

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Luboš Eminger

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Optimalizace návrhu složení ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC)
pro místní betonárny
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Luboš Eminger**
Osobní číslo: **D18231**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Optimalizace návrhu složení ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC) pro místní betonámy**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Požaduje se zpracovat rešerše stávající míry poznání v tématice ultra-vysokohodnotného betonu. Cílem práce je optimalizovat dávky vstupních surovin z místních zdrojů pro návrh UHPC. Experimentální část práce bude prováděna v laboratoři CEMEX Czech Republic, s.r.o. Doporučuje se provést záznam vývinu hydratačního tepla.

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

Návrh složení ultra-vysokohodnotného betonu

2) Experimentální část

Výroba čerstvého betonu

Provedení zkoušek čerstvého betonu (stanovení konzistence, objemová hmotnost)

Výroba zkušebních těles

Provedení zkoušek ztvrdlého betonu (pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, objemová hmotnost, stanovení statického modulu pružnosti v tlaku)

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

TP 226, 2010: Vysokohodnotné betony pro mosty PK. In: Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy ČR: Odbor silniční infrastruktury.

AITCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9

Beton: Technologie, konstrukce, sanace: Materiály a technologie (Vysokohodnotné betony). Praha: Beton TKS, s.r.o., 2011, jedenáctý, 6/2011. ISSN 1213311612.

COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

HUĐOBA, Igor, 2008. Vysokohodnotný betón: Materiály, vlastnosti, výroba, využitie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU. ISBN 978-80-227-2836-2.

MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.

PYTÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **26. října 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2022**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. října 2020

Prohlašuji:

Práci s názvem Optimalizace návrhu složení ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC) pro místní betonárny jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice. Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 17.05.2022

Luboš Eminger

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval zejména Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, vstřícnost při konzultacích a za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat firmě CEMEX Czech Republic s. r. o. za možnost podílet se na vývoji produktu, jmenovitě technickému vedoucímu laboratoře panu Michalu Konířovi. V neposlední řadě bych rád také poděkoval své rodině a blízkým za podporu po celou dobu studia.

Bakalářská práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědecko-výzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2021_010.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá ultra-vysokohodnotným betonem a technologickými požadavky pro tento materiál. Experimentální část je věnována optimalizací receptury UHPC ze surovin z místních zdrojů. Z navržených receptur se na základě zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu vybere, která splní definované požadavky. Experimentální část zahrnuje návrh, výrobu a zkoušení těles. Dále návrhem vlastní receptury a její porovnání s ostatními recepturami. Práce se taktéž zabývá zhodnocením finanční náročnosti UHPC.

KLÍČOVÁ SLOVA

ultra-vysokohodnotný beton, optimalizace návrhu receptury, suroviny z místních zdrojů, zkoušky čerstvého betonu, zkoušky ztvrdlého betonu

TITLE

Ultra-high-performance concrete composition design (UHPC) for local concrete plants.

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with ultra-high-quality concrete and technological requirements for this material. The experimental part is devoted to the optimization of the UHPC recipe from raw materials from local sources. Based on the tests of fresh and hardened concrete, the one that meets the defined requirements is selected from the proposed recipes. The experimental part includes design, production and testing of bodies. Furthermore, the design of your own recipe and its comparison with other recipes. The work also deals with the evaluation of the financial demands of UHPC.

KEYWORDS

ultra-high-quality concrete, recipe design optimization, raw materials from local sources, fresh concrete tests, hardened concrete tests

OBSAH

PODĚKOVÁNÍ	6
ANOTACE	7
KLÍČOVÁ SLOVA	7
TITLE	7
ANNOTATION	7
KEYWORDS	7
OBSAH	8
SEZNAM ILUSTRACÍ	11
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM VZORCŮ	13
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	14
ÚVOD	15
CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	16
TEORETICKÁ ČÁST	17
1. NÁZVOSOLOVÍ	17
1.1. Definice běžného betonu	17
1.2. Definice HSC	17
1.3. Definice UHSC	18
1.4. Definice HPC	18
1.5. Definice UHPC	19
1.6. Definice UHPFRC	20
1.7. Rozdíly mezi běžným betonem a UHPC	21
2. PŘÍZNIVÉ VLASTNOSTI UHPC	22
2.1. Mechanicko-fyzikální	22
2.2. Vlastnosti ovlivňující trvanlivost	25
3. NEPŘÍZNIVÉ VLASTNOSTI UHPC	27
3.1. Finanční náročnost	27
3.2. Požární odolnost	27
3.3. Křehkost	28
4. PRAKTICKÁ APLIKACE UHPC	29
4.1. Mostní konstrukce	29
4.2. Desky ztraceného bednění	33
4.3. Skořepinové bednění nosníků	34
4.4. Sanace	34

5.	SLOŽKY UHPC	37
5.1.	Kamenivo	37
5.2.	Cement.....	41
5.3.	Voda	44
5.4.	Reakce cementu s vodou	44
1.5.	Hydratační teplo	45
2.5.	Přísady	46
2.6.	Příměsi.....	48
2.6.2.	Inertní.....	49
2.6.3.	Vlákna.....	49
3.	NÁVRH RECEPTURY UHPC	51
	Druhy metod návrhu	51
3.1.	Metoda ACI 363 – Committee on high-strength concrete	51
3.2.	Metoda de Larrardova	52
3.3.	Zjednodušená metoda podle Mehty a Aïçtina	53
3.4.	Metoda podle ACI 221-1	53
3.5.	Metoda uvedená v publikaci Vysokohodnotné betony	54
4.	VÝROBA UHPC	55
4.1.	Míchání.....	55
3.1.1.	Rozdíly mezi betony v betonárně a transportbetonem.....	55
3.2.	Ukládání	56
3.3.	Ošetřování.....	56
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	59
1.	POUŽITÉ VSTUPNÍ SUROVINY	59
1.1.	Kamenivo	59
1.2.	Cement.....	62
1.3.	Voda	63
1.4.	Příměsi.....	63
1.5.	Přísady	64
2.	POSTUP NÁVRHU VLASTNÍ RECEPTURY	65
2.1.	Vstupní údaje.....	65
2.2.	Výpočet receptury	68
3.	PŘEHLED DALŠÍCH APLIKOVANÝCH ZÁMĚSÍ	72
4.	VÝROBA ČERSTVÉHO BETONU.....	76
4.1.	Míchací technika	76

4.2. Postup míchání	77
5. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU.....	79
5.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu	79
5.2. Teplota čerstvého betonu.....	80
5.3. Zkouška rozlité kužele	80
5.4. Zkouška obsahu vzduchu	83
6. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	84
7. OŠETŘOVÁNÍ.....	89
8. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU	91
8.1. Měření a vážení těles	91
8.2. Zkouška pevnosti v tlaku.....	93
8.3. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	96
8.4. Zkouška mrazuvzdornosti	97
8.5. Zkouška odolnosti proti CHRL	97
8.6. Zkouška průsaku tlakovou vodou.....	98
8.7. Modul pružnosti.....	98
8.8. Kalkulace ceny za jednotku objemu.....	99
ZÁVĚR	100
POUŽITÁ LITERATURA	105

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1 Typové složení běžného betonu	17
Obrázek 2 Graf vývoje pevností [9]	19
Obrázek 3 Porovnání složení UHPFRC s běžným betonem.....	20
Obrázek 4 Srovnání matrice UHPFRC s běžnými betony [12]	21
Obrázek 5 Pracovní diagramy UHPFRC v tlaku a v tahu [19].....	23
Obrázek 6 Měření modulu pružnosti pomocí tenzometrů [22].....	24
Obrázek 7 Porovnání průřezů jednotlivých materiálů [24]	24
Obrázek 8 Graf úbytku hmoty při zkoušce odolnosti proti CHRL [17]	25
Obrázek 9 Detail vyčnívajících drátků po zkoušce obrusem [29]	26
Obrázek 10 Odprýskané vzorky UHPC po vystavení vysoké teplotě [33].....	28
Obrázek 11 Pohled na lávku přes Labe v Čelákovících [35].....	29
Obrázek 12 Manipulace jednoho ze segmentů lávky [38].....	30
Obrázek 13 Umístění jednodílné lávky v obci Čeperka [23].....	31
Obrázek 14 Díl zábradlí vyrobeného z UHPC [40]	31
Obrázek 15 Pohled na lávku přes řeku Lubinu [43]	32
Obrázek 16 Odbedňování tenkostěnné lávky [44].....	33
Obrázek 17 Pohled na líc bednicích desek z UHPC [46]	33
Obrázek 18 Skořepinové ztracené bednění nosníku z UHPC vyztužené předpínacími kabely [49].....	34
Obrázek 19 Laboratorní zkouška nosníku s nabetonávkou z UHPC [50]	35
Obrázek 20 Hlazení uloženého čerstvého UHPC pro sanaci vozovky [51]	35
Obrázek 21 Zesílení spodní části mostu [52].....	36
Obrázek 22 Příklad modulových křivek frakcí kameniv [54]	39
Obrázek 23 Přehled tvarů zrn kameniva [55]	39
Obrázek 24 Fáze tuhnutí a tvrdnutí cementu s vodou [58].....	45
Obrázek 25 Vývoj hydratačního tepla v čase [59].....	46
Obrázek 26 Princip napětového a sférického odpuzování [62].....	47
Obrázek 27 Závislost tlakové pevnosti na dávce mikrosiliky [7].....	48
Obrázek 28 Příklad vláken používaných do UHPC, (a) drátky z uhlíkové oceli potažené mosazí, (b) polymerní vlákna [65].....	50
Obrázek 29 Schématický vývojový diagram návrhu metodou ACI 363 [5]	52
Obrázek 30 Schématický vývojový diagram návrhu zjednodušenou metodou podle Methy a Aičtina [5].....	53
Obrázek 31 Schématický vývojový diagram návrhu metodou ACI 221-1 [5].....	53
Obrázek 32 Schématický vývojový diagram návrhu metodou z publikace Vysokohodnotné betony [5].....	54
Obrázek 33 Schéma postupu míchání UHPC [19]	55
Obrázek 34 Druhy smršťování betonu v čase [68]	58
Obrázek 35 Drcené kamenivo Žumberk fr. 4/8	59
Obrázek 36 Drcené kamenivo Žumberk fr. 8/16	59
Obrázek 37 Těžené kamenivo Čeperka fr. 0/2	60
Obrázek 38 Těžené kamenivo Čeperka fr. 0/4	60
Obrázek 39 Těžené kamenivo Čeperka fr. 4/8	61
Obrázek 40 Těžené kamenivo Smiřice fr. 0/4	61

Obrázek 41 Drcené kamenivo Libodřice fr. 4/8	62
Obrázek 42 Sud s cementem CEM I 52,5 R Prachovice	62
Obrázek 43 Navážená dávka ocelových drátků MasteFiber 482.....	63
Obrázek 44 Navážená dávka superplastifikátoru CX Isoflex 535.....	64
Obrázek 45 Graf závislosti tlakové pevnosti na vodním součiniteli	65
Obrázek 46 Graf závislosti nasycení vody superplastifikátorem.....	66
Obrázek 47 Určení dávky hrubého kameniva v závislosti na tvaru zrna.....	66
Obrázek 48 Optimalizovaná křivka zrnitosti na základě poměrů kameniva	67
Obrázek 49 Vyplněná tabulka pokusné záměsi z publikace Vysokohodnotné betony.....	71
Obrázek 50 Malá kbelíková míchačka.....	76
Obrázek 51 Laboratorní míchačka s nuceným oběhem.....	77
Obrázek 52 Schéma postupu míchání receptur v experimentální části	78
Obrázek 53 Vytlačování mikrosiliky superplastifikátorem po vypnutí míchačky	78
Obrázek 54 Časová osa a pořadí zkoušek čerstvého betonu	79
Obrázek 55 Měření průměru rozlivu na malém rozlivovém terči	81
Obrázek 56 Měření průměru rozlivu na velkém rozlivovém terči.....	81
Obrázek 57 Zařízení pro měření obsahu vzduchu čerstvého betonu	83
Obrázek 58 Ukládání čerstvého UHPC do forem trámců (T400)	85
Obrázek 59 Výroba zkušebních tělese – krychle (K150)	86
Obrázek 60 Výroba zkušebních těles – válec (V300).....	86
Obrázek 61 Naplněné formy krychlí (K100).....	87
Obrázek 62 Odformovaná zkušební tělesa K100 po 24 hodinách.....	87
Obrázek 63 Odformovaná zkušební tělesa V300 po 24 hodinách.....	88
Obrázek 64 Detail povrchu UHPC po odbednění.....	88
Obrázek 65 Uložená tělesa do regálů v komoře	89
Obrázek 66 Ukládání zkušebních těles do vodní lázně	89
Obrázek 67 Trámce uložené ve vodní lázni.....	90
Obrázek 68 Vážení zkušebních těles a měření posuvným měřítkem	91
Obrázek 69 Měření délky ocelovým kalibrovaným měřidlem	91
Obrázek 70 Zkušební lis	93
Obrázek 71 Rozdrcené zkušební těleso K100 po tlakové zkoušce.....	94
Obrázek 72 Sloupcový graf porovnávající pět receptur s nejvyšší pevností	95
Obrázek 73 Zdrsnění povrchu zkušebního tělesa ocelovým kartáčem před zkouškou průsakem	97

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Podkategorie vysokohodnotných betonů.....	18
Tabulka 2 Přehled možného použití druhů kameniv do UHPC.....	37
Tabulka 3 Maximální velikost kameniva v závislosti na tlakové pevnosti UHPC [37].....	51
Tabulka 4 Charakteristiky použitého kameniva do vlastní receptury.....	67
Tabulka 5 Shrnutí charakteristik použitých složek receptury UHPC_3465M.....	68
Tabulka 6 Složení receptur UHPC_126 - UHPC_1035D - část. 1.....	72
Tabulka 7 Složení receptur UHPC_1136 - UHPC_2045D - část. 2.....	73
Tabulka 8 Složení receptur UHPC_2146 - UHPC_3055D - část. 3.....	73
Tabulka 9 Složení receptur UHPC_3162 - UHPC_3667 - část. 4.....	74
Tabulka 10 Přehled receptur a rozdílů mezi nimi.....	75
Tabulka 11 Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	79
Tabulka 12 Naměřené teploty čerstvého betonu.....	80
Tabulka 13 Průměr rozlivu malého a velkého terče.....	82
Tabulka 14 Obsah vzduchu čerstvého betonu.....	84
Tabulka 15 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání.....	92
Tabulka 16 Krychelná tlaková pevnost po 7, 28, 56 a 90 dnech.....	95
Tabulka 17 Pevnost v tahu za ohybu po 7, 28 a 90 dnech.....	96
Tabulka 18 Pevnost v tlaku na koncích trámečků po 7, 28 a 90 dnech.....	96
Tabulka 19 Pevnost tahu za ohybu zmrazovaných vzorků/ referenčních.....	97
Tabulka 20 Hmotnost odpadu po 125 cyklech zkoušky odolnosti proti CHRL.....	97
Tabulka 21 Hloubka průsaku tlakovou vodou.....	98
Tabulka 22 Výrobní náklady na m ³ UHPC – receptura UHPC_2752.....	99
Tabulka 23 Výrobní náklady na m ³ UHPRFC – receptura UHPC_3055D.....	99
Tabulka 24 Srovnání průměrů rozlivu receptur bez drátů a s dráty.....	100
Tabulka 25 Srovnání tlakové pevnosti receptur bez drátů a s dráty.....	101
Tabulka 26 Srovnání průměru rozlivu receptur s jinými superplastifikátory.....	102
Tabulka 27 Sestupné seřazení výsledků tlakové pevnosti receptur.....	102
Tabulka 28 Srovnání vlastní receptury s průměrnými hodnotami charakteristik čerstvého betonu.....	102
Tabulka 29 Srovnání vlastní receptury s průměrnými hodnotami tlakových pevností.....	102

SEZNAM VZORCŮ

Rovnice 1 Výpočet křivky zrnitosti podle Füllera [1].....	38
Rovnice 2 Výpočet křivky zrnitosti podle Bolomeye [1].....	38
Rovnice 3 Výpočet aktuální vlhkosti kameniva [5].....	40
Rovnice 4 Výpočet nasákavosti kameniva [5].....	40
Rovnice 5 Výpočet výsledného obsahu vody v kamenivu [5].....	40
Rovnice 6 Rovnice pro přepočet pevnosti v tlaku z menšího tělesa na větší [79].....	93
Rovnice 7 Výpočet pro stanovení modulu pružnosti.....	98

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CO₂ – oxid uhličitý

D_{max} – maximální velikost zrna kameniva

CHRL – chemické rozmrazovací látky

E_c – modul pružnosti betonu

f_c – tlaková pevnost betonu

HPC – high performance concrete = vysokohodnotný beton

HSC – high strenght concrete = vysokopevnostní beton

NPOK – nasáklé a povrchově osušené kamenivo

pH – vodíkový exponent

SCC – self compacting concrete = samozhutnitelný beton

UHSC – ultra-high strenght concrete = ultra-vysokopevnostní beton

UHPC – ultra-high performance concrete = ultra-vysokohodnotný beton

UHPRFC – ultra-high performance fiber reinforcement concrete = ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou výztuží

W_{abs} – absorbovaná vlhkost (nasákavost)

W_h – výsledná vlhkost kameniva

W_{tot} – akruální vlhkost kameniva (obsah vody v kamenivu)

ÚVOD

Materiál UHPC, jaký ho známe v dnešní době, je kompozitní materiál, který toho v porovnání s běžně vyráběným betonem nemá moc společného. Vysokohodnotný beton byl následníkem vysokopevnostního betonu (HSC), který se začal vyvíjet v 60. letech minulého století. Průkopníky v tomto oboru byly především USA, Kanada, Japonsko a Francie. S navyšující se pevností se zvyšovaly i další charakteristiky, které měly vliv na trvanlivost. Na základě toho se odborná veřejnost rozhodla, že beton mající výborné mechanické i trvanlivostní vlastnosti bude nazývat vysokohodnotným betonem (HPC). Vývoj těchto betonů velmi ovlivnil chemický průmysl, jenž přispěl objevením superplastifikátorů, které nahradily méně účinné plastifikátory. Obecně by se dalo říci, že do betonu je přidáváno čím dál více chemických přísad, které ovlivňují specifické vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Ultra-vysokohodnotný beton byl jen dalším stupněm vývoje, kdy jeho vlastnosti výrazně převyšují vlastnosti HPC.

Každým rokem se míra použití UHPC zvyšuje. V České republice se UHPC začal využívat nejprve na infrastrukturní stavby menšího významu, jakými jsou lávky pro pěší a cyklisty. Postupem času se odborná veřejnost a technologové stále seznamují s tímto pro ně novým materiálem, a tak jistě nebude troufalé tvrdit, že v budoucnosti by se mohla otočit pomyslná karta obrátit a využití UHPC by se mohlo stát častější než využití běžného betonu.

Aby se tento materiál mohl hojněji používat, musí projektanti znát jeho mechanické charakteristiky, které nejsou v současných normách začleněny. Pro návrh se používají specializované publikace, nicméně z celkového hlediska jsou informace o tomto materiálu poněkud roztráštěné a úkolem do budoucna bude sjednocení těchto informací ve formě norem.

Pro UHPC jsou používány výběrové materiály, které tento beton mohou udělat nedostupným materiálem. Proto je snaha vyvíjet receptury UHPC i z materiálů, které jsou v dosahu betonáren, čímž se zabývá i tato bakalářská práce.

CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem teoretické části bakalářské práce je seznámit čtenáře s druhy jednotlivých hodnotných betonů a nastínit, jak se odlišují od konvenčního betonu, který je standardně používán. Také je nutné uvést hlavní výhody a nevýhody vysokohodnotného betonu, které jsou založeny na odborných publikacích a člancích. Dále také obeznámit o praktickém použití UHPC v dopravním stavitelství a o potencionálním využití tohoto materiálu. V neposlední řadě je důležité definovat jednotlivé složky, které do UHPC patří. Závěrečná pasáž teoretické části se věnuje metodám návrhu a technologii výroby a ošetřování UHPC.

Cílem experimentální části bakalářské práce je optimalizovat složení UHPC za použití materiálů, které společnost Cemex Czech Republic s. r. o. odebírá z místních zdrojů. Výsledkem by měla být receptura, která splňuje vlastnosti náležící UHPC – jak ty mechanické, tak ty trvanlivostní. Klíčové je přitom v první fázi experimentu **dosáhnout minimální tlakové pevnosti 130 MPa**. Dále je nutné ověřit, zda receptura **obstojí trvanlivostním zkouškám** mrazuvzdornosti, průsaku tlakovou vodou a odolnosti proti CHRL.

V případě, že by se taková receptura našla, firma by ji po dalších fázích vývoje začlenila do svého portfolia, a tím by zvýšila svou konkurenceschopnost.

Dalším cílem je **navrhnout vlastní recepturu** a v základních charakteristikách ji porovnat s ostatními.

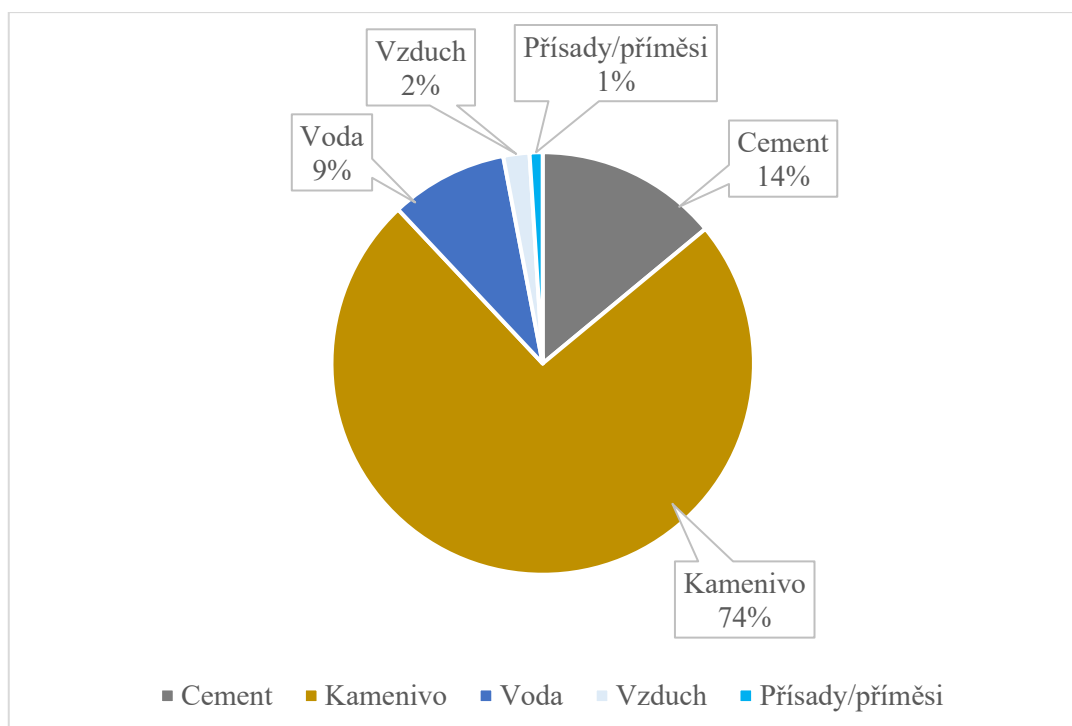
Podružným cílem je porovnání superplastifikátorů konkurenčních společností v porovnání se superplastifikátorem používaným firmou Cemex. Dále aplikace vzorků s rozptýlenou výztuží a bez ní. Posledním z cílů je zhodnocení finanční náročnosti dvou vybraných receptur.

TEORETICKÁ ČÁST

1. NÁZVOSOLOVÍ

1.1. Definice běžného betonu

Běžný beton je **do pevnostní třídy C50/60**. Čerstvý beton se skládá z hrubého a drobného kameniva, které je nejvíce zastoupeno v hmotnostním poměru. **Dávka cementu nepřevyšuje 400 kg/m³**. Vodní součinitel se pohybuje v rozmezí **0,4 – 0,65**. V minimálních dávkách se přidávají plastifikační (ztekucovací) přísady a příměsi. Složky betonu musí vyhovovat příslušným normám. Jak na výběr složek, tak na zpracovatelnost nejsou kladeny žádné nároky [1], [2], [3], [4].



Obrázek 1 Typové složení běžného betonu

1.2. Definice HSC

High Strength Concrete (vysokopevnostní beton) je označení pro beton, jehož hlavní charakteristikou je pevnost v tlaku, která je v rámci pevnostních tříd **C55/67 až C90/105 MPa**. V podstatě se jedná o **podskupinu HPC** [4].

1.3. Definice UHSC

Ultra-High Strength Concrete (ultra-vysokopevnostní beton) se vyznačuje **velmi vysokou** pevností, která převyšuje hodnoty vysokopevnostního betonu, tzn. spadá do pevnostních tříd > C90/105 MPa. Tento typ betonu je možné zařadit **do podskupiny UHPC**. Nicméně určení, zda se jedná o UHSC, nebo o UHPC je velmi složité, jelikož s rostoucí tlakovou pevností se zvyšují i trvanlivostní vlastnosti [4].

1.4. Definice HPC

High Performance Concrete (vysokohodnotný beton) se vyznačuje vlastnostmi, jež **převyšují** vlastnosti běžných betonů. Je to především vysoká pevnost, vyšší odolnost vůči agresivním prostředím, vyšší odolnost proti obrusu a vodopropustnost. Vysokohodnotné betony jsou pevnostních tříd **C55/67 a vyšší**. Tyto betony se dělí na další podkategorie (viz tabulka 1). Souhrnně se všechny skupiny vyznačují **vyšší dávkou cementu** (kolem 600 kg/m³) vyšších pevnostních tříd, kdy je část nahrazována **latentně-hydraulickými přísadami**. Velikost maximálního zrna je 16 mm [4]. S vysokou dávkou ztekucovačů se snižuje dávka vody, což se v poměru s pojivem projeví na **vodním součiniteli**, který má hodnoty **0,4 a nižší** [3], [4], [5], [6].

HPC (High Performance Concrete)	
HSC (High Strength Concrete)	C 55/67 – C90/105 MPa
VHSC (UHSC) (Very High Strength Concrete)	C100/115 – C135/150 MPa
UHPC, UHPFRC (Ultra-High Performance Concrete) (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete)	C135/150 MPa <

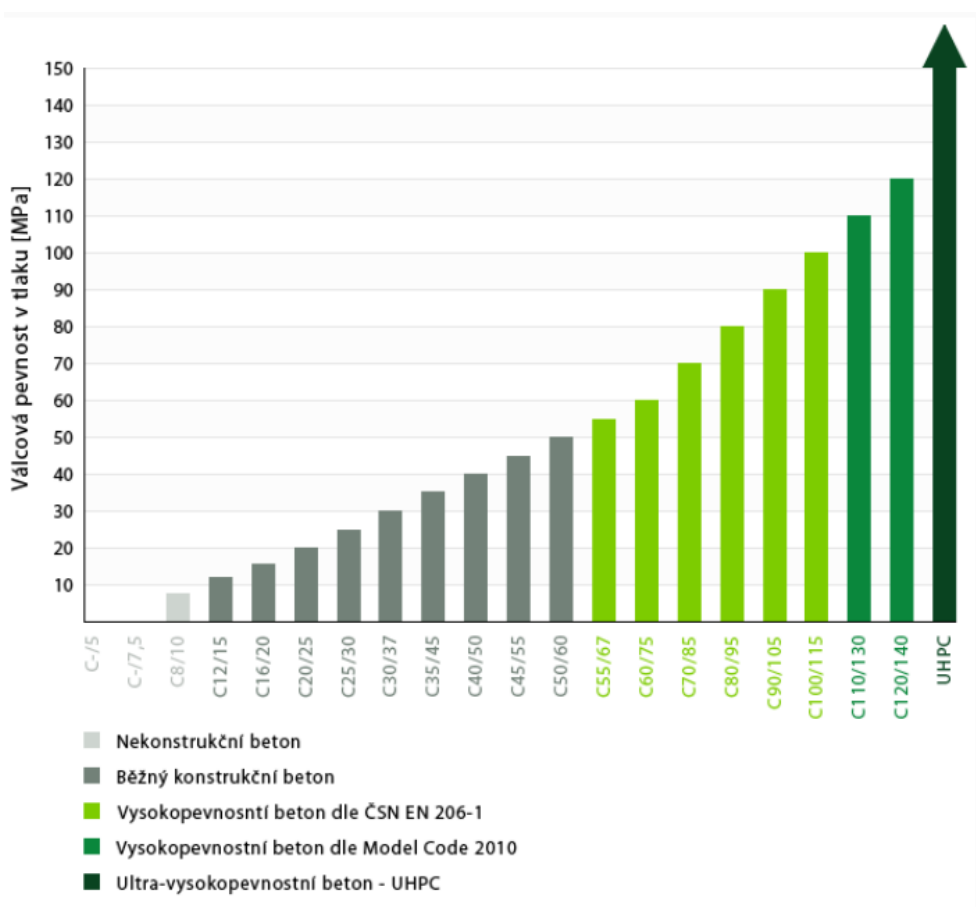
Tabulka 1 Podkategorie vysokohodnotných betonů

Při porovnání pevnostních tříd v TKP 226 s normou Model Code 2010, dochází k rozchodu ve vyšších pevnostních třídách o 5 MPa.

