovat a řádech desítek tisíc korun, kompletní systémy pak dokonce stovky tisíc. Tento fakt byl jedním z hlavních pro motivaci pro vývoj této alternativní metody měření objemových změn. Tato metoda má být schopna splňovat požadavky jak na přesnost a automatizaci tak na nízké pořizovací náklady.

Jedním z hlavních prvků bezkontaktní subpixelové metody je stabilní USB mikroskop, který nahrazuje doposud používané laserové snímače při výrazně nižších pořizovacích nákladech při zachování stejné přesnosti.

[16] [19]

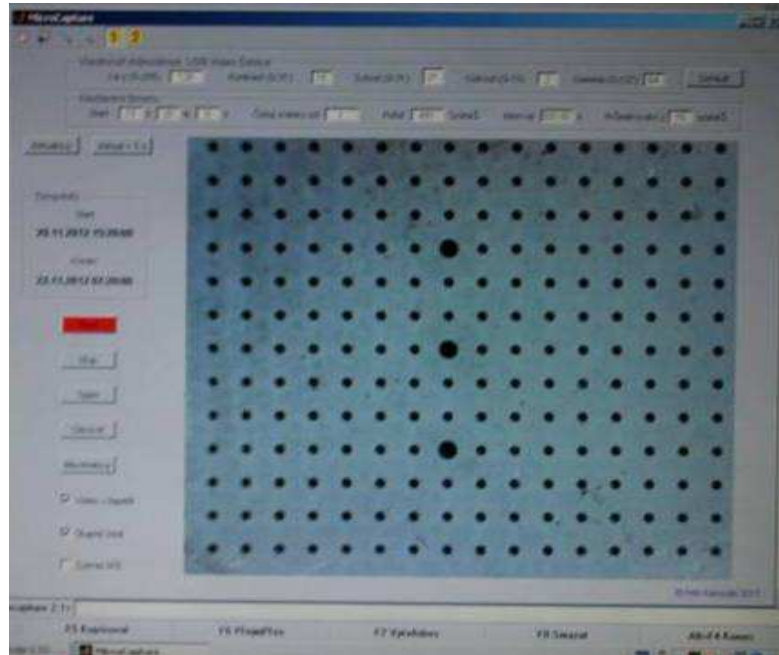
Princip

Metoda měření malých posunů je založena na snímkování terče, stabilně umístěným digitálním USB mikroskopem, který má na sobě fotogrammetrický obrazec. Terč je umístěn na polyuretanovém plováku, který je umístěn na povrchu směsi a po spuštění měření se s ní shodně pohybuje a kopíruje tak její dilatační posuny.



Obr. č. 7. Schéma měření dilatačních posunů maltové směsi v tenké vrstvě s využitím USB mikroskopu. [19]

Po dokončení snímání dojde k analýze série pořízených digitálních fotografií, které se od sebe liší velikostí posunu fotogrammetrického obrazce v zorném poli mikroskopu. Z určené změny polohy těžiště fotogrammetrického obrazce v ortogonální pixelové matici oproti předcházejícímu snímku (tj. změny řádkové a sloupcové souřadnice) lze změnu přepočítat na posun v metrické soustavě, jelikož známe skutečné vzdálenosti daných bodů.



Obr. č. 8. Program zaznamenávající snímky

Pracovní postup

Směs je po smíchání s vodou co nejdříve umístěna a zhutněna na podkladní desce ohraničená molitanovými mantinely, které dovolují dilatační posuny směsi. Od povrchu mantinelů a podkladní desky, které by mohly způsobovat tření, je směs oddělena plastovou fólií.

USB mikroskopy jsou umístěny do stabilních stojanů, při měření byly použity tři: jeden měřící horizontální posun, jeden měřící posun horizontální a vertikální a poslední zaznamenávající povrch vzorku pro vytvoření video záznamu.

Snímkování USB mikroskopů bylo nastaveno po 2 minutách. Tato metoda vykazuje přesnost 15 mikrometrů a její pracovní rozsah je ± 6 mm.

V intervalu 5 min je dále snímána teplota tuhnoucí směsi, teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu v místnosti, rychlost proudícího vzduchu nad povrchem vzorku.

[16] [17] [18] [19]



Obr. č. 9. Skutečný pohled na měřicí přístroj

5.2. Důležitost zkoumání vlastností prostředí v okolí vzorku

Zjišťování vlastností v prostředí vzorku je důležité pro výpočet intenzity odparu, což je důležité k nastínění počátku plastického smrštění a k možným vznikům trhlin. Nebezpečí vzniku trhlin stoupá, pokud intenzita odparu na povrchu je vyšší než rychlost stoupání vody k povrchu betonu. Vznik byt' jen vlasových trhlin vlivem plastického smršťování je stálým zdrojem obav nejen u nás, ale především v zemích, pro které je charakteristické teplé nebo větrné počasí. I díky těmto faktům autor Paul J. Uno sestavil vzorec a graf, který má usnadnit vypočítat odpařování z povrchu betonu a tím i možný vznik trhlin vznikajících v plastickém smršťování betonu.

Vzorec pro výpočet rychlosti odpařování

$$E = 5 \cdot ([T_C + 18]^{2.5} - r \cdot [T_A + 18]^{2.5}) \cdot (V + 4) \cdot 10^{-6} \quad [10]$$

Kde:

E = rychlost odparu [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{hod}$]

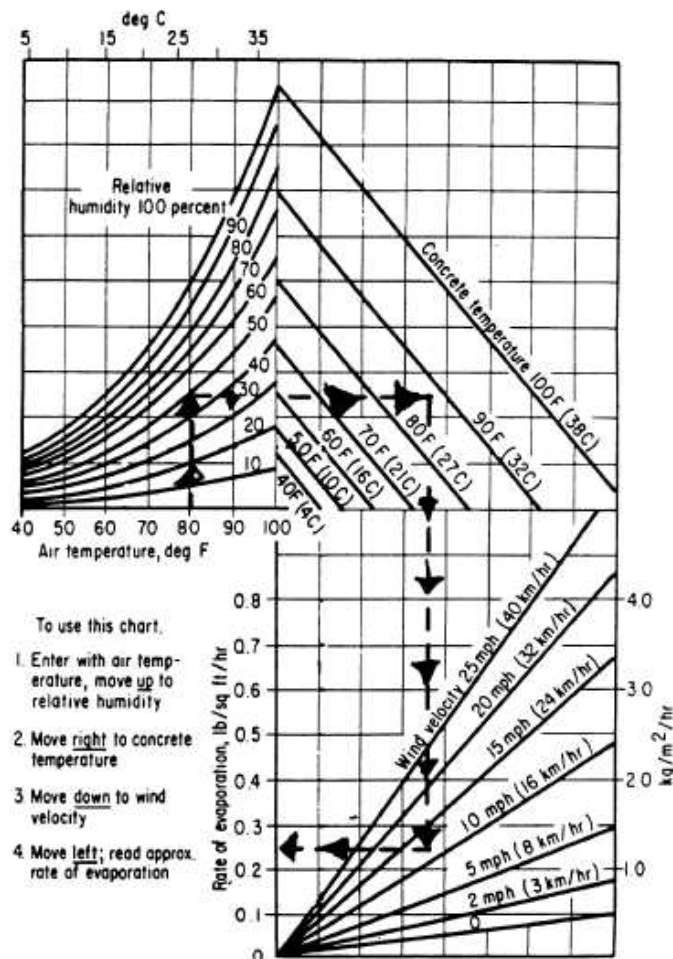
T_C = teplota betonu [$^{\circ}\text{C}$]

T_A = teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

r = relativní vlhkost v procentech / 100

V = rychlost vzduchu [km/hod].

Limitní odpar je $1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{hod}$, už i hodnoty blížíící se k této hodnotě by mohli mít za následek vznik spousty trhlin vedoucí až k významnému snížení únosnosti betonu.



Graf č. 1. Graf odhadu míry vypařování povrchové vlhkosti betonu [10]

Existuje celé řada dalších faktorů kromě rychlosti odpařování, které ovlivňují plastické smršťování betonu a možný vznik trhlin.

Další faktory ovlivňující plastické smršťování

- Pevnost betonu (ve vztahu k množství cementu)
- Tloušťka betonu (související s krvácením)
- Vliv vysokého podílu jemného kameniva
- Ovlivnění retardéry
- Obsah polymerních vláken
- Vliv materiálu pod betonovou deskou
- Povrchové spreje (především alifatické alkoholy)

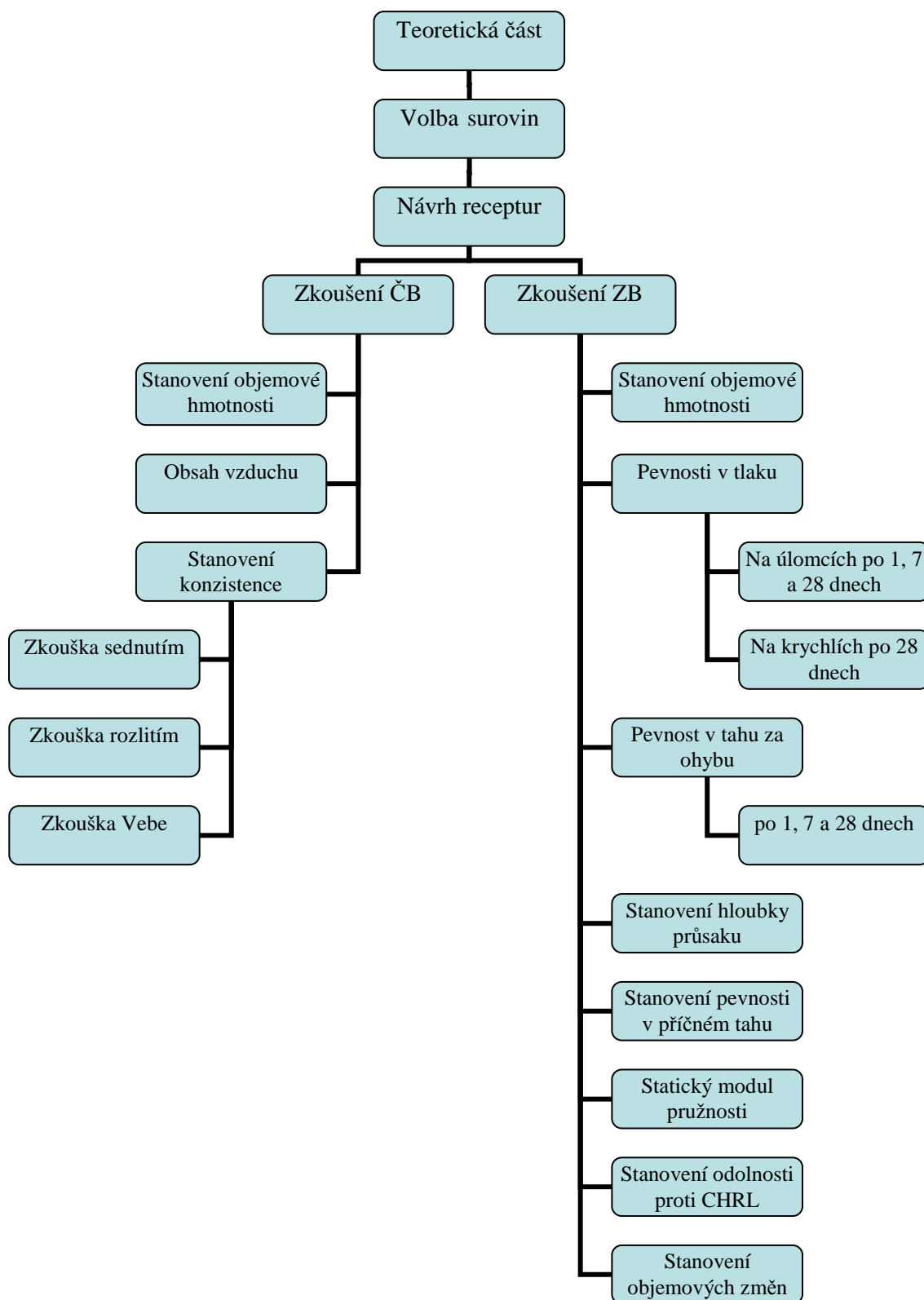
[10]

II. Experimentální část

6. Cíl bakalářské práce

Cílem práce je posouzení vlivu přídavku polypropylenových vláken bez statické funkce na vlastnosti betonu. Jedním z hlavních cílů je posuzovat tyto vlastnosti s ohledem na povrchovou úpravu těchto vláken. Především ověření účinnosti plazmové úpravy vláken pomocí nízkoteplotního plazmatického výboje, který je zkoumán ve spolupráci s Masarykovou univerzitou a firmy KrampeHarexCZ.

Provést navržené receptury s různými typy povrchových úprav vláken. Na těchto recepturách následně provést testování vlastností čerstvých betonů. Dále pak sledování objemových změn a fyzikálně mechanických vlastností těchto betonů. Nakonec porovnání těchto betonů s vlákny s různou povrchovou úpravou.



Graf č. 2. Diagram postupu práce

7. Použité suroviny

7.1. Cement

Pro všechny receptury byl použit cement CEM I 42,5 R z výrobního závodu Mokrý (Českomoravský cement).

Vlastnosti použitého cementu jsou shrnuty v tabulce č. 2.

Tab. č. 2. Vlastnosti použitého cementu [30]

<i>Fyzikální vlastnosti</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Průměrná hodnota</i>
Měrný povrch	m ² /kg	377
Normální konzistence	%	28,2
Počátek tuhnutí	Min	192
Konec tuhnutí	Min	274
Objemová stálost	Mm	1,0
<i>Mechanické vlastnosti</i>		
Pevnost v tlaku 2 dny	MPa	29,3
Pevnost v tlaku 28 dnů	MPa	59,9
Pevnost v ohybu 2 dny	MPa	5,4
Pevnost v ohybu 28 dnů	MPa	8,8

7.2. Kamenivo

Všechno použité kamenivo splňuje požadavky normy ČSN EN 12620. Kamenivo frakce 0 – 4 mm bylo použito z lomu Žabčice, frakce 4 – 8 mm z lomu Olbramovice a frakce 8 – 16 mm také z lomu Olbramovice

7.3. Voda

Při míchání byla použita voda z rozvodu pitné vody, která splňuje požadavky ČSN EN 1008.

7.4. Plastifikátor

Za plastifikátor byl zvolen CHRYSO[®] Fluid Optima 224 který je superplastifikátor nové generace na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 934-1, ČSN EN 934-2.

Vlastnosti použitého plastifikátoru jsou shrnuty v tabulce č. 3.

Tab. č. 3. Vlastnosti použité plastifikační přísady [31]

Vzhled	hnědá kapalina
Hustota při 20 °C	1,05 kg/dm ³ ± 0,2
Sušina	21,4 ± 1,1 % (EN 480-8)
pH	4,7 ± 1
Obsah chloridů	≤ 0,1 %
Obsah alkálií (ekv. Na ₂ O)	≤ 1 %

Doporučená dávkování je 0,3 – 2 kg na 100 kg cementu a musí se přidávat se záměsovou vodou.

7.5. Rozptýlená výztuž

Jako rozptýlená výztuž byly v recepturách použity polypropylenová vlákna se třemi typy povrchové úpravy.

A) Vlákna dodaná firmou KrampeHarexCZ, komerční

- Délka 12 mm
- Průměr 18 μm
- Dále jsou označována jako „KrampeHarex“

B) Experimentální vzorek vývoje, subdodavatel KrampeHarexCZ

- Jsou očištěná od aviváže a vypráním v alkoholu
- Délka 12 mm
- Průměr 18 μm
- Dále jsou označována jako „Očištěná“

C) Experimentální vzorek vývoje, subdodavatel KrampeHarexCZ

- Vlákna byla očištěna od aviváže a následně na nich byla provedena plazmová úprava po dobu 5 s
- Délka 12 mm
- Průměr 18 μm
- Dále jsou označována jako „Oplazmovaná 5 s“



Obr. č. 10. Použitá polypropylenová vlákna

D) Pro měření objemových změn byla navíc zkoušena ještě jedna varianta úpravy povrchu vláken, experimentální vzorek vývoje, subdodavatel KrampeHarexCZ

- Provedena plazmová úprava bez předchozích očištění vláken od aviváže.
- Délka 12 mm
- Průměr 18 μm
- Dále jsou označována jako „Aviváž + plazma“

8. Návrh receptur

Výsledná receptura byla navržena společně s Ing. L. Bodnárovou Ph.D.. Různá povrchová úprava vláken by měla být schopná na svůj povrch navázat rozdílné množství vody, což by mělo mít za následek změnu reologických vlastností.

Tab. č. 4. Tabulka receptur

Receptury				
Typ receptury		Množství [kg]	Poznámka	
REF		CEM I 42,5R Mokrá	340	
		0-4 Žabčice	819	
		4-8 Olbramovice	220	
		8-16 Olbramovice	783	
		Voda	163,2	w = 0,48
		Chryso Fluid Optima 224	6,12	1,8% z m _c
	A	KrampeHarex	1	1 kg na m ³
	B	Oplazmovaná 5 s	1	1 kg na m ³
	C	Vlákna očištěná	1	1 kg na m ³

Díky zvolené metodě měření objemových změn byla pro toto měření zvolena jiná receptura, která je vhodnější. Tato receptura se díky složení kameniva podobá recepturám pro potěrové betony, kde se rovněž počítá s možným využitím polymerních vláken.

Tab. č. 5. Tabulka receptur pro objemové změny

Receptura				
Typ receptury		Množství [kg]	Poznámka	
REF		CEM I 42,5R Mokrá	111	
		0-4 Žabčice	333	
		Voda	55,5	w=0,5
	A	KrampeHarex	1	1 kg na m ³
	B	Oplazmovaná 5 s	1	1 kg na m ³
	C	Vlákna očištěná	1	1 kg na m ³

9. Výsledky jednotlivých zkoušek

U zkoušek kde byla výsledná hodnota stanovena z průměru více hodnot, je v grafech zobrazena směrodatná odchylka těchto hodnot.

