

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Ověření vlivu agresivního prostředí na vláknobetony

Influence of aggressive environment on fiberconcretes
verification

Student:

Bohdan Sousedík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Šafrata, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Bohdan Sousedík**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Ověření vlivu agresivního prostředí na vláknobeton**
Influence of aggressive environment on fiberconcretes verification

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište, pro jaké konstrukce se používá beton s rozptýlenou výztuží a jaké výhody tyto kompozity přinášejí.
2. Zpracujte přehled komerčně dodávaných vláken užívaných pro vyztužování betonu a malt. Uveďte jejich vlastnosti a navzájem je porovnejte.
3. Vyberte vhodné reprezentanty vláken dle materiálu. Navrhněte složení vláknobetonů s těmito reprezentanty a vyrobte vzorky pro další zkoušení.
4. Na ztvrdlém betonu stanovte jeho odolnost proti mrazu, proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám.
5. Získaná data zpracujte přehledným způsobem. Vyhodnoťte působení agresivního prostředí na degradaci vláknobetonu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Pytlík, P.: *Technologie betonu*, 2. vyd. BRNO: VUTIUM, 2000. 390 stran. ISBN 80-214-1647-52000

Colleparidi, M.: *Moderní beton*, Informační centrum ČKAIT / Betonové stavitelství, Praha, 342 stran, ISBN: 978-80-87093-75-7

Krátký, J., Trtík, K., Vodička, J.: *Drátkobetonové konstrukce*, 1. vyd. Informační centrum ČKAIT / Betonové stavitelství, Praha, 107 stran, ISBN 80-86364-00-3

ČSN EN 206 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda (2014)

ČSN P 73 2404 - Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace (2016)

ČSN EN 14889 – Vlákná do betonu (2007)

Firemní literatura dodavatelů vláken

www.betontks.cz/casopis/

<http://www.concrete.org/>

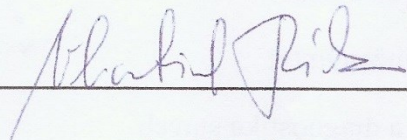
<http://www.verlagbt.de/verlag/beton/index.php?navtext=Beton>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Šafrata, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2016

Datum odevzdání: 02.05.2017


vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 25.2017.....


Savuk.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na mojí bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 25.2017.....


.....

podpis studenta

Poděkování

Rad bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Šafratovi Ph.D. za odborné rady a vedení při tvorbě mé práce. Dále bych chtěl také poděkovat zaměstnancům laboratoře a mým spolužákům za pomoc při výrobě vzorků.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá ověřením vlivu mrazu na vlastnosti vláknobetonu. Je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá konstrukcemi, ve kterých je možno použít vláknobeton a výhodami jeho užití. Dále je zpracován přehled používaných vláken.

Praktická část vyhodnocuje působení agresivního prostředí na vláknobeton. Na ztvrdlém betonu byla posuzována odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám ve srovnání s referenčním vzorkem bez přidané rozptýlené výztuže. Z výsledků vyplývá, že přídavek rozptýlené výztuže má pozitivní vliv na odolnost betonu proti zmrazování. Negativně však ovlivňuje soudržnost povrchu betonu při působení chemických rozmrazovacích látek.

Klíčová slova:

Vláknobeton, rozptýlená výztuž, chemické rozmrazovací látky, mrazuvzdornost

Summary

The objective of this bachelor's thesis has been to verify an impact of freezing temperatures as regards characteristics and serviceability of fiber-reinforced concrete. The thesis is structured in a theoretical and practical part. The theoretical part deals with concrete structures that can be fibre-reinforced, and specifies advantages of such reinforcement. A detailed list of suitable fibres is given.

The practical part of the thesis evaluates effects of chemically aggressive environment on the fiber-reinforced concrete. The hardened fiber-reinforced concrete was subjected to effects of freezing temperatures and de-icing chemicals and the experimental results were compared with those obtained by testing common concrete. It follows from the comparison that fiber reinforcement is of advantage if the effect of freezing temperatures is taken into account. Nevertheless, anti-freezing agents erode and diminish bond strength of fibre concrete surfaces more easily than it would be the case of common concrete.

Key Words:

Fiber-reinforced concrete, discrete fiber reinforcement, chemical anti-freezing agents, freeze resistance

Obsah

Seznam použitého značení.....	3
1 Úvod.....	4
2 Vláknobeton.....	5
2.1 Definice.....	5
2.2 Vliv rozptýlené výztuže na vlastnosti betonu.....	5
2.2.1 Vliv na čerstvý beton a jeho zrání.....	5
2.2.2 Vliv na mechanické vlastnosti.....	6
2.2.3 Ovlivnění dalších vlastností.....	8
2.3 Využití vláknobetonu a jeho výhody.....	8
2.3.1 Velkoplošné konstrukce.....	8
2.3.2 Základové konstrukce.....	8
2.3.3 Prefabrikáty pro dopravní stavby.....	9
2.3.4 Betonové skruže a trouby.....	9
2.3.5 Vysokohodnotné vláknobetony a ultravysokohodnotné betony.....	9
2.3.6 Segmenty tunelového ostění.....	10
2.3.7 Stříkané betony.....	10
2.3.8 Bílé vany.....	10
3 Rozptýlená výztuž.....	11
3.1 Ocelová vlákna.....	12
3.2 Polymerní vlákna.....	13
3.2.1 Polypropylenová vlákna.....	13
3.2.2 Polyvinylalkoholová (PVA) vlákna.....	13
3.3 Skleněná vlákna.....	14
3.4 Přírodní vlákna.....	15
3.5 Ostatní vlákna.....	15

4	Experimentální část.....	17
4.1	Popis provedených zkoušek	17
4.1.1	Zkouška rozlitím	17
4.1.2	Obsah vzduchu.....	19
4.1.3	Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám.....	20
4.1.4	Zkouška mrazuvzdornosti.....	21
4.1.5	Ultrazvuková impulsivní metoda.....	22
4.2	Návrh zkušebních receptur.....	23
4.3	Použité suroviny.....	24
4.4	Metodika přípravy směsi a jeho ošetřování	26
5	Výsledky měření	27
5.1	Zkoušky čerstvého betonu.....	27
5.2	Zkoušky ztvrdlého betonu.....	29
5.2.1	Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám.....	30
5.2.2	Mrazuvzdornost a ultrazvuková metoda.....	32
6	Závěr	36
	Seznam použité literatury	38
	Seznam obrázků.....	40
	Seznam tabulek.....	41
	Seznam příloh	42

Seznam použitého značení

D	Objemová hmotnost vzorku	[kg/m ³]
CHRL	Chemické rozmrazovací látky	
ČSN	České technické normy	
ČSN EN	České technické normy z evropských norem	
E	Modul pružnosti	[GPa]
E_{cu}	Dynamický modul pružnosti	[GPa]
L	Délka vlákna	[mm]
L_1	Délka dráhy ultrazvukové vlny	[m]
PVA	Polyvinylalkohol	[mm]
UHPC	Ultravysokohodnotný beton	
d	Průměr vlákna	[mm]
d_1	Šířka rozlití v jednom směru	[mm]
d_2	Šířka rozlití v druhém směru	[mm]
f	Pevnost v tahu	[MPa]
k	Součinitel rozměrnosti prostředí	[-]
t	Čas, po který ultrazvuková vlny prochází vzorkem	[s]
v_L	Rychlost ultrazvukové vlny	[m/s]
ρ_a	Množství odpadu po zkoušce CHRL	[g/m ²]

1 Úvod

Vlákobeton je progresivní materiál, který v posledních letech nachází své využití v mnoha oblastech, kde je zapotřebí zvýšených tahových pevností, ale z různých důvodů není vhodné užití klasické výztuže. Především se jedná o vyztužování průmyslových podlah. Nachází také uplatnění v silničním stavitelství, kde se může použít do ostění tunelů a k výrobě prefabrikovaných dílců. Nevýhodou vlákobetonu, která limituje jeho využití, je jeho vyšší pořizovací cena oproti klasicky vyztuženému betonu. Tato skutečnost odrazuje investory od jeho použití, i když správné využití vlákobetonu může přinést celkové snížení nákladů v důsledku snazšího zabudování. Dále oproti klasicky vyztuženému betonu je jeho použití vhodné, pokud přesně nelze určit, kde budou vznikat tahové napětí.

Využití vláken jako přídavku pro zlepšení vlastností do stavebního materiálů lze najít už během středověku, kdy byla přidávána přírodní vlákna v podobě například slámy do hlíny pro výrobu cihel. Dalším širokým uplatněním vlákobetonu byl beton s přídavkem azbestových vláken, který se ale již dnes nepoužívá díky karcinogenním účinkům. Na našem území se začal beton s rozptýlenou výztuží hojně používat v 90. letech 20. století, kdy zahraniční firmy představily koncept výroby průmyslových podlah bez využití klasické výztuže [6].

Bakalářská práce je rozdělena na dvě, části, teoretickou a praktickou. Teoretická část práce popisuje vlastnosti betonu, které se vylepšují přídavkem rozptýlené výztuže, ať už jde o mechanické nebo jiné vlastnosti. Následně jsou popisovány jednotlivé druhy konstrukcí, kde se vlákobetonu využívá. Další část popisuje samotná vlákna rozdělená dle materiálu s ohledem na jejich funkci, výrobu a vylepšení, které jednotlivá vlákna přinášejí.

Obsahem a cílem praktické části je ověření vlivu mrazu na vlastnosti vlákobetonu jak z pohledu na povrchovou vrstvu ověřením vlivu chemických rozmrazovacích látek, tak i zkouškou mrazuvzdornosti, která informuje o vývoji vnitřní struktury při působení mrazu. Pro porovnání těchto vlastností bylo vyrobeno deset záměsí, přičemž jedna byla bez přídavku vláken a sloužila jako referenční pro porovnání vlastností. Do ostatních byly v různém dávkování přidána vlákna vyrobená z různých materiálů.

2 Vláknobeton

2.1 Definice

Vláknobeton je kompozitní materiál, který má charakter a strukturu prostého betonu doplněného o rovnoměrně rozptýlená vlákna mající funkci výztuže. Rozptýlená výztuž přispívá ke zlepšení vlastností betonu. Samotná vlákna mohou být realizována v různých délkách, tvarech i materiálech. Vláknobeton může být vyráběn ve formě prefabrikovaných dílců nebo i ve formě transportbetonu dovezeného z betonárny [7].

2.2 Vliv rozptýlené výztuže na vlastnosti betonu

Přidání rozptýlené výztuže do betonu v závislosti na tvaru a materiálu vláken má pozitivní vliv na mladý beton, kde se vytváří vhodněji rozprostřené smršťovací trhliny a omezuje šíření trhlín vlivem objemových změn. Při použití vhodného druhu vláken má rozptýlená výztuž také pozitivní vliv na mechanické vlastnosti v ztvrdlém betonu, kde nemůže plně nahradit klasickou výztuž, ale může snížit její množství.

2.2.1 Vliv na čerstvý beton a jeho zrání

Ve srovnání s prostým betonem lze pozorovat přínos rozptýlené výztuže již během ukládání a prvních hodin hydratace vláknobetonu. Využití vláknobetonu přináší problémy při míchání, kde může mít vliv na konzistenci a obvykle je také nutné upravit složení betonu. Vylepšení vlastností čerstvého betonu lze pozorovat jak při použití makrovláken s vyšším modulem pružnosti, tak i za přidání mikrovláken s malým modulem pružnosti.

Vláknobetony s přidavkem mikrovláken redukují smrštění vlivem vysychání díky tomu, že mají vliv na omezení krvácení betonu a tím, že dokáží zadržet větší množství povrchové vody, která zlepšuje vyžrávání betonu. Samotná vlákna také přispívají k redukci smrštění tím, že omezují šíření trhlín, ale pouze během prvních hodin hydratace [5].

