



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ S OHLEDEM NA SOUČASNÝ VÝVOJ A VYUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ

STUDY OF HIGH STRENGTH CONCRETE WITH REGARD TO CURRENT
DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS IN CIVIL ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Vobinušková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KLÁRA KŘÍŽOVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Kristýna Vobinušková
Název	Studium vysokopevnostních betonů s ohledem na současný vývoj a využití ve stavebnictví
Vedoucí práce	Ing. Klára Křížová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Odborné tuzemské a zejména zahraniční časopisy, sborníky z tematických konferencí a symposií a internetové odkazy z daného oboru.

Doporučeny jsou zejména: sciencedirect. com, Beton TKS, Green building with concrete, High Performance Concrete, aj.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Jedná se o betony pevnostních tříd C 55/67 až C 100/115 s mimořádnou kvalitou určitých vlastností v porovnání s obyčejným betonem. Co do požadavků na tyto betony nad prostou vysokou pevností dominují nároky na odolnost a vysoké užité parametry nejrůznější povahy (schopnost samozhutnitelnosti, vysoká trvanlivost, vysoká plastická přetvárnost, aj.). Charakteristická je snaha doplňovat standardní složky betonu dalšími komponenty, typicky rozptýlenou výztuží, větším množstvím příměsí, speciálními druhy kameniva, modifikovaným cementem nebo směsí několika pojiv a širokou škálou výrobků stavební chemie.

Bakalářská práce by měla popsat současný stav poznání výzkumu a vývoje v oblasti vysokopevnostních betonů.

Podstatná část práce by měla být zpracována ve formě rozsáhlé rešerše všech dostupných odborných zdrojů zejména zahraniční literatury. Popsána bude historie vývoje HSC, HPC betonů, jejich základní vlastnosti, zákonitosti návrhu a provádění konstrukcí.

Dále bude zpracován přehled doporučení a opatření pro dosažení vysokých pevností a trvanlivosti betonu. Součástí bude přehled zajímavých realizovaných staveb a zkušeností z ČR.

Experimentální část práce bude vycházet ze znalostí teoretické části bakalářské práce.

Podle zásad návrhu složení betonu budou navrženy 4 betony na pevnostní třídu C 75/80, odlišných složení s cílem získání přehledu výsledků pevnosti betonu, odolnosti vůči chemicky rozmrazovacím látkám a nasákavosti.

Dosažené výsledky vyhodnotte a porovnejte v závislosti na složení jednotlivých betonů.

Rozsah: min. 45 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Klára Křížová, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje současný stav poznání výzkumu a vývoje v oblasti vysokopevnostních betonů - HSC. V teoretické části je popsána historie vývoje HSC a jejich základní vlastnosti. Dále jsou zde popsány jednotlivé materiály, vhodné pro tento typ betonu, zákonitosti při návrhu a provádění konstrukcí. Uvádí již několik realizovaných staveb v ČR. Experimentální část popisuje výrobu zkušebních těles z HSC. Na závěr jsou uvedeny výsledky zkoušek, pro určení vybraných vlastností, jako je pevnost v tlaku, odolnost vůči chemicky rozmrazovacím látkám a nasákavost.

ABSTRACT

In it's theoretical part, Bachelor's thesis describes basic features, historical and recent development and current knowledge in the area of high strength concretes – HSC. Moreover, individual materials suitable for this type of concrete and design and construction regularities are discussed. It provides several examples of already realized buildings of this kind in Czech republic. The experimental part covers production of HSC test bodies. Lastly, results of conducted experiments, such as compressive strength, resistance to chemical de-icing agents and water absorption are reported.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokopevnostní beton, křemičitý úlet, struska, popílek, pevnost v tlaku, odolnost vůči CHRL, nasákavost

KEYWORDS

High strength concrete, silica fume, slag, fly ash, compressive strength, resistance to chemical de-icing agents, water absorption

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Kristýna Vobinušková *Studium vysokopevnostních betonů s ohledem na současný vývoj a využití ve stavebnictví*. Brno, 2017. 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Kristýna Vobinušková
autor práce