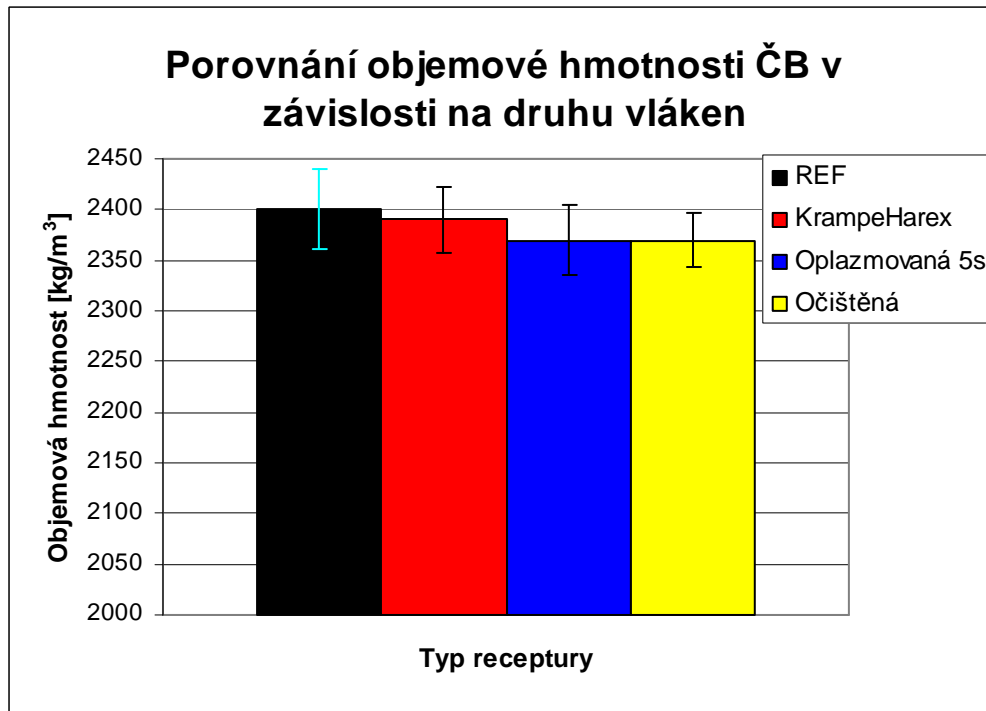
9.1. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Dle ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Objemová hmotnost se určí jako poměr hmotnosti množství zhutněného betonu k jeho objemu (ten je totožný s objemem formy).

Při stanovování objemové hmotnosti čerstvých betonů s vlákny při stejných recepturách se dalo očekávat podobných hodnot. Výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 6 a grafu č. 3.

Tab. č. 6. Výsledky objemových vlastností ČB

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Objemová hmotnost ČB [kg/m ³]	2400	2390	2370	2370



Graf č. 3. Výsledky objemových vlastností ČB

Při srovnání objemových hmotností ČB mi jako beton s největší objemovou hmotností vychází referenční receptura, tento jev by se dal vysvětlit tím, že u referenční receptury bylo naměřeno menší množství vzduchu. 1% rozdíl obsahu vzduchu by znamenal, při stanovené objemové hmotnosti, pokles této objemové hmotnosti o zhruba 25 kg/m^3 . Tento fakt se ovšem nepotvrzuje u dalších receptur, jejichž rozličné výsledky by se dali vysvětlit rozdílným poměrem kameniva a cementového tmele u jednotlivých vzorků jednotlivých receptur. Celkově se ovšem dá říci, že rozdílná povrchová úprava vláken by neměla ovlivnit objemovou hmotnost ČB o více než 50 kg/m^3 .

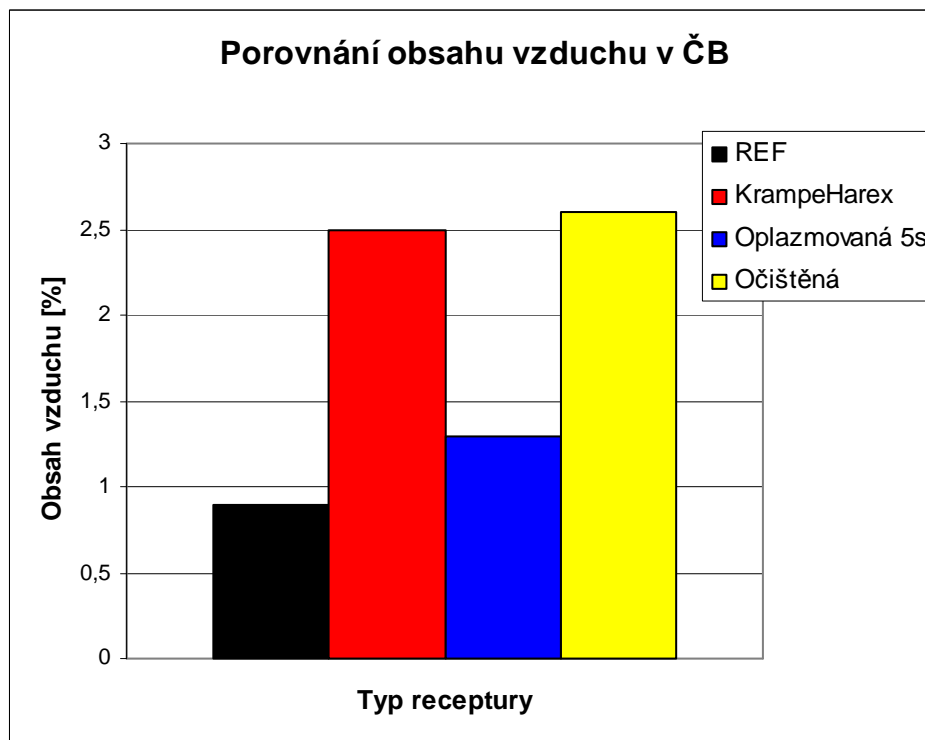
9.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Stanovení obsahu vzduchu bylo stanoveno dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlaková metoda.

Jednou z vlastností polypropylenových vláken v čerstvém betonu je zvedat obsah vzduchu. Výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 7 a grafu č. 4.

Tab. č. 7. Výsledky obsahu vzduchu v ČB

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Obsah vzduchu [%]	0,9	2,5	1,3	2,6



Graf č. 4. Výsledky obsahu vzduchu v ČB

Jak již bylo popsáno, polypropylenová vlákna mají nepříjemnou vlastnost na sebe navazovat bublinky vzduchu, což má nepříznivý vliv na pevnosti betonů (udává se snížení pevnosti o 5 % při nárůstu množství vzduchu o 1 %).

Toto tvrzení se mi potvrdilo tím, že referenční receptura dosahovala nejmenšího obsahu vzduchu v ČB, oproti tomu vlákna bez povrchové úpravy si vedli nejhůře, což díky poznatkům o povrchových úpravách vláken byl očekávaný výsledek. Překvapivě špatně si ovšem vedli i komerčně prodávaná vlákna, které dosahovaly více než dvojnásobné množství vzduchu oproti referenční receptuře. Naopak dobře si vedli vlákna s plazmovou úpravou, které vykazovaly nejmenších hodnot obsahu vzduchu v porovnání s recepturami obsahující vlákna a dokonce dosahovala hodnoty, která byla srovnatelná s referenční recepturou. Závěrem by se tedy dalo říct, že plazmová úprava vláken je vzhledem k hledisku obsahu množství vzduchu v ČB žádoucí.

9.3. Stanovení konzistence čerstvého betonu

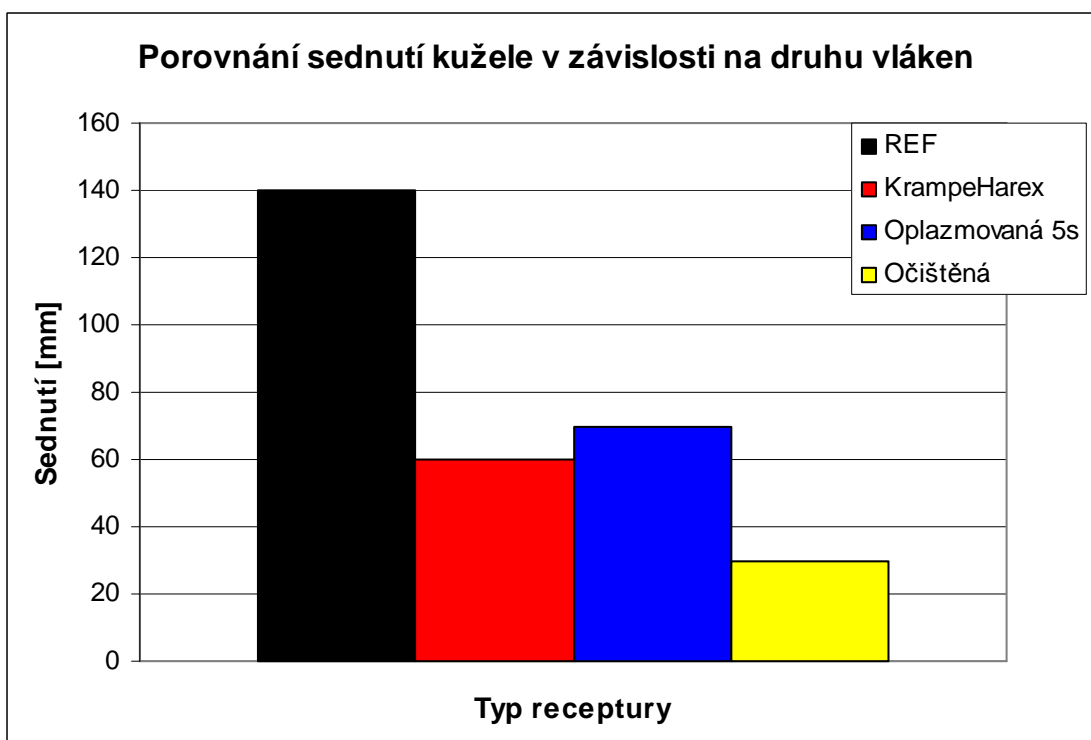
Stanovení konzistence čerstvého betonu bylo stanoveno třemi metodami a to zkouškou sednutím dle ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Dále pak zkouška Vebe dle ČSN EN 12350-3 Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe, a naposled zkouškou rozlitím dle ČSN EN 12350-5 Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím.

Zkouška sednutím

Výsledky zkoušky sednutí jsou shrnuty v tabulce č. 8 a grafu č. 5.

Tab. č. 8. Výsledky zkoušky sednutí

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Sednutí [mm]	140	60	70	30



Graf č. 5. Výsledky zkoušky sednutí



Obr. č. 11. Fotografie rozlité

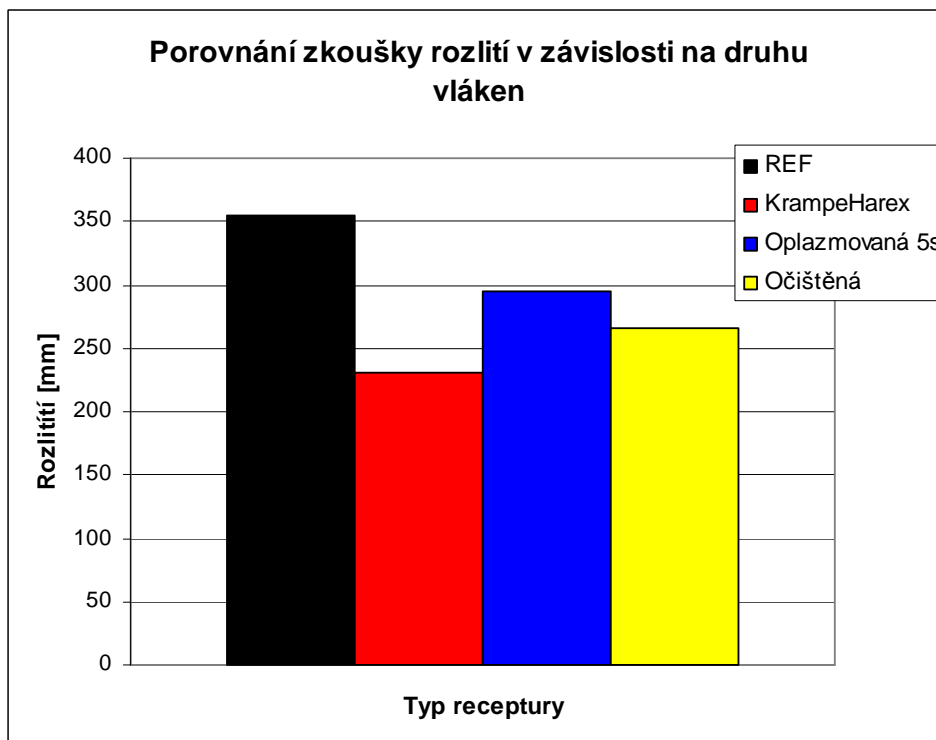
Při zjišťování reologických vlastností zkouškou sednutí kužele vycházíme z faktu, že vlákna jsou schopná díky svému povrchu v betonu navázat kapičky vody. Množství vody, kterou je vlákno schopné navázat se liší dle povrchové úpravy vláken. Voda, kterou na sebe naváže vlákno, se odpařuje z betonu o něco později, proto se někdy hovoří o tkz. samoošetřovací funkci, kterou vlákna mají, tento jev bude řešen později. Největší sednutí dosahuje referenční receptura. V porovnání receptur s vlákny nejhůře dopadla ta s neupraveným povrchem, která v porovnání s referenční recepturou vykazuje největší změnu reologických vlastností. Z dalšího pohledu na výsledky je patrné, že plazmová úprava je schopná navázat menší množství vody než komerčně prodávaná vlákna. Svým způsobem je vlastnost méně navazovat vodu více žádoucí, samo ošetřovací vlastnost je sice v betonu žádoucí, ale nepříjemností ovšem je, že se přidáním vláken se takto změní reologické vlastnosti a s tímto faktem se musí dopředu počítat při návrhu receptury, pokud chceme zachovat reologické vlastnosti a případně zvýšit vodní součinitel, což má neblahý vliv na pevnosti betonu.

Zkouška rozlitím

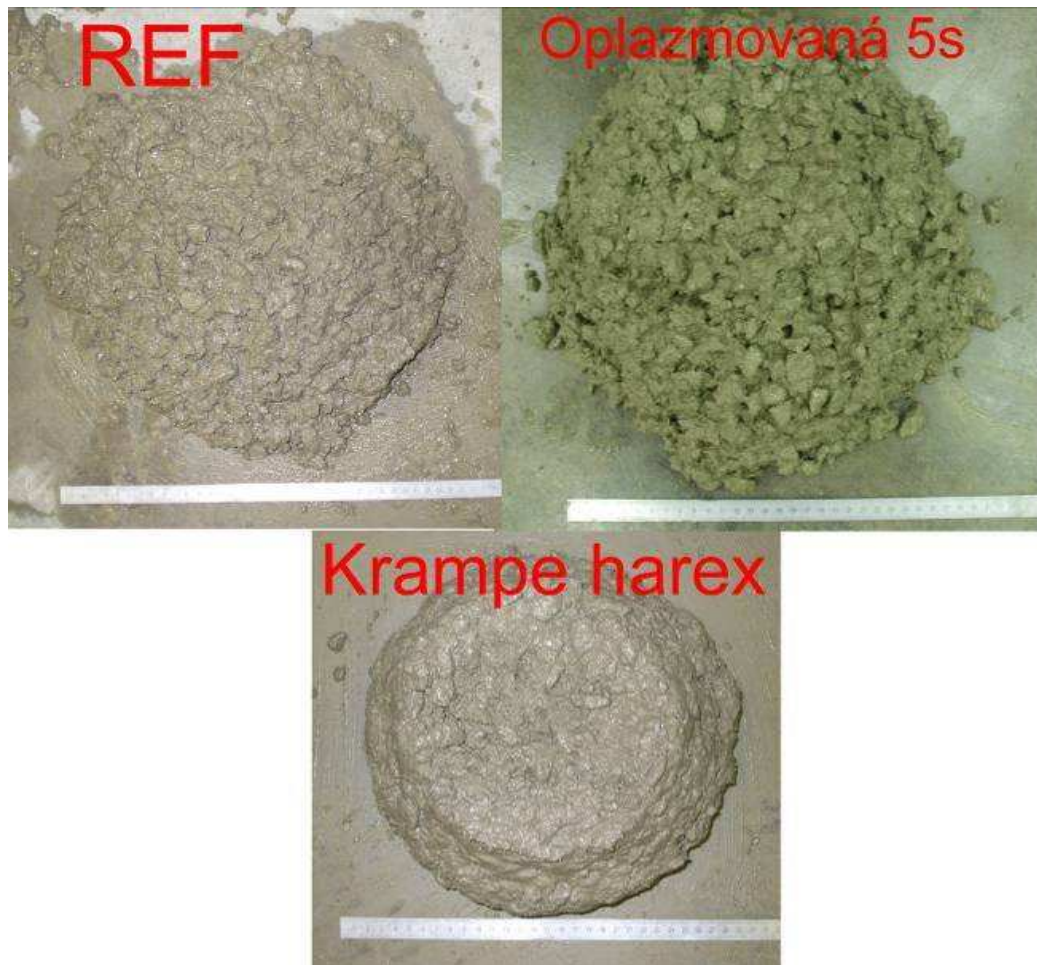
Výsledky zkoušky rozlití jsou shrnuty v tabulce č. 9 a grafu č. 6.