1.5. Definie UHPC

Ultra-High Performance Concrete (ultra-vysokohodnotný beton) je **beton nejvyšší jakosti**, vykazující nejvyšší hodnoty. Vyznačuje se velmi nízkým **vodním součinitelem 0,25 (a nižší)**, kdy je velká část vody nahrazována superplastifikátory a vysokého obsahu pojiv, čímž je obtížnější jeho zpracovatelnost. S UHPC jsou spojeny nejvyšší **nároky na jednotlivé složky**, které jsou pečlivě **vybírány a kontrolovány**. Kamenivo je většinou ze speciálních druhů hornin. Publikace se shodují, že **maximální zrno** kameniva by mělo být **8 mm**. Pojiva jsou nejvyšší jakosti a je požadováno nejjemnější mletí. Velmi vysoké nároky vyžaduje i výroba, ukládání a ošetřování čerstvého betonu. Jedině vysokými nároky a vysokou precizností při všech technologických krocích lze docílit vlastností připadajícím tomuto materiálu [3], [4], [5], [7].

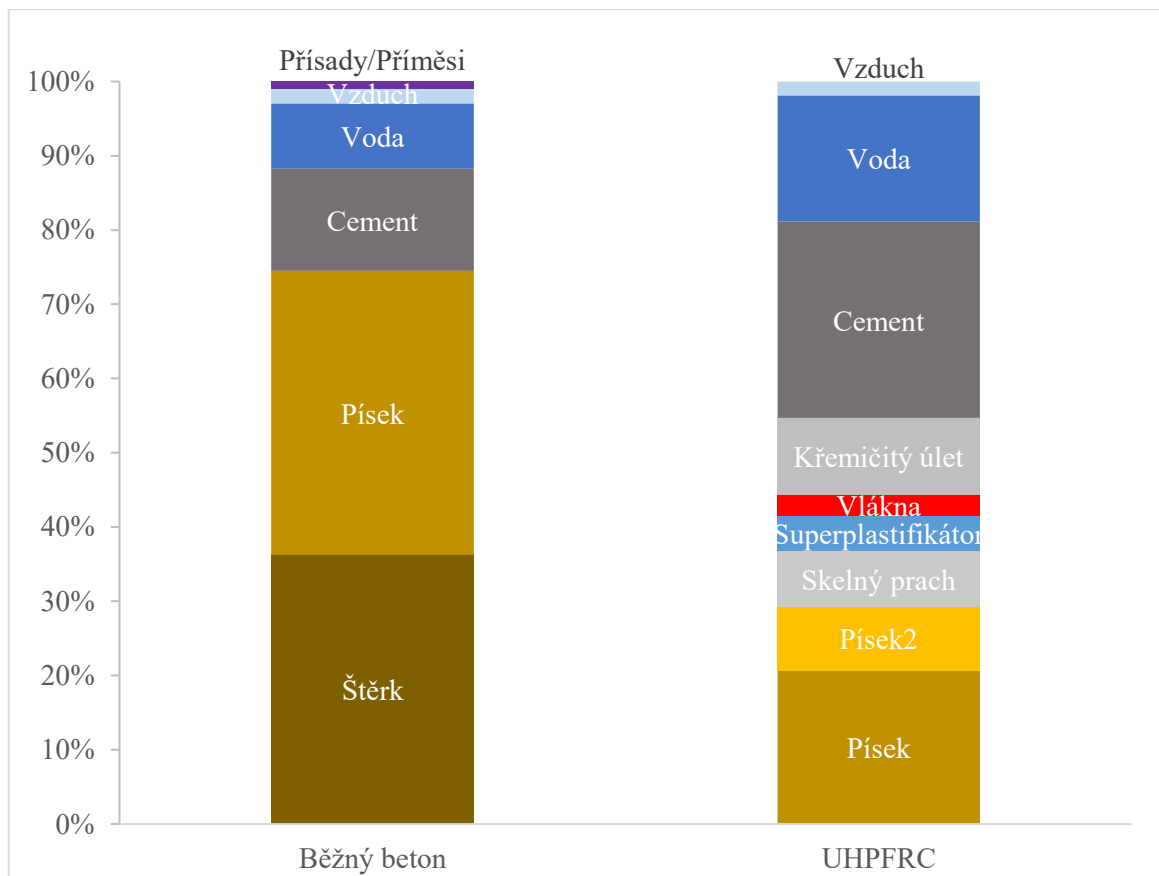
Ačkoliv TKP 226 a další publikace definují UHPC od pevnostních tříd C 135/150 MPa a vyšší, podle odborné veřejnosti a zkušeností z praxe tak lze označovat beton s krychelnou pevností 120–130 MPa. Tuto skutečnost potvrzují i zahraniční normy různých států, tudíž lze toto tvrzení akceptovat, jelikož pevnost není hlavním požadavkem tohoto betonu [3], [7], [8].



Obrázek 2 Graf vývoje pevností [9]

1.6. Definice UHPFRC

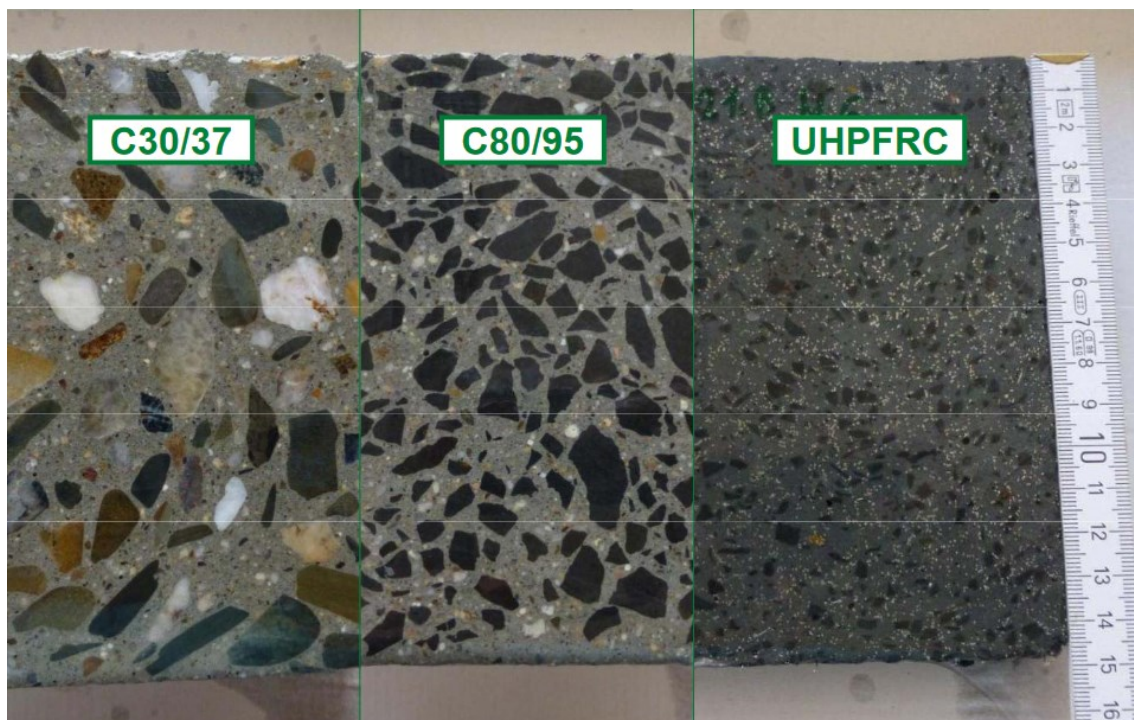
Ultra-High Performance Fiber Reinforcement Concrete (ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou výztuží) lze jinými slovy definovat jako kompozitní materiál, který je **vylepšením UHPC**. Vlákna mohou být nejrůznějších materiálů jako: vysokouhlíková ocel, polypropylen, polyvinylalkohol nebo čedič. Délky drátků se pohybují mezi 10–16 mm (závisí na nejmenším rozměru prvku) a průměr je v jednotkách nebo desetínách milimetru. Dávka je závislá na materiálu vláken, např. u ocelových drátů by měla být do 2 % objemu [10]. U vláknobetonu je důležité **dbát na technologii a ukládání** čerstvého betonu z důvodu možného shlukování vláken. **Vodní součinitel** je u tohoto typu betonu ještě **níže než u UHPC**, kdy se jeho hodnoty pohybují v rozmezí **0,16 – 0,2** a místo vody je vysoká dávka superplastifikátoru. Tento typ betonu se používá především pro jeho dobrou pevnost v tahu a lepší modul pružnosti, přičemž navyšuje své už tak výborné vlastnosti [1], [5], [11].



Obrázek 3 Porovnání složení UHPFRC s běžným betonem

1.7. Rozdíly mezi běžným betonem a UHPC

Definice výše udává základní rozdíly ztvrdlého betonu, jak v mechanicko-fyzikálních vlastnostech, tak v trvanlivosti. Rozdílnost těchto betonů začíná už při použití jednotlivých složek, jež vyžadují prvotřídní výběr a kvalitu. Čerstvé betony mají rovněž **odlišnou konzistenci** – čerstvý UHPC je lepkavého až "medového" charakteru. Zároveň **UHPC splňuje konzistenci odpovídající SSC**, takže není nutné jeho dodatečné hutnění. Při ukládání je nutno dbát na striktní postupy technologie. Jelikož je ve vysokohodnotném betonu vysoká dávka pojiv, dochází při tvrdnutí k vysokému vývinu hydratačního tepla a tím i k nadměrnému autogennímu smrštění. Aby dopady smrštění byly co nejmenší, je nutné opět dbát na správné a pečlivé ošetřování. Odlišnost mezi betony spočívá i v nárůstu pevnosti v počáteční době tvrdnutí, což nám umožňuje **rychlé odbedňování**. Zároveň z důvodu příměsi pojiva (např. křemičitý úlet) je nárůst pevnosti pozvolný a trvá delší dobu. V neposlední řadě se rozlišení týká i finanční náročnosti za m^3 , přičemž cena za jednotku UHPC několikanásobně (**8 – 13x**) **převyšuje cenu za m^3 běžného betonu**.



Obrázek 4 Srovnání matrice UHPFRC s běžnými betony [12]

2. PŘÍZNIVÉ VLASTNOSTI UHPC

2.1. Mechanicko-fyzikální

2.1.1. Vysoká pevnost v tlaku

Nejvýznamnější vlastností UHPC je jeho tlaková pevnost, která je definována 150 MPa a více.

Pevnost UHPC je závislá na jeho matrici. K porušení dochází ve dvou případech.

V prvním případě porušení prochází přes zrna kameniva. Děje se tak z důvodu zvolení málo pevného kameniva, které má nižší pevnost než navrhovaný beton a nižší modul pružnosti. V důsledku toho přichází **drcení zrn**. Proto se ke zvýšení pevnosti používají výběrová kameniva, přičemž je výhodné používat zrna menších velikostí. U betonů s velkými zrny se na jejich povrchu vyskytuje větší množství vody než v okolní cementové pastě, což se projevuje větším množstvím pórů. Z toho tedy jednoznačně vyplývá, že velikost zrna kameniva rozhoduje o vhodnosti jeho využití do UHPC – nejmenší zrna jsou těmi nejvhodnějšími.

V druhém případě porušení prochází přes rozhraní kameniva a cementové pasty. Pevnost v tlaku roste při snižujícím se vodním součiniteli. Nižší obsah vody zapříčiňuje kompaktnější matici bez pórů. Právě kvůli pórům či podobným diskontinuitám dochází k porušení [5], [7], [13], [14].

2.1.2. Vysoká pevnost v tahu

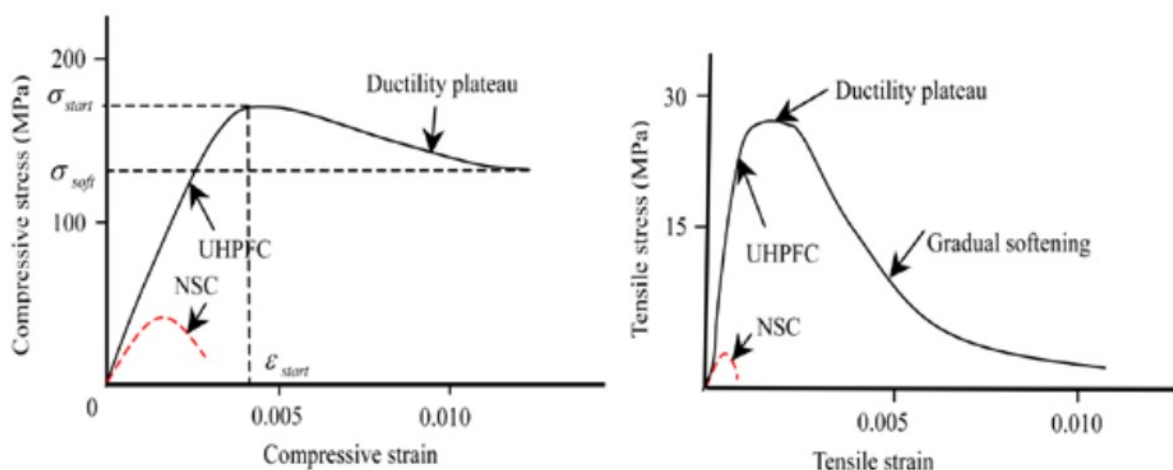
Při ohýbání prvků z prostého betonu nastává rychlý kolaps vlivem **křehkého lomu**. Proto je pro tento beton pevnost v tahu zanedbatelná i ve výpočtech návrhu konstrukce. To samé lze pozorovat u nevyztuženého UHPC. Aby došlo ke **zlepšení houževnatosti a tažnosti**, přidávají se do UHPC **ocelová vlákna**, díky nimž se tedy ve výsledku jedná o UHPFRC neboli UHPC s rozptýlenou výztuží. Optimální dávka je okolo 2 % hmotnosti. Vysokohodnotné betony s ocelovými vlákny vykazují **pevnost v tahu až 16 MPa**, což už je nezanedbatelná hodnota, se kterou lze počítat v návrhu konstrukce. Chování UHPC s rozptýlenou výztuží lze rozdělit do několika fází:

1. Elastická fáze: zde se chová UHPC **lineárně pružně podle Hookeova zákona**.
2. Fáze vzniku trhlin: Dojde-li k překročení elastické pevnosti v tahu, vytvářejí se mikrotrhlinky, poté první prasknutí a po něm tvorba první trhliny. V té době se aktivuje rozptýlená výztuž a tahové napětí poklesne.
3. V tuto chvíli by se v běžném betonu trhlina rozvíjela po celém průřezu a došlo by ke křehkému lomu. U UHPC s rozptýlenou výztuží dochází k **deformačnímu zpevnění**

vlivem toho, že napětí v trhlině přenášejí vlákna a tím zabraňují dalšímu rozevírání trhliny, přičemž se tvoří nové trhliny a průhyb je pozvolný.

4. Ve chvíli, kdy se trhliny začnou znovu rozevírat, napětí naakumulované v drátcích přenášející napětí v trhlinách překročí jejich pevnost v tahu, a tím **dochází k přetrhnutí**. Toto se děje v případě, že soudržnost mezi drátky a matricí je větší, než je tahová pevnost drátků. Pokud je tomu naopak, **drátky se začnou z matrice vytahovat**. Oba tyto následky lze nazvat jako destabilizace vláken.
5. Při přetrhnutí nebo vytažení drátků se trhлина šíří celým průřezem a následuje kolaps.

Vlákna neslouží pouze pro zachycení tahových napětí za ohybu. Mnohem častěji **zabraňují** vzniku trhlin v důsledku **autogenního smršťování**, které má u UHPC největší zastoupení [5], [14], [15], [16], [17], [18].

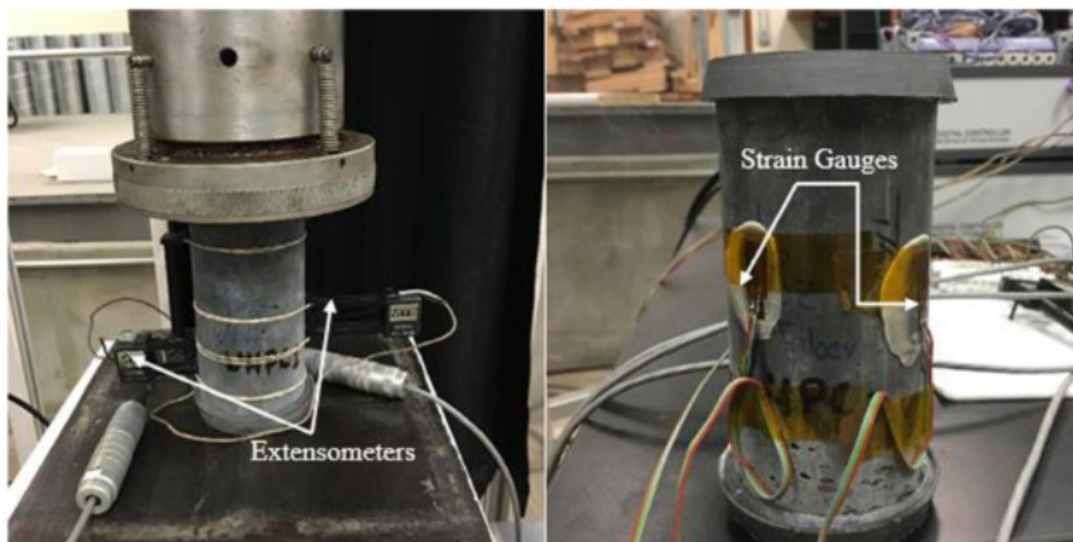


Obrázek 5 Pracovní diagramy UHPFRC v tlaku a v tahu [19]

2.1.3. Modul pružnosti

Znalost hodnoty modulu pružnosti je **důležitá především pro staticky neurčité konstrukce**. Ačkoliv lze modul pružnosti empiricky spočítat několika možnými způsoby, nejvhodnější je tuto veličinu měřit přímo. Principy výpočtů jsou závislé na pevnosti betonu v tlaku, v některých případech se ve výpočtu zohledňuje i modul pružnosti kameniva.

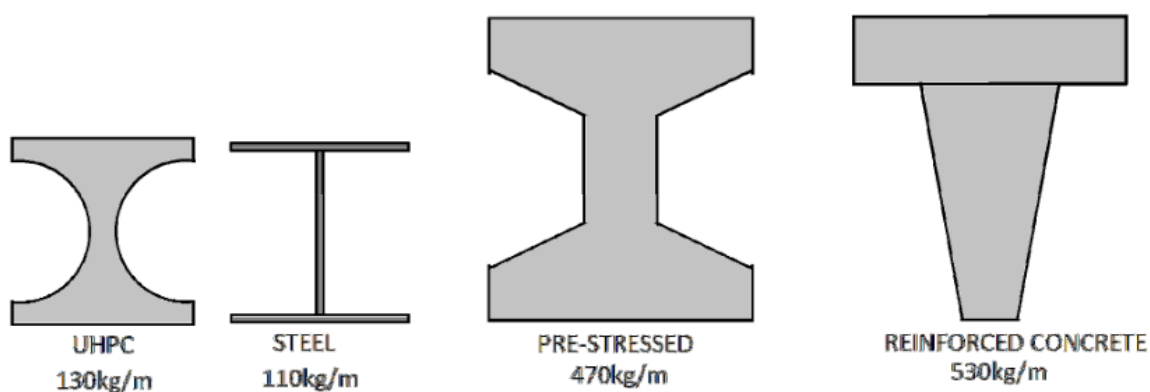
Existuje několik metod přímého měření, přičemž v ČR jsou metody popsány v normách ČSN EN 12390-13 [20] a ČSN ISO 1920-10 [21]. Základní **princip** obou norem je stejný, stanovení modulu pružnosti je na **základě vztahu mezi napětím a deformací zkušebního tělesa**. Deformace se většinou měří pomocí skupiny **tenzometrů**. Modul pružnosti UHP závisí především na použitém kamenivu a na jeho modulu pružnosti. Hodnoty modulu pružnosti UHPC se pohybují od **40 GPa do 50 GPa** [5], [18], [22].



Obrázek 6 Měření modulu pružnosti pomocí tenzometrů [22]

Shrnutí

Shrnutím mechanicko-fyzikálních vlastností vyplývá, že **navrhované konstrukce z UHPC** jsou **subtilnější** než z betonu železového či předpjatého. Tvrzení, že konstrukce z UHPC jsou jakýmsi **kompromisem** mezi konstrukcí ocelovou a železobetonovou je namístě. Navrhováním subtilnějších konstrukcí se **sniží celkový objem použitého materiálu** (v některých případech **až o 2/3**) [23], čímž se snižuje celková hmotnost konstrukce. S nižší hmotností je spojeno i zmenšení nákladů na manipulaci s prvky. Nejideálnějším použitím jsou předpínané konstrukce. UHPC by bylo také velmi dobře využitelné na **nenosné prvky**, které jsou **vystaveny agresivním prostředím** (římasy mostů, obrubníky a další).

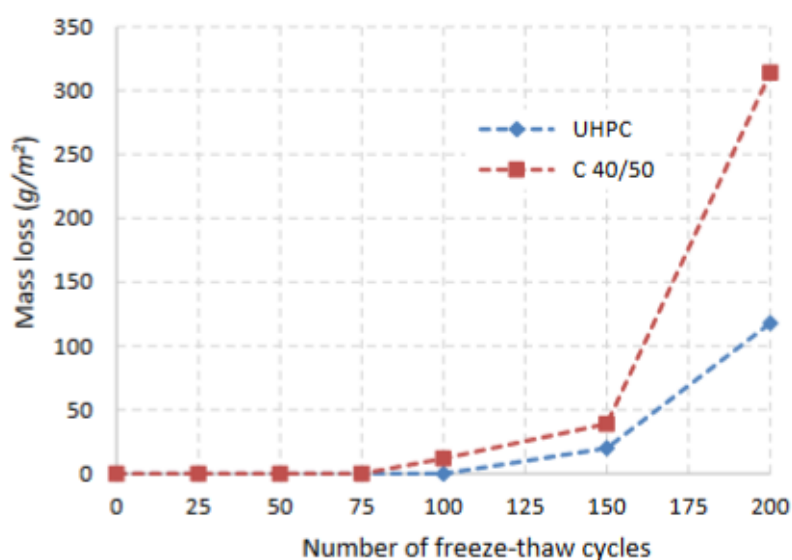


Obrázek 7 Porovnání průřezů jednotlivých materiálů [24]

2.2. Vlastnosti ovlivňující trvanlivost

2.2.1. Odolnost proti CHRL

Odolnost proti působení CHRL je definována normou ČSN EN 206 +A1 [25]. Norma definuje stupně prostředí (XF1 – XF4), které stanovují maximální vodní součinitel a minimální obsah cementu. Tyto stanovené požadavky však složení UHPC snadno předčí. Z příslušných zkoušek podle normy ČSN 73 1326 lze získat součinitel odolnosti betonu v podobě hmotnosti uvolněných částic na m^2 (D1: 1000 g/m^2 – D5: 5000 g/m^2) [26]. V tomto případě lze říci, že hmotnost odpadu je několikrát menší. Například ve studii [17] je odpad 118 g/m^2 po 200 cyklech. Za odolnost proti CHRL může především hutná matrice s minimem pórů. Hlavní vliv na tuto odolnost má vodní součinitel a obsah příměsí (většinou křemičitého úletu). Studie [27] uvádí, že použití ocelových vláken také přispívá ke zlepšení této vlastnosti, nicméně vyšší obsah vláken je kontraproduktivní [17], [28], [27].



Obrázek 8 Graf úbytku hmoty při zkoušce odolnosti proti CHRL [17]

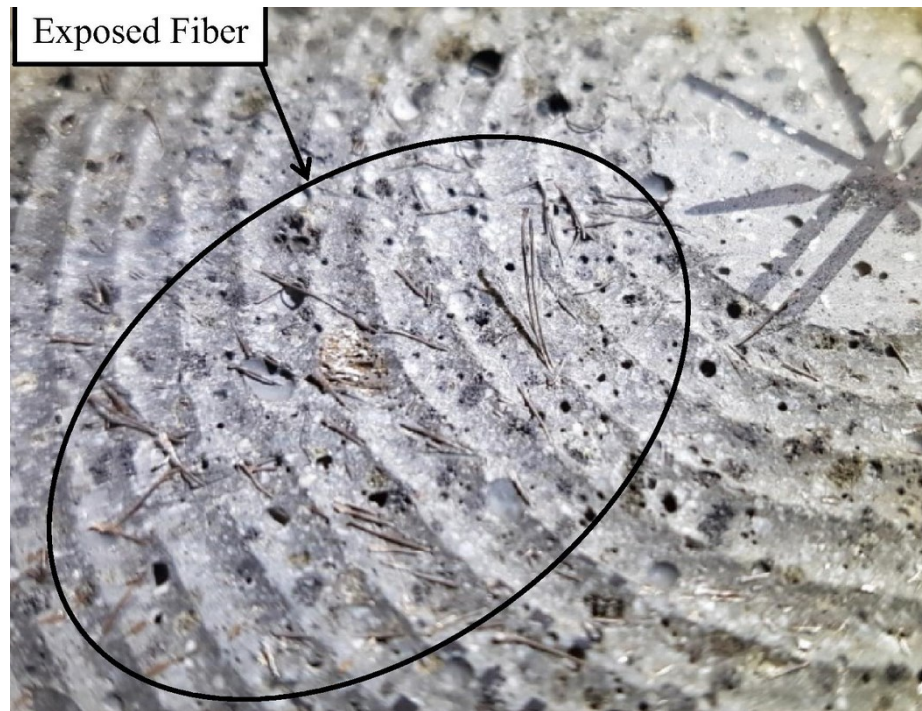
2.2.2. Odolnost proti abrazi (obrus)

V normě ČSN EN 206 +A1 jsou vymezeny definice stupňů prostředí XM1 – XM3. Norma udává pro jednotlivá prostředí pouze maximální vodní součinitel a minimální dávku cementu. V případě UHPC je možné přesáhnout množství použitého cementu až o 100 %. Z provedených studií vyplývá, že odolnost UHPC proti abrazi je několikrát větší než u běžných betonů s minimem ztráty hmoty.

Obrusnost betonu je závislá na vodním součiniteli – čím nižší vodní součinitel je, tím je struktura hutnější, méně porézní a vazba cementové pasty a kameniva je silnější. To vede k vyšší odolnosti proti abrazi.

Dalším faktorem, jímž můžeme ovlivnit obrusnost je vhodný výběr kameniva. Vhodné je kamenivo mající příznivé výsledky zkoušky obrusnosti kameniva. Tím jsou v první řadě vyvřelé horniny, např. čedič, žula nebo dolomitické vápence. Záleží rovněž na použití maximálního zrna, které by mělo být v ideálním případě 5 mm, maximálně však 13 mm.

Jediné úskalí v tomto ohledu spočívá v UHPC obsahujícím ocelová vlákna, kdy obrusem může dojít k odhalení ocelového drátku, který může postupem času korodovat [5], [17], [29].



Obrázek 9 Detail vyčnívajících drátků po zkoušce obrusem [29]

2.2.3. Samovyhojování (self-healing)

Vysoká dávka cementu se současně nízkou dávkou vody má za následek to, že všechna cementová zrna nezhydratují. Tím se v betonu vytváří jakási rezerva. V momentu, kdy vznikne trhlinka, do níž může vniknout voda (a to i jako vzdušná vlhkost), zhydratují zbylá cementová zrna s vodou. Výsledkem je zacelování se trhlín vlivem autogenního hojení. Tento efekt samozřejmě funguje jen u trhlín malých šířek, přibližně do šířky 50 μm , širší trhliny se mohou zacelit jen částečně [5], [30].

3. NEPŘÍZNIVÉ VLASTNOSTI UHPC

3.1. Finanční náročnost

Jelikož je UHPC vícesložkový materiál a jednotlivé složky jsou nejvyšších kvalit, přirozeně se tato skutečnost projevuje na jeho ceně. Téměř vždy se používá portlandský cement CEM 42,5 nebo 52,5 R, jehož cena je ze všech druhů cementů nejvyšší. K tomu nepřispívá ani jeho vysoká dávka. S rostoucí cenou energií současně s energetickou náročností výpalu slínku bude v budoucnu pravděpodobně jeho cena vzrůstat.