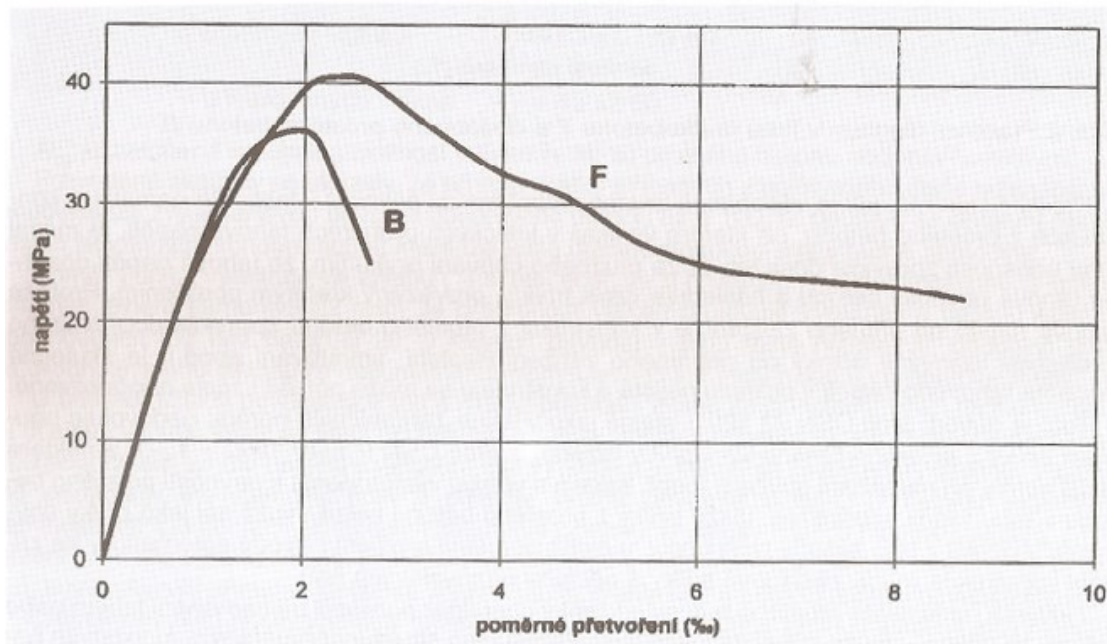
Použití vláknobetonu s makrovláknou také přispívá ke zlepšení vlastností čerstvého betonu. Obdobně jako u vláknobetonu s mikrovláknou, makrovlákna ovlivňují vznik a šíření smršťujících trhlín převážně tím, že trhliny vznikají ve větším množství, ale

s podstatně menším průměrem. Protože makrovlákna mají vyšší modul pružnosti, než má cementová matrice se však ovlivnění vzniku smršťujících trhlin projevuje déle. Dalším vlivem, jenž lze pozorovat, je omezení vzniku šterkových hnízd díky oddálení zrn kameniva pomocí vláken [5].

Přidáním vláken vyrobených z vhodného materiálu do betonové směsi určené pro použití jako stříkaný beton lze omezit zpětný odraz při nanášení (ztrátovost směsi).

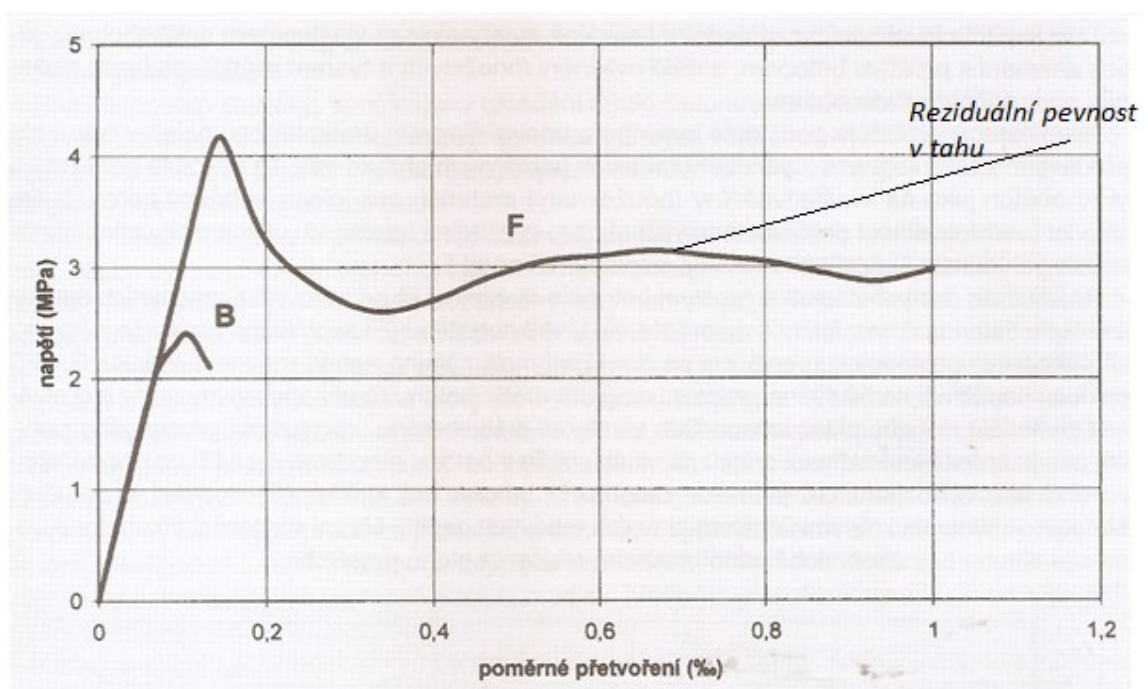
2.2.2 Vliv na mechanické vlastnosti

Samotné přidání rozptýlené výztuže ovlivňuje únosnost v tlaku jen málo, ale je patrné především v rozdílném chování během zatěžování. Oproti prostému betonu beton s rozptýlenou výztuží vykazuje plastické přetváření po dosažení maximální pevnosti v tlaku. Tato vlastnost je způsobena aktivací výztuže po vzniku trhlin v betonové matrici, která má významný vliv na zpomalení porušování při poklesu napětí. U prostého betonu dojde ke křehkému porušení vlivem tahových napětí na rozdíl od vláknobetonu, kde tato napětí přenesou vlákna. Beton s rozptýlenou výztuží má oproti prostému betonu až tři krát vyšší hodnotu mezního stlačení. Tento jev je zobrazen na obrázku 1, kde křivka B odpovídá prostému betonu a křivka F betonu s vlákny [3].



Obrázek 1: Zatěžovací graf pevnosti v tlaku [4]

Významnou změnu v chování vláknobetonu oproti prostému betonu lze pozorovat při napětí v tahu za ohybu. Přidání rozptýlené výztuže má vliv na zvýšení maximální pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tahu při běžném dávkování vláken o 50 % až 100 % anebo při vyšším dávkování až několikanásobně. Tento vliv je způsoben oddálením vývoje trhlin v tažené části vzorku a tím, že po jejich vzniku se aktivují vlákna, která začínají přenášet tahová napětí. Tento stav se nazývá reziduální pevnost (vyznačená na obrázku 2)) v tahu, která je především závislá na množství, tvaru a plastickému protažení použité rozptýlené výztuže. Rozdílná chování vláknobetonu (křivka F) a prostého betonu (křivka B) jsou znázorněna na obrázku 2 [8].



Obrázek 2: Zatěžovací graf pevnosti v tahu za ohybu [4]

V souvislosti se snížením křehkosti a zvýšením houževnatosti prvků vyrobených z vláknobetonu se také zvyšuje rázová pevnost, protože materiál je schopen absorbovat větší množství energie tak, že zabraňuje šíření křehkého lomu pomocí přítomnosti vláken. Tato vlastnost má také vliv na zvýšení odolnosti proti abrazi a kavitaci [2].

Při vhodném rozmístění vláken dochází také k zvýšení modulu pružnosti v podobě statického. Dynamický modul pružnosti se při použití vhodných vláken také navýší za předpokladu, že tato vlákna nepřispěla k vnesení velkého objemu vzduchu do betonu. Navýšení modulů pružnosti je způsobeno opět tím, že vlákna oddalují vznik významných trhlin, a proto vláknobeton vykazuje lepší plastické chování.

2.2.3 Ovlivnění dalších vlastností

Při použití polymerních vláken je možné zvýšit odolnost betonu proti vysokým teplotám. Za přítomnosti vysokých teplot se polymerní vlákno roztaví a následně odpaří, důsledkem je vznik kapilárních pórů, kterými může unikat vlhkost z betonu ve formě vodní páry anebo se v něm lépe šířit a tím nezpůsobuje vysoké tlaky. Tento jev omezuje takzvané explozivní odprýskávání krycí vrstvy betonu, při kterém dojde k odloučení povrchových vrstev konstrukce a následné rychlé zhroucení [9].

Při použití mikrovláken lze pozorovat částečné utěsnění povrchu, a tedy přispění k poklesu vodopropustnosti.

2.3 Využití vláknobetonu a jeho výhody

Prostý beton je velice křehký materiál, který dosahuje malých hodnot pevností v tahu a má malé přetvárné schopnosti. Hlavním úkolem prostorově neorientovaných a nesouvislých vláken je omezit vznik a šíření trhlin v cementové matici betonu vznikajících v důsledku změn okolního prostředí nebo působení zatížení na beton.

2.3.1 Velkoplošné konstrukce

Užití vláknobetonu je ekonomicky výhodné především v případech, kdy použití konvenční výztuže není zcela vhodné. Jde například o zkrácení doby betonování díky absenci časově náročné přípravy klasické výztuže, jako je její řezání, vázání, svařování a podobně. Další výhodou související s nepřítomností klasické výztuže je, že nejsou potřebné velké skladovací plochy pro její umístění. Tyto výhody se nejlépe využívají při betonování velkoplošných konstrukcí, jako jsou průmyslové podlahy a svrchní vrstva vozovek, kde je navíc potřebná vyšší houževnatost a odolnost betonu. Tato aplikace je v současné době nejvíce rozšířená. [3].

2.3.2 Základové konstrukce

Užití vláknobetonu v základových konstrukcích je výhodné především v případě, kdy se jedná o dynamicky nebo tvarově složitě namáhání. Jde především o základové konstrukce strojů, které navíc mohou mít tvarově složitý základ, kde by mohlo hrozit nedokonalé probetonování jeho částí [3].

2.3.3 Prefabrikáty pro dopravní stavby

Vláknobeton v prefabrikátech pro dopravní stavby je používán díky redukci trhlin vlivem objemových změn prvku, které by mohly být zdrojem zrychlené koroze. Dalším přínosem je zvýšení soudržnosti betonu s kotvami daných prvků a ochrana proti jejímu vytržení. Příkladem využití jsou prefabrikované dílce svodidlových sloupků, kde je nutné zajištění dobré soudržnosti se spojovací ocelovou tyčí, která má funkci záchyty vozidla. Další užití je v prefabrikovaných železničních pražcích s odolností proti rázům nebo doplňkových mostních říms, kde je nutné zajištění redukce objemových změn, aby nedocházelo k rychlé korozi působením atmosférických vlivů a solí z rozmrazovacích prostředků [10].

2.3.4 Betonové skruže a trouby

Oproti troubám s běžnou výztuží z armokoše je výroba trub z vláknobetonu značně technologicky rychlejší a snadnější. Tyto prvky vykazují menší náchylnost k poruchám díky mechanickému poškození, a tedy dochází k omezení zmetkovitosti. Užití trub z vláknobetonu místo těch vytvořených z prostého betonu příznivě přispívá k jejich subtilnější podobě a také zabraňuje náhlému zhroucení vlivem křehkému lomu [10].

2.3.5 Vysokohodnotné vláknobetony a ultravysokohodnotné betony

Vysokohodnotné vláknobetony nacházejí uplatnění v konstrukcích, kde je požadovaná jejich značná subtilnost a zároveň vysoká pevnost. Při této aplikaci je použito výrazné množství vláken oproti běžným aplikacím. K největším výhodám těchto konstrukcí patří velmi nízká hmotnost a objem prvků při zachování jejich únosnosti. Počáteční náklady na materiál jsou velmi vysoké, ale dané prvky mají dlouhou životnost a trvanlivost, a tedy nízké náklady na údržbu. Příklady použití vysokohodnotných betonů jsou v konstrukci mostů a lávek s malým rozpětím [11].