Tab. č. 9. Výsledky zkoušky rozlití

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Rozlití [mm]	355	230	295	265



Graf č. 6. Výsledky zkoušky rozlití



Obr. č. 12. Fotografie rozlití jednotlivých receptur

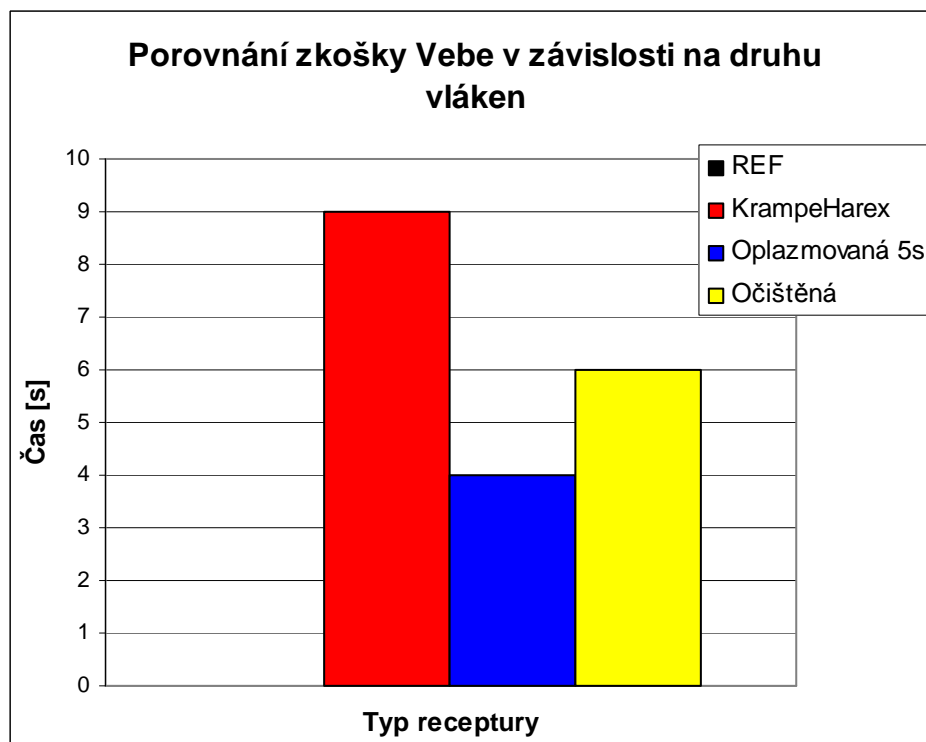
Zkouška rozlitím je pravděpodobně pro zjišťování reologických vlastností betonu s vlákny praktičtější než zkouška sednutím. Zkouška sednutím nám sice naznačí množství vody, které jsou vlákna schopna navázat, ale nezobrazí nám přesnou změnu chování čerstvého betonu. Je totiž pravděpodobné, že vlákna v čerstvém betonu jsou u zkoušky sednutí kužele schopná tento kužel „podržet“, jejich schopnost tento beton podržet ovšem není až tak markantní při mechanickém působení rázů. Schopnost „vazby“ vláken s čerstvým betonem je rozdílná s povrchovou úpravou, tuto schopnost je nám právě zkouška rozlití kužele lépe nastínit. Z výsledků je právě patrné že vlákna bez povrchové úpravy ne jsou na sebe sice schopné navázat větší množství vody než ostatní vlákna, ale při působení rázů je právě vazba těchto vláken menší než například vlákna komerční. Nejmenší změnu reologických vlastností proti referenční receptuře dosahují opět vlákna s plazmovou úpravou.

Zkouška Vebe

Výsledky zkoušky Vebe jsou shrnuty v tabulce č. 10 a grafu č. 7. Výsledek u referenční receptury by díky konzistenci dosahoval hodnoty do 1 s, do výsledků jsem jej ovšem nezařadil.

Tab. č. 10. Výsledky zkoušky Vebe

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Vebe [s]	-	9	4	6



Graf č. 7. Výsledky zkoušky Vebe



Obr. č. 13. Fotografie zkoušky Vebe

Poslední použitou zkouškou pro zjišťování reologických vlastností je zkouška Vebe. U této zkoušky je vlastnost „vazby“ vláken v čerstvém betonu ještě výraznější, protože vibrace v kombinaci se zatížením na kužel je významnější než prosté rázy. U této zkoušky jsem si tedy ověřil a zároveň potvrdil zjištěné výsledky z předchozí metody zjišťování reologických vlastností metodou rozlitím.

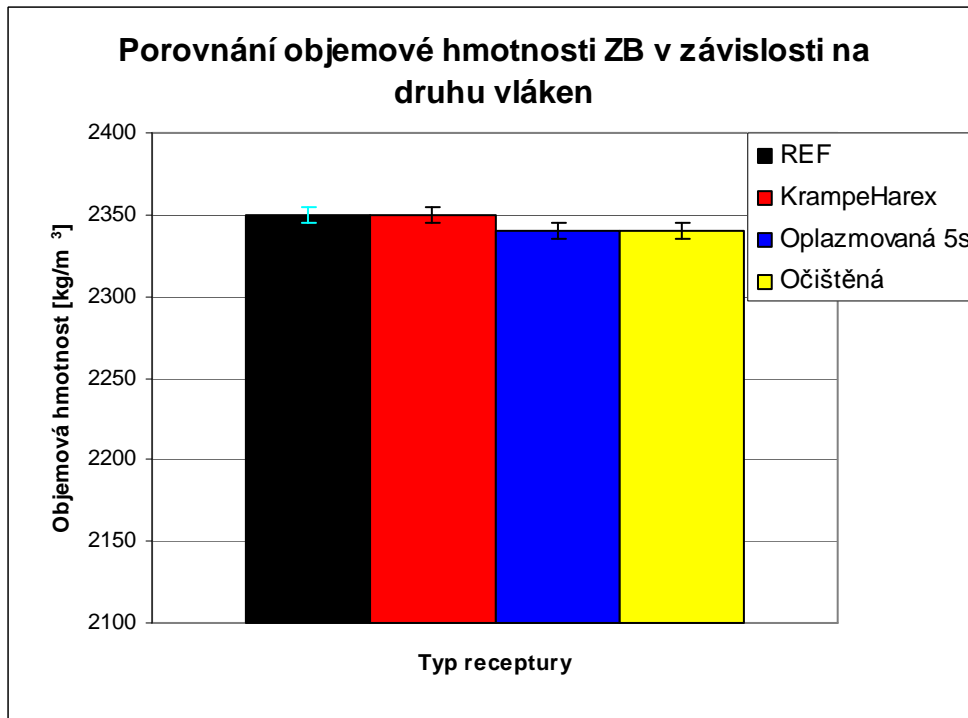
9.4. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Dle ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Určí se jako poměr hmotnosti ztvrdlého betonu k jeho objemu. Výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 11 a grafu č. 8.

Tab. č. 11. Výsledky objemových vlastností ZB

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Objemová hmotnost ZB [kg/m ³]	2350	2350	2340	2340



Graf č. 8. Výsledky objemových vlastností ZB

Rozdíly objemových hmotností zatvrdlého betonu mezi jednotlivými recepturami, přibližně odpovídají rozdílům mezi objemovými hmotnostmi čerstvých betonů. Dá se tedy použít podobný závěr. Nejvyšší objemovou hmotnost dosahuje referenční beton s nejmenším obsahem vzduchu. Rozdíly mezi zatvrdlými objemovými hmotnostmi opět nejsou příliš významné a pohybují se v rozmezí 10 kg/m³.

9.5. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles

Dle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pevnost v tlaku je rovna meznímu napětí při největším zatížení, které těleso snese, vztažené na plochu počátečního průřezu.

Pevnost v tlaku byla zkoušena po 1 dnu, po 7 dnech a po 28 dnech, po 1 a 7 dnech byla zkoušena na úlomcích po zkoušce tahu za ohybu a po 28 dnech byla zkoušena nejen na úlomcích, ale také na krychlích 150x150 mm.



Obr. č. 14. Fotografie zkoušky pevnosti v tlaku na úlomcích



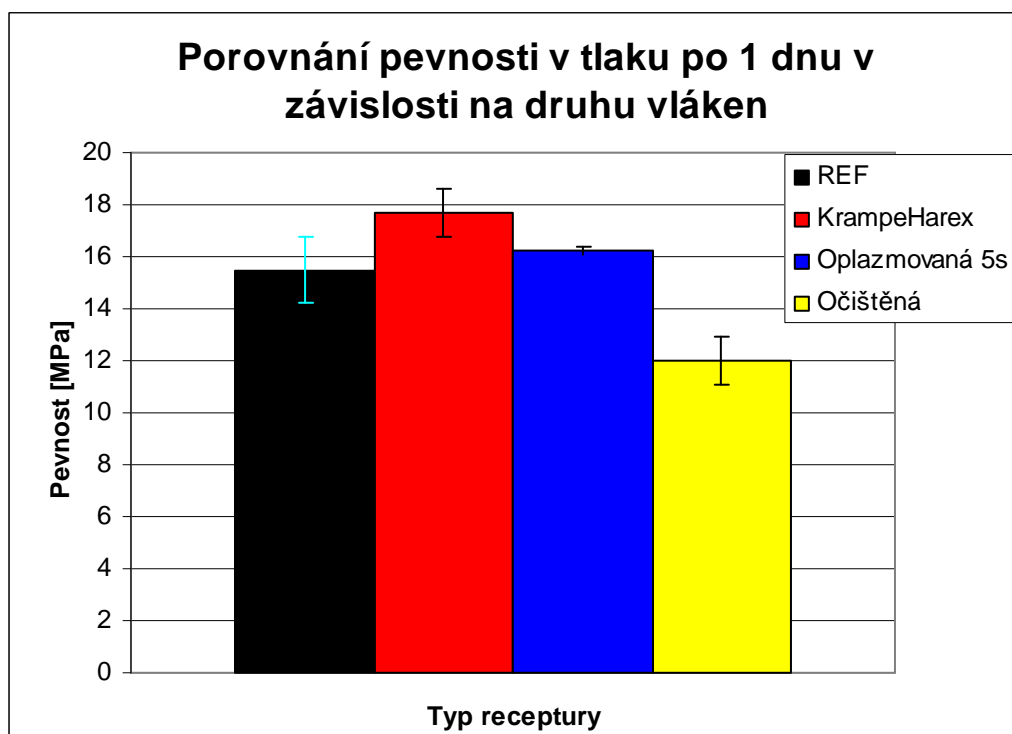
Obr. č. 15. Fotografie zkoušky pevnosti v tlaku na kostkách

Pevnost v tlaku

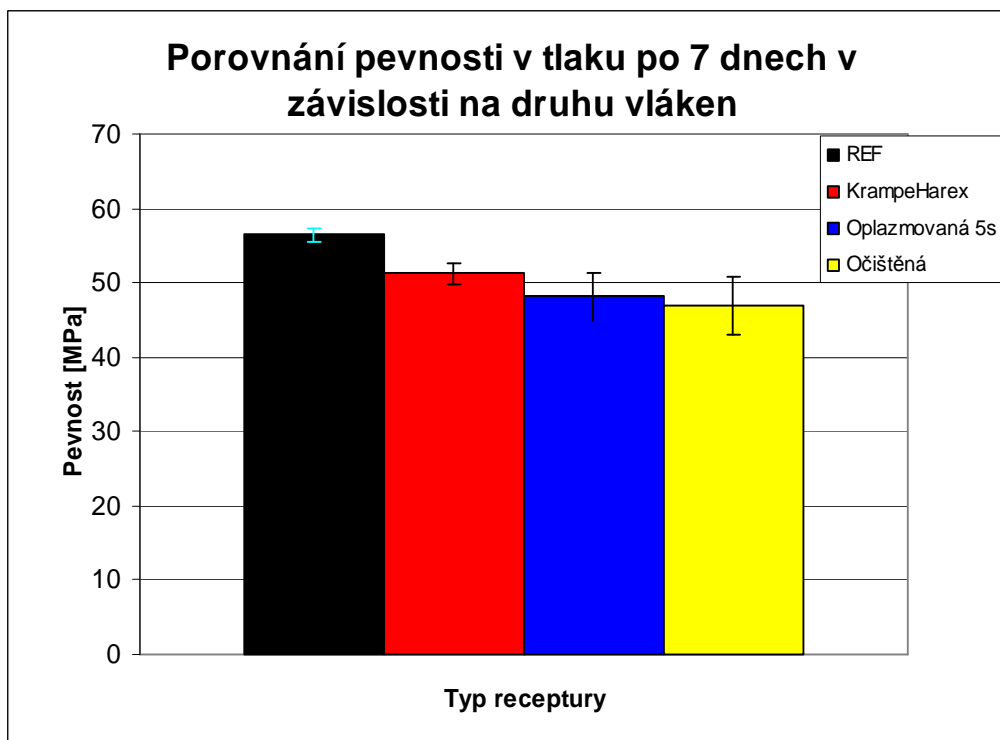
Zkoumáno na úlomcích ze zkoušky tahu za ohybu. Výsledky zkoušky v tlaku jsou shrnuty v tabulce č. 12 a grafech č. 9, 10, 11, 12.

Tab. č. 12. Výsledky pevností v tlaku

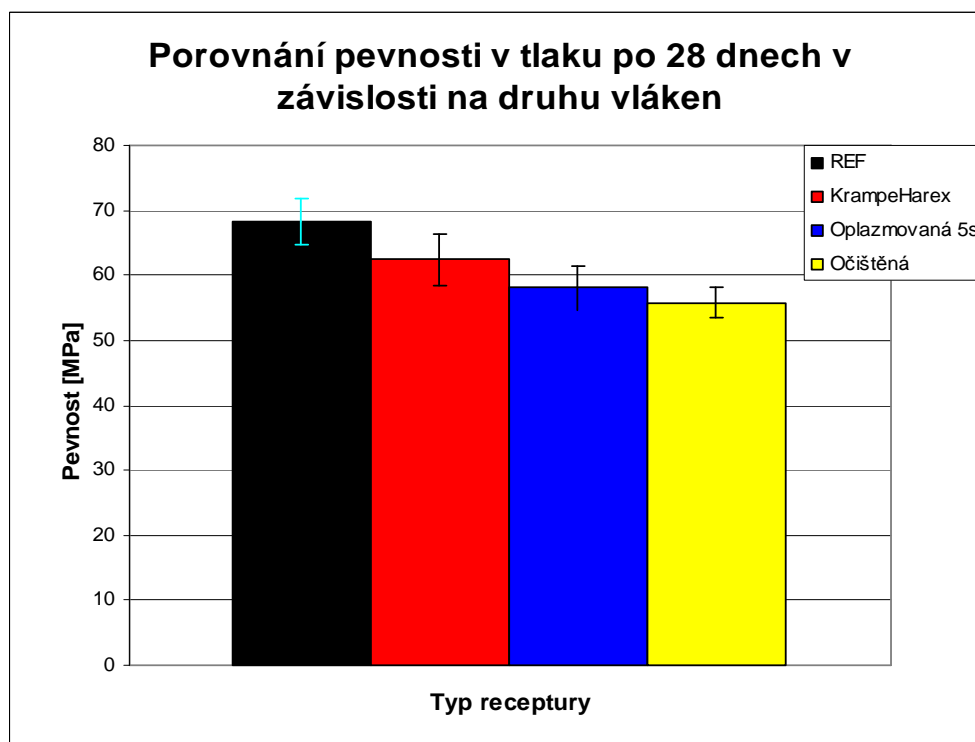
Pevnosti v tlaku [MPa]				
Pevnost v tlaku [MPa]	REF	KrampeHarex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
po 1 dnu	15,5	17,7	16,2	12
po 7 dnech	56,4	51,3	48,1	46,9
po 28 dnech	68,3	62,4	58,1	55,8