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucí své práce, Ing. Kláře Křížové, Ph.D., za cenné rady, připomínky a náměty při zpracování mé práce. Také jí děkuji za trpělivost a čas, který mi věnovala. Na závěr bych také chtěla poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	CÍL PRÁCE	10
3	TEORETICKÁ ČÁST	10
3.1	VÝVOJ VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ	10
3.2	VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON	11
3.3	VYSOKOHODNOTNÝ BETON	12
3.4	VÝBĚR MATERIÁLU	13
3.5	CEMENT.....	13
3.6	PŘÍSADY A PŘÍMĚSI	14
3.6.1	SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA	15
3.6.2	KŘEMIČITÝ ÚLET	16
3.6.3	METAKAOLIN.....	17
3.6.4	STRUSKA	18
3.6.5	ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK.....	19
3.7	KAMENIVO	20
3.8	VODA.....	23
4	PŘÍPRAVA HSC	23
4.1	MÍCHÁNÍ.....	23
4.2	UKLÁDÁNÍ, HUTNĚNÍ A OŠETŘENÍ ČERSTVÉHO BETONU.....	24
5	VLASTNOSTI HSC	24
5.1	PEVNOST V TLAKU.....	25
5.2	TRVANLIVOST	26
5.3	MODUL PRUŽNOSTI	27
6	DOPORUČENÍ PRO DOSAŽENÍ VYSOKÝCH PEVNOSTÍ	28
7	VYUŽITÍ HSC BETONŮ V ČR	28

7.1	PŘESYPANÝ MOST NA DÁLNICI D1 VYŠKOV–KROMĚŘÍŽ.....	29
7.2	LÁVKA PŘES VLTAVU V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH.....	31
7.3	TROJSKÝ MOST PRAHA.....	33
7.4	OBCHODNÍ DŮM „PASÁŽ MAGNUM“	35
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
8.1	METODIKA.....	36
9	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	43
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	46
11	ZÁVĚR.....	48
12	SEZNAM LITERATURY	50
13	SEZNAM TABULEK	57
14	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
15	SEZNAM ZKRATEK.....	58

1 ÚVOD

Beton je jedním z nejdůležitějších a nejrozšířenějších stavebních materiálů, který má zajímavou a dlouhou historii. Důvodem je jeho častá aplikace a především všestrannost a univerzálnost. V Evropě se za nejstarší doložený beton považuje podlaha domu z období okolo roku 5600 př. n. l. objevená v Srbsku na břehu Dunaje. Hydraulický beton s použitím přírodního cementu je znám už od dob antiky okolo roku 200 př. n. l. Římanům se podařilo postavit pozoruhodné stavby, které můžeme obdivovat ještě dnes. U českých památek se beton s hydraulickým pojivem stal součástí např. Karlova mostu z roku 1402. Překvapující jsou fyzikální vlastnosti např. nízká objemová hmotnost výplňového zdiva Karlova mostu, která odpovídá moderním, tzv. lehkým konstrukčním betonům.

Technologie výroby betonu se v průběhu historie vyvíjela a docházelo k výrazným změnám. Ve 20. až 30. letech 20. století došlo k prvnímu využití plastifikačních přísad, které snížily vodní součinitel a zlepšovaly fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu. Beton vykazoval tehdy dostačující pevnost kolem 20 MPa. Velký průlom nastal v 70. letech 20. století, kdy byly objeveny superplastifikační přísady. Beton již s velmi nízkým vodním součinitelem získal i další významné vlastnosti, jako je vysoká tekutost, vysoký modul pružnosti, vyšší ohybová pevnost, nižší permeabilita, zlepšená odolnost proti otěru a lepší trvanlivost. Vznikl tak ekonomicky výhodnější beton s pevností vyšší než 60 MPa. S tím, že v současné době je možné vyrobit beton s pevností 250 až 300 MPa. Díky tomu dnes beton nabízí stavitelům ideální vlastnosti a moderní řešení staveb.

2 CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části práce je popsat vývoj vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů, jejich základní vlastnosti, zákonitosti návrhu a popsat již realizované stavby ČR. Vysoká pevnost betonu je docílena určitým složením vysokopevnostního betonu. Proto budou popsány jednotlivé vstupní suroviny a doporučení jak dosáhnout těchto pevností. Cílem praktické části práce je navrhnout odlišné receptury pro vysokopevnostní beton, které vychází ze znalostí teoretické části práce. Poté budou provedeny zkoušky jako pevnost betonu v tlaku, odolnost vůči chemickému rozmrazování, nasákavost a výsledky se porovnají v závislosti na složení betonu.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 VÝVOJ VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ

Vysokopevnostní betony byly poprvé použity v USA v 70. letech 20. století u mostních budov, u kterých byla pevnost daleko vyšší než pevnost betonů do té doby [1]. Všechny betony, které vykazovaly pevnost v tlaku po 28 dnech 40 MPa a více, byly označeny jako vysokopevnostní betony. Postupem času se pevnost betonu zvyšovala na 60 až 100 MPa, kdy byly tyto betony použity pro stavby s velkým rozpětím, mosty, mrakodrapy, atd [2]. Po začátku používání superplastifikačních přísad bylo zjištěno,

že beton vykazuje i jiné vlastnosti, jako je nižší propustnost, vyšší modul pružnosti, vyšší tekutost, lepší odolnost proti otěru a lepší trvanlivost. Díky tomu vznikl obecnější název vysokohodnotný beton. Současně se tak rozšířilo i využití těchto betonů [11].

