



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VLIVU ORGANICKÝCH VLÁKEN NA POŽÁRNÍ ODOLNOST BETONU

STUDY OF THE INFLUENCE ORGANIC FIBRES ON THE FIRE RESISTANCE
OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Klobása

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Specializace | bez specializace |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Bc. Jan Klobása |
| Název | Studium vlivu organických vláken na požární odolnost betonu |
| Vedoucí práce | Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D. |
| Datum zadání | 31. 3. 2021 |
| Datum odevzdání | 14. 1. 2022 |

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

1. Arnon Bentur, Sidney Mindess, Fibre Reinforced Concrete, Taylor & Francis, 2007
2. Gideon P.A.G. van Zijl, Folker H. Wittmann, F. Wittmann, G. Van Zijl, Durability of Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cement-Based Composites (SHCC), Springer Netherlands, 2011
3. Colin D Johnston, Fiber-Reinforced Cements and Concretes, Taylor & Francis, 2010
4. D. J. Kim, K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil, Gustavo J. Parra-Montesinos, Hans W. Reinhardt, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: HPFRCC 6
5. Harvinder Singh, Steel Fiber Reinforced Concrete, Springer, 2017
6. Collepardi, Mario, Moderní beton, ČKAIT, 2009
7. Normy, předpisy, tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce bude věnována studiu vlivu organických vláken na odolnost betonu při působení extrémně vysokých teplot, které simulují působení požáru. V těchto případech, kdy je beton extrémně zatěžován vysokou teplotou mohou vlákna pozitivně ovlivnit odolnost betonu vůči tomuto zatížení a snížit tak bezpečnostní rizika. Současně je nutné sledovat základní charakteristiky betonu před působením teplotního zatěžování i po něm, protože vlivem teplot dochází také ke změnám ve struktuře betonu.

V teoretické části by měla být popsána problematika použití vláken v závislosti na jejich druhu a jejich vlivu na vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu, ale také v souvislosti s extrémním teplotním zatěžováním simulujícím požár. Kromě základních principů a vlivu vláken na vlastnosti betonu obecně, by měla být studována i problematika jejich dávkování a geometrie v souvislosti s teplotním zatížením a návrhem betonu. Je očekáváno shrnutí aktuálních poznatků v této oblasti. Na závěry a poznatky vyvozené z teoretické části, bude navazovat praktická část, kde budou analyzovány vybrané druhy vláken. Přepokládá se se využití recyklovaných vláken z PET lahví, celulósových, ale i standardně využívaných polyetylenových vláken. Tako vlákna by se měla lišit svojí materiálovou podstatou i geometrií. Budou navrženy a vyrobeny betony, na kterých bude prakticky studována funkce vybraných druhů vláken při zatěžování extrémně vysokou teplotou okolo 1 000 °C při sledování chování betonu a změně jeho vlastností. Na základě teoretických poznatků a praktických výsledků zkoušek budou vyvozeny závěry z působení vysokých teplot ve vztahu k vhodnosti jednotlivých druhů vláken. V diplomové práci bude provedeno hodnocení dosažených výsledků s hodnocením praktických dopadů. Práce bude zpracována odpovídající a požadovanou formou, v rozsahu 60 až 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na aktuální problematiku chování betonu při zatížení vysokými teplotami. V teoretické části je provedena a shrnuta rešerše poznatků o změnách v betonu, které probíhají při vystavení teplotnímu zatížení, které simuluje působení požáru. Důležitá je také sumarizace změn jednotlivých složek, které jsou použity pro výrobu betonu. Tato práce popisuje rovněž vliv vysokých teplot na mechanické a fyzikální vlastnosti. Jsou zde uvedeny informace o nejpoužívanějších vláknech a jejich funkce v betonu. Důraz je kladen na popsání možnosti používání recyklovaných vláken z PET nebo celulózy z důvodu pozitivního ekologického dopadu. V experimentální části jsou navrženy receptury s různými druhy a množstvím vláken. Předmětem výzkumu bylo určit, jak jednotlivé druhy a množství vláken ovlivňují fyzikálně mechanické vlastnosti betonu a jejich vhodnost pro použití do vysokých teplot. Bylo provedeno i mikroskopické snímání a studování změn ve struktuře betonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cementový kompozit, rozptýlená výztuž, explozivní odprýskávání, celulózová vlákna, PET vlákna, požární odolnost, požár, tepelná deformace, změny ve struktuře, recyklovaná vlákna

ABSTRACT

The master thesis is focused on current issues of concrete behaviour under high temperatures. In the theoretical part, a search of knowledge about changes in concrete, which take place when exposed to thermal loads, which simulates the effect of fire, is performed, and summarized. It is also important to summarize the changes in the individual components that are used to produce concrete. This work describes the effect of high temperatures on mechanical and physical properties as well. There is an information about the most used fibres and their function in concrete. Emphasis is placed on describing the possibility of using recycled PET or cellulose fibres due to the positive environmental impact. In the experimental part, recipes with different types and amounts of fibres are proposed. The subject of the research was to determine how individual types and amounts of fibres affect the physical – mechanical properties of concrete and their suitability for use at high temperatures. Microscopic scanning and study of changes in the structure of concrete was also performed.

KEYWORDS

Cement composite, dispersed reinforcement, explosive spalling, cellulose fibers, PET fibres, fire resistance, fire, thermal distortion, changes in the structure, recycled fibres

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jan Klobása *Studium vlivu organických vláken na požární odolnost betonu*. Brno, 2021. 114 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium vlivu organických vláken na požární odolnost betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Jan Klobása
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium vlivu organických vláken na požární odolnost betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Jan Klobása
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, ochotu a pomoc, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat technickým pracovníkům za odbornou pomoc při experimentální části. Poděkování patří také mé rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mě během studia podporovali.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu GAČR 21–25813S „Studium vlivu organických vláken na vlastnosti cementových kompozitů při extrémním zatěžování“.

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 10 |
| 2. Cíl práce..... | 11 |
| 3. Teoretická část..... | 12 |
| 3.1. Základní pojmy a názvosloví..... | 12 |
| 3.1.1. Požár..... | 12 |
| 3.1.2. Návrhový požár..... | 12 |
| 3.1.3. Požární odolnost..... | 12 |
| 3.1.4. Požární scénář..... | 13 |
| 3.1.5. Fáze požáru..... | 13 |
| 3.2. Požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí..... | 13 |
| 3.2.1. Požárně technické vlastnosti stavebních výrobků..... | 13 |
| 3.2.2. Třída reakce na oheň..... | 13 |
| 3.2.3. Požární odolnost stavebních konstrukcí..... | 14 |
| 3.3. Kompozitní materiál..... | 15 |
| 3.4. Cementový kompozit s rozptýlenou výztuží..... | 16 |
| 3.5. Chování složek cementového kompozitu za vysokých teplot..... | 17 |
| 3.5.1. Cementový tmel..... | 17 |
| 3.5.2. Kamenivo..... | 19 |
| 3.5.3. Ocelová výztuž..... | 20 |
| 3.6. Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu..... | 21 |
| 3.6.1. Vliv vysokých teplot na strukturu betonu..... | 21 |
| 3.6.2. Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu..... | 23 |
| 3.6.3. Vliv vysoké teploty na fyzikální vlastnosti cementového kompozitu..... | 26 |
| 3.6.3.1. Tepelná vodivost betonu..... | 27 |
| 3.7. Odprýskávání cementového kompozitu..... | 31 |
| 3.7.1. Plošné odprýskávání..... | 32 |
| 3.7.2. Štěpení a odprýsknutí části kameniva..... | 33 |
| 3.7.3. Explosivní odprýskání..... | 34 |
| 3.8. Užití vláken do cementového kompozitu..... | 36 |
| 3.8.1. Polypropylenová vlákna..... | 38 |
| 3.8.2. Celulózová vlákna..... | 43 |
| 3.8.3. Polyethylentereftalátová (PET) vlákna..... | 46 |
| 4. Experimentální část..... | 49 |
| 4.1. Metodika experimentální části práce..... | 49 |
| 4.2. Použité zkušební metody..... | 51 |
| 4.2.1. Zkoušky kameniva..... | 51 |
| 4.2.2. Laboratorní pozorování a měření vláken..... | 51 |
| 4.2.3. Zkoušky na čerstvém betonu..... | 51 |
| 4.2.4. Ztvrdlý beton..... | 52 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.5. Vysokoteplotní zatížení | 54 |
| 4.2.6. Pozorování mikrostruktury betonu | 55 |
| 4.3. Etapa I Výběr a popis vstupních surovin | 55 |
| 4.3.1. Cement..... | 55 |
| 4.3.2. Kamenivo | 56 |
| 4.3.3. Plastifikační přísada | 58 |
| 4.3.4. Rozptýlená výztuž | 58 |
| 4.4. Etapa II Návrh, výroba a zkoušení betonu | 63 |
| 4.4.1. Návrh složení betonu..... | 63 |
| 4.4.2. Fyzikálně mechanické vlastností betonu před vysokoteplotním zatížením ..65 | |
| 4.4.3. Fyzikálně mechanické vlastností betonu po vysokoteplotním zatížení | 77 |
| 4.5. Etapa III Výběr a zkoušení velkoformátových těles | 87 |
| 4.5.1. Teplotní zatížení panelových těles..... | 87 |
| 4.5.2. Vizuelní vyhodnocení zkušebních panelů po vysokoteplotním zatížení | 88 |
| 5. Diskuse výsledků..... | 91 |
| 6. Závěr..... | 96 |
| 7. Seznam použitých zdrojů a literatury | 99 |
| 8. Seznam tabulek..... | 111 |
| 9. Seznam obrázků | 112 |
| 10. Seznam grafů..... | 114 |

1. Úvod

Požár je jedním z nejzávažnějších a zároveň nepředvídatelných nebezpečí, které může ovlivnit fungování konstrukčního systému během jeho životnosti. Každý rok si vyžádá tisíce životů a způsobí škody na majetku v hodnotě miliard v celosvětovém měřítku. Pod tlakem zvyšování populace a omezování půdy vzhledem k efektivitě řešení otázky bydlení a dopravy, roste potřeba výstavby výškových budov a podzemních staveb. Stavební inženýrství čelí obrovskému problému v podobě poškození stavby požárem během výstavby nebo provozu. Požár na těchto stavbách je v posledních letech často hlášen po celém světě a vážně ohrožuje bezpečnost osob a majetku. Působení vysoké teploty zásadně ovlivňuje chování jednotlivých materiálů, do kterých spadá i nejpoužívanější konstrukční materiál, kterým je beton. Požár, respektive zatížení extrémně vysokou teplotou betonových či železobetonových konstrukcí je dobře známé zatížení, které vážně poškozuje strukturu betonu. Poškození struktury způsobuje především snížení mechanických vlastností betonu, odprýskávání betonu a vystavení ocelové výztuže vysoké teplotě. V případě požáru dochází ke negativním účinkům na konstrukci, kdy dokonce může dojít až ke kolapsu celého konstrukčního systému.

Přestože je beton klasifikován jako materiál nehořlavý, je nezbytné posuzovat jeho odolnost při působení vysokoteplotního zatížení. U konstrukčních železobetonových prvků působí beton také jako ochrana ocelové výztuže, která zajišťuje statickou funkci konstrukce. Vzhledem k důležitosti chování betonu při vysoké teplotě bylo provedeno mnoho studií na cementových kompozitech při vysoké teplotě a byly vyhodnoceny a prozkoumány nejdůležitější parametry. Heterogenní povaha betonu a nestejná teplotní expozice ztěžují možnosti přesného rozsahu a příčiny poškození betonových konstrukčních prvků v případě požáru. Znalost materiálových vlastností jednotlivých složek betonu při exponované teplotě však může pomoci předejít negativním dopadům na vlastnosti betonu v komplexním měřítku a cíleně zvýšit odolnost betonu či konstrukcí při tomto specifickém druhu zatížení. Požárům nelze zcela zabránit, avšak svědomité navrhování a údržba konstrukcí může riziko do značné míry zmírnit.

2. Cíl práce

Tato diplomová práce je věnována studiu problematiky vysokoteplotního zatížení betonu, které představuje působení požáru. Toto extrémní vysokoteplotní zatížení má zásadní vliv na vlastnosti betonu. V teoretické části bylo cílem shrnout dosavadní poznatky a výsledky z výzkumných prací, které se zabývají zkoušením a vývojem betonu s cementovou matricí pro dosažení vyšší odolnosti vůči vysokým teplotám. Už v samotném návrhu složení betonu je třeba uvažovat s odolností jednotlivých složek betonu, u kterých je sledováno chování a jejich vliv na konečné vlastnosti cementového kompozitu u tohoto nestandardního zatížení. Na základě zjištěných informací a závěrů je studována volba vhodných složek do betonu pro zvýšení požární odolnost betonu. Dále bylo cílem věnovat pozornost eliminaci následků vysokoteplotního zatížení na výsledné a žádané vlastnosti betonu pomocí organické rozptýlené výztuže s důrazem na využití recyklovaných či sekundárních zdrojů.

Cílem experimentální části bylo zaměření na vliv přídatku organických vláken na výsledné vlastnosti kompozitu před a po vystavení vysokoteplotního zatížení. Cílem této práce bylo také sledovat vliv druhu vlákna, jeho geometrie a dávkování na fyzikálně mechanické vlastnosti za standardních podmínek. V návaznosti je cílem stanovit fyzikálně mechanické vlastnosti a dále požární odolnost cementového kompozitu s vybranými vlákny při působení extrémně vysokých teplot. Cílem této práce je zajištění vyšší odolnosti proti působení extrémně vysokých teplot, kdy jsou sledovány faktory a detaily, které souvisí s dosažením požadovaného výsledku. Toto odvětví je velmi žádané s ohledem na bezpečnost, a to nejen ve stavu ke konstrukci, ale také ve vztahu k bezpečnosti osob.

3. Teoretická část

Problematika požární odolnosti je velmi důležitým parametrem, který je zohledňován při návrhu stavebních konstrukcí. Stále se zvyšujícími požadavky na stavební konstrukce se v tomto směru kladou i vyšší požadavky na stavební materiály. I materiály, které jsou nehořlavé, mohou vyvolat potřebu jejich zkoušení, a to jak z důvodu bezpečnosti, tak i v případech, kdy jsou kombinovány s materiálem, který těmito vlastnostmi nedisponuje [1,2,18].

S ohledem na požární odolnost se na konstrukce či materiály klade důležitý požadavek, kdy musí odolávat působení neobvyklému zatížení, kterým je účinek vysokých teplot. Jedním z materiálů, který je ze své podstaty nehořlavý, a přes to je mu věnována velká pozornost, je beton respektive vláknobeton [1,23,52].

3.1. Základní pojmy a názvosloví

Požární odolnost je spojována se zajištěním bezpečnosti především osob, ale také zabezpečením majetku, kdy je snahou co nejvíce snížit ztráty nebo škody. V tomto odvětví je několik základních pojmů, kterým je třeba věnovat pozornost, protože souvisí s řešenou problematikou [1].

3.1.1. Požár

Požár je chápán jako každé nechtěné hoření, při kterém dojde k poranění osob či zvířat, nebo dokonce k jejich usmrcení. Dále je požár také stavem, kdy nežádoucí hoření ohrožuje osoby, zvířata, materiálovou bázi nebo životní prostředí. U materiálové báze nebo v životním prostředí může docházet až ke škodám. U požáru můžeme narazit na pojem „plně rozvinutý požár“, při kterém dochází k hoření na všech hořlavých materiálech. Požár můžeme rozdělit na lokální, kdy dochází k požárním zatížení pouze v určitém místě, a dále na celoplošný [1,2,51].

3.1.2. Návrhový požár

Návrhový požár charakterizujeme vývojem a průběhem požáru v objektu, na který je dimenzováno požární zabezpečení. Zahrnuje fázi vývoje požáru, fázi plně rozvinutého požáru (okamžik, kdy se požár rozšíří po celé ploše místnosti, ve více místnostech nebo v celém objektu, popřípadě kdy teploty v hořícím pásu dosáhnou 500 až 600 °C). Dále sem patří fáze dohořívání a chladnutí (okamžik, kdy teploty plynů v požárním prostoru začnou klesat) [1,2,23].

3.1.3. Požární odolnost

Požární odolnost je definována jako doba v minutách, během níž je konstrukce schopna vzdorovat teplotám vytvořených při požáru, aniž by ztratila svou funkci [1,23,52].

3.1.4. Požární scénář

Vyjadřuje průběh požáru v čase s klíčovými událostmi, které charakterizují požár a odlišují požár od jiných možných požárů. Většinou jej vymezuje vznícení, průběh požáru, plně rozvinutá fáze dohořívání společně s prostředím a zařízením budovy, které mají vliv na požár [1,2,18,51].

3.1.5. Fáze požáru

Studiem a vyhodnocením skutečných či experimentálních požárů lze jejich průběh rozdělit na tři časové fáze. V prvním časovém období dochází ke vznícení hořlavých materiálů a k šíření požáru na ostatní hořlavé materiály. Tato fáze může trvat od několika minut až po několik hodin. V druhé fázi dojde k úplnému rozšíření požáru, kdy hoří převládající část hořlavých hmot v požárním úseku. Ve srovnání s první fází, kde se vyskytují poměrně nízké teploty v objektu zasaženém požárem, je druhá fáze typická rychlým vzestupem teplot a shořením většiny hořlavých hmot. V poslední fázi nastává pokles teploty díky nedostatku hořlavého materiálu [1,2].

3.2. Požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí

Požárně technické vlastnosti stavebních hmot je souhrnné hodnocení, které začíná u stavebních materiálů neboli stavebních hmot, které jsou základními prvky a které jsou označovány stavebními výrobky. Posléze je problematika těchto vlastností řešena také na celých konstrukcích [1,2,52].

3.2.1. Požárně technické vlastnosti stavebních výrobků

U stavebních výrobků, jakožto základních elementů, se při zkoušení požárně technických vlastností zejména zkoumá:

- reakce stavebních výrobků na oheň,
- šíření plamene na povrchu stavebních hmot,
- hodnocení odkapávání hmot z podhledů stropů a střech,
- hodnocení podlahovin a textilií [1,2,51].

3.2.2. Třída reakce na oheň

Základním parametrem, který vypovídá o vlastnostech stavebních materiálů, z kterých jsou následně kompletovány konstrukce či skladby, je klasifikace reakce na oheň. Stavební výrobky je nutné vždy klasifikovat, a to buď pomocí zkoušení anebo zařazení. Zařazení probíhá u výrobků, které patří do tříd A1 a A2, tj. bez příspěvku k požáru, které jsou uvedené v Rozhodnutí Komise 96/603/ ES, respektive 2000/605/ES a 2003/424/ES. Zkoušení probíhá podle základních evropských zkušebních norem. Klasifikace reakce na oheň stavebních výrobků se realizuje podle evropské klasifikační normy ČSN EN 13501–1. Pro hodnocení stavebního výrobku v oblasti požárně

technických vlastností je toto rozdělení rozhodující. V souladu s touto normou by měl být klasifikován každý stavební výrobek. Konkrétně se jedná o tyto klasifikační třídy reakce na oheň:

- třída A1: výrobky třídy A1 nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu, z toho důvodu jsou automaticky považovány za vyhovující všem požadavkům pro nižší třídy, za nehořlavé hmoty třídy A1 se považují anorganické hmoty, výrobky a konstrukce bez ohledu na užití ve stavebním objektu,
- třída A2: výrobky sice vyhovují stejným kritériím EN 13823 jako pro třídu B, ale navíc nebudou za podmínek plně rozvinutého požáru významně přispívat ke kalorickému zatížení a tím i k dalšímu růstu požáru,
- třída B: jako u třídy C, ale s přísnějšími požadavky,
- třída C: jako u třídy D, ale navíc při tepelném působení jednotlivého hořícího předmětu vykazují omezené rozšíření plamene,
- třída D: výrobky vyhovující kritériím E a schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez jeho významného rozšíření, kromě toho jsou též schopny odolávat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolnění tepla,
- třída E: výrobky schopné odolávat působení malého plamene po krátký časový interval bez významného rozšíření plamene,
- třída F: výrobky, které nelze zařadit do žádné z předchozích tříd [23,52].

3.2.3. Požární odolnost stavebních konstrukcí

Na rozdíl od klasifikace materiálu na reakci na oheň, je požární odolnost sledována na části nebo celku stavební konstrukce při zatížení vysokou teplotou, simulující požár. Odolávání účinku požáru neboli požární odolnost patří k podstatným vlastnostem stavební konstrukce. Při vyhodnocování vlastností stavebních konstrukcí v prostoru, který je zasažen požárem, musí být splněna podmínka: požadovaná požární odolnost \leq zjištěná požární odolnost [1,18].

Požární odolnost stavebních konstrukcí se zjišťuje pomocí požárních scénářů. Každému jednotlivému scénáři odpovídá jiná teplotní křivka. Jednotlivé teplotní křivky můžeme vidět na obrázku č. 1, kde už na první pohled jsou viditelné rozdíly především v počátečním náběhu teplot. Rozdělit je pak můžeme na:

- normová teplotní křivka,
- ostatní teplotní křivky:
 - křivka pomalého zahřívání pro doutnající požár,
 - „polopřirozený požár“,
 - uhlovodíková křivka,

- křivka působení vnějšího požáru [1,2,52].

Normové křivce byl mezinárodně na základě statistiky určen časový průběh teploty při požáru, tzv. normová teplotní křivka T, která je určena vztahem:

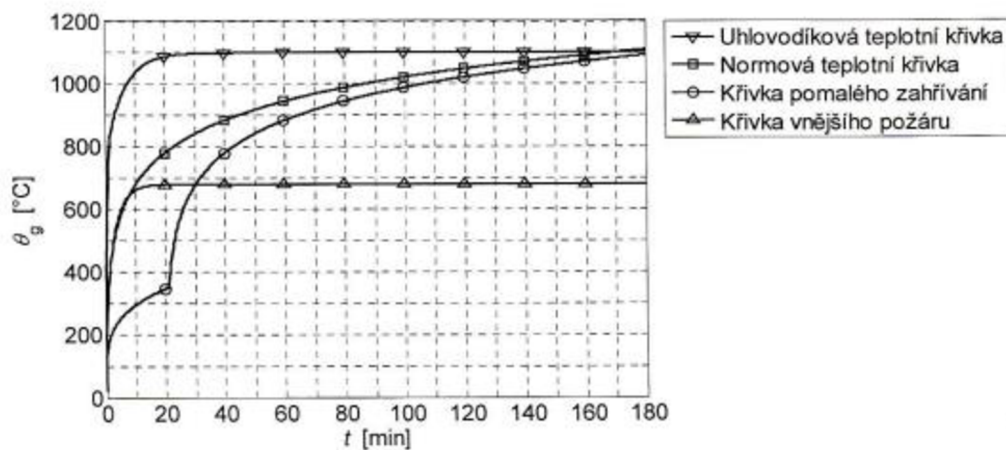
$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20$$

kde: t – doba od začátku zkoušky [min],

T – průměrná teplota v peci [°C] [2].

Stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí je možné provést několika způsoby:

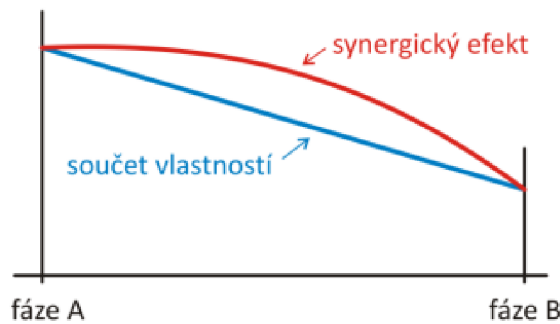
- zkouškou,
- normovou hodnotou, popř. výpočtem,
- zkouškou a výpočtem [1,2,18].



Obrázek 1: Teplotní křivky [18]

3.3. Kompozitní materiál

Kompozitní materiál, zkráceně kompozit, je obecně vzato materiál ze dvou nebo více fází s rozdílnými vlastnostmi. Jejich složením vzniká materiál s novými vlastnostmi, kterých sama o sobě nedosahuje ani jedna z použitých fází. Tomuto jevu se říká takzvaný synergický účinek – 1+1=3 (obrázek č. 2). Použité materiály se v makroměřítku liší tvarem nebo složením, ale v rámci kompozitu si zachovávají svoji identitu i přes to, že na své okolí působí v součinnosti. Nedochází k úplnému rozpouštění, nebo slučování a každá z fází může být fyzikálně identifikována [113].



Obrázek 2: Synergický účinek [113]

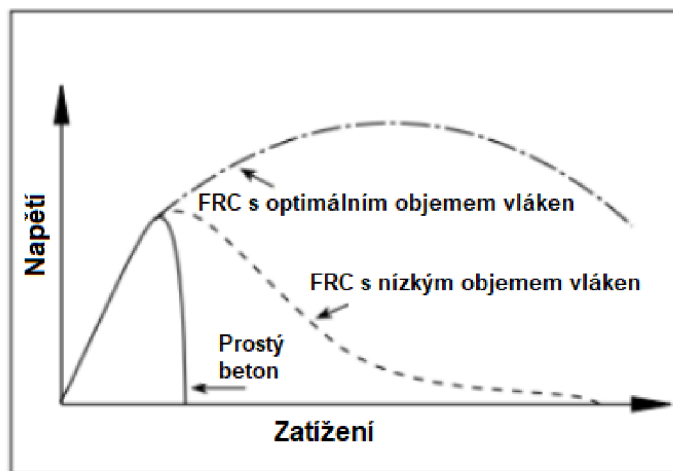
Tvrďší a pevnější nespojitá fáze kompozitu bývá označována jako výztuž. Typickým příkladem výztuže jsou různá vlákna či tkaniny, které dodávají kompozitu vlastnosti spojené s vysokou pevností v tahu. Spojitá a poddajnější fáze, která zastává funkci pojiva výztuže, bývá označována jako matrice. Matrice udává výsledný tvar kompozitu a zajišťuje přenos zatížení do vyztužující fáze. Mezi maticí a výztuží je velmi důležité zajistit dobrou soudržnost, která pak ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitu. Nejslabší vazba je mechanická, která vznikne pouze vzájemným zaklíněním obou fází. Dále pak rozlišujeme vazby fyzikální a chemické. Při chemické vazbě dochází v první etapě k prodifundování jednotlivých složek, kde vznikají tuhé roztoky a v druhé etapě pak může dojít ke vzájemné chemické reakci za vzniku mezivrstvy reakčního produktu [114].

3.4. Cementový kompozit s rozptýlenou výztuží

Nejpoužívanějším kompozitním materiálem v oblasti stavitelství je beton. Matrice betonu je tvořena cementem, který plní funkci hydraulického pojiva. K hydraulickému tvrdnutí cementu dochází důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů (křemičitanů a hlinitanů). Po vytvrzení vlivem hydratačních procesů a reakcí je materiál pevný, stálý a odolný proti působení vody. Do cementové matrice jsou přidávána plniva, která určují výsledné mechanické vlastnosti betonu. Kamenivo tvoří až 80 % celkového objemu betonu. Díky vzájemnému opření a zaklínění jednotlivých zrn vzniká pevná vrstva odolná v tlaku [95].

Modifikací cementové matrice přidáním vláken vzniká speciální typ betonu – vláknobeton (FRC). Díky synergickému efektu získává beton plněný vlákny výhodné vlastnosti v podobě omezení vzniku trhlin v objemu materiálu při tepelném nebo mechanickém namáhání, zvýšení odolnosti proti průniku vody a zlepšení jakosti povrchu. Výztuž může být tvořena ocelovými, skleněnými, syntetickými či uhlíkovými vlákny. Pro výsledné mechanické vlastnosti je důležité rovnoměrné rozptýlení vláken v objemu materiálu a jejich orientace. Pro některé aplikace je výhodná anizotropie mechanických vlastností, kterou způsobuje náhodná poloha vláken. Pro dosažení

izotropních mechanických vlastností lze vlákna do matrice ukládat s jednotnou orientací, ve svazcích nebo v tkaninách [64].



Obrázek 3: Rozdíl v průběhu napětí různých typů cementových kompozitů [64]

3.5. Chování složek cementového kompozitu za vysokých teplot

Beton je z pohledu jeho požární odolnosti velice hojně používaný stavební materiál. Svým chováním ve vysokých teplotách překonává materiály jako ocel nebo dřevo. Přesto ale při působení vysokých teplot dochází k výskytu a projevu významných nevratných změn, které mění jeho vlastnosti [95].

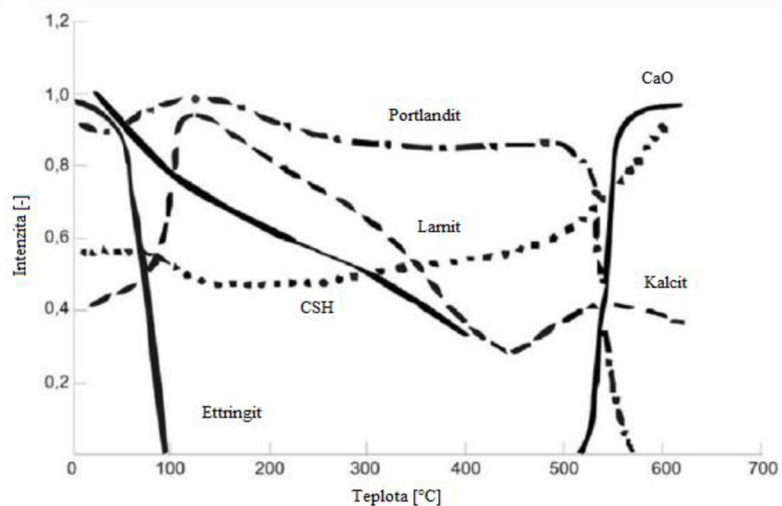
Jako všechny jiné kompozitní materiály, tak i beton je materiálem heterogenním. Skládá se z jednotlivých homogenních materiálů, které jsou označovány fázemi (složkami) soustavy. Právě proto si musíme tento heterogenní materiál rozdělit na jednotlivé složky, u kterých je nutno sledovat chování a vlastnosti při zvyšujících se teplotách [95].

3.5.1. Cementový tmel

Vliv zvýšených teplot na cementový tmel je velmi důležitým faktorem, protože cement je jeden z hlavních složek betonu. Chování cementového tmele je ovlivněno jeho samotným složením. Cementový tmel, který bude vyroben z cementu s nižším obsahem slínku, bude více odolný vůči vysokým teplotám. Při hydrataci portlandského slínku se vytváří Ca(OH)_2 , ve kterém při zvýšení teploty dochází k rozkladu a ztrátě vody. Největším problémem je v tomto případě chlazení. Při hašení požáru je přiváděna voda, která způsobuje opětovné reakce CaO s H_2O . Tento jev je velmi úzce spjat s rozpínáním a objemovým nárůstem. Právě proto se s výhodou používají cementy s nízkým obsahem portlandského slínku, nebo je možnost využít nižší množství portlandského cementu společně s přísadkou příměsí. Používají se nejrůznější příměsi, např. popílek, vápenec a struska. Kromě obsahu slínku v cementu, chování cementového tmele při vysoké

teplotě závisí na dalších důležitých faktorech jako je poměr CaO ku SiO₂, vodní součinitel nebo stupeň hydratace. Poměr mezi CaO ku SiO₂ při zahřívání určuje podobu vytváření nových minerálů. S poměrem 1,5 mohou vznikat podoby křemičitanů vápenatých, které se vyznačují špatnou krystalizací. Hydratace cementového tmele se vyvíjí v několika stupních a nezávisí nejen na vstupních složkách, ale také na způsobu a teplotě ošetřování [3–9].

V zásadě rozlišujeme dvě skupiny chování cementového tmele. Pro první skupinu je typické neuzavřené prostředí. Při zvýšení teplot dochází ke zvýšení transportu vlhkosti, která urychluje odpar a ztrátu volné (kapilární) vody. Při následném zvyšování teplot dochází i k odchodu vody chemicky vázané. Je dobré si uvědomit, že struktura cementového tmele se začíná poškozovat již při teplotě 105 °C, přestože tato teplota odpovídá sušení materiálu. Pozorování změn je zkoumáno na základních minerálech cementové tmele – ettringit, CSH gel, larnit, kalcit, portlandit a oxid vápenatý. Nejdříve dochází k rozkladu ettringitu při teplotě okolo 100 °C. Markantní změny jsou viditelné u dehydratace CSH gelu, kdy odchází již zmiňovaná chemicky vázaná voda. Při následovném zahřívání na teplotu cirká 400–500 °C výrazně klesne obsah portlanditu díky rozkladu a odchodu vody. Díky tomu je možné pozorovat zvyšující se obsah volného vápna v cementovém tmelu [3–9].

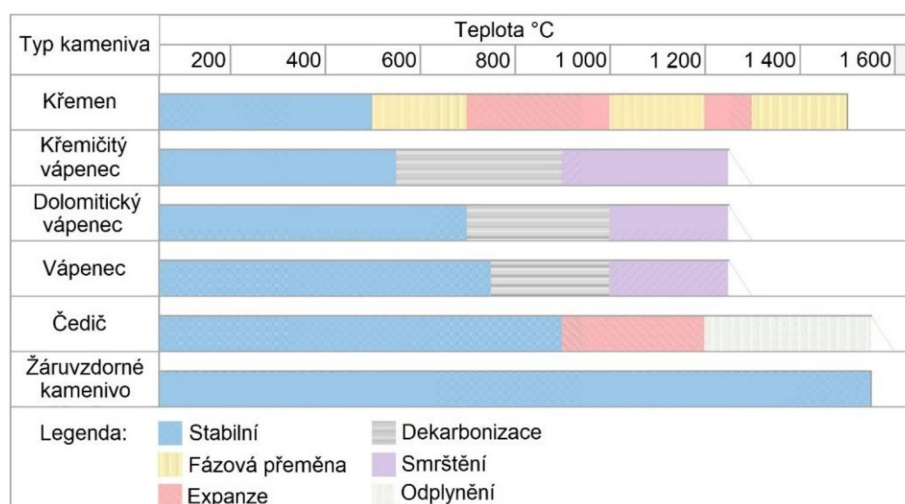


Obrázek 4: Vývoj intenzity rozkladu základních minerálů cementového tmele [22]

Ve druhé skupině je cementový tmel za vlhkých podmínek zahříván v uzavřeném prostředí, a proto dochází k tzv. hydrotermálním reakcím. Tento efekt se označuje jako vnitřní autoklávování. Při působení těchto podmínek dochází k chemickým a fyzikálním změnám, které mohou nastartovat změny v mikrostruktuře hydratačních produktů. Tento postup je velmi dobře známý a je hojně používán při výrobě pórobetonu [3–9].

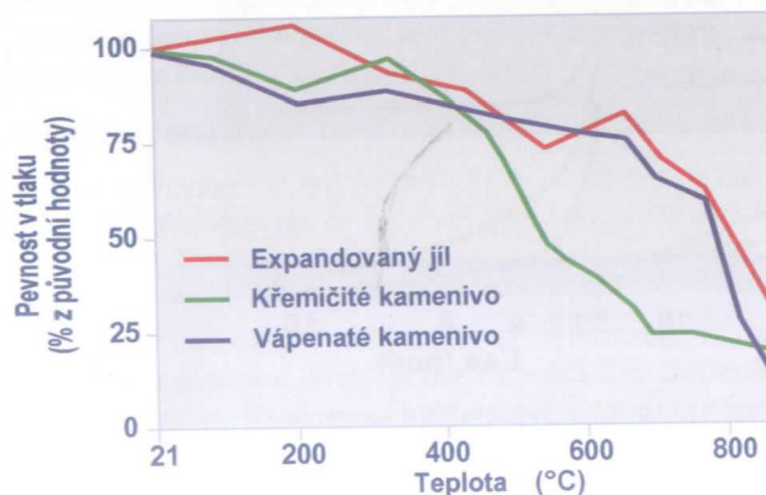
3.5.2. Kamenivo

V betonu je kamenivo podstatnou složkou, která vytváří nosnou kostru. Tato nosná kostra zaujímá cirká 70–80 % objemu betonu, a proto se jedná z pohledu objemu kameniva v betonu o dominantní složku. Z tohoto důvodu vlastnosti kameniva výrazně ovlivňují chování betonu při vysokých teplotách. Výběr a charakterizace použitého kameniva je pravděpodobně nejdůležitější při specifikaci betonu, který má být odolný vůči vysokým teplotám. Je možné, že dva druhy betonu s podobnými mechanickými vlastnostmi mají odlišné chování při požáru v důsledku odlišného typu kameniva. Při nárůstu teploty se každé kamenivo chová odlišně a je doprovázeno fyzikálně-chemickými změnami, jak můžeme vidět na obrázku č. 5. Při výběru kameniva se zaměřujeme především na koeficient teplotní deformace, zbytkovou deformaci po ochlazení, teplotní stabilitu a mineralogické složení [10–14,49].



Obrázek 5: Chování kameniva při vysokých teplotách [10]

Kamenivo je obecně klasifikováno na základě dominance obsahu oxidu křemičitého a vápníku na kameniva křemičitá, vápenatá nebo křemičito–vápenatá. Tato kameniva reagují při vysokých teplotách rozdílně. Křemičitá kameniva mají vyšší tepelnou vodivost než vápenec díky své krystalinitě. Přeměny křemene v křemičitém kamenivu stejně jako dekarbonizace ve vápnitých kamenivech vede k mikrotrhlinám, praskání, zvýšení pórovitosti a ztrátě pevnosti, což následně vede k oslabení vazby mezi kamenivem a cementovým tmelem. Tyto jevy se však vyskytují při odlišných teplotách a ovlivňují beton odlišně. U křemičitého kameniva probíhá při teplotě 574 °C fázová přeměna β – křemene na α – křemen, která je doprovázena zvýšením objemu až o 5 %. Vápenecové kamenivo vykazuje dobré tepelné chování do 700 °C. U kameniv, které obsahují uhličitany, dochází k rozkladu za vzniku oxidu vápenatého a oxidu uhličitého. Dále při chlazení betonu (hašení) může docházet k hydrataci a vzniku hašeného vápna. Tento jev je doprovázen s nárůstem objemu až o 40 % [10–14].



Obrázek 6: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku při zvyšování teploty [49]

Důležitými sledovanými parametry jsou již zmíněné teplotní stabilita a deformace, které závisí na mineralogické struktuře. Mono-minerální struktura kameniva je příznivější z pohledu stejného koeficientu teplotní roztažnosti. Kameniva, která jsou tvořena z více minerálů, jsou daleko více náchylná k rozpadu z důvodu napětí, které vzniká mezi krystaly díky rozdílné roztažnosti [10–14].

Tabulka 1: Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti známých hornin [11]

| Typ horniny | Koeficient lineární teplotní roztažnosti [$\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$] |
|-------------|---|
| Žula | 1,8–11,9 |
| Čedič | 3,6–9,7 |
| Pískovec | 4,3–13,9 |
| Vápenec | 0,9–12,2 |
| Dolomit | 6,7–8,6 |

3.5.3. Ocelová výztuž

Ocelová výztuž je běžně využívána pro zlepšení vlastností betonu, zvláště podporuje beton v tahových vlastnostech. Ocelová výztuž je ale charakteristická nižší požární odolností, protože své mechanické vlastnosti ztrácí při teplotách cca 500 °C. Samotný beton vydrží vyšší teploty. Z tohoto důvodu musí být výztuž chráněna co nejdéle. Právě z tohoto hlediska má tloušťka krycí vrstvy podstatný význam pro udržení teploty výztuže, pod již zmíněnou teplotu [15–17].