Graf č. 9. Výsledky pevností v tlaku po 1 dnu

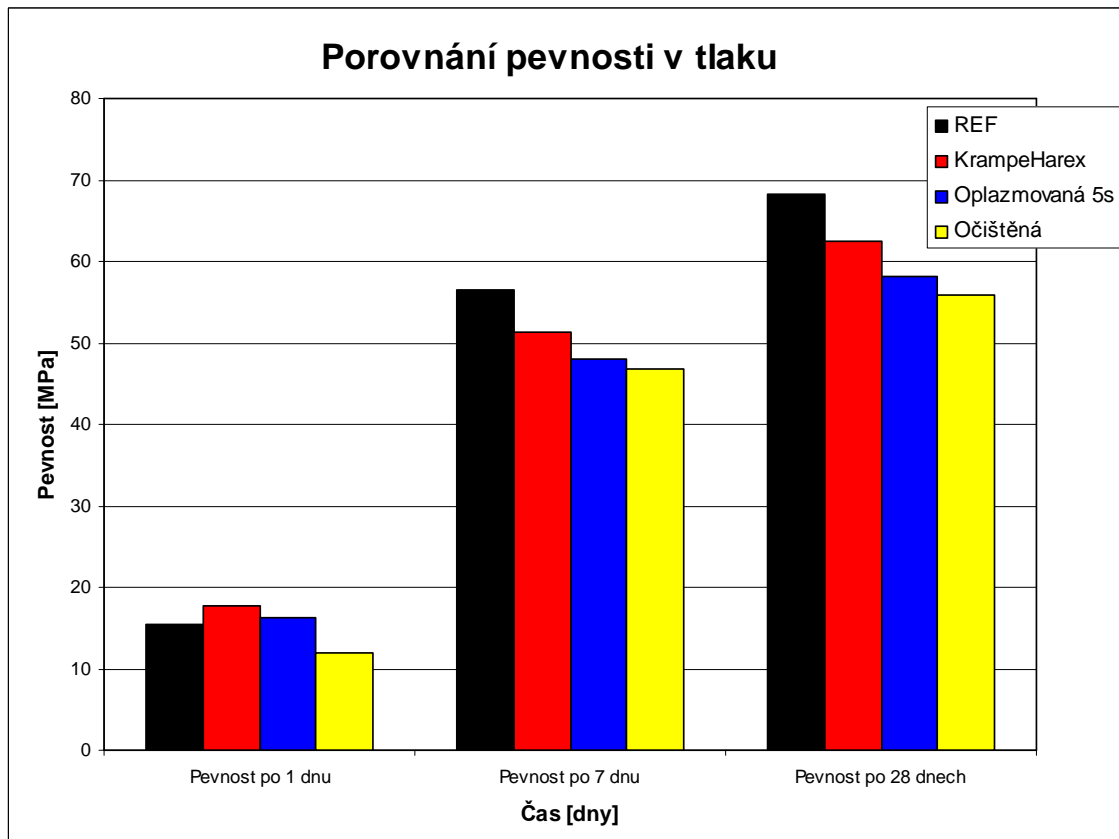


Graf č. 10. Výsledky pevností v tlaku po 7 dnech



Graf č. 11. Výsledky pevností v tlaku po 28 dnech

Celkové srovnání pevnosti v tlaku



Graf č. 12. Srovnání pevností v tlaku

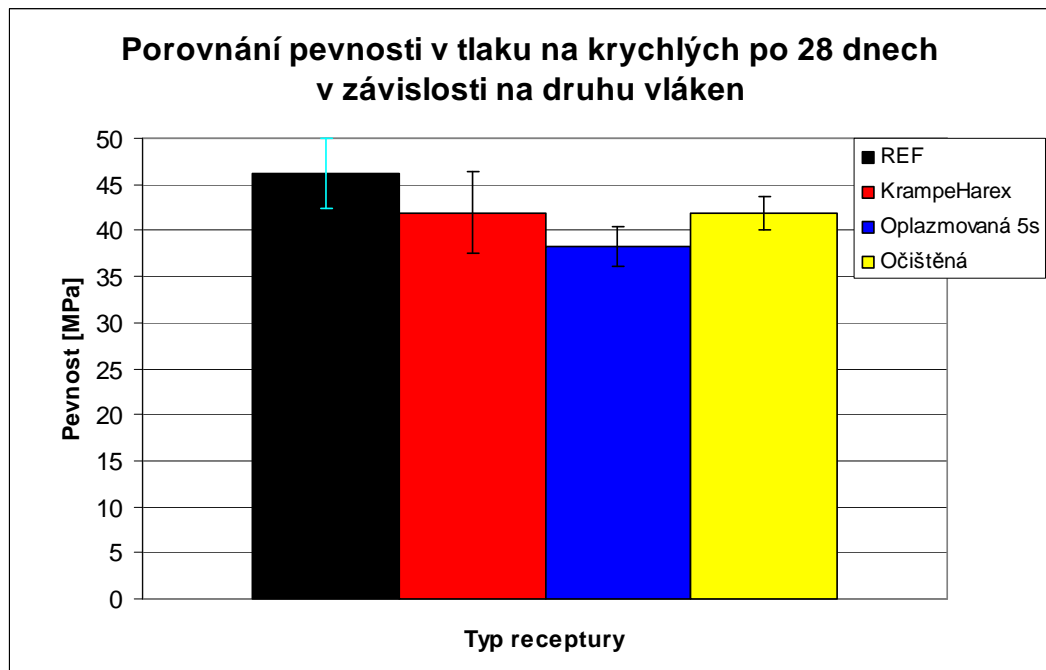
Vyhodnocení jednotlivých receptur na pevnost v tlaku po 1 dnu nepřinesla očekávané výsledky, pevnost betonu v tlaku by měla být nejvíce ovlivněna obsahem vzduchu, protože samotná vlákna nemají na pevnost v tlaku výraznější vliv. Výsledky ovšem tohle očekávání nenaplnily. Pro potvrzení těchto výsledků, kde nám nejlépe vyšla receptura obsahující komerčně se prodávající vlákna, bychom museli provést větší množství zkoušek. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben lidskou chybou a to nekvalitním zhutněním referenční a receptury. Pokud ovšem srovnáme výsledky pevností v tlaku po 7 a 28 dnech tak už nám zde vychází nejlépe referenční receptura, která obsahovala nejmenší množství vzduchu. Z těchto výsledků už by se dalo předpokládat právě zmíněný minimální vliv samotných vláken na pevnost betonu v tlaku.

Pevnost v tlaku po 28 dnech

Zkoumáno na krychlích. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce č. 13 a grafu č. 13.

Tab. č. 13. Výsledky pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Pevnost v tlaku [MPa]	56,4	51,3	48,1	46,9



Graf č. 13. Výsledky pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech

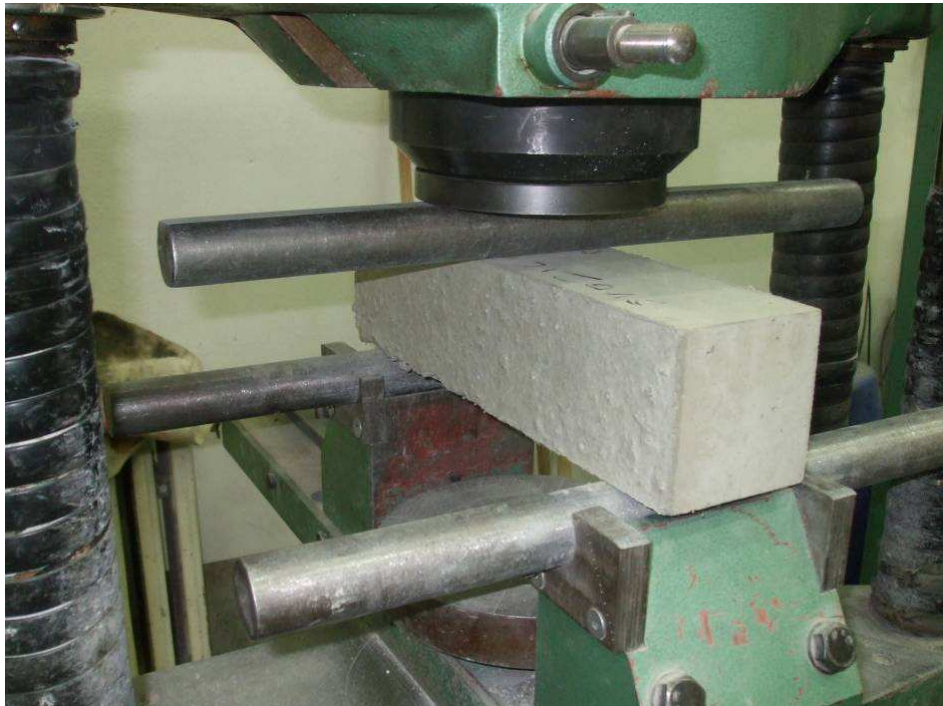
Z výsledků pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech vyšla nejlépe opět receptura referenční, poměrně nízkou hodnotou se opět prezentuje receptura s oplazmovanými vlákny od které by se dali vzhledem k obsahu vzduchu očekávat vyšší hodnoty. Tento jev je pravděpodobně opět způsoben špatným zhutněním.

Celkově z výsledků lze ovšem říct, že vlákna díky tomu že zvedají obsah vzduchu v čerstvém betonu, snižují tak pevnost v tlaku těchto betonů a pokud si spočítáme hodnoty, vyhází nám průměrně již zmíněná hodnota 5% poklesu pevnosti s nárůstem obsahu vzduchu o 1 %.

9.6. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Dle ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena po 1 dnu, po 7 dnech a po 28 dnech.



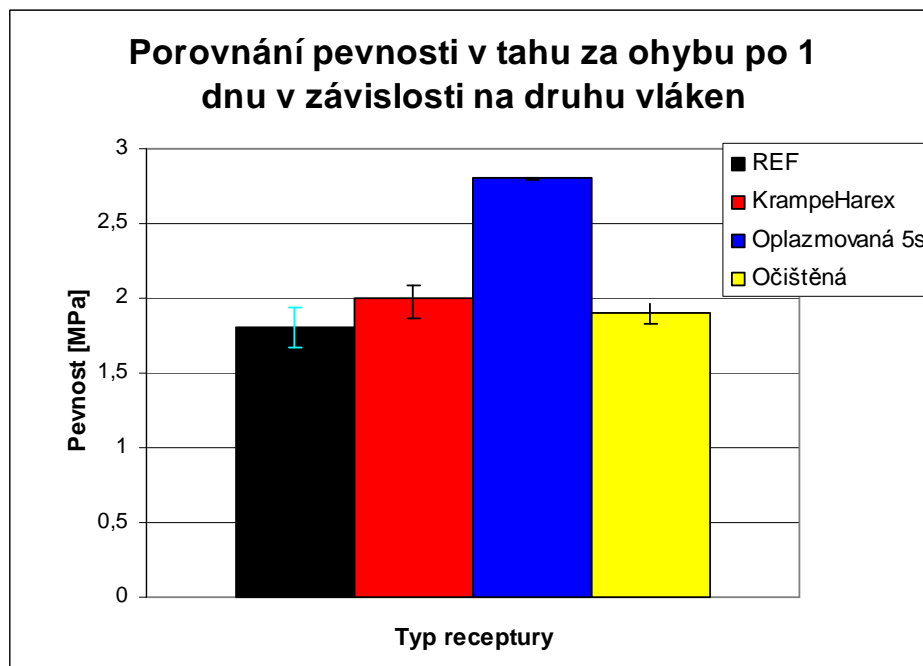
Obr. č. 16. Fotografie zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu

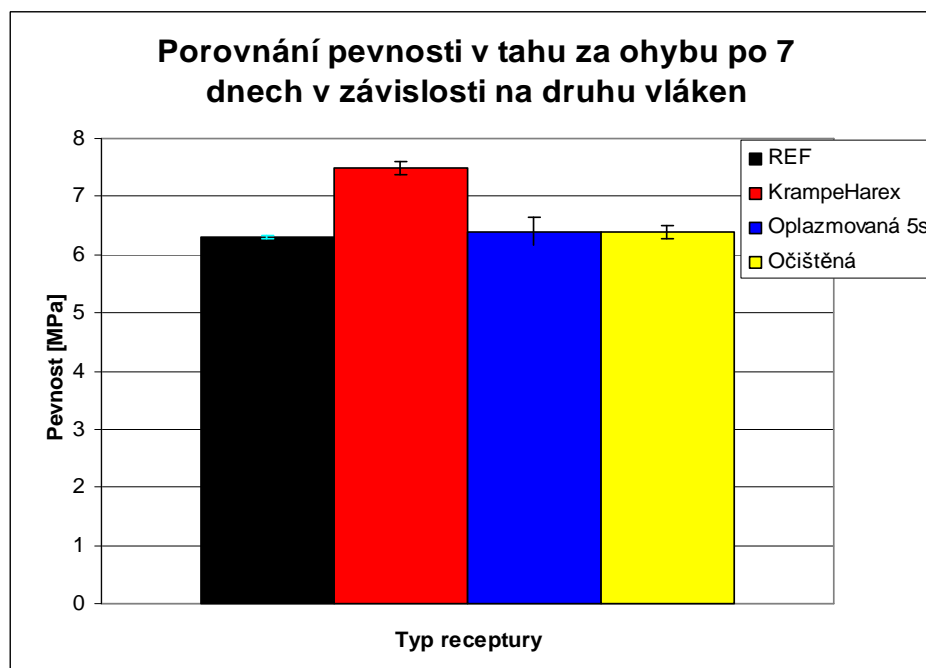
Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce č. 14 a grafech č. 14, 15, 16, 17.

Tab. č. 14. Výsledky pevností v tahu za ohybu

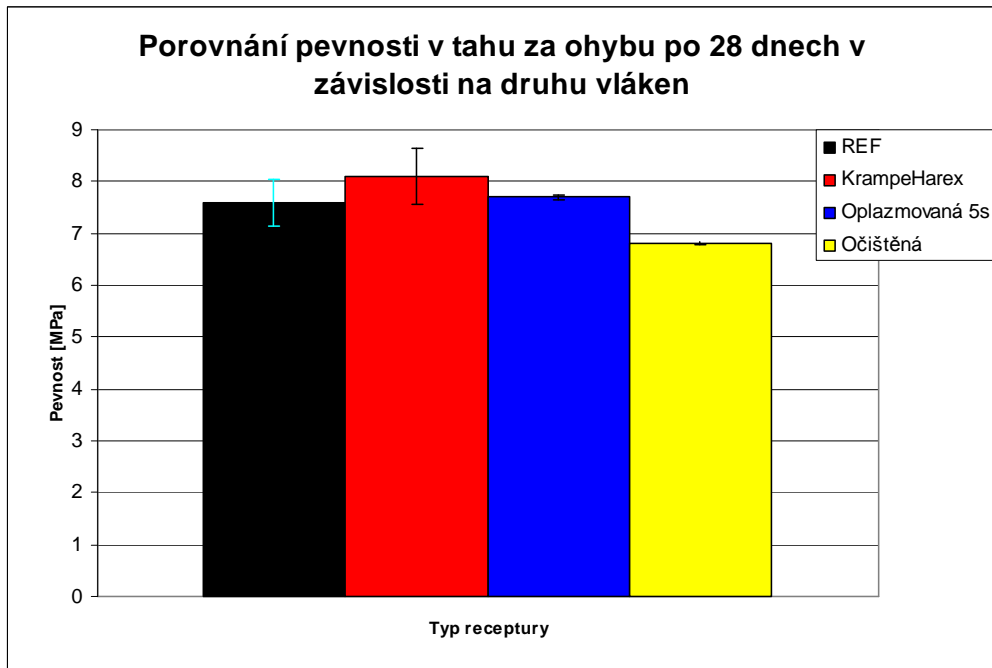
Pevnosti v tahu za ohybu [MPa]				
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	REF	KrampeHarex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
po 1 dnu	1,8	2	2,8	1,9
po 7 dnech	6,3	7,5	6,4	6,4
po 28 dnech	7,6	8,1	7,7	6,8



Graf č. 14. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 1 dnu



Graf č. 15. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 7 dnech

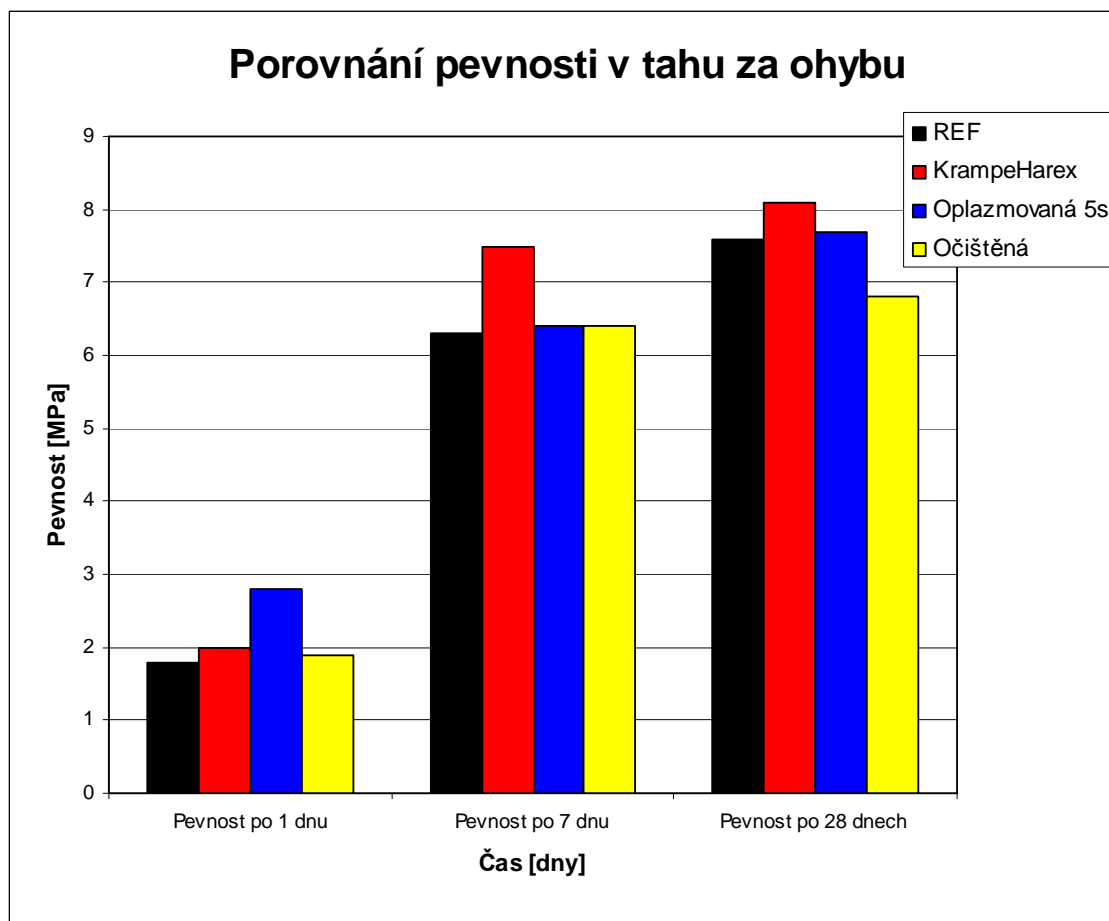


Graf č. 16. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 28 dnech



Obr. č. 17. Detail lomu po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu

Celkové srovnání pevnosti v tahu za ohybu



Graf č. 17. Srovnání pevností v tahu za ohybu

Polypropylenová vlákna sice nemají vlastnost příliš zvedat pevnost v tahu za ohybu, částečně by však v tomto ohledu pomoci mohly.

Z výsledků pevností v tahu za ohybu po 1 dnu je patrné, že receptury obsahující vlákna dosahovaly vyšších pevností okolo 10 %. Výjimkou je receptura s oplazmovanými vlákny která dosahovala nejvyšších hodnot. Jednou z vlastností plazmové úpravy povrchu vláken je, že její účinnost klesá od doby kdy byla povrchová úprava aplikována. Tento fakt se dá potvrdit při pohledu na výsledky po 7 dnech, kde nejvyšších hodnot dosahovala receptura s komerčními vlákny s hodnotou převyšující ostatní asi o 15 %. Receptura s oplazmovanými a neupravenými vlákny dosáhla srovnatelných hodnot jako receptura referenční. Při celkovém srovnání všech měření je znát, že účinnost vláken na pevnost v tahu za ohybu je podstatnější v raných stádiích tvrdnutí betonu kdy beton ještě nedosahuje svých konečných pevností a vlákna jsou

schopna přebírat část tahových sil. Nejlépe se jeví komerční vlákna, která i po 28 dnech zvyšují pevnost v tahu za ohybu o téměř 15 %. Oproti tomu receptura s oplazmovanými vlákny svou schopnost soudržnosti vláken s betonem časem ztratila a receptura s vlákny očištěnými byla celkově srovnatelná s recepturou referenční.