Ultravysokohodnotné betony (UHPC) jsou betony s pevnostmi alespoň 150 MPa v tlaku. Aby bylo možné těchto pevností dosáhnout, musí mít beton vysokou homogenitu a musí být vyztužen vlákny. Homogenita je dosažena úpravou křivky zrnitosti tak, že se nepoužívají velké frakce kameniva a je omezen vodní součinitel. Vlákna zvyšují pevnosti převážně v tahu a omezují křehkost, a tedy zvyšují houževnatost UHPC. Při výrobě ultravysokohodnotných betonů se používají hlavně krátká ocelová vlákna vysokých pevností ve velkém dávkování. Obdobně jako u vysokohodnotných betonů jsou náklady na jejich výrobu vysoké, ale prvky vyrobené z UHPC mají dlouhou životnost.

2.3.6 Segmenty tunelového ostění

Aplikace vláknobetonu ve výrobě prefabrikovaných segmentů ostění tunelů může být výhodnější než užití klasické výztuže díky úspoře celkového objemu výztuže a zrychlení etapy výroby. K využití vláknobetonu přispívá skutečnost, že po zabudování segmentů není nutná tak vysoká pevnost v tahu, jakou poskytují dílce se standartní výztuží, a že dílce z vláknobetonu mají lepší odolnost proti vzniku trhlin, a tedy vyšší vodonepropustnost [12].

2.3.7 Stříkané betony

Vláknobetony se využívají v podobě stříkaných betonů především pro podzemní stavby. Toto zajišťuje vyšší míru bezpečnosti, protože na rozdíl od klasické výztuže, kterou je nutné instalovat před nástřikem prostého betonu, není nutné vstupovat do nezajištěné ražby. K dalším výhodám tohoto způsobu patří eliminace problému s výztuží v místě žeber nebo zvýšení vodonepropustnosti ostění. Při správné volbě přidaných vláken se značně snižuje ztrátovost odpadajícího prostého betonu a vlákna také mohou přispět k vyšší míře požární bezpečnosti [12].

2.3.8 Bílé vany

Bílé vany jsou betonové konstrukce, které zároveň plní funkci hydroizolace. U těchto konstrukcí je kladen silný nárok na pečlivost provedení a na vodonepropustnost. Pro oba tyto požadavky je vhodné použít vláknobeton. Výhodou užití vláknobetonu oproti běžně vyztuženému betonu je snadnější provádění betonáže s omezením spotřeby výztuže hlavně ve svislých částech konstrukce. Nejvýrazněji se užívá vlastnosti vláknobetonu, která omezuje smrštění, a tedy tvorbu a velikost trhlin. Dále užívání vláknobetonu přispívá ke zvýšení samotné vodonepropustnosti povrchové vrstvy [13].

3 Rozptýlená výztuž

Nejobecněji se dají vlákna užitá jako rozptýlená výztuž zařadit do dvou skupin podle funkce, kterou plní v betonu. První skupinou jsou vlákna, která upravují smrštění betonu, jedná se o rozptýlenou výztuž s menším modulem pružnosti, než má matrice. Do druhé skupiny se řadí vlákna s konstrukční funkcí, která mají vyšší modul pružnosti než matrice, a tedy mají přímý vliv na mechanické vlastnosti zatvrdlého betonu. Srovnání jednotlivých typů vláken a matrice je znázorněno v tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti betonové matrice a vláken [4]

Materiál nebo vlákno	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměr [μm]	Délka [mm]	E [Gpa]	Pevnost v tahu [Mpa]	Mezní protažení [%]	Objem v kompositu [%]
Betonová matrice	1800–2400	-	-	20–40	1–4	0,01 - 0,02	97-99,9
Azbest	2550	0,02 - 30	5–40	164	200–1800	2–3	5–15
Uhlík	1160–1950	7–18	Max. 3	30–390	600–2700	0,5 - 2,4	3–5
Celulóza	1500	20–120	0,5 - 5,0	10–50	300–1000	20	5–15
Sklo	2700	12,5	10–50	70	600–2500	3,6	3–7
Polypropylen	910	20–100	5–20	4	-	10	0,1 - 0,2
Polyvinilalkohol	1000–3000	3–8	2–6	12–40	700–1500	-	2–3
Ocel	7860	100–600	10–60	200	700–2000	3–5	0,3 - 2,0

Dalším možným dělením vláken je dělení dle materiálu, ze kterého jsou vyrobena. Takto je lze rozdělit do několika skupin:

- Ocelová vlákna
- Polymerní vlákna
- Skleněná vlákna
- Přírodní vlákna
- Ostatní vlákna

3.1 Ocelová vlákna

Ocelová vlákna mají nevyšší podíl ve výrobě vláknobetonu. Dávkování těchto vláken se pohybuje mezi 20 kg/m³ až 90 kg/m³, obvykle okolo 30 kg/m³. Vlákna se vyrábějí v různých délkách, od 6 mm do 60 mm. Drátky dosahují pevností v tahu v rozmezí 400 MPa až 3500 MPa. Běžně se užívá drátků, které mají pevnost okolo 1300 MPa. Samotné drátky se dodávají v podobě buď jednotlivých vláken nebo ve formě vláken slepených vodou rozmísitelným lepidlem v počtu 26 až 48 vláken. Důležitou vlastností je soudržnost matrice a vláken, proto se využívá různých povrchových úprav drátků jako jsou například vtisky. Samotné vlákno má přímý tvar nebo se tvarově upravuje. Používá se zvlnění celé délky drátku nebo zahnutí konců vláken. Drátky mohou být povrchově opatřeny vrstvou proti korozi. Běžně se užívá jako povrchové úpravy měď, zinek nebo mosaz. Existuje pět základních postupů, pomocí nichž se vyrábějí vlákna pro vyztužování betonu [8]:

- Stříhání za studena taženého drátu
- Stříhání z ocelového pásku
- Frézování z ocelového bloku
- Odstředování drátků z taveniny
- Lití ocelových vláken

Během míchání a ukládání čerstvého betonu by měl být zachován převážně přímý tvar drátku. Tohoto se dá docílit kvalitou použitého materiálu s vysokou ohybovou tuhostí a správnou volbou štíhlostního poměru. Jedná se o poměr mezi délkou vlákna (L) a jeho průměrem (d) a obvykle není dosaženo velkých deformací, pokud je splněna podmínka vzorce (1) [3,14].

$$\frac{L}{d} \leq 100 \quad (1)$$

3.2 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna se vyznačují dobrou odolností proti působení kyselého i zásaditého prostředí. K běžně používaným materiálům pro výrobu vláken lze řadit polypropylén, polyethylen a polyvinylalkohol, Dále pak lze vlákna vyrábět z polyesteru, nylonu, polyakrylátu apod.

Dalším typem polymerních vláken mohou být uhlíková a aramidová vlákna. Tato vlákna poskytují nejlepší mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti a pevnost v tahu, ale díky své vysoké náročnosti na výrobu, a tedy s ní související vysokou cenou se běžně do betonů neužívají.

3.2.1 Polypropylenová vlákna

Nejběžněji používaným typem polymerních vláken jsou vlákna vyráběna z polypropylenu. Polypropylen má nízkou elasticitu, a proto pozitivně působí během prvních hodin hydratace betonu. Mezi jeho nevýhody lze zařadit relativně malou odolnost vůči UV záření, která způsobuje jeho degradaci. Běžně se produkují vlákna v délkách od 3 mm do 65 mm. Makrovlákna dosahují pevnosti v tahu až 750 MPa a modulu pružnosti 5200 MPa. Pro běžné použití se užívají samostatně anebo spolu s přídavkem polyethylenu. Vlákna se dělí na [18]:

- Mikrovlákna s průměrem $<0,3$ mm (monofilamentní) vyráběná rozvlákněním taveniny
- Mikrovlákna s průměrem $<0,3$ mm (fibrilovaná) vyráběná rozvlákněním plastové folie
- Makrovlákna s průměrem $>0,3$ mm vyráběná sdružováním jednotlivých vláken

Běžné dávkování mikrovláken je $0,6 \text{ kg/m}^3$ až $0,9 \text{ kg/m}^3$ a při použití makrovláken se pohybuje od $2,5 \text{ kg/m}^3$ do 5 kg/m^3 [18].

3.2.2 Polyvinylalkoholová (PVA) vlákna

Výhodou PVA vláken je přítomnost OH skupin, které vytváří molekulární soudržnost s betonovou maticí. Samotná polyvinylalkoholové vlákna mají vyšší modul pružnosti než cementová matrice, a proto ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Jejich tahová pevnost se pohybuje v rozmezí 800 MPa až 1600 MPa. Modul pružnosti je

v rozmezí 25 GPa až 40 GPa s průtažností asi 10 %. Vlákná se běžně vyrábějí v délkách do 30 mm. Polyvinilalkoholové vlákno je vyobrazeno na obrázku 3 [2].



Obrázek 3: PVA vlákna

3.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se vyrábějí z nekonečného vlákna, které vytéká ze sklářského kmene o teplotě 1560 °C z pece skrz platinoiriodové perforované destičky. Toho vlákno rychle chladne a hned je na něj nanášena lubrikace, která má ochrannou funkci a zároveň jednotlivá vlákna spojuje do provazců [16].

Běžné sklo má malou odolnost proti zásaditému prostředí, proto je nutné, aby byla upravena vsázka sklářského kmene. Nejběžněji se používá sklo s obsahem oxidu zirkoničitého mezi 17 a 20 procenty. Další ochranu skleněného vlákna poskytuje jeho lubrikace. Díky své dobré odolnosti proti agresivnímu prostředí nevyžaduje beton s příměsí skleněných vláken žádnou krycí vrstvu [16].

Pro použití jako rozptýlená výztuž se sklo aplikuje v podobě provazců s nerozplavitelnou lubrikací, kterou tvoří 100 kusů monovláken. Pevnost těchto provazců se pohybuje okolo 1700 MPa a dosahují modulu pružnosti 72 GPa. Vlákná se sekají na délku 6 mm nebo 12 mm. Tato vlákna se využívají pro zvýšení mechanických vlastností, především pevnosti v tahu za ohybu a houževnatosti [16].

Druhou běžně produkovanou variantou je mikrovýztuž s rozplavitelnou lubrikací, která uvolní provazce na jednotlivá vlákna. Vlákná mají pevnost v tahu 3500 MPa a modul pružnosti 72 GPa. Vlákná se vyrábějí v délkách 12 mm. Hlavní využití těchto vláken spočívá v ovlivnění vlastností čerstvého betonu, kde redukují jeho smrštění [16].

3.4 Přírodní vlákna

Mezi tato vlákna se řadí vlákna organického původu. Převážně se jedná o vlákna pocházející z listů, stvolů, povrchů a dřev rostlin. Užívá se jich při budování nízkonákladových staveb. Zajišťují převážně redukci smrštění během hydratace. Tato vlákna podléhají snadné degradaci vlivem biologických činitelů, proto se běžně před použitím impregnují.

3.5 Ostatní vlákna

Mezi tato vlákna se řadí dnes již zakázaná azbestová vlákna. K velkým výhodám azbestových vláken patřilo, že docházelo k jejich rovnoměrnému rozmístění v cementové matrici a zároveň beton byl schopen jich pojmout velké množství. Výsledný kompozit měl velmi dobré mechanické vlastnosti, chemickou a požární odolnost a byl abrazivzdorný. Dnes se azbest nevyužívá díky tomu, že samovolně odděluje vlákna o nízkém průměru, která způsobují nemoci dýchacích cest [1].

Dalším vláknem, které má vhodné vlastnosti pro využití jako rozptýlená výztuž, je čedičové vlákno (viz. obrázek 4). Jeho výroba je podobná jako u skleněného vlákna. Čedič je oproti sklu chemicky odolnější a odolává většímu rozptylu teplot. Pevnost v tahu se pohybuje okolo 1000 MPa a modul pružnosti 40 GPa. Tato vlákna mají podobné vlastnosti jako azbestová vlákna, ale nehrozí hygienické riziko.