K vysoké ceně také přispívá volba kameniva. Specifické druhy kameniv (např. čedič, diabas atd.) odpovídají specifickým nalezištím. Pokud jsou tato naleziště příliš daleko, ale i přesto je nutné jejich využití, vzrostou náklady na dopravu.

Dalším aspektem vysoce ovlivňujícím náklady na výrobu jsou použité přísady a příměsi. Ceny těchto složek se pohybují ve vyšších desítkách až stovkách korun za kilo.

Mimo složek betonu můžeme přičíst náklady spojené s jejich zkoušením, např. laboratorní zkoušky složení cementu, kompatibility cementu se superplastifikátorem apod. Velmi nákladná je kontrola technologie postupů, ošetřování a odbedňování [5], [18].

3.2. Požární odolnost

Odolnost UHPC vůči vysokým teplotám je stále zkoumaná problematika. Studie zabírající se touto problematikou se zaměřují jak na zkoušení vzorků ztvrdlého betonu, tak na zkoušení konstrukčních prvků.

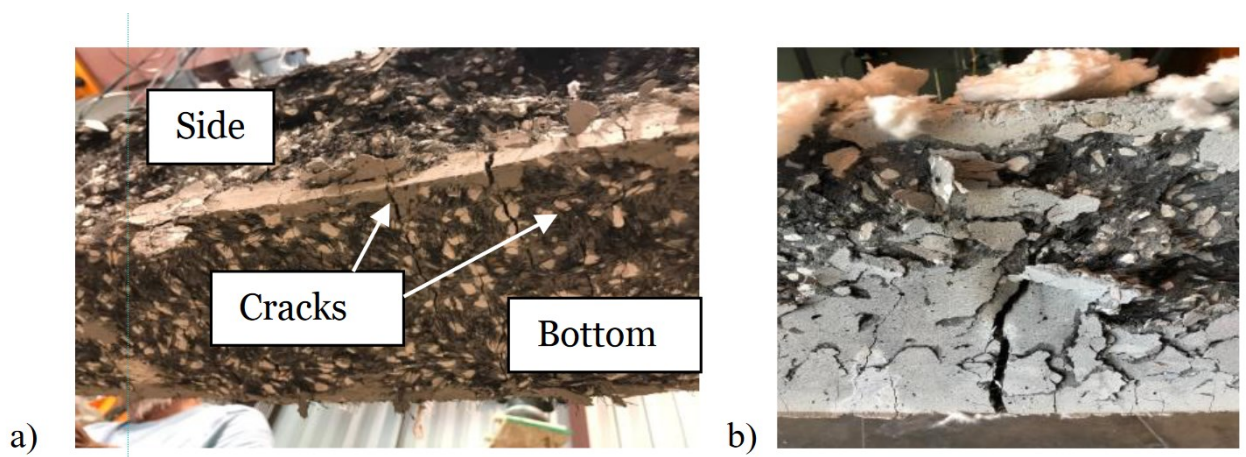
Při vysokých teplotách dochází u vysokohodnotného betonu k degradaci povrchu v podobě odlupování, u některých složení až k odstřelování částí materiálu. Tím se zmenšuje efektivní průřez prvku a teplota může rychleji pronikat k výztuži. To dále vede k rychlejšímu kolapsu konstrukce.

Při zahřívání UHPC se vlhkost v mikrostruktuře začíná ohřívat a měnit na vodní páru (tzv. pórový tlak), čímž vzniká i tahové napětí. Jelikož mikrostruktura UHPC obsahuje minimum pórů a je celkově uzavřená, brání vodní páře v úniku z konstrukce. Pokud pórový tlak přesáhne pevnost betonu v tahu, dochází ke vzniku trhlin a následnému odlupování a odprýskávání částí betonu. V případě, že vzniknou trhliny, vodní pára může unikat, a tím se sníží pórový tlak, což vede k menší míře odlupování. Pokud UHPC obsahuje rozptýlená výztužná vlákna, povrch betonu zcelují a zamezují větší míře odlupování, popřípadě umožňují odlupování

pouze menším kouskům. Ve studiích bylo zjištěno, že rychlost ohřevu nemá vliv na objem odlupované hmoty, naopak má vliv na rychlost odlupování.

Další případ, který může nastat je křehký lom. Při zahřívání uvnitř prvku dochází k nahromadění tepelné energie, což má za následek napětí v průřezu, kdy v určité fázi dojde ke křehkému lomu.

Studie vyvíjející receptury UHPC odolnějšího proti vysokým teplotám dospěly k poznatkům, že se jako vhodná cesta jeví použití vysokopecní strusky jako drobného kameniva v kombinaci s ocelovými a polymerními vlákny. Polymerní vlákna mají nízkou teplotu tání, když roztají, vzniknou póry, kterými může unikat vodní pára a pórový tlak není tak vysoký. Při vyšších teplotách strukturu pohromadě drží ocelová vlákna [5], [31], [32], [33], [34].



Obrázek 10 Odprýskané vzorky UHPC po vystavení vysoké teplotě [33]

3.3. Křehkost

Tuto vlastnost lze do jisté míry eliminovat přidáním ocelových vláken. Ta zabraňují křehkému lomu a zvyšují tažnost a houževnatost. Trhliny tvořící se při zatěžování jsou vlivem rozptýlených vláken zkracovány a jejich šířka je menší. U prvků z vysokohodnotného betonu obsahujících ocelová vlákna vede jejich obsah k vyšší míře pružné deformace a při vzniku trhlin nenastává křehký lom [5], [14].

4. PRAKTICKÁ APLIKACE UHPC

Ačkoliv by se mohlo zdát, že kvůli své vyšší ceně a nárokům na výrobu bude tento materiál používán zřídka, opak je pravdou. Každým rokem vzrůstá trend množství použití UHPC.

Vysokohodnotný beton je možné najít v interiérech jako designový nábytek; v pozemním stavitelství především jako konstrukční prvky, fasádní panely a architektonické prvky.

4.1. Mostní konstrukce

V dopravním stavitelství je jeho využití hojné na mostních konstrukcích. V České republice bylo realizováno již několik staveb s použitím UHPC. V největší míře se jednalo o lávky pro pěší, jako zavěšené segmentové konstrukce dodatečně předpjaté.

4.1.1. Lávka přes Labe v Čelákovících

Tato lávka má prvenství použití UHPC v nosné konstrukci. Tvůrcem receptury a dodavatelem betonu byla firma TBG Metrostav, s. r. o., kde společnost využila svůj komerčně nabízený produkt TOPCRETE, který je podle technických parametrů odolný proti každému prostředí za zachování životnosti až 200 let. UHPC bylo složeno z kameniva D_{\max} 5 mm v kombinaci s ocelovými drátky. Pevnostní třída betonu byla navržena C 110/130 MPa, nicméně jak ukázaly výsledky tlakových zkoušek, pevnost materiálu byla více jak 150 MPa.



Obrázek 11 Pohled na lávku přes Labe v Čelákovících [35]

Před započítím betonáže segmentů bylo provedeno experimentální ověřování vlastností jak čerstvého, tak ztvrdlého UHPC. Byly prováděny zkoušky k ověření reologie a ošetřování betonu. Tímto postupem mohla firma odstranit všechny drobné nedostatky.

Formy segmentů byly ocelové a při betonáži se zahřívaly na 60 °C pro urychlení tvrdnutí betonu, přičemž odbedňování bylo možné po 7–8 hodinách od vybetonování. Betonáž a ošetřování bylo prováděno vždy pod dozorem technologa a byl kladen důraz na systém řízení výroby [12], [36], [37], [35].

4.1.2. Lávka přes Vltavu v Lužci nad Vltavou

Tato lávka je koncepcí jejího návrhu velmi podobná předchozí zmíněné [38] [39].



Obrázek 12 Manipulace jednoho ze segmentů lávky [38]

4.1.3. Lávka přes opatovický kanál v obci Čeperka

Jedná se o lávku pro pěší, kterou tvoří jednodílný předpjatý nosník z UHPC. Navržen byl UHPC s rozptýlenou výztuží pevnostní třídy C110/130 MPa. Beton při betonáži nebyl nijak hutněn. V porovnání s variantou železobetonové monolitické konstrukce je úspora materiálu s UHPC o 2/3.

I v tomto případě bylo před zahájením výroby konstrukce provedeno experimentální ověření vlastností nejen betonu, ale také pokusné konstrukce. Při výrobě bylo dbáno na přesné dodržování technologických předpisů, jak při dávkování, míchání, ukládání tak i ošetřování.

V tomto případě bylo z UHPC zhotoveno i zábradlí, k jehož vyztužení byla užita skelná síť. UHPC byl opět ukládán bez hutnění [23], [9], [40].



Obrázek 13 Umístění jednoduché lávky v obci Čeperka [23]



Obrázek 14 Díl zábradlí vyrobeného z UHPC [40]

4.1.4. Lávka přes řeku Lubinu v Příboře

V Příboře vznikla architektonicky zdařilá lávka pro pěší a cyklisty. Lávku tvoří 5 deskových segmentů, které jsou dodatečně předepnuty. Dodavatelem čerstvého betonu byla firma KŠ Prefa s. r. o. ve spolupráci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze, kde byl navržen UHPC s rozptýlenou výztuží pevnostní třídy C 110/130 MPa. Naměřené hodnoty ze zkoušek udávají pevnost 150 MPa a modul pružnosti $E_c=47\text{--}49$ GPa. Receptura se skládá z dávky cementu, drobného kameniva $D_{\max}=2$ mm, strusky, mikrosiliky a z ocelových drátků o délce 10 mm a o dávce 1,5 % objemu. UHPC splňoval konzistenci samozhutnitelného betonu, čímž bylo zjednodušeno ukládání betonu a došlo k eliminaci problému se zaplněním formy. Bednění bylo kombinací oceli a překližky. Byl zde kladen velký důraz na ošetřování při tuhnutí pro eliminaci trhlin způsobených autogenním smrštěním [41], [42], [43].



Obrázek 15 Pohled na lávku přes řeku Lubinu [43]

4.1.5. Lávka přes Dřetovický potok

Jedná se o velmi designově zdařilou dvojité zakřivenou tenkostěnnou konstrukci. Při návrhu spolupracoval Kloknerův ústav ČVUT v Praze s firmou KŠ Prefa s. r. o. Pro zjištění správné konzistence a zhotovitelnosti byla vyrobena část lávky. Receptura obsahovala vysokou dávku cementu, kamenivo $D_{\max}=2$ mm, strusku, mikrosiliky, ocelová vlákna o dávce 1,5 % objemu a černý pigment. Navrhovaná pevnostní třída byla C110/130 MPa, nicméně ze zkoušek vyplynulo, že materiál má pevnost 150 MPa a modul pružnosti 50 GPa.

Čerstvý beton měl samozhutnitelné vlastnosti, takže ani zde nebylo nutné vibrování. Při výrobě byla kontinuálně hlídána konzistence a na základě toho se optimalizoval čerstvý beton. Vzhledem ke složitému tvaru lávky bylo bednění zhotoveno ze dřeva [44], [45].



Obrázek 16 Odbedňování tenkostěnné lávky [44]

4.2. Desky ztraceného bednění

Společnost KŠ Prefa s. r. o. ve svém portfoliu nabízí bednicí desky z UHPC, které použila i při realizaci spřažené ocelo-betonové konstrukce. Desky jsou minimální tloušťky 40 mm z UHPC s rozptýlenou výztuží pevnosti C 110/130 MPa. Horní povrch je opatřen zdrsněním pomocí vtisků pro lepší soudržnost s další betonovou vrstvou. Při ukládání jsou ocelové pásnice opatřeny pryžovým těsněním, v případě betonových nosníků plastbetonem. Tloušťku desky je možno započítat do krycí vrstvy výztuže, což je velkou výhodou. Desky jsou k sobě ukládány bez možnosti spojení (např. pero + drážka) a vzniká možnost prostupu CO₂ vzniklými mezerami, což je jediným negativem těchto desek [46], [47], [48].



Obrázek 17 Pohled na líc bednicích desek z UHPC [46]

4.3. Skořepinové bednění nosníků

Za touto realizací stojí firma Eurovia CS, a. s. ve spolupráci s Prefa Pro, a. s. Jedná se o prvky, které budou sloužit jako ztracené bednění. Po jejich instalaci na stavbě se dovyztuží předpínacími kabely a vybetonují. Výhodou je absence bednění na stavbě a trvanlivost bednicí skořepiny z UHPC. Pevnostní třída C 100/115 MPa měla po zkouškách pevnosti 135 MPa. Trvanlivostní charakteristiky jako mrazuvzdornost či odolnost proti CHRL měly minimální hodnoty. Požadavky na čerstvý UHPC byla konzistence splňující SCC a rychlé odbedňování (cca 10 hodin od betonáže) [49], [46].



Obrázek 18 Skořepinové ztracené bednění nosníku z UHPC vyztužené předpínacími kabely [49]

4.4. Sanace

4.4.1. Zesilování konstrukcí

Přibetonováním tenké vrstvy UHPC na stávající konstrukci se zvýší únosnost v ohybu až o polovinu. Záleží na tloušťce nabetonované vrstvy UHPC, která se může pohybovat v rozmezí 30–60 mm. Laboratorní zkoušky prokázaly, že mezi starým betonem a UHPC je velmi silná soudržnost. Napomáhá k tomu otryskání tlakovou vodou povrchu starého betonu a dále také "lepivost" UHPC [50].



Obrázek 19 Laboratorní zkouška nosníku s nabetonávkou z UHPC [50]

4.4.2. Sanace povrchu vozovky

Pro dobrou soudržnost a přilnavost se UHPC může použít pro sanaci betonových povrchů. Před betonáží se starý povrch otryskal tlakovou vodou, aby se odstranily nečistoty, volné části a povrch se zdrsnil. Nová krycí vrstva z UHPC má tloušťku minimálně 30 mm [51].



Obrázek 20 Hlazení uloženého čerstvého UHPC pro sanaci vozovky [51]

4.4.3. Zesílení mostu v Meziboří

Jedná se o první případ použití transportbetonu s ukládkou do monolitické konstrukce. Třída pevnosti UHPC, který byl použit na zesílení mostních opěr pomocí žebrové přibetonávky byla 130/140 MPa. TBG Metrostav s. r. o. byl dodavatelem betonu pod svou komerční značkou TOPCRETE, přičemž v úvahu připadaly dvě receptury s rozdílným průměrem (0,2 a 0,3 mm) a tvarovým indexem ocelových drátků o dávce 2 %. Ačkoliv byl UHPC dovážen na vzdálenost 110 km, jeho konzistence byla samozhutnitelná a výsledný povrch po odbednění byl vysoké kvality bez pórů [52].



Obrázek 21 Zesílení spodní části mostu [52]

5. SLOŽKY UHPC

Jak bylo řečeno v předešlých kapitolách, vlastnosti UHPC jsou především závislé na správném výběru jednotlivých složek.

5.1. Kamenivo

Kamenivo sloužící jako plnivo tvoří nosnou kostru betonu, na níž je u vysokohodnotného betonu kladen o to větší důraz [5]. Právě kamenivo může být nejslabším článkem matrice. Z petrografického hlediska vybíráme do UHPC kamenivo, jehož mateční horniny jsou vyvřelé nebo přeměněné, jelikož mají vysoké pevnosti v tlaku (viz tabulka 2).

Druh kameniva	Pevnost [MPa]
Čedič, Diabas	250–400
Křemen	220–300
Amfiobity (metamorfované vyvřelé horniny)	170–280
Rula	120–250
Žula	120–240
Gabr	150–225
Diorit (bylo použito v experimentální části)	135–215
Syenit	150–200
Dolomit	100–200
Břidlice	100–190
Vápenec	40–180
Mramor	74–145
Pískovec	30–80

Tabulka 2 Přehled možného použití druhů kameniv do UHPC

S mateční horninou se pojí i způsob jejího získávání. Nejideálnější formou získávání kameniva by byla těžba, nicméně kameniva s vysokou pevností se v největší míře získávají drcením. Při drcení může být riziko vzniku diskontinuit a mikrotrhlin. Forma získávání má také vliv na zpracovatelnost a konzistenci betonu v důsledku výsledného tvaru zrna kameniva.

Zkoušky kameniva by měly být prováděny minimálně před prvním použitím do betonu. Norma ČSN EN 12620 +A1 [53] definuje maximální obsahy škodlivých látek, které mají negativní vliv na trvanlivost betonu:

- Chloridy (max 0,05 %) způsobují korozi výztuže.
- Sírany (max 0,3 %) způsobují popraskání betonu.
- Reaktivní silika způsobuje alkalicko-křemičitou reakci a trhliny vlivem rozpínání.
- Jíly a jemné částice oslabují tranzitní zónu.
- Organické látky (max 0,5 %) ovlivňují hydratační procesy, a tím i mikrostrukturu.

Kvalita kameniva do UHPC by měla být co nejvyšší, a tedy obsah škodlivých látek co nejnižší.

5.1.1. Granulometrie

Čerstvý beton obsahuje zrna kameniva nejrůznějších velikostí a tvarů. Aby mikrostruktura byla co nejhutnější a nejkompaktnější (minimum mezer a pórů), je vhodné zjistit zrnitost kameniva síťovým rozbořem. Tím je určeno procentuální zastoupení jednotlivých velikostí zrn, která propadnou nebo zůstanou na sítích stanovené velikosti. Takto setřesená zrna stejné velikosti se nazývají frakce. Na základě granulometrické zkoušky je možné vytvořit grafické znázornění frakcí, jež nazýváme křivka zrnitosti. Pro nejnižší mezerovitost kameniva slouží tzv. ideální křivka zrnitosti, která lze vypočítat. Pro její výpočet existuje několik postupů např. podle Füllera či Bolomeye. Běžná praxe funguje tak, že se křivka zrnitosti skládá z více frakcí a pro UHPC je optimalizace křivky zrnitosti požadovanou záležitostí [1].

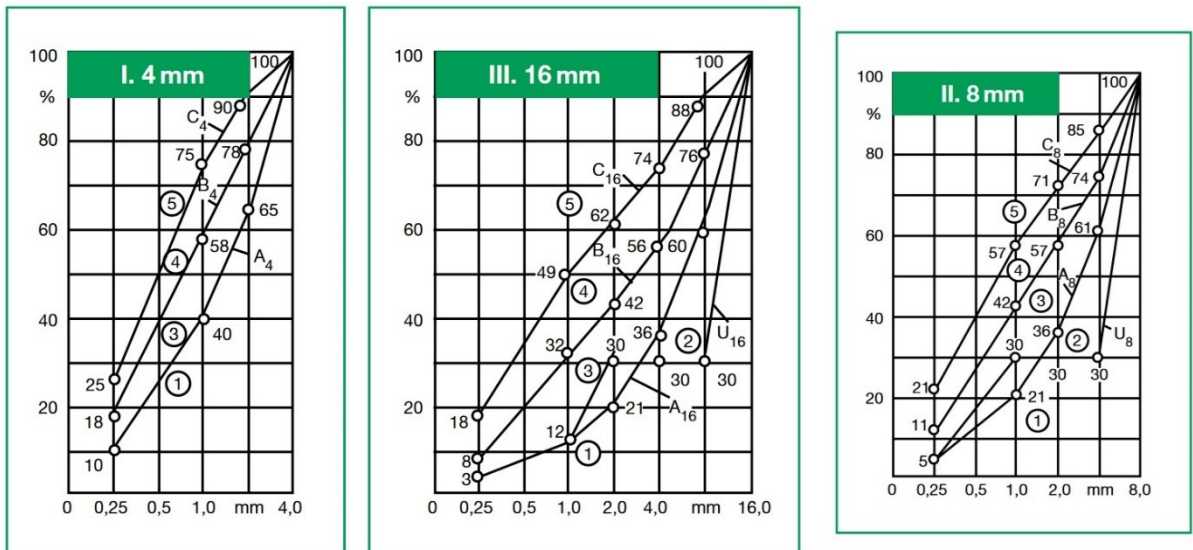
$$P = 100 \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Rovnice 1 Výpočet křivky zrnitosti podle Füllera [1]

$$P = A + (100 - A) * \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

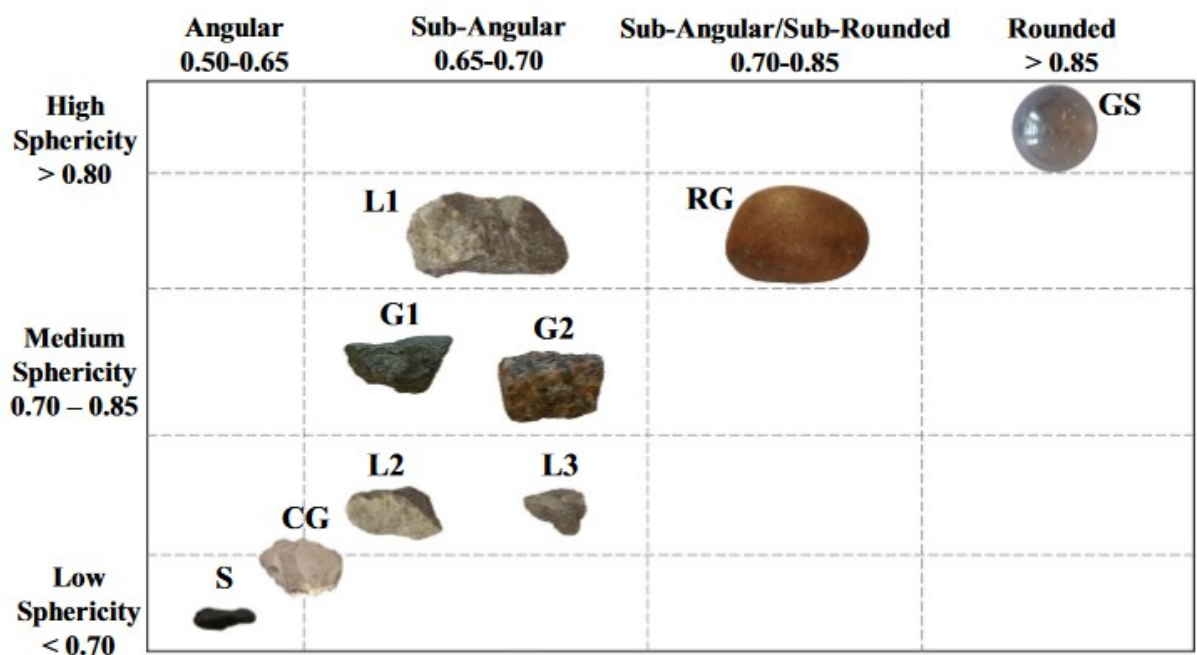
Rovnice 2 Výpočet křivky zrnitosti podle Bolomeye [1]

Náhradou výpočtu křivky zrnitosti je možné použití modulových křivek zrnitosti, které udávají meze, do kterých se má jednotlivá frakce vejít. Jak rovnice pro výpočet křivky, tak i modulární křivky jsou závislé na volbě maximálního zrna kameniva D_{max} . Jak již bylo dříve zmíněno, čím menší zrno kameniva v UHPC je, tím kvalitnější je výsledný beton. Proto se volí maximální zrno o velikosti 12 mm (16 mm). V praxi je běžné používat velikost maximálního zrna pod 10 mm, přičemž většinou je D_{max} 8 mm [5].



Obrázek 22 Příklad modulových křivek frakci kameniv [54]

S velikostí zrna se taktéž pojí i tvar zrn, jenž by měl být ostrohranného nebo oblázkového tvaru, přičemž tvarový index by se měl pohybovat kolem hodnoty 1. Příliš kulovitá zrna způsobují špatnou vazbu s cementovou pastou, proto by kamenivo mělo být ostřejší, aby při zatížení do sebe "zakleslo".



Obrázek 23 Přehled tvarů zrn kameniva [55]

5.1.2. Vlhkost kameniva

Dalším důležitým kritériem pro kamenivo používané do UHPC je jeho vlhkost nebo obsah vody (W_h). S vlhkostí se úzce pojí pórovitost kameniva, která udává procentuální podíl pórů. Obsah vody, která vnikne do pórů, definuje nasákavost (W_{abs}) udávající v procentech poměr mezi nasáklým a suchým kamenivem. Kamenivo lze dle jeho vlhkosti rozdělit na mokré a nasáklé.

Mokré kamenivo představují zrna, která jsou nasycena vnitřně (zaplnění pórů a kapilár) a je smáčený i jejich povrch.

U nasáklého kameniva voda vyplní pouze póry a kapiláry, ale povrch zůstává suchý. Obsah vody je tedy absorbován (W_{abs}). Tento stav nazýváme nasycené a povrchově osušené kamenivo (NPOK). Obsah vody absorbovaný kamenivem nijak neovlivňuje vlastnosti čerstvého ani ztvrdlého betonu, ale je velmi důležitý pro určení dávky záměsové vody. Pokud je aktuální vlhkost (W_{tot}) kameniva větší než nasákavost (W_{abs}), do návrhu vstupuje nadbytečná voda a je nutné s tímto obsahem vody počítat ve vodním součiniteli a snížit tak dávku záměsové vody. V opačném případě, kdy vlhkost kameniva (W_{tot}) bude menší než absorbovaný obsah vody (W_{abs}), kamenivo do sebe nasákne určitý obsah záměsové vody a sníží se tak zpracovatelnost [1], [2], [5], [56], [57].

$$W_{tot} = \frac{\text{hmotnost vlhkého kameniva} - \text{hmotnost suchého kameniva}}{\text{hmotnost suchého kameniva}} * 100$$

Rovnice 3 Výpočet aktuální vlhkosti kameniva [5]

$$W_{abs} = \frac{\text{hmotnost kameniva ve stavu NPOK} - \text{hmotnost suchého kameniva}}{\text{hmotnost suchého kameniva}} * 100$$

Rovnice 4 Výpočet nasákavosti kameniva [5]

$$W_h = W_{tot} - W_{abs}$$

Rovnice 5 Výpočet výsledného obsahu vody v kamenivu [5]

5.2. Cement

„Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydraulických procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě.“ [ČSN EN 197-1: Cement – Část 1, 2012, s. 11]

První složkou je portlandský slínek, který je hmotnostně zastoupen ve všech typech cementu, druhou složkou jsou minerální příměsi mající hydraulicky aktivní látky.

5.2.1. Portlandský slínek

K výrobě slínku je potřeba několik surovin různého minerálního složení. Suroviny potřebné k výrobě se dělí na:

- hlavní,
- vedlejší,
- pomocné.

5.2.2. Postup výroby cementu

Mezi hlavní složky slínku patří oxid vápenatý (CaO), který je obsažen např. ve vápenci, vápenných slínkách a dalších vápenných oxidech. Tato složka má ve slínku největší hmotnostní zastoupení (přibližně 65 % hm). Dalšími složkami jsou oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3). Tyto oxidy jsou obsaženy v jílech, popřípadě v jílovcích, lupcích, hlinitých břidlicích a určitých druzích hlín. Poměr těchto oxidů dotváří celkový obsah hlavních složek. Všechny suroviny se natěží, načež se namelou na surovinovou moučku a uloží do homogenizačních sil, kde se k nim přidávají vedlejší složky.

Poté následuje výpal v rotační peci, kde se vlivem vysokých teplot dosahujících 1 480 °C z moučky stává tavenina, která se speče do nepravidelných hrudek (slnutí). Následně je slínek prudce ochlazen, což má vliv na mikrostrukturu a jeho výsledné vlastnosti. Při procesu slinování dochází k chemickým reakcím a k vytváření přibližně 20 nových minerálních složek. Ve složení vypáleného slínku se nachází čtyři základní minerály, tzv. fáze.

- **Alit** (C_3S – Trikalciumsilikát)

Jeho zastoupení je ve slínku průměrně 65 % hmotnosti, čímž má také největší vliv na výslednou pevnost cementu. Při výpalu vzniká při 1 450 °C. Alit je reaktivní, proto v kontaktu s vodou vyvíjí značné množství hydratačního tepla, což vede k rychlému nárůstu počáteční pevnosti v řádech jednotek hodin.