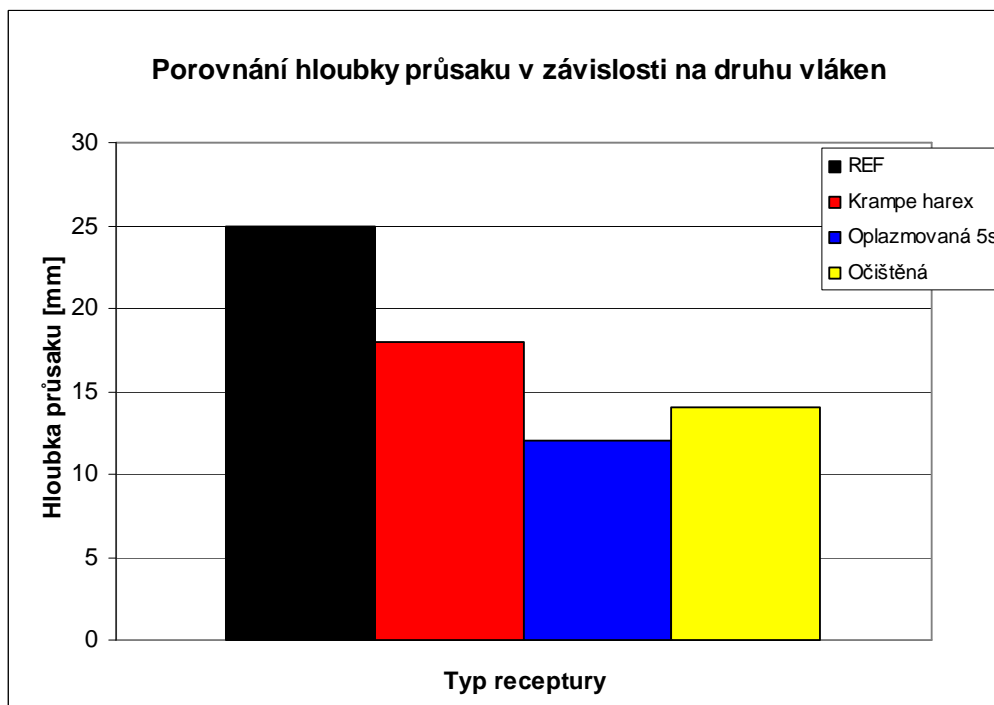
9.7. Stanovení hloubky průsaku

Dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou.

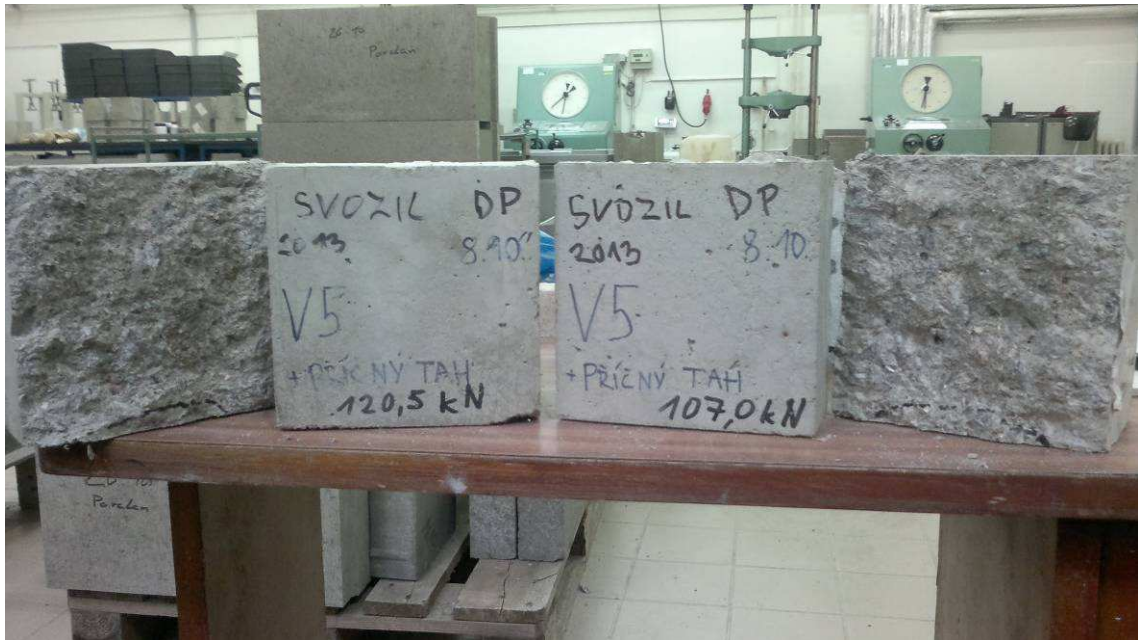
Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce č. 15 a grafu č. 18.

Tab. č. 15. Výsledky hloubky průsaku

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Hloubka průsaku [mm]	25	18	12	14



Graf č. 18. Výsledky hloubky průsaku



Obr. č. 18. Fotografie detailu hloubky průsaku na kostkách

V porovnání výsledků hloubky průsaku u jednotlivých receptur lze vidět pozitivní vliv přidaných vláken u jednotlivých receptur. Je tedy patrné, že vlákna rozmístěná v matrici betonu jsou schopná zabraňovat průsaku vody. Nejhuře v porovnání s referenční recepturou dopadl beton s komerčními vlákny, který snížil hloubku průsaku o 35 % oproti tomu oplazmovaná vlákna dokázala snížit hloubku průsaku o téměř 50 %. Poměrně srovnatelně s oplazmovanými vlákny vyšla i receptura s vlákny očištěnými.

Z daných výsledků by se tedy dalo předpokládat, že vlákna snižují hloubku průsaku, ale vlákna bez aviváže dosahují lepších výsledků.

9.8. Stanovení pevnosti v příčném tahu

Dle ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Pevnost v příčném tahu se zkouší na tělesech ve stáří 28 dnů.



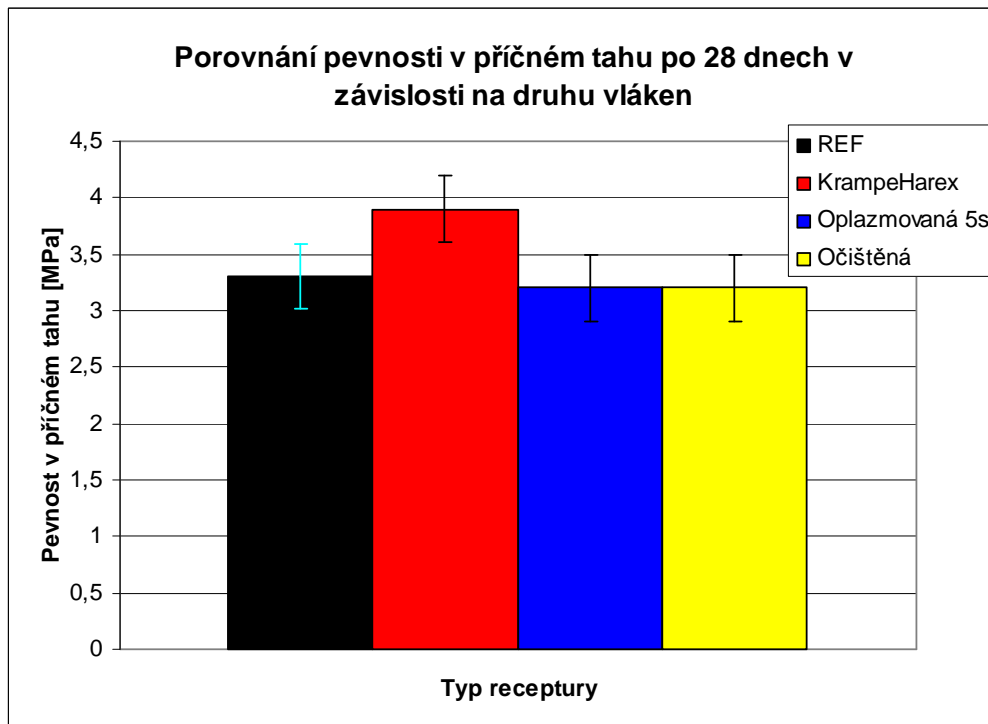
Obr. č. 19. Fotografie zkoušky pevnosti v příčném tahu na kostkách

Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce č. 16 a grafu č. 19.

Tab. č. 16. Výsledky pevnosti v příčném tahu

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,3	3,9	3,2	3,2

Tab. č. . Výsledky pevnosti v příčném tahu



Graf č. 19. Výsledky pevnosti v příčném tahu

Při zkoumání výsledků pevnosti v příčném tahu se dá částečně vycházet i z výsledků pevností v tahu za ohybu po 28 dnech, protože výsledky by měli být obdobné. Je vidět, že i u této zkoušky komerční vlákna jsou schopna zvednout pevnost v příčném tahu a to o necelých 15 %. Receptury s oplazmovanými a neočištěnými vlákny dosahovaly hodnot ještě nižších než receptura referenční. To je pravděpodobně způsobeno soudržností polypropylenových vláken s cementovou matricí protože oplazmovaná vlákna tuto vlastnost časem ztrácejí a vlákna očištění ji ani nemají a oproti referenční receptuře ještě naopak zvedají množství vzduchu.

9.9. Statický modul pružnosti betonu

Statický modul pružnosti betonu se zkouší dle ČSN ISO 6784 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku.

Stanovení statického modulu pružnosti – zkušební těleso s osazenými přístroji pro měření délkových změn se vloží do zkušebního lisu. Vyvodí se základní napětí a zaznamenají se údaje na všech přístrojích.

Napětí se zvyšuje plynule do hodnoty 1/3 pevnosti betonu v tlaku. Napětí se udržuje 60 s a v průběhu následujících 30 s se opět odečtou údaje na všech

přístrojích. Poté se sníží zatížení na základní napětí stejnou rychlostí jako při zatěžování. Tento předběžný cyklus se nejméně dvakrát opakuje se stejnou rychlostí zatěžování a odlehčování. Po dokončení posledního předběžného zatěžovacího cyklu se vyčká 60 s při napětí 0,5 MPa a během následujících 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření ε_b . Zkušební těleso se znovu zatíží předepsanou rychlostí na napětí σ_a a během 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření ε_a .

Průměrná poměrná přetvoření ε_a a ε_b se vypočítají ze všech měřených míst v měřeném zatěžovacím cyklu.

Statický modul pružnosti v tlaku E_c se vypočítá dle vzorce:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Kde: σ_a je horní zatěžovací napětí [MPa] ($\sigma_a = fc/3$)

σ_b je základní napětí (tj. 0,5 MPa)

ε_a je průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

ε_b je průměrné poměrné přetvoření při základním napětí.

[29]

Nebyl prokázán vliv povrchové úpravy vláken na změnu statického modulu pružnosti betonu. Statický modul pružnosti se u receptur pohyboval kolem hodnoty 29 GPa.

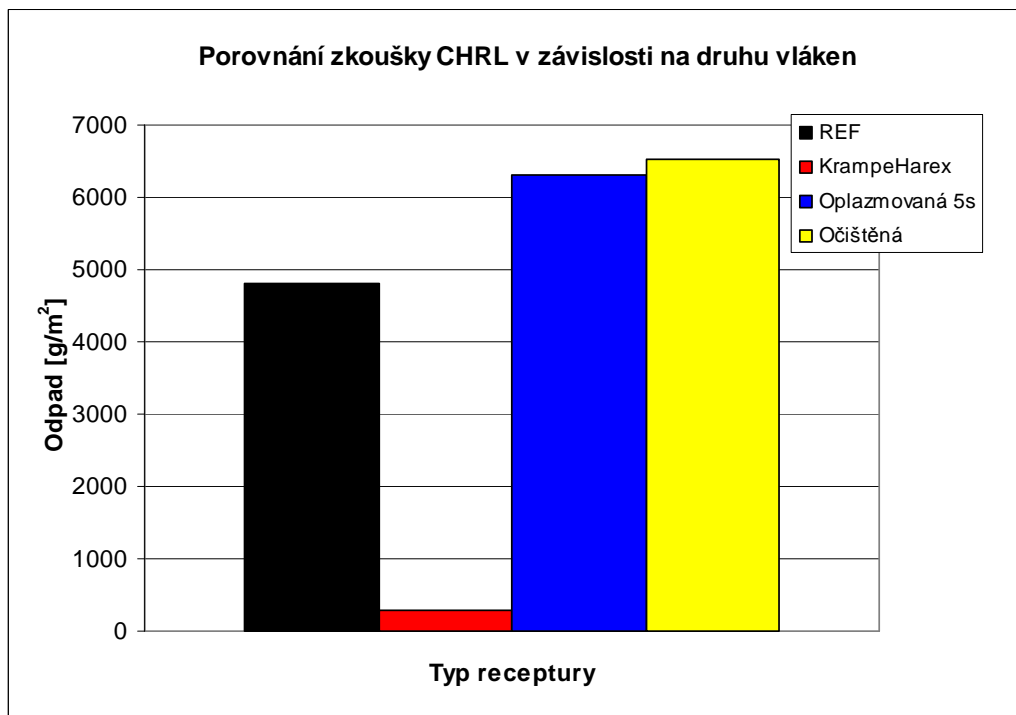
9.10. Stanovení odolnosti proti CHRL

Dle ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemicky rozmrazovacích látek.

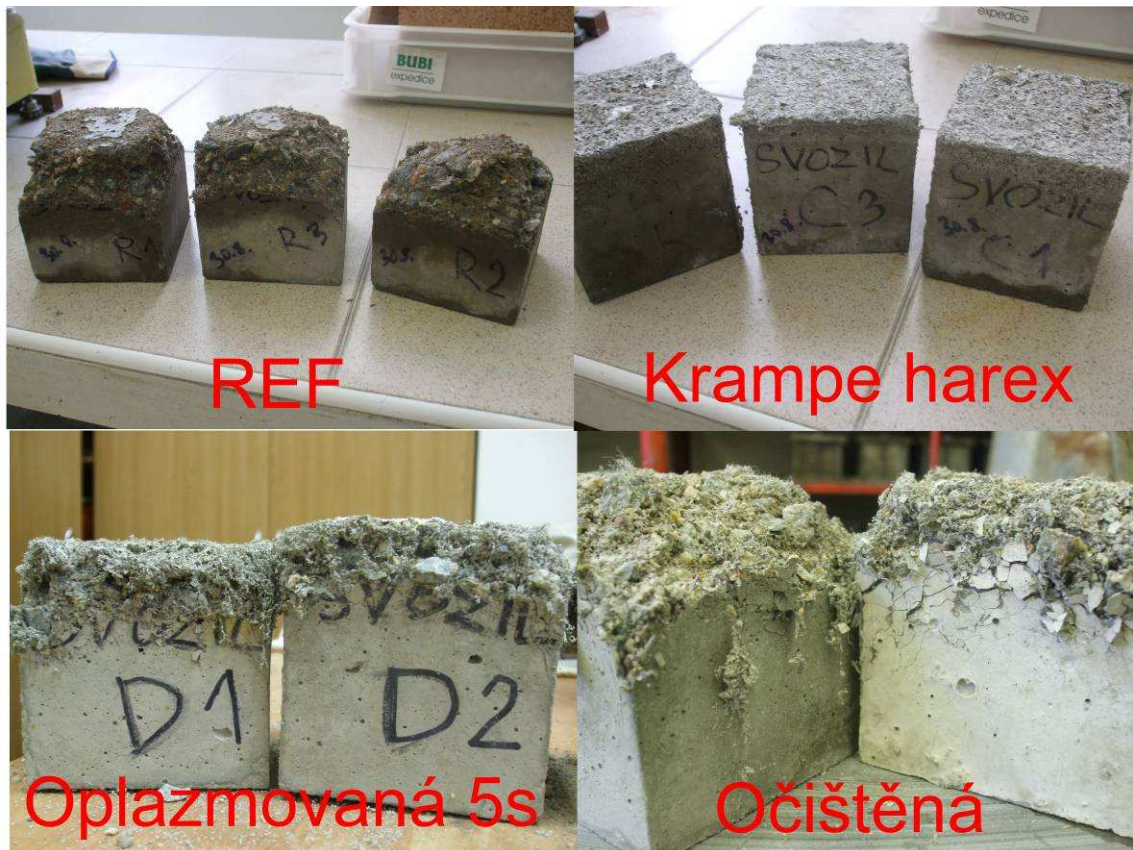
Vzorky byly zkoušeny na odolnost proti 75 cyklům. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce č. 17 a grafu č. 20 a poměrně kvalitně je vystihuje obr. č. 20.

Tab. č. 17. Výsledky odolnosti proti CHRL

	Receptura			
	REF	Krampeharex	Oplazmovaná 5 s	Očištěná
Množství odpadu po 75 cyklech [g/m ²]	4812	283	6314	6531



Graf č. 20. Výsledky odolnosti proti CHRL



Obr. č. 20. Fotografie vzorků po zkoušce odolnosti CHRL

Pokud nahlédneme no normy ČSN 73 1326, na zařídění povrchů zkušebních ploch tak zjistíme, že recepturu s komerčními vlákny bychom zařadily do stupně porušení 2 – slabě narušený s odpadem do 500 g/m^2 . Ostatní receptury patří do stupně porušení 5 – rozpadlý s odpadem přes 3000 g/m^2 .