Obrázek 4: Čedičová vlákna

4 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na ověření vlivu přidané rozptýlené výztuže na odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Pro porovnání připravených čerstvých betonů byly prováděny zkoušky dle ČSN EN 12350-5 (Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím), která je nejvhodnější pro porovnání vláknobetonů díky dynamickým účinkům během zkoušky. Další provedenou zkouškou byla ČSN EN 12350-7 (Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody). Pro účely srovnání vlivu rozptýlené výztuže na odolnost proti mrazu a chemických rozmrazovacích látek byly na všech záměsích provedeny zkoušky dle ČSN 73 1326 (Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek) a dle ČSN 73 1322 (Stanovení mrazuvzdornosti betonu). Aby bylo možné sledovat vývoj modulu pružnosti během jednotlivých cyklů zkoušení mrazuvzdornosti, byla prováděna po každých 25 cyklech měření dynamického modulu pružnosti dle normy ČSN 73 1371 (Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu).

4.1 Popis provedených zkoušek

4.1.1 Zkouška rozlitím

Zkouška se provádí ve formě (obrázek 5), která má průměr dolní podstavy 200 ± 2 mm a průměr horní podstavy 130 ± 2 mm. Forma má výšku 200 ± 2 mm a tloušťku stěn 1,5 mm. Tato forma je umístěna na střešací stolek, který umožňuje zvednutí [22].



Obrázek 5: Forma a střešací stůl zkoušky rozlitím

Forma i střešací deska se navlhčí. Forma se umístí na střed střešací desky, kde je pomocí přišlápnutí udržena ve stejné poloze a následně se naplní čerstvým betonem ve 2 vrstvách. Obě vrstvy se po naplnění zhutní deseti rázy dusadlem. Z horní hrany formy se odstraní přebytečný čerstvý beton a povrch se zarovná. V kolmém směru se forma zvedne a poté se uchopí deska střešacího stolu do horní polohy a nechá se volně padnout. Zvedání desky se opakuje patnáctkrát. Po posledním pádu desky se ve dvou na sobě v kolmých směrech změří šířka rozlití betonu s přesností na nejbližších 10 mm (d_1 , d_2) a měření se vyhodnotí dle vzorce (2) [22]:

$$\frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (2)$$

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších 10 mm a vyhodnotí se dle tabulky 2:

Tabulka 2: Stupeň konzistence

Stupeň	Průměr rozlití [mm]	Název
F1	≤ 340	směs tuhá
F2	350 až 410	směs plastická
F3	420 až 480	směs měkká
F4	490 až 550	směs velmi měkká
F5	560 až 620	směs tekutá
F6	≥ 630	směs velmi tekutá

Pokud během zkoušky dojde k separaci cementového tmele od kameniva je zkouška považována za neplatnou [22].

4.1.2 Obsah vzduchu

Zkouška obsahu vzduchu se provádí v tlakové nádobě zobrazené na obrázku 6 o obsahu minimálně pět litrů a je určena pro zkoušku čerstvého betonu s maximálním zrnem kameniva 63 mm [23].



Obrázek 6: Tlakový hrnec

Nádoba se naplní v jedné nebo více vrstvách tak, aby došlo k dostatečnému zhutnění vzorku. Zhutnění se provede pomocí ponorného vibrátoru, vibračního stolu, propichovací tyčí nebo zhutňovací tyčí. Naplněná a zhutněná nádoba se seřízne a uhladí. Okraj nádoby se očistí, aby došlo k dokonalému přilehnutí těsnění víka nádoby. Víko nádoby se pomocí svorek pevně upevní k hrnci a pomocí naplnění vody do zbylého prostoru mezi hladinou betonu a víkem se vytlačí přebytečný vzduch. Paličkou se poklepe nádoba, aby se uvolnil vzduch z okrajů nádoby. Dalším krokem je uzavření všech ventilů a natlakování nádoby do počáteční hodnoty. Následně se uvolní hlavní ventil a na stupnici víka tlakové nádoby se odečte hodnota vzduchu s přesností na 0,1 %. Výsledek je průměrná hodnota ze dvou měření zaokrouhlená s přesností na 0,5 % [23].

4.1.3 Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám se stanovuje minimálně na třech tělesech se stářím 28 dnů uložených ve vodním prostředí. Používají se krychle o rozměrech 150 mm, válce o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm, odřezy válce o průměru 150 mm a výšce minimálně 50 mm nebo hranoly o rozměrech 40x40x160 mm pro jemnozrnné betony. Horní hrana těles je během čerstvého stavu zarovnána pilovitým pohybem ocelového pravítka. [19].

Vlhká tělesa se umístí do misky stranou, která nepřišla do styku s odbedňujícími prostředky. Do misky je nalit 3 % roztok NaCl, který zamrzá při teplotě $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak, aby jeho hladina dosahovala do výšky $5 \pm 1\text{ mm}$ nad spodní plochu ponořeného tělesa. Zkoušené vzorky se umístí do přístroje, který je schopen vyvinout teplotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a udrží ji po dobu 15 minut a následně dojde k ohřevu těles na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, kterou také udržuje po dobu 15 minut. Celý jeden cyklus trvá přibližně 2 hodiny. Po 25 cyklech se změří hmotnost uvolněných částic tak, že se tělesa vyjmou z nádoby a omyjí se vodou v místech, kde docházelo ke styku s roztokem NaCl. Z misky se slije přebytečná voda a umístí se do sušárny s regulovanou teplotou $105 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po úplném odpaření vody se změří hmotnost pevných částic s přesností na 0,1 g [19].

Obvykle se provádí 100 až 150 cyklů. V případě, kdy už dojde k uvolnění hrubého kameniva, se zkouška ukončí dříve. Vyhodnocení probíhá součtem hmotností odpadů z těles, přičemž je vyloučen vzorek, který se liší o 50 % a více od průměru jednotlivých hmotnostních odpadů. Výsledek se udává jako hmotnost odpadu v gramech na metr

čtvereční. Norma povoluje i vizuální hodnocení vzorku a je možné jej zatřídit dle tabulky 3 [19]:

Tabulka 3: Stupně porušení při zkoušce CHRL

Stupeň porušení	ρ_a [g.m ⁻²]	Charakter odpadu
1 - nenarušený	do 50	velmi jemné prachové částice do 1 mm
2 - slabě narušený	do 500	jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50 % hmotnosti odpadu
3 - narušený	do 1000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 [g.m ⁻²]
4 - silně narušený	do 3000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 [g.m ⁻²]
5 - rozpadlý	přes 3000	jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

4.1.4 Zkouška mrazuvzdornosti

Zkouška mrazuvzdornosti se provádí na hranolových tělesech o rozměrech buď 100x100x400 mm nebo na hranolech o rozměrech 150x150x600 mm. Tělesa se zkoušejí ve stáří 28 dnů. Při zkoušce mají být tělesa nasáknuta vodou, a proto jsou před zkouškou uložena ve vodním prostředí [20].

Před zkouškou jsou tělesa zvážena a po každém měření jsou opět převážena, zdali nedošlo k hmotnostnímu úbytku většímu než 5 %, protože poté je zkouška ukončena a nepokračuje se v dalším zmrazování. Pro zkoušení se zhotovuje sada tří těleš, která jsou na začátku zkoušky zlomena na určení referenční pevnost v tahu za ohybu. Pro zkoušení mrazuvzdornosti se vyrábějí další tři tělesa, která podléhají zmrazovacím cyklům a po dokončení požadovaných cyklů jsou zlomena na určení pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaných těleš [20].

Tělesa jsou umístěna v zmrazovacím prostoru, který ochlazuje tělesa na teplotu v rozmezí -15 °C až -20 °C po dobu čtyř hodin a následně jsou ohřívána vodou na teplotu +20 °C za dvě hodiny. Celý cyklus trvá 6 hodin a obvykle se provádí 100 nebo 150 cyklů [20].

Vyhodnocením zkoušky je poměr mezi pevností v tahu za ohybu zmrazovaných těleš a těleš referenčních. Beton lze prohlásit za mrazuvzdorný, pokud tento poměr je 0,75 a větší [20].

4.1.5 Ultrazvuková impulsivní metoda

Podstata této metody spočívá ve vysílání ultrazvukových impulsů a měření doby jejich průchodu. Pro betonové konstrukce se používají sondy o frekvenci 54 kHz. Výstupem je změřená doba průchodu vlny zkoušeným vzorkem. Když je známa délka dráhy, kterou vlna prochází lze jednoduše vypočítat rychlost šíření ultrazvukové vlny dle vzorce (3) [21]:

$$v_L = \frac{L_l}{t}, \quad (3)$$

kde

v_L – rychlost šíření ultrazvukové vlny (m/s)

L_l – délka dráhy, kterou prochází vlna (m)

t – naměřený čas, po který vlna procházela skrz vzorek (s)

Samotné měření začíná nejprve tím, že je potřeba určit objemovou hmotnost daného vzorku. Dalším krokem je kalibrace přístroje na referenčním vzorku, který má známou dobu průchodu vlny. Obvykle je tento vzorek přiložen k přístroji a kalibrace probíhá na něm. Tímto se eliminují chyby plynoucí z umístění sond na povrchu tělesa [21].

Po takto provedené kalibraci se přistoupí k měření doby průchodu vlny na tělese. Měření probíhá na třech rozdílných místech vzorku, pokaždé zaznamenané dva krát. Přesnost výsledku je jedno procento. Měření vzorku se vyhodnotí dle vztahu (4) [21]:

$$E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2}, \quad (4)$$

kde

E_{cu} – dynamický modul pružnosti (Pa)

D – Objemová hmotnost vzorku (kg/m^3)

v_L – rychlost šíření UZ vlny (m/s)

k – součinitel rozměrnosti prostředí (-)

Při hodnocení se výsledek určí jako aritmetický průměr z naměřených hodnot. Pokud se nějaká hodnota liší o více jak pět procent z nejnižšího výsledku, musí být vyloučena [21].

4.2 Návrh zkušebních receptur

Pro účely zkoušení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a mrazuvzdornosti vláknobetonu bylo vyrobeno deset záměsí. Jedna záměs byla bez přidání vláken, a sloužila tedy jako referenční záměs k porovnání vlastností. Ostatní záměsi byly stejné jako referenční pouze s přidavkem rozptýlené výztuže z různých materiálů, obvykle s dávkováním na horní hranici doporučeného dávkování.

Při použití malých ocelových drátků byla také namíchána záměs, kde bylo přidáno malé množství rozptýlené výztuže na spodní hranici doporučeného dávkování.

Receptury (tabulka 4) byla navrženy s ohledem na požadavky na odolnost proti prostředí XF4 (vysoké nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky) a tedy s minimální dávkou cementu 340 kg/m^3 , s minimálním provzdušněním 4 %, s maximálním vodním součinitelem 0,45, s minimální pevností betonu C 30/37 a s kamenivem odolným proti zmrazování. Dávky přidávaných vláken jsou znázorněny v tabulce 5.