- **Belit** (C_2S – Dikalciumsilikát)
Ve slínku má zastoupení prům. 20 % hmotnosti. Ve srovnání s alitem je pomalou složkou portlandského slínku. Jeho reaktivnost je velmi nízká, a proto se vyznačuje nízkým hydratačním teplem (cca polovičním oproti alitu), malým smrštěním a pozvolným nárůstem pevnosti v rádech desítek dnů.
- **Trikalciumaluminát** (C_3A) – tmavá mezerní hmota
Portlandský slínek jej obsahuje prům. 8 % hmotnosti. Ze všech hlavních složek slínku je nejreaktivnější. Při reakci s vodou dochází k okamžité hydrataci a tím k uvolňování velkého množství hydratačního tepla. S rychlým procesem hydratace se také pojí výrazné smršťování a v porovnání s ostatními je jeho chemická odolnost velmi nízká.
- **Celit** (C_4AF – Tetrakalciumaluminát ferrit) – světlá mezerní hmota
Obsah ve slínku se pohybuje v průměru kolem 7 % hmotnosti. Jeho vlastnosti jsou podobné jako u belitu. Jeho hlavní předností je značná chemická odolnost vůči síranům.

Dále jsou ve slínku obsaženy vedlejší složky, které jsou vnímány jako nečistoty. Při vyšším obsahu mohou mít negativní vliv na vlastnosti slínku. Patří sem volné vápno (CaO) mající vliv na hydrataci a objemové změny, a oxid hořečnatý (MgO), který při kontaktu s vodou zvětšuje svůj objem.

Po výpalu, než se slínek semele, je na nějaký čas ponechán k odležení na skládce nebo v sílech. Do válcového mlýnu se kromě hrudek slínku přidává i druhá nejdůležitější složka cementu, kterou je síran vápenatý ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ve formě energo sádrovce nebo anhydridu. Síran vápenatý působí jako zpomalovač tuhnutí a v závislosti jeho obsahu v cementu (3-5 %) upravuje dobu tuhnutí cementu. Pokud se jedná o směsné cementy, přidávají se ještě další složky (příměsi) vykazující pucolánové vlastnosti [1], [2].

5.2.3. Příměsi

Jelikož je technologie výroby slínku náročná energeticky, je význačná i svými dopady na životní prostředí. Stále více se čistý portlandský cement nahrazuje směsnými cementy. Tyto cementy obsahují nižší procento portlandského slínku, který je nahrazen hydraulicky aktivními látkami.

Tyto pucolánové látky se v přírodě vyskytují v podobě vulkanického popelu, ale častěji se jedná o vedlejší produkty průmyslové výroby. Pucolán reaguje a tvrdne při smíchání s vodou a vápnem, které se uvolňuje při hydrataci cementu (vznik kalcium-silikát-hydrátů) – tzv. pucolánová aktivita. Adekvátní množství se pohybuje kolem 20–30 %.

Náhradu za cement můžeme použít:

- **Přírodní pucolán (P)**
- **Vápenec (L)**
- **Kalcinovaná břidlice (T)**
- **Průmyslový pucolán (Q)**
- **Vysokopecní struska (S)** – je vedlejším produktem při výrobě železa ve vysokých pecích. Vlivem hašení struska nabývá hydraulických vlastností. Zvláštností je, že struska je hydraulicky reaktivní i bez vápna, nicméně tato reakce je velmi slabá a dlouhá. Je vyráběna v podobě zrn velikostí písku nebo granulí.
- **Křemičitý úlet (D)** – jedná se o vedlejší produkt při výrobě křemíku a jeho slitin. Při redukci křemene vzniká plynný SiO, který se při ochlazení a zkondenzování přemění na SiO₂ ve formě jemných částic. Částice jsou kulovitěho tvaru a svou jemností jsou až 100x menší než zrna cementu (0,1 – 2 μm). Měrný povrch je v rozmezí 15 000 – 25 000 m²/kg.
- **Popílek (V, W)** – vzniká jako vedlejší produkt při pálení uhlí v tepelných elektrárnách. Tvar částic může být kulovitý nebo dutý a velikosti zrn jsou 15–20 μm. Pro pucolánovou reakci musí obsahovat množství amorfni siliky.

5.2.4. Jemnost mletí

Jemnost mletí je pro cement velmi důležitá. Kvantifikujeme ji jako hodnotu měrného povrchu (m²/kg). Minimální hodnota měrného povrchu portlandského cementu je 225 m²/kg, jinak se hodnoty pohybují 300–400 m²/kg, u cementů vyšších tříd i 500 m²/kg. Průměrná velikost zrn cementu se pohybuje v rozmezí 1–50 μm.

Jemnost mletí má vliv na pevnost a zpracovatelnost vysokohodnotného betonu. Čím je cement jemnější, tím je pevnost vyšší, ale také je reaktivnější a rychleji tuhne.

Do UHPC se používají čisté portlandské cementy (CEM I), v největší míře pevnostních tříd 52,5 a méně často 42,5. Popřípadě je možné smíchat tyto dvě třídy v určitém poměru. Kvůli rychlému nárůstu počátečních pevností se přidává rychlovazný cement (R) [1], [2], [5], [56].

5.3. Voda

Voda musí vyhovovat příslušným normovým požadavkům. Nejčastěji se používá pitná voda. Ostatní typy záměsových vod, jako je recyklovaná voda (vzniká při sériové výrobě v betonárnách), povrchová a odpadní průmyslová voda musí vyhovět průkazným zkouškám. Na vodu používanou v UHPC nejsou speciální požadavky, pouze stačí aby splňovala příslušné normy.

Pro dosažení nízkého vodního součinitele je obsah záměsové vody snížen jen na nezbytně nutnou dávku potřebnou k hydrataci cementu, přičemž se část vody nahrazuje superplastifikátorem [1], [5].

5.4. Reakce cementu s vodou

Mezi cementem a vodou probíhá mnoho chemických reakcí. Tou hlavní je proces hydratace, který má za následek tuhnutí a tvrdnutí cementové pasty. Tato reakce má několik fází.

Vliv fází portlandského slínku:

- Silikáty – alit (C_3S) a belit (C_2S) mají vliv na tvrdnutí a výslednou pevnost.
- Alumináty – C_3A a C_4AF mají vliv na tuhnutí.

Vývoj tuhnutí a tvrdnutí cementu:

1. Smíchání s vodou

Zrna cementu se nasáknou vodou a rozpouští se. Povrch částic cementu se pokrývá C-S-H gelem a ettringitem a zvyšuje se teplota. C-S-H gel je tvořen z fází silikátů slínku a ettringnit se vytváří z aluminátů, konkrétně C_3A .

2. Indukce

V této fázi se vytváří další ettringnit.

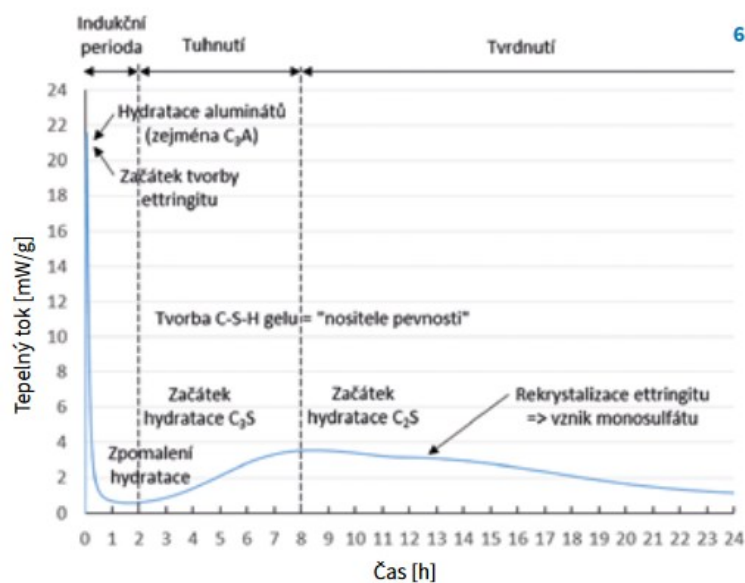
3. Tuhnutí

Vlivem exotermické reakce se zvyšuje teplota. Při reakci vzniká jehličkový ettringnit. Aluminátové a silikátové fáze cementu hydratují a beton tuhne vlivem tvoření vazeb. Tuhnutí končí cca 9-15 hodin po namíchání.

6. Tvrdnutí

Z hydratovaných zrn cementu do prostoru rostou jehličky ettringitu a vlákna C-S-H gelu, což se nazývá vnější produkt. Ettringit se vlivem rekrystalizace změní na monosulfát. Vzniká portlantid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hydroxid vápenatý) reagující s pucolánem a vytvářející další C-S-H gel. Portlantid zvyšuje pH, čímž chrání výztuž. Maximální teploty hydratačního tepla vznikají mezi 10 a 20 hodinami po namíchání.

Tvrdnutí končí v momentě, kdy jsou všechna zrna cementu zhydratovaná, nebo kdy se voda již nemůže k nezhydratovaným zrnům dostat, anebo v momentě, kdy se spotřebuje všechna voda [5], [58].

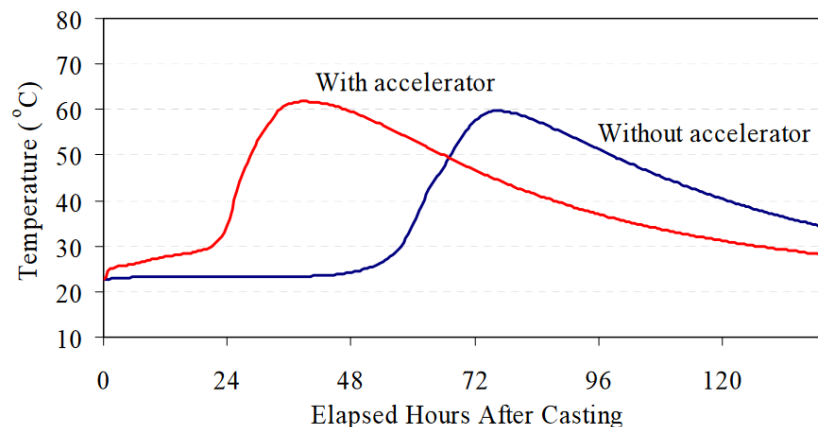


Obrázek 24 Fáze tuhnutí a tvrdnutí cementu s vodou [58]

1.5. Hydratační teplo

Hydratační teplo je vedlejším produktem procesu hydratace. Se zvyšujícím se obsahem cementu se zvyšuje i hydratační teplo, jelikož v daném okamžiku hydratuje určitý obsah cementových zrn. Rychlost nárůstu teploty závisí na obsahu C_3S , který generuje nejvíce tepla. V UHPC hydratační teplo dosahuje hodnot 60–70 °C [59]. Pokud je hydratační teplo vysoké, způsobuje i vysoké teplotní gradienty, které vedou k tahovému napětí a možnosti porušení betonu vlivem tvořících se trhlin. Důvodem je rychlost vývoje tlakové a tahové pevnosti, kdy tlaková pevnost narůstá poměrně rychleji než ta tahová. Na vývoji hydratačního tepla a jeho odvodu má podíl i tvar konstrukce. Rychlost odvodu tepla je přímo úměrná povrchu prvku.

Hydratační teplo se prudce zvyšuje až 12–18 hodin po vybetonování. Beton hydratuje 2–7 dní a poté zchladne na okolní teplotu. Teplota není ve všech místech prvku stejná. Teplota se bude lišit od středu (jádra) prvku směrem k povrchu, přičemž rozdíl mezi těmito místy může být až 10 °C. Náhrada vysokopecní strusky za část hmotnosti cementu, snižuje hydratační teplo s minimálním dopadem na výslednou pevnost. Ve studii [60] bylo zjištěno, že nahradit lze až 60 % obsahu cementu [5], [61], [59].



Obrázek 25 Vývoj hydratačního tepla v čase [59]

2.5. Přísady

V dnešní době se do betonů přidávají nejrůznější chemické přísady upravující vlastnosti čerstvého betonu. Může se jednat o přísady upravující dobu tuhnutí betonu, přísady zvyšující obsah vzduchu, inhibitory koroze, přísady snižující smršťování betonu a superplastifikátory snižující obsah vody. Ve většině UHPC lze nalézt právě superplastifikační přísady, které snižují dávku záměsové vody, což vede k vyšší pevnosti.

2.5.1. Superplastifikátory

Tyto přísady snižují spotřebu záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti. Vývoj superplastifikátorů začal v 60. letech minulého století, a za tu dobu dospěl ke značnému pokroku. Typy superplastifikátorů používané v dnešní době je možné rozdělit na:

- **Naftalenové (SNF)**
Obsah aktivní látky je 40–42 %.
Výhody: vyšší obsah aktivní látky a nižší cena.
- **Melaninové (SMF)**
Obsah aktivní látky 22–42 %.
Výhody: nezpožďují tuhnutí betonu, zachycují méně vzduchu, stálost a spolehlivost.

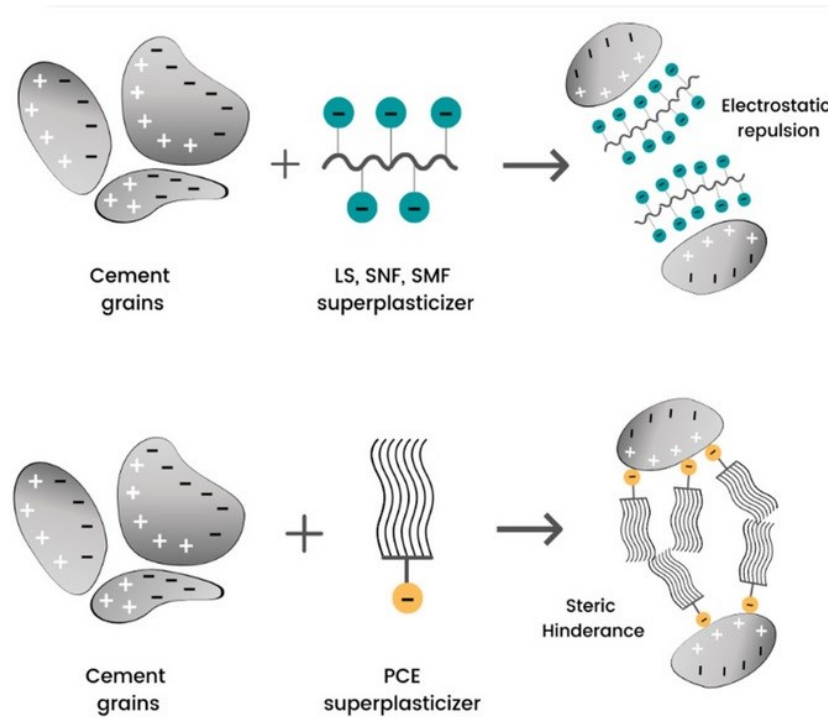
- **Lignosulfáty (MLS)**
- **Polykarboxyláty (PCE)**

Postupem výroby naftalenových a melaninových superplastifikátorů je sulfonatace, při níž reagují molekuly naftalenu s kyselinou sírovou. Dále vlivem kondenzace sloučenina polymeruje, tedy tvoří se molekulový řetězec. Následně je nutné sloučeninu neutralizovat, aby měla přijatelnější pH (výsledné pH 7,5 – 8,5).

Největším trendem je použití superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů.

Superplastifikátory fungují na principu **odpuzování cementových zrn**. Cementová zrna mají povrchové napětí, kdy na povrchu zrna působí elektrostatické přitažlivé síly. Jelikož povrchy cementových zrn mají opačné náboje, zrna se shlukují (fluktuují). Superplastifikátory obsahují anionty, které absorbují cementová zrna, **neutralizují náboj cementového zrna** a vytváří tak elektrostatické odpuzování (dispergují).

U polykarboxylátů je princip lehce odlišný. Je založen na **sférickém odpuzování**. Cementové zrna absorbují molekulu a ta obalí zrna. Molekula obsahuje postranní řetězce s neutrálním nábojem, které mezi zrny udržují odstup a zabraňují shlukování [5], [8].



Obrázek 26 Princip napětového a sférického odpuzování [62]

2.6. Příměsi

Příměsi můžeme rozdělit na aktivní a inertní. Aktivní příměsi mají přímý podíl na chemické reakci a ovlivňují vlastnosti betonu. Inertní příměsi zlepšují zpracovatelnost, ale nepodílí se na chemických procesech.

2.6.1. Aktivní

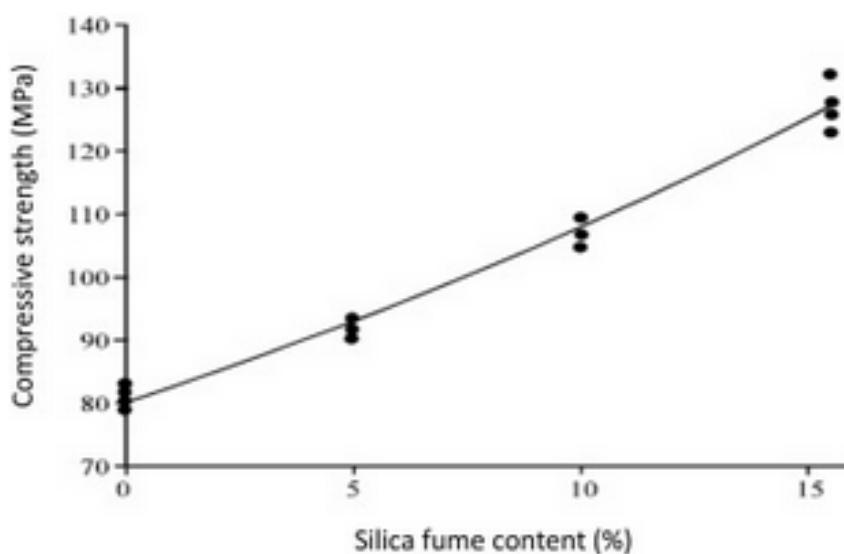
Latentně hydraulické příměsi jsou náhradou za část obsahu cementu. Většinou jsou v podobě prášku, a jsou to zpravidla stejné materiály jako ty, které se přidávají do směsných cementů. Vzhledem k jejich dávce jsou do čerstvého betonu přidávány samostatně.

Z dostupných zdrojů vyplývá, že nejvyužívanější příměsí je křemičitý úlet, který disponuje s mnoha pozitivními vlivy na UHPC. Ačkoliv se jedná o průmyslový odpad, jeho cena je značně vysoká, a proto je snaha křemičitý úlet kombinovat s jinými druhy příměsí, aby se snížila finanční náročnost UHPC.

V porovnání s křemičitým úletem mají ostatní druhy příměsí tendenci pevnost snižovat, proto se musí kombinovat s křemičitým úletem pouze v určitých poměrech [63].

2.6.1.1. Křemičitý úlet (mikrosilika)

Doporučená dávka se pohybuje kolem 8–10 % hmotnosti cementu a započítává se jako pojivo. Díky velikosti zrn působí jako výplň mezi zrny cementu a její pucolánové vlastnosti se podílí na hutnosti a pevnosti matrice. Tato příměs se do UHPC přidává téměř vždy. Vlivem pomalejších hydratačních procesů mikrosilika prodlužuje vytvrzování betonu, proto je směrodatná 90denní pevnost [7], [63].



Obrázek 27 Závislost tlakové pevnosti na dávce mikrosiliky [7]

2.6.1.2. Popílek

Doporučené množství je 10–15 % hmotnosti cementu. U popílku je riziko jeho proměnlivého složení. Do UHPC se používají popílky typu F (nízkovápenatý), C (vysokovápenatý). Na výslednou pevnost betonu nemá, tak velký vliv, jako křemičitý úlet.

2.6.1.3. Struska

Strusku lze používat jako náhradu za kamenivo anebo jako mikrofiller (výplň). Při použití jako náhrada kameniva je tak činěno zejména pro zlepšení odolnosti proti vysokým teplotám, jelikož struska má lepší tepelnou odolnost.

Při náhradě cementu pozitivně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Množství nahrazované za cement je okolo 15–30 % hmotnosti cementu. Dávka je závislá na jejím chemickém složení a jemnosti.

2.6.1.4. Metakaolin

Tento materiál je hlavní surovinou při výrobě porcelánu. Jedná se o speciální druh jílu kaolin. Zrna kaolinu jsou velká 0,5 – 5 μm (větší než zrna mikrosiliky, ale menší než zrna cementu). Jeho použití má vliv na výslednou barvu betonu, kdy je výsledná barva značně světlejší. Obsah nahrazovaného cementu je kolem 20 % [64].

2.6.2. Inertní

Inertní příměsi mají v UHPC funkci mikroplniva a nemají vliv na chemické procesy v betonu. Sem lze zahrnout např. křemenný prášek, mletý vápenec nebo práškový pigment a další [61].

2.6.3. Vlákna

Jak bylo zmíněno v dřívější kapitole, tahové vlastnosti jsou zlepšovány přidáním vláken. Vlákna mohou být nejrůznějších materiálů, přičemž každý z nich má své specifické použití.

Syntetická makro-/mikrovlákna zabraňují vzniku trhlin vlivem smršťování betonu, mají příznivý vliv na odolnost proti vysokým teplotám a odolnost proti nárazu. Průměr vláken je v řádech μm a délka je kolem 10 mm. Maximální dávka je 1 kg/m^3 . Mezi používané materiály patří polypropylen (HPP) a polyvinylalkohol (PVA).

Dále je možné do UHPC přidat čedičová nebo skelná vlákna.

Nejpoužívanějšími vlákny jsou ocelové drátky. Často se jedná o vysokouhlikovou ocel, přičemž povrch drátků je potažen mosazí z důvodu lepší ochrany proti korozi. Maximální délka drátků je cca 13–15 mm a průměr mají v řádech desetin milimetru. Délka ocelového vlákna by měla

být ideálně 2–5násobkem D_{max} . Pevnost v tahu mívají od 2 100 do 3 500 MPa. Dávka drátků se pohybuje kolem 80–120 kg/m³, což bývá kolem 1,5–2 % objemu. U drátků je třeba brát zřetel na jejich rovnoměrné rozmístění při ukládání. Čím delší vlákna jsou, tím větší je pravděpodobnost jejich shlukování [5].



Obrázek 28 Příklad vláken používaných do UHPC, (a) drátky z uhlíkové oceli potažené mosazí, (b) polymerní vlákna [65]

3. NÁVRH RECEPTURY UHPC

Druhy metod návrhu

Pro návrh receptury běžného betonu jsou k dispozici např. Bolomeyova nebo Kennedyho metoda, nicméně tyto metody bohužel není možné pro návrh UHPC použít, jelikož nevyhovují okrajovým podmínkám. Například v případě hodnoty vodního součinitele, konzistence už není závislá jen na dávce vody. Jako pojivo se používá poměr cementu a příměsí.

Několik studií a experimentů se věnovalo návrhu receptury pomocí modelování a simulací. Tyto modely se zabývají detailnějším spolupůsobením složek na úrovni částic. Mezi takové modely patří například:

- Hustota objemu suchých částic, která se zabývá spolupůsobením pevných složek s cílem minimalizovat mezery mezi částicemi (distribuce velikosti částic) a tím, jak dokonale jsou částice schopny se obalit. Výsledkem takového modelu může být křivka hustoty částic (Füller).
- Závislost na konzistenci.
- Statistický, který kvantitativně analyzuje vztah poměrů složek ku pevnosti.

Ačkoliv modelů je celá řada a každý má své přednosti, konkrétní návrhy jsou určovány jinými metodami [8].

Staré osvědčené metody jsou nedostačující, tudíž pro návrh receptury UHPC jsou používány zejména následující metody:

3.1. Metoda ACI 363 – Committee on high-strength concrete

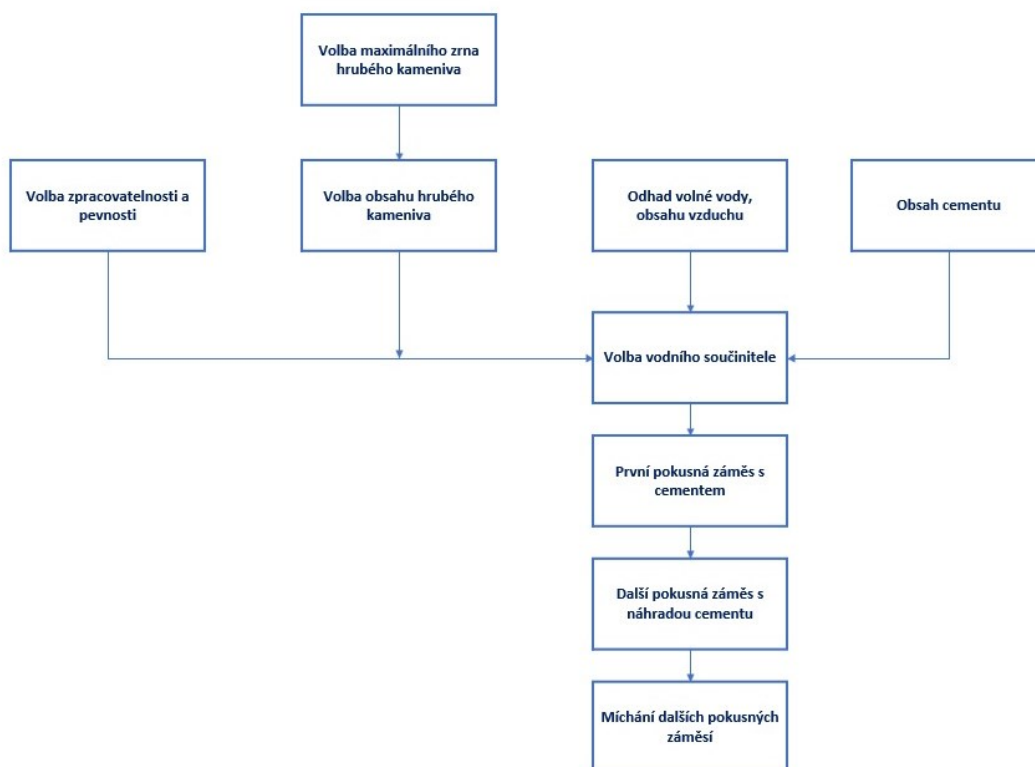
Na základě výběru zpracovatelnosti následuje výběr maximálního zrna kameniva (pro betony nad 85 MPa norma doporučuje použít 10–13 mm). Následně se zvolí obsah hrubého kameniva, který se vypočítá jako procento z objemové hmotnosti vzhledem k velikosti D_{\max} .

f_c [MPa]	D_{\max} [mm]	hm. hrubého kameniva procento obj. hmotnosti [kg]
<65	19–25	0,72 (20 mm)
65–85	25	0,75 (25 mm)
85<	10–13	0,65 (10 mm) 0,68 (13 mm)

Tabulka 3 Maximální velikost kameniva v závislosti na tlakové pevnosti UHPC [37]

Dalším krokem je odhad množství záměsové vody a obsahu vzduchu. Je nutné dbát na to, že hodnoty, jež jsou uvedeny v tabulce normy, jsou vztažené k drobnému kamenivu s mezerovitostí 35 %; pokud je tomu jinak, musí se obsah vody upravit (snížit nebo zvýšit o $4,5 \text{ l/m}^3$). Z tabulek se dále určuje i vodní součinitel ze závislosti pevnosti a maximálního zrna kameniva. Z vodního součinitele je možné následně vypočítat obsah cementu.

Ze stručného schématu vyplývá, že nikde nefigurují obsahy přísad. Ty se v návrhu projeví až po namíchání první záměsi, kde je jako pojivo použitý pouze cement. Příměsi nahrazující cement mají horní hranici obsahu cementu [5].



Obrázek 29 Schématický vývojový diagram návrhu metodou ACI 363 [5]

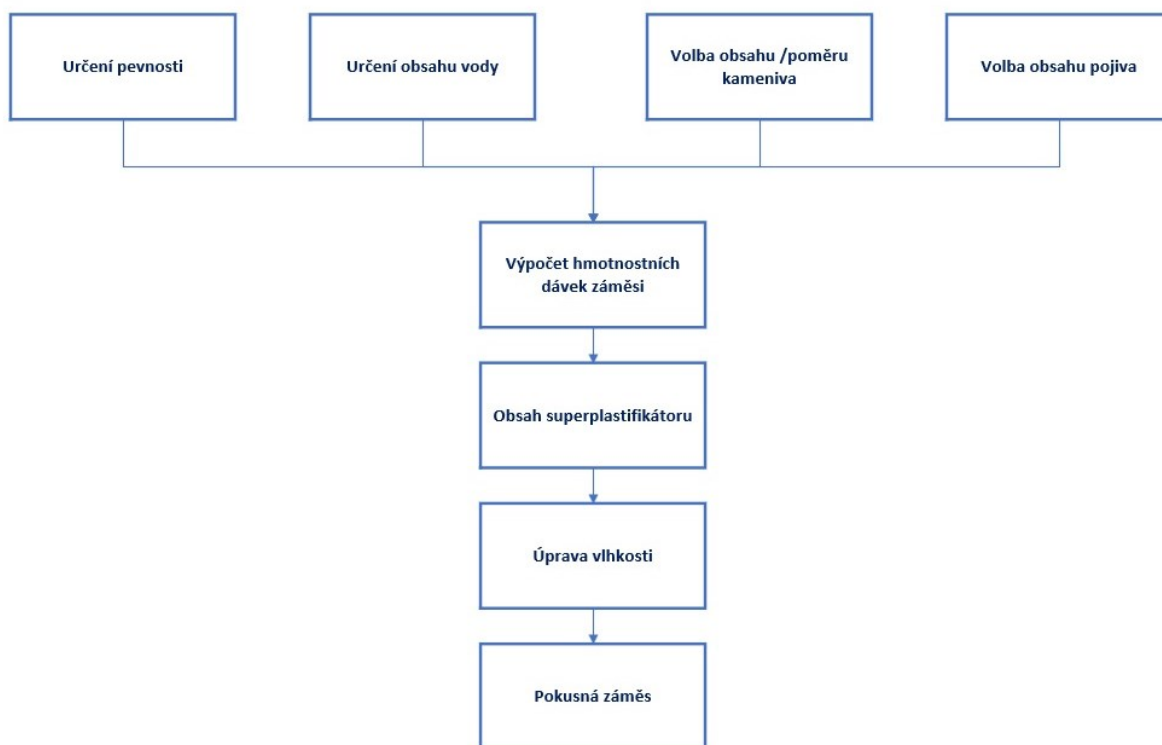
3.2. Metoda de Larrardova

Tato metoda je rozdělena do dvou částí, přičemž v první části je stanovována požadovaná pevnost a v druhé zpracovatelnost.