Výsledky u referenční receptury nejsou překvapením, protože receptura nebyla navržena tak, aby lépe odolávala působením CHRL. Z výsledků je dále patrné, že komerční vlákna zlepšují odolnost CHRL a to poměrně významně. Částečně to určitě způsobuje schopnost vláken omezovat průsak kapalin, dále pak zvýšené množství vzduchu, které by mohlo za určitých podmínek zlepšovat odolnost také. Zvýšené množství vzduchu je ovšem i u receptury s neupravenými vlákny a přesto hodnoty odolnosti přesahují i hodnoty u referenční receptury. U receptur s oplazmovanými vlákny a s neupravenými vlákny se špatná hodnota odolnosti CHRL dá vysvětlit tak, že tyto vlákna buď nemají (neupravené), nebo ztrácejí (oplazmované), schopnost vazby s cementovou maticí. Tento efekt by se výrazně nemusel projevit například při

stanovení hloubky průsaku, ale u odolnosti CHRL kde i mikroskopické trhlinky mezi vlákny a matricí by při neustálém cyklování a změnám teplot mohou znamenat destrukci povrchu betonu.

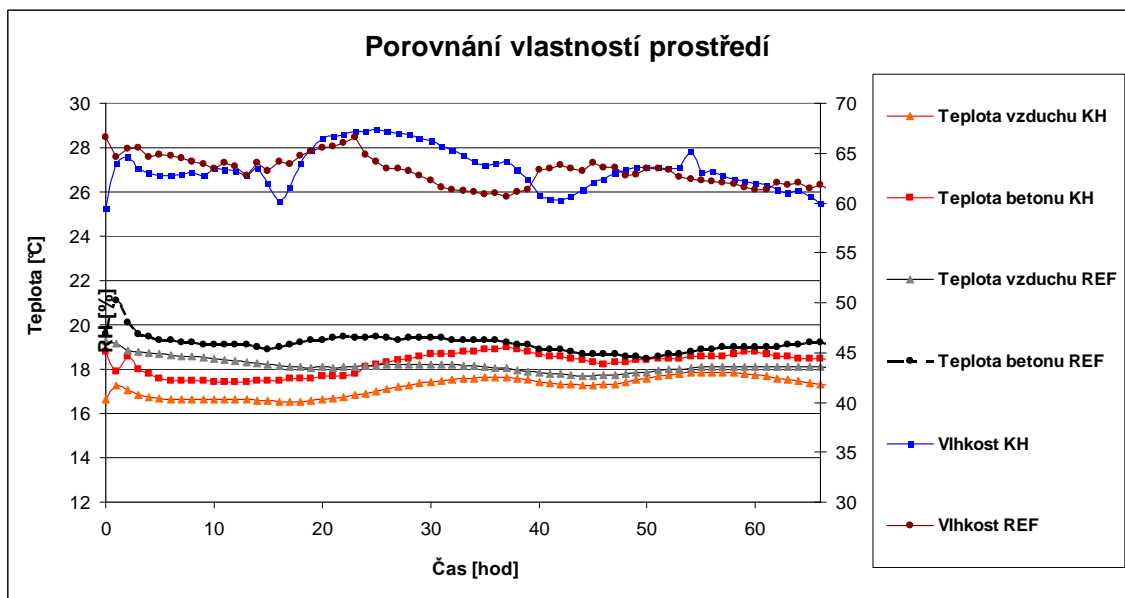
9.11. Zkoumání samoošetřovací funkce vláken

Prokázat tento efekt vláken není úplně jednoduchá záležitost. Jednou z možností jak tento jev zkoumat je zjišťováním intenzity výparu z povrchu betonu z důvodu, že voda adsorbovaná na povrchu vláken opouští beton o něco později než normálně vázaná voda.

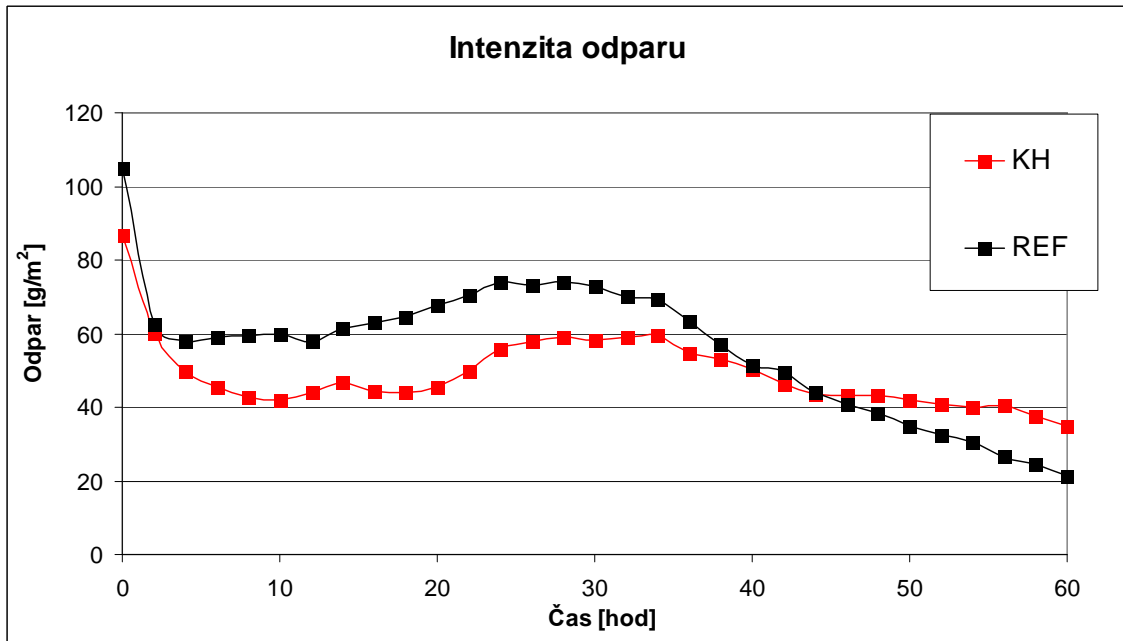
Předpokladem pro potvrzení jevu je zkoumání co nejvíce faktorů, které ho ovlivňují a zahrnout tyto výsledky do měření.

Pro potvrzení nebo vyvrácení samoošetřovacího efektu jsem zvolil pouze recepturu REF a A z tabulky č. 4. Výsledky zkoumání jsou shrnuty v grafech č. 21, 22.

Receptura s přidáním vláken je označována KH (obsaženy vlákna KrampeHarex).



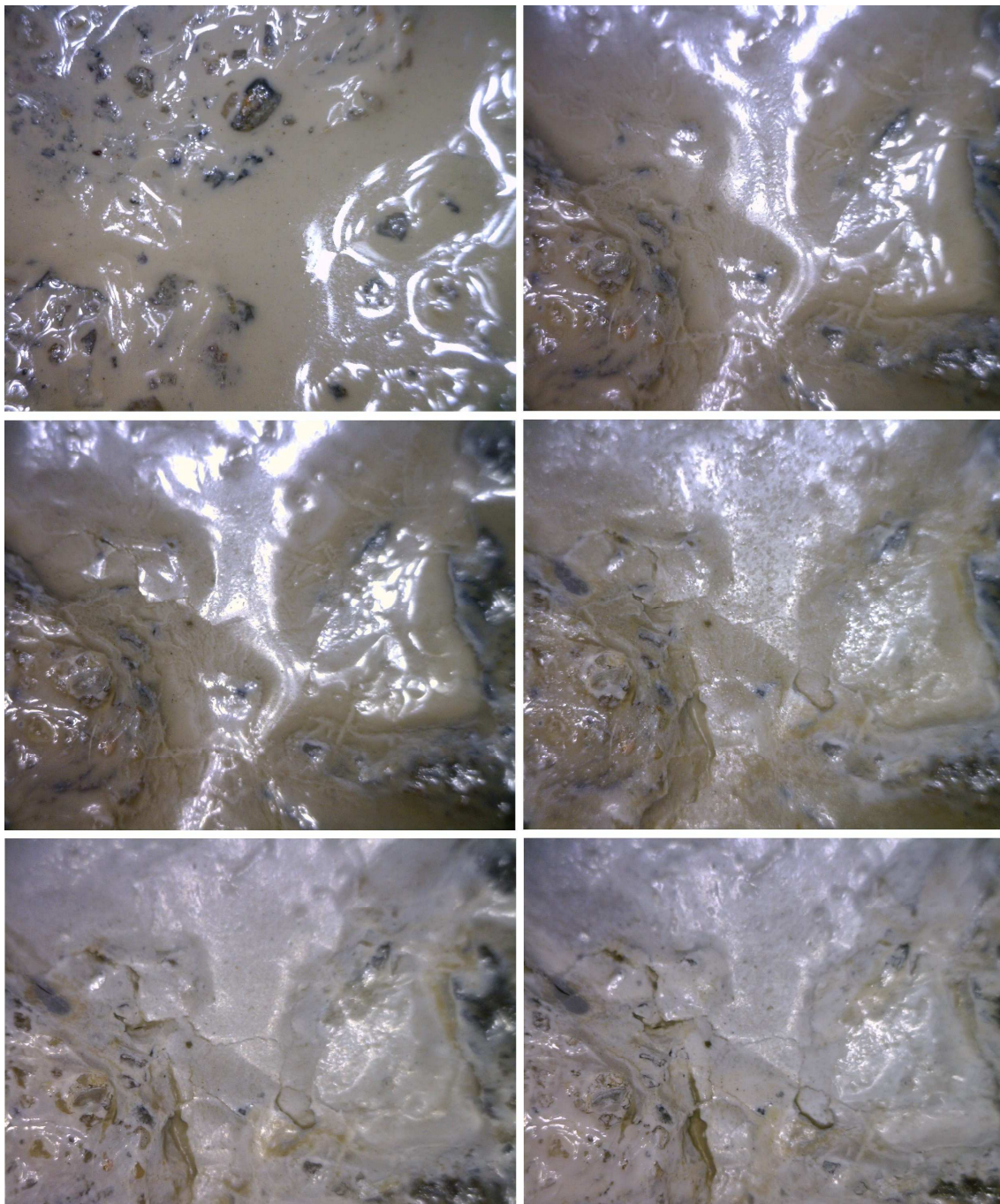
Graf č. 21. Graf popisuje prostředí okolo vzorků



Graf č. 22. Graf intenzit odparů

Při prozkoumávání výsledků ze sledování vlastnosti prostředí je patrné, že vlastnosti prostředí při zkoumání obou intenzit odparu byly hodně podobné. Když tedy víme, že receptury byly připravovány stejnou metodou a jsou stejné kromě vláken obsažené v jedné z nich, můžeme se pokusit vyvodit z intenzity odparu patřičný závěr.

Z grafu intenzity odparu je tedy vidět, že receptura bez vláken dosahuje v počátcích vyšších intenzit odparu než receptura obsahující vlákna. Po zhruba 45 hodinách tvrdnutí se grafy intenzit změnily. Zatímco graf intenzity referenční receptury klesal, tak naopak graf intenzity receptury s vlákny si držel svou intenzitu odparu. Z tohoto grafu by se tak dalo vyčíst, že receptura obsahující vlákna si drží svou intenzitu odparu díky tomu, že voda adsorbovaná na vláknech neodchází k povrchu tak rychle jako u receptury referenční a naopak odchází později, což by mohlo mít chtěný efekt samoošetřování a chránit tak beton před nechtěným vznikem trhlin v počátcích tvrdnutí betonu.



Obr. č. 21. Fotografie povrchu vzorku s vlákny KrampeHarex po zamíchání a po 2, 6, 14, 24 a 34 hodinách.

9.12. Stanovení objemových změn zatvrdlého betonu

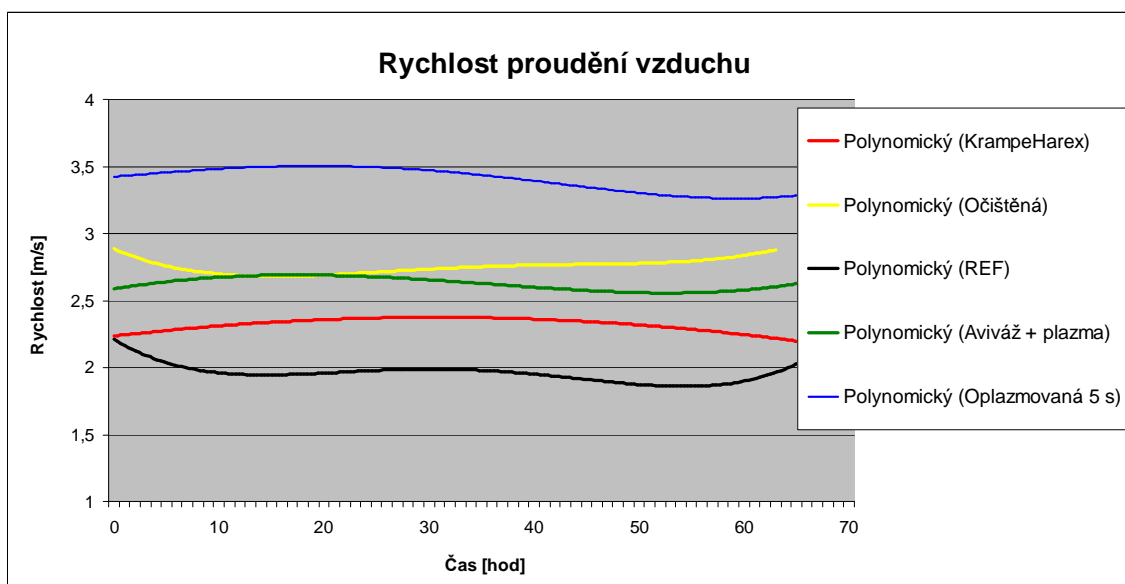
Pro stanovení objemových se nejčastěji používá metoda dle ČSN 73 1320 Stanovení objemových změn betonu. Stanoví se jako poměrná podélná přetvoření hranolů, uložených v předepsaných podmínkách po stanovenou dobu. Nevýhodou této metody je ovšem to, že se objemové změny zkoumají už na zatvrdlých vzorcích a nemáme proto přehled o objemových změnách v době tvrdnutí. Tuto nevýhodu eliminuje bezkontaktní subpixelová metoda - Principy snímání dilatačních posunů.

Současně s měřením objemových změn zaznamenáváme i podmínky důležité pro smršťování v okolí zkoušeného vzorku. A proto v konečném důsledku můžeme přihlídnout k těmto výsledkům a porovnat s dosaženými objemovými změnami.

Rychlost proudění vzduchu

Z vzorce od P. J. Uno víme, že rychlost proudění vzduchu je pro výpočet odparu důležitá, pokud si však do vzorce začneme dosazovat, nebo odečítat z přiloženého diagramu, zjistíme, že je to jeden ze stěžejních faktorů.

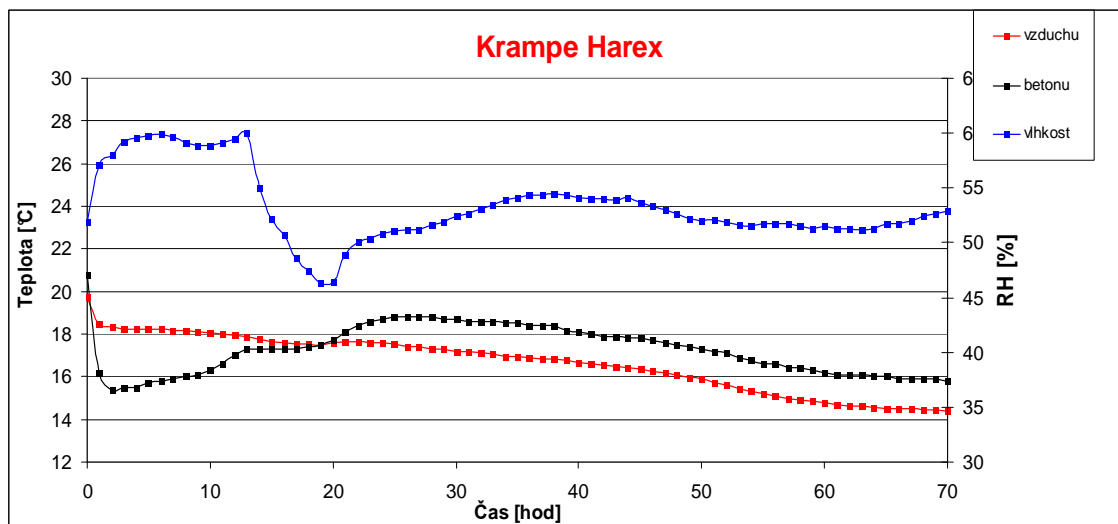
Výsledky rychlosti proudění vzduchu jsou shrnuty v grafu č. 23.