V 90. letech 20. století začaly být používány nové technologie opírající se o rozsáhlý výzkum chování materiálů. Jednotlivé složky byly podrobeny různým mechanickým, teplotním nebo chemickým zatížením od počátků přípravy čerstvého betonu až po stárnutí konstrukce. Byly tak objasněny příčiny degradace materiálu, což přispělo k vývoji technologií výroby betonu [25].

Použita byla stejná technologie jako pro běžné betony. Větší pozornost byla věnována použitým materiálům, které byly pečlivě vybírány a kontrolovány [6]. Klád se velký důraz na výběr portlandského cementu, který musel být vysoce kvalitní. Výběr kameniva a poměr cementu, vody, kameniva a příměsí byl také velice důležitý. Výrobci vysokopevnostního betonu musí znát faktory ovlivňující pevnost a musí být schopni manipulovat s těmito faktory, aby se dosáhlo požadované pevnosti. Studie kontroly kvality ukazují, že malé změny v poměrech návrhu betonu mohou vést k velkým změnám v pevnosti betonu v tlaku [5].

3.2 VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON

Vysokopevnostní beton (*High Strength Concrete* - HSC) je odlišný od běžných betonů svou charakteristickou pevností v tlaku, která může dosáhnout až 200 MPa [3]. Dle ČSN EN 206 [12] patří do pevnostní třídy C 55/67 až C 100/115 pro obyčejný, těžký beton a pevnostní třídy vyšší než LC 50/55 pro lehký beton [4]. Ačkoli není dána přesná hranice mezi HSC a běžným betonem, HSC definujeme s pevností v tlaku větší než 65 MPa [13]. Stejně tak není dána přesná hranice mezi HSC a ultra vysokopevnostním betonem UHPC (*Ultra High Performance Concrete*), který má ještě větší pevnost v tlaku a další vynikající vlastnosti. Za ultra vysokopevnostní beton se však považuje beton s pevností nad 120 MPa [13].

Betony, vykazující mimořádnou vlastnost, jsou zahrnuty mezi betony, které jsou označovány jako HPC (*High Performance Concrete*), v českém ekvivalentu vysokohodnotné betony. Z hlediska vlastností mohou mít i více mimořádných znaků a nemusí se jednat pouze o pevnost. HSC betony jsou tudíž podskupinou HPC [1]. Díky lepším materiálovým vlastnostem mají vysokou trvanlivost, vyšší vodotěsnost, odolnost proti korozi, schopnost samozhutitelnosti a menší smršťování způsobené migrací vlhkosti. Tyto vlastnosti souvisí se změnou pórovité struktury a zvýšením hutnosti v důsledku velmi nízkého vodního součinitele [7, 8].

Vodní součinitel (poměr hmotnost vody/hmotnost cementu) je díky přítomnosti superplastifikační přísady snížen na 0,23 až 0,40 [3]. Literatura uvádí, že celková pórovitost běžného betonu, HPC a UHPC je 15 %, 8,3 % a 6 % v uvedeném pořadí, přičemž kapilární pórovitost (0,03 až 10 μm) je 8,3 obj. %, 5,2 obj. % a 1,5 obj. % v daném pořadí [54]. Základním rysem je poměr chemických přísad a příměsí, který nám zvyšuje pevnost a odolnost betonu [10]. HSC obsahuje jednu nebo více příměsí, např. elektrárenský popílek, křemičitý úlet, metakaolin či jemně mletá granulovaná struska. Tyto příměsi částečně nahrazují cement, a proto se beton stává méně nákladný, šetrnější k životnímu prostředí a méně energeticky náročný. Ekonomicky výhodné

je použití místních materiálů [11]. Kromě toho HSC splňují stále se zvyšující nároky na vyšší, štíhlejší konstrukce a rychlejší budování [56]. Díky tomu se uplatní především u konstrukcí výškových staveb, v dopravním stavitelství, mostních konstrukcích, inženýrském stavitelství nebo např. u vrtných plošin pro těžbu ropy a zemního plynu [30].

Dlouhodobá vysokohodnotnost betonu je ovlivněna reaktivitou mezi některým křemičitým kamenivem a alkáliemi, které způsobují alkalicko-křemičitou reakci. Jsou dvě charakteristiky, které potlačují tuto reakci. Za prvé HSC díky velmi nízkému vodnímu součiniteli jsou schopné se samostatně vysušovat na úroveň, která neumožňuje alkalicko-křemičitou reakci (reaktivní vlhkost nižší než 80 %). Za druhé lze použít značné množství příměsí, které mohou kontrolovat alkalicko-křemičitou reakci. Nicméně, se vždy musí provést průkazné zkoušky [11].