Sub metoda zabývající se pevností pracuje s předpokladem, že pevnost betonu je rovna pouze pevnosti cementové pasty. Druhá sub metoda zaobírající se zpracovatelností pracuje s předpoklady, že pevnosti závisí na tekutosti pasty a její hustotě. Metoda je založena na experimentálních zkouškách chování cementových past. Kamenivo v tomto případě není vůbec bráno v potaz. Výsledkem metody by měla být pasta, která má nejvyšší pevnost a zároveň má požadovanou tekutost [5].

3.3. Zjednodušená metoda podle Mehty a Aïctina

Metoda je ve výsledku velmi jednoduchá a definuje značnou část okrajových podmínek. Maximální zrno kameniva je definováno jako 10–15 mm. Obsah kameniva má být 65 % celkového objemu, zároveň metoda definuje určité poměry mezi kamenivem. Obsah vody je určován na základě pevnostní třídy betonu a u pojiva lze použít pouze portlandský cement nebo v kombinaci s příměsí v určitém poměru [5].



Obrázek 30 Schématický vývojový diagram návrhu zjednodušenou metodou podle Mehty a Aïctina [5]

3.4. Metoda podle ACI 221-1

Metoda je založená na vodním součiniteli. Kvalitativní parametry jednotlivých složek nehrají v této metodě žádnou roli. Složky se počítají pomocí "absolutních objemů". [5]



Obrázek 31 Schématický vývojový diagram návrhu metodou ACI 221-1 [5]

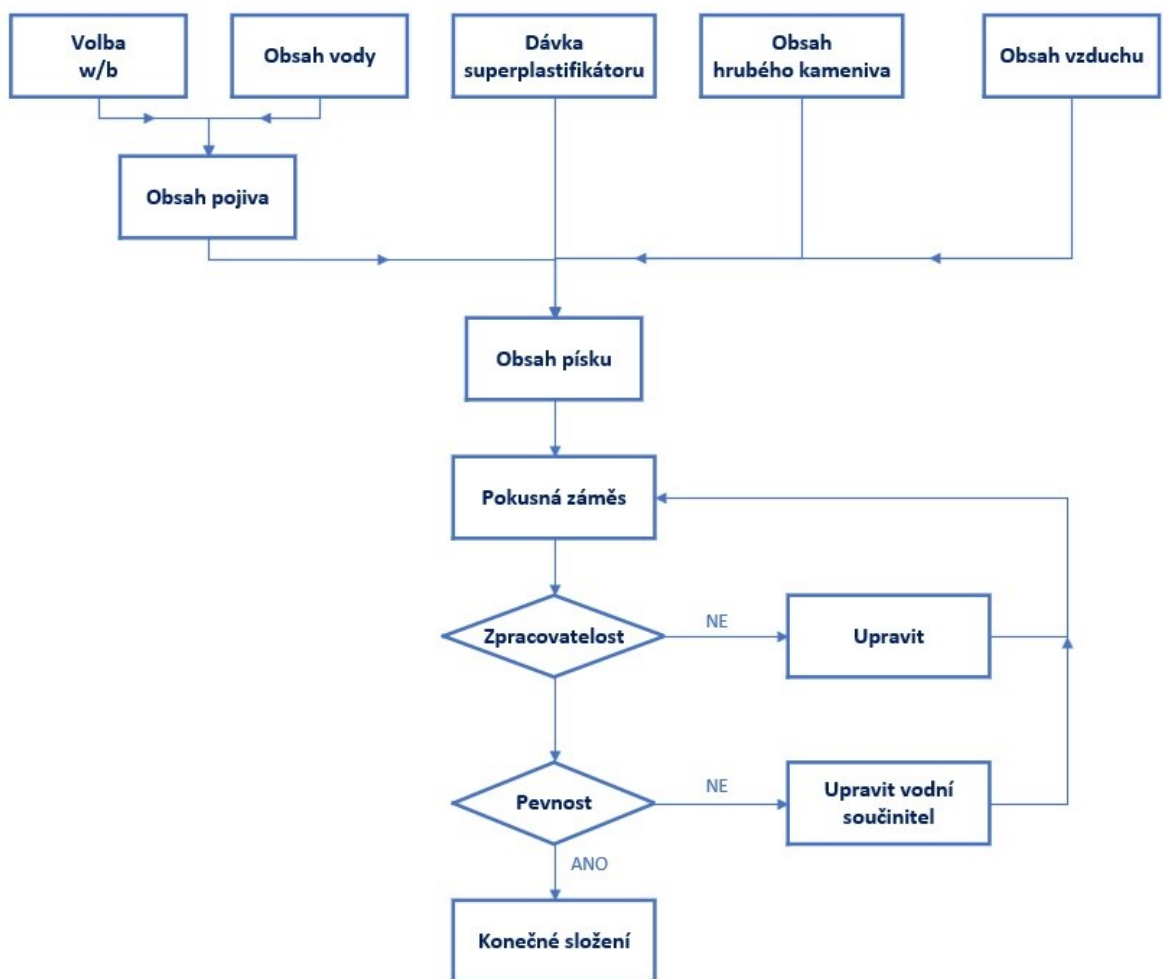
3.5. Metoda uvedená v publikaci Vysokohodnotné betony

Tato metoda je založená na empirických vztazích kombinovaných se zkušenostmi vývoje UHPC v laboratoři.

Tato metoda byla použita v experimentální části pro návrh vlastní receptury UHPC.

Procedura výběru pěti hlavních charakteristik:

- Vodní součinitel se určuje z křivky grafu, jež je závislostí vodního součinitele a tlakové pevnosti.
- Obsah vody určuje požadavek na zpracovatelnost.
- Určení obsahu superplastifikátoru.
- Určení obsahu hrubého kameniva.
- Určení obsahu vzduchu (většinou minimální hodnota). [5]



Obrázek 32 Schématický vývojový diagram návrhu metodou z publikace Vysokohodnotné betony [5]

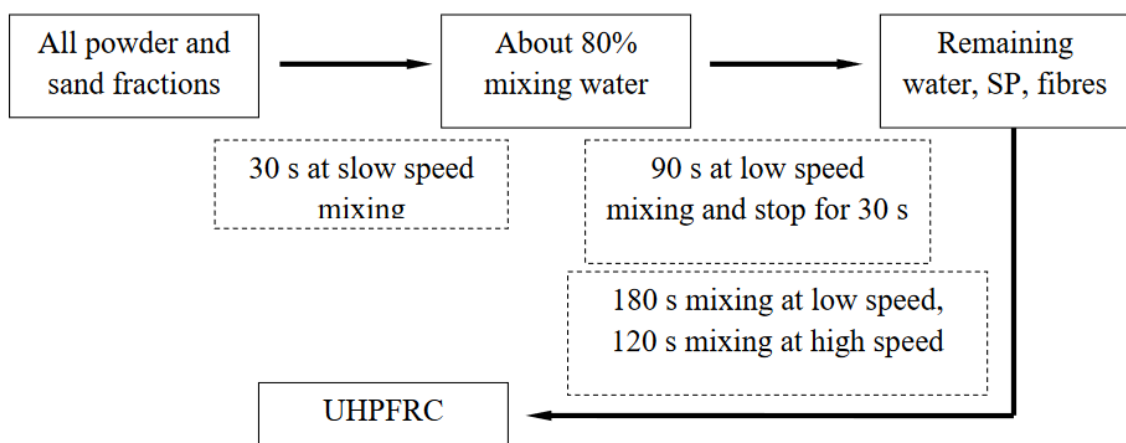
4. VÝROBA UHPC

4.1. Míchání

Pro postup míchání neexistuje žádný platný předpis, který by určil přesné pořadí dávkování složek. V zahraničních publikacích se lze setkat s několika postupy míchání. Avšak nejčastěji se postupy míchání shodují v následujícím postupu:

1. Smíchání frakcí kameniva + pojiva (suché sypané složky).
2. Přidání přibližně poloviny dávky záměsové vody, je možné přidat i část superplastifikátoru.
3. Přidání zbylé vody a superplastifikátoru.
4. Přidání vláken.

Samozřejmě existují případy postupů, které jsou zcela odlišné nebo více rozčleněné, nicméně uvedený princip míchání byl nejhojněji využíván. Průměrná doba míchání čerstvého betonu je přibližně 15 minut. Ve výsledku, ať je postup jakýkoliv, požadavkem je rovnoměrné promísení všech složek a disperze vláken [19], [61].



Obrázek 33 Schéma postupu míchání UHPC [19]

3.1.1. Rozdíly mezi betony v betonárně a transportbetonem

U cementu při smíchání s vodou začíná proces tuhnutí a tvrdnutí. To ovlivňuje dobu zpracovatelnosti betonu, přičemž je usilováno o uložení čerstvého betonu co nejdříve po namíchání. Tuto možnost nabízí pouze betonárna. Ačkoliv je u transportbetonu ukládán beton třeba i 1,5 hodiny od začátku míchání, je po něm požadována stejná zpracovatelnost jako na betonárně při stejném složení čerstvého betonu. Po dobu převozu čerstvého betonu v autodomíchávači začíná docházet k pomalému tuhnutí. Aby tedy bylo na stavbě docíleno stejných reologických vlastností, je potřebné dávku superplastifikátoru při míchání rozdělit. Jednu část přidat při míchání ještě na betonárně a druhou část přidat až před betonáží na stavbě.

3.2. Ukládání

Před samotným ukládáním je nutné definovat způsob plnění a způsob dopravy čerstvého UHPC k formě. Plnění formy může být najednou, anebo po vrstvách, u nichž je nutné dbát na jejich spojení, aby nedošlo k pracovní spáře. Ukládání by mělo být maximálně 90 minut od namíchání, nicméně doba vyplývá z výsledků zkoušek použitého cementu. Hlavní podmínkou při ukládání čerstvého betonu je, aby se uskutečnila v době, při níž je zaručena zpracovatelnost a konzistence.

Při ukládání čerstvého betonu obsahujícího drátky je potřebné dbát na jejich rovnoměrné rozložení a popřípadě upravit lití tak, aby drátky byly uloženy v jednom směru. Kontrola výsledné homogenity a orientace drátků je velmi důležitá. Pokud jsou drátky správně uloženy, mohou přispět k vyšší ohybové pevnosti.

Obvykle se UHPC vyrábí s konzistencí stejnou jako je ta pro samozhutnitelný beton (SCC). Tím pádem je ukládání prováděno litím bez dodatečného hutnění. Pokud je nutno vibrovat, je doporučeno používat příložené vibrátory. Vibracemi se z uloženého betonu dostane přebytečný vzduch a mikrostruktura bude hutnější. Po uložení a případném zhutnění následuje vyhlazení plnicí plochy, kdy hlazení může být obtížnější kvůli lepkavé konzistenci UHPC [1], [5], [66].

3.3. Ošetřování

Při pohledu na realizované stavby jak v ČR, tak i v zahraničí jsou konstrukce vyráběny jako prefabrikáty. Ošetřování betonu je závislé na vlhkosti a teplotě, která je v případě výrobních hal konstantní. Naopak z pohledu efektivity výroby je požadováno brzké odbedňování. Pokud se však betonuje ve výrobní hale nebo na stavbě, v obou případech **je ošetřování UHPC velmi důležité**. Pokud je ošetřování nedostatečné, UHPC přijde o své výjimečné vlastnosti. Beton je nutné ošetřit z důvodu zajištění maximální hydratace co největšího obsahu cementových zrn a eliminace smrštění.

Beton se smršťuje z několika různých důvodů:

- **Chemické smrštění**, kdy vlivem hydratačních procesů dochází ke kontrakci pevné fáze cementové pasty.
- **Autogenní smrštění** (tzv. samovysychání) vzniká vlivem spotřebování záměsové vody a toto smrštění vzniká v celém prvku homogenně. Čím nižší je vodní součinitel, tím větší je autogenní smrštění.

- **Smrštění odpařováním** vzniká na povrchu betonu, kdy povrch vysychá a tvoří se na něm velké tahové napětí, které pokud překročí pevnost betonu v tahu, vytvoří smršťovací trhliny.

Ošetřováním může být ovlivněno autogenní smrštění a smrštění odpařováním.

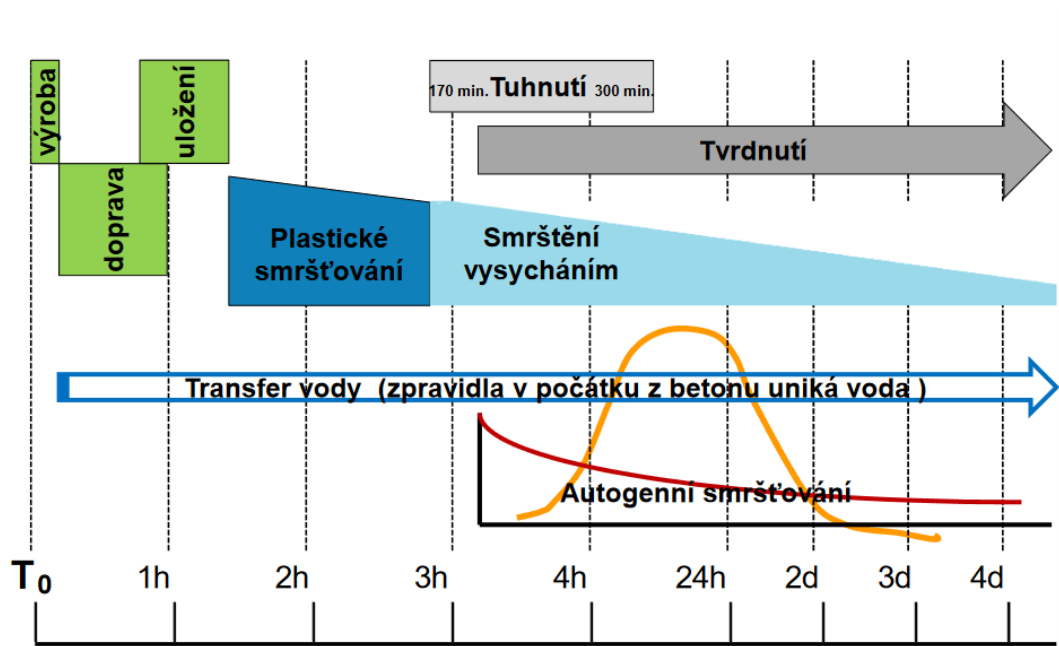
Ošetřování lze rozdělit na dva základní způsoby:

- Vodou, kdy se požaduje dosažení vlhkého povrchu betonu. Ošetřování se provádí skrápěním, mlžením povrchu. Tímto způsobem je nejlépe eliminováno autogenní smrštění.
- Ošetřovací membrány nebo postřiky (ochranný film) zabraňují odpařování a chrání tak povrch před vysycháním. Složením jsou na bázi parafinů nebo různé emulze vosku. Další možností je potáhnutí povrchu nepropustnou fólií.

Povrch, který je v kontaktu se vzduchem je nutné ošetřit postřikem nebo nepropustnou fólií. Pro eliminaci autogenního smrštění by bylo nejideálnější brzké odbednění prvku a následné vlhčení vodou. Na druhou stranu bednění ~~nám~~ působí proti odpařování vody z povrchu. Příznivějším postupem by bylo po odbednění povrch smáčet vodou a později ho ošetřit emulzním postřikem.

U betonů s vodním součinitelem 0,4 a nižší může odbednění nastat 16–24 hodin po betonáži. Ošetřování by mělo trvat minimálně 3 dny a ideálně 7 dní. Nicméně pokud je to možné, je vhodné ošetřovat i déle.

Dále je možné beton ošetřovat propařováním (tzv. vytvrzováním párou). Zjednodušeně tato metoda spočívá v tom, že je prvek přikryt plachtou a kolem něj vytvořena "komora", též z plachet. V tomto prostředí je prvek vystavován vodní páře o teplotě max. 90 °C po dobu několika hodin (cca 72 h). Vlivem tohoto procesu se eliminuje autogenní smrštění, zvýší se počáteční pevnost, a tím může dojít k rychlejšímu odbedňování. Tímto způsobem jsou ošetřovány prvky menších rozměrů [67], [68], [69], [70], [71], [72].



Obrázek 34 Druhy smršťování betonu v čase [68]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. POUŽITÉ VSTUPNÍ SUROVINY

1.1. Kamenivo

Pro výrobu UHPC bylo použito jak hrubé, tak drobné kamenivo ze zdrojů, odkud firma standardně odebírá.

1.1.1. Žumberk

Kamenivo z tohoto lomu je drcené a dodávané frakce jsou 0/4–63/125 mm. Z petrologického hlediska je mateční hornina diorit a žula. V navržených recepturách UHPC byl použit jako hrubé kamenivo frakce 4/8 a 8/16 mm.



Obrázek 35 Drcené kamenivo Žumberk fr. 4/8



Obrázek 36 Drcené kamenivo Žumberk fr. 8/16

1.1.2. Čeperka

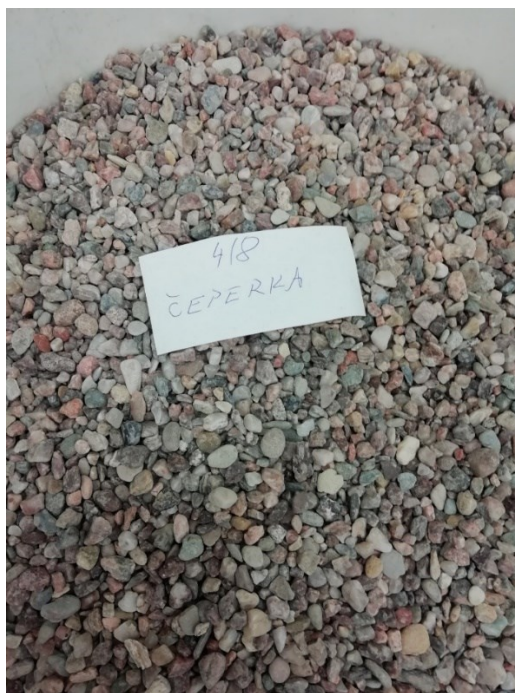
Ve šterkovně Čeperka patří přímo firmě Cemex se těží šterkopísek, který je praný a dodává se ve frakcích 0/4–32/63 mm. Hlavní zastoupení ve složení má křemen, dalšími fázemi jsou pískovce, žula a další. Do UHPC bylo použito jako drobné kamenivo frakce 0/2; 0/4 nebo 4/8 mm.



Obrázek 37 Těžené kamenivo Čeperka fr. 0/2



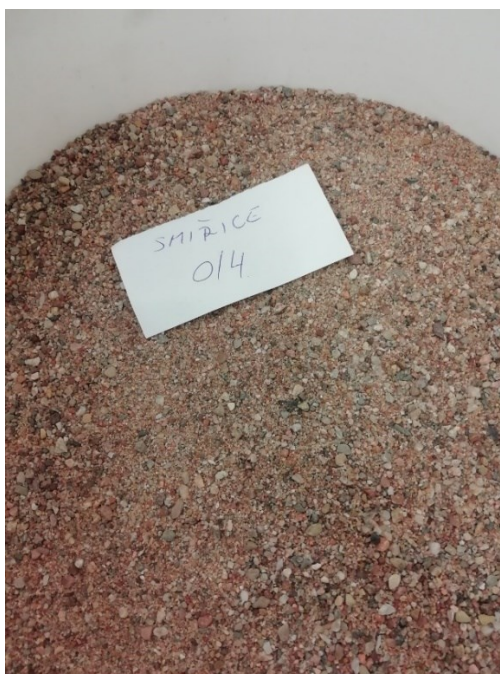
Obrázek 38 Těžené kamenivo Čeperka fr. 0/4



Obrázek 39 Těžené kamenivo Čeperka fr. 4/8

1.1.3. Smiřice

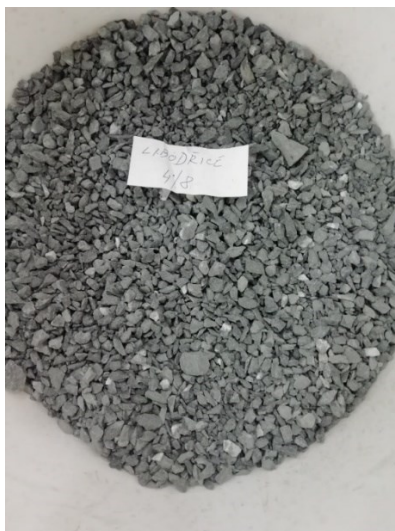
I tato štěrkovna patří do koncernu Cemex a rovněž zde se těží štěrkopísek, který je praný a dodávaný ve frakcích 0/4–32/63 mm. Složení z většiny tvoří křemen. V záměsích vysokohodnotného betonu je přidáván jako drobné kamenivo frakce 0/4 mm.



Obrázek 40 Těžené kamenivo Smiřice fr. 0/4

1.1.4. Libodřice

Lom Libodřice nabízí drcené kamenivo ve frakčním rozmezí 0/4–32/63 mm. Petrologicky se hornina skládá převážně z amfibolitu (patří do stejné skupiny jako diorit nebo gabra). V receptuře UHPC toto kamenivo bylo použito jako hrubé kamenivo frakce 4/8 mm.



Obrázek 41 Drcené kamenivo Libodřice fr. 4/8

1.2. Cement

Použity byly dva typy cementů přímo od firmy Cemex vyráběné v Prachovicích. Cement byl dodávaný v sudech.

Použité třídy cementu:

- CEM I 52,5 R Prachovice
- CEM II/A-M 42,5 R Prachovice



Obrázek 42 Sud s cementem CEM I 52,5 R Prachovice

1.3. Voda

Záměsová voda byla pitná z vodovodního řádu, čímž splňovala všechny parametry.

1.4. Příměsi

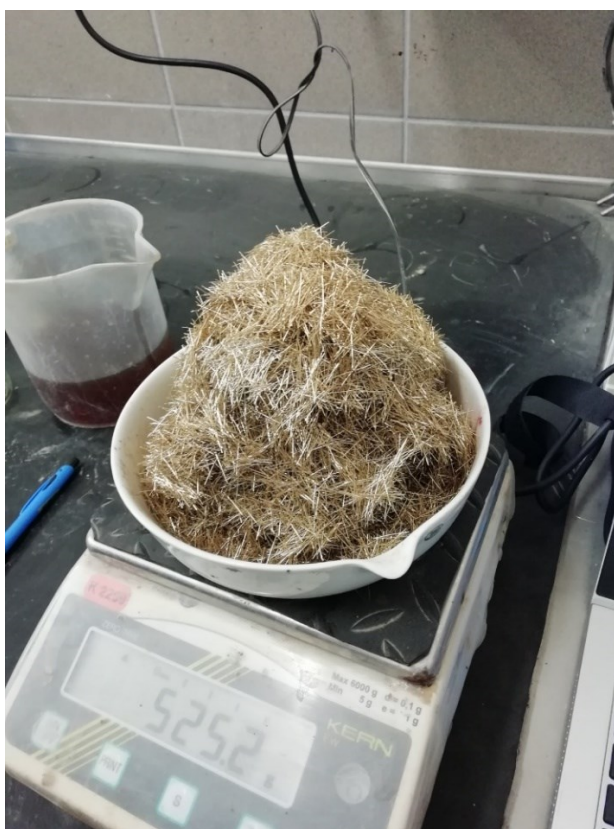
Jako příměsi byly použity křemičité úlety a drátky.

1.4.1. Křemičitý úlet (mikrosilika)

Pro částečnou náhradu pojiva byl použit křemičitý úlet od německé firmy RW Silicium GmbH, typ produktu "RW-Füller". Mikrosilika obsahuje 96 % SiO₂, zrnitost 0,1 – 0,3 μm a objemová hmotnost je 300–360 kg/m³.

1.4.2. Ocelové drátky

Drátky přidávané do záměsí byly od firmy Master Builders Solutions CZ s. r. o., typ Masterfiber 482. Jedná se o drátky z vysokouhlíkové oceli potažené mosazí o průměru 0,20 mm a délce 13 mm. Tvarový index drátků je 65. Drátky byly dodávány ve 20kg krabicích.



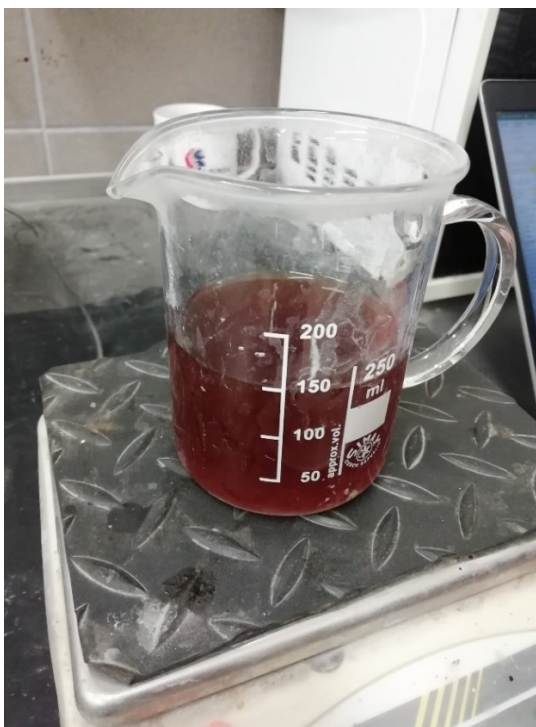
Obrázek 43 Navážená dávka ocelových drátků MasteFiber 482

1.5. Přísady

Ke snížení vodního součinitele a dosažení požadované konzistence byly ve směsi použity superplastifikátory. Ve většině záměsí byl použit CX Isoflex 535, který používá výhradně firma Cemex Czech Republic s. r. o. do svých oficiálních receptur. Nicméně během míchání pokusných záměsí byla možnost použít dalších superplastifikátorů od konkurenčních značek. Tím se naskytla možnost porovnat superplastifikátory mezi sebou.

1.5.1. CX Isoflex 535

Vzhledem k předešlým dobrým zkušenostem technologů firmy Cemex byl tento superplastifikátor nejvíce využíván do pokusných záměsí. Isoflex vyrábí dceřiná společnost firmy CEMEX Admixtures GmbH. Jedná se o kapalinu na bázi polykarboxylát etheru (PCE) s obsahem sušiny 24 %. Doporučené dávkování je 0,2 – 2 % hmotnosti pojiva.



Obrázek 44 Navážená dávka superplastifikátoru CX Isoflex 535

1.5.2. Isocoast 5800

Také tento superplastifikátor je vyráběn dceřinou společností CEMEX Admixtures GmbH.

1.5.3. Isocoast 9140

Další superplastifikátor, který je používán firmou CEMEX Admixtures GmbH.

1.5.4. MasterGlenium ACE 300

Jedná se o kapalinu s chemickým složením na bázi polykarboxylátů (PCE). Dávkování se pohybuje v rozmezí 0,6 – 1,5 % hmotnosti pojiva. Výrobce udává nejen disperzní vlastnosti, ale také zrychlení prvních hydratačních procesů a tím rychlejší nárůst počáteční pevnosti.

1.5.5. SIKA ViscoCrete 2700

Kapalná přísada na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Dávkování je v rozmezí 0,2 – 2,5 % hmotnosti pojiva.

2. POSTUP NÁVRHU VLASTNÍ RECEPTURY

Vlastní receptura byla navržena podle metody uvedené v publikaci Pierra-Claude Aïtiniho Vysokohodnotný beton.