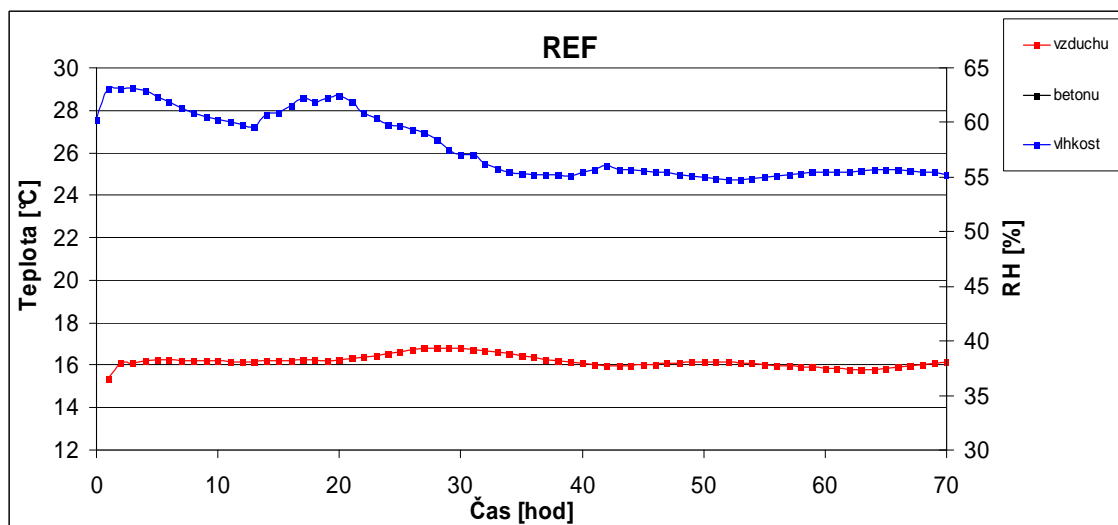
Graf č. 23. Rychlost proudění vzduchu u vzorků u objemových změn

Teplota betonu, teplota vzduchu a relativní vlhkost v místnosti

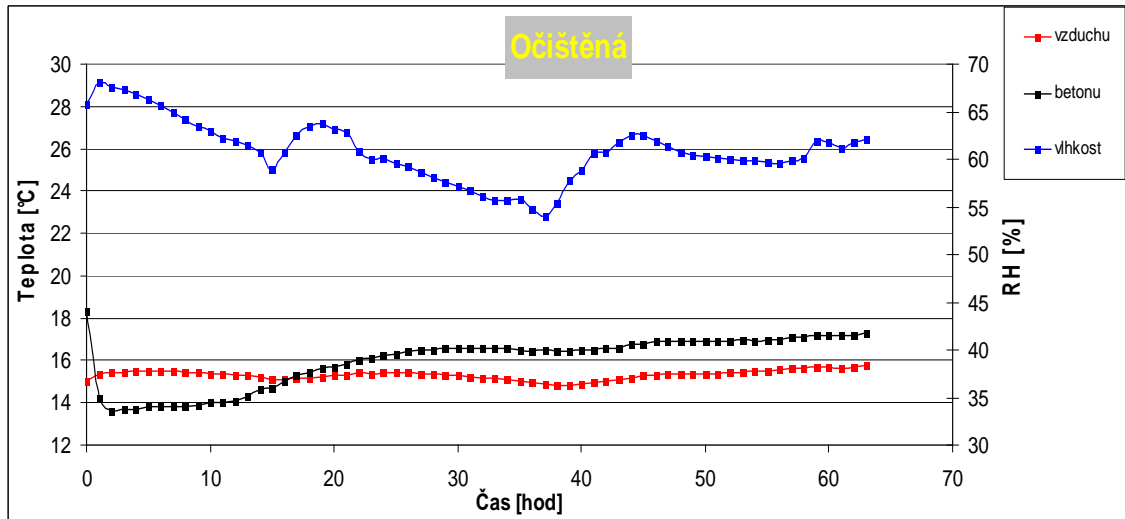
Výsledky dosažené v jednotlivých měřeních podle typů povrchové úpravy vláken jsou popsány v grafech č. 24, 25, 26, 27, 28.



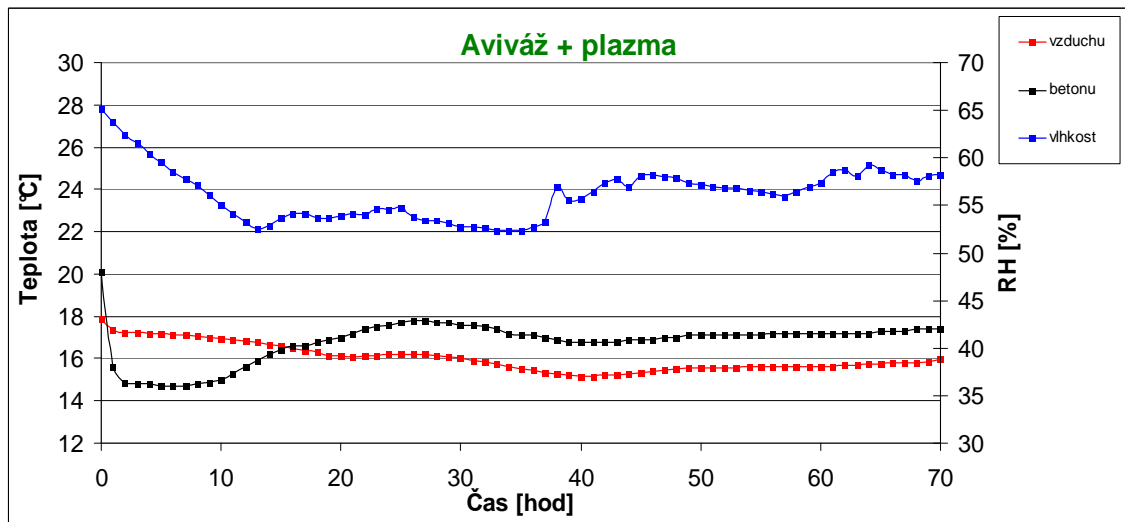
Graf č. 24. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s vlákny KrampeHarex



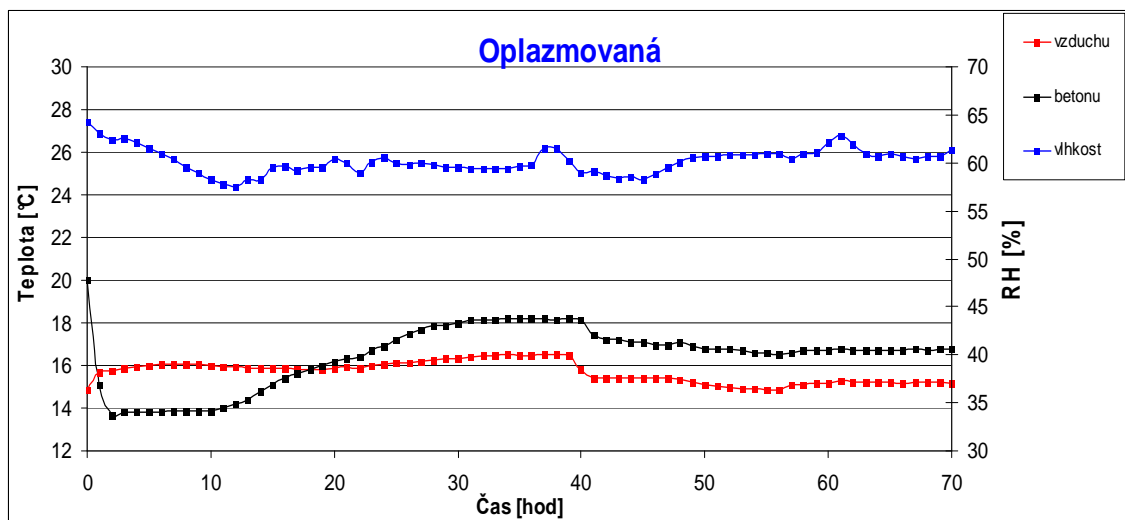
Graf č. 25. Graf popisuje prostředí okolo vzorku bez vláken



Graf č. 26. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s očištěnými vlákny



Graf č. 27. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s vlákny s aviváží + plazma

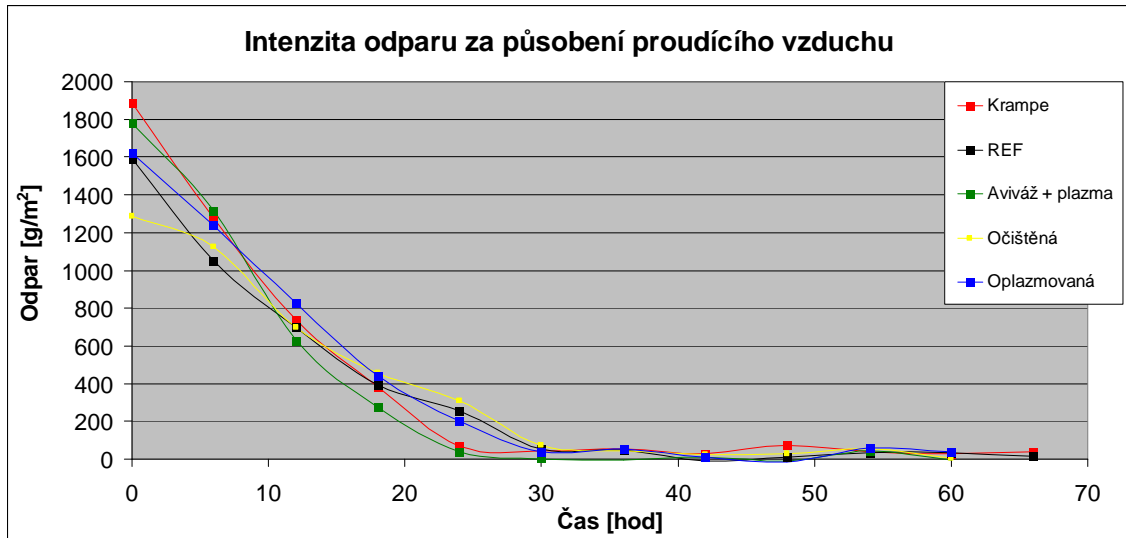


Graf č. 28. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s oplazmovanými vlákny

Odpar

Výpočet odparu je nejen důležitý ke zkoumání velikosti smrštnění, ale i ke zjišťování možného vzniku trhlin.

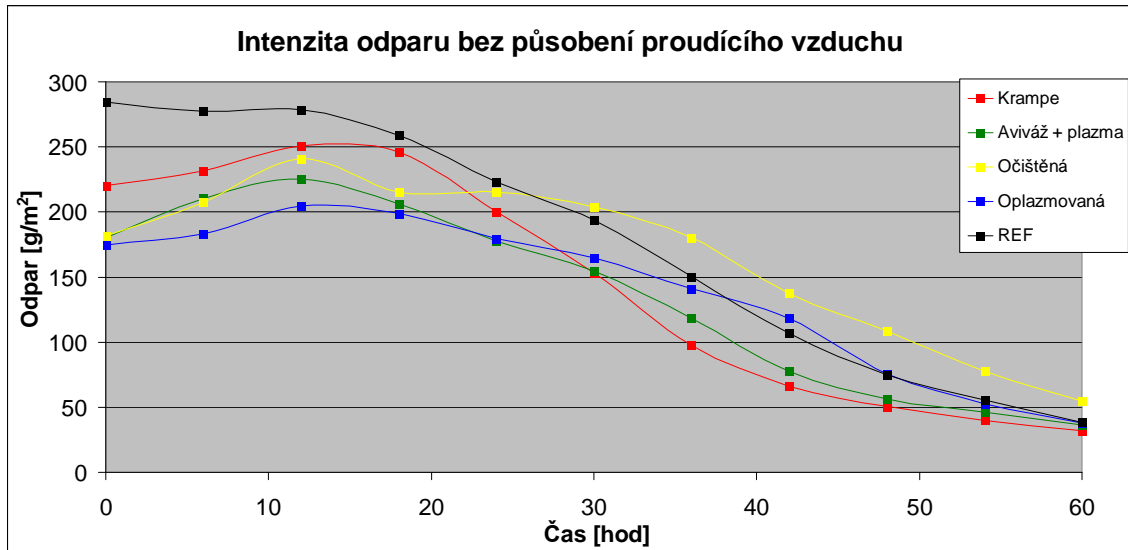
Zjištěná intenzita odparu je popsána v grafu č. 29.



Graf č. 29. Odpar za působení proudícího vzduchu

Díky vlastnosti vláken navázat na sebe kapičky vody při míchání, které by měli mít samo-ošetřující efekt, je důležité sledovat intenzitu odparu i ve vzorcích na které nepůsobil proudící vzduch. Na vzorcích kde proudící vzduch působil, je intenzita v prvních hodinách tak velká, že pro lepší zobrazení vlivu povrchové úpravy vláken na intenzitu odparu je vhodnější graf intenzit bez působení proudícího vzduchu při stejných teplotních a vlhkostních podmínkách.

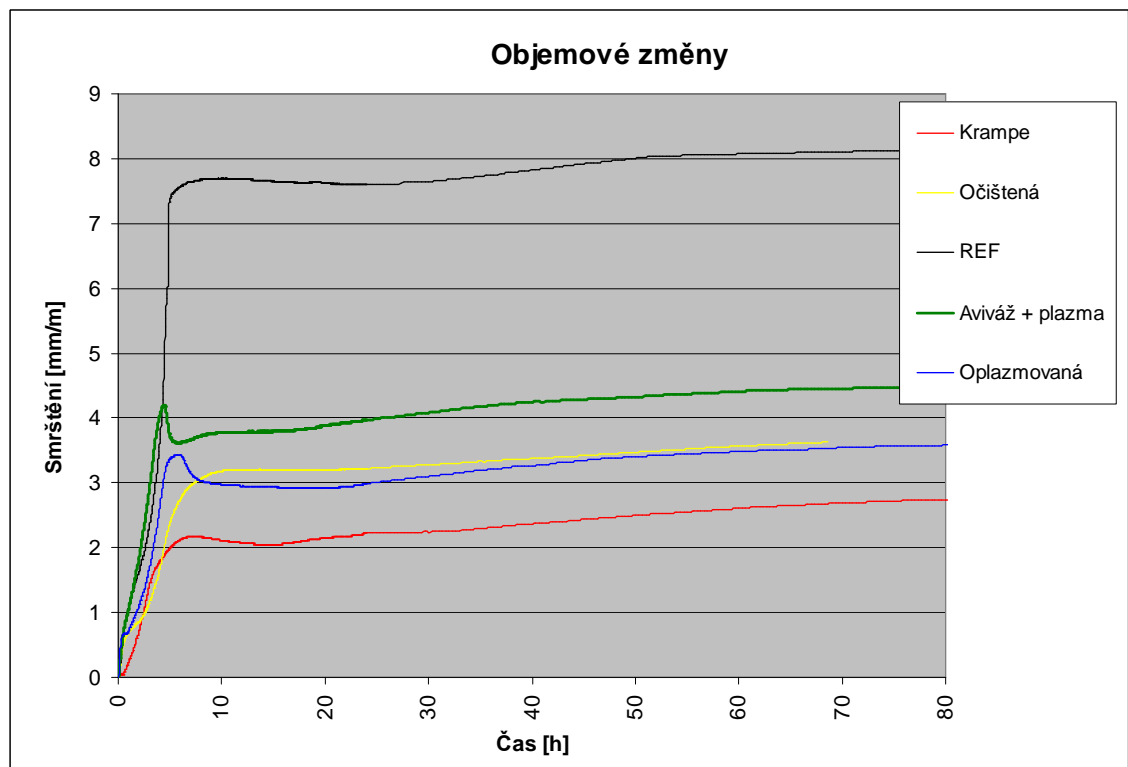
Intenzita odparu bez působení proudícího vzduchu je popsána v grafu č. 30.



Graf č. 30. Odpar bez působení proudícího vzduchu

Objemové změny

Objemové změny jsou popsány v grafu č. 31.



Graf č. 31. Horizontální smrštění

Při vyhodnocování objemových změn sledujeme velké množství faktorů, které ovlivňují smrštění daných receptur, a proto vyhodnocení není jednoduché.

V první řadě bych rád zhodnotil výsledky z intenzit odparů jednotlivých receptur. V grafu intenzit bez působení proudícího vzduchu je vidět výsledek, který byl podrobněji zkoumán v kapitole 9.11. a dalo by se říct, že tento graf potvrzuje zkoumání z této kapitoly.

Dále pokud se zaměřím pouze na graf objemových změn, je na první pohled patrný vliv vláken na smrštění betonu bez ohledu na povrchovou úpravu vláken. Protože i receptura, která vykazovala z receptur obsahující vlákna nejhorší výsledky, byla schopná snížit smrštění proti referenční receptuře o téměř 50 %. A receptura obsahující komerční vlákna od KrampeHarexCZ snížila smrštění o téměř 75 %.

Pro porovnání jednotlivých povrchových úprav vláken se více zaměřím na porovnání vlastností prostředí okolo vzorků. Když se vrátím k vlastnostem prostředí okolo vzorků zkoumaných v předchozím odstavci v porovnání vlhkosti prostředí a teplot jsou tyto vlastnosti u vzorků srovnatelné. V porovnání proudícího vzduchu ovšem zjistíme, že rychlost vzduchu, který působil na vzorek s referenční recepturou dosahuje nejnižších hodnot, a proto by se dalo očekávat, že kdyby rychlost působení byla ještě o něco vyšší, nebo více srovnatelná s ostatními recepturami, mohl by být rozdíl ve smrštění vzorků ještě větší. Naopak rychlost proudícího vzduchu byla největší u receptury, která obsahovala oplazmovaná vlákna. Dalo by se tedy předpokládat, že hodnota smrštění by mohla být v porovnání s ostatními recepturami zvýšená. Jako nejméně vhodná se jeví úprava povrchu oplazmováním na neočištěnou aviváž, která v porovnání s komerčními vlákny dosahovala až dvojnásobného většího smrštění.

V konečném porovnání je tedy v betonech žádoucí obsah vláken s ohledem na objemové změny betonů. Jako nejvhodnější povrchová úprava se jeví úprava komerčních vláken aviváží a plazmová úprava. Tyto dvě povrchové úpravy jsou schopny snížit smrštění o 60 % a více.

10. Závěr

Při srovnání objemových hmotností ČB receptur obsahující různou povrchovou úpravu vláken ovlivní tuto hodnotu oproti referenční receptuře pouze zvýšený obsah vzduchu. Celkově se ovšem dá říci, že rozdílná povrchová úprava vláken by neměla ovlivnit objemovou hmotnost ČB o více než 50 kg/m^3 .

Polypropylenová vlákna mají nepříjemnou vlastnost na sebe navazovat bublinky vzduchu, což má nepříznivý vliv na pevnosti betonů. Referenční receptura dosahovala nejmenšího obsahu vzduchu v ČB, oproti tomu vlákna bez povrchové úpravy si vedli nejhůře. Komerčně prodávaná vlákna dosáhla podobného výsledku jako vlákna neupravená. Dobrý obsah vzduchu vykazala vlákna s plazmovou úpravou, která téměř 2x zlepšili obsah vzduchu oproti komerčním vláknům. Závěrem by se tedy dalo říct, že plazmová úprava vláken je vzhledem k hledisku obsahu vzduchu v ČB žádoucí.