Spolu s přednostmi mají HSC i své nevýhody. Většinou je to díky nedostatku adekvátních výzkumů. Jedna z nevýhod tohoto betonu je použití vysokého množství cementu. Beton se proto stává křehčí, zvyšuje se hydratační teplo a smršťování. To vše může vést k destrukci betonu. Pro zabránění těchto problémům je zapotřebí minimalizovat množství cementu. Jednou z možností je zvýšit množství jemného kameniva, což vede ke snížení množství cementové pasty potřebné pro zaplnění prázdných míst a také využití příměsí [54]. Další nevýhodou může být vyšší jednotková cena nebo vyšší náklady na náročnější kontrolu při výrobě. Pokud HSC neobsahuje vlákna, mají i nižší odolnost vůči působení vysokých teplot [1].

3.3 VYSOKOHODNOTNÝ BETON

Nejen díky vysoké pevnosti v tlaku jsou HPC používány. Mezi další výhody patří vysoká živostnost, menší množství vyztužovacích prvků, menší množství mikrotrhlin, odolnost proti korozi. Velmi malá pórovitost způsobuje malou propustnost betonů a dává malou šanci agresivním látkám napadnout beton [2, 9]. Tyto betony mají obvykle vyšší modul pružnosti, což zvyšuje stabilitu betonu [5]. Jsou výhodnější kvůli vysoké pevnosti, a proto lze redukovat průřez konstrukčního prvku. Snižuje se tím množství cementu a kameniva, tudíž se snižují náklady, i když mohou být zvýšeny materiálové náklady [2, 9].

Kvalita a maximální velikost zrna není omezena [1]. Vodní součinitel je v rozmezí 0,20-0,40. Z tohoto důvodu většinou nedochází k zhydratování všech zrn cementu. Tato nehydratovaná zrna pak působí jako plnivo s velmi dobrou soudržností [9]. Cementový kamen může dosáhnout pevností velkého rozsahu a to od cca 80 až 250 MPa [16].

Výzkumný program SHRP (*The strategic Highway Research Programme*) definuje HPC, který splňuje alespoň jeden z následujících požadavků:

- 1) pevnost v tlaku betonu ve stáří 4 hodiny $\geq 17,5$ MPa
- 2) pevnost v tlaku betonu ve stáří 24 hodin ≥ 35 MPa
- 3) po 28 dnech pevnost v tlaku ≥ 70 MPa
- 4) vodním součinitel $\leq 0,35$
- 5) součinitel trvanlivosti $> 0,80$ po 300 cyklů zmrazování a rozmrazování [15].

Kromě HSC dnes do vysokohodnotných betonů řadíme např. betony ultra vysokých pevností, samozhutnitelné betony, velmi vysokohodnotné betony, provzdušněné

vysokohodnotné betony, lehké vysokohodnotné betony aj. UHPC je používán především ve sloupcích pro výškové konstrukce, pro pozemní konstrukce u mostních konstrukcích, lávek pro pěší či letištní plochy aj. Díky těmto materiálům vznikají odvážnější architektonické řešení betonových konstrukcí. Typický UHPC se skládá z cementu, příměsí (např. křemičitý úlet, křemičitý písek, popílek), přísady (plastifikační nebo superplastifikační přísady), jemného písku nebo také může obsahovat ocelová vlákna. Vodní součinitel může být snížen na hodnotu 0,12. Běžně se však používá vodní součinitel 0,32 [67]. Samozhutnitelné betony (*Self Compacting Concrete – SCC*) se používají např. při výstavbě mostních konstrukcích, tunelů, podzemních nádrží, kde je složité ukládání a hutnění běžného betonu. V důsledku toho má beton vysokou zpracovatelnost a dochází ke snížení nákladů na pracovní sílu a zařízení, zvýšení produktivity, snížení hluku na staveništi a vyznačuje se lepší kvalitou povrchu [68, 38]. Lehké vysokopevnostní betony (*Lightweight High Strength Concrete – LWHSC*) se vyznačují objemovou hmotností do 2 000 kg/m³, kdy dochází k poklesu hmotnosti o 13 až 27 %. Používají se pro snížení hmotnosti konstrukce a tepelně izolační vlastnosti. Jako lehké kamenivo lze použít např. LIAPOR nebo spékaný popílek LYTAG. Vhodným typem pórového kameniva lze dosáhnout pevnosti v tlaku až 100 MPa [30, 76].