Tabulka 4: Dávkování surovin na m^3

Označení	Dávka na m^3	Jednotka
Cement CEM I 42,5 R (m_c)	390	kg
w/c	0,45	-
Voda	176	l
Kamenivo 0/4	884	kg
Kamenivo 4/8	136	kg
Kamenivo 8/16	680	kg
Provzdušňující přísada (0,2 % k m_c)	0,78	kg
Superplastifikátor (0,9 % k m_c)	3,51	kg

Tabulka 5: Dávka vláken na m³

Označení	Dávka na m ³	Jednotka
Dramix RC 65/60 BN	25	kg
Dramix OL 13/20	25	kg
Dramix OL 13/20	80	kg
BeneSteel 55	5	kg
BASF MasterFibre 401	5	kg
Stavon 12 mm	0,9	kg
Anti – Crack HP 12 mm	0,9	kg
Anti – Crack HD 12 mm	0,9	kg
Čedičová vlákna	10	kg

4.3 Použité suroviny

- **Cement CEM I 42,5 R:** Portlandský cement z Hranické cementárny s obsahem minimálně 95 % portlandského slinku, pevnostní třída 42,5 s rychlým nástupem počátečních pevností
- **Voda:** Pitná voda z vodovodního řádu města Ostravy
- **Kamenivo 0/4 Tovačov:** Drobné těžené kamenivo mokrým způsobem
- **Kamenivo 4/8 Tovačov:** Hrubé těžené kamenivo mokrým způsobem
- **Kamenivo 8/16 Hrabůvka:** Hrubé drcené kamenivo z Moravské droby
- **Provzdušňující přísada:** MasterAir 214 je provzdušňující přísada na bezchloré bázi, pomocí které je možné vytvořit systém ultra-stabilních vzduchových pórů kolovitého tvaru. Póry mají optimální poměr a vysoký měrný povrch. Doporučené dávkování je 0,05 až 1,5 %.
- **Superplastifikátor:** MasterGlenium SKY 665 je superplastifikační přísada vhodná do transportbetonu na polykarboxylátové bázi s doporučeným dávkováním mezi 0,2 a 3 % ve vztahu k cementu

- **Dramix RC 65/60 BN:** Rozptýlená ocelová výztuž délky 60 mm vyrobená z drátu o průměru 0,9 mm a pevností v tahu 1160 MPa, na konci opatřená háčky jednou zahnutými. Doporučené dávkování minimálně 15 kg/m³ pro vytvoření výztužné sítě.
- **Dramix OL 13/20:** Krátké rovné ocelové drátky délky 13 mm. Rozptýlená výztuž je vyrobena z drátu o pevnosti 2750 MPa a průměru 0,21 mm.
- **BeneSteel 55:** Polymerová makrovlákna o délce 55 mm a příčně profilovaným zákrutem. Průměr vlákna je 0,48 mm a pevnost vlákna v tahu 610 MPa. Doporučené dávkování od 1 kg/m³ až přes 4 kg/m³ pro silně namáhané konstrukce.
- **BASF MasterFibre 401:** Vlákna vyrobená z polyvinilalkoholu o délce 12 mm. Pevnost v tahu vlákna je 800 MPa a jeho průměr 0,16 až 0,24 mm. Vlákna jsou rovná bez povrchové úpravy.
- **Stavon 12 mm:** Polypropylenová vlákna o délce 12 mm s tažností 70 až 120 %. Průměr vlákna je 0,018 až 0,032 mm. Doporučené dávkování je mezi 0,6 a 0,9 kg/m³.
- **Anti – Crack HP 12 mm:** Alkalickovzdorné skleněné vlákno tvořené nerozplavitelnou lubrikací a asi 100 kusy jednotlivých skleněných vláken délky 12 mm s pevností v tahu 1700 MPa.
- **Anti – Crack HD 12 mm:** Alkalickovzdorné skleněné vlákno. Vlákno je obaleno rozplavitelnou matricí, která při styku s vodou uvolní jednotlivá vlákna. Délka vlákna je stříhána na 12 mm. Průměr jednotlivého vlákna je 0,014 mm.
- **Čedičová vlákna:** Vlákno tvořené z čediče o délce 43 mm a pevností v tahu 1080 MPa. Průměr vlákna je 0,65 mm a dávkuje se v minimálně 5 kg/m³.

4.4 Metodika přípravy směsi a jeho ošetřování

Pro ověření vlivu chemických rozmrazovacích látek a mrazuvzdornosti bylo připraveno z každé záměsi tři krychle o hraně 150 mm a pět těles o tvaru hranolu s rozměry 100x100x400 mm. Pro tato tělesa bylo použito 35 litrů betonu se složením dle tabulky 6.

Tabulka 6: Dávka surovin na zkušební tělesa

Označení	Dávka na 34 l	Jednotka
Cement CEM I 42,5 R	13,26	kg
w/c	0,45	-
Voda	5,97	l
Kamenivo 0-4	30,06	kg
Kamenivo 4-8	4,62	kg
Kamenivo 8-16	23,12	kg
Provzdušňující přísada (0,2 % k mc)	26,52	g
Superplastifikátor (0,9 % k mc)	119,34	g

Cement a kamenivo bylo naváženo s přesností na 50 g. Voda byla naměřena v objemovém válci s přesností na 10 ml a provzdušňující přísada a superplastifikátor byl navážen s přesností na 0,2 g.

Betonová směs byla připravována v míchačce s nuceným oběhem, a to tak, že nejprve bylo do ní umístěno kamenivo. Hmotnost kameniva byla upravena dle vlhkosti a následně bylo kamenivo zamícháno. Po něm byl přidán cement a opět došlo k zamíchání záměsi. Následným krokem bylo přidání vody, jejíž hmotnost byla upravena o vodu obsaženou ve vlhkosti kameniva. Posledním krokem bylo přidání plastifikátoru, se kterým byla směs opět promíchána a přidání provzdušňující přísady.

Po přípravě byl beton plněn do předem připravených plastových forem opatřených odbedňujícím olejem pro přípravu krychlí a předem připravených ocelových trámů, také opatřených odbedňujícím olejem. Tělesa byla hutněna na vibračním stolku a uložena na podlaze laboratoře. Po 24 hodinách byla tělesa odbedněna, popsána a umístěna do vodního prostředí.

5 Výsledky měření

5.1 Zkoušky čerstvého betonu

Pro porovnání jednotlivých záměsí byly prováděny vždy zkoušky rozlití, obsahu vzduchu a objemové hmotnosti čerstvého betonu. Zkoušky rozlití a obsahu vzduchu probíhaly dvakrát. První měření probíhalo dvě minuty po přidání provzdušňující přísady za stálého míchání. Po tomto měření byla do betonové směsi přidána vlákna a proběhlo další míchání po dobu jedné minuty a následně se opět měřil obsah vzduchu a rozlití směsi. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla měřena po přidavku vláken. Výsledky obsahu vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 7, naměřené hodnoty rozlití jsou uvedeny v tabulce 8. a Objemové hmotnosti čerstvého betonu jsou znázorněny na obrázku 7.

Tabulka 7: Měřený obsah vzduchu

Označení	Obsah vzduchu po 2 min míchání [%]	Obsah vzduchu po 3 min míchání [%]
Referenční bez vláken	5,8	6,8
RC 65/60 BN 25 kg.m ³	4,6	6,5
OL 13/20 25 kg.m ³	4,0	6,2
OL 13/20 80 kg.m ³	4,5	6,4
AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m ³	5,9	7,0
AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m ³	5,0	6,9
BeneSteel 55 5 kg.m ³	4,8	6,4
Stavon 12 mm 0,9 kg.m ³	5,8	6,9
MasterFiber 401 5 kg.m ³	5,8	7,5
Čedičová vlákna 10 kg.m ³	4,4	5,8

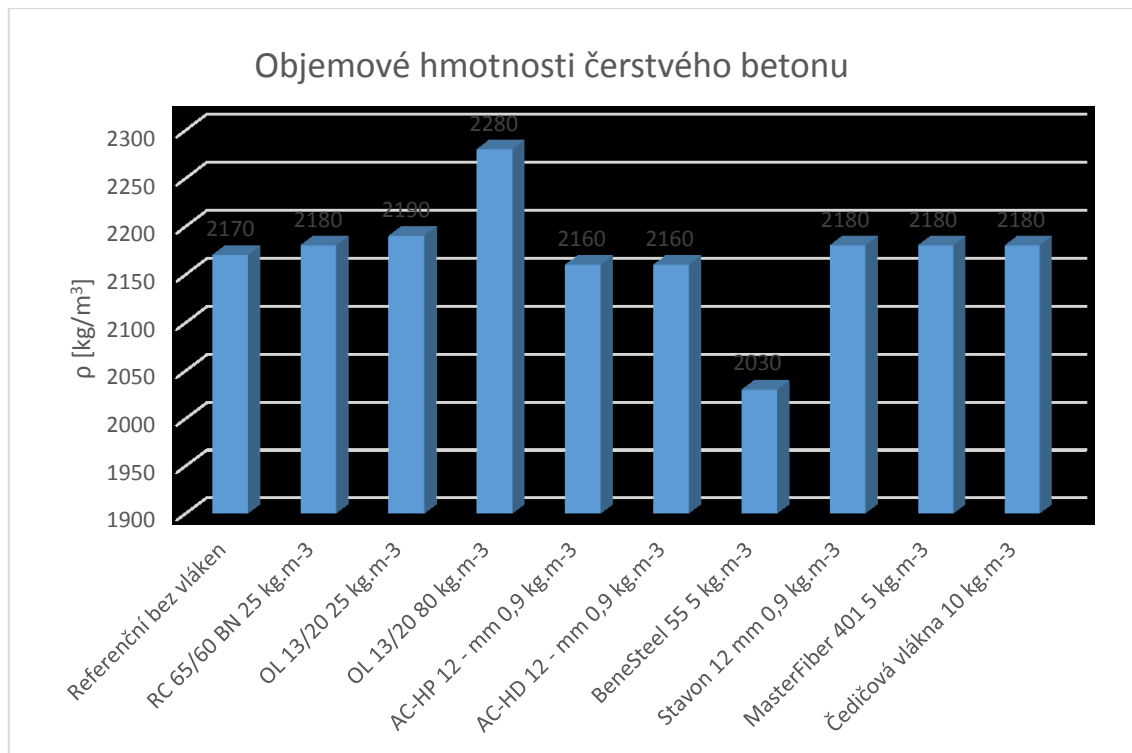
Tabulka 8: Konzistence záměsí

Označení	Rozlítí po 2 min [mm]	Konzistence	Rozlítí po 3 min [mm]	Konzistence
Referenční bez vláken	490	F4	480	F3
RC 65/60 BN 25 kg.m ³	520	F4	510	F4
OL 13/20 25 kg.m ³	550	F4	500	F4
OL 13/20 80 kg.m ³	550	F4	330	F1
AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m ³	480	F3	440	F3
AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m ³	510	F4	450	F3
BeneSteel 55 5 kg.m ³	510	F4	370	F2
Stavon 12 mm 0,9 kg.m ³	500	F4	350	F2
MasterFiber 401 5 kg.m ³	490	F4	360	F2
Čedičová vlákna 10 kg.m ³	550	F4	460	F3

Při přípravě byla snaha vytvořit záměsí, které by měly podobný obsah vzduchu a konzistenci jako záměsí před přidávkem vláken. Obsahy vzduchu před přidávkem vláken se pohybovaly mezi 4,0 a 5,9 % a jejich konzistence byla F4 – směs velmi měkká, s výjimkou záměsí, do které byla následně přidána skleněná vlákna AC – HP.

Při porovnání obsahu vzduchu referenční směsí a ostatních záměsí po přidání vláken vyplývá, že na zvýšení obsahu vzduchu měla pozitivní vliv všechna vlákna kromě polypropylenových vláken STAVON a skleněných vláken AC – HD.

Významný vliv na snížení konzistence rozlítím je pozorovatelný u směsí s přidávkem polypropylenových vláken STAVON. Konzistence sice také výrazně klesla i u dalších záměsí, ale přidavek vláken byl v těchto vzorcích násobně vyšší.



Obrázek 7: Objemové hmotnosti čerstvého betonu

Z naměřených objemových hmotností je patrné, že přidavek vláken nemá výrazný účinek na změnu objemové hmotnosti. Nejvýraznější změna je pozorovatelná u betonu s přidavkem vláken BeneSteel 55, u kterého se snížila objemová hmotnost o 140 kg/m^3 při porovnání s referenčním vzorkem. Snížení objemové hmotnosti bylo způsobeno pravděpodobně jednak malou objemovou hmotností vláken a také tím, že vlákna se rozštěpují a zabírají poměrně velký objem. Dále je také vidět, že vysoká dávka ocelových drátků Dramix OL 13/20 zvýšila objemovou hmotnost čerstvého betonu o 110 kg/m^3 při porovnání s referenčním vzorkem.