Při zjišťování reologických vlastností zkouškou sednutí kužele dosahuje největší sednutí referenční receptura. V porovnání receptur s vlákny nejhůře dopadla ta s neupraveným povrchem. Plazmová úprava je schopná navázat menší množství vody než komerčně prodávaná vlákna. Zkouška rozlitím je pravděpodobně pro zjišťování reologických vlastností betonu s vlákny praktičtější než zkouška sednutím. Vlákna bez povrchové úpravy jsou na sebe sice schopné navázat větší množství vody než ostatní vlákna, ale při působení rázů je právě vazba těchto vláken v betonu menší než například vlákna komerční. Nejmenší změnu reologických vlastností proti referenční receptuře dosahují opět vlákna s plazmovou úpravou. Poslední použitou zkouškou pro zjišťování reologických vlastností je zkouška Vebe. U této zkoušky je vlastnost „vazby“ vláken v čerstvém betonu ještě výraznější, než u zkoušky rozlitím, protože vibrace v kombinaci se zatížením na kužel je významnější než prosté rázy. U této zkoušky jsem si tedy ověřil a zároveň potvrdil zjištěné výsledky z předchozí metody zkoušení čerstvého betonu metodou rozlitím. Dá se tedy říct, že plazmová úprava vláken s ohledem na reologické vlastnosti dosahuje lepších výsledků než ostatní povrchové úpravy.

Rozdíly objemových hmotností zatvrdlého betonu mezi jednotlivými recepturami, přibližně odpovídají rozdílům mezi objemovými hmotnostmi

čerstvých betonů. Rozdíly mezi zatvrdělými objemovými hmotnostmi opět nejsou příliš významné a pohybují se v rozmezí 10 kg/m^3 .

Pevnosti v tlaku po 1 dnu ukázala, že komerčně prodávaná vlákna by i přes zvýšení obsahu vzduchu by mohl zvednout pevnost. S ohledem na další výsledky není tento jev tak významný, a proto bych na jeho potvrzení musel provést větší množství zkoušek. Srovnáním výsledků pevností v tlaku po 7 a 28 dnech nám vychází nejlépe referenční receptura, která obsahovala nejmenší množství vzduchu. U ostatních receptur nebyl prokázán jiný vliv na pevnosti v tlaku, kromě zvýšení obsahu vzduchu způsobený vlákny což snížilo pevnost, s ohledem na druh povrchové úpravy vláken. Z výsledků pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech vyšla nejlépe opět receptura referenční, poměrně nízkou hodnotou se opět prezentuje receptura s oplazmovanými vlákny. Celkově by se dal potvrdit fakt, že komerčně prodávaná vlákna i přes zvýšený obsah vzduchu vykazují nejmenší pokles v pevnosti v tlaku oproti referenční receptuře.

Při celkovém srovnání všech měření je znát, že účinnost vláken na pevnost v tahu za ohybu je podstatnější v raných stádiích tvrdnutí betonu kdy beton ještě nedosahuje svých konečných pevností a vlákna jsou schopna přebírat část tahových sil. Nejlépe se jeví komerční vlákna, která i po 28 dnech zvyšují pevnost v tahu za ohybu o téměř 15 %. Oproti tomu receptura s oplazmovanými vlákny svou schopnost soudržnosti vláken s betonem časem ztratila a receptura s vlákny očištěnými byla celkově srovnatelná s recepturou referenční.

V porovnání výsledků hloubky průsaku u jednotlivých receptur lze vidět pozitivní vliv přidaných vláken u jednotlivých receptur. Vlákna bez aviváže dosahují lepších výsledků. To by mohlo být způsobeno tím, že i neupravená vlákna jsou v betonu schopny na sebe navázat kapičky vody a to by mohlo snížit hloubku průsaku.

Při zkoumání výsledků pevnosti v příčném tahu je vidět, že i u této zkoušky komerční vlákna jsou schopny zvednout pevnost v příčném tahu a to o necelých 15 %. Receptury s oplazmovanými a neočištěnými vlákny dosahovaly hodnot ještě nižších než receptura referenční. To je pravděpodobně způsobeno soudržností polypropylenových vláken s cementovou maticí protože oplazmovaná vlákna tuto vlastnost časem ztrácejí a vlákna očištění ji ani nemají a oproti referenční receptuře ještě naopak zvedají množství vzduchu.

Nebyl prokázán vliv povrchové úpravy vláken na změnu statického modulu pružnosti betonu. Statický modul pružnosti se u receptur pohyboval kolem hodnoty 29 GPa.

Pokud nahlédneme no normy ČSN 73 1326, na zatřídění povrchů zkušebních ploch tak zjistíme, že recepturu s komerčními vlákny bychom zařadily do stupně porušení 2 – slabě narušený s odpadem do 500 g/m². Ostatní receptury patří do stupně porušení 5 – rozpadlý s odpadem přes 3000 g/m².

Z grafu intenzit by se tak dalo vyčíst, že receptura obsahující vlákna si drží svou intenzitu odparu díky tomu, že voda adsorbovaná na vláknech neodchází k povrchu tak rychle jako u receptury referenční a naopak odchází později, což by mohlo mít chtěný efekt samoošetřování a chránit tak beton před nechtěným vznikem trhlin v počátcích tvrdnutí betonu.

Graf objemových změn nám na první pohled ukáže vliv vláken na smrštění betonu bez ohledu na povrchovou úpravu vláken. Protože i receptura, která, vykazovala z receptur obsahující vlákna nejhorší výsledky, byla schopná snížit smrštění proti referenční receptuře o téměř 50 %. A receptura obsahující komerční vlákna od KrampeHarexCZ snížila smrštění o téměř 75 %. Receptura, která obsahovala oplazmovaná vlákna díky podmínkám mohla vykazovat hodnotu smrštění o něco menší. Jako nejméně vhodná se jeví úprava povrchu oplazmováním na neočištěnou aviváž, která v porovnání s komerčními vlákny dosahovala až dvojnásobného většího smrštění. V konečném porovnání je tedy v betonech žádoucí obsah vláken s ohledem na objemové změny betonů. Jako nejvhodnější povrchová úprava se jeví úprava komerčních vláken aviváží a plazmová úprava. Tyto dvě povrchové úpravy jsou schopny snížit smrštění o 60 % a více.

V konečném porovnání povrchových úprav vláken nejhůře dopadla vlákna bez povrchové úpravy, která vykazovala nejhorší hodnoty téměř u všech zkoušených vlastností. V porovnání komerčně prodávaných vláken a vláken s plazmovou úpravou, mají tyto povrchové úpravy s ohledem na zkoušené vlastnosti výhody v těchto odvětvích: Plazmová úprava vláken vykazovala lepší vlastnosti prakticky ve všech zkoušených vlastnostech u čerstvých betonů především u zkoušek reologických vlastností čerstvého betonu. Naproti tomu vlákna KrampeHarex dosahovaly lepších výsledků u všech zkoušek pevností

jak v tlaku, tak v tahu za ohybu. S ohledem na intenzitu výparů dosahovala lepších výsledků oplazmovaná vlákna, která by tímto měla získat vyšší odolnost proti možnému vzniku trhlin při raných stádiích tvrdnutí betonu, ale oproti tomu menších objemových změn dosáhla vlákna s lubrifikovaným povrchem.

Dalo by se tedy předpokládat, že plazmová úprava vláken by mohla nahradit klasickou úpravu povrchu vláken, ale musíme počítat se ztrátou pevnosti po 28 dnech v tlaku o necelých 10 % a v tahu za ohybu o téměř 5 %.

11. Seznam tabulek

Tab. č. 1. Vlastnosti vláken do betonu

Tab. č. 2. Vlastnosti použitého cementu

Tab. č. 3. Vlastnosti použité plastifikační přísady

Tab. č. 4. Tabulka receptur

Tab. č. 5. Tabulka receptur pro objemové změny

Tab. č. 6. Výsledky objemových vlastností ČB

Tab. č. 7. Výsledky obsahu vzduchu v ČB

Tab. č. 8. Výsledky zkoušky sednutí

Tab. č. 9. Výsledky zkoušky rozlití

Tab. č. 10. Výsledky zkoušky Vebe

Tab. č. 11. Výsledky objemových vlastností ZB

Tab. č. 12. Výsledky pevností v tlaku

Tab. č. 13. Výsledky pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech

Tab. č. 14. Výsledky pevností v tahu za ohybu

Tab. č. 15. Výsledky hloubky průsaku

Tab. č. 16. Výsledky pevnosti v příčném tahu

Tab. č. 17. Výsledky odolnosti proti CHRL

12. Seznam grafů

- Graf č. 1. Graf odhadu míry vypařování povrchové vlhkosti betonu
- Graf č. 2. Diagram postupu práce
- Graf č. 3. Výsledky objemových vlastností ČB
- Graf č. 4. Výsledky obsahu vzduchu v ČB
- Graf č. 5. Výsledky zkoušky sednutí
- Graf č. 6. Výsledky zkoušky rozlití
- Graf č. 7. Výsledky zkoušky Vebe
- Graf č. 8. Výsledky objemových vlastností ZB
- Graf č. 9. Výsledky pevností v tlaku po 1 dnu
- Graf č. 10. Výsledky pevností v tlaku po 7 dnech
- Graf č. 11. Výsledky pevností v tlaku po 28 dnech
- Graf č. 12. Srovnání pevností v tlaku
- Graf č. 13. Výsledky pevností v tlaku na krychlích po 28 dnech
- Graf č. 14. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 1 dnu
- Graf č. 15. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 7 dnech
- Graf č. 16. Výsledky pevností v tahu za ohybu po 28 dnech
- Graf č. 17. Srovnání pevností v tahu za ohybu
- Graf č. 18. Výsledky hloubky průsaku
- Graf č. 19. Výsledky pevnosti v příčném tahu
- Graf č. 20. Výsledky odolnosti proti CHRL
- Graf č. 21. Graf popisuje prostředí okolo vzorků
- Graf č. 22. Graf intenzit odparů
- Graf č. 23. Rychlost proudění vzduchu u vzorků u objemových změn
- Graf č. 24. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s vlákny KrampeHarex
- Graf č. 25. Graf popisuje prostředí okolo vzorku bez vláken
- Graf č. 26. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s očištěnými vlákny
- Graf č. 27. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s vlákny s aviváží + plazma
- Graf č. 28. Graf popisuje prostředí okolo vzorku s oplazmovanými vlákny
- Graf č. 29. Odpar za působení proudícího vzduchu
- Graf č. 30. Odpar bez působení proudícího vzduchu
- Graf č. 31. Horizontální smrštění

13. Seznam obrázků

- Obr. č. 1. Cementová pasta s polymerními vlákny
- Obr. č. 2. Suchá betonová směs s polypropylenovými vlákny
- Obr. č. 3. Polymerní vlákna
- Obr. č. 4. Vzorec propylenu
- Obr. č. 5. Změna chování PP vláken – nalevo vlákna před úpravou; napravo PP vlákna po úpravě [7]
- Obr. č. 6. Fotografie aparatury s DCSBD a detailní schéma elektrody [7]
- Obr. č. 7. Schéma měření dilatačních posunů maltové směsi v tenké vrstvě s využitím USB mikroskopu. [19]
- Obr. č. 8. Skutečný pohled na měřicí přístroj
- Obr. č. 9. Program zaznamenávající snímky
- Obr. č. 10. Použitá polypropylenová vlákna
- Obr. č. 11. Fotografie sednutí
- Obr. č. 12. Fotografie rozlití jednotlivých receptur
- Obr. č. 13. Fotografie zkoušky Vebe
- Obr. č. 14. Fotografie zkoušky pevnosti v tlaku na úlomcích
- Obr. č. 15. Fotografie zkoušky pevnosti v tlaku na kostkách
- Obr. č. 16. Fotografie zkoušky pevnosti v tahu za ohybu
- Obr. č. 17. Fotografie detailu hloubky průsaku na kostkách
- Obr. č. 18. Detail lomu po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu
- Obr. č. 19. Fotografie zkoušky pevnosti v příčném tahu na kostkách
- Obr. č. 20. Fotografie vzorků po zkoušce odolnosti CHRL
- Obr. č. 21. Fotografie povrchu vzorku s vlákny KrampeHarex po zamíchání a po 2, 6, 14, 24 a 34 hodinách.

14. Seznam použité literatury

- [1] SVOZIL, Jaroslav. *Studium objemových změn a dotvarování lehkých konstrukčních betonů : bakalářská práce*. Brno, 2011. 51 str. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [2] Mario Collepardi, *Moderní beton*, Edice Betonové stavitelství, IC ČKAIT, s.r.o. 2009, ISBN: 978-80-87093-75-7
- [3] Hela R., *Technologie betonu*, VUT FAST Brno 2005
- [4] Q.F Wei, Surface characterization of plasma-treated polypropylene fibers, *Materials Characterization*, Volume 52, Issue 3, June 2004, Pages 231-235
- [5] Českomoravský cement, *Příručka technologa, Beton- suroviny, výroba, vlastnosti*, 2005 druhé aktualizované vydání, Českomoravský cement a.s. Beroun, Českomoravský beton a.s. Beroun, Českomoravské štěrkovny a.s. Mokrá
- [6] Pytlík P. – *Technologie betonu*, VUT FAST Brno 2000
- [7] *Plazmová úprava polypropylenových vláken*, Daniel Kopkáně, Dana Skácelová, Monika Fialová, Petr Herka, Juniorstav 2011
- [8] Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers Original Research Article, *Construction and Building Materials*, Volume 27, Issue 1, February 2012, Pages 305-312
Zoran J. Grdic, Gordana A. Toplicic Curcic, Nenad S. Ristic, Iva M. Despotovic
- [9] ING. Lenka Bodnárová , PH.D., *Kompozitní materiály (CJ02)*, Vysoké učení technické v Brně, FAST
- [10] UNO, P.J., "Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 4, July-Aug. 1998, pp. 365-375.
- [11] Bc. Monika Fialová, *Zvýšení adheze polypropylenových výztužných vláken k betonu pomocí nízkoteplotního plazmatu*, Diplomová práce Masarykovou univerzita, přírodovědecká fakulta, Ústav fyzikální elektroniky, 2011
- [12] Ducháček V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*,. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha, 2006, 87-88

- [13] Jiří Litoš – Vliv modifikačních přísad na objemové změny čerstvých cementových past, Beton – technologie, konstrukce, sanace 2/2007, Beton TKS s.r.o.
- [14] Hela R., Technologie betonu II, VUT FAST Brno 2007
- [15] ČSN EN 14889-2 Vlákná do betonu, Část 2: Polymerní vlákna
- [16] KALVODA, P. Subpixelová detekce posunů pro určování objemových změn stavebních látek s využitím digitálního mikroskopu. Veřejná verze. 2010. 88 s., 8s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, Ústav geodézie. Brno. Disertační práce
- [17] KALVODA, P.; KOPKÁNĚ, D.; MACHOTKA, R.; VONDRÁK, J. Fotogrammetrické sledování objemových změn stavebních materiálů. In XII. mezinárodní vědecké konference, sekce 11 Geodézie a kartografie, Sborník příspěvků. Brno: CERM, s.r.o. Brno, 2009. s. 79-82. ISBN: 978-80-7204-629- 4.
- [18] NOVÁČEK, J., KALVODA, P. Vývoj bezkontaktní fotogrammetrické metody pro sledování objemových změn hydratujících staviv. In Sborník anotací JUNIORSTAV 2010. 2010. p. 279 - 279. ISBN 978-80-214-4042-5.
- [19] NOVÁČEK, J.; KOPKÁNĚ, D. Ověření vlastností mechanického stavivu pro stanovení objemových změn hydratujících maltovin. In sborník konference Maltoviny 2010. Brno: VUT Brno, 2010. s. 1-10. ISBN: 978-80-214-4204- 7.
- [20] ŠTENKO, M., Použití 2-paprskové laserové dilatometrie při sledování objemových změn stavebních materiálů ve fázi zrání a vlivem vlhkosti. XII. symposium SILICHEM Brno 19.–21. 9. 2007
- [21] Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, Fire Safety Journal, Volume 44, Issue 8, November 2009, Pages 1015-1022, Ali Behnood, Masoud Ghandehari
- [21] The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, February 2012, Pages 73-77, Saeid Kakooei, Hazizan Md Akil, Morteza Jamshidi, Jalal Rouhi

- [22] Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials, *Cement and Concrete Composites*, Volume 18, Issue 2, 1996, Pages 85-92, A.M. Alhozaimy, P. Soroushian, F. Mirza
- [23] SINGH, Sehaj, SHUKLA, Arun, BROWN Richard. *Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix*. *Journal Cement and Concrete Reserch*. Volume 34. 2004. pages 1919-1925
- [24] FELEKOGLU Barak, TOSUN, Kamile, BARADAN, Bulent. *A comparative study on the flexural performance of plasma treated polypropylene fiber reinforced cementitious composites*. *Journal of Materials Processing Technology*, volume 209. 2009 pages 5133-5144
- [25] ZHANG, C., GOPALARATNAM. V. S., YASUDA, H. K., Plasma treatment of polymeric fibers for improved performance in cement matrices. *Journal of Applied Polymer Science*, volume 76. 2000 pages 1985-1996
- [26] Ma Z., Qi H. *Polypropylene fiber modified by surface cross-linking in dielectric barrier discharge*. *Surface & Coatings Technologi*. 201, 2007, 4935-4938
- [27] ČSN EN 206–1 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [28] William J.K., James H.H., Jefferey A.M. Polypropylene: Structure, Properties, Manufacturing Processes and Applications in *Handbook of polypropylene and Polypropylene Composites* edited by Haruhun G. K., Mercel Dekker Inc. New York, 1999, 15-38
- [29] ČSN ISO 6784 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [30] Vlastnosti cementu: <http://www.heidelbergcement.com/cz>;
http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/volne_lozeny_cement/kvalita/cemi425r.htm
- [31] Vlastnosti plastifikátoru: <http://www.chryso.cz>;
http://www.chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/49074/Chf%20Optima%20224.pdf