Při vysokých teplotách u vyztuženého betonu má vliv i soudržnost betonu s výztuží, která je za normálních podmínek založena na stejné teplotní roztažnosti obou materiálů. Při narůstající teplotě cca nad 100 °C se začíná teplotní roztažnost lišit. U oceli dochází k jejímu zvyšování. Následkem tohoto chování dochází s narůstající teplotou k rozpínání ocelové výztuže, čímž vzniká napětí a snížení soudržnosti mezi výztuží a

betonem. Pro soudržnost betonu s ocelí byly na základě studií a zkoušek ustanoveny tyto zásady:

- vliv vodního součinitele se na soudržnost neuplatní,
- druh kameniva patří k rozhodujícím faktorům – čím nižší jsou tepelné deformace betonu, tím je vyšší soudržnost při narůstajících teplotách,
- mezi hladkými a žebříkovými ocelovými výztužemi byly pozorovány velké rozdíly v soudržnosti,
- kvalita povrchů hladkých ocelí výrazně ovlivňuje soudržnost za vysokých teplot – v případě silně zkorodované výztuže se chová hladká ocel přibližně stejně jako ocel žebříková [15–17].

3.6. Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu

Beton je materiál nehořlavý, který prokazuje oproti ostatním stavebním materiálům výtečné vlastnosti z hlediska požární odolnosti. To ovšem neznamená, že jeho vlastnosti nejsou působením vysokých teplot negativně ovlivněny. Z hlediska požární odolnosti rozdělujeme beton do těchto skupin:

- skupina A – betonová směs vyrobená z umělého kameniva (keramzit, vermikulit) nebo přírodního pórovitého kameniva (křemelina, tufity, pemza), jehož objemová hmotnost nepřesáhne 1800 kg/m^3 ,
- skupina B – betonová směs z hutného kameniva (křemen, živec čedič), jehož objemová hmotnost je rovna alespoň 1800 kg/m^3 [18].

Výborná protipožární odolnost betonu je způsobena jeho nízkou tepelnou vodivostí, vysokou tepelnou kapacitou a pomalou ztrátou pevnosti s narůstající teplotou, což mu umožňuje působit jako účinná protipožární bariéra mezi různými konstrukčními prvky. Vliv vysoké teploty na beton závisí na tepelných, deformačních a mechanických vlastnostech fází (složek), ze kterých se beton skládá [19].

3.6.1. Vliv vysokých teplot na strukturu betonu

Posouzení požárem zatíženého betonu obvykle začíná vizuálním pozorováním změny barvy, praskání a odlupování povrchu. Tyto jevy poskytují obecné vodítko pro určení teploty, kterým byl beton zasažen. Při zahřátí nad $300 \text{ }^\circ\text{C}$ se barva betonu může změnit od normální přes růžovou ($300\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$) až po bělavě šedou ($600\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$) na žlutohnědou ($900\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$). Růžové zbarvení je důsledkem přítomnosti sloučeniny železa v jemných nebo hrubých kamenivech [19–21].

První efekty pomalého nárůstu teploty v betonu se projeví mezi 100 a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy dochází k odpařování volné vlhkosti obsažené v betonové hmotě. Okamžitá expozice může mít za následek odlupování v důsledku vytváření vysokého vnitřního

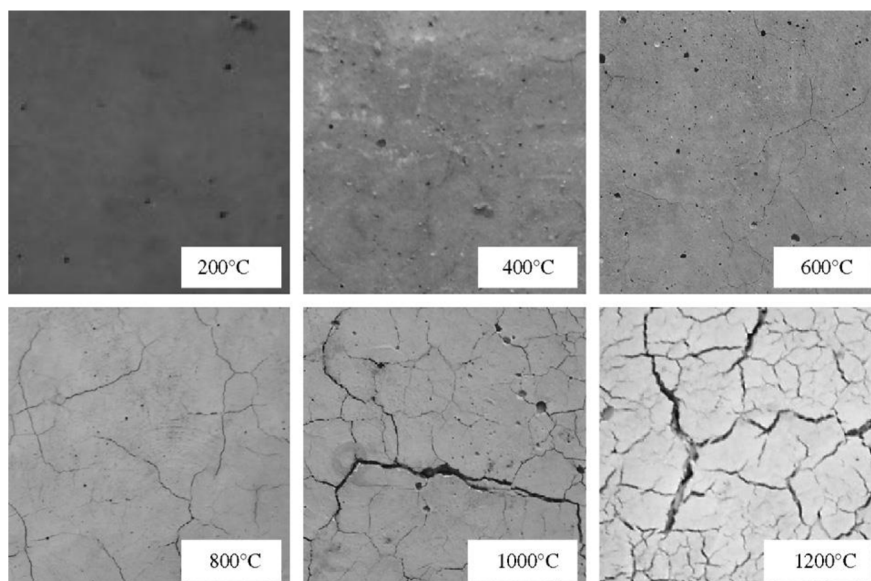
tlaku páry. Jak se teplota blíží 250 °C, začíná docházet k dehydrataci nebo ztrátě neodpařitelné vody nebo hydratační vody. Teploty v rozmezí 550 °C jsou kritické, protože dochází k dehydrataci hydroxidu vápenatého. Hydroxid vápenatý je produktem hydratace většiny portlandských cementů, přičemž množství závisí na konkrétním použitém cementu. Dalším aspektem je také kamenivo, které mění své vlastnosti a chování při narůstající teplotě. Přehled změn v mikrostruktuře betonu je uveden v tabulce č. 2 [19–21].

Kromě vizuálního pozorování se při zkoumání mikrostruktury betonu používá také optická mikroskopie nebo SEM. Výsledky naznačují, že povaha a rozsah trhlin mohou korelovat se skutečnými teplotami dosahovanými v betonu. [19-21]

Tabulka 2: Přehled změn ve struktuře betonu při zvyšování teploty [22]

| Rozsah teplot | Změny v mikrostruktuře betonu |
|----------------|---|
| 20–200 °C | ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti |
| | 80–150 °C dehydratace ettringitu, |
| | 150–170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| | počátek dehydratace CSH gelu |
| | ztráta fyzikálně vázané vody |
| 300–400 °C | praskání křemičitého kameniva (350 °C) |
| | kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody |
| 400–500 °C | rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ |
| 500–600 °C | přeměna křemene z β fáze na α fázi (573 °C) v kamenivu |
| 600–800 °C | druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$ |
| 800–1 000 °C | 840 °C rozklad dolomitického vápence |
| | 930–960 °C rozklad kalcitu $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ |
| 1 000–1 200 °C | tvorba wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) |
| 1 300 °C | celkový rozpad betonu |

Důsledky odpařování vody a chemických změn hydratačních produktů můžeme pozorovat na obrázku č. 7. Je jasně viditelné, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje pórovitost a velikost pórů v betonu, která vede až k vzniku trhlin a rozpadu. Odpařování vody je dále zodpovědné za zdrsnění struktury pórů a snížení mechanických vlastností, jak bylo diskutováno v předchozím odstavci [21].



Obrázek 7: Povrchová struktura betonu vystavená vysokým teplotám [21]

3.6.2. Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu

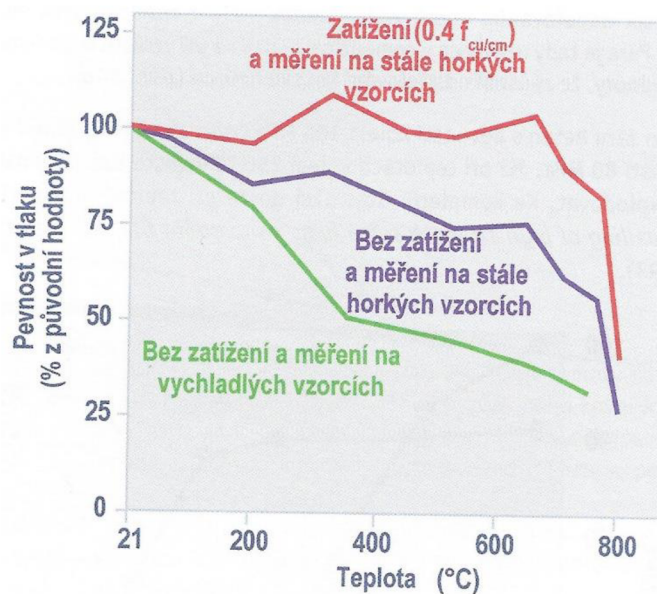
Mechanické vlastnosti betonu, který byl vystaven zvýšeným teplotám, se mění v závislosti na složení směsi a podílu jednotlivých složek. Při vysoké teplotě jsou mechanické vlastnosti vysoce ovlivněny podmínkami prostředí při vytvrzování, mírou zhutnění nebo rychlostí zahřívání a chlazení. K důležitým sledovaným mechanickým vlastnostem při zvyšující se teplotě patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu a modul pružnosti, protože stabilita betonových konstrukcí úzce souvisí s těmito materiálovými vlastnostmi. Znalost redukčních součinitelů těchto vlastností vlivem nárůstu teploty je velmi důležitá pro navrhování konstrukcí, které musí po určitou dobu odolávat účinku požáru. Mechanické zkoušky se provádějí na zkušebních vzorcích, kterými jsou válce o poměru průměru podstavy a výšky 1:2 (nejčastěji 100 × 200 mm nebo 150 × 300 mm) a dále kostky o rozměru 100 mm nebo 150 mm [24–37].

3.6.2.1. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku betonu je zásadní vlastností, která tento materiál charakterizuje a tento fakt platí také při působení zvýšené teploty, protože tato pevnost je důležitá při navrhování požární odolnosti. Při normálních teplotách tak i při vysokých teplotách pevnost v tlaku cementového kompozitu závisí na složení, stupni zhutnění, typu kameniva, vlastnostech tranzitní zóny, poměru w/c, typu přísady a jejím obsahu. Při zvýšených teplotách vzniká uvnitř betonu pórový tlak v důsledku odpařování vázané vody [24–28].

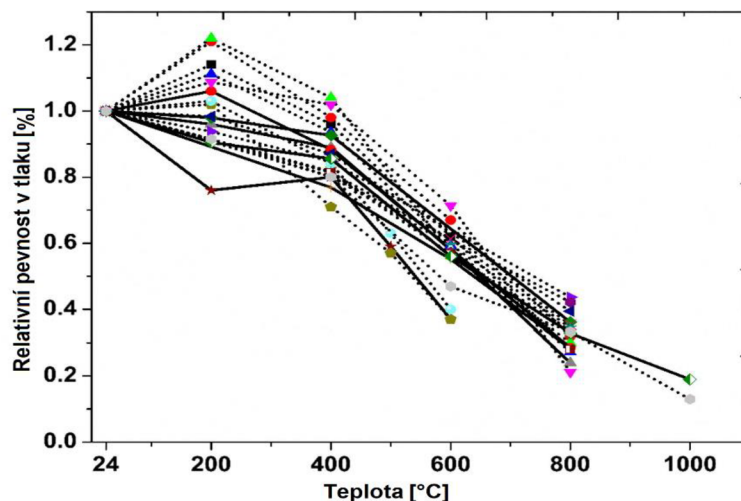
Betonové vzorky jsou vystaveny tlakovému zatížení buď během, nebo po teplotní expozici v horkém nebo ochlazeném stavu buď v nezatíženém stavu známém jako staticky nenamáhaný nebo nenapjatý, a dále v zatíženém stavu popisovaný jako staticky

namáhaný stav. Výsledky těchto různých forem zkoušení můžeme vidět na obrázku č. 8. Hned na první pohled jsou patrné rozdíly mezi křivkami, které symbolizují klesající pevnost v tlaku při zvyšující teplotě. Pozorujeme pozitivní ovlivnění pevnosti u staticky zatížených vzorků, kdy zatížení zřejmě napomáhá k eliminaci porušení, protože expanze způsobená vysokou teplotou je redukována tímto zatížením. Dále pak můžeme sledovat rozdíl mezi metodou zkoušení na horkých a vychladlých vzorcích. Daleko vyšší ztrátu pevnosti můžeme sledovat na vychladlých vzorcích, u kterých může docházet k dodatečnému vytváření trhlin vlivem teplotní roztažnosti a následnému smrštění, které tuto pevnost snížili [24,26,28,49].



Obrázek 8: Vliv druhu zkoušení na pevnost v tlaku při zvyšování teploty [49]

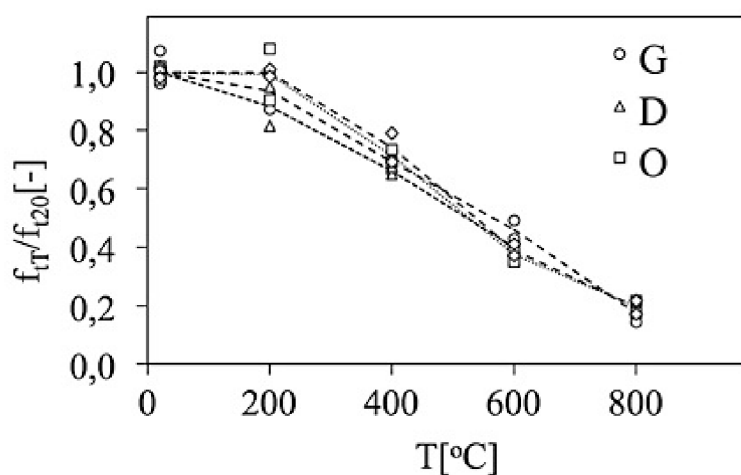
Jak již bylo řečeno, zbytková pevnost v tlaku betonu je velmi sledovaný a studovaný parametr. Na obrázku č. 9 můžeme pozorovat výsledky studií, které se zbytkovou pevností v tlaku zabývali. V mnoha studiích a výzkumech je pozorováno, že do teploty 200 °C pevnost betonu v tlaku buď vzrůstá, nebo zůstává konstantní a po 200 °C plynule klesá. Několik studií uvádí tento přírůstek pevnosti v důsledku přibližování vrstev cementového gelu během ohřevu v důsledku zvýšení van der Waalsových sil. Rychlost změny pevnosti v tlaku je různá pro různé druhy betonu i pro různé teplotní rozsahy. Degradace vznikající po překročení 200 °C pochází z odchodu volné vody a z dehydratace CSH v betonu. Kromě toho povaha kameniva ovlivňuje degradaci betonu, kdy například u vápenatého kameniva dochází k hydrataci vzniklého CaO v Ca(OH)₂, kdy je tato reakce spojena se zvýšením objemu až o 40 % a vede k rozpadu vzorku [24–28,35,36].



Obrázek 9: Srovnání zbytkových pevností v tlaku betonu při narůstající teplotě různých studií [11]

3.6.2.2. Pevnost v tahu

Pevnost v tahu betonu je ve srovnání s pevností v tlaku značně nižší. Hodnota pevnosti v tahu se uvažuje cca 1/10 hodnoty pevnosti v tlaku. Z tohoto důvodu se pevnost v tahu betonu při normální teplotě často zanedbává. Při požáru je to naopak významná vlastnost, protože vytvoření trhlin v betonu při vysokých teplotách je obecně zapříčiněno tahovým napětím. Tato pevnost závisí na téměř stejných faktorech, jako je pevnost v tlaku. Jak můžeme vidět na obrázku č. 10, relativní pevnost v tahu se zvyšující se teplotou obecně klesá lineárně. V případě této studie došlo u několika vzorků k zachování pevností až do teploty 200 °C. Tento jev může být vysvětlen odpařováním volné vody, která přispívá k zvýšení pevnosti hydratací nezreagovaných zrn cementu [25–30].

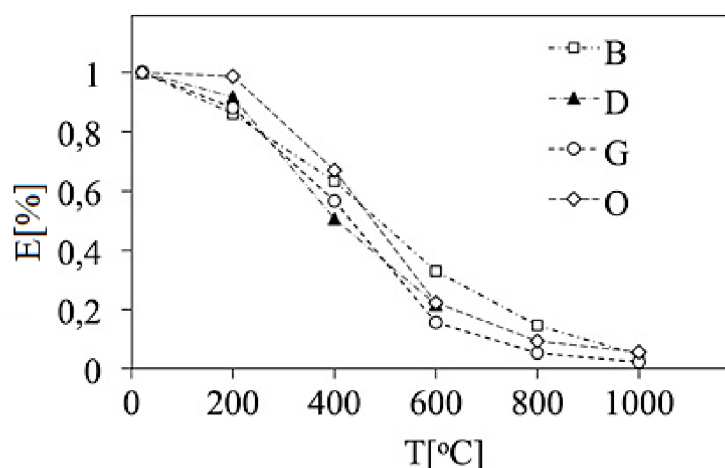


Obrázek 10: Znázornění pevnosti v tahu betonu při zvyšování teploty [32]

3.6.2.3. Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje schopnost betonu odolávat deformaci. Jinými slovy, je to míra tuhosti betonu. Faktory ovlivňující hodnotu modulu pružnosti jsou podobné jako faktory ovlivňující i zbylé mechanické vlastnosti. Míra snížení elasticity při zvýšených teplotách závisí především na stupni teplotní expozice, vodním součiniteli, stáří betonu, samotném návrhu betonové směsi a na použitém kamenivu. Při vysokých teplotách má škodlivý vliv na modul pružnosti rozklad hydratovaných cementových produktů, zvětšování kapilárních prostorů v důsledku dehydratace cementové pasty a také zvýšení napětí v kontaktní zóně v důsledku proměnlivé tepelné roztažnosti složek betonu. Výsledky z výzkumných prací dostupných v literatuře naznačují, že primárními faktory ovlivňujícími modul pružnosti při vysoké teplotě je výskyt trvalého napětí během ohřevu. Dále je ve výzkumných studiích pozorováno, že pevnost v tlaku má malý vliv na změnu modulu pružnosti s narůstající teplotou. Obecně se dá říct, že se modul pružnosti přibližně lineárně snižuje se zvyšující teplotou. Modul při zvýšené teplotě klesá mnohem více pro beton vytvrzený pod vodou než na vzduchu [30–37,50].

Na obrázku č. 11 je možné sledovat grafické znázornění změny modulu pružnosti se zvyšující se teplotou při použití různých druhů kameniv. Jeví se, že zhoršení modulu pružnosti se neděje při opakovaném zvyšování a snižování teploty, ale souvisí s nejvyšší dosaženou teplotou během ohřevu [32].



Obrázek 11: Znázornění modulu pružnosti při zvýšení teplot pro beton s různými kamenivy (B – čedič, D – dolomit, G – granit, O – křemen) [32]

3.6.3. Vliv vysoké teploty na fyzikální vlastnosti cementového kompozitu

Studium fyzikálních vlastností betonů je nezbytné pro studium chování betonů při vysoké teplotě, zvláště pro předpovídání tepelného toku betonem. Šíření tepla v betonu řídí chemické a strukturální degradační procesy v požáru. Sledované vlastnosti jsou především tepelná vodivost, teplotní roztažnost a měrné teplo betonu během ohřevu.

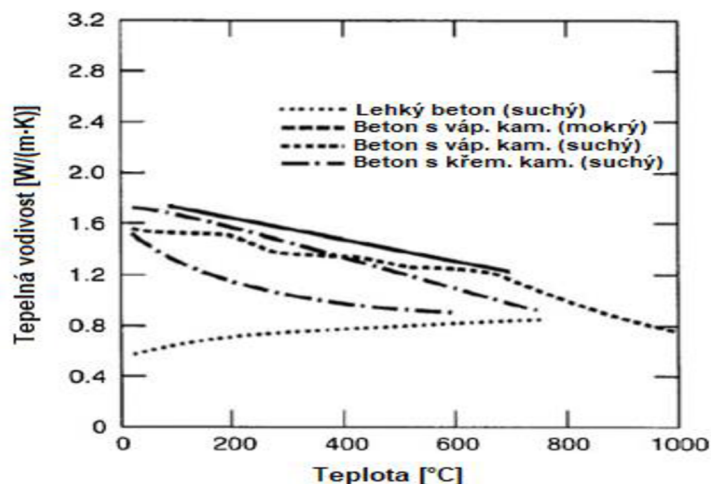
Tyto vlastnosti výrazně závisí na typu kameniva, obsahu vlhkosti nebo složením betonové záměsi [38–40].

3.6.3.1. Tepelná vodivost betonu

Tepelná vodivost je míra, se kterou teplo proudí materiálem. V procesu vedení se teplo přenáší z jedné částice na druhou prostřednictvím molekulárních vibrací a přenosu energie prostřednictvím volných elektronů. Tepelná vodivost materiálu závisí na jeho mřížkovém uspořádání, mineralogickém složení, konektivitě pórů a velikosti krystalů. U betonu tepelná vodivost závisí na již zmíněných proměnných jako typu a zdroji jednotlivých složek, teplotní expozici a nejvíce na obsahu vlhkosti. Tepelná vodivost betonu se při pokojové teplotě pohybuje v rozmezí od 1,6 W/(m·K) do 3,6 W/(m·K). Tepelná vodivost vzorků nasyceného betonu a malty je údajně o 50–70 % vyšší než u suchých vzorků [38–48].

Při zvýšení teploty dochází k odpařování fyzikálně a chemicky vázané vody či rozkladu hydrátů, která způsobuje pokles tepelné vodivosti betonu. Pokles tepelné vodivosti souvisí i s praskáním rozhraní cementového tmele a kameniva a s narušením mezikrystalických vazeb v kamenivu v důsledku nadměrné tepelné roztažnosti. Při normálně teplotě se tepelná vodivost zvyšuje se stupněm krystalinity materiálu. S rostoucí teplotou však klesá více u dobře krystalizované struktury než u špatně krystalizované struktury. Změny vlastností kameniva při vysokých teplotách samozřejmě ovlivňují tepelné vlastnosti betonu a tím i přenos tepla v betonu. Fyzikálně-chemické změny probíhající v agregátech se liší podle minerálního složení. Proto je výběr kameniva důležitým faktorem při určování tepelných vlastností betonu vystaveného vysoké teplotě [38–48].

Vzhledem k tomu, že kamenivo zaujímá v betonu velký objem (kolem 60–80 %), je obecně známo, že přenos tepla betonem závisí hlavně na povaze kameniva. Mineralogické vlastnosti kameniva výrazně ovlivňují vodivost betonu: čediče a dolerity mají nízkou vodivost, vápence a žuly jsou ve středním rozmezí, zatímco křemenec a pískovec vykazují nejvyšší vodivost. Tepelná vodivost hornin běžně používaných jako kamenivo do betonu se pohybuje od 1 do 9 W/(m·K). Betony s křemičitým kamenivem mají při pokojové teplotě větší tepelnou vodivost než betony s vápenatým kamenivem [38–48].

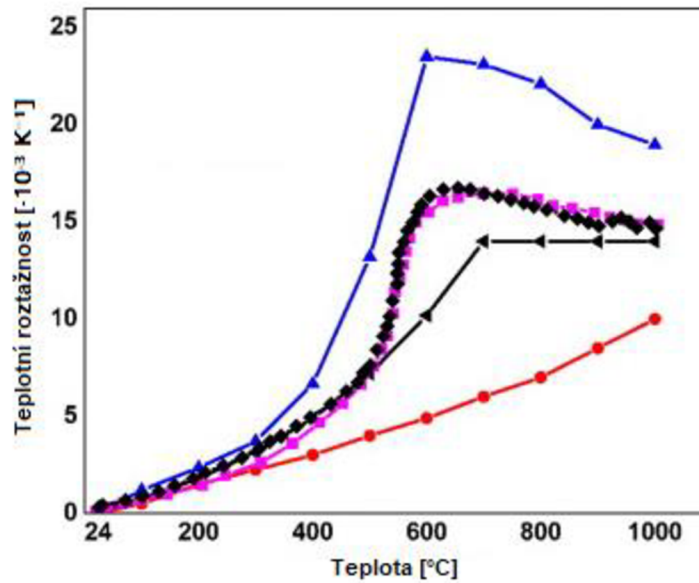


Obrázek 12: Tepelná vodivost různých betonů v závislosti na teplotě a obsahu vlhkosti [11]

3.6.3.2. Tepelná roztažnost cementového kompozitu

Tepelná roztažnost je jednou z nejdůležitějších vlastností při pochopení chování betonu při zvýšených teplotách. Tepelná roztažnost je namáhání betonu, který je vystaven pouze tepelnému zatížení bez jakéhokoli mechanického zatížení. Koeficient tepelné roztažnosti (KTR) je mírou tepelné roztažnosti ve smyslu procentuální změny délky na stupeň nárůstu teploty [43]

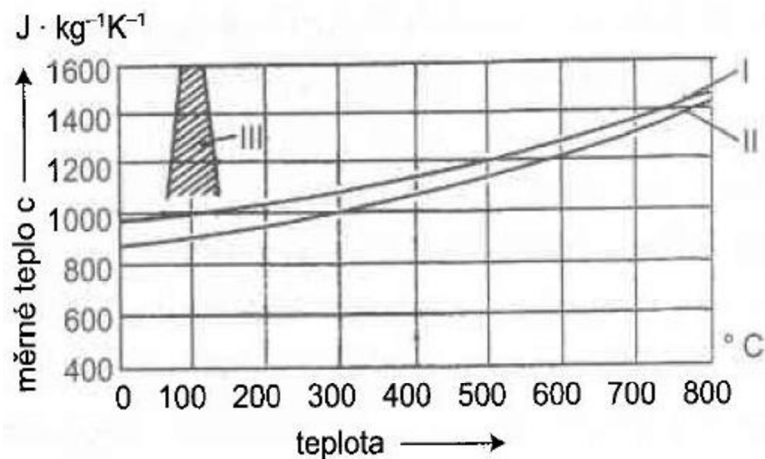
Lineární tepelnou roztažnost lze měřit pomocí dilatometrie. Protože beton je heterogenní materiál, jeho vlastnosti jsou kumulativním efektem vlastností jeho jednotlivých složek a každá složka má individuální KTR. Při pokojové teplotě se KTR betonu pohybuje od $6 \cdot 10^{-6}$ do $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ podle typu přítomného hrubého kameniva. Hlavní podíl betonu tvoří hrubé kamenivo. Tepelná roztažnost hrubých kameniv závisí na typech kameniva a jejich krystalografickém uspořádání. KTR žuly se pohybuje od $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ do $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, zatímco KTR vápence se pohybuje od $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ až $9,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Při asi 570 °C se KTR hrubých agregátů obsahující křemen prudce zvyšuje v důsledku expanzivní inverze z beta na alfa křemen. Experimentálním pozorováním bylo detekováno zvyšování teplotní roztažnosti betonu při zvyšování teploty, jak je znázorněno na obrázku č. 13. Dále je také pozorováno, že náhlé zahřátí nebo ochlazení může vyvolat smrštění v oblasti kontaktní zóny, což může dále způsobit praskliny. Faktory ovlivňující tepelnou roztažnost betonu jsou podíl směsi, druh cementu, velikost vzorku, stupeň nárůstu teploty a stáří vzorku [43,46,48,49].



Obrázek 13: Teplotní roztažnost betonů s různými kamenivy v závislosti na teplotě [11]

3.6.3.3. Měrné teplo cementového kompozitu

Měrné teplo neboli tepelná kapacita je vyjádřena velikostí míry, s jakou se teplo ukládá v materiálu, nebo také rychlosti nárůstu vnitřní energie systému. Podle oficiální definice je měrné teplo potřebné ke zvýšení teploty materiálu o jeden stupeň celsia. Faktory ovlivňující měrné teplo betonu jsou hustota betonu, druh kameniva a vlhkost. Měrné teplo suchého betonu se při pokojové teplotě pohybuje cirká 900 J/(kg·K) pro beton obsahující křemičité i vápenaté kamenivo. Při zvyšování teploty se zvyšuje i měrné teplo až na cirká hodnotu 1400 J/(kg·K) U vlhkého betonu se může měrné teplo lineárně zvyšovat při teplotě 115 °C až na hodnotu 2200 J/(kg·K), kdy poté lineárně klesá na 1000 J/(kg·K) při asi 200 °C. Tento jev lze přikládat odpařování fyzikálně vázané vody. Výzkumník Shin a kolektiv uvedli, že mineralogické složení nemá významný vliv na měrné teplo materiálu. Nicméně Kodur a jeho společníci pozorovali, že od pokojové teploty do 800 °C se měrné teplo zvyšuje z 840 na 1800 J/(kg·K) v důsledku fázových změn ve vázané vodě. V případě betonu sestávajícího z křemičitého kameniva se dále zvyšuje v důsledku inverze křemene při cca 570 °C. Autoři také uvedli, že beton sestávající z uhličitanových agregátů vykazuje vyšší měrné teplo nad 700 °C v důsledku přítomnosti velkého množství dolomitu, který vyžaduje velké množství tepla k disociaci při asi 780 °C [46–48].



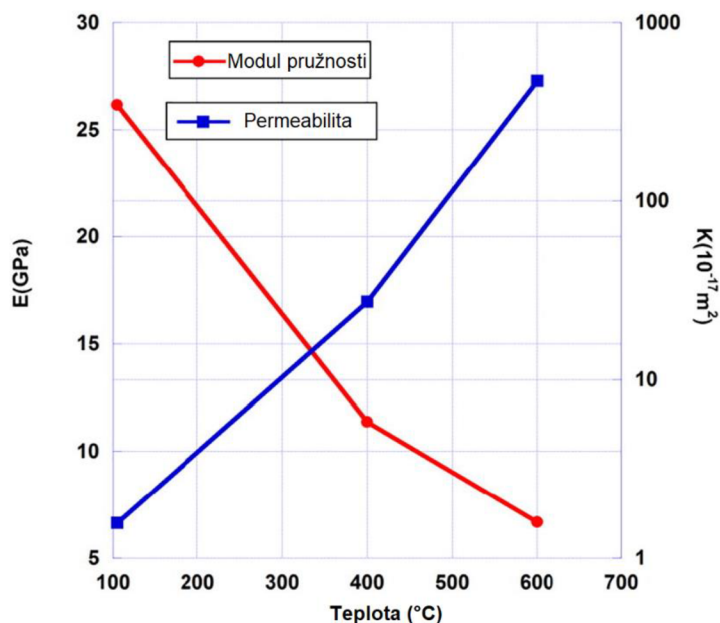
Obrázek 14: Měrné teplo betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony, III – mokré betony) [46]

3.6.3.4. Propustnost cementového kompozitu

Propustnost neboli permeabilita betonu je materiálová charakteristika popisující schopnost tekutin (plynu nebo kapaliny) pronikat porézním materiálem pod tlakovým gradientem. Je to jedna z nejkritičtějších charakteristik řídící rychlost transportu vlhkosti a vývoj pórového tlaku uvnitř betonu, který přispívá k riziku odprýskávání povrchové vrstvy betonu. Bylo provedeno mnoho studií o propustnosti betonu při vysokých teplotách v nezátíženém stavu, zatímco ve srovnání s tím existuje jen málo publikovaných údajů o propustnosti betonu vystaveného tepelnému i mechanickému zatížení [53–56].

Zahřívání materiálu je spojeno s fyzikálně chemickými změnami, jako odpařování vody, rozklad CSH gelu nebo rozklad portlanditu, které mění jeho porézní strukturu a zvyšuje jeho propustnost a činí jej citlivějším. Ztráta vody vede k mikropraskání a zvětšení velikosti pórů. Další změna, která přispívá ke zvýšení propustnosti, je fázová přeměna na křemičitém kamenivu, která má za důsledek praskání a zvětšení velikosti pórů, prasklin nebo dutin [53–56].

Tento jev, který je v predešlém textu popsán, můžeme pozorovat na obrázku č. 15. Dochází zde ke exponenciálnímu zvýšení propustnosti a zároveň ke snižování mechanických vlastností, v tom případě modulu pružnosti [53–56].



Obrázek 15: Závislost mezi modulem pružnosti a propustnosti s rostoucí teplotou [53]

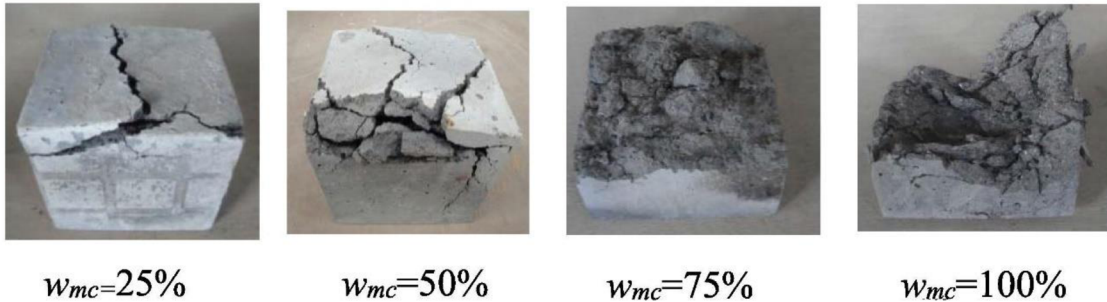
3.7. Odprýskávání cementového kompozitu

Odprýskávání (odlupování) betonu po vystavení vysoké teploty je velkým problémem a jeho důležitost si pravidelně připomínáme, když slyšíme o tragických požárech v tunelech nebo obytných budovách. V této problematice je cílem výzkumů ochrana majetku a osob a zajištění bezpečnosti složek záchranné služby v případě zásahu. Problematika odprýskávání je stále aktuální, a to z různých důvodů. Jeden z důvodů může být technologická inovace stavebních materiálů, které jsou mechanicky odolnější, ale tepelně citlivější. S tímto problémem se nejčastěji setkáme při testování vysokopevnostních až ultravysokopevnostních betonů, které se vyznačují menší porézností a větší hutností než běžný beton [57–67,75].

Odlupování označujeme jako nežádoucí účinek vysoké teploty na beton, který souvisí s obsaženou vlhkostí v betonu. Samotné odlupování může být násilné nebo nenásilné odtržení vrstvy nebo kousků betonu z povrchu konstrukce, je-li vystaven vysokému a rychlému stoupání teploty, jaké se při požáru vyskytují. Téměř všechny znalosti o odlupování pochází ze zkušeností s konstrukcemi vystavenými požáru. Nové informace vyplývají ze simulace požáru v tunelové konstrukci. Tunelová konstrukce má daleko vyšší počáteční vlhkost než obytné budovy. Dále se pak při požáru budov rychlost zahřívání betonového povrchu pohybuje v rozmezí 20–30 °C/min. U tunelu se udává, že tato hodnota stoupání je přibližně 250 °C/min [58,59,63,65].

Odprýskávání se obecně rozděluje do těchto kategorií:

- plošné odprýskávání,
- štěpení a odprýskávání části kameniva,
- explozivní odprýskávání,
- odlupování rohů,
- odlupování po ochlazení [66].

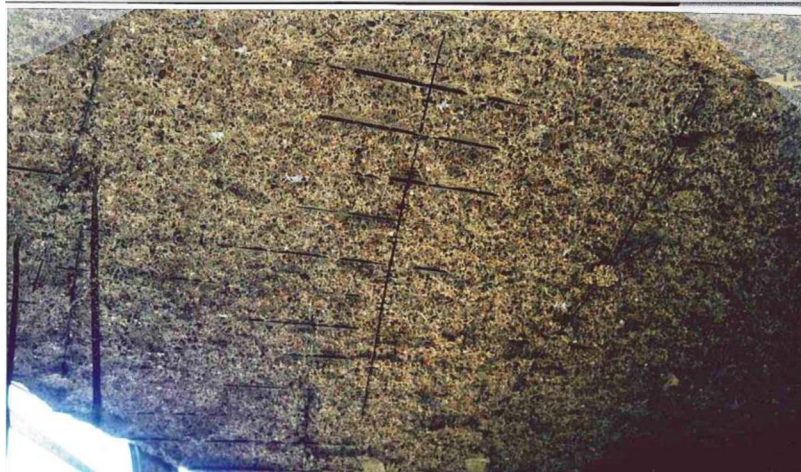


Obrázek 16: Vliv obsahu vlhkosti na odprýskávání betonu [63]

Toto rozdělení nemusí být zcela vypovídající, protože mezi některými z nich neexistuje jasná dělicí čára, a proto někteří autoři rozdělují odlupování odlišně. Při požáru většinou dochází k více druhům odlupování, v některých případech může dokonce dojít i ke kombinaci všech již uvedených druhů. První tři zmíněné druhy odlupování se obvykle vyskytují na počátku a při největší intenzitě požáru, naopak zbylé druhy se vyskytují až na konci požáru. Odlupování může být nevýznamné, alternativně může mít vážný účinek proti požární odolnosti betonu z důvodu odstranění krycí vrstvy betonu, po kterém vystavíme výztuž rychlému nárůstu teploty, čímž dochází k poškození [57–66,75].

3.7.1. Plošné odprýskávání

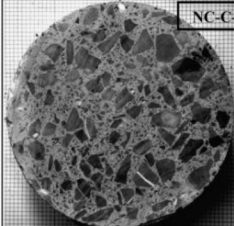
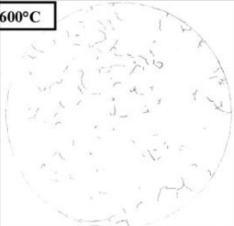
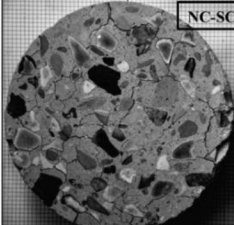
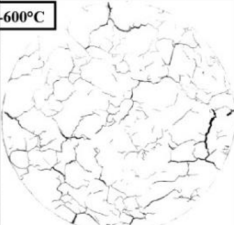
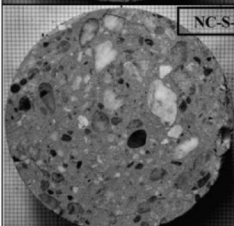
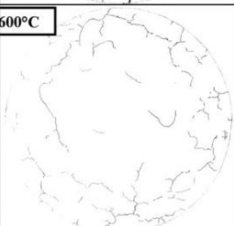
Tento typ odprýskávání se projevuje v počáteční fázi požárního zatížení. Charakteristickým projevem tohoto druhu odprýsknutí je vytvoření plošných podpovrchových puchýřů a dutin, jejichž důsledkem pak dochází k následnému odprýsknutí. Jak už název napovídá, jedná se o celoplošné odstřelení krycí vrstvy betonu a odhalení výztuže. Odprýsknuté kusy betonu se pohybují rozměrově cirká 20 mm [64,75].