3.4 VÝBĚR MATERIÁLU

HSC neobsahuje žádné speciální nebo neobvyklé složky, proto se musí vybírat kvalitní materiály s určitými vlastnostmi [3], aby splnily požadovanou tlakovou pevnost, samozhutnitelnost a zpracovatelnost betonu [8]. Při výrobě těchto betonů je důležité propojení těchto kroků:

- výběr vhodných přísad do betonu, které ovlivňují pevnost a reologické vlastnosti
- stanovení poměrů jednotlivých složek
- pečlivá kontrola kvality každé fáze výrobního procesu

3.5 CEMENT

HSC je vhodné vyrobit z portlandského cementu CEM I 42,5 R (CEM I 52,5 R) nebo struskového portlandského cement CEM II/B-S 42,5 v modifikaci N nebo R. Množství cementu zaujímá 12 až 22 % hmotnosti betonové směsi, což odpovídá dávce 350 až 550 kg/m³ [9, 14]. Z ekonomického hlediska však může být z části nahrazen příměsí [1]. Fyzikální a chemické vlastnosti cementu hrají velkou roli ve vývoji pevnosti a v reologii čerstvého betonu [10]. Výběr vhodného cementu je však velice komplikovaný. Jelikož pevnost betonu v tlaku je od rozmezí 50 MPa až 150 MPa, různé typy cementů se neuplatňují stejným způsobem. U jednoho druhu betonu mohou splňovat např. požadovanou pevnost, ale nesplňují požadavky na reologii, proto jsou vysokohodnotné betony rozděleny do tří tříd (Tab.1) [1]. Velikost částic cementu se pohybuje od 1 do 250 μm. Jemnost částic nadále ovlivňuje množství vody pro vhodnou konzistenci. S vyšším množstvím cementu se zvyšuje smršťování betonu a částečně plní funkci mikrofileru [10, 14]. Záleží také na kompatibilitě se superplastifikační přísadou, u něhož je výběr daleko snazší [1]. Hledáme-li cement pro použití u HSC betonů, měli bychom vybrat cement obsahující malé množství C₃A (trikalciinaluminát), jak je jen možné, což znamená zjednoduší kontrolu reologie a méně problémů s kompatibilitou superplastifikační přísadou [10].

Tab. 1: Návrh třídění vysokohodnotných betonů [11]

Vlastnosti	Třídy		
	I.	II.	III.
Pevnost v tlaku [MPa]	75±12,5	100±12,5	125±12,5
Vodní součinitel	0,30–0,35	0,25–0,30	0,20–0,25
CEM I	37,5	37,5–47,5	47,5
Množství cementu [kg/m³]	350-450	400-500	450-550
Plastifikační přísada [kg/m³]	5-20	10-25	15-30
Pevnost kameniva [MPa]	>100	>150	>150
D_{max} [mm]	22	16	12
Křemičitý úlet [% cem]	0	5/10	10/15
Konzistence, rozlití [cm]	42-48	49-60	49-60

Při výrobě cementu vzniká velké množství škodlivého CO₂. Pro ochranu životního prostředí vědci zkoumají částečnou náhradu portlandského cementu za příměsi. Dřívější práce se soustředily především na nahrazení cementu příměsemi získanými jako odpadní produkt. Kevin Smith a, kol., zkoumali pevnost a trvanlivost různých směsí HSC. Příměsi, jako je elektrárenský popílek a jemně mletá struska, byly použity pro zkoušky, během kterých bylo zjištěno, že všechny použité složky vytváří beton trvanlivý a odolný.

Typ cementu má také důležitou roli na vývoj pevnosti, zejména v raném věku. Po 28 dnech pevnost v tlaku betonu s portlandským cementem byla 62 MPa, avšak pro beton se struskovým cementem stejného složení pouze 52 MPa. Nicméně po 91 dnech oba betony vykazovaly podobné pevnosti v tlaku (70 ± 2 MPa). Na druhé straně, přídavek pucolánových příměsí má významný vliv na pevnosti betonu v tlaku v závislosti na jejich typu, složení a vlastnostech. Kombinace příměsí s portlandským cementem zvyšuje pevnost betonu více než struskový cement. Při porovnání celkové pórovitosti betonu bylo zjištěno, že beton se struskovým cementem má nižší pórovitost 8,9 %, zatímco beton s portlandským cementem 10 %. Dalším snížením pórovitosti dosáhli náhradou cementu např. 25 % elektrárenského popílku a 10 % křemičitého úletu, kde se pórovitost snížila na 6,2 % [52, 54].