2.1. Vstupní údaje

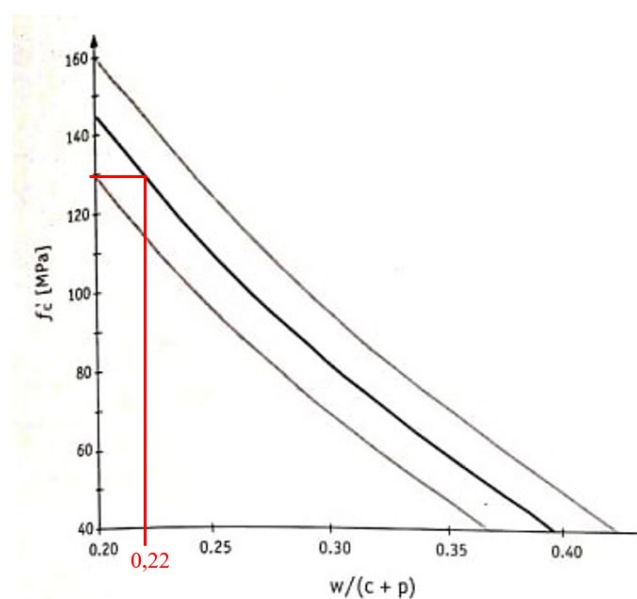
Metoda je založená na prvotní volbě vstupních údajů, od kterých se návrh dále odvíjí.

2.1.1. Tlaková pevnost

Prvním krokem bylo určení výsledné tlakové pevnosti betonu, která byla zvolena jako $f_c = 130$ MPa.

2.1.2. Vodní součinitel

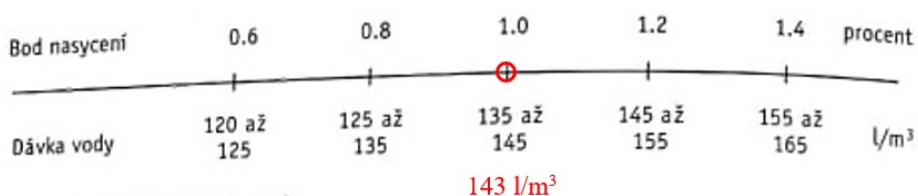
Na grafu, který udává závislost tlakové pevnosti na vodním součiniteli je určitelná přibližná hodnota vodního součinitele. Z obrázku 45 je patrné, že byl zvolen vodní součinitel o hodnotě 0,22.



Obrázek 45 Graf závislosti tlakové pevnosti na vodním součiniteli

2.1.3. Dávka záměsové vody

Na grafu (obrázku 46) je znázorněná závislost nasycení vody superplastifikátorem. Pro prvotní návrhy je podle publikace doporučeno začít na hodnotě 1,0.



Obrázek 46 Graf závislosti nasycení vody superplastifikátorem

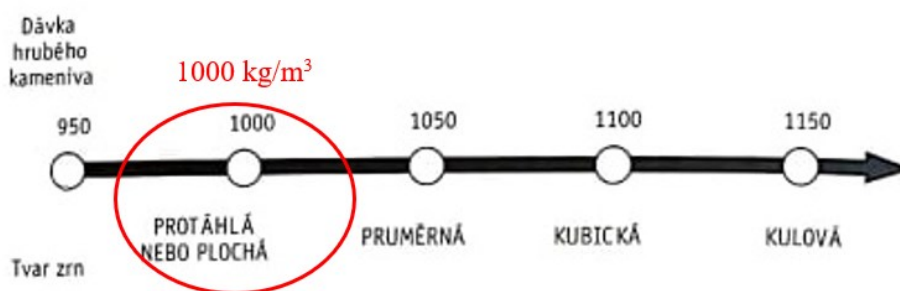
Pro volbu minimální dávky záměsové vody je tedy rozmezí 135 až 145 l/m³, přičemž do vlastní receptury byla zvolena hodnota 143 l/m³.

2.1.4. Obsah vzduchu

Aby bylo dosaženo co nejvyšších pevností, je nutné počítat s minimálním obsahem vzduchu. Většinou obsah vzduchu v UHPC nepřekročí 1 %. Proto pro návrh byla zvolena hodnota 0,6 %, což lze také považovat za 0,6 l/m³.

2.1.5. Dávka hrubého kameniva

Podle tvaru zrna hrubého kameniva je odvoditelná jeho dávka v navrhované záměsi. Pokud tvar zrna není znám, publikace doporučuje začít na hodnotě 1000 kg/m³. S touto hodnotou nicméně nebude počítáno, jelikož poměr frakcí je již určený z optimální křivky zrnitosti viz obrázek 48.

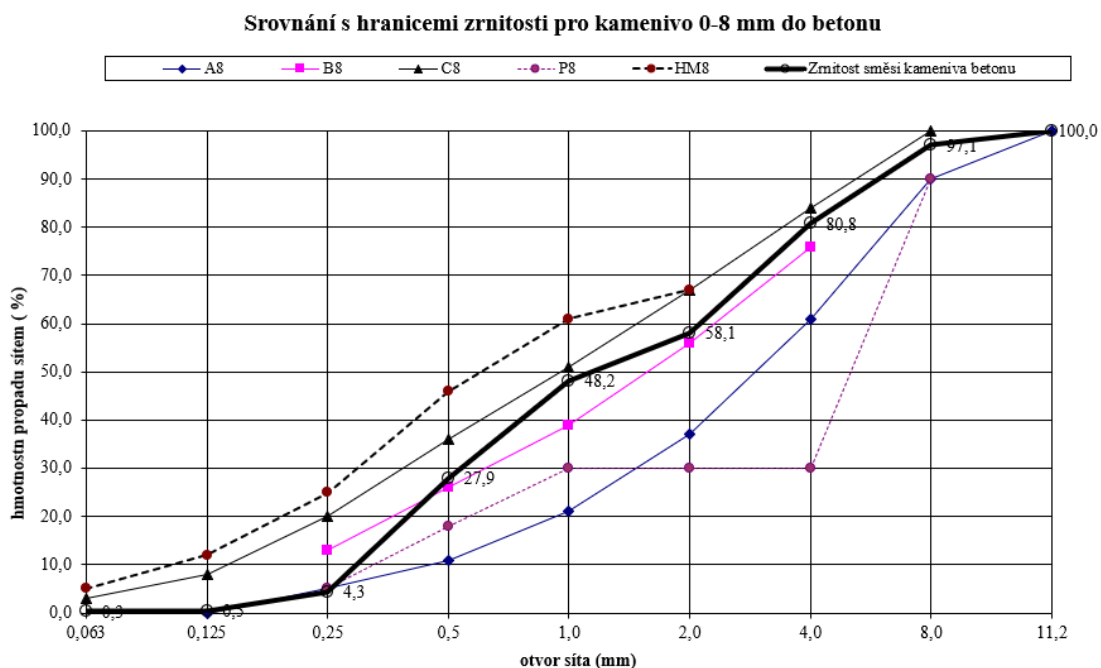


Obrázek 47 Určení dávky hrubého kameniva v závislosti na tvaru zrna

Díky síťovým propadům jednotlivých frakcí kameniva a optimální křivce zrnitosti obdržené od firmy Cemex, bylo možno navrhnout nejvhodnější křivku zrnitosti z použitých kameniv, a tak i jejich poměry. Základní údaje o kamenivu byly převzaty z technických listů.

Frakce kameniva	Dávka [kg/m ³]	Obj. hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]
Čeperka 0/2	390	2 600	1,2
Smiřice 0/4	600	2 590	1,0
Žumberk 4/8	560	2 860	0,2

Tabulka 4 Charakteristiky použitého kameniva do vlastní receptury



Obrázek 48 Optimalizovaná křivka zrnitosti na základě poměrů kameniva

Jako pojivo byla použita dávka cementu CEM I 52,5 R Prachovice a mikrosiliky.

Superplastifikátor byl použit CX Isoflex 535 o hustotě 1 056 kg/m³ s obsahem sušiny 29,4 %.

Souhrnná tabulka receptury **UHPC_3465M**:

Pevnost v tlaku f_c [MPa]	130
Vodní součinitel	0,22
Dávka záměsové vody [l/m ³]	143
Obsah vzduchu [%]	0,6
Kamenivo	
Obsah hrubého kameniva [kg/m ³]	590
Frakce	Čeperka 0/2; Smiřice 0/4; Žumberk 4/8
Dávka [kg/m ³]	390; 600; 560
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2 600; 2 590; 2 860
Nasákavost [%]	1,2; 1,0; 0,2

Pojivo	
Cement	CEM I 52,5 R Prachovice
Objemová hmotnost mikrosiliky [kg/m ³]	200
Superplastifikátor	
Název	CX Isoflex 535
Hustota [kg/m ³]	1 056
Obsah sušiny [%]	29,4

Tabulka 5 Shrnutí charakteristik použitých složek receptury UHPC_3465M

2.2. Výpočet receptury

2.2.1. Tabulka A

Do této tabulky se vepíše zbylá pojiva, jejich měrná hmotnost v g/cm³ a jejich poměr v procentech.

2.2.2. Tabulka superplastifikátoru

- **Buňka 15:** Výpočet hmotnosti sušiny v superplastifikátoru (M_{sol}). Podle výrobce je doporučená dávka 0,2 – 2,0 % hmotnosti pojiva.

M_{sol} Hmotnost sušiny v superplastifikátoru

B Hmotnost pojiva

d Doporučená dávka sušiny v procentech vzhledem k celkové hmotnosti pojiva (volíme podle doporučení výrobce)

G_{sup} Hustota látky (superplastifikátoru)

$$M_{sol} = B * \frac{d}{100} = 660 * \frac{1,65}{100} = 10,90 \text{ kg}$$

- **Buňka 24:** Výpočet celkového objemu superplastifikátoru V_{lig} (tekutiny).

$$V_{lig} = \frac{M_{sol}}{s * G_{sup}} * 100 = \frac{1,65}{29,4 * 1056} * 100 = 0,35108 * 1000 = 35,1 \text{ l}$$

- **Buňka 21:** Výpočet objemu vody v superplastifikátoru V_{wat} .

$$V_{wat} = V_{lig} * G_{sup} * \left(\frac{100 - s}{100} \right) = 0,351 * 1056 * \left(\frac{100 - 29,4}{100} \right) = 26,2 \text{ l}$$

- **Buňka 11:** Výpočet objemu sušiny v superplastifikátoru V_{sol} .

$$V_{sol} = V_{lig} - V_{wat} = 35,1 - 26,2 = 8,9 \text{ l}$$

2.2.3. Tabulka kameniva

- **Buňka G_{нрок}**: Doplnění objemové hmotnosti kameniva ve stavu nasyceného a povrchově osušeného kameniva.
- **Buňka w_{abs}**: Doplnění nasákavosti kameniv.
- **Buňka w_{tot}**: Doplnění celkového (aktuálního) obsahu vody v kamenivu. Jelikož bylo kamenivo vždy 100% vysušené, do těchto buněk je vyplněna nula.
- **Buňka w_h**: Výpočet vlhkosti kameniva. Pokud vyjde záporná, znamená to, že kamenivo ze záměsové vody nasákne (absorbuje) určité množství vody, které bude chybět k dosažení požadované konzistence. Naopak pokud bude vlhkost kladná, bude kamenivo do směsi vnášet nadbytečnou vodu, která zvýší vodní součinitel.

$$w_h = w_{tot} - w_{abs} = 0 - 0,2 = -0,2\%$$

2.2.4. Tabulka záměsi

- **Buňka 1**: Doplnění vodního součinitele. (0,22)
- **Buňka 2**: Doplnění množství záměsové vody. (143 l)
- **Buňka 3**: Výpočet množství pojiva.

$$b = \frac{143}{0,22} = 660 \text{ kg/m}^3$$

- **Buňky 4-1; 4-2**: Doplnění hodnot poměrů pojiv.
- **Buňka 5**: Doplnění obsahu hrubého kameniva, kde by měla být původně hodnota 1 000 kg/m³, nicméně podle výsledků optimální křivky zrnitosti bude doplněna hodnota 560 kg/m³.
- **Buňka 6**: Doplnění obsahu vzduchu. (0,6 %)
- **Buňka 7**: Doplnění nasycení superplastifikátorem.
- **Buňka 8-1; 8-2**: Výpočet objemu pojiv.

$$V_{cem} = \frac{550}{3,14} = 175 \text{ l/m}^3$$

$$V_{sil} = \frac{110}{2,2} = 50 \text{ l/m}^3$$

- **Buňka 9**: Výpočet objemu hrubého kameniva.

$$V_{agr} = \frac{560}{2,86} = 195,80 \text{ l/m}^3$$

- **Buňka 10**: Výpočet objemu vzduchu.

$$V_{air} = 0,6 * 10 = 6 \text{ l/m}^3$$

- **Buňka 11**: Opsání hodnoty z tabulky superplastifikátoru.

- **Buňka 12:** Doplnění objemu 1000 l.
- **Buňka 13:** Součet vyplněných buněk v druhém sloupci odečtený od buňky 12. Tímto postupem je získán objem drobného kameniva.

$$1000 - 578,9 = 421,1 \text{ l/m}^3$$
- **Buňka 14:** Zpětně dopočítání hmotnosti drobného kameniva.
- **Buňka 15:** Opsání hodnoty z tabulky superplastifikátoru.
- **Buňka 16:** Sečtení buněk ve třetím sloupci pro získání orientační objemové hmotnosti čerstvého betonu.
- **Buňka 17:** Hmotnost kameniva vynásobená vztahem $1 + \frac{w_h}{100}$
- **Buňka 18:** Vzájemné odečtení hmotností kameniva z buněk 5 a 17.

$$560 - 558,9 = 1,1 \text{ l}$$

To znamená, že bude potřeba o 1,1 litru záměsové vody navíc, aby bylo dosaženo stejné konzistence.
- **Buňka 19:** Stejně jako v buňce 17.
- **Buňka 20:** Stejně jako v buňce 18.
- **Buňka 21:** Opíše se hodnota z tabulky superplastifikátoru a doplní se záporné znaménko, takže voda obsažená v superplastifikátoru se bude odečítat.
- **Buňka 22:** Sečtení hodnot v buňkách 18; 20; 21.

$$1,1 + 11 + (-26,2) = -14,1 \text{ l}$$

Dávka záměsové vody bude tedy snížena o 14,1 l.
- **Buňka 23:** Zde se doplní dávka záměsové vody po odečtení hodnoty z buňky 22.

$$143 - 14,1 = 128,9 \text{ l}$$
- **Buňka 24:** Opíše se hodnota z tabulky superplastifikátoru.
- **Buňka 25–30:** Doplní se výsledné hodnoty, které vzniknou vynásobením buněk ve sloupci 5 hodnotou požadovaného objemu záměsi.

Jelikož byla použita malá míchačka o objemu 10 l, požadovaný objem záměsi byl 7,5 litrů.

Pro výpočet byla použita vzorová tabulka návrhu směsi z publikace „Pierre-Claude Aïtcin – Vysokohodnotný beton“ [5].

Záměs I.D.: UHPC_3465M

Tabulka návrhu směsi

Pevnost v tlaku : MPa

Tabulka A	G_{sup}	%
Cement	3.14	85 %
Rw Silica	2.2	15 %

Kamenivo	G_{NPOK}	%		
		w_{abs}	w_{tot}	w_h
Hrubé	2860	0,2 %	0 %	-0,2 %
Jemné	2600	1,1 %	0 %	-1,1 %

$$w_h = w_{tot} - w_{abs}$$

$$M = M_{NPOK} (1 + h)$$

SUPERPLASTIFIKÁTOR		$M_{sol} = B \cdot \frac{d}{100}$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{s \cdot G_{sup}} \cdot 100$	$V_w = V_{liq} \cdot G_{sup} \cdot \left(\frac{100-s}{100}\right)$	$V_{sol} = V_{liq} - V_w = V_{liq} \left[1 - \left(\frac{100-s}{100}\right) \cdot G_{sup}\right]$
Obj. hm. (G_{sup})	Obsah suš. s (%)	15	E 24	F 21	G 11
1056	29,4	10,9 kg/m ³	35,1 l/m ³	26,2 l/m ³	8,90 l/m ³

MATERIÁL	1		2		3		4		5		6	
	Hmotnost kg/m ³		Objem l/m ³		Dávka při NPOK kg/m ³		Korekce vody l/m ³		Složení			
									1 m ³		Záměs	
VODA	2 143		2 143		2 143				23 128,9		25 0,96	
CEMENT	3		4-1		8-1				4-1		26-1	
	660		550		175,16				550		4,125	
			4-2		8-2				4-2		26-2	
			110		50				110		0,825	
			4-3		8-3				4-3		26-3	
			—		—				—		—	
HRUBÉ KAMENIVO	5 560		9 195,8		5 560		18 +1,1		17 558,9		27 4,19	
JEMNÉ KAMENIVO			13 421,1		14 990		20 +11,0		19 979,1		28 7,34	
VZDUCH	PROCENT		10									
	6 0,6 %		6,0		—							
SUPERPLASTIFIKÁTOR	7 1,0 %		11 8,90		15 10,9		21 - 26,2		24 35,1		29 0,26	
CELKEM			12 1000		16 2365		22 -14,1				30 17,7	

$$Záměs = 7,51 \rightarrow 0,0075 \text{ m}^3 \rightarrow f = 0,0075$$

Obrázek 49 Vyplněná tabulka pokusné záměsi z publikace Vysokohodnotné betony

3. PŘEHLED DALŠÍCH APLIKOVANÝCH ZÁMĚSÍ

V rámci experimentu bylo navrženo celkem 36 různých receptur. Receptury byly navrženy technologem firmy Cemex nebo vznikly při vzájemné spolupráci. Vlastní přínos byl potom také aktivní účastí autora bakalářské práce při vlastní výrobě, zkoušení čerstvého betonu a při odformování zkušebních těles.

Kód záměsí	UHPC_126	UHPC_227	UHPC_328	UHPC_429	UHPC_530D	UHPC_631	UHPC_732	UHPC_833	UHPC_934	UHPC_1035D
CEM I 52,5 R	-	-	500	550	550	-	-	550	580	550
CEM II/ A-M 42,5 R	500	550	-	-	-	500	500	-	-	-
RW Silica	100	100	100	100	100	100	100	80	70	100
Voda	175	175	175	175	175	160	175	173	190	194
Čeperka 0/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Čeperka 0/4	750	740	750	740	740	-	-	-	-	-
Smiřice 0/4	-	-	-	-	-	755	745	740	1500	715
Čeperka 4/8	800	760	800	760	760	-	-	-	-	-
Žumberk 4/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Libodřice 4/8	-	-	-	-	-	805	765	760	-	720
Žumberk 8/16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CX ISOLFEX 535	22	22	22	22	25	25	25	25	28	25
ISOCOAST 2700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISOCOAST 5800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VISCOCRETE 2700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MG ACE 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Master fiber 4820	-	-	-	-	40	-	-	-	-	70
Vodní součinitel	0,29	0,27	0,29	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,30

Tabulka 6 Složení receptur UHPC_126 - UHPC_1035D - část. 1

Kód záměsi	UHPC_1136	UHPC_1237	UHPC_1338	UHPC_1439	UHPC_1540	UHPC_1641	UHPC_1742	UHPC_1843	UHPC_1944	UHPC_2045
CEM I 52,5 R	550	550	100	150	270	500	550	550	600	650
CEM II/ A-M 42,5 R	-	-	450	400	280	-	-	-	-	-
RW Sillica	110	110	110	110	110	110	110	100	70	50
Voda	190	190	190	175	175	175	175	167	175	190
Čeperka 0/2	-	-	-	-	-	310	310	740	250	220
Čeperka 0/4	355	335	-	-	-	-	-	-	-	-
Smiřice 0/4	355	375	690	690	690	425	380	-	445	455
Čeperka 4/8	-	-	-	-	-	-	110	-	-	-
Žumberk 4/8	340	770	780	780	780	355	-	750	775	770
Libodřice 4/8	430	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Žumberk 8/16	-	-	-	-	-	430	780	-	-	-
CX ISOLFEX 535	23	23	20	20	20	20	20	20	20	27
ISOCOAST 2700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISOCOAST 5800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VISCOCRETE 2700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MG ACE 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Master fiber 4820	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vodní součinitel	0,29	0,29	0,29	0,27	0,27	0,29	0,27	0,26	0,25	0,25

Tabulka 7 Složení receptur UHPC_1136 - UHPC_2045D - část. 2

Kód záměsi	UHPC_2146	UHPC_2247	UHPC_2348	UHPC_2449	UHPC_2550	UHPC_2651	UHPC_2752	UHPC_2853	UHPC_2954	UHPC_3055D
CEM I 52,5 R	700	650	650	650	650	-	570	-	590	150
CEM II/ A-M 42,5 R	-	-	-	-	-	650	-	650	-	400
RW Sillica	30	70	70	70	70	110	140	110	140	110
Voda	195	175	175	175	175	160	155	160	156	155
Čeperka 0/2	200	225	225	225	225	325	325	335	335	-
Čeperka 0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smiřice 0/4	450	465	465	465	465	395	430	395	395	635
Čeperka 4/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Žumberk 4/8	765	795	795	795	795	795	390	785	795	745
Libodřice 4/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Žumberk 8/16	-	-	-	-	-	-	465	-	-	-
CX ISOLFEX 535	14,7	20	-	-	-	16	21	-	-	20
ISOCOAST 2700	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-
ISOCOAST 5800	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-
VISCOCRETE 2700	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-
MG ACE 300	-	-	-	-	-	-	-	20	31	-
Master fiber 4820	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
Vodní součinitel	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21	0,23	0,21	0,22	0,25

Tabulka 8 Složení receptur UHPC_2146 - UHPC_3055D - část. 3

Kód záměsi	UHPC_3162	UHPC_3263	UHPC_3364	UHPC_3465M	UHPC_3566	UHPC_3667
CEM I 52,5 R	550	550	550	550	550	550
CEM II/ A-M 42,5 R	-	-	-	-	-	-
RW Sillica	110	110	110	110	110	110
Voda	143	143	143	128	143	143
Čeperka 0/2	300	500	-	390	290	390
Čeperka 0/4	580	580	-	-	-	-
Smiřice 0/4	-	-	1000	600	640	600
Čeperka 4/8	-	-	-	-	-	-
Smiřice 4/8	-	-	-	-	-	610
Žumberk 4/8	78	640	570	560	440	-
Libodřice 4/8	-	-	-	-	-	-
Žumberk 8/16	-	-	-	-	240	-
CX ISOLFEX 535	40	30	41	35	35	35
ISOCOAST 2700	-	-	-	-	-	-
ISOCOAST 5800	-	-	-	-	-	-
VISCOCRETE 2700	-	-	-	-	-	-
MG ACE 300	-	-	-	-	-	-
Master fiber 4820	-	-	-	-	-	-
Vodní součinitel	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21

Tabulka 9 Složení receptur UHPC_3162 - UHPC_3667 - část. 4

Tabulka 10 zobrazuje přehled všech receptur a případné rozdíly mezi nimi.

Kód záměsi	Rozdíl
UHPC_126 – UHPC_227	Různá dávka kameniva, CEM II/A-M 42,5 R
UHPC_328 – UHPC_429	Různá dávka kameniva, CEM I 52,5 R
UHPC_530D	Receptura UHPC_429 + drátky
UHPC_631 – UHPC_732	Různá dávka kameniva i CEM II/A-M 42,5 R
UHPC_833 – UHPC_934	Různá dávka kameniva i CEM I 52,5 R
UHPC_1035D	Modifikovaná UHPC_833 + drátky
UHPC_1136 – UHPC_1237	Různá dávka a poměr kameniva, CEM I 52,5 R
UHPC_1338 – UHPC_1540	Poměr CEM I 52,5 R a CEM II/A-M 42,5 R vůči kamenivu
UHPC_1641 – UHPC_1742	Rozdílná dávka a poměr kameniva Rozdílná dávka CEM I 52,5 R
UHPC_1843 – UHPC_2146	Rozdílný poměr kameniva Rozdílná (zvyšující se) dávka CEM I 52,5 R Rozdílná (snižující se) dávka mikrosiliky
UHPC_2247 – UHPC_2348	Porovnání superplastifikátorů Isoflex 535 a SIKA Viscocrete 2700
UHPC_2449 – UHPC_2550	Porovnání superplastifikátorů Isocoast 5800 a 9140
UHPC_2651 – UHPC_2752	Rozdílná dávka kameniva Rozdílná třída cementu
UHPC_2853 – UHPC_2954	Porovnání superplastifikátoru MG ACE 300 a rozdílných tříd cementů
UHPC_3055D	Receptura UHPC_1439 + drátky
UHPC_3162 – UHPC_3667	Porovnání rozdílné křivky zrnitosti a dávky superplastifikátoru

Tabulka 10 Přehled receptur a rozdílů mezi nimi

4. VÝROBA ČERSTVÉHO BETONU

Před mícháním bylo nutno připravit měřicí pomůcky a navážit vstupní suroviny.

4.1. Míchací technika

Záměsi se míchaly převážně v malé kbelíkové míchačce o objemu 10 l (viz obrázek 50) anebo v laboratorní míchačce s nuceným oběhem o objemu 80 l (viz obrázek 51).

Před mícháním byly stěny a lopatky míchačky opatřeny separačním přípravkem, aby se zamezilo nalepování pojiva na lopatky.



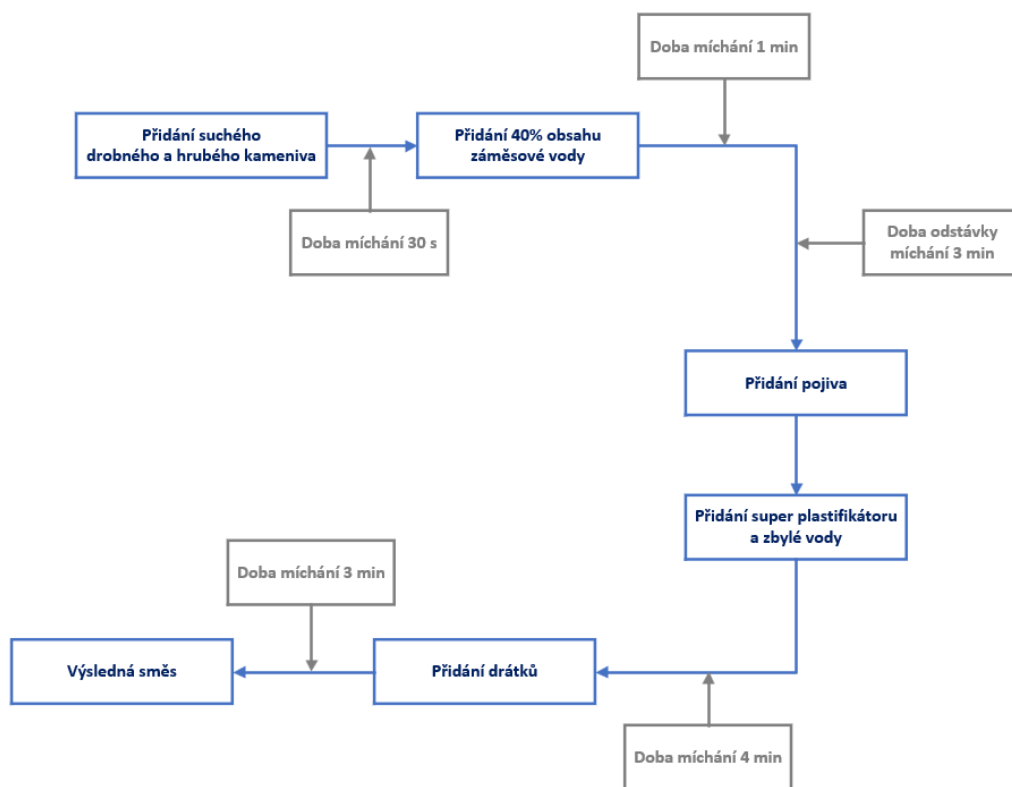
Obrázek 50 Malá kbelíková míchačka



Obrázek 51 Laboratorní míchačka s nuceným oběhem

4.2. Postup míchání

Jako první se do míchačky nasypalo navážené kamenivo, které se míchalo 30 sekund a k němuž bylo poté přidáno 40 % obsahu záměsové vody. Po nalití vody se směs vody a kameniva míchala další minutu, aby se voda s kamenivem dobře promíchala. Poté se míchačka zastavila na dobu 3 minut, aby kamenivo mohlo absorbovat vmísenou vodu. Po této době byl přidán cement a křemičitý úlet. Po spuštění míchání se do směsi přilil zbylý obsah vody společně s dávkou superplastifikátoru. Aby se složky homogenně promísily a superplastifikátor začal plně účinkovat, celou směs bylo potřebné míchat 7 minut. Pokud byla ve směsi přítomna ocelová vlákna, byla přidána ve 4. minutě míchání směsi, tak aby po dobu 3 minut došlo k řádnému promíchání.