Obrázek 17: Plošné odlupování po teplotním namáhání [65]

3.7.2. Štěpení a odprýsknutí části kameniva

Štěpení a odprýsknutí části kameniva může být způsobeno rozdílnou teplotní roztažností jednotlivých složek betonu. Při tepelném zatížení dochází buď k narušení vazby mezi cementovým tmelem a kamenivem, nebo poškození samotného kameniva. Poškození kameniva může být způsobeno fyzikálně–chemickými přeměnami anebo rozdílnou teplotní roztažností samotného kameniva. Z tohoto důvodu je proto výhodnější kamenivo, jehož složení je mono–minerální. Tento druh odprýskávání se především vyskytuje u betonu s použitým křemičitým kamenivem, u kterého dochází k fázové přeměně [36,75].

| Vzorek po tepelném zatížení | Struktura trhlin | Procentuální zastoupení trhlin |
|--|--|--------------------------------|
|  <p>NC-C-600°C</p> |  | 0,99 % |
|  <p>NC-SC-600°C</p> |  | 5,44 % |
|  <p>NC-S-600°C</p> |  | 1,56 % |

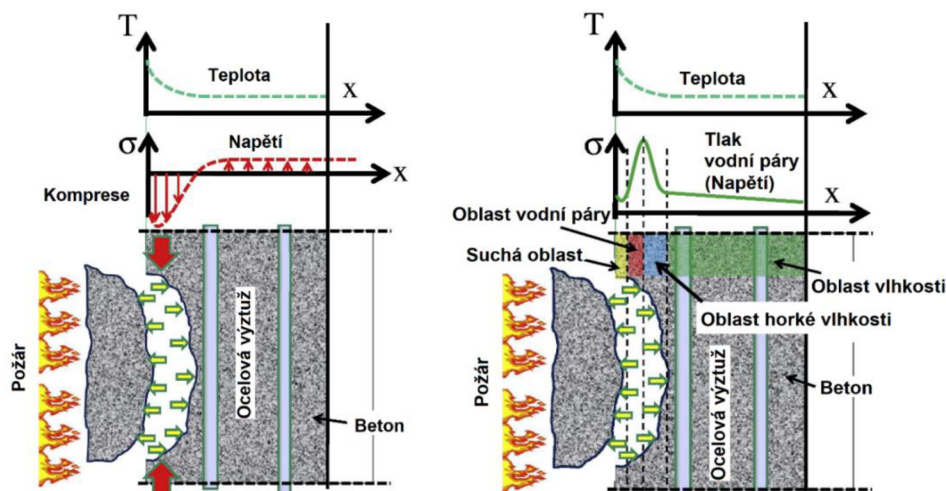
Obrázek 18: Štěpení a odprýskávání části kameniva [36]

Z výše uvedeného obrázku (obrázek č. 18) je patrné, že nejvíce poškozený je beton, kde bylo použito kamenivo křemičito–vápenaté (NC–SC). Zde jsou trhliny spojeny a tvoří síť rozmístěnou po celém povrchu vzorku. Plocha trhlin je asi 5,44 % povrchu betonového vzorku. Trhliny se nacházejí hlavně na rozhraní cementového tmelu a kameniva, ale také prochází skrz agregáty. U betonu, kde bylo použito křemičité kamenivo (NC–S), jsou trhliny méně husté, nacházejí se hlavně a okraji vzorku. Plocha trhlin je asi 1,56 % povrchu. Trhliny jsou pozorovány na rozhraní cementového tmelu a kameniva. U posledního vzorku, kde bylo použito vápenaté kamenivo (NC–C), jsou trhliny izolované a netvoří síť. Plocha trhlin je asi 1 % povrchu s minimální šířkou trhlin. [36,57,65]

3.7.3. Explosivní odprýskání

Tento druh odprýskávání se projevuje na počátku působení vysokých teplot, cca do 30 minut po vzniku požáru. Vyznačuje se prudkým a intenzivním odstraněním krycí vrstvy až do hloubky 100 mm, což vede k výraznému oslabení průřezu. Tímto jevem dochází k výraznému snížení mechanických vlastností a může dojít až ke kolapsu zatíženého prvku nebo dokonce ke zhroucení, které může ohrozit celou konstrukci [57–61, 66,75].

Existují dvě nejčastěji uváděné teorie o mechanismu explozivního odprýskávání betonu při zatížení vysokou teplotou. První mechanismus zahrnuje termomechanický proces, který je přímo spojen s teplotním polem. Jak se teplota povrchu betonu zvyšuje, teplotní gradient vede k rozložení tlakového napětí ve směru rovnoběžném s povrchem betonu, což vede k rozvoji tahových napětí v kolmém směru. Když napětí v tahu překročí pevnost v tahu, dojde k explozivnímu odlupování betonu, jak je znázorněno na obrázku č. 19 [59–63].



Obrázek 19: Mechanismy explozivního odprýskávání: nalevo – teplotní dilatace, napravo – tlak vodní páry [66]

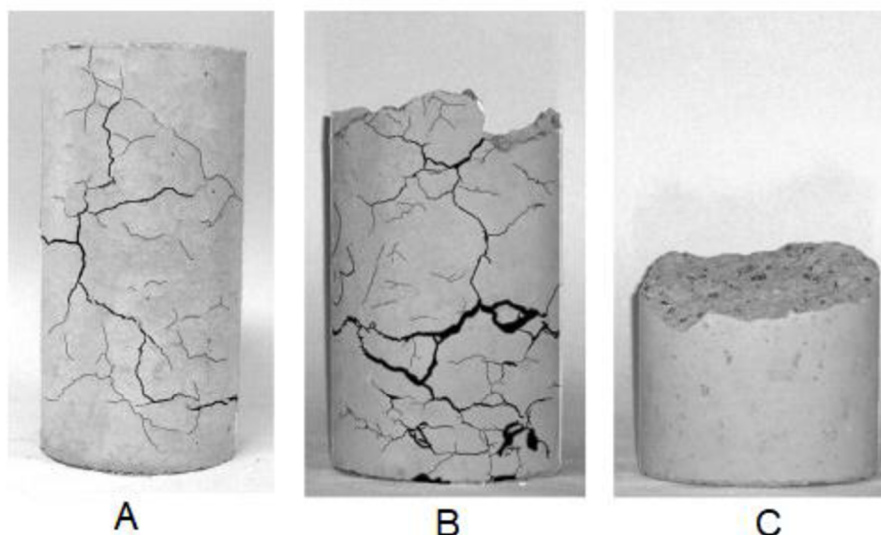
Druhý mechanismus je založen na přeměně vlhkosti obsažené v betonu na plynou fázi. Ve vyzrálém betonu jsou vzduchové póry zaplněny různým množstvím vlhkosti. Množství obsažené vlhkosti je nejvíce závislé na stáří betonu a prostředí, kde je beton uložen. Při vypuknutí požáru dochází k zahřívání betonu, kdy nastává přeměna kapalně vlhkosti na vodní páru, která zvyšuje tlak v pórech. K dramatickému zvýšení tlaku vodní páry dochází zejména na hranici mezi oblastí vodní páry a oblastí horké vlhkosti. Tyto dva mechanismy mohou působit samostatně nebo v kombinaci [57–66].

Faktory ovlivňující explozivní odprýskávání:

- mechanické vlastnosti,
- stáří a propustnost,
- rychlost ohřevu,
- velikost a tvar průřezu,
- typ a velikost kameniva,
- obsah vlhkosti,
- přítomnost trhlin,
- vyztužení [75].

Při hodnocení náchylnosti betonu k explozivnímu odprýskávání je důležitým sledovaným parametrem jeho hutnost nebo propustnost. Pokud je pórový systém dostatečně hustý a beton propustný, vzniklá pára se rozpíná nebo uniká k povrchu, tudíž nenastávají žádné deformace a iniciace trhlin. Při nízké pórovitosti vznikající tlak začne beton namáhat tahovým a tlakovým napětím, který překročí mechanické vlastnosti samotného materiálu a dochází k explozivnímu odstřelu kusů betonu [57–67].

Velmi zajímavým faktorem, který je často opomíjen, a není v literatuře moc popsán, je vztah mezi velikostí kameniva a odprýskáváním, který je možný sledovat na obrázku č. 20. Na tomto obrázku můžeme sledovat zkušební tělesa vyrobená z obyčejného betonu, který byl teplotně zatížen. Jednotlivá zkušební tělesa byla vyrobena s odlišným maximálním zrnem kameniva. Těleso A (vlevo) bylo vyrobeno z betonu, kde bylo použito maximální zrno kameniva 14 mm, u tělesa B (uprostřed) bylo použito největší zrno 10 mm a u tělesa C bylo použito jen drobné kamenivo do 4 mm. Rozdíly mezi výsledky jsou patrné hned na první pohled [58,59,67].

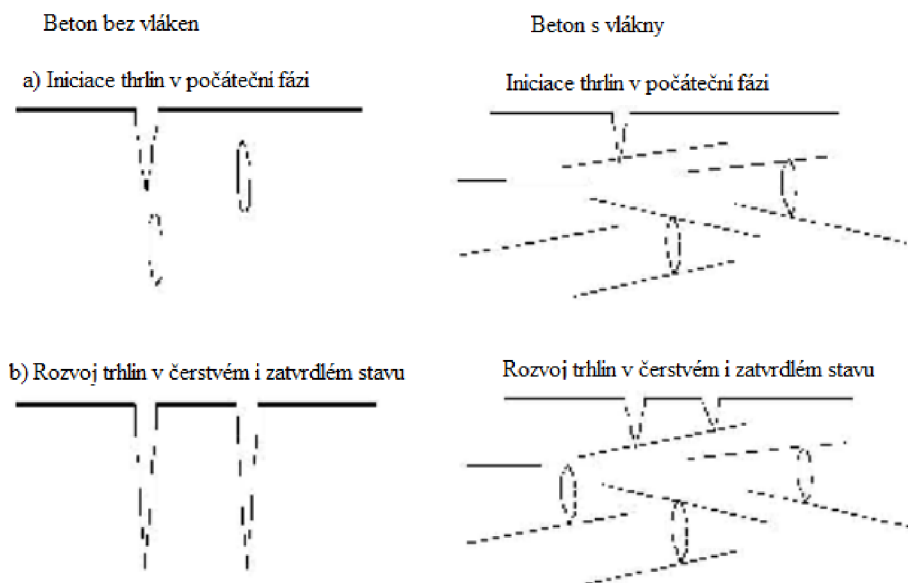


Obrázek 20: Vliv velikosti kameniva na odlupování betonu [67]

Tento efekt je výzkumníky vysvětlován existencí hlavní trhliny (lomová zóna), u které se nahromadilo mnoho mikrotrhlin. Je zřejmé, že zvýšení velikosti kameniva vede k zvýšení lomové zóny. Velká lomová zóna může snížit tok energie, která se může uvolnit do těchto trhlin a nedochází k odstřelu a rozpadu betonu [60,63,64,67].

3.8. Užití vláken do cementového kompozitu

Beton je materiál s vysokou pevností v tlaku, ale přibližně desetkrát menší pevností v tahu. Dále se vyznačuje křehkým chováním a neumožňuje přenos napětí po prasknutí. Aby se zabránilo křehkému porušení a zlepšily se mechanické vlastnosti, je možné do betonové matrice přidat vlákna. Vznikne tak vlákny vyztužený beton (FRC), což je cementový kompozitní materiál s rozptýlenou výztuží ve formě vláken, které mohou být např. z oceli, polymeru, skla, uhlíku a dalších. Vlákna do betonu nepoužíváme jen z důvodu zlepšení mechanických či fyzikálních vlastností, ale také z ekonomických a ekologických důvodů. Právě díky tomu, že je stále větší a větší důraz kladen na udržitelný rozvoj a snižování produkce oxidu uhličitého, se stává co nejdélejší životnost betonových konstrukcí jedním z prioritních požadavků. Proto je cílem snížit počet a velikost trhlin a pórů, propustnost vody nebo vnikání chemických látek [68–70].



Obrázek 21: Schématické znázornění vlivu vláken na omezení vzniku a rozvoje trhlin [71]

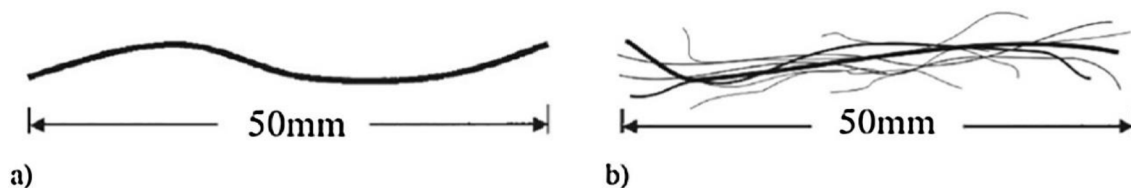
Při charakterizaci FRC je třeba vzít v úvahu druh materiálu, tvar a geometrii vlákna (délka l , průměr d a poměr stran/štíhlost l/d). Podle druhu materiálu rozlišujeme vlákna na kovová a nekovová. První skupina zahrnuje ocelová vlákna, zatímco druhá je velmi různorodá. Obsahuje syntetická (polymerní), skelná, uhlíková, čedičová nebo přírodní vlákna. Rozdílné chování FRC je z velké části způsobeno druhem použitých vláken a jejich chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Navíc další významný vliv na vlastnosti FRC má samotné dávkování vláken. Nelze předpokládat, že zvýšením množství vláken se budou vlastnosti FRC neustále zlepšovat. Mnohé výzkumy poukazují na koncept optimálně navržené receptury, ve které je dosaženo kompromisu mezi zpracovatelností a pevností betonové směsi [68–71,77].

Jak bylo zmíněno výše, rozměry a štíhlost vláken jsou zásadní při analýze chování FRC. Ve studii výzkumníka Yaziciho a kol. byly uvažovány různé objemy vláken (0,5 %; 1,0 % a 1,5 %) a štíhlosti (45, 65 a 80). Autoři došli k závěru, že vyšší l/d vlákna vedlo ke zlepšení pevnosti v tlaku, tahu a ohybu (až o 50 %), v porovnání s vláknem nejmenší štíhlosti. Problematiku štíhlosti vláken se zabýval i výzkumník Garcii-Taengua, který sledoval deformace spojené se smrštěním betonu. Z jeho práce vyplývá, že nejen obsah vláken a zatížení, ale také štíhlost ovlivnila dotvarování u předem popraskaného prvku [68–71,80].

Výzkumníci, kteří se zabývali délkou vlákna, přišli k následujícím závěrům. Optimální délka vlákna pro ochranu betonu proti odlupování je určena třemi kritickými parametry: mezisložkovou vzdáleností, velikostí kameniva a počtem vláken. Čím větší je velikost hrubého kameniva, tím delší je optimální délka vlákna. Způsobeno je to

skutečností, že zvětšováním velikosti kameniva se zvyšuje i vzdálenost mezi kamenivem, což vyžaduje delší vlákna. Pro daný obsah vláken, pokud se průměr vlákna sníží, se zmenší také optimální délka vlákna. Je tomu tak proto, že počet vláken se dramaticky zvyšuje a tím překonává vliv délky na ochranu proti odlupování [68,69,71,77].

Účinnost vláken závisí nejen na výše uvedených parametrech, ale také na jejich spojení s betonem. Pro zvýšení soudržnosti vlákna a betonu mají vlákna různé tvary (zvlněná, zkroucená, sinusová, hákovitá) a jejich zářezy mohou být fibrilovány – konce se během míchání rozdělí, jak můžeme vidět na obrázku č. 22. Navíc samotný tvar vlákna ovlivňuje zakotvení v betonové směsi. Je prokázáno, že ocelová vlákna s hákovým koncem jsou účinnější při zlepšování houževnatosti než jiné druhy vláken. Konkrétně pro získání podobné hodnoty soudržnosti je vyžadován vyšší obsah vláken pro vlnité a deformované konce než pro ocelová vlákna s hákovým koncem. Je třeba zmínit, že účinnost vláken závisí také na jejich orientaci ve vztahu k tvorbě trhlin v betonovém prvku. Nejpozitivnějšího účinku se dosáhne, když jsou vlákna ve směru pnutí kolmá na trhlinu. Rozptyl výsledků při mechanických zkouškách betonu je přítomen mimo jiné v důsledku rozdílů v rozložení vláken v matrici betonu [68–70,82].



Obrázek 22: Polypropylenové vlákno a) před mícháním, b) po smíchání [70]

Je třeba také poznamenat, že použití rozptýlené výztuže v betonu nám dává omezení týkající samotného návrhu betonové směsi, kdy musíme počítat s vnesením dalšího povrchu, který je třeba ovlhčit a také obalit cementovým tmelem. Při vyhodnocování zpracovatelnosti betonu bylo zjištěno, že je ovlivněna nejen složením směsi, ale také množstvím, tvarem a štíhlostí vláken. Přidáním PP vláken má zřejmý negativní vliv na hodnoty sednutí, a proto je při práci s FRC vyžadováno použití plastifikační přísady. V opačném případě může být směs nezpracovatelná, poréznější a vlákna mohou být nerovnoměrně rozmístěna a tvořit shluky. Zvýšené dávkování vláken proto nemusí vždy znamenat zlepšení mechanických vlastností FRC [68–71,83].

3.8.1. Polypropylenová vlákna

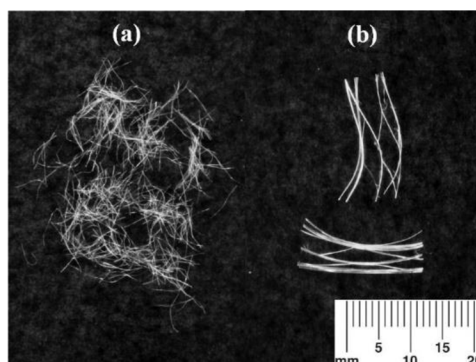
Polypropylenová vlákna (PP) jsou polymerní vlákna, která jsou definována jako rovné nebo deformované fragmenty extrudovaného, orientovaného nebo řezaného polymerního materiálu. Rozlišujeme dva druhy PP vláken: mikrovlákná a makrovlákná (obrázek č. 23). Liší se především délkou, ale také funkcí, kterou v betonu plní.

Makrovlákna mohou být také nazývána strukturální vlákna, protože jsou ve velmi omezené míře schopna nahradit tradiční výztuž v podobě ocelových tyčí a přenášet zatížení působící na konstrukci. Jejich délka se obvykle pohybuje mezi 30 a 50 mm. Druhou skupinou jsou mikrovlákna, která jsou kratší než 30 mm a neplní nosnou funkci. Jejich hlavní úlohou je překonat plastické smrštění a omezit tvorbu trhlin v betonu. Díky tomu zvyšují odolnost a prodlužují životnost prvku. Mikro PP vlákna mohou být alternativou k sítím, které se používají také proti tvorbě prasklin [70,72,75].



Obrázek 23: Polypropylenová vlákna a) mikrovlákna, b) makrovlákna [70]

Polypropylenová vlákna používaná v betonových aplikacích jsou komerčně dostupná v řadě typů a velikostí. Nejběžnější jsou monofilamentní a fibrilovaná (viz obrázek č. 24). Monofilamentní vlákna jsou vyráběna procesem vytlačování s nominálními průměry v rozmezí 10–40 μm . Monofilamentní vlákna jsou vyráběna z jednoho pramene vlákna. Fibrilovaná vlákna jsou vyráběna ve formě fólií, které jsou poté nařezána a rozvlákněna. Vlákna všech druhů lze řezat na požadovanou délku, běžně v rozmezí 3–20 mm. V závislosti na způsobu výroby mají vlákna různé mechanické vlastnosti. Lze konstatovat, že pevnost v tahu mikro PP vláken je cca 300–450 MPa a modul pružnosti se pohybuje přibližně 3,8–7,0 GPa. Pro makro PP vlákna jsou hodnoty vyšší, 400–760 MPa pro pevnost v tahu a 3,5–12,0 GPa pro modul pružnosti [76,74,83].

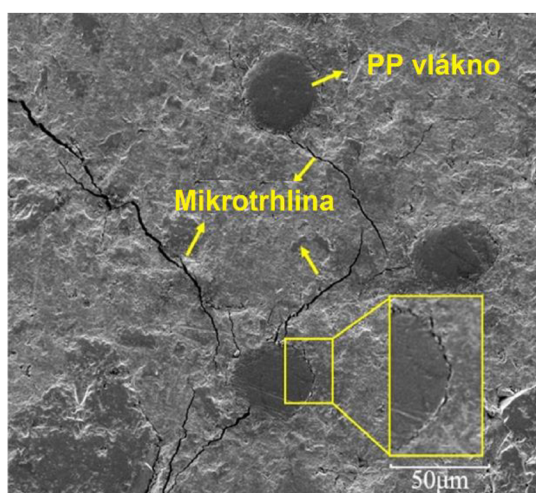


Obrázek 24: Polypropylenová vlákna a) monofilamentní, b) fibrilovaná [74]

Více než tři desetiletí experimentálních studií přesvědčivě prokázali, že přidání polypropylenových vláken do betonu může značně snížit sklon k odlupování betonu způsobené vysokými teplotami. Tyto vlákna by měly fungovat tak, aby se změnily vnitřní poměry jako migrace vlhkosti a/nebo procesy odpařování v zahřátém betonu, čímž se snižuje náchylnost k odlupování, zvláště když je dominantní termohydraulický mechanismus odlupování. V literatuře jsou uváděny tři potenciální mechanismy, jak PP vlákna v betonu skutečně fungují:

- nespojité rezervoáry,
- spojité kanálky,
- prázdné kanály [70–84].

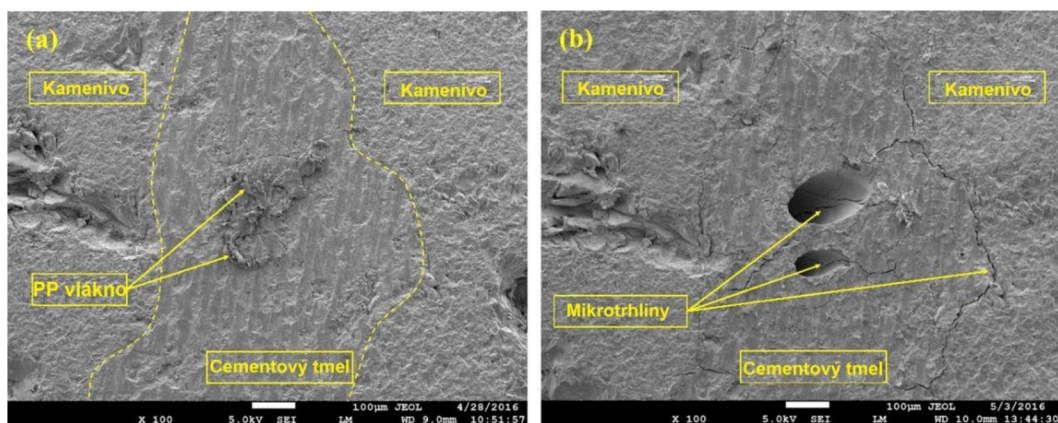
Během zahřívání mohou objemové změny PP vláken způsobit mikrotrhliny v cementové matrici obklopující vlákna, a tak vytvářet nespojité rezervoáry, který zvyšují migraci vlhkosti v betonu. Začlenění PP může také podporovat přirozené zvyšování obsahu vzduchu v betonu během míchání [70–84].



Obrázek 25: Mikrotrhliny (nespojité rezervoáry) vzniklé expanzí PP vláken [64]

Na rozhraních mezi PP vlákny a betonovou matricí mohou být také vytvořeny kontinuální kanálky v důsledku špatné mezifázové adheze a/nebo relativně poréznější přechodové zóny na rozhraní. U tohoto jevu, který je nazývaný teorie tlakově indukovaného tangenciálního prostoru, se předpokládá zvyšující migrace vlhkosti betonu během ohřevu [70–84].

Zlepšený transport vlhkosti může být také řízen vytvářením prázdných kanálků, které zanechávají pyrolyzovaná (roztavená) vlákna PP během zahřívání při cca 170 °C, jak můžeme vidět na obrázku č. 26. Toto je nejrozšířenější popisovaný mechanismus používaný k popisu účinku PP vláken v zahříváném betonu [70–84].



Obrázek 26: Mikrotrhliny vzniklé roztažností PP vláken a kameniva, kanálky v betonu vzniklé táháním PP vláken [64]

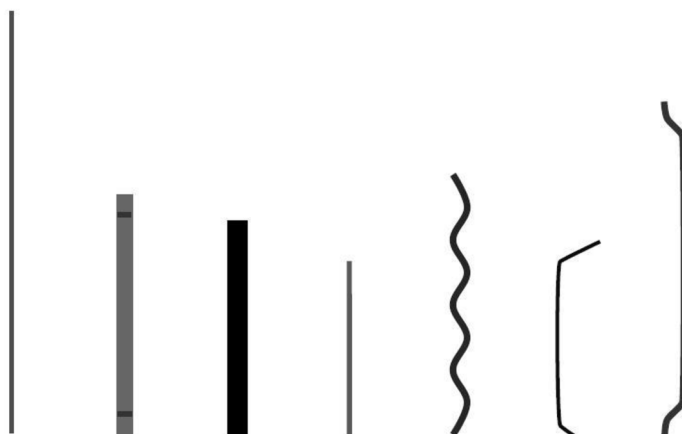
3.8.1.1. Ocelová vlákna

Je více než známé, že přidáním ocelových vláken do betonu přinášíme zvýšení mechanických vlastností betonu. Toto odlišné chování betonu s rozptýlenou výztuží oproti betonu prostému můžeme sledovat už v prvních hodinách zrání betonu. Tento rozdíl se nejvíce projeví po tvrdnutí cementové matrice, kdy už jsou vlákna pevně zakotvena. Nejvíce se zvýšení vlastností projevuje u pevnosti v tahu a pevnosti v tahu ohybem. Lze tedy obecně konstatovat, že podpora vláken spočívá především pro tahová napětí a distribuci tohoto napětí v betonu. Velmi důležitá je i skutečnost, že ocelová vlákna brání vzniku smršťovacích trhlin a zvýšení odolnosti proti explozivnímu odprýskávání betonu. Dávkování těchto vláken se pohybuje okolo 20 až 40 kg/m³ [15,16,68,69,99,100].

Ocelová vlákna je možné rozdělit do několika základních skupin. První dělení je charakterizováno základním tvarem a průřezem:

- rovná vlákna s hladkým povrchem,
- rovná vlákna s profilovaným povrchem,
- zvlněná vlákna:
 - vlákna s koncovými ohyby,
 - vlákna s koncovými kotvícími ohyby a rilováním,
- segmentová vlákna
 - pozinkovaná a antikorozi vlákna,
 - speciální vlákna [15,16].

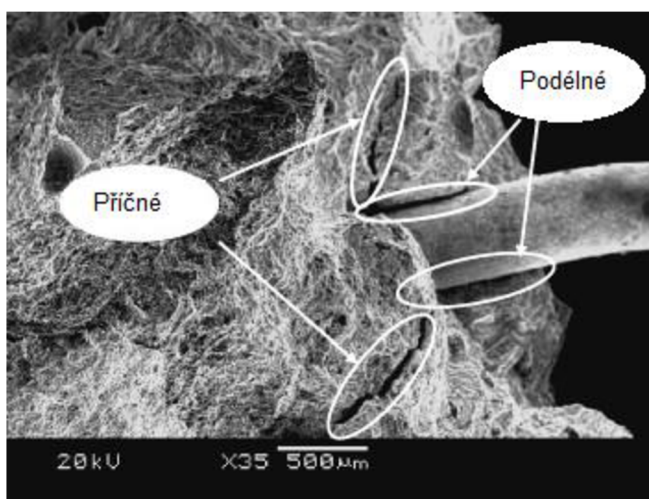
Jejich průřez je kruhového nebo obdélníkového tvaru. Hlavní a také nejpoužívanější skupina vláken je tvořena vlákny s typickými upravenými konci, které můžeme vidět na obrázku č. 27 napravo. Délka takovýchto vláken se pohybuje od 10 do 70 mm podle použití. Další dělení může být dle druhu materiálu, ze kterého jsou vyrobená [15,16,99].



Obrázek 27: Ocelová vlákna: různé typy a průřezy [16]

Zlepšení soudržnosti betonu, který je zatížen vysokými teplotami, lze ovlivnit používáním ocelových vláken, které eliminují šíření trhlin. Při vyšším dávkování ocelových vláken (více než 80 kg na 1 m³ betonu) však, ale nedochází k význačnému zlepšení odolnosti, ale naopak ke zhoršení vlastností, protože dochází k významnému oddělení jednotlivých fází hmoty betonu a tvoření shluků vláken [68,69,99,100].

Výzkumníci z Číny ve své publikaci došli k závěru, že přidání ocelových vláken je užitečné pro beton, který byl zasažen požárním zatížením až do teploty 1 200 °C. Přidání ocelových vláken přispělo ke zvýšení mechanických vlastností a vyšší odolnosti vůči účinkům vysokých teplot. Došlo k zvýšení soudržnosti a zbytkové pevnosti [99,100]. Při začlenění ocelových vláken do betonu byly pozorovány však i negativní účinky po vystavení velmi vysoké teplotě. Díky různým koeficientům teplotní roztažnosti se objevily příčné a podélné trhliny mezi maticí a ocelovými vlákny, jež jsou vidět na následujícím mikroskopickém snímku (obrázek č. 28) [68,69].

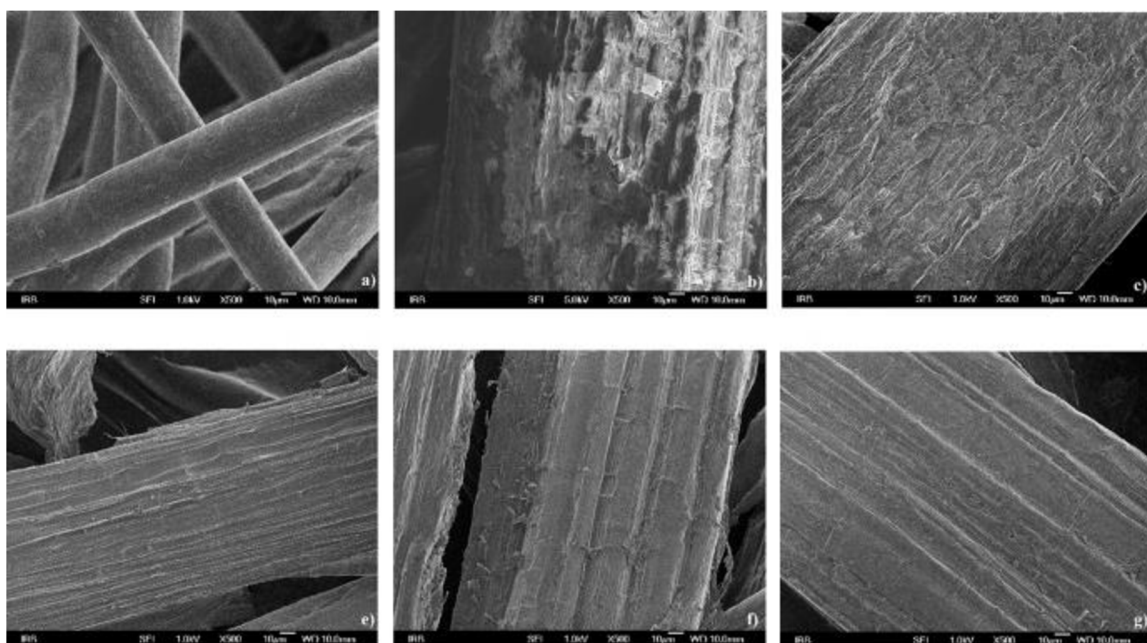


Obrázek 28: Podélné a příčné trhliny v matici s ocelovými vlákny zatížené vysokou teplotou [69]

Po teplotě 750 °C bylo sledováno částečné natavení vláken. Takto natavená vlákna vyplnily trhliny a staly se křehčími. Poté docházelo ke křehkému lomu a kolapsu celého betonu. Je tedy stále otázkou, zda používání ocelových vláken spíše přispívá nebo nepřispívá ke zvýšení odolnosti betonu proti působení požáru [68,69].

3.8.2. Celulózová vlákna

V posledních několika letech problémy související s enviromentální a ekologickou problematikou vyvolaly rozsáhlý výzkum materiálů šetrných k životnímu prostředí. Zvláštní zájem je věnován použití vláken získaných z obnovitelných rostlinných zdrojů v kompozitních materiálech. Kombinace zajímavých mechanických a fyzikálních vlastností a jejich přínosů pro životní prostředí je hlavní hnací silou pro jejich použití jako alternativy pro vláknovou výztuž. Hlavní chemické složky jsou celulóza, hemicelulóza a různá množství ligninu. Koncentrace těchto složek závisí na faktorech jako druh vlákna, podmínky růstu, rozměr, staří, umístění na rostlině, způsob extrakce a zpracování. Celulózová vlákna vykazují řadu důležitých výhod jako je široká dostupnost za relativně nízkou cenu, biologická obnovitelnost a rozložitelnost, schopnost recyklace, nezávadnost, nulová uhlíková stopa a zajímavé fyzikální a mechanické vlastnosti (nízká hustota, dobrá tuhost, houževnatost a pevnost). Možné problémy spojené s těmito vlákny mohou být špatná mezifázová adheze mezi celulózovým vláknem a matricí, omezená teplotní stabilita kompozitu a špatná separace a disperze vláken. Tyto nevýhody lze eliminovat úpravou vláken. Nejúčinnější a nejvýhodnější se ukázalo alkalické ošetření (NaOH, Na₂SO₃) [84–92].



Obrázek 29: a) PP vlákno, b) Konopné vlákno bez ošetření, c) Konopné vlákno sterilizované, e) Konopné vlákno po 5% NaOH, f) Konopné vlákno po 2,5% NaOH + 2% Na₂SO₃, g) Konopné vlákno po 5% NaOH + 2% Na₂SO₃. [91]

Jako zdroje celulózových vláken lze využít všechny cévnaté rostliny, které se v přírodě vyskytují. Použití konkrétní rostliny jako zdroje vlákna pro danou aplikaci však závisí na její dostupnosti a na nákladech na extrakci. Celulózová vlákna se podle původu a složení dělí na nedřevěná a dřevěná vlákna. Dřevěná vlákna jsou také známá jako lignocelulózová vlákna, protože mají vyšší obsah ligninu než nedřevěná vlákna. Nedřevěná vlákna lze rozdělit do čtyř hlavních skupin v závislosti na části rostliny použité k extrakci: lýková vlákna (konopí, juta, kenaf, len a další), listová vlákna (sisal, ananas, palma olejná, banán a další), stonková vlákna (brčka – rýže, pšenice, ječmen, rákos – bambus, sloní tráva), a vlákna semen (bavlna, kokosové vlákno a další). Dřevěná vlákna se dělí na vlákna z měkkého dřeva (borovice, jedle), a vlákna z tvrdého dřeva (bříza, eukalyptus, buk, dub a další) [84–92].

Kromě původu můžeme celulózová vlákna klasifikovat podle funkce jejich tvaru. Tato vlákna lze tedy nalézt jako prameny (dlouhá vlákna o délkách mezi 20 a 100 cm), staplová vlákna (krátká vlákna, která lze spřádat do přízní) nebo buničinu (velmi krátká vlákna o délkách kolem 1–10 mm, které by měly být rozptýleny do vody, aby se oddělily) [84–91].

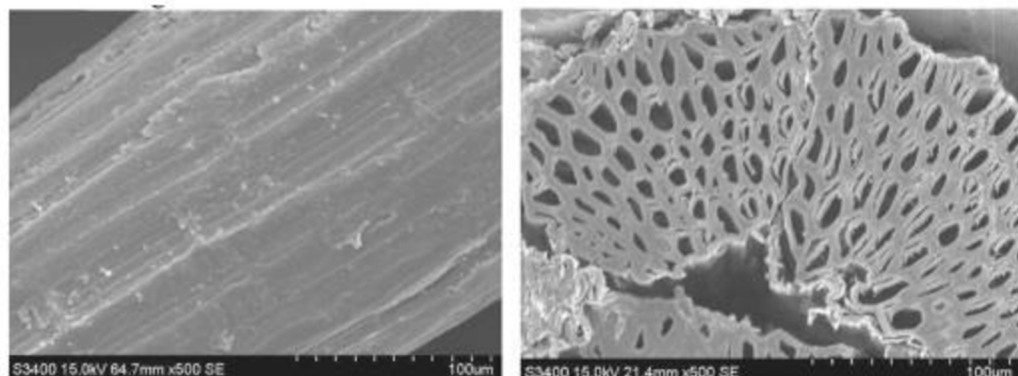


Obrázek 30: Celulózová vlákna v různých formách: a) prameny, b) stříž, c) buničina [90]

Pro kompozity vyztužené vlákny náhodně rozptýlené v matrici se běžně používají celulózová vlákna ve formě buničiny nebo stříže, které se obecně získávají ze dřeva procesem rozvláknění. Rozvláknění můžeme rozdělit na mechanické, tepelné, chemické nebo nějaké kombinace těchto úprav. Krom tohoto můžeme vlákna získávat i recyklací odpadního papíru. Papír je nejčastější typ odpadu ve městech. Papír může být recyklován pouze 6 až 10krát, protože každou recyklací se zmenšuje délka vláken, což vede ke snížení mechanické pevnosti a kvality (vzhled a barva) vyrobeného papíru a ke

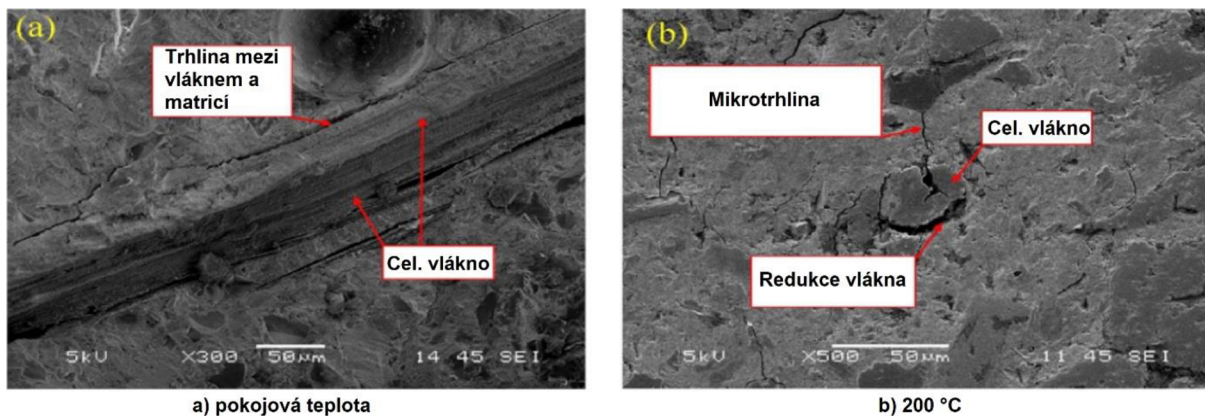
zvýšení technologických ztrát. Na konci šňůry jednotlivých cyklů je celulóza nízké kvality využívána ve stavebním průmyslu například pro výrobu sádkokartonu, izolačních materiálů. Recyklování papíru je přínosné v neposlední řadě také z ekologického hlediska. Tuna recyklovaného papíru představuje 17 ušetřených stromů, přes 4 tisíce KW nebo okolo 26 tisíc litrů vody, stejně jako cirká 30 kg toxických sloučenin, které by se vypustili do atmosféry [84,92].

Konečné vlastnosti celulózového vláknocementového kompozitu ovlivňuje kromě vlastností vláken a složek matrice výrobní proces, ukládání nebo podmínky zrání. Hlavní cíle, kterých je třeba dosáhnout při vývoji kompozitu s dobře vyváženými mechanickými vlastnostmi, jsou následující: homogenní disperze vláken v matrici, nízká pórovitost matrice, dobré spojení mezi cementovým tmelem a vlákny, optimalizované procento vláken (dostatečné vyztužení materiálu a zároveň nedochází k narušení kontinuity materiálu). Jak už je uvedeno a jak můžeme vidět z podélného pohledu na obrázku č. 29 nebo 31, povrch vláken se jeví jako hrubý a obsahuje značné množství malých zářezů, které negativně ovlivňuje mezifázovou adhezi mezi vláknem a matricí [84–91].