5.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

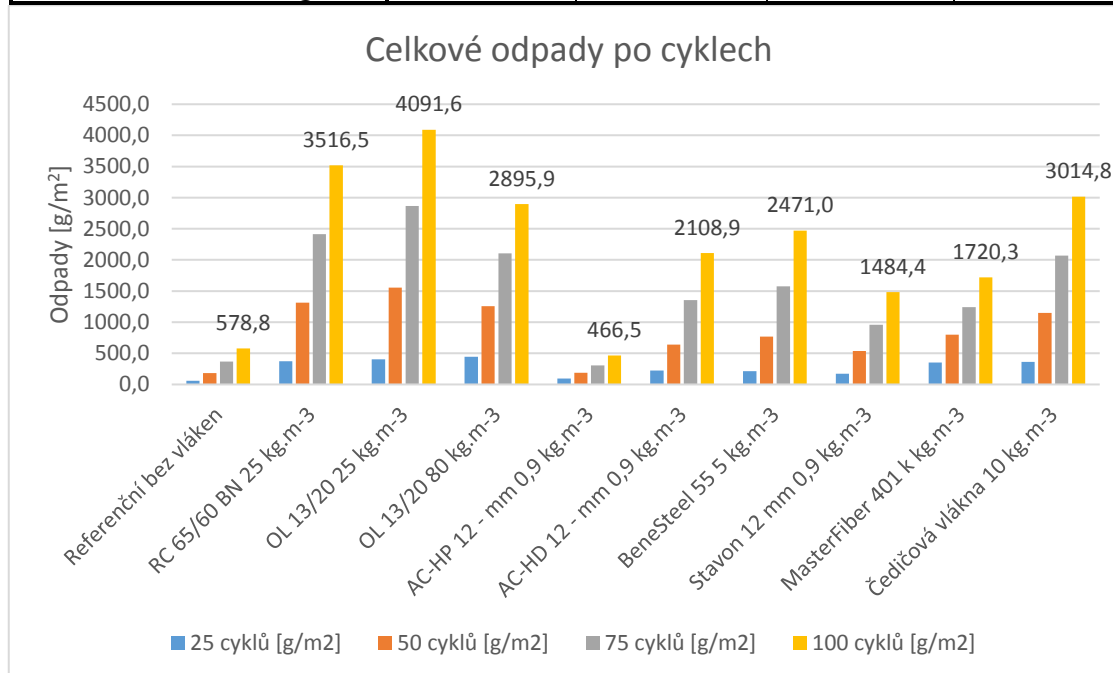
Pro porovnání vlivu mrazu na beton s rozptýlenou výztuží byly jednotlivé záměsi podrobeny zkoušce na odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám do 100. cyklu. Zkouška CHRL vypovídá o povrchové struktuře betonu. Pro porovnání vlivu mrazu na vnitřní strukturu byla uskutečněna zkouška mrazuvzdornosti taktéž do 100. cyklu. Pro kontrolu vývoje betonu během zmrazovacích cyklů bylo po každém 25. cyklu provedeno měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzivní metodou.

5.2.1 Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Měření odpadů probíhalo na třech krychlich o délce strany 150 mm, v tabulce 9 jsou zaznamenány průměrné odpady z jednotlivých záměsí. Na obrázku 8 je vyznačen nárůst odpadů po 25 cyklech.

Tabulka 9: Odpady zkoušky CHRL

Označení	25 cyklů [g/m ²]	50 cyklů [g/m ²]	75 cyklů [g/m ²]	100 cyklů [g/m ²]
Referenční bez vláken	59,8	180,9	366,4	578,8
RC 65/60 BN 25 kg.m ⁻³	372,8	1311,5	2412,0	3516,5
OL 13/20 25 kg.m ⁻³	405,4	1555,7	2865,5	4091,6
OL 13/20 80 kg.m ⁻³	444,2	1254,4	2104,7	2895,9
AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m ⁻³	94,9	188,2	305,1	466,5
AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m ⁻³	221,4	638,7	1354,4	2108,9
BeneSteel 55 5 kg.m ⁻³	212,4	768,6	1577,9	2471,0
Stavon 12 mm 0,9 kg.m ⁻³	170,4	536,2	959,5	1484,4
MasterFiber 401 k kg.m ⁻³	350,5	797,5	1239,7	1720,3
Čedičová vlákna 10 kg.m ⁻³	359,9	1146,7	2067,2	3014,8



Obrázek 8: Grafické srovnání odpadů zkoušky CHRL

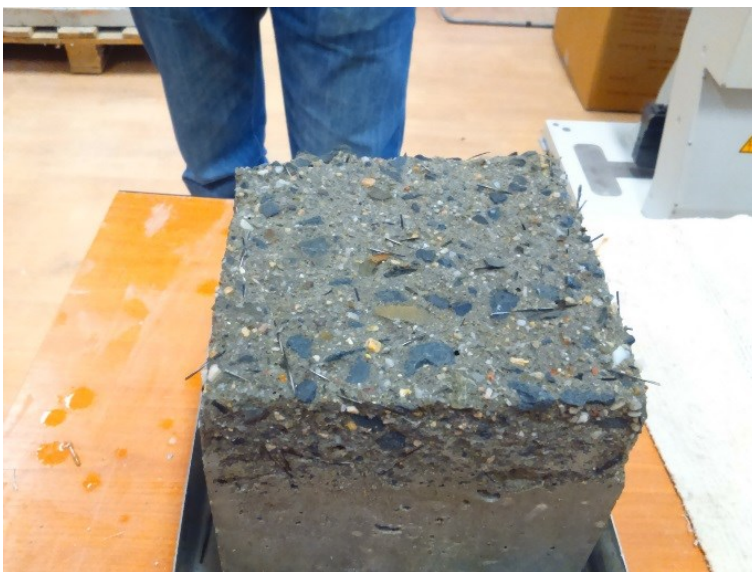
Z výsledků je patrné, že všechna vlákna mají nepříznivý vliv na odolnost proti CHRL. Pouze u vláken AC-HP se zdá, že mají nulový nebo dokonce příznivý účinek, ale těchto vláken byla velice malá dávka, a proto výsledný beton měl spíše charakter referenční záměsí. Lze vypožorovat, že celkově ve srovnání různých materiálů má nejhorší vliv

přídavek ocelových vláken. Úplně nejhoršího odpadu dosáhla záměs s přídavkem 25 kg/m³ drobných ocelových vláken OL 13/20.

Z výšky, do které se dostalo poškození povrchu u jednotlivých záměsí, je patrné, že vlákna a prostor kolem nich funguje jako místo pro transport chloridu do hloubky betonu a tím přispívá k jeho degradaci. Tento jev byl nejvýznamněji pozorovatelný u vzorků, do kterých byla přidána čedičová vlákna a polyvinilalkoholová vlákna MasterFibre 401. Takto degradované vzorky jsou na obrázcích 9 a 10.



Obrázek 9: Vzorek s přídavkem PVA vláken



Obrázek 10: Vzorek s čedičovými vlákny

Jako nejméně nepříznivý na povrchovou strukturu se zdá přídavek polypropylenových vláken STAVON. Ale jak je možné vidět na obrázku 11, se přispěním těchto vláken vytvořila houbovitá struktura, která by za běžných podmínek okamžitě odpadla. Výsledky množství odpadu povrchového tmele jsou takto malé jen v důsledku toho, že pouhým proudem vody, jak je určeno v normě, se tato houbovitá struktura neuvolnila, ale mechanicky šla velice jednoduše odstranit. Kdyby byla do výsledku započítána i tato odstraněná struktura výsledný odpad po 100 cyklech by se zvedl na 2092,7 g/m².



Obrázek 11: Vzorek po CHRL s polypropylenovými vlákny

Ostatní fotografie zkušebních tělech po zkoušce odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a jejich odpady jsou v příloze 1.

5.2.2 Mrazuvzdornost a ultrazvuková metoda

Zkouška mrazuvzdornosti probíhala na hranolech o rozměrech 100x100x400 mm. Pro zkoušku bylo vyrobeno pět těles, přičemž tři byla použita jako referenční tělesa pro pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech. Do mrazicího zařízení byla umístěna pouze dvě

tělesa z každé záměsi z důvodu kapacity. Výsledky mrazuvzdornosti jsou uvedeny v tabulce 10.

Pomocí ultrazvukové impulzivní metody byl vždy po 25 cyklech změřen dynamický modul pružnosti, aby bylo možné sledovat vývoj vnitřní struktury. Zkouška probíhala pomocí přístroje TICO se sondami o frekvenci 54 kHz, který je na obrázku 12. Výsledky ultrazvukové metody jsou uvedeny v tabulce 11.



Obrázek 12: Zkušební přístroj TICO pro měření ultrazvuku

Tabulka 10: Pevnosti v tahu za ohybu a mrazuvzdornost

Označení	f [Mpa] před zmrazováním	f [Mpa] po zmrazování	Součinitel mrazuvzdornosti
Referenční bez vláken	7,7	7,4	0,97
RC 65/60 BN 25 kg.m ³	7,2	7,3	1,00
OL 13/20 25 kg.m ³	7,1	7,9	1,10
OL 13/20 80 kg.m ³	7,6	8,5	1,12
AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m ³	7,1	8,0	1,08
AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m ³	7,0	7,8	1,11
BeneSteel 55 5 kg.m ³	7,1	8,0	1,12
Stavon 12 mm 0,9 kg.m ³	7,0	7,2	1,03
MasterFiber 401 5 kg.m ³	7,3	8,1	1,11
Čedičová vlákna 10 kg.m ³	7,5	7,8	1,03

Z výsledků zkoušky mrazuvzdornosti se dá jednoznačně říct, že veškeré záměsi byly mrazuvzdorné, protože součinitel je větší než 0,75. Dále je zde patrné, že rozptýlená výztuž zlepšuje chování vnitřní struktury těles při zkoušce, protože všechna vyztužená tělesa dosáhla vyšší pevnosti po mrazu než před ním oproti referenčnímu tělesu, kde bylo možné zaznamenat pokles pevnosti.

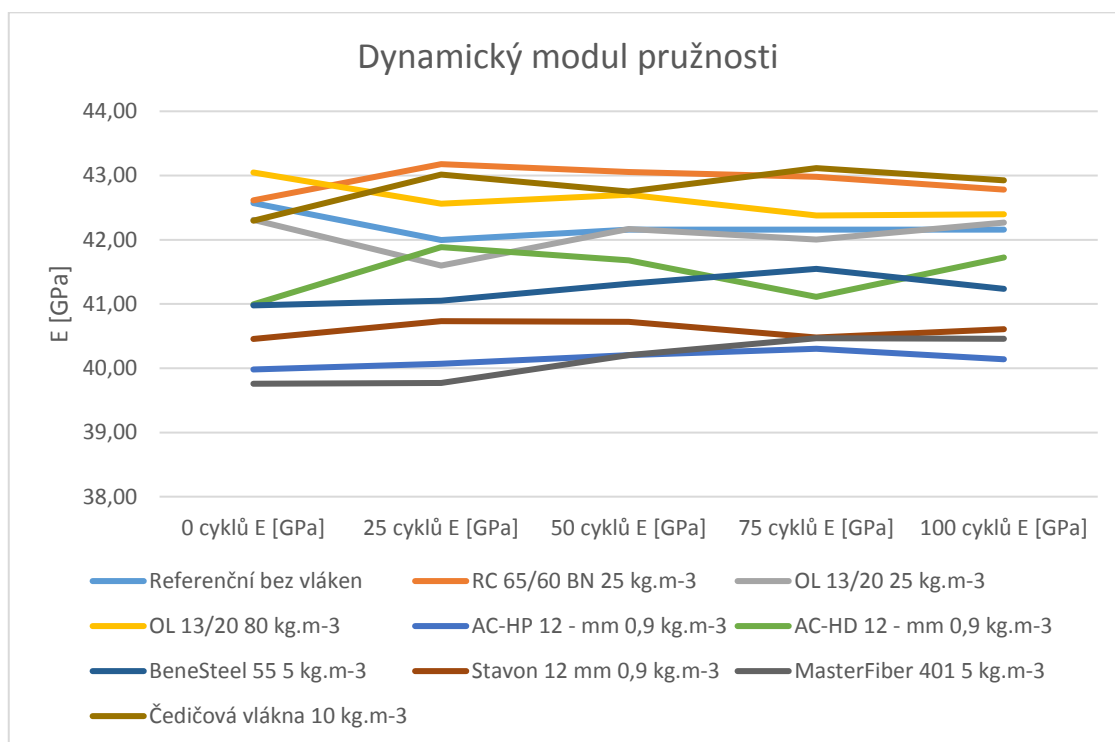
Vyšší pevnosti po zkoušce jsou způsobeny tím, že beton po mrazu je dva krát starší než tělesa, s kterými je srovnávám a měl během doby, kdy docházelo k ohřevu těles, čas hydratovat.