3.6 PŘÍMĚSI A PŘÍMĚSI

Často používanými příměsemi u vysokopevnostných betonů jsou:

- křemičitý úlet
- jemně mletá struska
- elektrárenský popílek
- metakaolin

Tyto příměsi reagují s cementem za vzniku C-S-H gelu, který částečně odpovídá za pevnost betonu.

Nezbytnou součástí při výrobě vysokopevnostných betonů je použití chemických přísad, které zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu a redukují množství záměsové vody. Nejvíce se používají:

- plastifikační přísady
- superplastifikační přísady
- retardační přísady
- provzdušňovací přísady [10].

3.6.1 SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA

Superplastifikační přísada výrazně snižuje množství potřebné vody (účinnost od 15 % do 40 %) při stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu. Dále umožňuje rychlý nárůst pevnosti, omezuje tvorbu trhlin, snadněji ukládá směsi díky plastifikačním účinkům (není potřeba intenzivní hutnění) a nerozměšuje čerstvý beton [22]. Přísady na bázi sulfonovaného melaminu či naftalenu jsou nahrazovány přísadami na bázi polykarboxylátů, které jsou výrazně účinnější [19]. To se projevuje již při dávce v řádu desetin % z obsahu cementu. Cementová zrna se po smíchání s vodou neshlukují za přítomnosti superplastifikačních přísad, které neutralizují náboje na povrchu zrn, a tím brání nežádoucímu shlukování [6].

Může být v kombinaci s retardéry, které zpomalí počáteční rychlosti hydratace cementu a prodlouží zpracovatelnost čerstvého betonu po delší dobu. Provzdušňovací přísada uměle vytváří vzduchové póry do betonu, které částečně mohou zvyšovat zpracovatelnost směsi a zvyšují odolnost proti poškození v důsledku zmrazování a rozmrazování [9, 10].

Superplastifikační přísady se chovají odlišně v kombinaci s různými cementy a různé druhy superplastifikačních přísad se chovají jinak se stejným cementem. Závisí především na síranových a hlinitanových složkách v cementu. Typ síranu obsaženého v cementu má hlavní vliv na viskozitu.

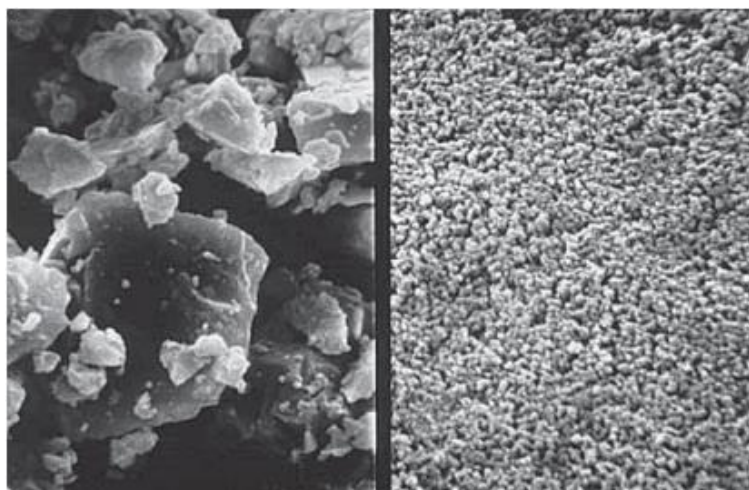
Hakan Nuri Atahan a kol., sledovali vliv při použití portlandského cementu bez použití příměsí. Poměr voda/cement (w/c) se pohyboval od rozmezí 0,26 a 0,42. U betonů s nízkým w/c (0,26, 0,30 a 0,34) použili superplastifikační přísadu na bázi polykarboxylátu a při relativně vyšším w/c (0,38 a 0,42) použili superplastifikační přísadu na bázi naftalenu. V Tab.2 jsou uvedené nejvyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech, dosažené při použití určitého množství superplastifikační přísady. Z tabulky je patrné, že nejvyšší pevnost v tlaku vyšla u betonu s nejnižším w/c 0,26 a nejvyšším množstvím superplastifikační přísady 7,6 kg/m³. Nejnižší pevnosti se pak pohybují u betonu s nejvyššími vodními součiniteli 0,38 a 0,40 [47].