Obrázek 52 Schéma postupu míchání receptur v experimentální části

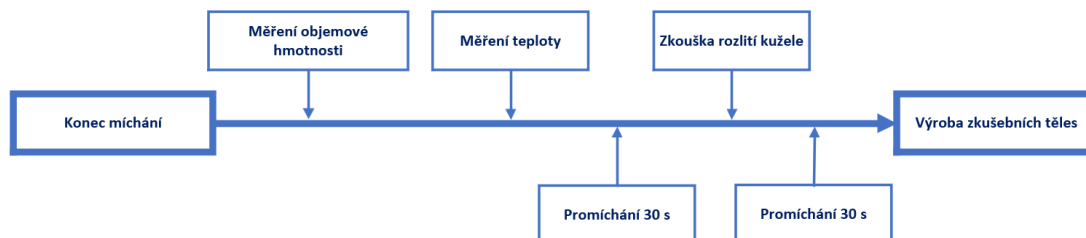
U některých záměsí docházelo po ukončení procesu míchání k vytlačování mikrosiliky superplastifikátorem, což se projevovalo tmavošedivým napěněným filmem na hladině. Postupně došlo k úplnému nasycení zrn křemičitého úletu, a tím k úplné homogenizaci čerstvého betonu.



Obrázek 53 Vytlačování mikrosiliky superplastifikátorem po vypnutí míchačky

5. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU

Zkoušení čerstvého betonu bylo prováděno v následujícím postupu. Jako první byla naměřena objemová hmotnost, dále teplota a nakonec bylo zkoušeno rozliti kužele.



Obrázek 54 Časová osa a pořadí zkoušek čerstvého betonu

5.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu

Po domíchání záměsi se odebralo množství betonu, kterým se naplnila nádoba a poté se na digitální váze zvažila, aby bylo možné zjistit objemovou hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlením na 10 kg/m^3 .

U velkých záměsí se jednalo o kalibrovanou nádobu o objemu 8 litrů a u malých kbelíkových záměsí se jednalo o kalibrovanou nádobu o objemu 1 litru.

Kód záměsi	Objemová hmotnost čerst. betonu [kg/m^3]	Kód záměsi	Objemová hmotnost čerst. betonu [kg/m^3]
UHPC_126	2 330	UHPC_1944	2 390
UHPC_227	2 360	UHPC_2045	N/A
UHPC_328	2 340	UHPC_2146	2 410
UHPC_429	2 320	UHPC_2247	2 420
UHPC_530D	2 360	UHPC_2348	2 430
UHPC_631	2 440	UHPC_2449	N/A
UHPC_732	2 420	UHPC_2550	N/A
UHPC_833	2 430	UHPC_2651	2 420
UHPC_934	2 210	UHPC_2752	2 420
UHPC_1035D	2 430	UHPC_2853	2 420
UHPC_1136	2 420	UHPC_2954	2 410
UHPC_1237	2 360	UHPC_3055D	2 470
UHPC_1338	2 370	UHPC_3162	2 430
UHPC_1439	2 410	UHPC_3263	2 410
UHPC_1540	2 440	UHPC_3364	2 390
UHPC_1641	2 460	UHPC_3465M	2 410
UHPC_1742	2 400	UHPC_3566	2 410
UHPC_1843	2 370	UHPC_3667	2 410

Tabulka 11 Objemová hmotnost čerstvého betonu

5.2. Teplota čerstvého betonu

Teplota byla měřena kontaktním teploměrem ponořeným do čerstvého betonu. Teplota prostředí byla stálá 20 °C, protože byla regulována laboratorním TZB.

Kód záměsi	Teplota čerstvého betonu [°C]	Kód záměsi	Teplota čerstvého betonu [°C]
UHPC_126	24,8	UHPC_1944	24,9
UHPC_227	24,7	UHPC_2045	N/A
UHPC_328	25,4	UHPC_2146	25,2
UHPC_429	25,9	UHPC_2247	N/A
UHPC_530D	26,3	UHPC_2348	24,3
UHPC_631	25,0	UHPC_2449	N/A
UHPC_732	24,9	UHPC_2550	N/A
UHPC_833	25,9	UHPC_2651	23,9
UHPC_934	25,7	UHPC_2752	23,9
UHPC_1035D	26,0	UHPC_2853	24,4
UHPC_1136	22,2	UHPC_2954	23,8
UHPC_1237	23,4	UHPC_3055D	23,8
UHPC_1338	22,6	UHPC_3162	24,7
UHPC_1439	23,3	UHPC_3263	25,2
UHPC_1540	22,1	UHPC_3364	24,9
UHPC_1641	26,2	UHPC_3465M	24,6
UHPC_1742	24,8	UHPC_3566	24,2
UHPC_1843	25,9	UHPC_3667	24,9

Tabulka 12 Naměřené teploty čerstvého betonu

5.3. Zkouška rozlití kužele

Jelikož bylo UHPC vyráběno s vlastnostmi odpovídajícími samozhutnitelnému betonu (SCC), zkouška rozlitím byla provedena podle normy ČSN EN 12350-8 [73]. Optimální rozměr rozlití by se měl pohybovat okolo 650–750 mm, což odpovídá třídě rozlití SF2. Pokud je rozlití pod 650 mm, čerstvý beton je hustý a špatně by zatékal; a pokud je více jak 750 mm, dochází k segregaci cementové pasty, a čerstvý beton se stává nehomogenní.

Pro určení konzistence bylo použito normových zkušebních zařízení, která jsou popsána v normě ČSN EN 12350-1 [74]. V častějších případech se pro zkoušku rozlití používalo malého rozlivového terče o maximálním průměru 300 mm spolu s malým kuželem.

Těsně před zkouškou byl povrch desky a kužele navlhčen a bylo odebráno množství čerstvého betonu potřebné k naplnění kužele.



Obrázek 55 Měření průměru rozlivu na malém rozlivovém terči



Obrázek 56 Měření průměru rozlivu na velkém rozlivovém terči

Kód záměsi	Průměr malého rozlitého kužele [mm]	Průměr velkého rozlitého kužele [mm]
UHPC_126	300	N/A
UHPC_227	290	N/A
UHPC_328	280	N/A
UHPC_429	270	N/A
UHPC_530D	290	N/A
UHPC_631	260	660
UHPC_732	280	740
UHPC_833	280	740
UHPC_934	220	530
UHPC_1035D	250	680
UHPC_1136	270	690
UHPC_1237	290	730
UHPC_1338	280	730
UHPC_1439	270	650
UHPC_1540	280	710
UHPC_1641	290	740
UHPC_1742	290	750
UHPC_1843	270	690
UHPC_1944	300	790
UHPC_2045	N/A	N/A
UHPC_2146	310	800
UHPC_2247	280	690
UHPC_2348	280	N/A
UHPC_2449	N/A	N/A
UHPC_2550	N/A	N/A
UHPC_2651	N/A	600
UHPC_2752	N/A	590
UHPC_2853	280	680
UHPC_2954	280	680
UHPC_3055D	N/A	630
UHPC_3162	N/A	750
UHPC_3263	N/A	630
UHPC_3364	N/A	700
UHPC_3465M	N/A	700
UHPC_3566	N/A	740
UHPC_3667	N/A	680

Tabulka 13 Průměr rozlivu malého a velkého terče

5.4. Zkouška obsahu vzduchu

Jelikož navrhované UHPC je neprovzdušněné a není použita žádná provzdušňovací přísada, obsah vzduchu v této fázi není zcela žádoucí. Proto zkouška obsahu vzduchu čerstvého betonu nebyla prováděna u všech záměsí, ale jen u některých z nich, aby byla známa orientační hodnota. Zkouška byla prováděna tlakoměrnou metodou v souladu s normou ČSN EN 12350– 7 [75].



Obrázek 57 Zařízení pro měření obsahu vzduchu čerstvého betonu

Kód záměsi	Obsah vzduchu čerstvého betonu [%]	Kód záměsi	Obsah vzduchu čerstvého betonu [%]
UHPC_126	N/A	UHPC_1944	N/A
UHPC_227	N/A	UHPC_2045	N/A
UHPC_328	N/A	UHPC_2146	0,6
UHPC_429	N/A	UHPC_2247	N/A
UHPC_530D	N/A	UHPC_2348	1,1
UHPC_631	0,7	UHPC_2449	N/A
UHPC_732	N/A	UHPC_2550	N/A
UHPC_833	0,7	UHPC_2651	2,8
UHPC_934	3,9	UHPC_2752	3,3

Kód záměsi	Obsah vzduchu čerstvého betonu [%]	Kód záměsi	Obsah vzduchu čerstvého betonu [%]
UHPC_1035D	N/A	UHPC_2853	N/A
UHPC_1136	N/A	UHPC_2954	N/A
UHPC_1237	N/A	UHPC_3055D	0,6
UHPC_1338	0,8	UHPC_3162	N/A
UHPC_1439	N/A	UHPC_3263	N/A
UHPC_1540	N/A	UHPC_3364	N/A
UHPC_1641	0,8	UHPC_3465M	N/A
UHPC_1742	0,7	UHPC_3566	N/A
UHPC_1843	0,7	UHPC_3667	N/A

Tabulka 14 Obsah vzduchu čerstvého betonu

UHPC je vyráběn jako neprovzdušněný, a tudíž obsah vzduchu v čerstvém UHPC je očekáván pod 1 % objemu.

U receptur UHPC_934; _2651; _2752 se obsah vzduchu blíží k hodnotě 5 % (obsahu vzduchu pro provzdušněné SCC), která je definována normou ČSN EN 206+A1. Z toho vyplývá, že hodnoty naměřené u těchto receptur nejsou relevantní, a proto tedy ze souboru výsledků byla vyřazena.

6. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Formy zkušebních těles byly před plněním opatřeny separačním přípravkem. Jako zkušební tělesa se vyráběla:

- krychle 100x100x100 mm – kód K100
- krychle 150x150x150 mm – kód K150
- válce Ø150, h= 300 mm – kód V300
- hranoly (trámce) 100x100x400 mm – kód T160
- hranoly (trámce) 150x150x700 mm – kód T400

Tělesa byla vyráběna pro zkoušky ve stáří betonu:

- 1denní
- 7denní
- 28denní
- 56denní
- 90denní

Každá sada těles se vyráběla v počtu minimálně 2 kusů, aby bylo možné hodnoty výsledků statisticky zpracovat (konkrétně zprůměrovat).

Ukládání probíhalo ručně pomocí zednické lžice a zednické fanky. Uložený čerstvý beton se nijak nehtnil. Před nabíráním směsi do fanky bylo nutno směs lehce promíchat, aby nabraný čerstvý beton byl homogenní.

Vyrobená tělesa byla na 24 hodin uložena do prostředí se stálou teplotou 20 ± 2 °C. Po uplynulé době 24 hodin byly vzorky těles odformovány.



Obrázek 58 Ukládání čerstvého UHPC do forem trámů (T400)



Obrázek 59 Výroba zkušebních tělese – krychle (K150)



Obrázek 60 Výroba zkušebních těles – válec (V300)



Obrázek 61 Naplněné formy krychlí (K100)



Obrázek 62 Odformovaná zkušební tělesa K100 po 24 hodinách



Obrázek 63 Odformovaná zkušební tělesa V300 po 24 hodinách



Obrázek 64 Detail povrchu UHPC po odbednění

7. OŠETŘOVÁNÍ

Vzorky, které byly určeny k delšímu zrání (28denní, 56denní, 90denní) byly uloženy do regálů v komoře o stálé teplotě 20 ± 2 °C a vlhkosti 95 ± 5 %. Tělesa byla ošetřována v souladu s normou ČSN EN 12390-2 [76].



Obrázek 65 Uložená tělesa do regálů v komoře

Ostatní tělesa byla uložena do vodní lázně se stálou teplotou 20 ± 2 °C.



Obrázek 66 Ukládání zkušebních těles do vodní lázně



Obrázek 67 Trámce uložené ve vodní lázni

8. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU

8.1. Měření a vážení těles

Ještě předtím, než byla tělesa uložena do vodní lázně či komory, bylo nutné vzorky změřit a zvážit. Na základě těchto výsledků je určitelná objemová hmotnost ztvrdlého UHPC. Rozměry byly měřeny posuvným měřítkem anebo kalibrovaným kovovým měřidlem.



Obrázek 68 Vážení zkušebních těles a měření posuvným měřítkem



Obrázek 69 Měření délky ocelovým kalibrovaným měřidlem

Kód záměsí	7denní	28denní	56denní	90denní
UHPC_126	2 320	2 320	2 340	2 350
UHPC_227	2 330	2 350	2 340	2 350
UHPC_328	2 320	2 330	2 350	2 360
UHPC_429	2 310	2 350	2 290	2 360
UHPC_530D	2 370	2 370	N/A	2 350
UHPC_631	2 470	2 470	2 470	2 520
UHPC_732	2 450	2 450	2 470	2 450
UHPC_833	2 440	2 430	2 470	2 460
UHPC_934	2 250	2 270	2 270	2 240
UHPC_1035D	2 460	2 460	2 430	2 430
UHPC_1136	2 400	2 420	2 420	2 450
UHPC_1237	2 120	2 410	2 380	2 410
UHPC_1338	2 400	2 410	2 390	2 420
UHPC_1439	2 430	2 420	2 410	2 440
UHPC_1540	N/A	2 430	N/A	2 430
UHPC_1641	2 460	2 440	2 380	2 410
UHPC_1742	2 400	2 440	2 370	2 420
UHPC_1843	2 430	2 410	2 450	2 420
UHPC_1944	2 440	2 470	2 440	2 410
UHPC_2045	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2146	2 440	2 460	2 440	2 480
UHPC_2247	2 470	2 410	2 460	2 430
UHPC_2348	2 420	2 410	2 410	2 400
UHPC_2449	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2550	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2651	2 450	2 450	2 440	2 460
UHPC_2752	2 460	2 460	2 460	2 460
UHPC_2853	2 450	2 430	2 460	2 440
UHPC_2954	2 460	2 470	2 450	2 440
UHPC_3055D	2 510	N/A	2 530	N/A
UHPC_3162	2 430	2 410	2 410	2 470
UHPC_3263	2 400	2 400	2 390	2 430
UHPC_3364	2 400	2 390	2 400	2 410
UHPC_3465M	2 420	2 420	2 380	2 420
UHPC_3566	2 320	2 330	2 340	2 430
UHPC_3667	2 440	2 420	2 440	2 350

Tabulka 15 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání

Z tabulky lze vyčíst, že u některých receptur má objemová hmotnost snižující se hodnoty, popřípadě velký rozptyl. V těchto případech se však jedná o relevantní výsledky, hodnota objemové hmotnosti může kolísat i o 60 kg/m^3 . Průměrná objemová hmotnost je po 28 tak 90 dnech zrání $2\,420 \text{ kg/m}^3$. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla provedena podle normy ČSN EN 12390-7 [77].

8.2. Zkouška pevnosti v tlaku

Krychelná pevnost byla zkoušena podle platné normy ČSN EN 12390-3 [78]. Ke zkoušce byly použity krychle o hranách 100 mm ($0,01 \text{ m}^2$) nebo 150 mm ($0,0225 \text{ m}^2$).

Krychelná pevnost byla zkoušena na tělesech stáří 7; 28; 56 a 90 dnů. Jelikož se ve všech recepturách vyskytuje dávka mikrosiliky, která je známa tím, že nárůst pevnosti betonu je za jejího užití nabývá v čase, a proto za **směrodatnou tlakovou pevnost jsou považovány výsledky na tělesech stáří 90 dnů**.

Ve většině případů byla zhotovována tělesa o hraně 100 mm. Jako **směrodatná tlaková pevnost** je považována ta zjištěná na **krychlích o hraně 150 mm**. Pro přepočítání pevnosti z K100 na K150 je použit následující vztah [79]:

$$f_{c,K150} = f_{c,K100} * 0,95$$

Rovnice 6 Rovnice pro přepočítání pevnosti v tlaku z menšího tělesa na větší [79]



Obrázek 70 Zkušební lis



Obrázek 71 Rozdrčené zkušební těleso K100 po tlakové zkoušce

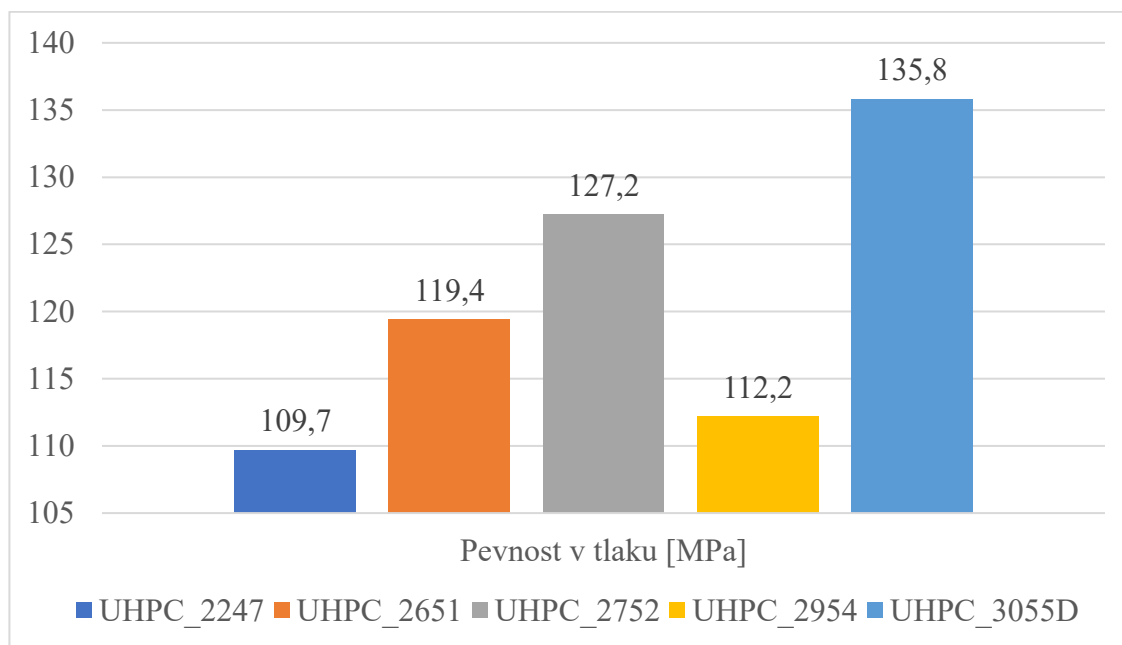
Kód záměsi	7denní	28denní	56denní	90denní
UHPC_126	68,4	79,6	82,3	88,3
UHPC_227	67,0	90,1	94,2	90,2
UHPC_328	72,5	93,0	102,9	78,0
UHPC_429	78,9	92,0	96,8	83,8
UHPC_530D	85,7	97,8	N/A	108,3
UHPC_631	71,2	97,8	97,5	101,5
UHPC_732	70,3	86,6	96,3	97,5
UHPC_833	78,4	85,3	86,8	94,8
UHPC_934	65,9	79,7	72,3	72,6
UHPC_1035D	78,8	100,5	102,6	105,7
UHPC_1136	76,1	98,9	95,6	102,9
UHPC_1237	75,2	87,6	103,5	97,2
UHPC_1338	75,3	81,3	96,5	86,0
UHPC_1439	77,1	96,2	92,7	103,5
UHPC_1540	N/A	89,7	N/A	89,9
UHPC_1641	82,7	97,1	102,1	108,6
UHPC_1742	73,1	84,4	104,2	105,6
UHPC_1843	79,9	52,7	82,0	91,7
UHPC_1944	79,8	105,4	108,0	102,6
UHPC_2045	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2146	79,2	95,4	105,8	107,7

UHPC_2247	90,0	97,2	109,7	109,7
UHPC_2348	73,5	96,5	82,4	107,3
UHPC_2449	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2550	N/A	N/A	N/A	N/A
UHPC_2651	91,4	112,0	126,1	119,4
UHPC_2752	89,4	105,8	125,2	127,2
UHPC_2853	84,7	104,9	100,3	96,3
UHPC_2954	87,2	107,5	114,8	112,2
UHPC_3055D	98,6	119,7	199,5	135,8
UHPC_3162	65,9	79,8	82,2	99,0
UHPC_3263	68,9	94,4	92,5	86,1
UHPC_3364	72,5	90,9	79,2	95,1
UHPC_3465M	71,0	95,1	70,9	81,2
UHPC_3566	77,0	88,0	80,1	106,3
UHPC_3667	80,0	91,2	110,4	101,1

Tabulka 16 Krychelná tlaková pevnost po 7, 28, 56 a 90 dnech

U zkušebních těles stáří 56 dnů záměsí UHPC_3162 až UHPC_3566 nastal prudký pokles tlakové pevnosti. Bohužel tuto skutečnost nelze adekvátně odůvodnit. Příčina této velké odchylky může spočívat např. ve špatné výrobě zkušebních těles, nebo v předčasném ukončení zkoušky. Na základě nepříznivých hodnot u těchto receptur dojde k jejich přemíchávce.

Z tabulky pevností bylo vybráno 5 receptur vykazujících nejvyšší pevnost po 90 dnech zrání.



Obrázek 72 Sloupcový graf porovnávající pět receptur s nejvyšší pevností

8.3. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Zkoušky byly prováděny v souladu s příslušnou normou ČSN P 73 2452 [80]. Pro zkoušky byly použity hranoly 100x100x400 mm (kód T160).

Kód záměsi	7denní	28denní	90denní
UHPC_126	10,0	11,6	N/A
UHPC_227	11,3	12,1	N/A
UHPC_328	11,2	12,3	N/A
UHPC_429	11,2	14,4	N/A
UHPC_530D	11,9	13,4	N/A
UHPC_631	N/A	11,2	N/A
UHPC_732	N/A	12,1	N/A
UHPC_833	N/A	13,1	N/A
UHPC_934	N/A	11,4	N/A
UHPC_1035D	11,5	13,2	N/A
UHPC_1136	N/A	N/A	N/A
UHPC_1237	12,6	16,6	15,6
UHPC_1338	10,8	14,4	15,4
UHPC_1439	13,1	13,9	16,7
UHPC_1540	12,0	14,9	15,7

Tabulka 17 Pevnost v tahu za ohybu po 7, 28 a 90 dnech

Kód záměsi	7denní	28denní	90denní
UHPC_126	74,4	90,4	N/A
UHPC_227	79,0	96,7	N/A
UHPC_328	70,9	96,6	N/A
UHPC_429	88,9	90,6	N/A
UHPC_530D	93,7	100,3	N/A
UHPC_631	N/A	N/A	N/A
UHPC_732	N/A	N/A	N/A
UHPC_833	N/A	N/A	N/A
UHPC_934	N/A	N/A	N/A
UHPC_1035D	N/A	N/A	N/A
UHPC_1136	N/A	N/A	N/A
UHPC_1237	93,3	107,5	128,7
UHPC_1338	83,5	65,2	128,0
UHPC_1439	91,5	106,1	120,5
UHPC_1540	88,5	107,4	119,8

Tabulka 18 Pevnost v tlaku na koncích trámečků po 7, 28 a 90 dnech

8.4. Zkouška mrazuvzdornosti

Pro zkoušku mrazuvzdornosti byly vyhotoveny dvě sady trámčů (T400) po dvou kusech. Jedna sada sloužila pro cyklování a následnou zkoušku tahu za ohybu (f_{cf}) a druhá sloužila jako referenční. Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena dle platné normy ČSN 73 122 [81]. Počet cyklů byl stanoven na 150 a stáří zkoušených těles bylo 28 dnů.



Obrázek 73 Zdrsnění povrchu zkušebního tělesa ocelovým kartáčem před zkouškou průsakem

Kód záměsi	Pevnost v tahu za ohybu srovnávací [MPa]	Pevnost v tlaku na koncích trámčů srovnávací [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu zmrazovaná [MPa]	Pevnost v tlaku na koncích trámčů zmrazovaná [MPa]	Součinitel mrazuvzdornosti betonu
UHPC_2651	12,5	112,5	11,0	109,1	88
UHPC_2752	11,9	109,1	10,8	118,1	91
UHPC_3055D	13,5	141,3	13,0	142,1	96

Tabulka 19 Pevnost tahu za ohybu zmrazovaných vzorků/ referenčních

8.5. Zkouška odolnosti proti CHRL

Pro tuto zkoušku byly zhotoveny válce \varnothing 150 mm, h= 300 mm. Tělesa byla zkoušena podle platné normy ČSN 73 1326 [26] metodou C. Počet cyklů byl stanoven na 125 cyklů.

Kód záměsi	Množství odpadu po 125 cyklech [g/m ²]
UHPC_2651	20
UHPC_2752	10
UHPC_3055D	10

Tabulka 20 Hmotnost odpadu po 125 cyklech zkoušky odolnosti proti CHRL

8.6. Zkouška průsaku tlakovou vodou

Za vodonepropustný je beton považován v případě, že hloubka průsaku tlakové vody nepřesáhne 20 mm. Zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 12390–8 [82].

Kód záměsi	Naměřená hloubka průsaku [mm]
UHPC_2651	9
UHPC_2752	4
UHPC_3055D	3

Tabulka 21 Hloubka průsaku tlakovou vodou

8.7. Modul pružnosti

V ČR existuje několik platných metod k určení statického modulu pružnosti betonu. První z metodik je popsána v normě ČN EN 12390–13 [20]. Referenční metodiku popisuje norma ČSN ISO 1920–10 [21], ze které vychází referenční dokument TP-ČBS-05.

Princip zkoušky a stanovení modulu pružnosti spočívá v měření deformace v závislosti na napětí od vyvozeného tlakového zatížení. Pro zkoušku se používá válec Ø 150 mm, h= 300 mm (poměr stran 2:1). Počet zkušebních těles se rozdělí na dvě části, kdy jedna část slouží pro stanovení tlakové pevnosti a druhá část je určena pro samotné stanovení modulu pružnosti. Deformace je většinou měřena pomocí tenzometrů, které se přilepí protilehle na povrch těles. Minimální počet jsou tři měřící zařízení.

Princip samotné zkoušky se u obou norem prakticky neliší. Těleso se cyklicky zatěžuje a odlehčuje, a přitom se zapisují hodnoty deformace při určitém zatížení. Normy se rozcházejí v počtu cyklů a velikosti horní hranice napětí. V posledním cyklu v obou normách se zkušební těleso zatěžuje až do jeho porušení.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Rovnice 7 Výpočet pro stanovení modulu pružnosti

Experimentální část byla především zaměřena na dosažení tlakové pevnosti 130 MPa a na ověření trvanlivostních charakteristik. Zkoušky ustanovující modul pružnosti budou doplněny v další fázi experimentálních prací.

8.8. Kalkulace ceny za jednotku objemu

V poslední řadě je důležité zohlednit finanční náročnost tohoto materiálu. Oceněním jednotlivých složek UHPC lze hrubým odhadem stanovit finanční náročnost na jeho výrobu. Jelikož je firma Cemex Czech Republic s. r. o. velkoodběratelem všech surovin, uvedené ceny budou pro velkoodběr včetně DPH.

Pro porovnání výsledné ceny byly vybrány dvě receptury, přičemž jedna obsahuje ocelová vlákna.

Složka	Množství [kg]	Cena za jednotku [kč/kg]	Cena v m ³ [kč]
CEM I 52,5 R	570	3,6	2 060
RW Sillica	140	100	14 000
Čeperka 0/2	325	0,355	120
Smiřice 0/4	430	0,265	115
Žumberk 4/8	390	0,510	200
Žumberk 8/16	465	0,500	240
Voda	155	0,095	20
CX Isoflex 535	21	60	1 260
Celkem:			18 015

Tabulka 22 Výrobní náklady na m³ UHPC – receptura UHPC_2752

Složka	Množství [kg]	Cena za jednotku [kč/kg]	Cena v m ³ [kč]
CEM I 52,5 R	150	3,6	540
CEM II/A-M 42,5 R	400	3,48	1 395
RW Sillica	110	100	11 000
Smiřice 0/4	635	0,265	170
Žumberk 4/8	746	0,510	380
Voda	155	0,095	20
CX Isoflex 535	20	60	1 200
Drátky	100	175	17 500
Celkem:			32 205

Tabulka 23 Výrobní náklady na m³ UHPRFC – receptura UHPC_3055D

ZÁVĚR

Bylo navrženo 36 receptur, které se liší použitím různých poměrů kameniva z místních zdrojů, pojiv, přísad i příměsí. Stěžejním cílem experimentální části bylo **dosažení tlakové pevnosti minimálně 130 MPa a ověření trvanlivostní charakteristiky UHPC**.