K nejlepšímu nárůstu došlo u směsi s přídavkem 80 kg/m³ malých ocelových drátků OL 13/20 a u polymerních vláken BeneSteel 55, a to konkrétně o 12 %. Vzhledem k tomu, že v mrazu byla umístěna pouze 2 tělesa, může být výsledek tímto zkreslen. Celkové rozdíly mezi jednotlivými záměsemi nebyly velké.

Tabulka 11: Výsledky měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukem

Označení	0 cyklů	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
	E_{cu} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{cu} [GPa]
Referenční bez vláken	42,57	42,00	42,16	42,16	42,16
RC 65/60 BN 25 kg.m ³	42,61	43,18	43,05	42,98	42,78
OL 13/20 25 kg.m ³	42,31	41,60	42,17	42,00	42,27
OL 13/20 80 kg.m ³	43,05	42,56	42,70	42,38	42,39
AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m ³	39,98	40,07	40,21	40,30	40,14
AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m ³	40,99	41,89	41,68	41,11	41,72
BeneSteel 55 5 kg.m ³	40,98	41,05	41,31	41,55	41,24
Stavon 12 mm 0,9 kg.m ³	40,46	40,73	40,72	40,48	40,61
MasterFiber 401 5 kg.m ³	39,76	39,77	40,20	40,47	40,46
Čedičová vlákna 10 kg.m ³	42,30	43,01	42,75	43,12	42,93

Výsledky zkoušky pomocí ultrazvuku naznačují, že dynamický modul pružnosti se během zkoušky mrazvzdornosti neměnil, protože se jednotlivé hodnoty před začátkem zkoušky a po jejím ukončení liší obvykle pouze o 0,5 GPa nebo zůstávají nezměněné. Téměř lineární vývoj je možné vidět na obrázku 13.



Obrázek 13: Grafický vývoj dynamického modulu pružnosti

6 Závěr

Cílem této práce bylo ověření vlivu agresivního prostředí mrazu na vláknobetony v porovnání s referenční směsí. Pro zjištění tohoto vlivu byly vzorky vystaveny chemickým rozmrazovacím látkám a zkoušce mrazuvzdornosti.

Z výsledků rozlití a obsahu vzduchu před přidáním vláken (po dvou minutách míchání) lze určit, že jednotlivé záměsi jsou podobné, a tedy je možné je srovnávat. Dále pak z výsledků měření rozlití a vzduchu po třech minutách míchání se dá vypožorovat, že významný vliv na snížení konzistence mají vlákna STAVON, již ve velice malém dávkování. Dle změn objemových hmotností lze také vyčíst, že vlákna se příliš nepodílejí na zvýšení hmotnosti. Změna, kdy došlo k zvýšení objemové hmotnosti se dá vypožorovat pouze u přidání velkého množství ocelových vláken a snížení bylo patrné u polymerních vláken BeneSteel 55.

Při porovnání referenční záměsi bez vláken a ostatních záměsí měly všechny vzorky vyšší množství odpadu cementového tmele, u některých vzorků až více než osmi násobnou. U referenčního vzorku odpad dosáhl $578,8 \text{ g/m}^2$, u dávky 25 kg/m^3 malých ocelových vláken byl odpad $4091,6 \text{ g/m}^2$. Zajímavým výsledkem bylo zjištění, že polypropylenová vlákna STAVON způsobují degradaci povrchu, která dle normy nevychází příliš špatně, ale povrch je natolik rozrušen, že ho lze mechanicky snadno odloučit. Dále se ukázalo, že vlákna z různých materiálů mají rozdílný účinek na transport chloridů okolo nich, protože bylo na okrajích vzorků vidět, že porušení bylo ve značně vyšší úrovni, než byla hladina roztoku.

Všechny vzorky s přidavkem vláken měly vyšší pevnosti po zmrazovacích cyklech v porovnání s referenčními vzorky, které byly odzkoušeny před zmrazováním. Rozdílně tomu bylo jen u referenčního vzorku bez vláken, kde jeho pevnost po zmrazování klesla. Jako nejlepší se jevily varianty, kdy byla do betonu přidána vysoká dávka malých ocelových drátků, tedy 80 kg/m^3 vláken Dramix OL 13/20 anebo polymerních vláken BeneSteel 55. Během této zkoušky byla prováděna kontrola vývoje dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou, kde z výsledků vyplývá, že na namíchané záměsi mráz neměl významný účinek, protože se během cyklů dynamický modul prakticky neměnil.

Z výsledků vyplývá, že přídavek rozptýlené výztuže má pozitivní vliv na odolnost betonu proti zmrazování. Přidaná vlákna zvyšují pevnost v tahu, proto krystalizační tlaky ledu v menší míře narušují strukturu betonu. Pokud jsou při působení mrazu přítomny i chemické rozmrazovací látky, odolnost povrchové vrstvy vláknobetonu klesá. Z toho se dá usoudit, že vlákna fungují jako místa, kolem nichž se voda s chloridy snadno šíří a poté společně s působením mrazu snadno rozrušují povrchový cementový tmel.

Seznam použité literatury

1. PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
2. COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
3. KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA. *Drátkobetonové konstrukce*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999. ISBN 80-86364-00-3.
4. NEWMAN, John a Ban Seng CHOO, ed. *Advanced concrete technology: Processes*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-5105-9.
5. HELA, Rudolf. *Technologie betonu II*. Brno: VUT v Brně, 2007.
6. KOHOUTKOVÁ Alena. Vláknobetony – blýská se na lepší časy? *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. 2010, roč. 2010, č. 2, s. 3-6. ISSN 1213-3116.
7. Vláknobeton [online]. EBETON [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton>
8. TRTÍK, Karel. Vyztužování struktury betonu ocelovými vlákny. In: *METAL 2000: 9. mezinárodní metalurgická konference: 16. -18. 5. 2000, Ostrava* [online]. Ostrava: Tanger, 2000. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/>
9. BEŇO, Jaroslav, Jan PRUŠKA a Matouš HILAR. Betonová ostění podzemních staveb – nové trendy. *Stavební obzor* [online]. 2011, roč. 20, č. 3, s. 65-68 [vid. 2017-04-27]. ISSN 1210-4027. Dostupné z: <http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so032011.pdf>
10. KOHOUTKOVÁ Alena. *Uplatnění vláknobetonu v prefabrikovaných prvcích* [online]. ASB-portal.cz [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/uplatneni-vlaknobetonu-vprefabrikovanych-prvcich>
11. KOHOUTKOVÁ Alena. *Betony s rozptýlenou výztuží* [online]. iMaterialy.cz [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/betony-s-rozptylenou-vyztuzi_41257.html

12. HILAR, Matouš. Využití vláknobetonu pro výstavbu tunelů pod letišťem Heathrow. In: *Geotechnické problémy líniových stavieb, Bratislava 30.- 31. máj 2011* [online]. Praha: 3G Consulting Engineers s.r.o. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.3-g.cz/uploaded/publikace/2011---vlaknobeton-pod-heathrow.pdf>
13. COUFAL, Robert. Betony pro vodonepropustné a masivní konstrukce. *Materiály pro stavbu*. 2013, roč. 19, č. 8, s. 38-43. ISSN 1213-0311.
14. Fibres [online]. KrampeHarex GmbH & Co. KG. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.krampeharex.com/en/fibres/>
15. Construction [online]. Bekaert, © 2015. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.bekaert.com/#prodtab1>
16. Cem-FIL® glass fiber, the solution for concrete reinforcement [online]. Owens Corning, © 1999–2017. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.ocvreinforcements.com/CemFIL/>
17. ČSN EN 14889-1. Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007.
18. ČSN EN 14889-2. Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007.
19. ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: Český normalizační institut, 2003.
20. ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003.
21. ČSN 73 1371. Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: Český normalizační institut, 2011.
22. ČSN EN 12350-5. Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlítím. Praha: Český normalizační institut, 2009.
23. ČSN EN 12350-7. Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Český normalizační institut, 2009.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zatěžovací graf pevnosti v tlaku [4].....	6
Obrázek 2: Zatěžovací graf pevnosti v tahu za ohybu [4]	7
Obrázek 3: PVA vlákna	14
Obrázek 4: Čedičová vlákna	16
Obrázek 5: Forma a střešací stolek zkoušky rozlítím	18
Obrázek 6: Tlakový hrnec.....	19
Obrázek 7: Objemové hmotnosti čerstvého betonu	29
Obrázek 8: Grafické srovnání odpadů zkoušky CHRL	30
Obrázek 9: Vzorek s přídavkem PVA vláken.....	31
Obrázek 10: Vzorek s čedičovými vlákny.....	31
Obrázek 11: Vzorek po CHRL s polypropylenovými vlákny	32
Obrázek 12: Zkušební přístroj TICO pro měření ultrazvuku	33
Obrázek 13: Grafický vývoj dynamického modulu pružnosti.....	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti betonové matrice a vláken [4]	11
Tabulka 2: Stupeň konzistence	19
Tabulka 3: Stupně porušení při zkoušce CHRL	21
Tabulka 4: Dávkování surovin na m ³	23
Tabulka 5: Dávka vláken na m ³	24
Tabulka 6: Dávka surovin na zkušební tělesa	26
Tabulka 7: Měřený obsah vzduchu	27
Tabulka 8: Konzistence záměsí	28
Tabulka 9: Odpady zkoušky CHRL	30
Tabulka 10: Pevnosti v tahu za ohybu a mrazuvzdornost	34
Tabulka 11: Výsledky měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukem	35

Seznam příloh

Příloha 1: Referenční tělesa po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 2: Tělesa s vlákny RC 65/60 BN 25 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 3: Tělesa s vlákny OL 13/20 25 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 4: Tělesa s vlákny OL 13/20 80 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 5: Tělesa s vlákny AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 6: Tělesa s vlákny AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

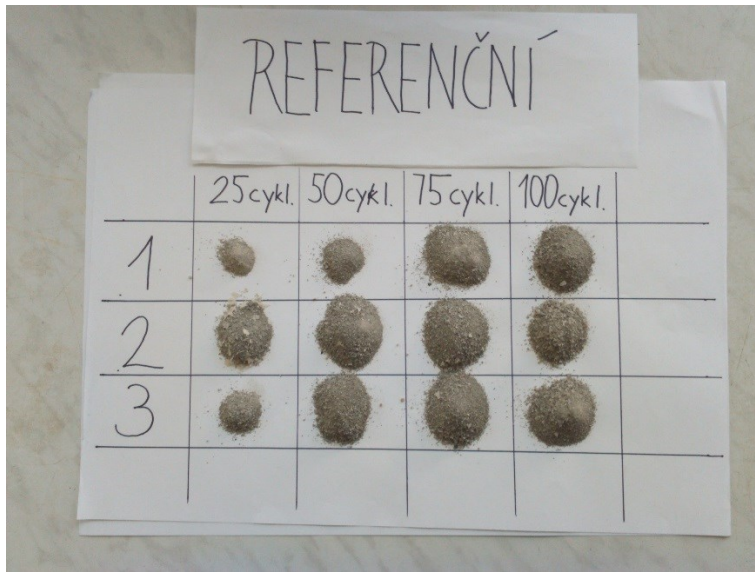
Příloha 7: Tělesa s vlákny BeneSteel 55 5 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 8: Tělesa s vlákny Stavon 12 mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 9: Tělesa s vlákny MasterFiber 401 5 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

Příloha 10: Tělesa s čedičovými vlákny 10 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