Tab. 2: Hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, závislé na vodním součiniteli a množství použité superplastifikační přísady [47]

Vodní součinitel	Množství superplastifikační přísady [kg/m ³]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]
0,26	7,6	98,5
0,30	4,8	88,8
0,34	3,1	79,7
0,38	6,8	59,1
0,42	5,6	60,0

3.6.2 KŘEMIČITÝ ÚLET

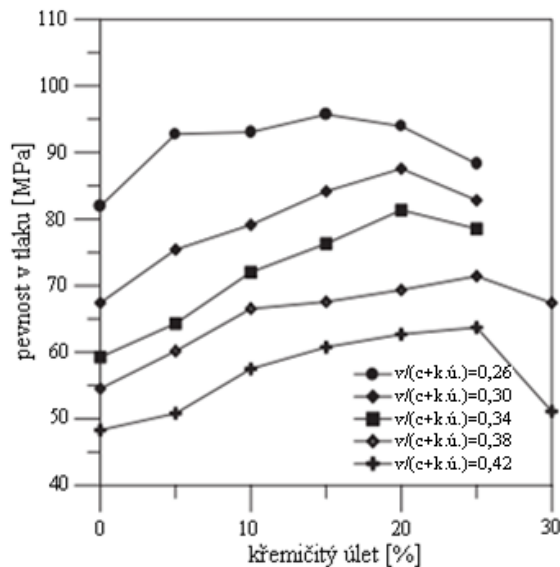
Křemičitý úlet, nebo-li mikrosilika, vzniká jako vedlejší produkt při redukcí čistého křemíku v obloukových elektrických pecích při výrobě křemičitých a ferrokřemičitých slitin. Je tvořen velmi jemnými částicemi kulovitěho tvaru. Velikost těchto částic je 0,1 až 2 μm, které tvoří aglomeráty o průměru 50 μm. Obsah reaktivního SiO₂ závisí na typu redukované slitiny, která se pohybuje v rozmezí 85 až 97 % [16, 17]. Měrný povrch se pohybuje v rozmezí od 15 000 do 25 000 m²/kg. Křemičitý úlet je pucolánově aktivní látka, která má dobrý vliv na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti betonu. Spolu se superplastifikační přísadou, Ca(OH)₂ a vodou tvoří C-S-H gely, které zaplňují jemné póry díky čemuž vzniká nepropustná struktura betonu [3, 17]. Díky příměsi a velmi jemných částic křemičitého úletu, dochází k vyplnění prostor mezi hrubšími zrny cementu, což umožňuje snížení vodního součinitele a hutnější mikrostruktury s vyšší pevností [19].



Obr. 1: Porovnání velikosti částic cementu a křemičitého úletu [55]

Při zkoumání křemičitého úletu, byl optimální obsah 5 až 20 % z portlandského cementu. Díky křemičitému úletu v kombinaci s jinými pojivy se zachovává běžná zpracovatelnost betonu s pevností vyšší než 80 MPa [62]. Li a kol., zkoumali a porovnávali použití různých procent náhrady křemičitého úletu z hmotnosti cementu a dokázal, že přidáním 10 % křemičitého úletu se zvýší pevnost v tlaku o 15 % [44]. Obr. 2 od S. Bhanja a B. Sengupta znázorňuje různé pevnostní hodnoty s odlišnými poměry w/c. Výsledky ukazují, že optimální množství křemičitého úletu nejsou

jednoznačné, ale pohybují se od rozmezí 15 % až 20 % jako náhrada cementu. Maximální hodnota pevnosti v tlaku 95,7 MPa byla získána při použití 15 % křemičitého úletu a poměru w/c 0,26 a minimální hodnota 48,3 MPa byla získána s 5 % křemičitého úletu při vodním součiniteli 0,42 [59]. Ostatní studie se shodují na tom, že optimální množství křemičitého úletu je max. do 20 %. Poté beton ztrácí zpracovatelnost a zvyšuje se množství potřebné vody. Při dlouhodobém pozorování je však pevnost betonu s 15 % křemičitým úletem jen nepatrně vyšší než s 10 % [63].



Obr. 2: Pevnost v tlaku po 28 dnech s různými procenty křemičitého úletu [59]

Jedna se studií se zabývala zastoupením portlandského cementu 0 %, 8% a 16 % křemičitým úletem při stálém vodním součiniteli 0,27. Vzorek neobsahující křemičitý úlet vykazoval pevnost v tlaku 85,7 MPa. Po přidání 8 % křemičitým úlet se pevnost zvýšila na 112,4 MPa. Pouze k mírnému zlepšení v pevnosti došlo u vzorku s 16 % křemičitého úletu, kdy pevnost vyšla 113,5 MPa, což je nepatrný rozdíl oproti 8 %. Tato pozorování ukazují, že pro daný vodní součinitel a přítomnost křemičitého úletu zvýší pevnost betonu a toto zvýšení však není přímo úměrné k jeho množství. Při změně vodního součinitele však opět dojde ke změně pevnosti. Snížením w/c na 0,24 se zvýšila pevnost v tlaku z 112,4 MPa na 120,9 MPa. Tím lze říci, že snížení vodního součinitele vede ke zvýšení pevnosti betonu [82].