Obrázek 31: Podélný a příčný řez sisalového vlákna [89]

Na obrázku č. 31 můžeme vidět i příčný průřez, kde pozorujeme otevřené dutiny (lumény). Průměr této dutiny se pohybuje od 3 do 15 μm . Vzhledem k tomuto otevřenému uzavřenému lumenu těchto vláken absorbují značné množství vody. Tato vlhkost slouží k podpoření hydratace cementu během zrání. Toto podpoření je prospěšné pro zajištění homogenní a husté mikrostruktury. Jsou tedy vhodná pro tzv. samošetřování betonu. Díky absorpční schopnosti je během procesu míchání patrná hodnota spotřeby vody. Tato hodnota je vyšší, než u ostatních vláken jako jsou PP, skelných nebo ocelových vláken. Během procesu tvrdnutí je tato absorpční voda extrahována. Výsledkem je vyschnutí a zmenšení vlákna, jak můžeme vidět na obrázku č. 32. Prostory vzniklé smrštěním vlákna a dutiny ve vláknech pomáhají pojmout tlak vodní páry a tím zlepšit požární odolnost [81,83,85,88].



Obrázek 32: Jutové vlákno v betonu a) při pokojové teplotě, b) při teplotě 200 °C [88]

Při narůstající teplotě dochází k tepelné degradaci a tím dochází k redukci vlákna a tvorbě kanálků, čímž se zlepší požární odolnost. Jak je vidět na obrázku č. 32, částečně rozpadnuté celulózové vlákno zabraňuje šíření trhlin a zároveň zvyšuje propustnost. Po této redukci se vytváří prostor pro rozpínání vodní páry nebo může docházet až k odchodu vodní páry z betonu díky propojení vytvořených mikrotrhlin a dutin.

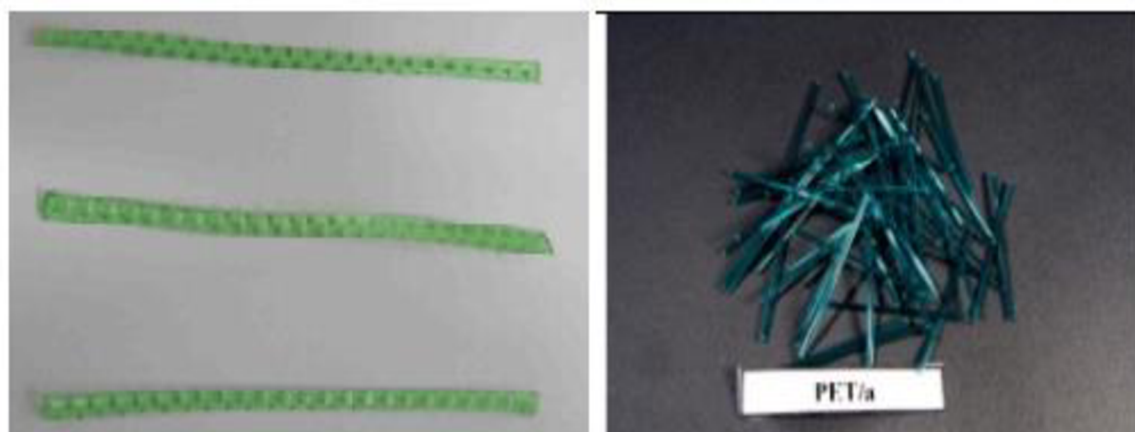
3.8.3. Polyethylentereftalátová (PET) vlákna

Během posledních desetiletí se ukázalo, že obrovské množství nerozložitelného odpadu, zejména ve formě odpadního plastu představuje vážné problémy pro životní prostředí, dokonce je považován za jeden z nejnebezpečnějších zdrojů znečištění. Opětovné použití polymerního odpadu hraje důležitou roli v udržitelném nakládání s pevným odpadem. Používání polymerního odpadu pomáhá šetřit přírodní zdroje, které nelze obnovit. Problém recyklace odpadních plastů je nepochybně jedním z problémů, s kterým se potýkáme a který nás bude v budoucnu nejvíce sužovat. V polymerním odpadu má největší zastoupení polyethylen následován polyethylentereftalátem, známějším jako PET [93–114].

Polyethylentereftalát (PET) je jedním z nejdůležitějších a nejrozšířenějších plastů na světě, zejména pro výrobu nápojových obalů. Současná celosvětová produkce PET přesahuje 20 milionů tun/rok a vykazuje dramatický nárůst v asijské oblasti zvláště v Číně a Indii. Obecně existují tři způsoby odstraňování odpadu: spalování, skládkování a recyklace. Spalování a skládkování způsobují ekologické problémy. Recyklace polymerního odpadu obsahující PET je oblíbeným směrem nakládání s tímto odpadem. V dnešní době je ale bohužel míra recyklace PET lahví mnohem menší než prodej nových PET pro běžné užití. Tento rozdíl se dramaticky zvětšuje a tlačí k nalezení řešení tohoto problému a vyšší recyklaci. Z tohoto důvodu bylo věnováno mnoho úsilí recyklaci polymerního odpadu prostřednictvím opětovné aplikace v oblasti stavebnictví [93–114].

Jak již bylo zmíněno dříve, polymerní odpad může ovlivnit životní prostředí, a proto existuje vážná potřeba nakládat s tímto odpadem, aby se zabránilo znečištění a šetřilo se životní prostředí. Mnoho výzkumníků studovalo využití polymerního odpadu v betonu. Jednou z účinných strategií pro recyklaci odpadních materiálů, jako je polymerní odpad, je jejich začlenění do betonu, což nejen zabraňuje přímému návratu polymerního odpadu do životního prostředí, ale také může poskytovat náhradu vstupních složek, které se pro výrobu betonu používají, jako například přírodního kameniva. Použití PET částic jako recyklovaného kameniva v betonu může pozitivně ovlivňovat některé vlastnosti betonu jako objemovou hmotnost, houževnatost, ale také negativně může ovlivňovat některé další mechanické a fyzikální vlastnosti betonu [93–114].

Dalším z možných řešení je použití recyklovaného PET jako rozptýlené výztuže v betonu. K výhodám těchto vláken patří široká dostupnost, nízké náklady, dobré fyzikální i mechanické vlastnosti, které umožňují nahrazení jiných druhů vláken, nebo hledisko životnosti betonu. Tyto vlákna se mohou vyrábět hned několika způsoby: ručním řezáním PET nápojových lahví, řezáním PET folií vyrobených z recyklovaného PET, vytlačováním na extrudéru. Tloušťka jednotlivých vláken se může pohybovat od 0,12 mm (hlavně při extruzi) do 2 mm, délka a šířka je pak individuální v rámci návrhu směsi (nejčastěji délka – 30 až 40 mm, šířka – 2 až 5 mm). Je zřejmé, že s výběrem přípravy vláken se budou měnit i jejich vlastnosti, nejvíce geometrie a drsnost povrchu. Pomocí metody extruze lze vyrábět různá provedení (rovná, zvlněná), nevýhodou je však vnášení přídatné energie pro výrobní proces. Při extruzi nebo i při řezání mohou vznikat rovná souvislá vlákna, která mají však obvykle nízkou adhezi s betonovou matricí. Pro zlepšení této adheze se geometrie vlákna deformuje, obvykle se do nich vyrážejí různé vzory [93–114].



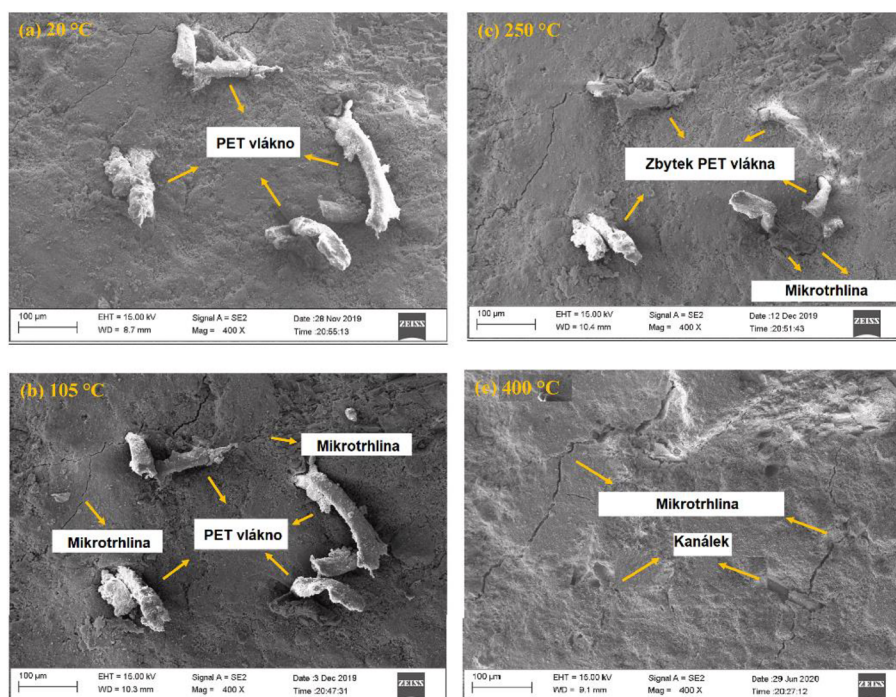
Obrázek 33: PET vlákna: nalevo–řezané, vyražené, nalevo–extrudované, rovné [111]

Tabulka 3: Vybrané charakteristiky různých typů vláken [71]

| Materiál vlákná | Pevnost v tahu [MPa] | Modul pružnosti [GPa] | Protážení při přetržení [%] | Průměr vlákná [μm] | Hustota [kg/m ³] | Teplota tání [°C] |
|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|
| PP vlákná | 200–700 | 3,5–18 | 5–40 | 10–300 | 910 | 160 |
| PET vlákná | 40–200 | 2,8–16 | 10–50 | 20–200 | 1 380 | 260 |
| Celulózoová vlákná | 70–130 | 8–14 | 5–30 | 10–150 | 1 540 | 240 |
| Ocelová vlákná | 1 500–3 800 | 170–300 | 1–2 | 100–600 | 7 850 | 1 350 |

Jak už je zmíněno a je obecně známo, vlákna výrazně nezvyšují pevnost v tlaku, ale jsou však užitečné pro omezení trhlin, zejména těch, které jsou způsobeny smršťováním. Dále také podporují beton v pevnosti v tahu nebo v ohybu. U těchto vláken sledujeme takzvaný „efekt šití“, kdy vlákna působí proti četným mikrotrhlinám, které se přirozeně mají tendenci tvořit při tvrdnutí betonu. Zlepšují tak zejména životnost samotného materiálu [93,98,112].

Stejně jako u PP, tak i PET vlákna mají potenciál k snížení odlupování betonu při vysokých teplotách. Jak pozorujeme na obrázku č. 34, při narůstající teplotě dochází k vytvoření kanálků, kde se tlak vodní páry může rozpínat. Tyto vlákna mají oproti PP vyšší bod tání cirká 260 °C, což je menší nevýhoda ve srovnání s PP. Používání těchto druhů vláken pro tento účel je však na začátku zkoumání a pro zavedení do praxe by bylo potřeba provést řadu výzkumů [96,99,102,111].



Obrázek 34: Rozpad PET vlákná při narůstající teplotě [102]

4. Experimentální část

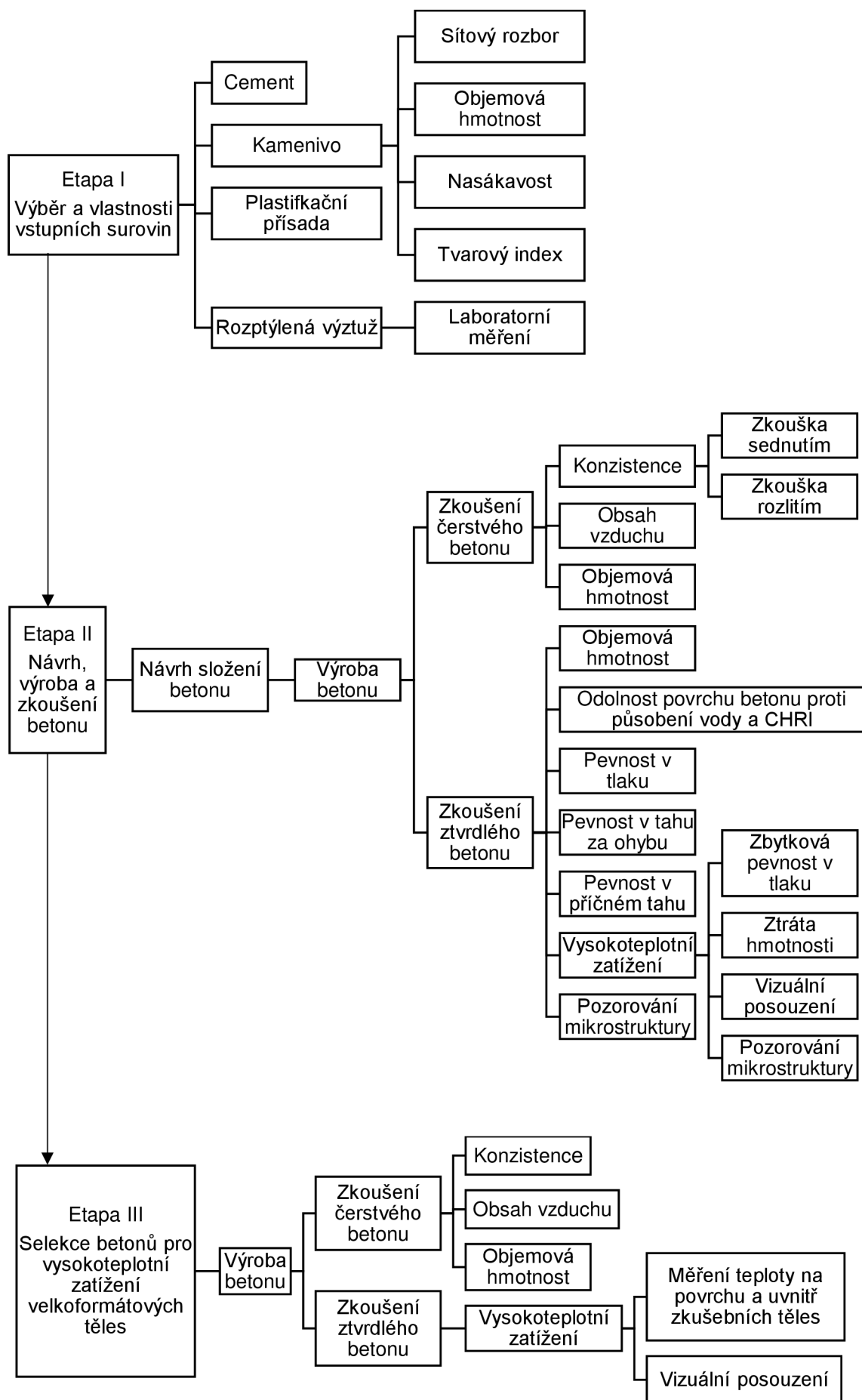
Při vysokých teplotách je chování betonu jedním ze základních a podstatných sledovaných hledisek ve stavebnictví. Působení vysokých teplot způsobuje nežádoucí účinky na vlastnosti betonu, které nemusí způsobovat jen škody na majetku, ale také může ohrožovat lidské zdraví nebo dokonce životy. Z tohoto důvodu je více než důležité nalézt příhodné řešení pro zlepšení vlastností betonu při zvyšujících se teplotách, která zabezpečí zvláště bezpečnost při užívání nebo provozu konstrukce. Východiskem tohoto problému je především vhodná volba vstupních surovin, které jsou proti vysokoteplotnímu zatížení rezistentní. Jedna z nejpoužívanějších možností zvýšení požární odolnosti je přidání vláken do struktury betonu, kde je naopak zpravidla požadován rozklad těchto vláken při nižších teplotách, pokud není vyžadována statická funkce těchto vláken. Existují různé druhy vláken, které svými funkcemi přispívají pro zvýšení odolnosti betonu při teplotním zatížení. Mezi nejpoužívanější druhy vláken patří vlákna polypropylenová, dále pak ocelová a v neposlední řadě je snahou do této oblasti začlenit také vlákna přírodní nebo vlákna z recyklovaného materiálu z důvodu pozitivního ekologického dopadu.

Z tohoto důvodu se experimentální část diplomové práce zabývá možnostmi použití vhodných vstupních surovin pro výrobu vláken jako opatření při působení vysokých teplot na beton se zaměřením na ekologické varianty vláken pro zvýšení odolnosti proti působení vysokých teplot.

4.1. Metodika experimentální části práce

Cílem této práce bylo sledovat chování cementových kompozitních materiálů s rozptýlenou výztuží při vysokoteplotním zatížení. Pozornost byla věnována nejen použitým druhům vláken, ale také vlivu vláken na mechanické a fyzikální vlastnosti betonu, které byly sledovány před i po zatížení vysokou teplotou. Sledovány byly základní parametry, které posloužily k charakteristice sledovaných betonů.

Práce byla rozdělena do 3 hlavních etap. První etapa se zabývala výběrem a vlastnostmi vstupních surovin. Základní vstupní suroviny byly voleny tak, aby nepřispívaly zvyšování požární odolnosti, aby bylo možné sledovat vliv použitých vláken. U druhé etapy byl řešen především návrh, výroba a zkoušení betonu. Na základě výsledků druhé etapy byly vybrány optimální složení betonu, respektive druh a dávka vláken, která byla vystavena vysokoteplotnímu namáhání ve velkoformátové podobě z důvodu simulace působení požáru na větší povrch betonového prvku u třetí etapy. Na následující stránce je znázorněna grafické schéma metodiky experimentální části práce.



4.2. Použité zkušební metody

4.2.1. Zkoušky kameniva

U všech použitých frakcí kameniva byl stanoven síťový rozbor, objemová hmotnost a nasákavost. Stanovení zrnitosti kameniva bylo provedeno dle ČSN EN 933–1. Dle ČSN EN 933–4 byl stanoven tvar zrn – Tvarový index. Objemová hmotnost a nasákavost kameniva byla stanovena dle ČSN EN 1097–6 [132–134].

4.2.2. Laboratorní pozorování a měření vláken

V rámci měření byla stanovena tloušťka na souboru vybraných vláken. Zároveň byl také zhodnocen vizuální vzhled vláken.

4.2.3. Zkoušky na čerstvém betonu

Na čerstvém betonu bylo provedeno stanovení konzistence pomocí zkoušky sednutím a zkoušky rozlítím, dále bylo provedeno měření obsahu vzduchu a objemová hmotnost. Základní normou pro zkoušení čerstvého vláknobetonu je ČSN P 73 2451 [120].

4.2.3.1. Zkouška sednutím

V normě ČSN P 73 2451, která je věnována vláknobetonu, je uvedeno, že pro stanovení konzistence vláknobetonu není vhodné použít zkoušku sednutím dle normy ČSN EN 12350–2. Přestože tato metoda není určena pro měření konzistence vláknobetonu, byla použita z důvodu sledování závislosti konzistence pro porovnání se zkouškou rozlítím. Podstatou této zkoušky je změření rozdílu mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého zkušební vzorku a zatřídění do jednotlivého stupně viz tabulka 4 [121].

Tabulka 4: Klasifikace sednutí betonu [121]

| Stupeň | Sednutí [mm] |
|---------------------|--------------|
| S1 směs tuhá | 10–40 |
| S2 směs plastická | 50–90 |
| S3 směs měkká | 100–150 |
| S4 směs velmi měkká | 160–210 |
| S5 směs tekutá | ≥210 |

4.2.3.2. Zkouška rozlítím

V normě ČSN P 73 2451 je řečeno, že pro stanovení konzistence vláknobetonu pomocí zkoušky rozlítím platí ustanovení ČSN EN 12350–5. Tato zkouška stanoví konzistenci čerstvého betonu změřením průměru rozlitého betonu na rovné desce, která je vystavena otřesům. Po změření průměru je zatříděna dle následující tabulky č. 5 [122].

Tabulka 5: Klasifikace rozlití betonu [122]

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

4.2.3.3. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu se provádí dle normy ČSN EN 12 350–7. Tato norma uvádí dvě metody měření. V této práci byla použita metoda tlakoměrná se zkušební tlakoměrným přístrojem. Tato metoda je založena na principu, že jedinou stlačitelnou složkou čerstvého betonu je vzduch. Měří se snížení tlaku vzduchu v přetlakové komoře, která byla předem natlakovaná. Obsah vzduchu se poté odčítá na stupnici tlakoměru, která je vyjádřena v procentech [124].

4.2.3.4. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Objemová hmotnost byla měřena podle ČSN EN 12350–6. Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů. Podstatou zkoušky je změření objemu zkušební tělesa a stanovení hmotnosti. Objemová hmotnost se vypočte z následujícího vztahu:

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

kde: D – objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³],
 m₁ – hmotnost prázdné nádoby [kg],
 m₂ – hmotnost naplněné nádoby ztuhlé betonem [kg],
 V – objem nádoby [m³] [123].

4.2.4. Ztvrdlý beton

Na ztvrdlém betonu byla po 28 dnech zrání stanovena objemová hmotnost, pevnostní charakteristiky (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu). Dále bylo provedeno stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Vyhodnocení jednotlivých zkoušek bylo provedeno jako průměr z minimálně 3 zkušebních těles. Základní normou pro zkoušení ztvrdlého vláknobetonu je ČSN P 73 2452 [125].

4.2.4.1. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Pro stanovení objemové hmotnosti betonu platí ustanovení ČSN EN 12390–7. Princip zkoušky spočívá ve zjištění hmotnosti zkušební tělesa vztážené na objem zkušební tělesa. Pro výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu byl použit následující vztah:

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

kde: D – objemová hmotnost [kg/m³],
V – objem tělesa [m³],
m – hmotnost tělesa [kg] [126].

4.2.4.2. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390–3 po 28 dnech zrání ve vodním uložení na 3 zkušebních krychlich o hraně 150 mm. Principem zkoušky je rovnoměrné zatěžování ve zkušebním lisu, až do meze porušení. Výsledkem zkoušky je poměr zjištěné maximální hodnoty síly při porušení ku velikosti plochy tlačného průřezu zkušebního tělesa. Zkušební tělesa jsou uložena do lisu kolmo na směr ztuhnutí. Výsledná pevnost betonu v tlaku se vypočte ze vztahu:

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

kde: f_c – pevnost v tlaku [MPa],
F – maximální dosažená síla [N],
A – tlačná plocha [mm²] [127].

4.2.4.3. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles

Pevnost v tahu za ohybu se zkouší podle ČSN EN 12 390–5. Zkušební tělesa ve tvaru trámčů 100×100×400 mm jsou ve zkušebním zařízení zatěžována čtyřbodovým ohybem až do meze porušení. Výsledkem měření je zatížení zaznamenané při porušení vzorku, které se poté dosadí do vzorce pro výpočet 4 bodového ohybu:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

kde: f_{cf} – pevnost v tahu za ohybu [MPa],
F – maximální zatížení [N],
l – rozteč mezi podpěrnými válečky [mm],
d₁, d₂ – rozměry příčného průřezu tělesa [mm] [128].

4.2.4.4. Stanovení pevnosti v příčném tahu zkušebních těles

Zkoušení pevnosti v příčném tahu zkušebních těles z betonu se zkouší na krychlich podle ustanovení ČSN EN 12 390–6. Zkušební těleso je vystaveno tlaku v úzkém pruhu po jeho délce. Výsledná kolmá tahová síla způsobí porušení tělesa tahem. Pevnost v příčném tahu je dána vztahem:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

kde: f_{ct} – pevnost v příčném tahu [MPa],
F – maximální zatížení [N],
L – délka dotykové přímky tělesa [mm],
d – zvolený příčný rozměr tělesa [mm] [129].

4.2.4.5. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

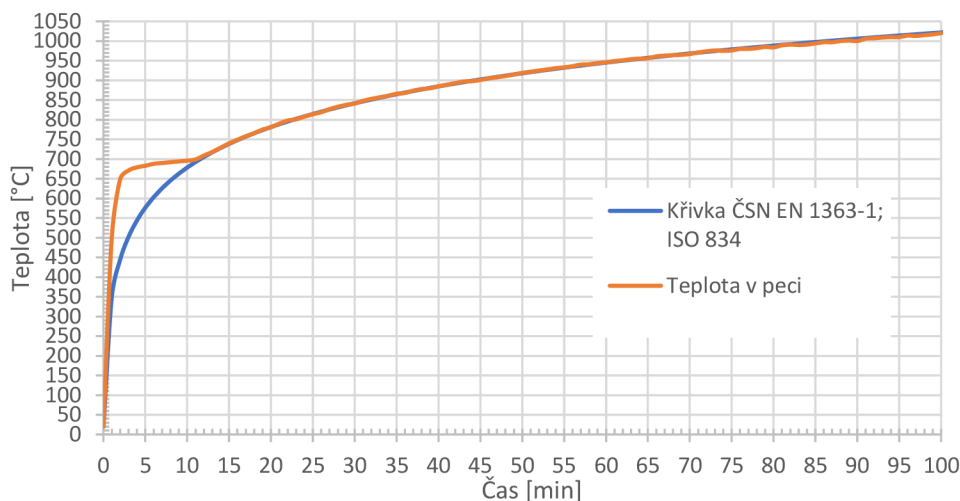
Zkouška se provádí dle ČSN 73 1326 Z1. Beton je vystaven působení rozmrazovací látky (3% roztok NaCl) na horní výrobní plochu zkušební tělesa a definovanému působení střídavých cyklů kladných a záporných teplot v časových režimech. Zkouška probíhá po etapách, po 25 cyklech, po každé etapě se zachytí odpad a vysuší se v sušárně. Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnosti odpadu vztaženého na 1 m² zkušební plochy, která se porovná s limitní hodnotou pro daný metodický postup, zpravidla maximálně 1 000 g/m². Odolnost proti působení vody a roztoku NaCl se hodnotí dle součinitele odolnosti D₁ až D₅ v g/m² [130].

4.2.5. Vysokoteplotní zatížení

Zatěžování vysokou teplotou bylo prováděno na požární peci (obrázek č. 36) dle normové teplotní křivky ČSN EN 1363–1 (ISO 834), která je znázorněna na grafu č. 1 společně s průběhem reálných teplot během zkoušky zkušebních těles. Zatížení vysokou teplotou bylo prováděno na hranici teploty 1 000 °C. Po dosažení této teploty byla zkouška ukončena a zkušební vzorky se ponechaly k pozvolnému ochlazení na okolní teplotu v laboratoři. Nebyla prováděna izotermická výdrž, a to z důvodu pozvolného nárůstu teplotní křivky v oblasti blížíící se hranici 1 000 °C [131].



Obrázek 35: Požární pec [131]



Graf 1: Požární křivka teplotního zatěžování

4.2.6. Pozorování mikrostruktury betonu

Pomocí elektronového mikroskopu byla sledována mikrostruktura pouze v pohledu na zakotvení vlákna v cementové matrici před a po působení vysokých teplot simulujících působení požáru. Toto pozorování bylo provedeno pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu se sondou v enviromentální podobě a 3D zobrazení – TESCAN MIRA3 XMU. Tento přístroj pracuje buď ve vysokovakuovém nebo nízkovakuovém módu s možností nastavení tlaku v komoře. Pomocí této metody nebyla jen sledována, ale byly také pořízeny snímky mikrostruktury betonu s vlákny [131].

4.3. Etapa I Výběr a popis vstupních surovin

Pro výrobu betonu byly vybrány suroviny, které jsou běžně k dostání a používají se pro betonáže ve stavebnictví. Důvodem výběru těchto surovin je simulace chování obvykle dostupného betonu při vysokých teplotách a zkoumání eliminace negativních účinků při působení vysokých teplot na beton.

4.3.1. Cement

Pro výrobu betonu byly použity dva druhy cementu, a to portlandský a portlandský směsný z důvodu vzájemného porovnání fyzikálně mechanických vlastností betonu a vlivu působení vysokých teplot. Konkrétně se jednalo o cementy:

- portlandský cement CEM I 42,5 R, Českomoravský cement a.s.– závod Mokrá,
- portlandský směsný cement CEM II/B–M (S–LL) 32,5 R, Českomoravský cement a.s.– závod Mokrá.

Nejpodstatnějšími rozdíly mezi těmito druhy cementu jsou v obsah slínku, pomalejší náběh pevností nebo mechanické vlastnosti. U portlandského cementu CEM I 42,5 R je slínek jedinou hlavní složkou. Obsahuje maximálně 5 % doplňující složky. U tohoto typu cementu dochází k rychlým nárůstům pevnosti s vysokým vývinem

hydratačního tepla. Pevnost v tlaku po 28 dnech se pohybuje okolo 60 MPa. U portlandského směsného cementu CEM II/B–M (S–LL) 32,5 R, který se vyrábí semletím portlandského slínku, granulované vysokopeční strusky, vápence, síranu vápenatého a případně některých dalších složek, dochází k pozvolnému nárůstu pevnosti s nižším hydratačním teplem. Pevnost v tlaku po 28 dnech je cirká 50 MPa.

Tabulka 6: Poměr složek u použitých cementů podle ČSN EN 197–1 [115]

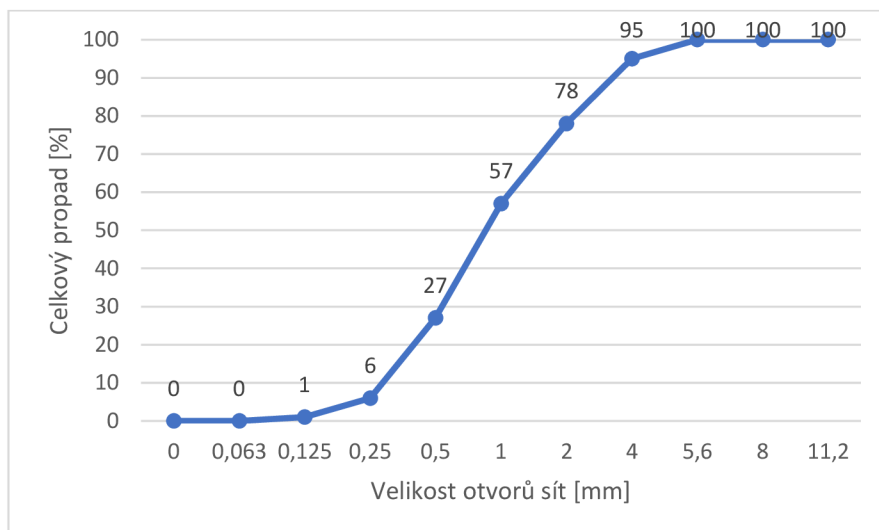
| Druh cementu | Hlavní složky | | | Doplňující složky |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------|---------|-------------------|
| | Portlandský slínek | Vysokopeční granulovaná struska | Vápenec | |
| CEM I 42,5 R | 95 % | – | | 0–5 % |
| CEM II/B–M (S–LL) 32,5 R | 65–79 % | 21–35 % | | 0–5 % |

4.3.2. Kamenivo

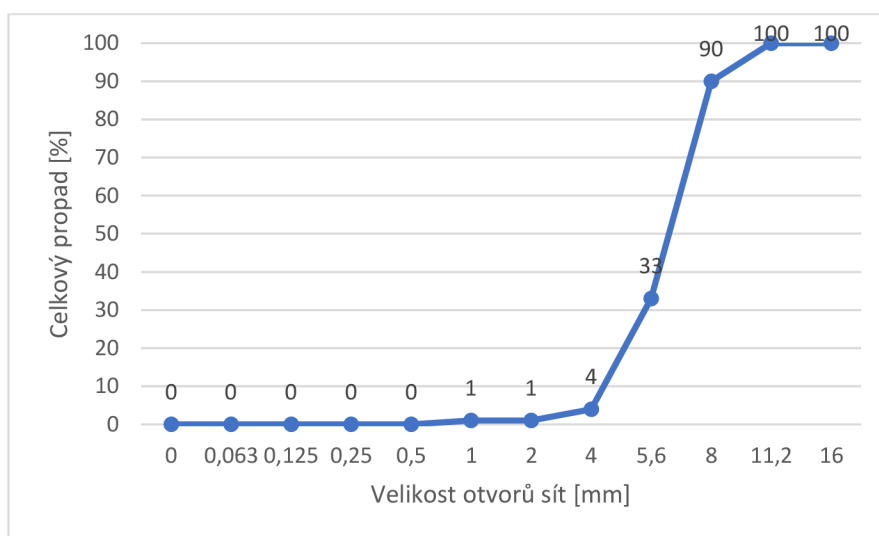
Pro výrobu betonu bylo použito kamenivo jak těžené, tak i drcené. V rámci experimentální části byly použity 3 frakce kameniva, a sice 0–4 mm, 4–8 mm a 8–16 mm. Pro frakce 0–4 mm a 4–8 mm bylo použito prané těžené kamenivo Žabčice, frakce 8–16 mm bylo použito kamenivo drcené Olbramovice. V tabulce č. 7 je vyhodnocena zrnitost jednotlivých frakcí [116,117].

Tabulka 7: Zrnitost kameniv

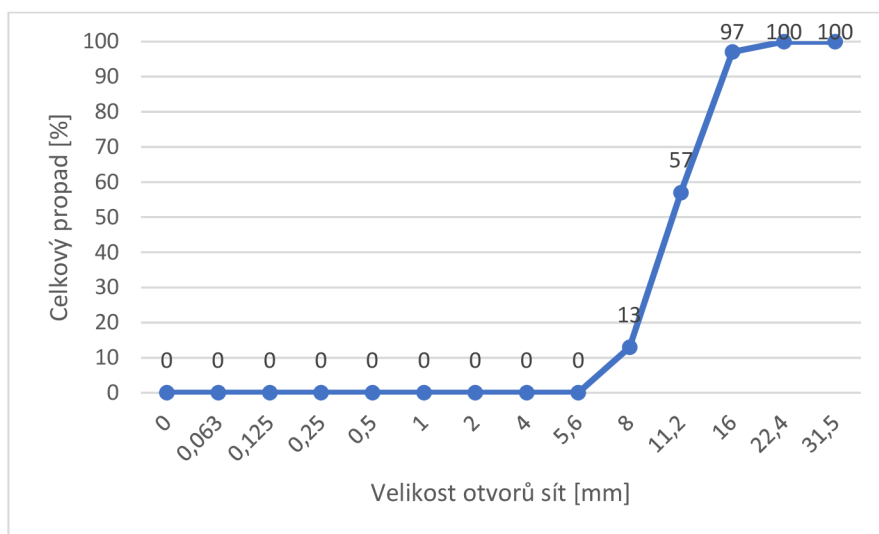
| Velikost ok [mm] | DTK 0–4 mm Žabčice | | | HTK 4–8 mm Žabčice | | | HDK 8–16 mm Olbramovice | | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| | Propad sítem [g] | Celkový zbytek [%] | Celkový propad [%] | Propad sítem [g] | Celkový zbytek [%] | Celkový propad [%] | Propad sítem [g] | Celkový zbytek [%] | Celkový propad [%] |
| 31,5 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |
| 22,4 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |
| 16 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 44 | 3 | 97 |
| 11,2 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 678,09 | 40 | 57 |
| 8 | 0 | 0 | 100 | 143 | 10 | 90 | 739,4 | 44 | 13 |
| 5,6 | 0 | 0 | 100 | 787,4 | 57 | 33 | 214,74 | 13 | 0 |
| 4 | 33,6 | 5 | 95 | 410,5 | 30 | 4 | 5,16 | 0 | 0 |
| 2 | 101,9 | 16 | 78 | 31,5 | 2 | 1 | 0,49 | 0 | 0 |
| 1 | 135,5 | 22 | 57 | 2,7 | 0 | 1 | 0,06 | 0 | 0 |
| 0,5 | 188,1 | 30 | 27 | 14 | 1 | 0 | 0,09 | 0 | 0 |
| 0,25 | 130,6 | 21 | 6 | 0,8 | 0 | 0 | 0,13 | 0 | 0 |
| 0,125 | 30,5 | 5 | 1 | 0,6 | 0 | 0 | 0,19 | 0 | 0 |
| 0,063 | 2,8 | 0 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0,34 | 0 | 0 |
| Dno | 2,8 | 0 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0,11 | 0 | 0 |



Graf 2: Křivka zrnitosti DTK 0–4 mm Žabčice



Graf 3: Křivka zrnitosti HTK 4–8 mm Žabčice



Graf 4: Křivka zrnitosti HDK 8–16 mm Olbramovice

V tabulce č. 8 jsou uvedeny výsledky provedených zkoušek na souboru kameniv.

Tabulka 8: Vybrané stanovené vlastnosti použitých kameniv

| Parametr | Jednotka | Charakteristická hodnota | | |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------------|--------|---------|
| | | 0–4 mm | 4–8 mm | 8–16 mm |
| Obsah jemných částic | % hm. | 0,05 | 0,01 | 0,89 |
| Tvar zrn – tvarový index | % hm. | – | <15 | <40 |
| Nasákavost | % hm. | 1,3 | 1,5 | 1,5 |
| Objemová hmotnost kamene | kg/m ³ | 2660 | 2620 | 2620 |
| Objemová hmotnost volně sypaného kam. | kg/m ³ | 1490 | 1320 | 1320 |

4.3.3. Plastifikační přísada

Jako plastifikační přísada do betonu byla použita superplastifikační přísada ChrysoOptima 247. Jedná se o přísadu žlutohnědé barvy na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Vykazuje silnou schopnost redukovat množství vody, kdy se svojí citlivostí k procesu hydratace prodlužuje dobu zpracovatelnosti betonu a eliminuje možný výskyt povrchových trhlin. Tato plastifikační přísada se musí přidávat se záměsovou vodou [118].

4.3.4. Rozptýlená výztuž

V diplomové práci bylo použito více druhů vláken. V prvním případě se jednalo o dvojici vláken z PP (mikro a makro vlákna). Druhá skupina vláken, která byla použita pro výrobu vláknobetonu, byla celulózová vlákna. V prvním případě se jednalo o celulózová vlákna, která jsou vyráběna průmyslově. V druhém případě byla vybrána recyklovaná celulózová vlákna z odpadu. Poslední druh použitých vláken byla PET vlákna.

4.3.4.1. Polypropylenová vlákna Chryso Fibrin 23 D (PP I)

Chryso Fibrin 23 D je zvlněné syntetické polypropylenové vlasové monofilamentní vlákno. Délka toho vlákna se pohybuje cirká 12 mm, průměr je 18 μm, jedná se tedy o mikrovlákno. Jejich povrchové zvlnění přispívá k přilnavosti k cementovému tmelu a tím se zvyšuje jejich odpor k vytržení. Vybrané vlastnosti můžeme vidět v tabulce č. 9 [118].

Tabulka 9: Vybrané vlastnosti Chryso Fibrin 23 D [118]

| Parametr | Jednotka | Fibrin 23 D |
|-----------------|-------------------|-------------|
| Barva | – | bílá |
| Hustota | kg/m ³ | 910 |
| Délka | mm | 12 |
| Průměr | μm | 18 |
| Pevnost v tahu | MPa | 557 |
| Modul pružnosti | GPa | 4,2 |
| Teplota tání | °C | 160 |



Obrázek 36: Polypropylenová vlákna Chryso Fibrin 23 D

4.3.4.2. Polypropylenová vlákna Chryso Fibre S50 (PP II)

Jedná se o syntetické strukturální vlákno vyráběné ze směsi surovin (polypropylen, polyethylen) s vysokou mechanickou pevností. Délka tohoto vlákna je 50 mm, řadíme ho tedy k makrovláknům (viz obrázek č. 37). Tyto vlákna zvyšují houževnatost, odolnost vůči nárazům a únavě, odolnost vůči vzniku smršťovacích trhlin a vůči segregaci. Chryso Fibre S50 má velmi vysokou přilnavost, která je výsledkem schopnosti se během míchaní na koncích roztřepit. Tyto vlákna se míchají společně s kamenivem po dobu 30 sekund. Vlastnosti tohoto druhu vláken můžeme sledovat v tabulce č. 10 [118].