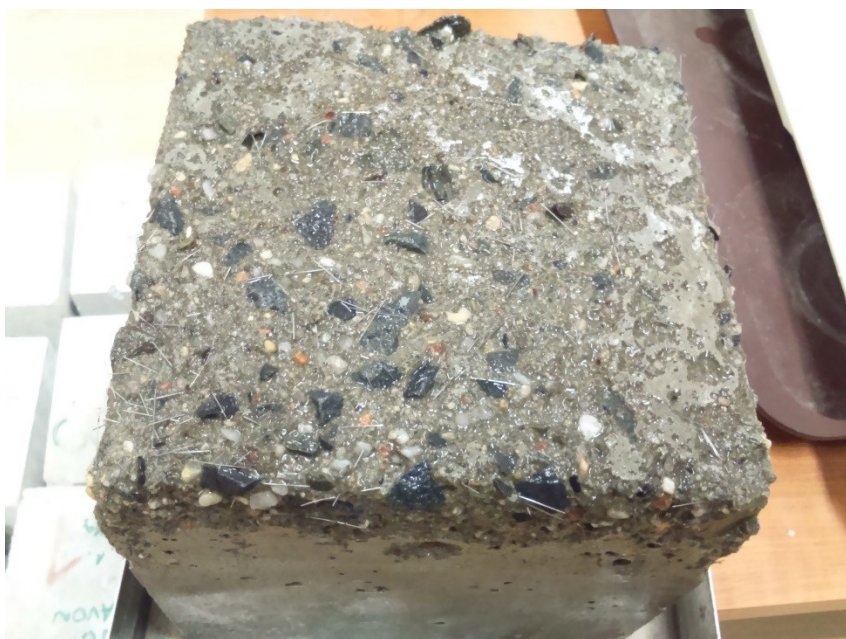
Příloha 1: Referenční tělesa po zkoušce CHRL a jejich odpady



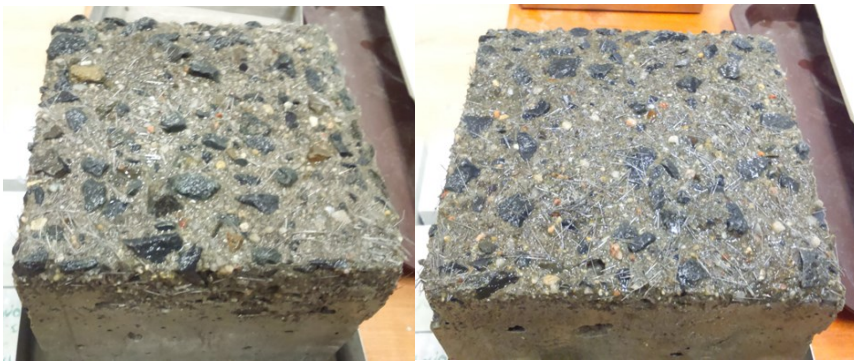
Příloha 2: Tělesa s vlákny RC 65/60 BN 25 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



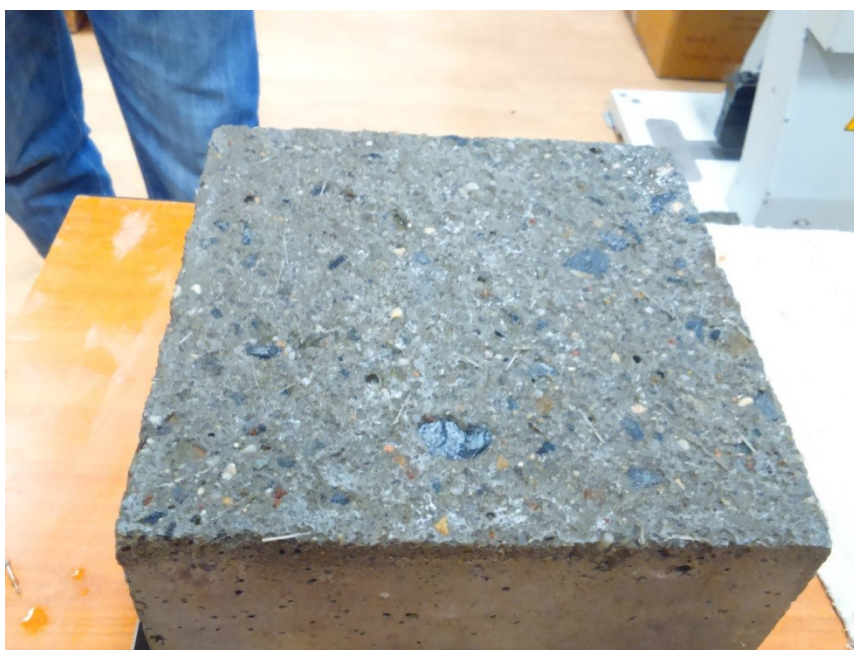
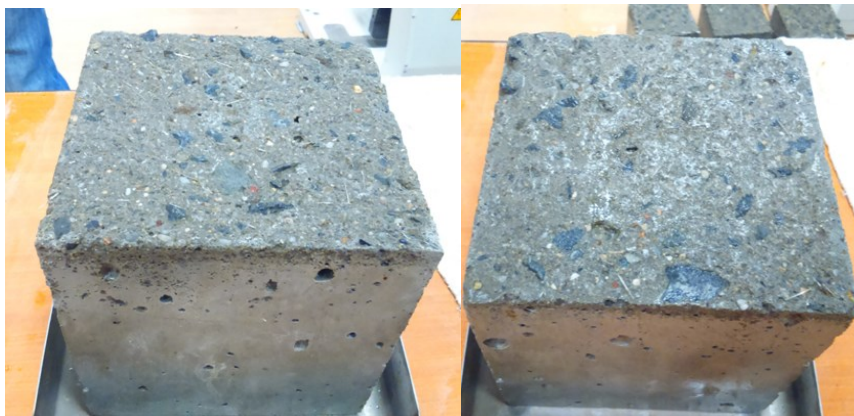
Příloha 3: Tělesa s vlákny OL 13/20 25 kg.m³po zkoušce CHRL a jejich odpady



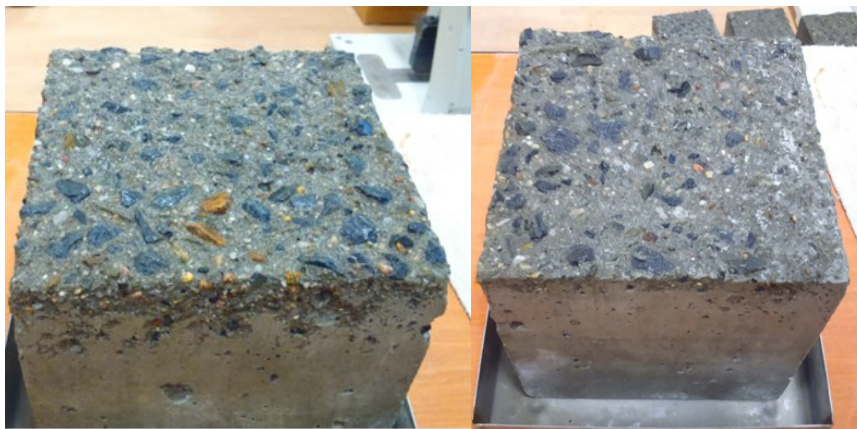
Příloha 4: Tělesa s vlákny OL 13/20 80 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



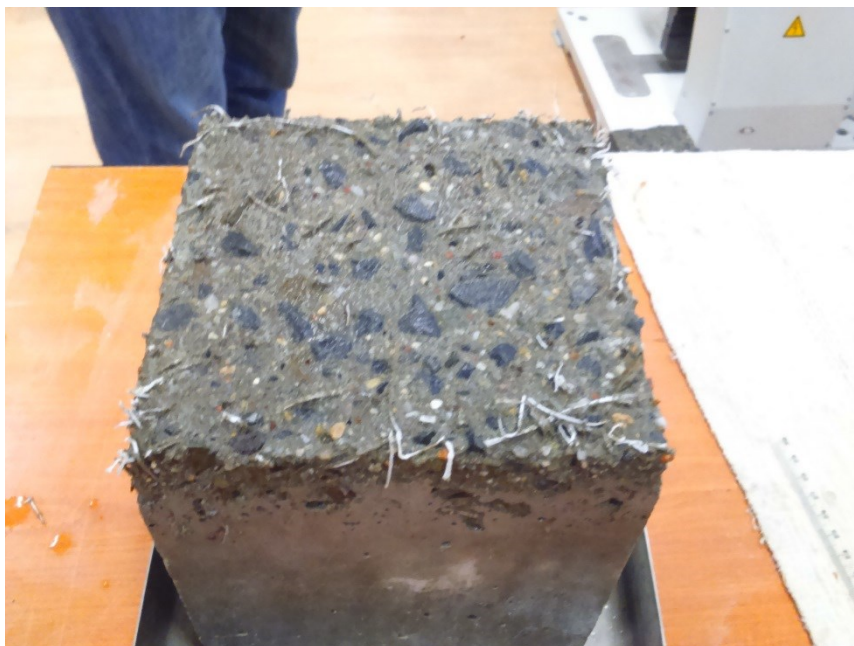
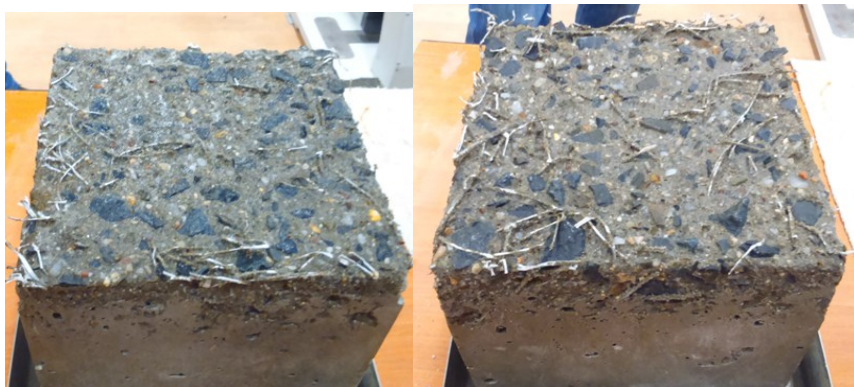
Příloha 5: Tělesa s vlákny AC-HP 12 - mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



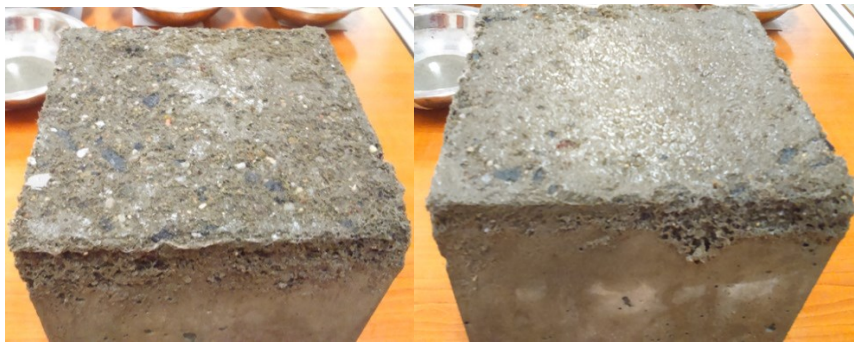
Příloha 6: Tělesa s vlákny AC-HD 12 - mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



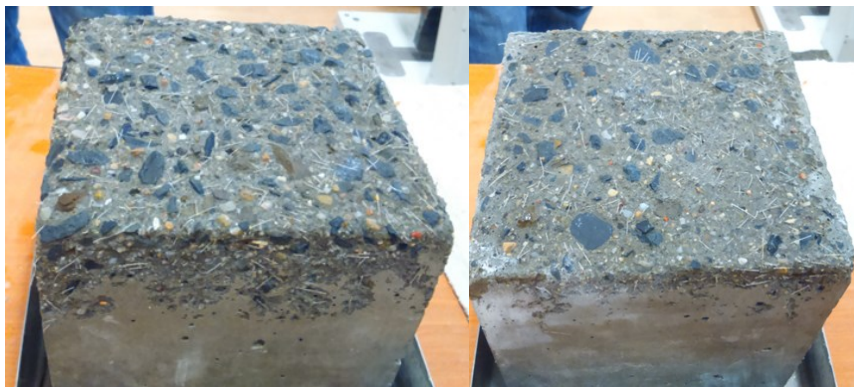
Příloha 7: Tělesa s vlákny BeneSteel 55 5 kg/m^3 po zkoušce CHRL a jejich odpady



Příloha 8: Tělesa s vlákny Stavon 12 mm 0,9 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



Příloha 9: Tělesa s vlákny MasterFiber 401 5 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady



Příloha 10: Tělesa s čedičovými vlákny 10 kg.m³ po zkoušce CHRL a jejich odpady