Při míchání se čerstvý beton choval homogenně, jen u některých záměsí docházelo k vytlačování mikrosiliky superplastifikátorem. Čerstvý beton byl díky vysoké dávce superplastifikátoru **medového až lepkavého charakteru**.

Objemová hmotnost čerstvého betonu se průměrně pohybovala kolem **2 140 kg/m³**.

Zkouška rozlíváním prokázala, že navrhované receptury UHPC mají konzistenci samozhutnitelného betonu a **splňují třídu SF2**. Minimální průměr rozlívání byl na velkém terči 530 mm a maximální 800 mm, **průměr se pohybuje cca na hodnotě 700 mm**. Na malém terči byl minimální průměr 220 mm a maximální 310 mm, průměrná hodnota byla 280 mm. Při porovnání konzistence receptur s drátky a těmi, ze kterých receptury s drátky vychází, lze vyvodit následující:

- U receptury UHPC_530D zvýšení dávky superplastifikátoru napomohlo k většímu průměru rozlívání oproti UHPC_429.
- Ačkoliv receptura s drátky UHPC_1035D obsahuje o 21 litrů vody více, na konzistenci to nemělo žádný zaznamatelný pozitivní efekt.
- Naopak receptura UHPC_3055D obsahuje o 20 litrů vody méně než referenční receptura UHPC_1439, nicméně na rozlívání to mělo minimální dopad.

Kód záměsí	Dávka vody [kg/m ³]	Dávka superpl. [kg/m ³]	Dávka vláken	Průměr malého kužele [mm]	Průměr velkého kužele [mm]
UHPC_429	175	22	-	270	N/A
UHPC_530D	175	25	40	290	N/A
UHPC_833	173	25	-	280	740
UHPC_1035D	194	25	70	250	680
UHPC_1439	175	20	-	270	650
UHPC_3055D	155	20	100	N/A	630

Tabulka 24 Srovnání průměrů rozlívání receptur bez drátků a s drátkami

Teplota čerstvého betonu se po 10 minutách míchání při okolní teplotě 20 °C pohybovala v rozmezí hodnot **průměrně 24,8 °C ~ 25 °C**. Minimální naměřená teplota byla 22,1 °C, maximální 26,3 °C.

Vysoká dávka cementu má za následek oproti běžným pevnostním třídám betonů rychlejší nárůst hydratačního tepla. Ačkoliv nejvyšší dávka cementu byla 700 kg/m³, **nejvyšší teploty byly naměřeny při dávce cementu 500 kg/m³**. Výrobce superplastifikátoru Mastrglenium ACE 300 uvádí zrychlení hydratačních procesů. Z toho lze předpokládat, že se přirozeně zvýší i teplota betonu, nicméně receptury UHPC_2853 a UHPC_2954 vykazují průměrné hodnoty.

Dlouhodobější měření vývoje hydratačního tepla nebylo do této fáze experimentu zahrnuto a bude provedeno v další fázi experimentu.

Obsah vzduchu ze zkoušených záměsí se pohyboval v rozmezí 0,6 – 1,1 % a průměrná hodnota je 0,75 %, což odpovídá očekávaným výsledkům.

Hodnota **objemové hmotnosti betonu po 28 dnech** zrání byla v průměru **2 420 kg/m³**.

Směrodatná tlaková pevnost byla po 90 dnech zrání kvůli obsahu mikrosiliky. Prvním porovnáním lze zhodnotit vliv rozptýlené výztuže. Z tabulky níže je patrné, že **drátky mají příznivý vliv na tlakovou pevnost** – zvyšují tlakovou pevnost minimálně o 10 %.

Receptura bez drátků	Receptura s drátky	Tlaková pevnost bez drátků [MPa]	Tlaková pevnost s drátky [MPa]	Rozdíl [%]
UHPC_429	UHPC_530D	83,8	108,3	29,0
UHPC_833	UHPC_1035D	99,8	111,3	11,5
UHPC_1439	UHPC_3055D	108,9	135,8	24,0

Tabulka 25 Srovnání tlakové pevnosti receptur bez drátků a s drátky

V dalších fázích experimentálních prací bude optimalizován návrh složení drátků podle Směrnice pro drátkobetonové konstrukce (jejímž vydavatelem je Česká betonářská společnost) a normy ČSN P 73 2450 (Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda) [83].

V teoretické části bylo uvedeno, že menší zrna kameniva jsou pro využití do betonu obecně vhodnější variantou. Toto tvrzení však experimentální část bakalářské práce nepotvrzuje. Výsledky totiž ukazují, že receptury s použitím frakce 8/16 měly vyšší pevnost než receptury o maximálním zrnu 4/8.

Při porovnání použitých superplastifikátorů CX Isoflex a SIKA Viscocrete 2700 lze konstatovat, že pro zachování stejné konzistence měla být dávka Viscocrete 2700 vyšší. Superplastifikátor MasterGlenium ACE 300 je použitým množstvím i hodnotami rozlivu srovnatelný s CX Isoflex 535.

Kód záměsi	Superplastifikátor	Dávka [kg/m ³]	Rozliv malého kužele [mm]	Rozliv velkého kužele [mm]
UHPC_2247	CX Isoflex 535	20	280	690
UHPC_2348	SIKA Viscocrete 2700	33	280	N/A
UHPC_3853	MG ACE 300	20	280	680

Tabulka 26 Srovnání průměru rozlivu receptur s jinými superplastifikátory

Recepturou s nejvyšší pevností v tlaku je ta s označením UHPC_3055D, jež obsahuje rozptýlenou výztuž. Receptura s nejvyšší pevností bez rozptýlené výztuže má označení UHPC_2752.

Pořadí	Kód záměsi	Tlaková 90denní pevnost [MPa]
1	UHPC_3055D	135,8
2	UHPC_2752	127,2
3	UHPC_2651	119,2
4	UHPC_2954	112,2
5	UHPC_2247	109,7

Tabulka 27 Sestupné seřazení výsledků tlakové pevnosti receptur

Návrh vlastní receptury UHPC_3465M potvrdil, že je v rámci vlastností čerstvého betonu srovnatelná s průměrnými hodnotami.

	Obj. hmotnost [kg/m ³]	Teplota [°C]	Rozliv velkého kužele [mm]	Obsah vzduchu [%]
UHPC_3465M	2 410	24,6	700	N/A
Prům. hodnoty	2 410	25	700	0,75

Tabulka 28 Srovnání vlastní receptury s průměrnými hodnotami charakteristik čerstvého betonu

U receptury UHPC_3465M docházelo k pozvolnému nárůstu pevnosti, nicméně jako u většiny receptur, **směrodatná 90denní pevnost nedosáhla** na požadovanou minimální hodnotu 130 MPa a její hodnota je značně podprůměrná

	7denní pevnost [MPa]	28denní pevnost [MPa]	56denní pevnost [MPa]	90denní pevnost [MPa]
UHPC_3465M	71,0	95,1	70,9	81,2
Prům. hodnoty	77,0	93,0	99,0	100,0

Tabulka 29 Srovnání vlastní receptury s průměrnými hodnotami tlakových pevností

Při **srovnání naměřených pevností v tahu** za ohybu lze obecně konstatovat, že tělesa s rozptýlenou výztuží mají srovnatelnou tahovou pevnost jako tělesa bez ní. Při srovnání výsledků ze zkoušek na 28denních tělesech není pozorovatelný prakticky žádný rozdíl mezi recepturami s drátky a bez drátků. Maximální hodnota 16,7 MPa byla naměřena u receptury UHPC_1439 po 90 dnech. Minimální hodnota 11,2 MPa byla naměřena u UHPC_631 po 28 dnech. Naopak maximum 16,6 MPa bylo po 28 dnech naměřeno u receptury UHPC_1237.

Zkouška mrazuvzdornosti prokázala, že součinitel mrazuvzdornosti je **větší než 75 %**. UHPC je tedy **mrazuvzdorný**.

Výsledky **zkoušky odolnosti proti CHRL ukázaly**, že maximální hodnota odpadu po 125 cyklech je **20 g/m²**. Tato hodnota je mnohonásobně menší než maximální hodnota **stupně porušení 1** (max. 1000 g/m²). Povrch vzorku UHPC je **nenarušený**.

Ze zkoušky průsaku tlakovou vodou bylo zjištěno, že maximální hloubka průsaku je **9 mm**, což navržené UHPC řadí do kategorie **vodonepropustných**, jelikož hloubka průsaku nepřesáhla mezní hodnotu 20 mm.

Finanční náročnost UHPC je závislá na tom, zda receptura obsahuje rozptýlenou výztuž. Pouhá dávka ocelových drátků zvýší celkovou výrobní cenu za m³ téměř o 100 %.

V první fázi vývoje návrhu receptur s využitím kameniv z lokálních zdrojů bylo v experimentální práci ověřeno, že trvanlivostní charakteristiky splňují požadavky, které jsou kladeny na UHPC. Receptury potvrdily předpoklad vodonepropustnosti, minimálních hodnot odpadu vzniklého působením CHRL a mrazuvzdornost.

Na základě dosud provedených návrhů receptur **nebyla dosažena** minimální tlaková pevnost 130 MPa. Příčinou bude nedostatečná pevnost použitého kameniva, na kterém je pevnost UHPC závislá. Výjimkou je receptura obsahující ocelové drátky, která dosáhla takové pevnosti 135,8 MPa. Kvůli nedostatečné pevnosti kameniva, nelze žádnou z receptur podrobit dalšímu vývoji. Jedním z východisek by mohlo být začlenění receptury s nejvyšší pevností jako produktu velmi vysokopevnostního betonu (VHSC).

Pokud by receptura měla být začleněna do kategorie UHPC, muselo by se stávající použité kamenivo nahradit pevnějším. To může být spojeno s případnou horší dostupností a zvýšenými náklady na dopravu.

UHPC disponuje velkým množstvím příznivých vlastností, a proto je smysluplné se zabývat jeho vývojem. Referenční stavby jak v ČR, tak v zahraničí dokazují, že tento materiál nemusí

být vyhrazen pouze pro laboratorní a speciální účely. V budoucnu je možné očekávat zvýšený trend dodatečného vývoje a aplikací tohoto materiálu, jelikož má pro to obrovský potenciál.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN ISBN978-80-87093-75-7.
- [2] KRÍŽOVÁ, Katarína. *Betonové konstrukce I: pro SPŠ a SOU stavební*. 1. Praha: Sobotáles, 2010. ISBN ISBN978-80-86817-39-2.
- [3] PROF. ING. VÍTEK, CSc., Jan ING. MAREK, Ph.D., DOC. ING. KOLÍSKO a David ING. ČÍTEK. UHPC a jeho aplikace v České Republice. In: *EBeton* [online]. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2019 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2019_7_098_uhpc-a-jeho-aplikace-v-ceske-republice/
- [4] PONTEX, SPOL S R.O., PRAHA. *TECHNICKÉ PODMÍNKY TP 226: Vysokohodnotné betony pro mosty PK*. 1. Praha 4: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor silniční infrastruktury, 2010. Dostupné také z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_226.pdf
- [5] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [6] *Model Code 2010: First complete draft* [online]. 1. Německo: Document Competence Center Kästl e. K., 2010, 318 s. [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-2-88394-095-6. Dostupné z: [doi:doi.org/10.35789/fib.BULL.0055](https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0055)
- [7] BAJABER, M.A. a I.Y. HAKEEM. UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, **10**, 1058-1074 [cit. 2022-04-10]. ISSN 22387854. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jmrt.2020.12.051](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051)
- [8] ZHOU, Min, Zemei WU, Xue OUYANG, Xiang HU a Caijun SHI. Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2021, **124** [cit. 2022-04-12]. ISSN 09589465. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104242](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104242)
- [9] TICHÝ, Jan, Jan KOMANEC, Bohuslav SLÁNSKÝ ML., Stanislav ŠEVČÍK a Jiří KOLÍSKO. UNIKÁTNÍ LÁVKA PRO PĚŠÍ Z UHPC V OBCI ČEPERKA. In: *EBeton* [online]. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2016-4-21_0.pdf
- [10] DU, Jiang, Weina MENG, Kamal KHAYAT et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering* [online]. 2021, **224** [cit. 2022-04-11]. ISSN 13598368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesb.2021.109220](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220)
- [11] DU, Jiang, Weina MENG, Kamal KHAYAT et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering* [online]. 2021, **224**, 103 [cit. 2022-04-10]. ISSN 13598368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesb.2021.109220](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220)
- [12] COUFAL, Robert. Ultra--vysokohodnotné betony a jejich uplatnění v architektuře. In: *Beton University* [online]. Beroun: Českomoravský beton, a. s.

[cit. 2022-04-11]. Dostupné z:

https://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/prezentace/40cdd35830895bc39c6538c2258e1efd64ab25d2_uploaded_2016-03-bu-design-uhpc-kompr.pdf

[13] KUSUMAWARDANINGSIH, Yuliarti, Ekkehard FEHLING a Mohammed ISMAIL. UHPC Compressive Strength Test Specimens: Cylinder or Cube?. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **125**, 1076-1080 [cit. 2022-04-11]. ISSN 18777058. Dostupné z:

doi:10.1016/j.proeng.2015.11.165

[14] IBRAHIM, Mustapha, Maen FARHAT, Mohsen ISSA a Jessica HASSE. Effect of Material Constituents on Mechanical and Fracture Mechanics Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal* [online]. 2017, **114**(3), 453-465 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0889-325X. Dostupné z: doi:10.14359/51689717

[15] KUSUMAWARDANINGSIH, Yuliarti, Ekkehard FEHLING, Mohammed ISMAIL a Attitou ABOUBAKR. Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **125**, 1081-1086 [cit. 2022-04-11]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.11.166

[16] HE, Jiayuan, Weizhen CHEN, Boshan ZHANG, Jiangjiang YU a Hang LIU. The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers. *Materials* [online]. 2021, **14**(9) [cit. 2022-04-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14092455

[17] FLÁDR, Josef, Petr BÍLÝ a Jan VODIČKA. Experimental Testing of Resistance of Ultra-high Performance Concrete to Environmental Loads. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **151**, 170-176 [cit. 2022-04-11]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.07.366

[18] AKHNOUKH, Amin a Chelsea BUCKHALTER. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2021, **15**, 11 [cit. 2022-04-11]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2021.e00559

[19] YU, R. *Development of sustainable protective ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): design, assessment and modeling* [online]. 1. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2015, 283 s. [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-90-386-3924-6. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/files/3945658/798494.pdf>

[20] ČSN EN 12390-13 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

[21] ČSN ISO 1920-10 (73 1319): *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Ed. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[22] ALSALMAN, Ali, Canh DANG, Gary PRINZ a W. HALE. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **153**, 918-928 [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158

- [23] ING. TICHÝ, CSC., Jan. LÁVKA PRO PĚŠÍ Z UHPC PŘES OPATOVICKÝ KANÁL. In: *Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu* [online]. Praha: Centrum kompetence Technologické agentury České republiky, 2015 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2015/2015_WP3_TL3_TL3_6.pdf
- [24] NILSSON, Lennart. *Development of UHPC concrete using mostly locally available raw materials* [online]. Luleå, 2018 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1217567/FULLTEXT01.pdf>. Degree project. Luleå University of Technology Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineerin.
- [25] ČSN EN 206+A1 (732403): *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [26] ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Ed. 1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [27] LU, Zhe, Zhen-gang FENG, Dongdong YAO, Xinjun LI a Hongru JI. Freeze-thaw resistance of Ultra-High performance concrete: Dependence on concrete composition. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **293** [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123523](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123523)
- [28] ALKAYSI, Mo, Sherif EL-TAWIL, Will HANSEN a Zhichao LIU. Effects of Silica Powder and Cement Type of Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *First International Interactive Symposium on UHPC* [online]. Iowa State University Digital Press, 2016, - [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: [doi:10.21838/uhpc.2016.87](https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.87)
- [29] PYO, Sukhoon, Selamu ABATE a Hyeong-Ki KIM. Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **165**, 11-16 [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.036](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.036)
- [30] DOOSTKAMI, Hesam, Marta ROIG-FLORES a Pedro SERNA. Self-healing efficiency of Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete through permeability to chlorides. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **310** [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125168](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125168)
- [31] YE, Hao-wen, Nai-qian FENG, Yan LING-HU, Zhi-wei RAN, Li-xun LIN, Shi-kun QI a Yi DONG. Research on Fire Resistance of Ultra-High-Performance Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2012, **2012**, 1-7 [cit. 2022-04-11]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: [doi:10.1155/2012/530948](https://doi.org/10.1155/2012/530948)
- [32] LIANG, Xiangwei, Chengqing WU, Yu SU, Zhu CHEN a Zhongxian LI. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **179**, 400-412 [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.241](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.241)
- [33] BANERJI, S., V.K.R. KODUR a R. SOLHMIRZAEI. Ire response of ultra high performance concrete beams. In: *Iowa State University Extension and Outreach* [online]. Iowa: Iowa State University [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.extension.iastate.edu/registration/events/2019UHPCPapers/UHPC_ID53.pdf

- [34] SCIARRETTA, Francesca, Stefano FAVA, Marco FRANCINI, Luca PONTICELLI, Mauro CACIOLAI, Bruno BRISEGHIELLA a Camillo NUTI. Ultra-High performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **304** [cit. 2022-04-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124608
- [35] Lávka pro pěší v Čelákovících. In: *TBG Metrostav* [online]. Praha: TBG METROSTAV s.r.o. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.tbg-metrostav.cz/reference/lavka-pro-pesi-v-celakovicich/>
- [36] Zastavení č. 21 - Lávka přes Labe. In: *Město Čelákovice* [online]. Čelákovice: Město Čelákovice, 2000-2014 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.celakovice.cz/cs/informace/naucna-stezka/zastaveni-c-21-lavka-pres-labe.html>
- [37] Aplikace ultra-vysokohodnotného betonu. In: *Metrostav* [online]. Praha: Metrostav a.s., 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/udrzitelny-rozvoj/inovace-a-technicky-rozvoj/aplikace-ultra-vysokohodnotneho-betonu>
- [38] Betonáže segmentů lávky Lužec. In: *HOCHTIEF* [online]. HOCHTIEF CZ a. s., 2015 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.hochtief.cz/pro-media/aktuality/betonaze-segmentu-lavky-luzec>
- [39] *Betonářské dny ...: konference s mezinárodní účastí* [online]. Pardubice: Česká betonářská společnost, 1993 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-80-907611-3-1. Dostupné z: https://bd27.slajd.cz/static/ofal/pdf/SBORNIK_27__BD_2020.pdf
- [40] ING. TICHÝ, CSc., Stanislav ING. ŠEVČÍK a Bohuslav ING. SLÁNSKÝ ML. VÝROBA A ZKOUŠKY ZÁBRADELNÍCH PANELŮ Z UHPC. In: *Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu* [online]. Praha: Centrum kompetence Technologické agentury České republiky, 2015 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2015/2015_WP3_TL3_5.pdf
- [41] KOLÍSKO, Jiří, Petr TEJ, Lukáš VRÁBLÍK, David ČÍTEK, Jan MOUREK a Marek BLANK. NÁVRH A VÝROBA SEGMENTOVÉ PŘEDEPNUTÉ LÁVKY Z UHPC V PŘÍBOŘE. In: *EBeton* [online]. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2019-4-03-navrh-a-vyroba-segmentove-predepnute-lavky-z-uhpc-v-pribore/>
- [42] Lávka přes řeku Lubinu v Příboře. In: *Archiweb* [online]. Brno: Archiweb, s.r.o., 1997-2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/lavka-pres-reku-lubinu-v-pribore>
- [43] Lávka přes řeku Lubinu v Příboře. In: *KŠ PREFA* [online]. Praha: KŠ PREFA, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/lavka-pres-reku-lubinu-v-pribore/>
- [44] Aplikace vysokopevnostního materiálu UHPC na výrobu unikátní tenkostěnné obloukové lávky. In: *IMaterialy.cz* [online]. Praha: Business Media One, s. r. o., 2007–2020 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/aplikace-vysokopevnostniho-materialu-uhpc-na-vyrobu-unikatni-tenkostonne-obloukove-lavky_48711.html

- [45] Lávka přes Dřetovický potok. In: *Archiweb: internetové centrum architektury* [online]. Brno: Archiweb, s.r.o., 1997-2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/lavka-pres-dretovicky-potok>
- [46] Modernizace mostů přes tratě SŽDC v Přerově, ul. Dluhonská. In: *KŠ PREFA* [online]. Praha: KŠ PREFA, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/modernizace-mista-krizeni-mosty-pres-trate-szdc-v-prerove-ul-dluhonska/>
- [47] UHPC DESKY ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ: TECHNICKÝ LIST. In: *KŠ PREFA* [online]. Praha: KŠ PREFA, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://ksprefa.cz/wp-content/uploads/2020/07/KSP_TL_UHPC_04_Desky_ztraceneho_bedneni.pdf
- [48] ING. SÝKORA, Michal, Jan ING. KOMANEC a Petr ING. JEDLINSKÝ. ZTRACENÉ BEDNĚNÍ Z DESEK Z UHPC. In: *Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu* [online]. Praha: Centrum kompetence Technologické agentury České republiky, 2019 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2019/2019_WP3_TL3_05d.pdf
- [49] Efektivnější konstrukce s vyšší spolehlivostí a delší životností. In: *Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu* [online]. Praha: Centrum kompetence Technologické agentury České republiky, 2016 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www.cesti.cz/wc16/04.pdf>
- [50] VÍTEK, Jan, Robert COUFAL, Lukáš BOHÁČEK a David ČÍTEK. Experimentální ověření zesilování konstrukcí pomocí UHPC. In: *Mosty 2021* [online]. Brno: SEKURKON s.r.o., 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.symposium-mosty.cz/wp-content/uploads/2021/10/29_Vitek_CVUT.pdf
- [51] VINKLEROVÁ, Kristýna. Špičkový beton TOPCRETE a možnosti jeho využití. In: *IMaterialy.cz* [online]. Praha: Business Media One, s. r. o., 2007–2020 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/informace-vyrobce/spickovy-beton-topcrete-a-moznosti-jeho-vyuziti_48714.html
- [52] ING. COUFAL, Ph.D., Ph.D, DOC. ŠAFÁŘ, Miloslav KOVAČ a David HAMPEJS. První aplikace UHPC pro monolitickou přibetonávku v ČR — most v Meziboří u Litvínova. In: *EBeton* [online]. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_38_prvni-aplikace-uhpc-pro-monolitickou-pribetonavku-v-cr-most-v-mezibori-u-litvinova/
- [53] ČSN EN 12620+A1 (72 1502): *Kamenivo do betonu*. Ed. 4. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [54] PŘÍRUČKA TECHNOLOGA BETON: SUROVINY — VÝROBA — VLASTNOSTI. In: *Beton University* [online]. Českomoravský beton, a. s., 2013 [cit. 2022-05-12].
- [55] MICHOT-ROBERTO, S., A. GARCIA-HERNÁNDEZ, S. DOPAZO-HILARIO a A. DAWSON. The spherical primitive and perlin noise method to recreate realistic aggregate shapes. *Granular Matter* [online]. 2021, **23**(2) [cit. 2022-04-12]. ISSN 1434-5021. Dostupné z: doi:10.1007/s10035-021-01105-6

- [56] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [57] Vliv praní kameniva na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu. In: *IMaterialy.cz* [online]. Praha: Business Media One, s. r. o., 2007–2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/vliv-prani-kameniva-na-mechanicke-vlastnosti-vysokohodnotneho-betonu_47869.html
- [58] KASAL ML., Pavel a Martin KEPPERT. MĚŘENÍ HYDRATAČNÍHO TEPLA CEMENTU. *Beton*. Beton TSK, s. r. o., 2022, **22**(1), 68-71.
- [59] HUSAIN, Syed A.B. *Characterization of UHPFRC Materials for Bridge Construction: An Opportunity to Eliminate the Need for Prestressing in Bridges* [online]. Toronto Ontario, 2021 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://yorkspace.library.yorku.ca/xmlui/bitstream/handle/10315/39144/Husain_Syed_A.B._2021_Masters.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Thesis. York University Toronto.
- [60] YALÇINKAYA, Çağlar a Oğuzhan ÇOPUROĞLU. Hydration heat, strength and microstructure characteristics of UHPC containing blast furnace slag. *Journal of Building Engineering* [online]. 2021, **34** [cit. 2022-04-12]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2020.101915
- [61] YALÇINKAYA, Çağlar a Oğuzhan ÇOPUROĞLU. Hydration heat, strength and microstructure characteristics of UHPC containing blast furnace slag. *Journal of Building Engineering* [online]. 2021, **34** [cit. 2022-05-12]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2020.101915
- [62] KUJAWA, Weronika, Ewa OLEWNIK-KRUSZKOWSKA a Jacek NOWACZYK. Concrete Strengthening by Introducing Polymer-Based Additives into the Cement Matrix—A Mini Review. *Materials* [online]. 2021, **14**(20) [cit. 2022-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14206071
- [63] HAMAD, Mays, Mohammed NASR, Ali SHUBBAR et al. Production of Ultra-High-Performance Concrete with Low Energy Consumption and Carbon Footprint Using Supplementary Cementitious Materials Instead of Silica Fume: A Review. *Energies* [online]. 2021, **14**(24) [cit. 2022-04-12]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14248291
- [64] DINAKAR, P., Pradosh SAHOO a G. SRIRAM. Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2013, **7**(3), 215-223 [cit. 2022-04-11]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-013-0045-0
- [65] KANG, Su-Tae, Kang-Seok LEE, Jeong-Il CHOI, Yun LEE, Burak FELEKOĞLU a Bang LEE. Control of Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Through Artificial Flaws and Fiber Hybridization. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 33-41 [cit. 2022-04-11]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0155-6
- [66] NG. TICHÝ, CSc., Ph.D, DOC. ING. KOLÍSKO, Ph.D, ING. VOKÁČ, David ING. ČÍTEK, Vladislav ING. TREFIL a Milan ING. KALNÝ. METODIKA PRO VÝROBU PRVKŮ Z UHPC A PRO KONTROLU JEJICH PROVEDENÍ: APLIKOVANÝ VÝZKUM

ULTRAVYSOKOHODNOTNÉHO BETONU (UHPC) PRO PREFABRIKOVANÉ PRVKY STAVEB METODIKA 3. In: *Kloknerův Ústav ČVUT v Praze* [online]. Praha: Kloknerův Ústav ČVUT v Praze, 2015 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Methodika-3-V%C3%BDroba-UHPC.pdf>

[67] PARK, Jong-Sup, Young KIM, Jeong-Rae CHO a Se-Jin JEON. Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions. *Materials* [online]. 2015, 8(8), 5537-5553 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma8085261

[68] ING. VESELÝ, Vladimír. Ošetřování betonu: Moderní trendy v betonu III. – Provádění betonových konstrukcí. In: *Beton University* [online]. Beroun: Českomoravský beton, a. s., 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/prezentace/b8e425e1aba38f1ea3d5050eddc7b11c7e78e787_uploaded_bu-osetrovani-betonu-zkracena-verze-pro-web-vve.pdf

[69] Steam curing of concrete: Methods, and Advantages. In: *The Constructor* [online]. 2009-2021 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/concrete/steam-curing-concrete-methods-advantages/38837/>

[70] ING. BIRNBAUMOVÁ, Marie. *TECHNICKÉ PODMÍNKY TP 231: OŠETŘOVÁNÍ BETONU*. 1. Praha: Ministerstvo dopravy Odbor silniční infrastruktury, 2011. Dostupné také z: www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_231.pdf

[71] VON WERDER, Julia, Sebastian SIMON, André GARDEI, Patrick FONTANA a Birgit MENG. Thermal and hydrothermal treatment of UHPC: influence of the process parameters on the phase composition of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures* [online]. 2021, 54(1) [cit. 2022-04-12]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-021-01633-w

[72] Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community: CHAPTER 2. MATERIALS AND PRODUCTION CONSTITUENT MATERIALS AND MIX PROPORTIONS. In: *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* [online]. Washington, DC: Federal Highway Administration [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/002.cfm>

[73] ČSN EN 12350- 8 (73 1301): *Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím*. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

[74] ČSN EN 12350-1 (73 1301): *Zkoušení čerstvého betonu – Část 1: Odběr vzorků a zkušební zařízení*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

[75] ČSN EN 12350-7 (73 1301): *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

[76] ČSN EN 12390-2 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [77] ČSN EN 12390-7 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [78] ČSN EN 12390-3 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [79] ČSN EN 12390-3 ZMĚNA Z1 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [80] ČSN P 73 2452: *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Ed. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [81] ČSN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Ed. 1. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1968.
- [82] ČSN EN 12390-8 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [83] ČSN P 73 2450: *Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Ed. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.