Obrázek 37: Polypropylenová vlákna Chryso Fibre S50

Tabulka 10: Vybrané vlastnosti Chryso Fibre S50 [118]

| Parametr | Jednotka | Fibre S50 |
|-----------------|-------------------|-----------|
| Barva | – | bílá |
| Hustota | kg/m ³ | 920 |
| Délka | mm | 50 |
| Průměr | μm | 650 |
| Pevnost v tahu | MPa | 650 |
| Modul pružnosti | GPa | 5 |
| Teplota tání | °C | 160 |

4.3.4.3. Celulózové vlákno Chryso Fibre UF–500 (CEL I)

Chryso Fibre UF–500 je přírodní mikrovlákno s výbornou přilnavostí k cementovému tmelu. Tyto vlákna jsou mechanicky uspořádaná a vytvarovaná do podoby malých pelet o rozměrech 5 × 0,5 mm (viz obrázek č. 38). Vlastnosti můžeme vidět v tabulce č. 11. Tyto vlákna jsou hydrofobizovaná a upravená tak, aby se daly použít do betonu. Vlákna se dávkuje do suché směsi bez cementu, kdy během míchání dochází k rozdužení čtverečků na jednotlivá vlákna [118].



Obrázek 38: Celulózová vlákna Chryso Fibre UF–500 [118]

Tabulka 11: Vlastnosti celulózového vlákna Chryso Fibre UF–500 [118]

| Parametr | Jednotka | Fibre UF–500 |
|-----------------|-------------------|--------------|
| Barva | – | bílá |
| Hustota | kg/m ³ | 1100 |
| Délka | mm | 1,9-2,3 |
| Průměr | µm | 14-17 |
| Pevnost v tahu | MPa | 600-900 |
| Modul pružnosti | GPa | 8,5 |
| Teplota tání | °C | 230–260 |

4.3.4.4. Vlákna z recyklované celulózy F3000 (CEL II)

Tato vlákna byla získána ze sběrového papíru. Tento papír byl rozvlákněn a zbaven nečistot a tiskové barvy. Tento proces není ale úplně dokonalý. Vlákna z recyklované celulózy mají proměnný průřez s černým obrysem. Byla rovná až mírně zakřivená. Díky velkému rozptylu velikostí částic, který se projevuje na délkách i průměrech vláken, a proto se při pohledu na vlákna jeví jako směs vláken a prachu. V těchto vláknech byly patrné barevné útržky [87].



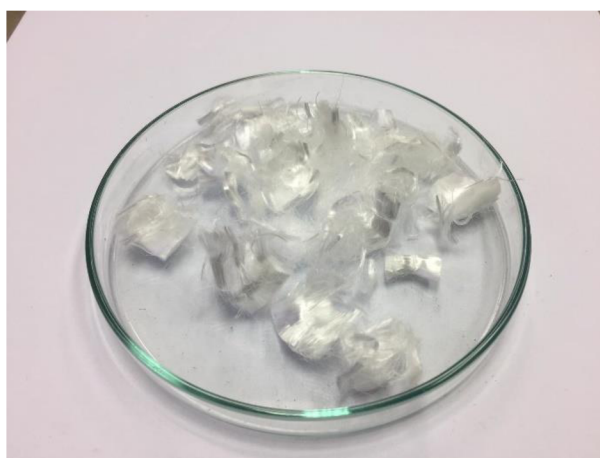
Obrázek 39: Vlákna z recyklované celulózy F3000

Tabulka 12: Vlastnosti recyklované celulózy F 3000 [87]

| Parametr | Jednotka | Recyklovaná celulóza F 3000 |
|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| Barva | – | spektrum barev |
| Hustota | kg/m ³ | 1200 |
| Délka | mm | 0,1–2 |
| Průměr | μm | 10–20 |
| Pevnost v tahu | MPa | – |
| Modul pružnosti | GPa | – |
| Teplota tání | °C | 230–260 |

4.3.4.5. Vlákna z recyklovaného PET (Namflex) (PET)

Podle údajů poskytnutých výrobcem je vlákno Namflex speciálně upravené PET vlákno získané zpětnou recyklací z odpadních surovin nejčastěji z PET lahví postupným rozvlákněním hrubě nadrcených částic (vloček) ve velikosti desítek milimetrů. Vlákna se vkládají do míchačky do suché směsi. Tato vlákna jsou na dotek hebká a zdají se být tahově pevná. Jsou uskupena ve stejnosměrně orientovaných shlucích, jak můžeme vidět na obrázku č. 40. Dále v tabulce č. 13 můžeme vidět jejich základní vlastnosti [119].



Obrázek 40: Vlákna z recyklovaného PET (Namflex)

Tabulka 13: Vlastnosti recyklovaného PET vlákna (Namflex) [119]

| Parametr | Jednotka | Namflex |
|-----------------|-------------------|--------------|
| Barva | – | špinavě bílá |
| Hustota | kg/m ³ | 1300-1400 |
| Délka | mm | 12 |
| Průměr | μm | 15 |
| Pevnost v tahu | MPa | – |
| Modul pružnosti | GPa | – |
| Teplota tání | °C | 200–260 |

4.3.4.6. Laboratorní měření vláken

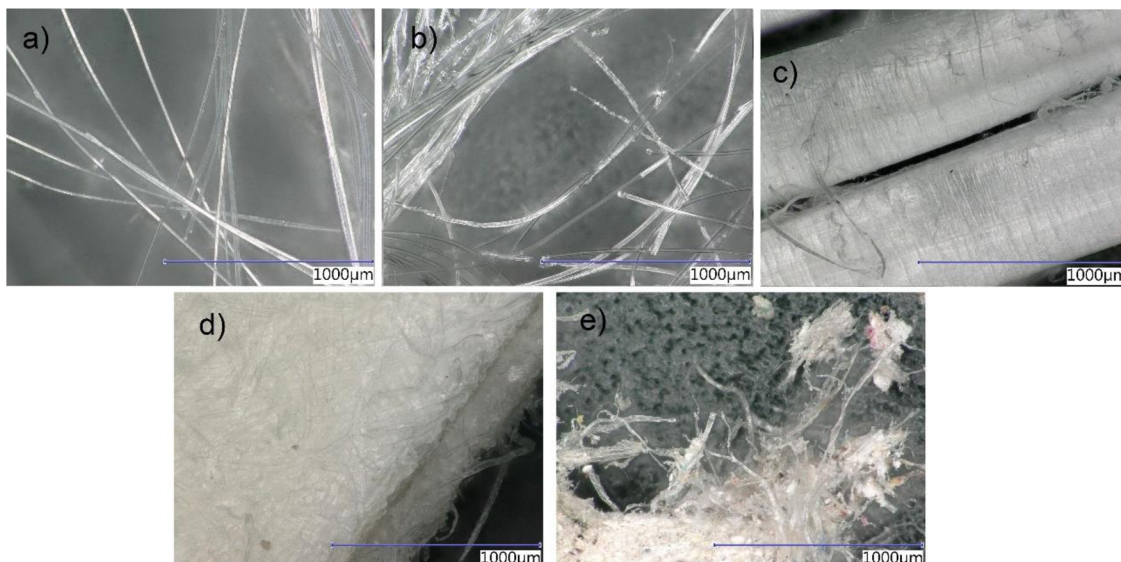
Na souboru vláken, které byly použity do betonu, bylo provedeno pozorování optickým mikroskopem, kdy bylo provedeno vizuální zhodnocení zkoumaných vláken a dále byla stanovena tloušťka vláken, jak je vidět v tabulce č. 14.

Tabulka 14: Naměřené a vypočtené hodnoty měření vláken

| Vlákna | | PET | PP I | PP II | CEL I | CEL II |
|------------------|------------------------|-------|------|--------|-------|--------|
| Tloušťka [μm] | Průměr | 18,04 | 21,4 | 668,64 | 28,75 | 17,75 |
| | Směrodatná odchylka | 1,25 | 3,21 | 43,84 | 4,31 | 5,43 |

Po vyhodnocení tloušťky vláken bylo zjištěno, že naměřené hodnoty odpovídají hodnotám udávaným výrobcem.

Na obrázku č. 41 jsou mikroskopické snímky jednotlivých vláken, na kterých bylo provedeno vizuální zhodnocení. Na obrázku s označením a) jsou vidět vlákna z recyklovaného PET. Tyto vlákna se měly černé okraje a vnitřek se jevil bezbarvý. Jsou to vlákna rovná nebo lehce zvlněná sekaná vlákna. Na snímku b) jsou zobrazena vlákna PP I, která jsou bílá. Tento druh vláken je rovný a hladký. Stejně charakteristické rysy mají i vlákna PP II c) s rozdílným povrchem. Tento povrch se nejeví hladce, nýbrž drsně s částečným odloupením povrchových vrstev. Na posledních dvou snímcích (d) a e) jsou vyobrazena vlákna celulózová. Na snímku d) je pohled na průmyslově slisované pelety celulózových vláken, která se při míchání rozduří na jednotlivá vlákna. Vlákna se jeví jako zakřivená, bezbarvá s proměnlivým průřezem. Na posledním snímku můžeme pozorovat vlákna z recyklované celulózy. Tato vlákna měla proměnný průřez, různou délkou se zakřiveným profilem. Díky rozdílnému původu je u těchto vláken velký rozptyl velikosti částic, což se projevuje na délkách i průměrech vláken. Dále byly v tomto vzorku patrné barevné útržky.



Obrázek 41: Snímky vláken z optického mikroskopu PET(a), PP I (b), PP II (c), CEL I (d), CEL II (e)

4.4. Etapa II Návrh, výroba a zkoušení betonu

4.4.1. Návrh složení betonu

Návrh složení betonu byl proveden s ohledem na poznatky získané z poznatků v teoretické části této práce, která vychází především ze zahraniční literatury, která řeší studovanou problematiku. Pro výrobu zkušebních těles bylo připraveno 21 různých receptur, kde se měnil druh cementu, druh a dávka vláken a dále dávka plastifikační přísady. Dávka plastifikační přísady byla volena pro dosažení stejné konzistence. Byly použity dva druhy cementu, a to CEM I 42,5 R (CEM I) a CEM II/B–M (S–LL) 32,5 R (CEM II). Z důvodu možného porovnání jednotlivých druhů vláken, byla dávka vláken volena objemově, proto se při pohledu na složení jednotlivých betonů v tabulce č. 15 liší hmotnostní zastoupení vláken. Zásadní bylo sledovat rostoucí vliv objemu vláken různých druhů na změnu vlastností betonu. Pro rekapitulaci byla v betonech použita tato vlákna: PET – recyklovaná vlákna z PET (Namflex), PP I – chryso fibrin 23 D, PP II – chryso fibre S50, CEL I – chryso fibre UF 500, CEL II – recyklovaná vlákna z celulózy.

Po namíchání betonu byly provedeny zkoušky na stanovení konzistence (zkouška sednutím a rozlitím). Dále byl v betonu stanoven obsah vzduchu a objemová hmotnost v čerstvém stavu. Z čerstvého betonu byla vyrobena zkušební tělesa o velikosti 150×150×150 a dále 100×100×400. Následující den byla zkušební tělesa odformována a uložena do vodního uložení, po 28 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnostní charakteristiky a odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Část vzorků byla vysokoteplotně zatížena. Po zatížení vysokou teplotou bylo provedeno porovnání vybraných vlastností betonu.

Tabulka 15: Návrh složení betonů

| Složení betonu na 1 m ³ | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|--------|---------|---------|----------|------|-------|------------------|-------------------|------|-------|-------|--------|
| Jednotka | kg/m ³ | | | | | | | %/m ³ | kg/m ³ | | | | |
| Složka Receptura | CEM I | CEM II | DTK 0–4 | HTK 4–8 | HDK 8–16 | Voda | Plast | Objem vláken | PET | PP I | PP II | CEL I | CEL II |
| REF | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,8 | – | – | – | – | – | – |
| PET 3,6 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1 | 0,036 | 0,5 | – | – | – | – |
| PET 7,2 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,3 | 0,072 | 1 | – | – | – | – |
| PET 10,8 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,5 | 0,108 | 1,5 | – | – | – | – |
| PP I 3,6 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,9 | 0,036 | – | 0,33 | – | – | – |
| PP I 7,2 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1 | 0,072 | – | 0,66 | – | – | – |
| PP I 10,8 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,3 | 0,108 | – | 0,99 | – | – | – |
| PP II 10,8 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,1 | 0,108 | – | – | 0,99 | – | – |
| CEL I 3,6 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,9 | 0,036 | – | – | – | 0,4 | – |
| CEL I 7,2 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,9 | 0,072 | – | – | – | 0,8 | – |
| CEL I 10,8 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,2 | 0,108 | – | – | – | 1,2 | – |
| CEL II 3,6 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,9 | 0,036 | – | – | – | – | 0,43 |
| CEL II 7,2 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1 | 0,072 | – | – | – | – | 0,86 |
| CEL II 10,8 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,1 | 0,108 | – | – | – | – | 1,31 |
| CEL II 18,1 | 350 | – | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,5 | 0,181 | – | – | – | – | 2,17 |
| REFS | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 0,8 | – | – | – | – | – | – |
| PET S 10,8 | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,5 | 0,108 | 1,5 | – | – | – | – |
| PP I S 10,8 | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,3 | 0,108 | – | 0,99 | – | – | – |
| PP II S 10,8 | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 1 | 0,108 | – | – | 0,99 | – | – |
| CEL I S 10,8 | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,2 | 0,108 | – | – | – | 1,2 | – |
| CEL II S 10,8 | – | 350 | 945 | 315 | 600 | 180 | 1,1 | 0,108 | – | – | – | – | 1,31 |

4.4.2. Fyzikálně mechanické vlastností betonů před vysokoteplotním zatížením

Laboratorní měření a zkoušky na betonu byly provedeny dle postupů již zmíněných v předchozích kapitolách.

4.4.2.1. Konzistence čerstvého betonu

Po namíchání betonu bylo ihned provedeno stanovení konzistence čerstvého betonu pomocí zkoušky sednutím a rozlitím. Jak již bylo zmíněno, konzistence jednotlivých betonů s vlákny byla volena konstantní pro srovnání jejich vlastností. Konzistence byla ovlivňována množstvím použité plastifikační přísady, nikoli zvýšením množství vody. Při přidávání vody dochází totiž k ovlivňování struktury a jejich vlastností. Pro referenční beton bez vláken byla volena měkčí konzistence s optimálním množstvím plastifikační přísady.

U obou zmíněných zkoušek byl sledován jasně patrný vliv zvýšeného objemu vláken. Při zvýšení dávky vláken pro dosažení stejné konzistence musela být zvýšena i dávka plastifikační přísady. Vysvětlení můžeme najít ve zvýšení povrchu potřebnému k ovlhčení povrchu vláken. Při stanovování konzistence pomocí zkoušky sednutím byly všechny betony s vlákny (kromě betonu s PP II) zařazeny podle klasifikace do třídy S1 s hodnotou sednutí 40 mm. Oba referenční betony s rozdílnými cementy měly sednutí vyšší (100 mm, stupeň konzistence S3). Tento jev můžeme hledat v již zmíněném zvýšení povrchu díky přidání vláken.

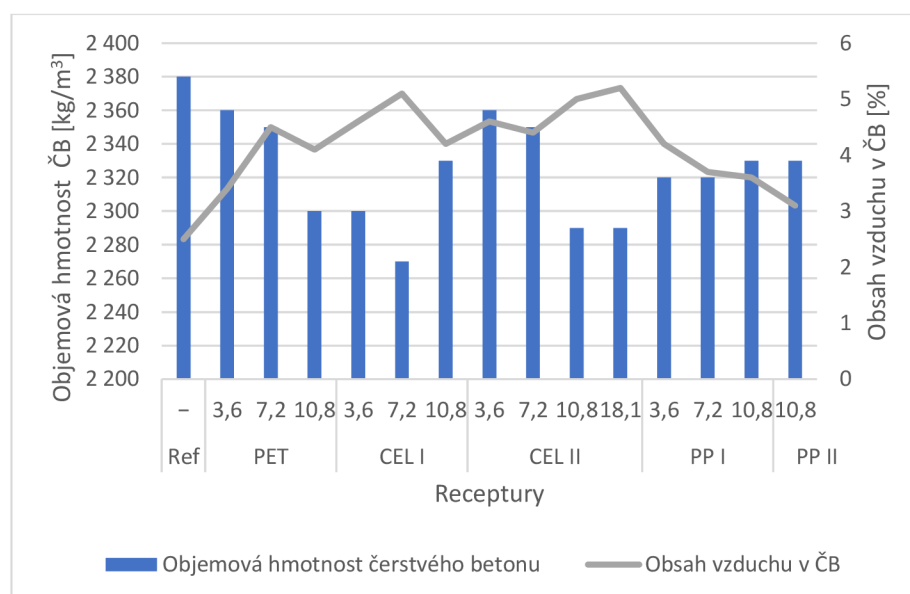
Při sednutí 40 mm vycházela hodnota zkoušky rozlití u všech betonů s vlákny (kromě betonu s PP II) stejná (rozlití 270/270, stupeň F1). Opět u referenčních záměsí se sednutím 80 mm dosahovalo rozlití vyšší hodnoty (350/350, stupeň F2). I když není zkouška sednutím pro vláknobeton doporučována, v této diplomové práci bylo možné sledovat určitou korelaci mezi těmito zkouškami konzistence. Další zajímavostí je měření konzistence u záměsí s PP II. Tento jediný druh vlákna je makrovlákno, u kterého při použití stejné dávky plastifikační přísady jako u PP I, které je zástupcem mikrovláken, docházelo k vyššímu sednutí (80 mm) i rozlití (300/300). Důvodem je menší povrch a nižší počet vláken u makrovláken ve srovnání s mikrovlákny při stejné dávce a objemu vláken.

4.4.2.2. Objemová hmotnost a obsah vzduchu v čerstvém betonu

V tabulce č. 16 můžeme vidět naměřené hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu (ČB) a obsahu vzduchu v ČB vyrobeného s portlandským cementem. Jak můžeme vidět, hodnoty objemové hmotnosti se pohybují v rozmezí 2270–2380 kg/m³ a obsah vzduchu 2–5 %, což odpovídá běžnému betonu. Tyto dva parametry spolu úzce souvisí. Čím je vyšší obsah vzduchu, tím by objemová hmotnost měla klesat.

Tabulka 16: Hodnoty objemové hmotnosti a obsahu vzduchu čerstvého betonu s CEM I

| Receptura | Objemová hmotnost ČB [kg/m ³] | Obsah vzduchu v ČB [%] |
|-------------|---|------------------------|
| REF | 2 380 | 2,5 |
| PET 3,6 | 2 360 | 3,4 |
| PET 7,2 | 2 350 | 4,5 |
| PET 10,8 | 2 300 | 4,1 |
| CEL I 3,6 | 2 300 | 4,6 |
| CEL I 7,2 | 2 270 | 5,1 |
| CEL I 10,8 | 2 330 | 4,2 |
| CEL II 3,6 | 2 360 | 4,6 |
| CEL II 7,2 | 2 350 | 4,4 |
| CEL II 10,8 | 2 290 | 5 |
| CEL II 18,1 | 2 290 | 5,2 |
| PP I 3,6 | 2 320 | 4,2 |
| PP I 7,2 | 2 320 | 3,7 |
| PP I 10,8 | 2 330 | 3,6 |
| PP II 10,8 | 2 330 | 3,1 |



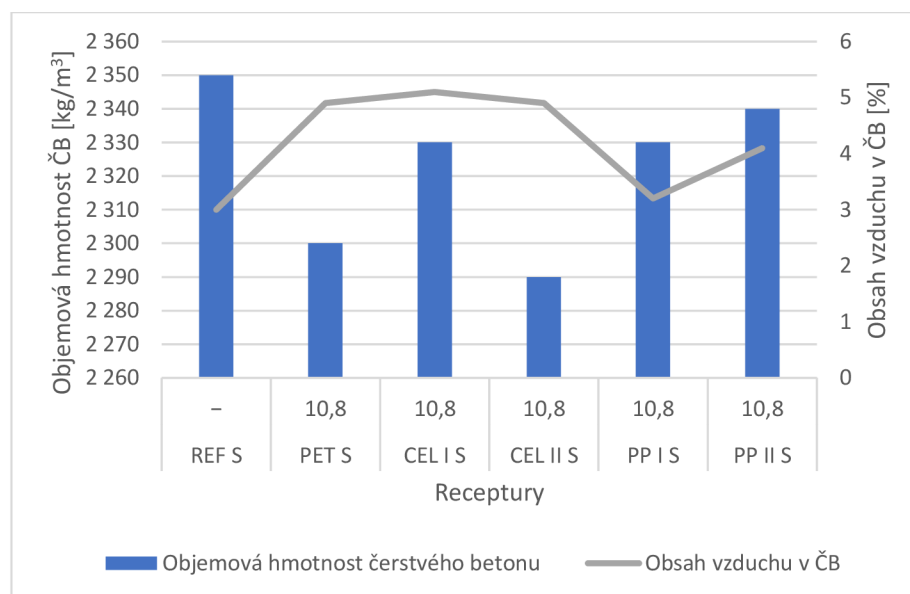
Graf 5: Závislost objemové hmotnosti ČB a obsah vzduchu v ČB na druhu betonu s CEM I

Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u referenčního betonu s hodnotou 2 380 kg/m³ a obsahem vzduchu 2,5 %. S přidavkem vláken došlo ke snížení objemové hmotnosti díky nižší objemové hmotnosti samotných vláken a dále zvýšení obsahu vzduchu. Tento vzduch je do směsi vpraven na povrchu vláken. Z grafu č. 5 je patrné, že zpravidla se zvýšením objemu vláken docházelo ke zvýšení obsahu vzduchu, a tedy klesá objemová hmotnost.

Tabulka 17: Hodnoty objemové hmotnosti a obsahu vzduchu čerstvého betonu s CEM II

| Receptura | Objemová hmotnost ČB [kg/m ³] | Obsah vzduchu v ČB [%] |
|---------------|---|------------------------|
| REFS | 2 350 | 3 |
| PET S 10,8 | 2 300 | 4,9 |
| CEL I S 10,8 | 2 330 | 5,1 |
| CEL II S 10,8 | 2 290 | 4,9 |
| PP I S 10,8 | 2 330 | 3,2 |
| PP II S 10,8 | 2 340 | 4,1 |

U betonů, u kterých byl pro výrobu použit CEM II, docházelo ke stejným jevům a principům jako u předešlého cementu (CEM I). Referenční vzorek má opět nejvyšší objemovou hmotnost s nejnižším obsahem vzduchu. U záměsí, které měly nejmenší objemovou hmotnost měly největší obsah vzduchu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 17 a graficky znázorněny v grafu č. 6.



Graf 6: Závislost objemové hmotnosti ČB a obsah vzduchu v ČB na druhu betonu s CEM II

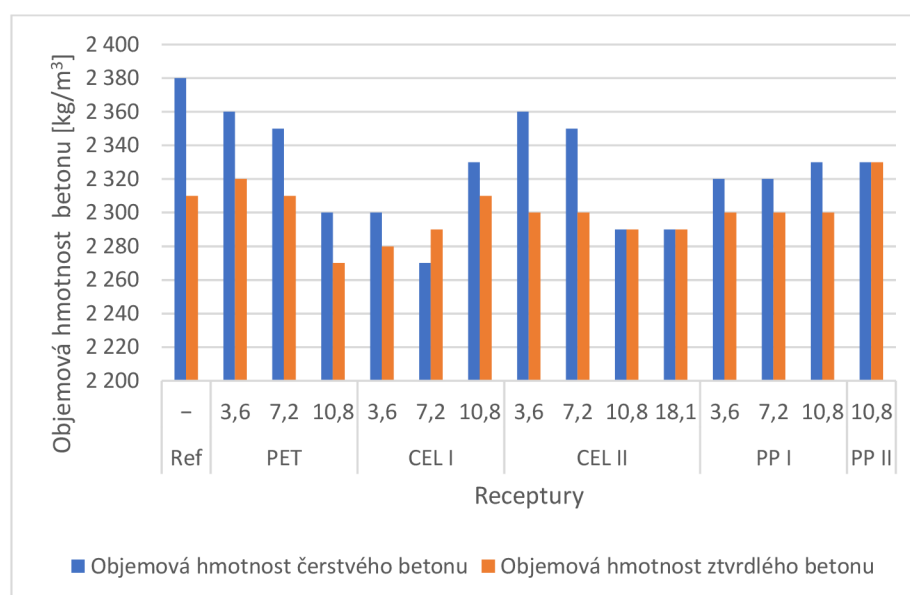
4.4.2.3. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu ZB byla měřena po 28 dnech zrání ve vodním uložení. Dle postupu, který byl již zmíněn, byly zkušební vzorky změřeny a zváženy a dále vypočtena objemová hmotnost, kterou můžeme vidět v tabulce č. 18.

Tabulka 18: Hodnoty objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM I

| Receptura | Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³] | Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³] |
|-------------|---|---|
| REF | 2 380 | 2 310 |
| PET 3,6 | 2 360 | 2 320 |
| PET 7,2 | 2 350 | 2 310 |
| PET 10,8 | 2 300 | 2 270 |
| CEL I 3,6 | 2 300 | 2 280 |
| CEL I 7,2 | 2 270 | 2 290 |
| CEL I 10,8 | 2 330 | 2 310 |
| CEL II 3,6 | 2 360 | 2 300 |
| CEL II 7,2 | 2 350 | 2 300 |
| CEL II 10,8 | 2 290 | 2 290 |
| CEL II 18,1 | 2 290 | 2 290 |
| PP I 3,6 | 2 320 | 2 300 |
| PP I 7,2 | 2 320 | 2 300 |
| PP I 10,8 | 2 330 | 2 300 |
| PP II 10,8 | 2 330 | 2 330 |

V této tabulce, nebo i v grafu č. 7 vidíme srovnání mezi objemovou hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu. Kromě očekávaného poklesu mezi čerstvým a ztvrdlým stavem betonu, byl vidět i pokles objemové hmotnosti s rostoucí dávkou vláken u jednotlivých druhů betonů. K tomuto jevu dochází vlivem nižší objemové hmotnosti vláken a rostoucího obsahu vzduchu v betonu. Největší pokles registrujeme u záměsi referenční.

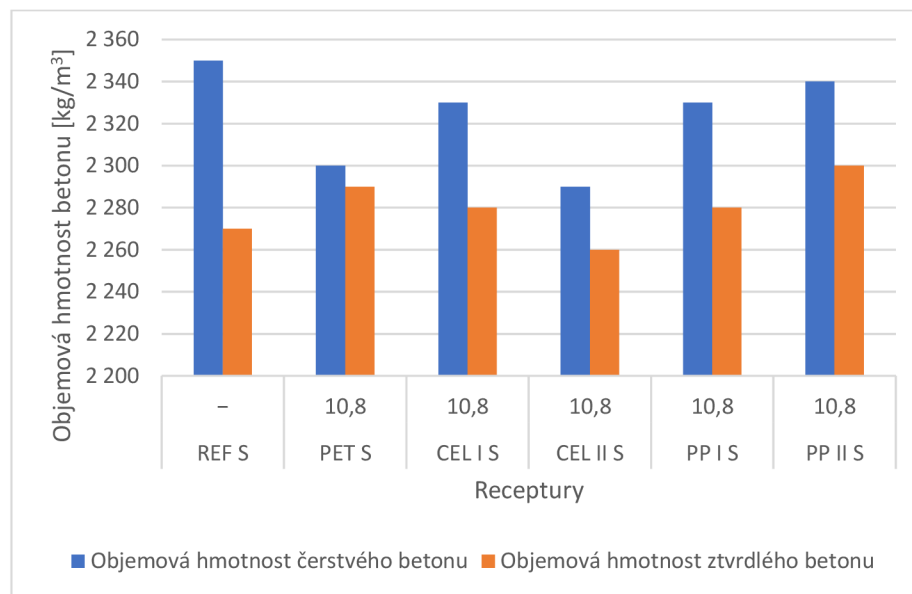


Graf 7: Porovnání objemových hmotností ČB a ZB jednotlivých betonů s CEM I

Tabulka 19: Hodnoty objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM II

| Receptura | Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³] | Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³] |
|---------------|---|---|
| REFS | 2 350 | 2 270 |
| PET S 10,8 | 2 300 | 2 290 |
| CEL I S 10,8 | 2 330 | 2 280 |
| CEL II S 10,8 | 2 290 | 2 260 |
| PP I S 10,8 | 2 330 | 2 280 |
| PP II S 10,8 | 2 340 | 2 300 |

Porovnání mezi objemovými hmotnostmi čerstvého a ztvrdlého betonu s CEM II můžeme vidět v tabulce č. 19 a grafu č. 8. Opět je zřetelný rozdíl mezi těmito objemovými hmotnostmi. Největší pokles mezi čerstvým a ztvrdlým betonem pozorujeme u referenčního betonu bez vláken, kde byla současně i nejvyšší objemová hmotnost v čerstvém stavu. Hodnoty objemových hmotností se pohybovaly v rozmezí od 2 260 do 2 350 kg/m³.



Graf 8: Porovnání objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM II

4.4.2.4. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku s portlandským cementem (CEM I) byla měřena po 28 dnech zrání ve vodním uložení. Při porovnání pevností v tlaku viz tabulka č. 20 je patrné, že přidání vláken do betonů přispívá k zvýšení pevnosti v tlaku. Tento jev není primárně požadován, ale vysvětlením je zpevnění struktury a lepší rozložení a roznesení napětí při zatěžování do struktury.

Tabulka 20: Hodnoty pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I

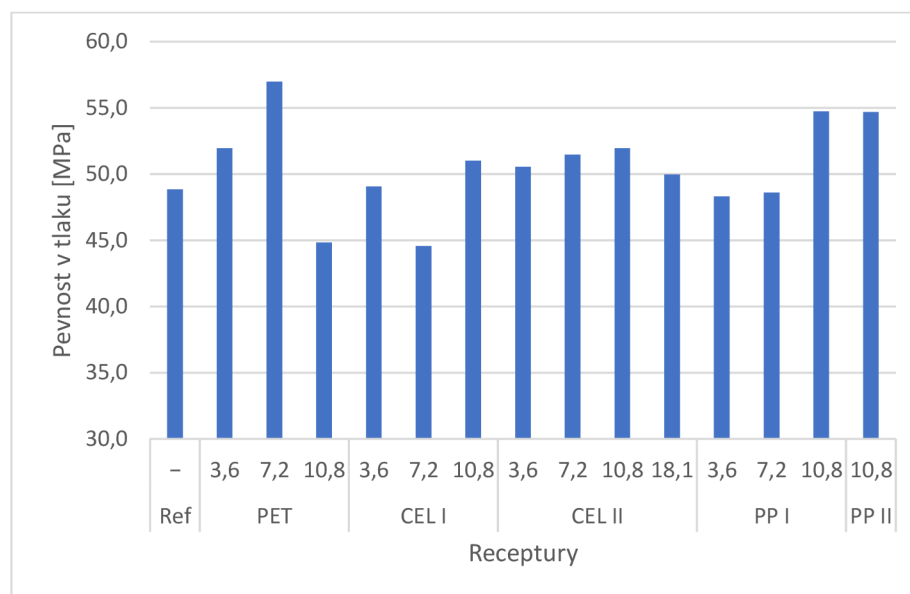
| Receptura | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------|-----------------------|
| REF | 48,8 |
| PET 3,6 | 52,0 |
| PET 7,2 | 57,0 |
| PET 10,8 | 44,8 |
| CEL I 3,6 | 49,1 |
| CEL I 7,2 | 44,6 |
| CEL I 10,8 | 51,0 |
| CEL II 3,6 | 50,6 |
| CEL II 7,2 | 51,5 |
| CEL II 10,8 | 52,0 |
| CEL II 18,1 | 50,0 |
| PP I 3,6 | 48,3 |
| PP I 7,2 | 48,6 |
| PP I 10,8 | 54,7 |
| PP II 10,8 | 54,7 |

U použití vláken z recyklovaného PET docházelo nejprve ke zvyšování pevností, kdy při dávce 0,036 % byla hodnota pevnosti 52 MPa a dále při dávce 0,072 byla 57 MPa. Při dalším navyšování dávky na 0,108 % došlo k poklesu pevnosti na 44,8 MPa, kdy tato pevnost byla nižší než u vzorků referenčních. Proto jako optimální dávka pro zvýšení pevnosti v tlaku pro tento druh vlákna je 0,072 %. Dále tato dávka s tímto druhem vlákna vykazala nejvyšší pevnost v tlaku ze všech zkoušených betonů.

U celulóзовých vláken přidávaných do betonu ve formě průmyslově vyráběných pelet (CEL I) došlo u nejnižší dávky 0,036 % ke zvýšení pevnosti oproti referenčnímu vzorku. Při následném zvýšení dávky na 0,072 % došlo k poklesu o 5 MPa. U nejvyšší dávky těchto vláken pevnost vzrostla nad hodnotu nejnižší dávky. Pokles u střední dávky může být způsobený nedostatečným promícháním a nerozdružením vláken dávkované ve formě pelet. Další důvod můžeme hledat v objemové hmotnosti tohoto betonu. Průběh pevnosti je totožný s průběhem objemové hmotnosti betonů s těmito vlákny.

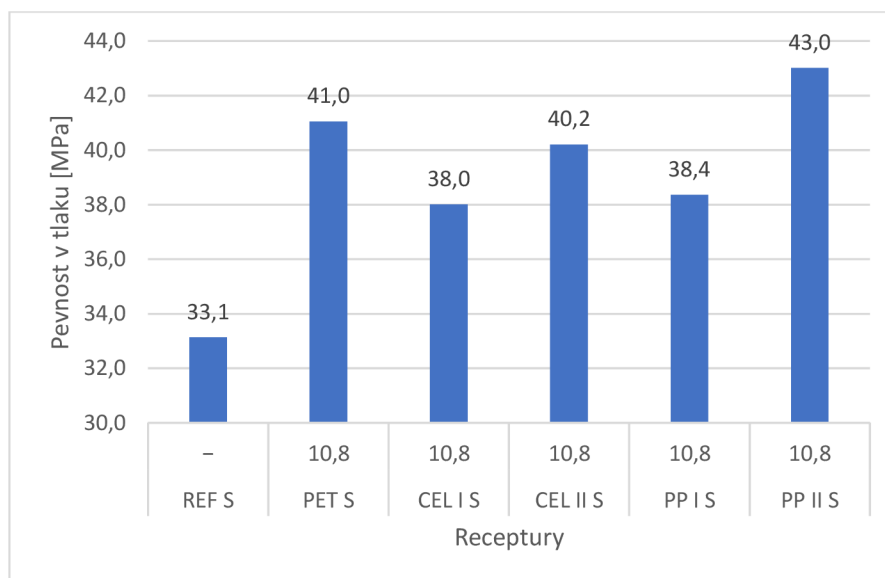
U recyklované celulózy při použití nejnižší dávky 0,036 % jsme dosáhli vyšší pevnosti v tlaku než u betonu referenčního bez vláken. Při narůstající dávce docházelo ke zvýšení pevnosti až do dávky 0,108 %, kde nastává maximum. Další přídavek vláken už pevnost snížilo a došlo tzv. předávkování. Ke zvýšení pevnosti došlo pravděpodobně z důvodu zpevnění struktury ale také z důvodu vnitřního ošetřování. Vlákna, která do sebe absorbovala vodu, ji extrahovala a tím podpořila hydrataci cementu se vznikem kompaktní struktury.

Přídavek PP I s nižšími dávkami neměl na pevnost v tlaku vliv. Pevnost byla téměř shodná s pevností referenční. Až přídavek vláken 0,108 % vykazoval vyšší pevnosti v tlaku než beton referenční. U tohoto druhu není jisté, zda je tato dávka optimální a bylo by třeba provést další navýšení dávky. Srovnání pevnosti v tlaku betonů s rozdílnými druhy a dávkami vláken můžeme vidět v grafu č. 9.



Graf 9: Porovnání pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I

Pevnost v tlaku betonů s portlandským směsným cementem (CEM II) měla totožný průběh jako u betonu s cementem portlandským. Nejnížší pevnost byla naměřena u betonu referenčního, nejvyšší pevnost naopak u betonu s makrovláknou s PP. Přídavek vláken opět ovlivnil pevnosti v tlaku, jak můžeme vidět v grafu č. 10. V tomto grafu je i znázorněno srovnání jednotlivých pevností.



Graf 10: Porovnání pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM II

U obou druhů cementu přispěly nejvíce pro zvýšení pevnosti v tlaku PET a PP vlákna. Nejmenší ovlivnění pevnosti v tlaku pozorujeme u přidání průmyslově vyrobených celulózových vláken.

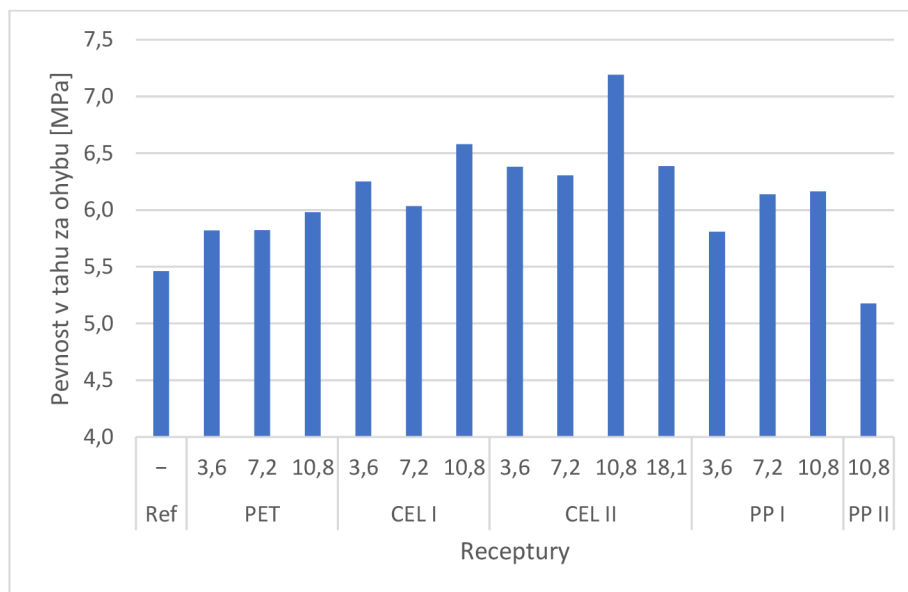
4.4.2.5. Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno ve formě čtyřbodového ohybu po 28 dnech zrání ve vodním uložení. Můžeme konstatovat, že všechny betony s obsahem vláken kromě betonu s makrovlákny PP II měly vyšší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu než referenční beton, jak můžeme vidět v tabulce č. 21.

Tabulka 21: Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM I

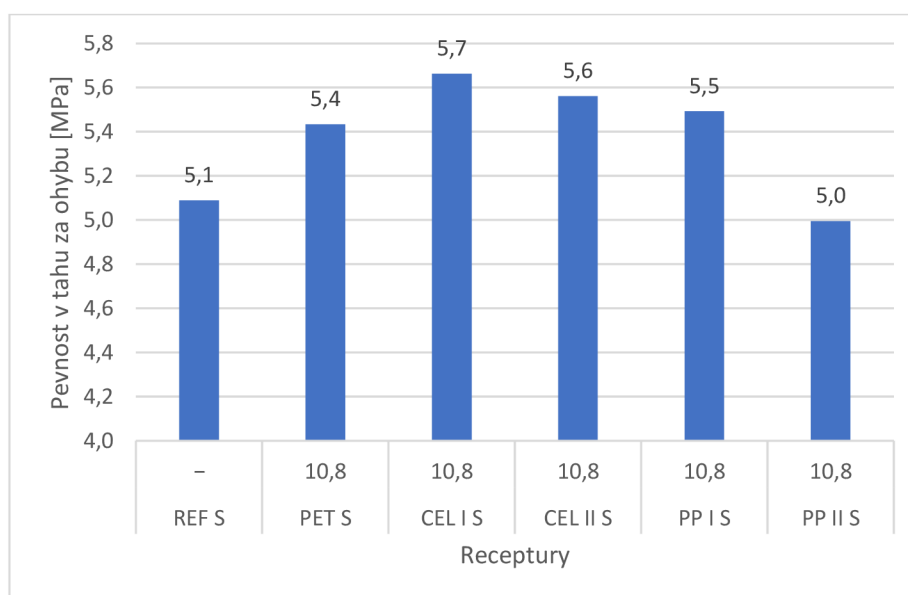
| Receptura | Pevnost v tahu za ohybu [MPa] |
|-------------|-------------------------------|
| REF | 5,5 |
| PET 3,6 | 5,8 |
| PET 7,2 | 5,8 |
| PET 10,8 | 6,0 |
| CEL I 3,6 | 6,2 |
| CEL I 7,2 | 6,0 |
| CEL I 10,8 | 6,6 |
| CEL II 3,6 | 6,4 |
| CEL II 7,2 | 6,3 |
| CEL II 10,8 | 7,2 |
| CEL II 18,1 | 6,4 |
| PP I 3,6 | 5,8 |
| PP I 7,2 | 6,1 |
| PP I 10,8 | 6,2 |
| PP II 10,8 | 5,2 |

Ve srovnání s referenčním betonem došlo u všech betonů s vlákny ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu (viz graf č. 11), ale při porovnání zvyšujícího se objemu konkrétních vláken již nedocházelo k výraznému zvýšení pevnostní charakteristiky. Tento efekt je zapříčiněn daným druhem vlákna, a především jeho geometrií ve vztahu k maximálnímu zrnu kameniva v celém betonu. U recyklované celulózy s nejvyšší dávkou 0,108 % detekujeme nejvyšší hodnotu pevnosti. Betony s vlákny vykazovaly oproti referenčnímu betonu průměrně o 1 MPa vyšší pevnost. Nejnižší hodnota nebyla naměřena u referenčního betonu, ale u betonu s makrovlákny. U tohoto druhu betonu sice nedošlo ke křehkému lomu, ale bylo by třeba zvýšit dávku pro zvýšení pevnosti. Důvod můžeme najít v počtu vláken rozptýlených v matrici.



Graf 11: Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM I

Hodnoty pevností v tahu za ohybu u betonů, kde byl použit portlandský směsný cement, můžeme vidět v grafu č. 12. U referenčních vzorků byla hodnota pevnosti nejnižší s hodnotou 5,1 MPa. Přídavkem vláken i u toho cementu došlo ke zvýšení pevnosti. Průměrné zvýšení pevnosti v tahu za ohybu bylo o 0,5 MPa.



Graf 12: Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM II

4.4.2.6. Pevnost v příčném tahu

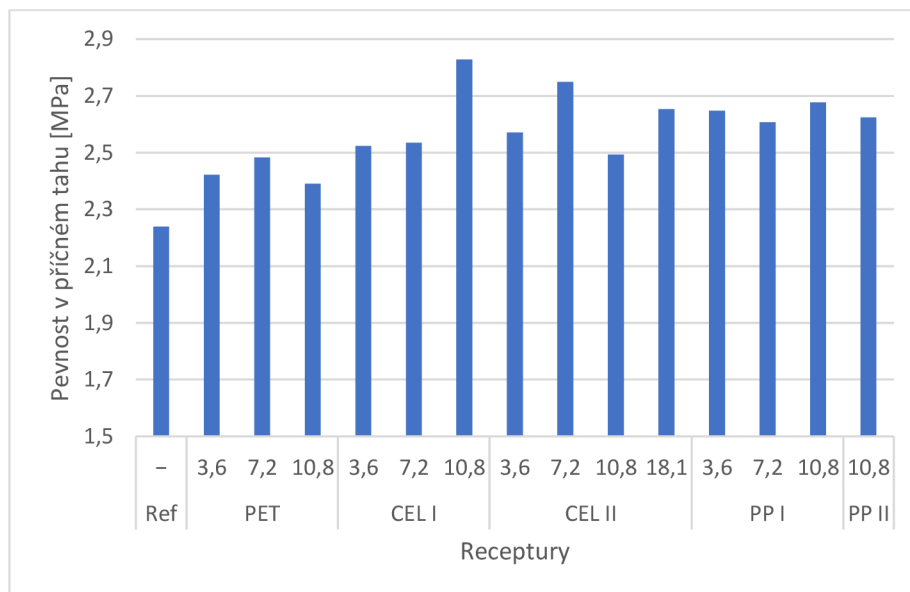
Jako v předešlých měřeních, i tato zkouška byla provedena po 28 dnech zrání ve vodním uložení. Jako u předešlých pevnostních parametrů, tak i u této zkoušky pozorujeme vliv přidáním vláken do betonu. Přidání vláken vedlo ke zvýšení pevnosti

v příčném tahu. Z tohoto plyne, že nejnižší hodnota příčného tahu byla vyhodnocena pro referenční beton bez vláken. Jednotlivé hodnoty můžeme vidět v tabulce č. 22.

Tabulka 22: Hodnoty pevnosti v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM I

| Receptura | Pevnost v příčném tahu [MPa] |
|-------------|------------------------------|
| REF | 2,2 |
| PET 3,6 | 2,4 |
| PET 7,2 | 2,5 |
| PET 10,8 | 2,4 |
| CEL I 3,6 | 2,5 |
| CEL I 7,2 | 2,5 |
| CEL I 10,8 | 2,8 |
| CEL II 3,6 | 2,6 |
| CEL II 7,2 | 2,7 |
| CEL II 10,8 | 2,5 |
| CEL II 18,1 | 2,7 |
| PP I 3,6 | 2,6 |
| PP I 7,2 | 2,6 |
| PP I 10,8 | 2,7 |
| PP II 10,8 | 2,6 |

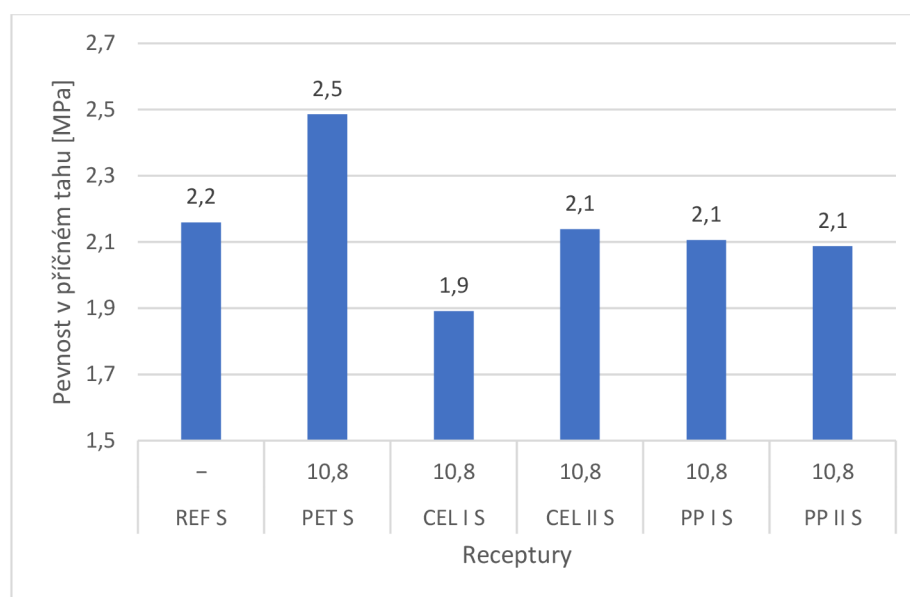
Pevnost v příčném tahu se s rostoucí dávkou jednotlivých vláken výrazně nemění nebo jen s malými odchylkami. Nejvyšší pevnosti v příčném tahu dosahovaly betony s celulózovými vlákny, a to u obou druhů. Nejvyšší hodnota byla vyhodnocena pro CEL I s dávkou 0,108 %, druhá nejvyšší hodnota byla u CEL II 0,072 %.



Graf 13: Hodnoty pevností v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM I

Obecně se čeká zvýšení tahových pevností přidáním vláken, což se potvrdilo, přestože se ve většině případů jedná o mikrovlákná. Vyšší pevnosti vykazovala celulózová vlákna i u předešlé sledované pevnostní charakteristiky.

V předešlých pevnostních vlastnostech bylo chování betonu s oběma druhy cementu podobné. V tomto případě vlákna přidaná do betonů s CEM II nevykázala zásadní vliv na pevnost v příčném tahu. Pevnost referenčního vzorku je téměř totožná s ostatními betony. Jediný beton s PET vlákny se vyznačuje mírným zvýšením o 0,3 MPa.



Graf 14: Hodnoty pevností v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM II

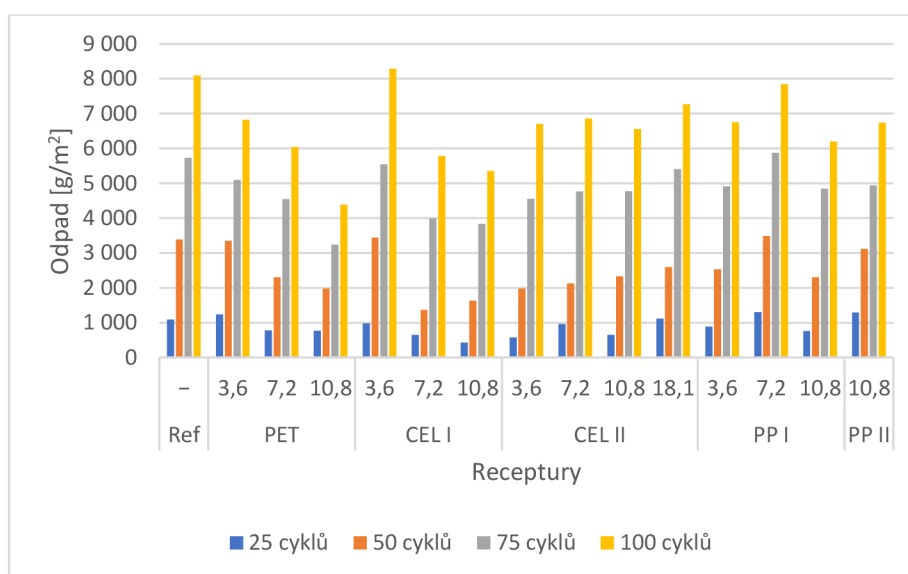
4.4.2.7. Odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL)

Zkouška odolnosti betonu proti působení účinků vody a chemických rozmrazovacích látek ukázala, že beton s vyšším obsahem vláken vykazuje větší odolnost vůči působení účinků CHRL metodou A. Nejvyšší odpady z povrchu vykazoval beton referenční bez přídavku vláken. Nejnižších odpadů bylo dosaženo u betonu s vlákny PET s nejvyšší dávkou. Z tabulky č. 23 i grafu č. 15 je vidět, že u všech druhů se zvyšující se dávkou vláken docházelo ke zvýšení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL, ale odpady z povrchu byly velmi vysoké přesahující hranici 1 000 g/m², kdy je beton považován za odolný vůči působení vody a CHRL.

Tabulka 23: Průměrné hodnoty odpadů vztažené na 1 m² betonů s CEM I

| Počet cyklů Receptura | Průměrné naměřené hodnoty odpadů sledovaných cyklů [g/m ²] | | | |
|--------------------------|---|------|------|------|
| | 25 | 50 | 75 | 100 |
| REF | 1088 | 3386 | 5730 | 8091 |
| PET 3,6 | 1230 | 3350 | 5093 | 6815 |
| PET 7,2 | 772 | 2298 | 4545 | 6039 |
| PET 10,8 | 767 | 1978 | 3239 | 4384 |
| CEL I 3,6 | 978 | 3442 | 5544 | 8286 |
| CEL I 7,2 | 648 | 1360 | 3990 | 5781 |
| CEL I 10,8 | 421 | 1633 | 3833 | 5351 |
| CEL II 3,6 | 572 | 1978 | 4547 | 6703 |
| CEL II 7,2 | 959 | 2123 | 4760 | 6855 |
| CEL II 10,8 | 648 | 2324 | 4774 | 6548 |
| CEL II 18,1 | 1113 | 2597 | 5407 | 7272 |
| PP I 3,6 | 886 | 2528 | 4905 | 6744 |
| PP I 7,2 | 1301 | 3488 | 5877 | 7846 |
| PP I 10,8 | 761 | 2302 | 4844 | 6194 |
| PP II 10,8 | 1286 | 3120 | 4936 | 6732 |

Faktor vysokého množství odpadu ve výsledcích zkoušek může být způsoben pravděpodobně nedokonalou povrchovou úpravou vzorků pro zkoušení betonu proti účinkům CHRL. Další důležitý faktor může být provzdušnění betonu, které pomáhá zvýšit odolnost proti působení vody a CHRL. Zkoušené betony nebyly provzdušněny účinnými póry požadované velikosti, ale naopak provzdušnění betonu, které bylo sledováno, bylo způsobeno přidáním vláken do betonu. U betonů se směsným cementem byl pozorován podobný efekt.



Graf 15: Průměrné hodnoty odpadů betonů s CEM I u stanovených cyklů

4.4.3. Fyzikálně mechanické vlastností betonů po vysokoteplotním zatížení

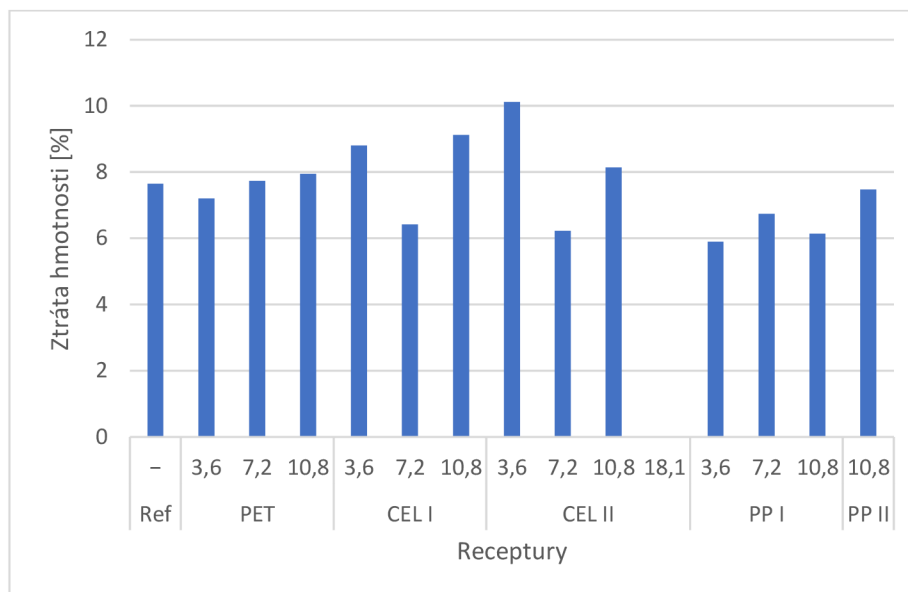
Zkušební tělesa, která byla vystavena vysokým teplotám přes 1 000 °C, byla vizuálně pozorována během zatěžování vysokou teplotou. Vizuální stránka zkušebních těles byla rovněž provedena po zchladnutí. Po vysokoteplotním zatížení byla dále zkoumána zbytková pevnost v tlaku s vyhodnocením změny hmotnosti po vysokoteplotním zatížení.

4.4.3.1. Ztráta hmotnosti

Pokles hmotnosti je kromě dehydratace betonu dán mimo jiné i vyhořením vláken, rozkladem hydrosilikátů, portlanditu a dalšími změnami struktury. Z tabulky č. 24 a grafu č. 16 vyplývá, že největší ztrátu hmotnosti evidujeme u zkušebních těles s CEM I, do kterých byla přidávána celulózová vlákna. U těchto druhů betonů navíc docházelo k odprýsknutí povrchových vrstev. Dokonce u nejvyšší dávky CEL II 0,181 % došlo k rozpadu těles. Z výsledků je patrné, že nejnižších hodnot bylo dosaženo u betonu s vlákny PP I. Srovnatelnou ztrátu hmotnosti s referenčním vzorkem pozorujeme u betonů s PET vlákny. Můžeme říct, že vlákna neměla výrazný vliv na ztrátu hmotnosti s tímto druhem cementu.

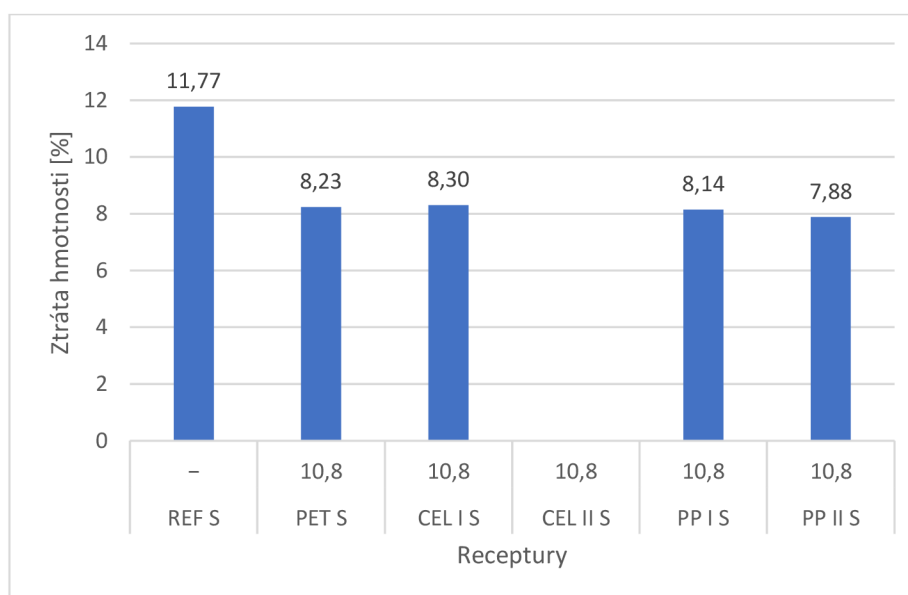
Tabulka 24: Hodnoty ztráty hmotnosti jednotlivých betonů s CEM I

| Receptura | Ztráta hmotnosti [%] |
|-------------|----------------------|
| REF | 7,65 |
| PET 3,6 | 7,20 |
| PET 7,2 | 7,73 |
| PET 10,8 | 7,95 |
| CEL I 3,6 | 8,81 |
| CEL I 7,2 | 6,42 |
| CEL I 10,8 | 9,12 |
| CEL II 3,6 | 10,12 |
| CEL II 7,2 | 6,22 |
| CEL II 10,8 | 8,14 |
| CEL II 18,1 | – |
| PP I 3,6 | 5,90 |
| PP I 7,2 | 6,74 |
| PP I 10,8 | 6,14 |
| PP II 10,8 | 7,47 |



Graf 16: Hodnoty ztráty hmotností jednotlivých betonů s CEM I

U betonů, u kterých byl pro výrobu použit CEM II, je vidět vliv přídavku vláken. Ztráta hmotnosti je totiž u referenčního vzorku nejvyšší. U zbylých betonů je ztráta hmotnosti téměř shodná s hodnotou okolo 8 % viz graf č. 17. U vzorku s recyklovanou celulórou došlo ke rozpadu stejně jako v případě použití CEM I.



Graf 17: Hodnoty ztrátových hmotností jednotlivých betonů s CEM II

4.4.3.2. Zbytková pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku ukázala, že nejvyšší hodnoty se vyskytovaly u všech betonů před teplotním zatížením, kde proti namáhání spolupůsobila vlákna s cementovou matricí. V tabulce č. 25 lze pozorovat hodnoty pevností před zatěžování, hodnoty pevností po zatěžování a dále vyjádřenou hodnotu zbytkové pevnosti v tlaku v

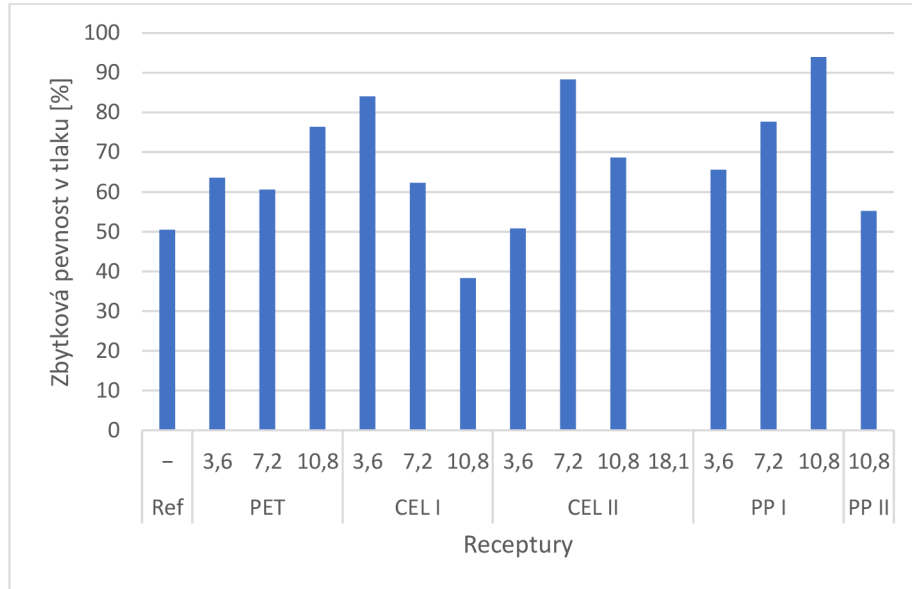
%. Při ověřování působení vysokoteplotního zatížení bylo předpokládáno, že dojde ke snížení pevnosti. K poklesu pevnosti dochází díky změnám ve struktuře betonu jako je rozklad portlanditu, rozklad CSH fází nebo fázová přeměna použitého křemičitého kameniva. Tyto změny způsobují vznik mikrotrhlin, které snižují zbytkové pevnosti.

Tabulka 25: Vyhodnocení zbytkové pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I

| Receptura | Pevnost v tlaku [MPa] | Zbytková pevnost v tlaku [MPa] | Zbytková pevnost v tlaku [%] |
|-------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| REF | 48,8 | 24,7 | 50,5 |
| PET 3,6 | 52,0 | 33,0 | 63,6 |
| PET 7,2 | 57,0 | 34,6 | 60,6 |
| PET 10,8 | 44,8 | 34,2 | 76,4 |
| CEL I 3,6 | 49,1 | 41,2 | 84,1 |
| CEL I 7,2 | 44,6 | 27,8 | 62,3 |
| CEL I 10,8 | 51,0 | 19,5 | 38,3 |
| CEL II 3,6 | 50,6 | 25,7 | 50,8 |
| CEL II 7,2 | 51,5 | 45,5 | 88,3 |
| CEL II 10,8 | 52,0 | 35,7 | 68,6 |
| CEL II 18,1 | 50,0 | 0,0 | 0,0 |
| PP I 3,6 | 48,3 | 32,4 | 65,0 |
| PP I 7,2 | 48,6 | 37,7 | 77,8 |
| PP I 10,8 | 54,7 | 51,4 | 93,9 |
| PP II 10,8 | 54,7 | 30,2 | 55,2 |

Z grafu č. 18 je vidět, že přídavek vláken napomohl ke zvýšení zbytkové pevnosti, kromě dvou dávek s celulóзовými vlákny. U betonu CEL I s dávkou 0,108 % a CEL II s dávkou 0,181 % došlo pravděpodobně k rychlé přeměně vlhkosti obsažené ve vláknu na páru s nárůstem tlaku, který se podílel na snížení pevnosti. Druhý ze zmíněných vzorků dokonce vysokoteplotní zatěžování nevydržel a rozpadl se. U betonů s přídavkem vláken s PET docházelo ke zvýšení zbytkové pevnosti již při nejnižší dávce, avšak jako nejlepší z tohoto hlediska vyšla optimální dávka 0,108 %, kdy zbytková pevnost byla 76,4 % z původní pevnosti. U betonů s CEL I byl trend opačný. Se zvyšující se dávkou vláken CEL I zbytková pevnost klesala. Vysvětlení tohoto chování může být v obsažené vlhkosti. Díky zvyšujícímu se obsahu vláken, která jsou schopná v sobě udržet vlhkost, mohla narůstat i vlhkost v celém kompozitu. Betony s recyklovanou celulóзou se chovají podobně jako průmyslově vyráběné pelety s výjimkou střední dávky vlákna. U betonů s CEL II s dávkou 0,072 % dosahovala zbytková pevnost 88,3 % z původní pevnosti. PP I vlákna potvrdila svoji funkci, pro kterou se přidávají do betonu za účelem zvýšení požární odolnosti. Již při první dávce vláken došlo ke zvýšení zbytkové pevnosti. U nejvyšší dávky, která je běžně užívanou dávkou, se hodnota zbytkové pevnosti v tlaku pohybovala přes 90 % z původní hodnoty. Přídavek vláken PP

II sice zvýšil zbytkovou pevnost, ale ve srovnání s PP I je mnohem nižší, což je pravděpodobně způsobeno velikostí vláken. Při zachování stejného objemu mikrováken i makrovláken je markantní rozdíl v počtu vláken. U tohoto betonu nebyl rozptýlen dostatečný počet pro vytvoření propustné sítě.



Graf 18: Zbytková pevnost v tlaku jednotlivých betonů s CEM I



Obrázek 42: Pohled na zkoušení zbytkové pevnosti v tlaku

S použitím směsného portlandského cementu byla očekávána vyšší odolnosti vůči zatížení vysokou teplotou oproti CEM I. V tomto cementu jsou přidány příměsi, které snižují obsah slínku. Při zrání se vytváří méně portlanditu, který se pak při vysokoteplotní zatížení rozkládá. Nedošlo však ke zvýšení zbytkových pevností, naopak došlo ke snížení více než o 65 %. U referenčního betonu s CEM I byla tato ztráta pouze 50 %.

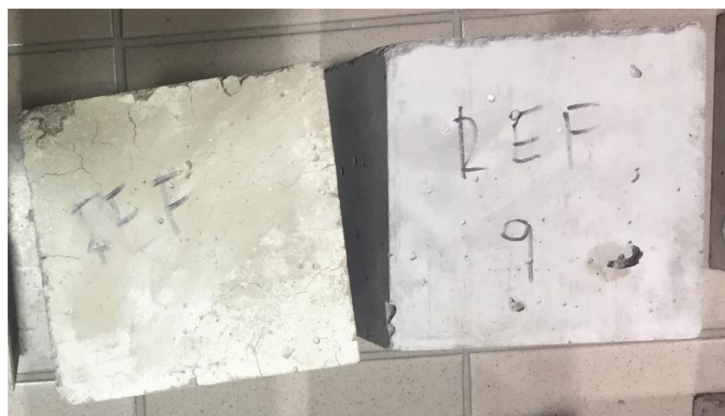
Přidavkem vláken se opět zvýšila zbytková pevnost. U všech typů betonů s rozdílnými vlákny s jejich stejným objemem se zvyšuje zbytková pevnost v tlaku na 50 %.

Tabulka 26: Vyhodnocení zbytkových pevností v tlaku jednotlivých betonů s CEM II

| Receptura | Pevnost v tlaku [MPa] | Zbytková pevnost v tlaku [MPa] | Zbytková pevnost v tlaku [%] |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| REFS | 33,1 | 11,8 | 35,5 |
| PET S 10,8 | 41,0 | 18,7 | 45,6 |
| CEL I S 10,8 | 38,0 | 18,4 | 48,5 |
| CEL II S 10,8 | 40,2 | 0,0 | 0,0 |
| PP I S 10,8 | 38,4 | 19,2 | 50,1 |
| PP II S 10,8 | 43,0 | 23,0 | 53,4 |

4.4.3.3. Vizuální posouzení zkušebních těles vystavených vysoké teplotě

Po zatížení zkušebních těles vysokými teplotami bylo provedeno hodnocení změn, které se během zatížení projevily na zkušebních tělesech. Jednou z pozorovatelných změn je změna barvy povrchu, dále pak odstřelování nebo iniciace trhlin na povrchu. Pro srovnání se na jednotlivých snímcích nacházejí vzorky zatížené vysokými teplotami a pak vzorek nezatížený.



Obrázek 43: Referenční betony s CEM I před a po vysokoteplotním zatížení

U referenčních těles (obrázek č. 43) byla pozorována síť trhlinek na povrchu, rohy zkušebních těles byly narušené, a dokonce na některých místech odpadly. Bylo jasně viditelné narušení struktury a drobné odprýsknutí povrchu díky expanzi obsažené vody/vlhkosti uvnitř vzorku. Expanze uvnitř betonu narůstá a způsobuje odprýsknutí. S narůstající se teplotou se síť trhlinek rozšiřuje. Při porovnání vzorků je také jasná změna barvy povrchu, kdy došlo ke zesvětlení povrchu z důvodu změn ve struktuře.

Nejlépe ze všech zatížených betonů byly vizuálně vyhodnoceny betony s přidavkem PET a PP I vláken (obrázek č. 44). Již od první dávky docházelo jen k minimálně tvorbě trhlin. Došlo ke změně barvy povrchu, ne však tak výrazné jako u referenčních betonů. Na žádném ze zkušebních vzorků nedocházelo k odprýskávání.

U zkušebních těles, kde bylo použito makrovlákno PP II, nebyly detekovány velké degradační změny, tento vzorek se však při manipulaci začal postupně drolit. Nedošlo přímo k odstřelení betonu při požáru, avšak jeho povrch byl poškozený a jeho soudržnost s jádrem nebyla tak velká jako u betonů s použitými mikrovlákny, která zajistily vyšší propustnost.



Obrázek 44: Betony s CEM I s přídavkem PET (nalevo) a PP (napravo) vláken s rostoucí dávkou před a po vysokoteplotním zatěžování

U betonů s přídavkem celulóзовých vláken platí opačná závislost než u vláken PET a PP I. Se zvyšující se dávkou vláken rostla také degradace těles, jak je vidět na obrázku č. 45. U nejvyšší dávky dokonce došlo ke zjevnému odprýsknutí části tělesa. Vizuální hodnocení přesně odpovídá i mechanickému chování, které již bylo vyhodnoceno. Chování jednotlivých těles mohla ovlivnit hutnost mikrostruktury díky samoošetřování betonu nebo množství vlhkosti. Čím vyšší dávka vláken, tím vyšší hutnost a nižší propustnost. Vlákna poté už nedokázala praskání díky tlaku vodní páry ovlivnit. U zkušebních těles vyrobených s přídavkem CEL II po vizuální stránce dopadla nejlépe prostřední dávka 0,072 %. U této dávky nastala minimální tvorba trhlin s nejnižší degradací, a to i podle mechanického hodnocení.



Obrázek 45: Betony s CEM I s přidavkem CEL I (nalevo) a CEL II (napravo) vláken s rostoucí dávkou před a po vysokoteplotním zatěžování

Zkušební tělesa vyrobená s CEM II, která byla zatížena vysokoteplotním zatížením vykazovala velké degradační změny. Referenční vzorky byly z velké části popraskané, došlo u nich také k odprýskávání větších ploch. Stejná vizuální podoba byla sledována i u vzorků betonů s přidavkem jednotlivých vláken. Přídavek vláken sice nepatrně ovlivnil zbytkovou pevnost v tlaku, avšak k zastavení tvorby trhlin a odprýskávání však zabránit nedokázaly.

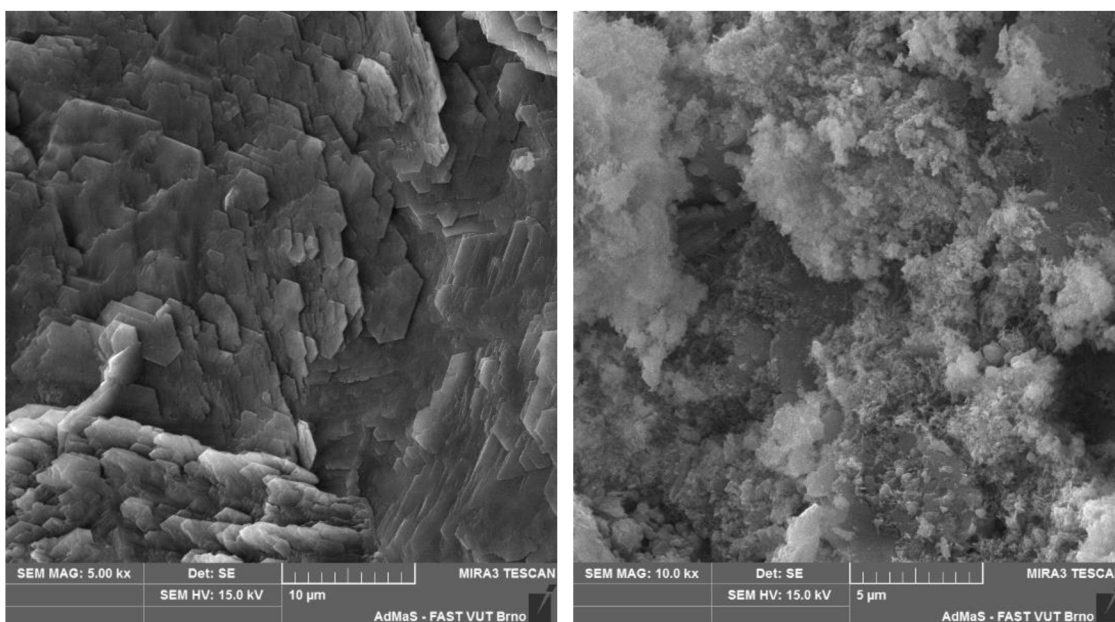


Obrázek 46: Část betonů (CEM II) s přidavkem vláken před a po vysokoteplotním zatěžování

4.4.3.4. Pozorování mikrostruktury betonu

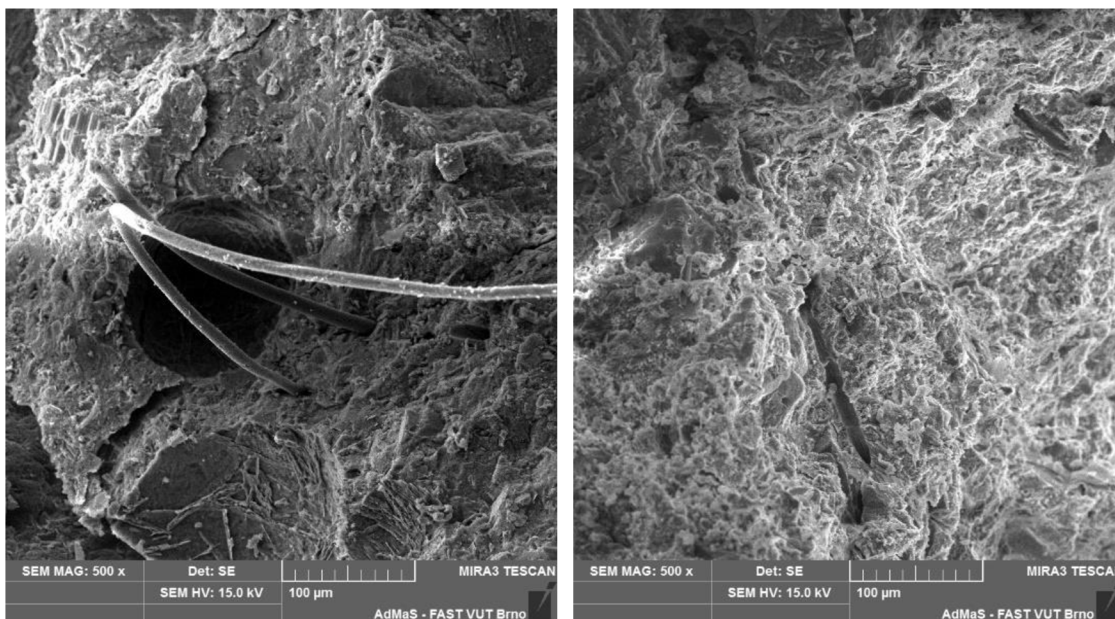
Při studiu působení vláken v betonu bylo provedeno snímkování mikrostruktury betonu. Sledovány a studovány byly zkušební vzorky jak před, tak i po vysokoteplotním zatížení pro srovnání a sledování chování betonu ve vysokých teplotách.

Na obrázku č. 47 je vidět referenční vzorek před a po vysokoteplotním zatížení. Na první pohled snímků je patrný jasný rozdíl. Nalevo vidíme beton před vysokoteplotním zatížením. Dle vzhledu je možné usuzovat, že pravděpodobně se jedná o krystaly portlanditu s šesterečnou soustavou. Tyto plošné krystaly jsou naskládány do vrstev a tvoří kompaktní strukturu. Po zatížení vysokými teplotami dochází ke změnám ve struktuře jako je ztráta kapilární vody, dehydratace nebo ke tvorbě trhlin mezi kamenivem a cementovým tmele či fázová přeměna kameniva. Právě výsledek dehydratace vidíme na obrázku č. 47 napravo. Pozorujeme porézní drsné krystaly ve slinutém povrchu.



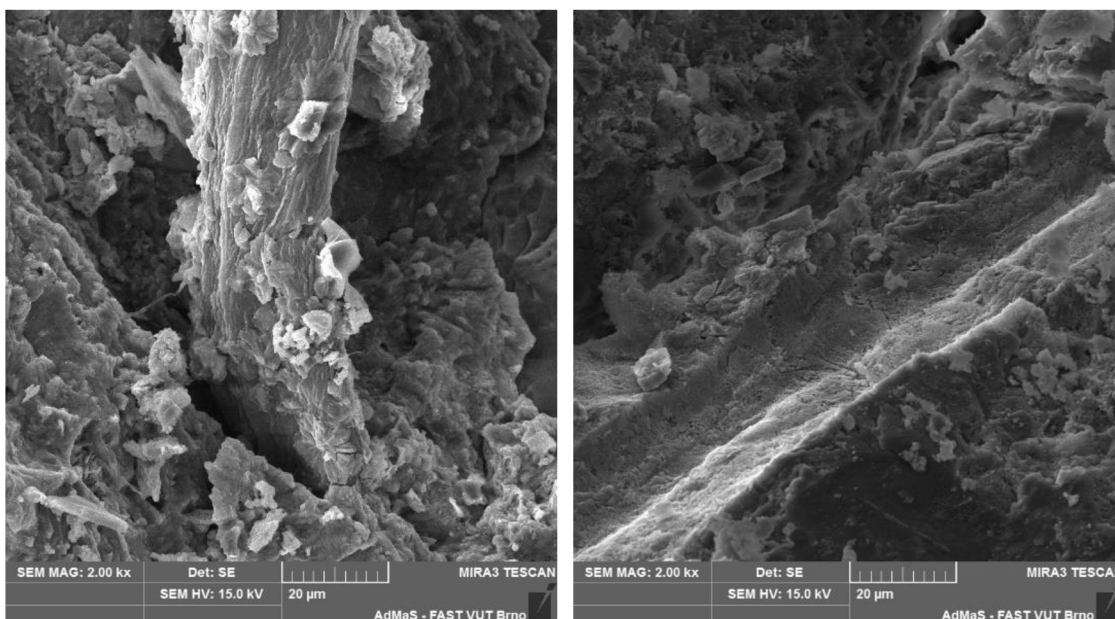
Obrázek 47: Referenční vzorek betonu před a po vysokoteplotním zatěžování

Na následujícím snímku č. 48 je vidět beton s PET vlákny před a po vysokoteplotním zatížení. Na prvním snímku vidíme pevně zakotvená PET vlákna do cementové matrice. Také lze vidět hladký povrch s minimálními zbytky cementové matice z ukotvení. Za vlákny vidíme do struktury póru o velikosti 100 µm. Na stejném snímku napravo vidíme strukturu, kde jsou patrná lůžka po vyhořelých PET vláknech, která zvyšují permeabilitu.



Obrázek 48: Beton s PET vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování

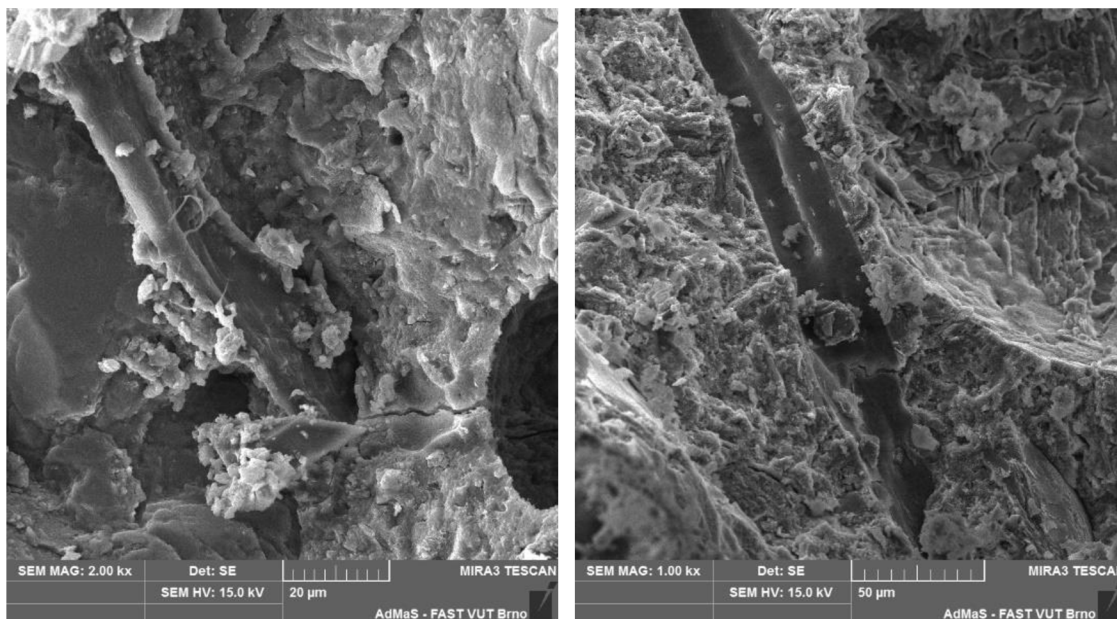
Na obrázku č. 49 nalevo je vidět CEL I vlákno zakotvené v betonové matrici. Samotné vlákno se jeví celistvé, hrubé a drsné a díky tomu jsou na většině jeho povrchu zbytky po zakotvení v matrici. Na totožném obrázku napravo pozorujeme vzniklé lůžko po vyhoření vlákna. Matrice se jeví podobně jako u referenčních vzorků.



Obrázek 49: Beton s CEL I vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování

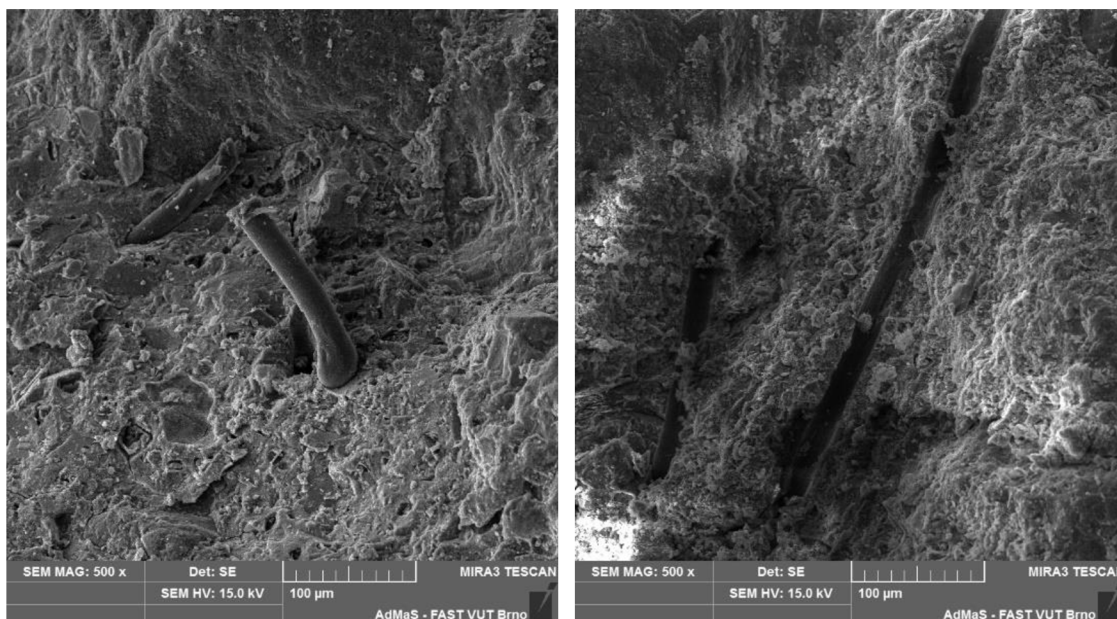
Značný rozdíl vidíme při srovnání vláken CEL I a CEL II. Vlákna z recyklované celulózy nejsou oproti CEL I drsná ani celistvá. Tato vlákna jsou hladká a jsou spíše plochého charakteru. U kotvení vlákna můžeme vidět prasklinu, která mohla vzniknout při expanzi vlákna při nabobtnání nebo při přípravě vzorku pro mikroskopické

pozorování. Na vláknu lze opět vidět zbytky matrice, ale oproti CEL I je jich značně méně. Na snímku se zatíženým vzorkem je vidět lůžko, které vzniklo z recyklovaného celulózového vlákna a není spojitého průřezu.



Obrázek 50: Beton s CEL II vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování

K podpoření uvolnění pórového tlaku a zabránění se používá přidání PP vláken do betonu. Na obrázku č. 51 je spatřitelný jeho důvod. Při zatížení betonu s PP vysokými teplotami dochází z počátku k měknutí a pak dále k tavení až vyhoření. Při vyhoření dojde k tvorbě kanálek, které vytváří prostor pro rozpínání tlaku vodní páry. Na následujícím obrázku také vidíme pevně ukotvená vlákna s hladkými povrchy.



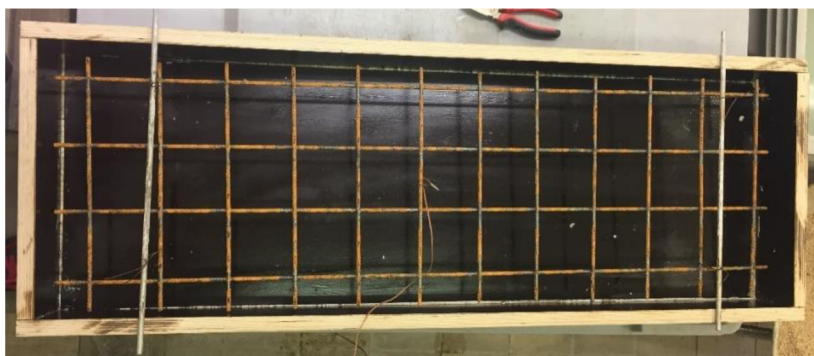
Obrázek 51: Beton s PP I vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování

4.5. Etapa III Výběr a zkoušení velkoformátových těles

4.5.1. Teplotní zatížení panelových těles

Z předešlé etapy vyhodnocení vlastností před a po teplotním zatěžováním byly vybrány 4 varianty betonů: REF, PET 0,072, CEL II 0,072 a PP I 0,072. Tyto 3 receptury s vlákny byly vybrány na základě výsledků předchozí etapy, které vykazovaly příznivější vlastnosti z pohledu vyšší odolnosti vůči působení vysokých teplot. Referenční beton bez vláken byl vybrán pro porovnání jednotlivých sledovaných vlastností s betony s vlákny.

Na obrázku č. 52 vidíme pohled do prázdné formy panelu, která sloužila pro jeho výrobu. Použitá forma měla rozměry 1 200×400×100 mm. Pro vyztužení betonu byla vložena výztuž ve formě sítě při vysokoteplotním zatížení. Dále byl do betonu vložen termočlánek pro sledování teploty uvnitř zkušebního panelu. Panely byly ponechány ve formách se zabráněním ztráty vlhkosti a uloženy v prostředí s vysokou relativní vlhkostí nad 90 % po dobu 28 dnů.



Obrázek 52: Forma panelu s výztuží a připevněný termočlánek

Při vysokoteplotním zatěžování byla sledována teplota na povrchu a uvnitř zkušebních těles. Povrchová teplota na neohřívané straně před samotným zatěžováním byla 20 °C, od zápalu pece byla 20 minut konstantní a pak se lineárně zvyšovala až do konce zatěžování. Po dosažení teploty 1 000 °C uvnitř pece se teplota nezasaženého povrchu zkušebních těles pohybovala okolo 115 °C. Uvnitř zkušebních vzorků docházelo ke lineárnímu zvýšení teploty od počátku zahřívání. Před zatížením byla teplota uvnitř betonu okolo 19 °C, při teplotě 1 000 °C uvnitř pece se teplota uvnitř vzorků pohybovala v rozmezí 400–460 °C.

Při narůstající teplotě nebyla sledována jen teplota na povrchu a uvnitř zkušebních panelů, ale byly také sledovány změny na povrchu v časové ose. Sledováno bylo hlavně uvolňování vody v kapalné formě, tvorba trhlin a odprýsknutí. Po 20 minutách zahřívání dochází k postupnému uvolňování vody všech zkušebních panelů viz obrázek č. 53.

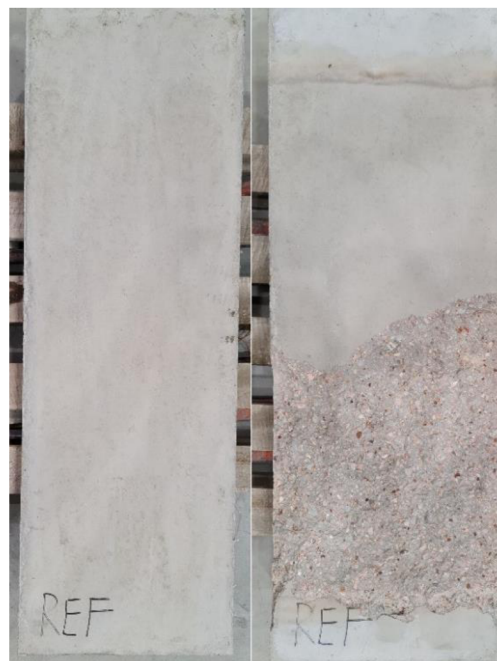


Obrázek 53: Zkušební panely během teplotního zatěžování – pocení

Po 25 minutách vysokoteplotního zatěžování, kdy uvnitř pece byla teplota okolo 800 °C, došlo k odprýsknutí u panelu CEL II a referenčního betonu REF. Teplota uvnitř těchto vzorků v tento moment byla okolo 115 °C. Nahromaděná vlhkost v těchto panelech přeměněná na vodní páru doprovázela zvýšení vnitřního tlaku a docházelo k odloupení povrchové vrstvy. U PP I ani u panelu s PET vlákny toto odprýsknutí zaznamenáno nebylo. Zkouška skončila po přesáhnutí 1 000 °C v peci, kdy se zastavil přívod tepla a vzorky se ponechaly k postupnému ochlazení na okolní teplotu laboratoře.

4.5.2. Vizuelní vyhodnocení zkušebních panelů po vysokoteplotním zatížení

Po vysokoteplotním zatížení zkušebních panelů proběhla vizuelní prohlídka a porovnání změn na povrchu, které se zde objevily.

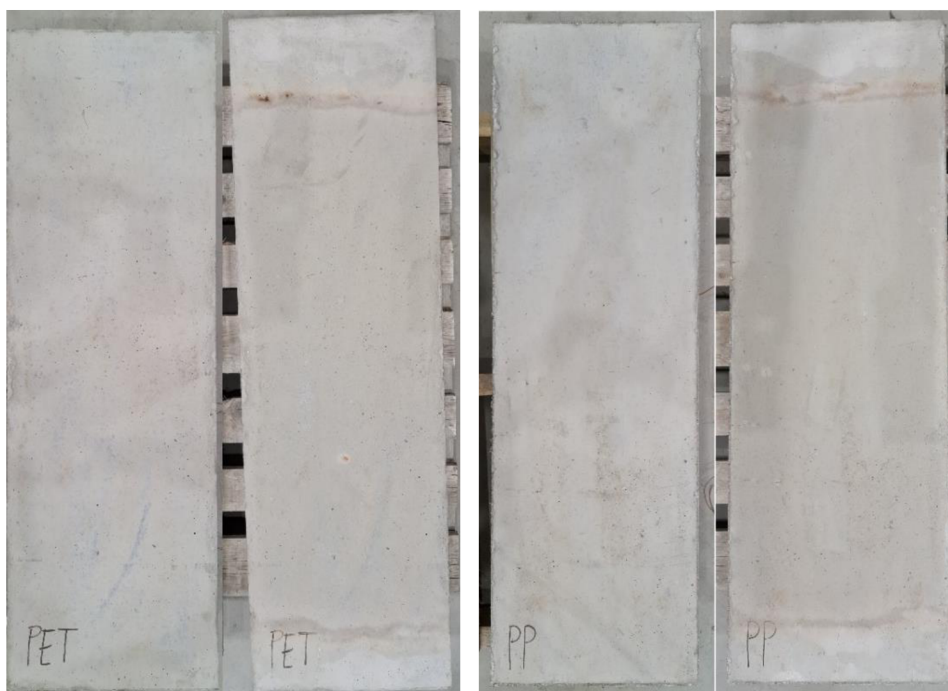


Obrázek 54: Zkušební panel REF před a po vysokoteplotním zatížení

U referenčního panelu bez přídavku jakýkoliv vláken (obrázek č. 54) byly potvrzeny obecné předpoklady odprýsknutí betonu z ohřívaného povrchu. U tohoto betonu došlo k vážnému odloupení povrchové vrstvy až do hloubky průměrně 2,5 cm, kdy odprýsknutá plocha je rovna více než 50 % zatížené plochy panelu. Na zbytku neodprýsknuté plochy se nachází hustá síť trhlin a puchýřků, které by vedly k dalšímu odprýsknutí. Při odprýsknutí krycí vrstvy byla ocelová výztuž více namáhána vysokou teplotou, což vedlo k vyšší deformaci a prohnutí celého panelu. Na snímku č. 54 i 55 je dále vidět změna zbarvení cementové matrice a kameniva díky proběhlým změnám vlivem vysoké teploty, podobně jako u menších zkušebních těles.



Obrázek 55: Měření hloubky odprýsknutí na panelu REF



Obrázek 56: Zkušební panel PET před a po vysokoteplotním zatížení (vlevo), zkušební panel PP I před a po vysokoteplotním zatížení (vpravo)

Při hodnocení zkušebních kostek v druhé etapě s PET a PP vlákny byla vidět schopnost eliminovat náchylnost k odprýskávání. Při hodnocení v této etapě se nám toto tvrzení potvrdilo. U panelu s PET ani s PP I vlákny (obrázek č. 56) nedošlo na povrchu zasaženém vysokou teplotou k žádnému odlupování nebo tvorbě puchýřků či velkých trhlin. Na jejich povrchu se nacházela velice hustá síť trhlinek o velmi malé šířce, které nebyly pro oko skoro rozpoznatelné. Tyto vlákna potvrdila jejich funkci při vysoké teplotě. Došlo k jejich tavení až vyhoření, což vytvořila lůžka a síť, kde se mohl tlak vodní páry rozpínat a nedošlo tak k porušení struktury betonu.

U panelů s přídavkem CEL II vláken došlo k silnému odprýsknutí přes půlku zatíženého povrchu s průměrnou hloubkou 2 cm. Vysvětlení tohoto jevu může být to, že vlákna z recyklované celulózy během výroby betonu naabsorbovala větší množství vody, která byla později uvolňována a docházelo ke smrštění vláken. Tyto objemové změny mohou vést až k mezifázovému oddělení vláken od matrice. S rostoucí teplotou se smrštění vláken zvyšuje a vlákno zaujímá mnohem menší objem oproti původnímu stavu, kdy byla ještě naabsorbována vlhkost. Dle odborných studií je spojení mezi matricí s vlákny pouze velmi slabými silami. Vlivem nízkých vazebných sil na rozhraní vlákna a cementové matrice při teplotním namáhání se nemusí začít inicieovat tvorba žádné trhliny v systému. V tomto případě je cesta nebo místo pro rozpínání tlaku vodní páry pouze prostor mezi vláknem a matricí, a po vyhoření i lůžko po vlákně, což nemusí být dostačující ve srovnání se systémem s PP I, kdy po vyhoření vzniká spojitý systém trhlin. Proto je účinnost přírodních vláken zásadní otázkou, zejména při nízkém dávkování [87,88].



Obrázek 57: Zkušební panel CEL II před a po vysokoteplotní zatížení

5. Diskuse výsledků

V této kapitole jsou shrnuty výsledky provedené v rámci této práce. Bylo navrženo 21 receptur, u kterých se měnil zejména druh a dávka přidávaného vlákna, kdy vlákna byla dávkována objemově. Sledováno bylo i srovnání dvou odlišných druhů cementů. Koncepce návrhu složení betonu, především z pohledu reologie, byla jednotlivých druhů čerstvých betonů kromě referenčních zvolena a udržována konstantní pro srovnání jejich vlastností, a to z pohledu dávkování vody, která zásadně ovlivňuje vlastnosti betonu ve ztvrdlém stavu. U tohoto stanovení byl jasně patrný vliv zvyšování dávky vláken. Při zvýšení dávky vláken docházelo ke snížení konzistence. Důvodem je zvýšení povrchu, který je potřebný k ovlhčení. Zajímavý byl rozdíl mezi PP I a PP II. Při stejné dávce, a tím i objemu vláken, docházelo k vyššímu sednutí u PP II. Vysvětlení může spočívat v počtu vláken, kde PP II jsou makrovlákna, které ve srovnání s PP I (mikrovlákna) mají při stejném objemu vláken nižší počet vláken a tím i menší povrch na ovlhčení.

Objemová hmotnost a obsah vzduchu v čerstvém vzduchu spolu velmi úzce souvisí. S rostoucím obsahem vzduchu dochází k poklesu objemové hmotnosti. Objemová hmotnost čerstvého betonu s oběma druhy cementu se pohybovala v rozmezí 2 270–2 380 kg/m³ a obsah vzduchu v rozmezí 2,5–5 %. Nejvyšší objemová hmotnost byla dle očekávání stanovena u betonu referenčního 2 380 kg/m³ s nejnižší hodnotou obsahu vzduchu 2,5 %. S přidavkem vláken se objemová hmotnost snižovala díky jejich nižší objemové hmotnosti ve srovnání s ostatními složkami betonu, kdy se tento rozdíl zvyšoval s rostoucí dávkou vláken. Zvýšením dávky vláken bylo očekáváno zvýšení obsahu vzduchu v čerstvém betonu vlivem známého efektu přilnutí vzduchu na vláknech. Při hodnocení srovnání mezi objemovou hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu byl potvrzený trend poklesu mezi těmito stavy. Rozdíly mezi čerstvým a ztvrdlým betonem, byly pro jednotlivé betony nižší v případě použití vláken, nejvyšší rozdíl byl u betonu referenčního, tj. bez vláken.

Přídavek vláken do struktury betonu přispíval ke zvýšení pevnosti v tlaku, který se projevil na všech betonech s vlákny. Tento efekt není primárně požadován, ale vysvětlením je zpevnění struktury a lepší rozložení a roznesení napětí při zatěžování. Se zvyšující se dávkou vláken se pevnost v tlaku měnila odlišně v porovnání jednotlivých druhů vláken. U těles s PET vlákny s přidavkem 0,036 % došlo ke zvýšení pevnosti až o 20 % oproti referenčnímu betonu bez vláken. Při nejvyšší dávce 0,108 % se však pevnost snížila o 10 % oproti referenčnímu betonu, kdy mohlo dojít na základě předávkování pravděpodobně k špatné distribuci vláken v materiálu. U betonu s průmyslově vyráběnými celulóзовými vlákny CEL I došlo u prvního přídavku vláken

0,036 % k nepatrnému zvýšení pevnosti oproti referenčnímu vzorku. U přídatku 0,072 % došlo ke snížení pevnosti v tlaku o 5 MPa oproti první dávce vláken vlivem možného špatného rozdělení vláken a tím i špatné distribuce vláken ve struktuře betonu. Tento jev lze usoudit na základě zvýšení pevnosti při dalším přídatku vláken, kdy dávka 0,108 % celulókových vláken CEL I zvýšila pevnost v tlaku oproti první dávce o 2 MPa. Pevnost v tlaku betonů s recyklovanou celulózkou CEL II se s počátečním přídatkem vláken 0,036 % zvýšila o 2 MPa oproti betonu referenčnímu. Se zvyšováním dávky vláken se zvyšovala i pevnost až do přidání dávky 0,108 %, kdy u této dávky dochází k bodu zlomu a následné přidání vláken způsobí snížení pevnosti na základě pravděpodobného předávkování. Přídatok PP I s nižší dávkou 0,036 % neměl na pevnost v tlaku výrazný vliv. Pevnost byla téměř shodná s pevností referenční. Až přídatok vláken s dávkou 0,1087 % vykazoval vyšší pevnosti v tlaku o 12 % než beton referenční. U toho druhu vláken nenastal bod zlomu, kdy sledujeme stále narůstající tendenci. Pro zjištění pokračující tendence nárůstu či začátku klesání pevnosti by bylo potřeba provést další navýšení dávky. Při srovnání použitých cementů se potvrdil trend zvýšení pevnosti s přídatkem vláken. U obou druhů cementů přispěly nejvíce pro zvýšení pevnosti v tlaku přídatky PP a PET vláken.

Všechny betony s přídatkem vláken, kromě betonu s makrovlákny, měly vyšší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu než referenční beton (5,5 MPa). Betony s vlákny vykazovaly oproti referenčnímu betonu průměrně o 1 MPa vyšší pevnost. Při porovnání pevností betonů se zvyšující se dávkou vláken zpravidla nedocházelo k výraznému zvýšení. Podobnou hodnotu pevnosti v tahu za ohybu měl beton referenční (5,5 MPa) a beton s vlákny PP II (5,2 MPa). U betonu s makrovlákny PP II nedošlo k náhlému rozlomení, ale docházelo k postupnému rozevírání trhliny, kdy makrovlákna zachovala soudržnost materiálu přes vznikající trhlinu. U tohoto druhu vláken nebyl v matici pravděpodobně rozptýlen dostatečný počet vláken, kdy použitá dávka u tohoto druhu vláken byla na spodní hranici doporučené od výrobce. U betonů s CEM II došlo také s přídatkem vláken ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu oproti betonu referenčnímu. Průměrné zvýšení pevnosti bylo o 0,5 MPa. Pevnost v příčném tahu měla podobný trend jako pevnost v tahu za ohybu. S přídatkem vláken dochází ke zpevnění struktury a zvýšení tahových pevností, přestože se jednalo o mikrovlákna, která nejsou do betonů primárně přidávána pro zvýšení tahových pevností.

Zkouška odolnosti betonu proti působení účinkům vody a chemických rozmrazovacích látek ukázala, že u betonů se zvyšující se dávkou všech druhů vláken dochází k postupnému snížení odpadu z povrchu betonu. Největší množství odpadu bylo vyhodnoceno pro referenční beton. Nejméně odpadu bylo u betonu s přídatkem nejvyšší

dávky PET vláken 0,108 %. Vysoké odpady z povrchu betonu mohly být ovlivněny nevhodnou úpravou vzorků nebo absencí provzdušnění, což je účinná cesta pro zvýšení odolnosti. Betony nebyly záměrně provzdušňovány pomocí provzdušňovací přísady, která by zvýšila odolnost betonu, protože cílem bylo sledovat obsah vzduchu, který se zvýší vlivem přidání vláken.

Další stěžejní částí bylo stanovení vlivu přídavku vláken na odolnost betonu proti zatížení požárem. Jednou z možností, jak eliminovat poškození betonu vlivem požáru, je začlenění vláken do struktury cementového kompozitu [75,88,99]. Tento předpoklad se potvrdil, ale jak bylo v teoretické práci řešeno, závisí vždy na geometrii vlákna, jeho druhu a dávce, což se potvrdilo i v tomto experimentu. V závislosti na parametrech vlákna a výsledných vlastnostech betonu, je možné stanovit maximální vhodné dávkování. V tomto experimentu začlenění všech druhů vláken do struktury betonu s vhodnými objemy vedlo ke zvýšení odolnosti proti působení požáru. Po vysokoteplotním zatížení byla nejprve vyhodnocena vizuální stránka zkoušených těles. Pozorována byla změna barvy, odprýskávání nebo množství trhlin na povrchu. Nejmenší dopady působení extrémně vysoké teploty (nad 1 000 °C) byly vyhodnoceny pro zkušební tělesa s přídavkem PET a PP vláken, kdy nedocházelo k žádné podobě odprýsknutí a na povrchu vzorků byla vytvořena síť mikrotrhlin špatně spatřitelné lidským okem. U těles referenčního betonu a betonu s přídavkem CEL I i CEL II docházelo k značnému odprýsknutí povrchových vrstev. Vizuální hodnocení koresponduje s hodnocením ztráty hmotnosti. Největší ztráta hmotnosti je detekována u betonů s celulóзовými vlákny. Po vysokoteplotním zatížení bylo předpokládáno, že dojde ke snížení pevnosti. Tento pokles je způsoben změnami ve struktuře betonu jako je rozklad matrice nebo fázová přeměny kameniva, které způsobují vývoj trhlin, které poté snižují zbytkové pevnosti [66,95]. Při začlenění PP I vláken byla potvrzena jejich funkce, pro kterou se přidávají do betonu za účelem zvýšení požární odolnosti. Již při první dávce vláken 0,036 % došlo ke zvýšení zbytkové pevnosti. U nejvyšší dávky 0,108 %, která je běžně užívanou dávkou, se hodnota zbytkové pevnosti v tlaku pohybovala více než 90 % z původní hodnoty pevnosti. Při stejném objemu vláken přídavek vláken PP II sice zvýšil zbytkovou pevnost na 55 % oproti referenčnímu betonu (50 %), ale ve srovnání s PP I mnohem méně (90 %). Jak již bylo zmíněno důvodem je počet vláken při stejné dávce, kdy PP II jsou makrovlákna a kdy v betonu nebyl rozptýlen dostatečný počet vláken pro vytvoření propustné sítě. Podobný trend jako u PP I sledujeme i přídavku vláken PET, kdy při užití nejvyšší dávky vlákna 0,108 % dosahovala zbytková pevnost v tlaku téměř 77 % původní pevnosti. U betonů s CEL I se zvyšující se dávkou vláken se zbytková pevnost snižovala, což koresponduje i se zbylými vyhodnocenými vlastnostmi. U CEL I s přídavkem nejnižší

dávky (0,036 %) se zbytková pevnost v tlaku pohybovala okolo 85 %. U nejvyšší dávky (0,108 %) se zbytková pevnost snížila na hodnotu 38,3 %. Na základě této snižující tendence usuzujeme, že vysvětlení tohoto chování může být v obsažené vlhkosti ve vláknech. Čím vyšší objem vláken, tím vyšší množství vlhkosti. Dále tato tendence může být způsobená nedostatečně propustnou sítí ve struktuře betonu. Při výrobě betonu do sebe celulózová vlákna naabsorbovala vodu a tím nabobtnala. Při hydrataci cementu ji částečně extrahovala, čímž napomohla k hutnější struktuře a proběhlo jeho zpětné smrštění. Toto smrštění může vést až k mezifázovému oddělení vláken od matrice. Při teplotním namáhání betonu, kdy dochází k dalšímu smrštění vlákna, nemusí docházet k iniciaci mikrotrhlin ve struktuře betonu díky slabému spojení mezi maticí a vlákny. Nevytváření mikrotrhlin ve struktuře betonu nemusí způsobit zvýšení propustnosti [87,88]. U CEL II vyšla nejvhodnější dávka 0,0724 % s hodnotou zbytkové pevnosti přes 88 %. Při nejvyšší dávce 0,181 % došlo k rozpadu tělesa. Odlišné chování betonů s CEL I a CEL II by mohlo být způsobeno rozdílným tvarem průřezu jednotlivých vláken. Při mikroskopickém snímání povrchu byl průřez u vláken CEL I uzavřený ve formě trubiček. Naproti tomu u vláken CEL II byl průřez spíše plochého charakteru. Na základě tohoto tvrzení by se mohlo usuzovat o nižší absorpci vody do jeho lumenu.

Při sledování vztahu vlákna a matrice cementového kamene bylo provedeno snímání mikrostruktury betonu před a po vysokoteplotním zatížení. Názorně bylo možné sledovat povrch vláken i zakotvení jednotlivých druhů vláken v cementové maticí. Ze snímků betonu, který byl zatížen zatížením simulující požár, bylo možné sledovat změny ve struktuře díky působení vysokých teplot, kdy dochází k degradaci vlákna, které po sobě zanechá volné lůžko, společně s ostatními složkami.

V poslední etapě této práce byla provedena selekce z všech betonů, kdy byly vybrány betony, které vykazovaly příznivé vlastnosti z pohledu odolnosti proti působení vysoké teploty, ze kterých byly vyrobeny velkoformátové zkušební dílce. U těchto těles při zatěžování extrémně vysokou teplotou byla sledována teplota uvnitř těles a dále na ohřívaném a neohřívaném povrchu. Při dosažení 1 000 °C uvnitř pece dosahovala teplota v tělesech 400–460 °C. Teplota povrchu na neohřívané straně se pohybovala okolo 100 °C. Jak je zmiňováno i ve výzkumných publikacích, v průběhu zatížení došlo u všech panelů k uvolňování kapalné vody (krvácení) a následně k odprýsknutí ochranné vrstvy u panelu referenčního a dále u panelu s CEL II. Teplota uvnitř těchto vzorků v době odstřelu přesahovala 115 °C. Vlivem nahromaděné vlhkosti, která se přeměnila na vodní páru, se zvýšil vnitřní tlak a docházelo k odloupení povrchové vrstvy [88,90,99]. U PP I ani u panelu s PET vlákny toto odprýsknutí zaznamenáno nebylo díky propustné sítí ve struktuře betonu. Následné vizuální hodnocení po vychladnutí těles na teplotu

v laboratoři potvrdilo odprýsknutí u panelů referenčního i s přídavkem CEM II vláken. U obou panelů došlo k silnému odprýsknutí přes půlku zatíženého povrchu s průměrnou hloubkou 2–2,5 cm. Na základě vyhodnocení betonu s vlákny i betonu referenčního ve formě velkoformátových panelů bylo potvrzeno chování betonu a mechanismy fungování vláken v betonu, jako tomu bylo u menších zkušebních těles.

Co se týká otázky použití směsného portlandského cementu CEM II, ze závěrů publikací vyplývá pozitivní vliv na odolnost proti působení vysoké teploty a proto bylo očekáváno zlepšení konečných vlastností po vystavení vysokoteplotního zatížení [3,6,8]. Toto tvrzení se však v této práci nepotvrdilo a nedocházelo ke zvýšení požární odolnosti při vystavení vysokoteplotního zatížení. Docházelo k odstřelování, dále docházelo ke snížení zbytkových pevností více než o 65 % z původní pevnosti. U referenčního betonu s CEM I byla tato ztráta pouze 50 %. U těchto betonů s CEM II byl patrný přídavek vláken, který zlepšil jejich chování. Chování tohoto cementu může být způsobeno jeho nižší pevnostní třídou.

6. Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na problematiku chování cementových betonů při vysokoteplotním zatížení se zaměřením na sledování vlivu vybraných druhů vláken na fyzikálně mechanické vlastnosti.

Na základě shrnutí dosavadních poznatků problematiky chování cementového kompozitu při působení vysokých teplot jako celku i chování jednotlivých složek je popsán vliv vysokých teplot na strukturu, mechanické a fyzikální vlastnosti betonu. Kromě popisu chování základních vstupních složek pro výrobu betonu je důležitou částí práce pojednání o kritickém selhání betonu, kdy vlivem mechanismů teplotní dilatace nebo tlaku vodní páry dochází k různým druhům odprýskávání. Podstatná část teoretické části je věnována použití rozptýlené výztuže, která je používána pro zvýšení houževnatosti, pevnostních charakteristik tak i pro zvýšení trvanlivosti betonu. Kromě výše uvedených vlastností je rozptýlená výztuž zásadním opatřením proti porušení a destrukci betonu při vysokoteplotním zatížení, kdy dochází k teplotní dilataci a zvyšování tlaku vodní páry uvnitř betonu. Novodobým trendem je použití a začlenění vláken z recyklovaných organických surovin. Z výzkumných prací zabývajících se geometrií vlákna pro zvýšení odolnosti proti odlupování vyplývají tři zásadní parametry: vzájemná vzdálenost a velikost zrn kameniva a počet vláken v betonu. Výzkumné práce, které se zabývají použitím PP vláken do betonu, uvádějí závěry, že tyto vlákna při vysokoteplotním zatížení betonu usnadňují transport vlhkosti obsažené v betonu díky propojené síti z vyhořelých lůžek a vytvořených mikrotrhlin. Zvláštní pozornost je věnována použití vláken získaných z obnovitelných rostlinných zdrojů nebo recyklací surovin, z čehož plyne, že celulózové vlákno je velmi zajímavým druhem vlákna z pohledu ekologického dopadu. Z vyhodnocení závěrů publikací zabývajících se odolností proti působení vysokých teplot lze usoudit, že toto vlákno přispívá k hutnější vnitřní struktuře betonu. Nasákové vlákno díky vnitřnímu lumeny naabsorbuje vodu při přípravě betonu. Během zrání je tato voda extrahována v době hydratace cementu čímž vznikne hutnější matrice. Během extrahování vody obsažené ve vláknu dochází ke smrštění, kdy vzniká prostor pro rozptýlení tlaku vodní páry. Během posledních desetiletí se ukázalo, že obrovské množství nerozložitelného odpadu, zejména ve formě odpadního plastu představuje vážné problémy pro životní prostředí. Z tohoto důvodu opětovné použití polymerního odpadu hraje důležitou roli. V polymerním odpadu má druhé největší zastoupení PET nejčastěji PET lahve. Jedním z možných řešení je použití recyklovaného PET jako rozptýlené výztuže. Stejně jako u PP, tak i PET vlákna mají potenciál k snížení odlupování betonu při vysokých teplotách. Tyto vlákna však mají vyšší bod tání okolo 240 °C ve srovnání s PP, který má bod tání okolo 170 °C.

V experimentální části práce byl sledován vliv různých druhů vláken na vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu, a dále byl zkoumán vliv druhu použitých vláken a jejich dávky na chování cementového kompozitu zatíženého extrémně vysokou teplotou. U čerstvého betonu je jasně patrné, že přidáním vláken dochází ke snížení konzistence. Stanovené objemové hmotnosti v čerstvém stavu korespondovaly se stanoveným obsahem vzduchu v čerstvém betonu, kdy míra provzdušnění rostla s dávkou vláken. U ztvrdlého betonu došlo k očekávanému poklesu objemové hmotnosti ve srovnání s čerstvým stavem díky odchodu přebytečné vlhkosti. U mechanických vlastností přidavek vláken způsobil zvýšení pevnosti díky zpevnění struktury a lepšímu rozložení a roznesení napětí do zatěžované struktury. Ke zvýšení mechanických vlastností došlo navzdory rostoucímu obsahu vzduchu vnesenému přidáním vláken. Při přidavku vláken bylo obecně očekáváno zvýšení tahových pevností, což se potvrdilo, přestože se ve většině případů jednalo o mikroválka, která v tomto směru nevykazují zásadní vliv. Navzdory rostoucímu obsahu vzduchu způsobenému přidavkem vláken se mechanické vlastnosti zvyšovaly.

Po zatížení extrémně vysokou teplotou byla očekávána změna vlastností zatíženého betonu vlivem změn proběhnutých ve struktuře betonu. Ztráta hmotnosti při vysokoteplotním zatížení může být způsobena vyhořením vláken, dehydratací nebo rozkladem vnitřní struktury betonu. Nejvyšší ztráta hmotnosti byla detekována u betonů s přidavkem celulózy, kdy byly vyhodnoceny i nejnižší zbytkové pevnosti. Přidavek všech druhů vláken pozitivně ovlivnil zbytkovou pevnost v tlaku. Se zvyšujícím se objemem vláken docházelo k viditelným rozdílům chování jednotlivých druhů betonu. U PET a PP I vláken při zvyšující se dávce dochází k zvyšování zbytkové pevnosti, kdy nejvyšší zbytková pevnost je vyhodnocena u nejvyššího dávkování $0,1087 \text{ \%}/\text{m}^3$ s hodnotami více než 75 % z původní pevnosti. PET vlákna vyrobená z odpadního materiálu mají potenciál pro přidávání do betonu k dosažení vyšší požární odolnosti betonu či prvků konstrukce díky uspokojivému chování při vysokých teplotách betonu, kde jsou tyto vlákna začleněna. Na základě dosažených výsledků by mohla PET vlákna fungovat podobně jako PP vlákna, s pozitivním ekologickým dopadem. U betonů s CEL I vlákny došlo s postupným zvyšováním objemu vláken k sestupné tendenci zbytkové pevnosti v tlaku. Klesající tendence je možná vysvětlit obsaženou vlhkostí uvnitř vlákna, proto je nezbytné brát v potaz jeho absorpční schopnost. Dále je tato tendence pravděpodobně způsobená nedostatečně propustnou sítí ve struktuře betonu. Smrštění vláken totiž může vést až k mezifázovému oddělení vláken od matrice kdy poté nemusí docházet k iniciaci mikrotrhlin ve struktuře betonu díky slabému spojení mezi matricí a vlákny. U betonů s CEL II byla vyhodnocena nejvhodnější dávka $0,0724 \text{ \%}$ s hodnotou zbytkové

pevnosti přes 88 %. Odlišné chování betonů s CEL I a CEL II by mohlo být způsobeno rozdílným tvarem průřezu jednotlivých vláken. Z důvodu absorpce a smrštění vláken je používání přírodních vláken pro zvýšení požární odolnosti betonu zásadní otázkou. I když přídavek celulóзовých vláken pro zvýšení požární odolnosti nebyl prokázán, vlákna z recyklované celulózy CEL II začleněná v betonu prokázala jejich funkci v betonu a betony s těmito vlákny vykazovaly srovnatelné mechanické vlastnosti jako betony s průmyslově vyráběnou celulózou CEL I. Recyklovaná celulózová vlákna by se mohla začít aplikovat do betonů stejně jako vlákna průmyslově vyráběná pro zvýšení jejich mechanických a trvanlivostních vlastností.

Na základě provedených poznatků teoretické i experimentální práce, je zřejmé, že je možnost využívat vlákna pro zvýšení užitných vlastností betonů i ze zdrojů, které nepochází z primární výroby. Zkoušená vlákna získaná z recyklovaných PET materiálů a celulózová vlákna z recyklovaného papíru, vykazují velmi dobrý potenciál pro možné využití v oblasti technologie betonu. Podobně se tento efekt projevil i při sledování odolnosti vláknobetonů při působení extrémně vysokých teplot, které představují riziko požáru. Toto je velmi důležitý argument, který souvisí s bezpečností. Na základě provedených poznatků z teoretické i experimentální části byly definovány vhodné dávky pro zvýšení mechanických vlastností a zároveň pro zvýšení požární odolnosti betonu. U PP I byla vyhodnocena nejvhodnější objemová dávka 0,108 %, které odpovídá hmotnostní dávka 1 kg/m³, jež je běžně používaným přídavkem. U recyklovaného PET vlákna byla vyhodnocena nejvhodnější dávka 0,072 %. U tohoto přídavku dochází u mechanických vlastností ke bodu zlomu a následné přídavky spíše mechanické vlastnosti snižují. Zároveň tato dávka vykazovala nejpříznivější vlastnosti i po vysokoteplotním zatížení. U průmyslově vyrobených celulózových vláken CEL I vlivem klesající tendence při zvyšující se dávce u požárního zatížení a na základě téměř konstantních mechanických vlastností při zvyšující se dávce by byla nejvhodnější objemová dávka 0,036 %. Vhodná dávka u vláken z recyklované celulózy CEL II byla vyhodnocena na 0,072 %.

7. Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] BRADÁČOVÁ, Isabela. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. Brno: ERA, 2007. Technická knihovna (ERA). ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010, 189 s. ISBN 978-80-01-04613-5
- [3] HABIB, A.O., I. AIAD, F.I. EL-HOSINY a A.M. ABD EL-AZIZ, 2018. Development of the fire resistance and mechanical characteristics of silica fume-blended cement pastes using some chemical admixtures. Construction and Building Materials [online]. 181, 163-174 [cit. 2021-11-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.051
- [4] AYDIN, Serdar, I. AIAD, F.I. EL-HOSINY a A.M. ABD EL-AZIZ, 2008. Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. Fire Safety Journal [online]. 43(8), 610-617 [cit. 2021-11-15]. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2008.02.001
- [5] YAZICI, Şemsi, Gözde İnan SEZER, Hakan ŞENGÜL a A.M. ABD EL-AZIZ, 2012. The effect of high temperature on the compressive strength of mortars. Construction and Building Materials [online]. 35(8), 97-100 [cit. 2021-11-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.082
- [6] Cement and Concrete Research [online], 2007. 37. [cit. 2021-11-15]. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888460700049X>
- [7] MORSY, M.S., A.F. GALAL, S.A. ABO-EL-ENEIN a A.M. ABD EL-AZIZ, 1998. Effect of temperature on phase composition and microstructure of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay. Cement and Concrete Research [online]. 28(8), 1157-1163 [cit. 2021-11-15]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(98)00083-0
- [8] BOQUERA, Laura, J. Ramon CASTRO, Anna Laura PISELLO, Claudia FABIANI, Antonella D'ALESSANDRO, Filippo UBERTINI a Luisa F. CABEZA, 2021. Thermal and mechanical performance of cement paste under high temperature thermal cycles. Solar Energy Materials and Solar Cells [online]. 231(8), 1157-1163 [cit. 2021-11-15]. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/j.solmat.2021.111333
- [9] LUBLÓY, Éva, J. Ramon CASTRO, Anna Laura PISELLO, Claudia FABIANI, Antonella D'ALESSANDRO, Filippo UBERTINI a Luisa F. CABEZA, 2018. Heat resistance of portland cements. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry [online]. 132(3), 1449-1457 [cit. 2021-11-15]. ISSN 1388-6150. Dostupné z: doi:10.1007/s10973-018-7132-z
- [10] SOLLERO, M.B.S., A.L. MORENO JUNIOR a C.N. COSTA, 2021. Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates. Construction and Building Materials [online]. 287 [cit. 2021-11-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122843
- [11] MALIK, Manisha, S.K. BHATTACHARYYA a Sudhirkumar V. BARAI, 2021. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. Construction and Building Materials [online]. 270 [cit. 2021-11-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
- [12] ROBERT, F., H. COLINA a Sudhirkumar V. BARAI, 2009. The influence of aggregates on the mechanical characteristics of concrete exposed to fire: A review. Magazine of Concrete Research [online]. 61(5), 311-321 [cit. 2021-11-18]. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.2007.00121

- [13] XING, Zhi, Anne-Lise BEAUCOUR, Ronan HEBERT, Albert NOUMOWE a Béatrice LEDESERT, 2015. Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 95(5), 18-28 [cit. 2021-11-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.060
- [14] SAVVA, A., P. MANITA a K.K. SIDERIS, 2005. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites* [online]. 27(2), 239-248 [cit. 2021-11-18]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013
- [15] ZHOU, Meng, Jiaji WANG, Jianguo NIE a Qingrui YUE, 2021. Experimental study and model of steel plate concrete composite members under tension. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 185(2), 239-248 [cit. 2021-11-18]. ISSN 0143974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2021.106818
- [16] CHEN, Lijie, Ray Kai Leung SU, Jianguo NIE a Qingrui YUE, 2021. Influence of rebar geometry on the steel-concrete interface of reinforced concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 304(2), 239-248 [cit. 2021-11-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124668
- [17] TRETJAKOV, Alexey, Illia TKALENKO, František WALD a Qingrui YUE, 2021. Fire response model of the steel fibre reinforced concrete filled tubular column. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 186(2), 239-248 [cit. 2021-11-18]. ISSN 0143974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2021.106884
- [18] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ, 2010. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [19] TAYEBI, Morteza a Mahdi NEMATZADEH, 2021. Post-fire flexural performance and microstructure of steel fiber-reinforced concrete with recycled nylon granules and zeolite substitution. *Structures* [online]. 33, 2301-2316 [cit. 2021-11-19]. ISSN 23520124. Dostupné z: doi:10.1016/j.istruc.2021.05.080
- [20] ABDELMELEK, Nabil, Naser S. ALIMRANI, Nikolaos KRELIAS a Eva LUBLOY, 2021. Effect of Elevated Temperatures on Microstructure of High Strength Concrete Based-Metakaolin. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* [online]. 33, 2301-2316 [cit. 2021-11-19]. ISSN 10183639. Dostupné z: doi:10.1016/j.jksues.2021.08.001
- [21] ZHU, Pinghua, Samuel BRUNNER, Shanyu ZHAO, et al., 2019. Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. *Cement and Concrete Composites* [online]. 104, 2301-2316 [cit. 2021-11-19]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103414
- [22] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications*, Košice, červen 2008. ISBN 978-80-553-0040-5
- [23] *Reakce-stavebnich-vyrobku-na-ohen-1-dil-tridy-horlavosti*, 2020. Izolace-info [online]. Copyright [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/technicke-informace/tridy-reakce-na-ohen-u-stavebnich-materialu/22677-reakce-stavebnich-vyrobku-na-ohen-1-dil-tridy-horlavosti-a.html#.YZ0SrWDMKUK>
- [24] MA, Qianmin, Rongxin GUO, Zhiman ZHAO, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 2015. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials* [online]. 93, 371-383 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131

- [25] CHAN, Y.N., G.F. PENG, M. ANSON, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 1999. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites* [online]. 21(1), 23-27 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(98)00034-1
- [26] ZAWADOWSKA, Aleksandra, Luisa GIULIANI, Kristian Dahl HERTZ, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 2021. Experimental study on the mechanical properties of fire exposed concrete. *Safety Science* [online]. 142(1), 23-27 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09257535. Dostupné z: doi:10.1016/j.ssci.2021.105357
- [27] SHUMUYE, Eskinder Desta, Jun ZHAO, Zike WANG, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 2019. Effect of fire exposure on physico-mechanical and microstructural properties of concrete containing high volume slag cement. *Construction and Building Materials* [online]. 213(1), 447-458 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.079
- [28] AKCA, Abdullah Huzeyfe, Nilüfer ÖZYURT, Zike WANG, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 2020. Post-fire mechanical behavior and recovery of structural reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials* [online]. 253(1), 447-458 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119188
- [29] LI, Min, ChunXiang QIAN, Wei SUN, Zhiwei LIN a Kecheng HE, 2004. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research* [online]. 34(6), 1001-1005 [cit. 2021-11-23]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.007
- [30] *Cement and Concrete Research* [online], 2000. 30. [cit. 2021-11-23]. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699002641>
- [31] SHUMUYE, Eskinder Desta, Jun ZHAO a Zike WANG, 2019. Effect of fire exposure on physico-mechanical and microstructural properties of concrete containing high volume slag cement. *Construction and Building Materials* [online]. 213(3), 447-458 [cit. 2021-11-23]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.079
- [32] HAGER, Izabela, Tomasz TRACZ, Jacek ŚLIWIŃSKI a Katarzyna KRZEMIENI, 2016. The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. *Fire and Materials* [online]. 40(5), 668-682 [cit. 2021-11-24]. ISSN 03080501. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2318
- [33] ZHAI, Yue, Zichen DENG, Nan LI a Rui XU, 2014. Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model. *Construction and Building Materials* [online]. 68, 777-782 [cit. 2021-11-24]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.052
- [34] XIAO, Jianzhuang, Gert KÖNIG, Nan LI a Rui XU, 2004. Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire Safety Journal* [online]. 39(1), 89-103 [cit. 2021-11-24]. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-7112(03)00093-6
- [35] TANYILDIZI, Harun, Ahmet COSKUN, Nan LI a Rui XU, 2008. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials* [online]. 22(11), 2269-2275 [cit. 2021-11-24]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.033

- [36] XING, Zhi, Anne-Lise BEAUCOUR, Ronan HEBERT, Albert NOUMOWE a Béatrice LEDESERT, 2011. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. *Cement and Concrete Research* [online]. 41(4), 392-402 [cit. 2021-11-24]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.01.005
- [37] VIEIRA, J.P.B., J.R. CORREIA a J. DE BRITO, 2011. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research* [online]. 41(5), 533-541 [cit. 2021-11-24]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.02.002
- [38] ROUFAEL, Georges, Anne-Lise BEAUCOUR, Javad ESLAMI, Dashnor HOXHA a Albert NOUMOWÉ, 2021. Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 268 [cit. 2021-11-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121221
- [39] BEATRIZ DA SILVA, Jéssica, Marco PEPE, Romildo Dias TOLEDO FILHO, Dashnor HOXHA a Albert NOUMOWÉ, 2020. High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. *Fire Safety Journal* [online]. 117 [cit. 2021-11-25]. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2020.103222
- [40] ROY, Sushanta, Taito MIURA, Hikaru NAKAMURA, Yoshihito YAMAMOTO a Albert NOUMOWÉ, 2020. High temperature influence on concrete produced by spherical shaped EAF slag fine aggregate – Physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials* [online]. 231 [cit. 2021-11-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117153
- [41] MOLAY, Tchappa Gnamsi Guy, Mambou Nguoyep Luc LEROY, Tchoffo FIDELE, Hamidou Gilbert FRANCK a Ndjaka Jean-Marie BIENVENU, 2019. Mechanical and physical performances of concretes made from crushed sands of different geological nature subjected to high temperatures. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 22(4), 1116-1124 [cit. 2021-11-25]. ISSN 22150986. Dostupné z: doi:10.1016/j.jestch.2019.02.007
- [42] NEDELJKOVIĆ, Marija, Jeanette VISSER, Timo G. NIJLAND, Siska VALCKE a Erik SCHLANGEN, 2021. Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study. *Construction and Building Materials* [online]. 270 [cit. 2021-11-30]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121475
- [43] TSOLAKIS, Efstratios, Christos KALLIGEROS, Panteleimon TZOUGANAKIS, Dimitrios KOULOCHERIS a Vasilios SPITAS, 2021. A novel experimental setup for the determination of the thermal expansion coefficient of concrete at cryogenic temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 309 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125134
- [44] LI, Liang, Vinh DAO, Pietro LURA, Dimitrios KOULOCHERIS a Vasilios SPITAS, 2021. Autogenous deformation and coefficient of thermal expansion of early-age concrete: Initial outcomes of a study using a newly-developed Temperature Stress Testing Machine. *Cement and Concrete Composites* [online]. 119 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.103997
- [45] NILSEN, Vanessa, Le T. PHAM, Michael HIBBARD, Adam KLAGER, Steven M. CRAMER a Dane MORGAN, 2019. Prediction of concrete coefficient of thermal expansion and other properties using machine learning. *Construction and Building Materials* [online]. 220, 587-595 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.006

- [46] POMIANOWSKI, Michal, Per HEISELBERG, Rasmus Lund JENSEN, Rui CHENG, Yinping ZHANG a Dane MORGAN, 2014. A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. *Cement and Concrete Research* [online]. 55, 22-34 [cit. 2021-12-01]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2013.09.012
- [47] MA, Jinghui, Yizhen YANG, Xu ZHENG, Bobin DAI, Dong ZHU a Qi LIU, 2021. Impact on heat storage performance of concrete radiant floor with finned water supply pipes. *Journal of Building Engineering* [online]. 44 [cit. 2021-12-01]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2021.103351
- [48] SALEH, Alaa N., Alyaa A. ATTAR, Omer K. AHMED, Sameer S. MUSTAFA, Dong ZHU a Qi LIU, 2021. Improving the thermal insulation and mechanical properties of concrete using Nano-SiO₂. *Results in Engineering* [online]. 12 [cit. 2021-12-01]. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2021.100303
- [49] COLLEPARDI, Mario, 2009. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT. *Betonové stavitelství*. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [50] KODUR, Venkatesh. *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. *ISRN Civil Engineering* [online]. 2014, 2014, 1-15 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1155/2014/468510. ISSN 2090-5114. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2014/468510/>
- [51] BRADÁČOVÁ, Isabela. *Požární bezpečnost domu. 2., aktualiz. vyd.* Brno: ERA, 2008. *Stavíme*. ISBN 978-80-7366-128-1.
- [52] KUPILÍK, Václav. *Konstrukce pozemních staveb: požární bezpečnost staveb. 2., aktualiz. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2009. *Stavíme*. ISBN 978-80-01-04291-5.
- [53] KOLAWOLE, John Temitope, Riaan COMBRINCK a William Peter BOSHOFF, 2021. Plastic cracking behaviour of concrete and its interdependence on rheo-physical properties. *Composites Part B: Engineering* [online]. [cit. 2021-12-02]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2021.109527
- [54] MAIER, Marcus, Matthias ZEIML, Roman LACKNER a J.Y. RICHARD LIEW, 2020. On the effect of pore-space properties and water saturation on explosive spalling of fire-loaded concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 231 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117150
- [55] MIAH, Md Jihad, Hatem KALLEL, Hélène CARRÉ, Pierre PIMIENTA a Christian LA BORDERIE, 2019. The effect of compressive loading on the residual gas permeability of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 217, 12-19 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.057
- [56] LI, Ye, Hatem KALLEL, Hélène CARRÉ, Pierre PIMIENTA a Christian LA BORDERIE, 2021. Effect of post-fire curing and silica fume on permeability of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 290, 12-19 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123175
- [57] LU, Hao a Yao YAO, 2022. Spalling mechanism of carbon nanotube concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 314 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125594
- [58] QIN, Hao, Jiacheng YANG, Kai YAN, Jeung-Hwan DOH, Kun WANG a Xin ZHANG, 2021. Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions. *Construction and Building Materials* [online]. 303 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124464

- [59] DU, Yong, Hong-Hui QI, Shan-Shan HUANG a J.Y. RICHARD LIEW, 2020. Experimental study on the spalling behaviour of ultra-high strength concrete in fire. *Construction and Building Materials* [online]. 258 [cit. 2021-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120334
- [60] MAIER, M., A. SAXER, K. BERGMEISTER a R. LACKNER, 2020. An experimental fire-spalling assessment procedure for concrete mixtures. *Construction and Building Materials* [online]. 232 [cit. 2021-12-02]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117172
- [61] BENSALÉM, Hadjira, Samira DJAKNOUN, Evariste OUEDRAOGO a Ramdane AMROUCHE, 2021. Analysis of thermal-induced spalling tests on high to ultra-high performance concrete subjected to standard fire. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 15 [cit. 2021-12-02]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2021.e00704
- [62] REN, Pengfei, Xiaomeng HOU, V.K.R. KODUR, Chao GE, Yading ZHAO a Wei ZHOU, 2021. Modeling the fire response of reactive powder concrete beams with due consideration to explosive spalling. *Construction and Building Materials* [online]. 301 [cit. 2021-12-02]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124094
- [63] YANG, Juan, Gai-Fei PENG, Jie ZHAO a Guo-Shuang SHUI, 2019. On the explosive spalling behavior of ultra-high performance concrete with and without coarse aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 226, 932-944 [cit. 2021-12-02]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.299
- [64] LI, Ye, En-Hua YANG, Ao ZHOU a Tiejun LIU, 2021. Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 284 [cit. 2021-12-03]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122818
- [65] JANSSON, R., P. PIMIENTA a F. MEFTAH, 2013. Fire spalling of concrete – A historical overview. *MATEC Web of Conferences* [online]. 6 [cit. 2021-12-03]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20130601001
- [66] OZAWA, Mitsuo, Shinya UCHIDA, Toshiro KAMADA, Hiroaki MORIMOTO a Zhishun GE, 2012. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission: Numerical and experimental studies. *Construction and Building Materials* [online]. 37, 621-628 [cit. 2021-12-03]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070
- [67] PAN, Zhu, Jay G. SANJAYAN a Daniel L.Y. KONG, 2012. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 36, 365-372 [cit. 2021-12-06]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.120
- [68] YAZICI, Şemsi, Gözde İNAN a Volkan TABAK, 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials* [online]. 21(6), 1250-1253 [cit. 2021-12-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025
- [69] GARCÍA-TAENGUA, E., S. ARANGO, J.R. MARTÍ-VARGAS a P. SERNA, 2014. Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. *Construction and Building Materials* [online]. 65(6), 321-329 [cit. 2021-12-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.139

- [70] BLAZY, Julia, Rafał BLAZY, J.R. MARTÍ-VARGAS a P. SERNA, 2021. Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 14(6), 321-329 [cit. 2021-12-07]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2021.e00549
- [71] KOLÍSKO, Jiří, 2008. Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů: Influence of short randomly distributed polypropylene micro and macro fibres on properties of cement mortars and concrete. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [72] BANTHIA, Nemkumar a Rishi GUPTA, 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 36(7), 1263-1267 [cit. 2021-12-07]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2006.01.010
- [73] ZHANG, Dong, Yuchen LIU a Kang Hai TAN, 2021. Spalling resistance and mechanical properties of strain-hardening ultra-high performance concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 266(7), 1263-1267 [cit. 2021-12-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120961
- [74] MALUK, Cristian, Luke BISBY a Giovanni P. TERRASI, 2017. Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Engineering Structures* [online]. 141, 584-595 [cit. 2021-12-07]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.058
- [75] QIN, Hao, Jiacheng YANG, Kai YAN, Jeung-Hwan DOH, Kun WANG a Xin ZHANG, 2021. Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions. *Construction and Building Materials* [online]. 303, 584-595 [cit. 2021-12-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124464
- [76] PLAGUÉ, T., C. DESMETTRE a J.-P. CHARRON, 2017. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. *Cement and Concrete Research* [online]. 94, 59-70 [cit. 2021-12-13]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2017.01.004
- [77] HEO, Young-Sun, Jay G. SANJAYAN, Cheon-Goo HAN a Min-Cheol HAN, 2012. Relationship between inter-aggregate spacing and the optimum fiber length for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research* [online]. 42(3), 549-557 [cit. 2021-12-13]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.12.002
- [78] BILODEAU, A, V.K.R KODUR, G.C HOFF a Min-Cheol HAN, 2004. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites* [online]. 26(2), 163-174 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(03)00085-4
- [79] KALIFA, Pierre, Grégoire CHÉNÉ, Christophe GALLÉ a Min-Cheol HAN, 2001. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research* [online]. 31(10), 1487-1499 [cit. 2021-12-13]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(01)00596-8
- [80] AGRA, Ronney R., Ramoel SERAFINI, Antonio D. DE FIGUEIREDO a Min-Cheol HAN, 2021. Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete reinforced with different fiber contents. *Construction and Building Materials* [online]. 301(10), 1487-1499 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124242

- [81] LI, Xiuling, Yi BAO, Lele WU, Qingxi YAN, Hongyan MA, Genda CHEN a Huining ZHANG, 2017. Thermal and mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 157(10), 829-838 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.125
- [82] KHALIQ, Wasim, Venkatesh KODUR, Lele WU, Qingxi YAN, Hongyan MA, Genda CHEN a Huining ZHANG, 2011. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* [online]. 41(11), 1112-1122 [cit. 2021-12-13]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.06.012
- [83] MISSEMER, L., E. OUEDRAOGO, Y. MALECOT, C. CLERGUE, D. ROGAT, Genda CHEN a Huining ZHANG, 2019. Fire spalling of ultra-high performance concrete: From a global analysis to microstructure investigations. *Cement and Concrete Research* [online]. 115(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.10.005
- [84] XU, Haiyan, Zhijie WANG, Zimeng SHAO, et al., 2021. Experimental study on durability of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 306(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124867
- [85] XU, Haiyan, Zimeng SHAO, Zhijie WANG, et al., 2020. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 261(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120610
- [86] SINGH, Harshbab, Rishi GUPTA, Zhijie WANG, et al., 2020. Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 12(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2019.e00324
- [87] MA, Weili, Yuan QIN, Yanlong LI, et al., 2020. Mechanical properties and engineering application of cellulose fiber-reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Materials Today Communications* [online]. 22(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 23524928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2019.100818
- [88] ZHANG, Dong, Kang Hai TAN, Aravind DASARI, et al., 2020. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Cement and Concrete Composites* [online]. 109(11), 207-219 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103512
- [89] ONUAGULUCHI, Obinna, Nemkumar BANTHIA, Aravind DASARI, et al., 2016. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites* [online]. 68(11), 96-108 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014
- [90] ARDANUY, Mònica, Josep CLARAMUNT, Romildo Dias TOLEDO FILHO, et al., 2015. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials* [online]. 79(11), 115-128 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035

- [91] NETINGER GRUBEŠA, Ivanka, Berislav MARKOVIĆ, Anita GOJEVIĆ, et al., 2018. Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete: A review of recent research. *Construction and Building Materials* [online]. 184(11), 473-484 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.014
- [92] ALUKO, Oluwatobi Gbenga, Jamaludin Mohamad YATIM, Mariyana Aida Ab. KADIR, et al., 2020. A review of properties of bio-fibrous concrete exposed to elevated temperatures: A review of recent research. *Construction and Building Materials* [online]. 260(11), 473-484 [cit. 2021-12-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119671
- [93] FOTI, Dora, 2019. Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete. *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete* [online]. Elsevier, 2019, 387-410 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102676-2.00018-9
- [94] FOTI, Dora, 2013. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures* [online]. Elsevier, 2019, 96, 396-404 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2012.09.019
- [95] ISLAM, Md. Jahidul, Md. Salamah MEHERIER a A.K.M. Rakinul ISLAM, 2016. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 125, 946-951 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128
- [96] SIDDIQUE, Rafat, Jamal KHATIB a Inderpreet KAUR, 2008. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management* [online]. Elsevier, 2019, 28(10), 1835-1852 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011
- [97] THOMAS, Lisa Mary, Syed Aadil MOOSVI a Inderpreet KAUR, 2020. Hardened properties of binary cement concrete with recycled PET bottle fiber: An experimental study. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2019, 32(10), 632-637 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.03.025
- [98] HASAN-GHASEMI, Ali, Mahdi NEMATZADEH a Inderpreet KAUR, 2021. Tensile and compressive behavior of self-compacting concrete incorporating PET as fine aggregate substitution after thermal exposure: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 289(10), 632-637 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123067
- [99] NEMATZADEH, Mahdi, Amir Ali SHAHMANSOURI a Maziar FAKOOR, 2020. Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 252(10), 632-637 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119057
- [100] FAKOOR, Maziar, Mahdi NEMATZADEH a Maziar FAKOOR, 2021. Evaluation of post-fire pull-out behavior of steel rebars in high-strength concrete containing waste PET and steel fibers: Experimental and theoretical study. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 299(10), 632-637 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123917

- [101] ALFAHDAWI, Ibrahim H., S.A. OSMAN, R. HAMID a Abdulkader Ismail AL-HADITHI, 2019. Influence of PET wastes on the environment and high strength concrete properties exposed to high temperatures: Experimental and theoretical study. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 225(10), 358-370 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.214
- [102] CHEN, Meng, Zhihao SUN, Wenlin TU, Xin YAN a Mingzhong ZHANG, 2021. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete at elevated temperatures: Experimental and theoretical study. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2019, 124(10), 358-370 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104257
- [103] MOUSAVIMEHR, Mehdi, Mahdi NEMATZADEH, Wenlin TU, Xin YAN a Mingzhong ZHANG, 2020. Post-heating flexural behavior and durability of hybrid PET–Rubber aggregate concrete: Experimental and theoretical study. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 265(10), 358-370 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120359
- [104] TAYEH, Bassam A., Ibrahim ALMESHAL, Hassan M. MAGBOOL, Hisham ALABDULJABBAR a Rayed ALYOUSEF, 2021. Performance of sustainable concrete containing different types of recycled plastic: Experimental and theoretical study. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2019, 328(10), 358-370 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.129517
- [105] CORREIA, J.R., J.S. LIMA, J. DE BRITO, Hisham ALABDULJABBAR a Rayed ALYOUSEF, 2014. Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates: Experimental and theoretical study. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2019, 53(10), 187-199 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004
- [106] TONET, Karina Guerra, Jane Proszek GORNINSKI, J. DE BRITO, Hisham ALABDULJABBAR a Rayed ALYOUSEF, 2013. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 40(10), 378-389 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.049
- [107] FRATERNALI, Fernando, Vincenzo CIANCIA, Rosaria CHECHILE, Gianvittorio RIZZANO, Luciano FEO a Loredana INCARNATO, 2011. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Composite Structures* [online]. Elsevier, 2019, 93(9), 2368-2374 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2011.03.025
- [108] OCHI, T., S. OKUBO, K. FUKUI, Gianvittorio RIZZANO, Luciano FEO a Loredana INCARNATO, 2007. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2019, 29(6), 448-455 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002

- [109] ALBANO, C., N. CAMACHO, M. HERNÁNDEZ, A. MATHEUS, A. GUTIÉRREZ a Loredana INCARNATO, 2009. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Waste Management [online]. Elsevier, 2019, 29(10), 2707-2716 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2009.05.007
- [110] ALQAHTANI, Fahad K., Idrees ZAFAR, M. HERNÁNDEZ, A. MATHEUS, A. GUTIÉRREZ a Loredana INCARNATO, 2021. Plastic-based sustainable synthetic aggregate in Green Lightweight concrete – A review: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Construction and Building Materials [online]. Elsevier, 2019, 292(10), 2707-2716 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123321
- [111] KIM, Sung Bae, Na Hyun YI, Hyun Young KIM, Jang-Ho Jay KIM, Young-Chul SONG a Loredana INCARNATO. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Cement and Concrete Composites [online]. Elsevier, 2010, 2019, 32(3), 232-240 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002
- [112] AL-HADITHI, Abdulkader Ismail, Nahla Naji HILAL, Hyun Young KIM, Jang-Ho Jay KIM, Young-Chul SONG a Loredana INCARNATO. The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Journal of Building Engineering [online]. Elsevier, 2016, 2019, 8(3), 232-240 [cit. 2021-12-14]. ISBN 9780081026762. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2016.06.011
- [113] CHUNG, Deborah D. L., 2010. Composite Materials: Science and Applications. 2. vyd. London: Springer. Engineering Materials and Processes. ISBN 978-1-84882-830-8.
- [114] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. Polymerní kompozitní materiály: Science and Applications. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. Engineering Materials and Processes. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [115] Heidelbergcement [online], 2020. Mokrá: © Českomoravský cement [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs>
- [116] Zepiko [online], 2021. © ZEPIKO spol. s r.o. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.zepiko.cz>
- [117] Betonservis [online], 2021. Praha: © betonservis [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.betonservis.cz/>
- [118] Chryso [online], 2021. Praha: © CHRYSO [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.chryso.cz/>
- [119] Ciur [online], 2021. Brandýs nad Labem: © Ciur [cit. 2021-12-19]. Dostupné z <https://www.ciur.cz/>
- [120] ČSN P 73 2451 ZMĚNA Z1, 2017. Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [121] ČSN EN 12350-2, 2020. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [122] ČSN EN 12350-5, 2020. Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlítím. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

- [123] ČSN EN 12350-6, 2020. Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [124] ČSN EN 12350-7, 2020. Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [125] ČSN P 73 2452, 2015. Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [126] ČSN EN 12390-7 OPRAVA 1, 2021. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [127] ČSN EN 12390-3, 2020. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [128] ČSN EN 12390-5, 2020. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [129] ČSN EN 12390-6, 2010. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [130] ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [131] Admas [online], 2021. Brno: cameb [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://admas.eu/>
- [132] ČSN EN 933- 4, 2008. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT.
- [133] ČSN EN 933- 1, 2012. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [134] ČSN EN 1097-6, 2014. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

8. Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti známých hornin [11] | 20 |
| Tabulka 2: Přehled změn ve struktuře betonu při zvyšování teploty [22]..... | 22 |
| Tabulka 3: Vybrané charakteristiky různých typů vláken [71]..... | 48 |
| Tabulka 4: Klasifikace sednutí betonu [121] | 51 |
| Tabulka 5: Klasifikace rozlití betonu [122] | 52 |
| Tabulka 6: Poměr složek u použitých cementů podle ČSN EN 197-1 [115] | 56 |
| Tabulka 7: Zrnitost kameniv | 56 |
| Tabulka 8: Vybrané stanovené vlastnosti použitých kameniv | 58 |
| Tabulka 9: Vybrané vlastnosti Chryso Fibrin 23 D [118] | 58 |
| Tabulka 10: vybrané vlastnosti Chryso Fibre S50 [118]..... | 59 |
| Tabulka 11: Vlastnosti celulóзовého vlákna Chryso Fibre UF-500 [118]..... | 60 |
| Tabulka 12: Vlastnosti recyklované celulózy F 3000 [87]..... | 61 |
| Tabulka 13: Vlastnosti recyklovaného PET vlákna (Namflex) [119] | 62 |
| Tabulka 14: Naměřené a vypočtené hodnoty měření vláken | 62 |
| Tabulka 15: Návrh složení betonů | 64 |
| Tabulka 16: Hodnoty objemové hmotnosti a obsahu vzduchu čerstvého betonu s CEM I | 66 |
| Tabulka 17: Hodnoty objemové hmotnosti a obsahu vzduchu čerstvého betonu s CEM II..... | 67 |
| Tabulka 18: Hodnoty objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM I | 68 |
| Tabulka 19: Hodnoty objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM II | 69 |
| Tabulka 20: Hodnoty pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I | 70 |
| Tabulka 21: Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM I..... | 72 |
| Tabulka 22: Hodnoty pevnosti v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM I | 74 |
| Tabulka 23: Průměrné hodnoty odpadů vztažené na 1 m ² betonů s CEM I | 76 |
| Tabulka 24: Hodnoty ztráty hmotnosti jednotlivých betonů s CEM I..... | 77 |
| Tabulka 25: Vyhodnocení zbytkové pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I..... | 79 |
| Tabulka 26: Vyhodnocení zbytkových pevností v tlaku jednotlivých betonů s CEM II .. | 81 |

9. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Teplotní křivky [18]..... | 15 |
| Obrázek 2: Synergický účinek [113] | 16 |
| Obrázek 3: Rozdíl v průběhu napětí různých typů cementových kompozitů [64] | 17 |
| Obrázek 4: Vývoj intenzity rozkladu základních minerálů cementového tmelu [22]..... | 18 |
| Obrázek 5: Chování kameniva při vysokých teplotách [10]..... | 19 |
| Obrázek 6: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku při zvyšování teploty [49] | 20 |
| Obrázek 7: Povrchová struktura betonu vystavená vysokým teplotám [21] | 23 |
| Obrázek 8: Vliv druhu zkoušení na pevnost v tlaku při zvyšování teploty [49]..... | 24 |
| Obrázek 9: Srovnání zbytkových pevností v tlaku betonu při narůstající teplotě různých studií [11] | 25 |
| Obrázek 10: Znázornění pevnosti v tahu betonu při zvyšování teploty [32] | 25 |
| Obrázek 11: Znázornění modulu pružnosti při zvýšení teplot pro beton s různými kamenivy (B – čedič, D – dolomit, G – granit, O – křemen) [32] | 26 |
| Obrázek 12: Tepelná vodivost různých betonů v závislosti na teplotě a obsahu vlhkosti [11]..... | 28 |
| Obrázek 13: Teplotní roztažnost betonů s různými kamenivy v závislosti na teplotě [11] | 29 |
| Obrázek 14: Měrné teplo betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony, III – mokré betony) [46]..... | 30 |
| Obrázek 15: Závislost mezi modulem pružnosti a propustnosti s rostoucí teplotou [53] | 31 |
| Obrázek 16: Vliv obsahu vlhkosti na odprýskávání betonu [63] | 32 |
| Obrázek 17: Plošné odlupování po teplotním namáhání [65]..... | 33 |
| Obrázek 18: Štěpení a odprýskávání části kameniva [36] | 33 |
| Obrázek 19: Mechanismy explozivního odprýskávání: nalevo – teplotní dilatace, napravo – tlak vodní páry [66] | 34 |
| Obrázek 20: Vliv velikosti kameniva na odlupování betonu [67] | 36 |
| Obrázek 21: Schématické znázornění vlivu vláken na omezení vzniku a rozvoje trhlin [71]..... | 37 |
| Obrázek 22: Polypropylenové vlákno a) před mícháním, b) po smíchání [70]..... | 38 |
| Obrázek 23: Polypropylenová vlákna a) mikrovlákna, b) makrovlákna [70] | 39 |
| Obrázek 24: Polypropylenová vlákna a) monofilamentní, b) fibrilovaná [74] | 39 |
| Obrázek 25: Mikrotrhliny (nespojité rezervoáry) vzniklé expanzí PP vláken [64]..... | 40 |
| Obrázek 26: Mikrotrhliny vzniklé roztažností PP vláken a kameniva, kanálky v betonu vzniklé táním PP vláken [64] | 41 |
| Obrázek 27: Ocelová vlákna: různé typy a průřezy [16]..... | 42 |
| Obrázek 28: Podélné a příčné trhliny v matrici s ocelovými vlákny zatížené vysokou teplotou [69] | 42 |
| Obrázek 29: a) PP vlákno, b) Konopné vlákno bez ošetření, c) Konopné vlákno sterilizované, e) Konopné vlákno po 5% NaOH, f) Konopné vlákno po 2,5% NaOH + 2% Na ₂ SO ₃ , g) Konopné vlákno po 5% NaOH + 2% Na ₂ SO ₃ . [91] | 43 |
| Obrázek 30: Celulózová vlákna v různých formách: a) prameny, b) stříž, c) buničina [90]..... | 44 |
| Obrázek 31: Podélný a příčný řez sisalového vlákna [89]..... | 45 |
| Obrázek 32: Jutové vlákno v betonu a) při pokojové teplotě, b) při teplotě 200 °C [88] | 46 |
| Obrázek 33: PET vlákna: nalevo–řezané, vyražené, nalevo–extrudované, rovné [111] | 47 |
| Obrázek 34: Rozpad PET vlákna při narůstající teplotě [102]..... | 48 |
| Obrázek 35: Požární pec [131]..... | 54 |
| Obrázek 36: Polypropylenová vlákna Chryso Fibrin 23 D | 59 |
| Obrázek 37: Polypropylenová vlákna Chryso Fibre S50 | 59 |
| Obrázek 38: Celulózová vlákna Chryso Fibre UF–500 [118] | 60 |
| Obrázek 39: Vlákna z recyklované celulózy F3000..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 40: Vlákna z recyklovaného PET (Namflex) | 61 |
| Obrázek 41: Snímky vláken z optického mikroskopu PET(a), PP I (b), PP II (c), CEL I (d), CEL II (e) | 63 |
| Obrázek 42: Pohled na zkoušení zbytkové pevnosti v tlaku | 80 |
| Obrázek 43: Referenční betony s CEM I před a po vysokoteplotním zatížení..... | 81 |
| Obrázek 44: Betony s CEM I s přídavkem PET (nalevo) a PP (napravo) vláken s rostoucí dávkou před a po vysokoteplotním zatěžování..... | 82 |
| Obrázek 45: Betony s CEM I s přídavkem CEL I (nalevo) a CEL II (napravo) vláken s rostoucí dávkou před a po vysokoteplotním zatěžování..... | 83 |
| Obrázek 46: Část betonů (CEM II) s přídavkem vláken před a po vysokoteplotním zatěžování..... | 83 |
| Obrázek 47: Referenční vzorek betonu před a po vysokoteplotním zatěžování..... | 84 |
| Obrázek 48: Beton s PET vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování | 85 |
| Obrázek 49: Beton s CEL I vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování | 85 |
| Obrázek 50: Beton s CEL II vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování | 86 |
| Obrázek 51: Beton s PP I vlákny před a po vysokoteplotním zatěžování..... | 86 |
| Obrázek 52: Forma panelu s výztuží a připevněný termočlánek..... | 87 |
| Obrázek 53: Zkušební panely během teplotního zatěžování – pocení | 88 |
| Obrázek 54: Zkušební panel REF před a po vysokoteplotním zatížení..... | 88 |
| Obrázek 55: Měření hloubky odprýsknutí na panelu REF | 89 |
| Obrázek 56: Zkušební panel PET před a po vysokoteplotním zatížení (vlevo), zkušební panel PP I před a po vysokoteplotním zatížení (vpravo) | 89 |
| Obrázek 57: Zkušební panel CEL II před a po vysokoteplotní zatížení | 90 |

10. Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1: Požární křivka teplotního zatěžování | 55 |
| Graf 2: Křivka zrnitosti DTK 0–4 mm Žabčice | 57 |
| Graf 3: Křivka zrnitosti HTK 4–8 mm Žabčice | 57 |
| Graf 4: Křivka zrnitosti HDK 8–16 mm Olbramovice | 57 |
| Graf 5: Závislost objemové hmotnosti ČB a obsah vzduchu v ČB na druhu betonu s CEM I | 66 |
| Graf 6: Závislost objemové hmotnosti ČB a obsah vzduchu v ČB na druhu betonu s CEM II | 67 |
| Graf 7: Porovnání objemových hmotností ČB a ZB jednotlivých betonů s CEM I..... | 68 |
| Graf 8: Porovnání objemových hmotností jednotlivých betonů s CEM II..... | 69 |
| Graf 9: Porovnání pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM I..... | 71 |
| Graf 10: Porovnání pevnosti v tlaku jednotlivých betonů s CEM II..... | 71 |
| Graf 11: Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM I..... | 73 |
| Graf 12: Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých betonů s CEM II | 73 |
| Graf 13: Hodnoty pevností v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM I..... | 74 |
| Graf 14: Hodnoty pevností v příčném tahu jednotlivých betonů s CEM II..... | 75 |
| Graf 15: Průměrné hodnoty odpadů betonů s CEM I u stanovených cyklů | 76 |
| Graf 16: Hodnoty ztráty hmotností jednotlivých betonů s CEM I | 78 |
| Graf 17: Hodnoty ztrátových hmotností jednotlivých betonů s CEM II..... | 78 |
| Graf 18: Zbytková pevnost v tlaku jednotlivých betonů s CEM I..... | 80 |