3.6.3 METAKAOLIN

Díky celosvětové redukci křemičitého úletu se do budoucna očekává použití metakaolinu, který může být až o 33 % levnější [71]. Při jeho použití lze snížit dávku cementu na 400 kg/m³ [1]. Experimentální výsledky ukazují, že nahrazení cementu za 10 % metakaolinu je optimální množství, které vede ve většině případů ke zlepšení vlastností HPC [70]. Nad tím se shodují i ostatní studie, kdy např. Raja, Pillaib a Santhakumarc během svého experimentu částečně nahradili portlandský cement metakaolinem. Především se zaměřili na zlepšení pevnosti v tlaku v závislosti na množství náhrady cementu metakaolinem. Obsah metakaolinu zvyšovali, kdy maximální pevnosti v tlaku po 28 dnech 75,5 MPa dosáhli s 8 % metakaolinu. Poté pevnost postupně klesala. To je způsobeno tím, že se pevnost v tlaku zvyšuje

v důsledku pucolánové reakce, kdy metakaolin reaguje s hydroxidem vápenatým a produkuje více C-S-H gelu [62]. Jiná studie nahradila portlandský cement 0 %, 10 %, 15 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 % metakaolinem. Procento zvýšení pevnosti v tlaku po 28 dnech vyšly následující: 0 %, 15,83 %, 21,96 %, 14,18 %, 7,78 %, 1,95 % a -1,93 % v daném pořadí. Z toho je patrné, že lze použít metakaolin do 15 % jako náhrada cementu, kdy vyšší množství výrazně nezvýší pevnost v tlaku, popřípadě ji sníží [60, 72, 75].

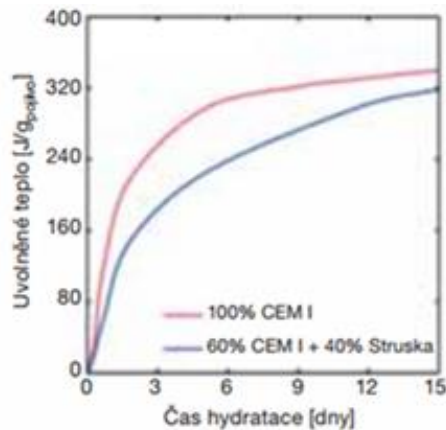
Wild a kol., zkoumali vliv metakaolinu spolu se superplastifikační přísadou. Nejlepší výsledky nastaly při nahrazení cementu 20 % metakaolinu a 2,4 % superplastifikační přísadou (vztaženo na hmotnost pojiva). Ukázalo se, že metakaolin vyžaduje menší dávky superplastifikační přísady v porovnání např. s křemičitým úletem a zlepšuje mechanické vlastnosti a odolnost betonu. Duan a kol., dále uvedli, že použití metakaolinu má příznivý vliv na strukturu pórů a kontaktní zónu mezi kamenivem a cementovou pastou v pozdějším věku ve srovnání s křemičitým úletem či struskou [75].

3.6.4 STRUSKA

Struska, nebo-li mletá vysokopecní granulovaná struska, vzniká rychlým ochlazením taveniny zásadité strusky, která odpadá jako vedlejší zplodina při výrobě surového železa ve vysoké peci [20, 21]. Patří mezi nejvýznamnější latentně hydraulická látka. Důležitým parametrem je její modul zásaditosti, který se vypočítá:

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}, \quad (1)$$

kdy $M_z > 1$. Pokud $M_z < 1$, lze strusku využít pouze jako kamenivo [26]. Struska se mele na obdobný měrný povrch jako má cement (350 až 450 m²/kg). Množství strusky se pohybuje od 15 do 60 % v závislosti na klimatických podmínkách [27]. Z chemického hlediska je tvořena především SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, S²⁻ a MnO [28]. Aktivace strusky je relativně pomalý proces, což má za následek pomalejší nástup pevnosti a také hydratačního tepla. Struskové produkty jsou z chemického hlediska C-S-H gel, který vyplní prázdná místa za vzniku hutnější cementové pasty, která poté zajišťuje větší konečnou pevnost a trvanlivost betonu [14, 25]. Používá se i jako surovina pro výrobu některých typů cementu (portlandské struskové cementy) [20]. Vysokopecní struska je efektivní pro snížení hydratačního tepla betonu, zlepšení vodotěsnosti, dlouhodobé pevnosti a odolnosti proti poškození solí [51].



Obr. 3: Vývoj hydratačního tepla s použitím strusky a bez ní [29]

Některé výzkumy zkoumaly vliv jemně mleté strusky na pevnost a trvanlivost HSC betonů. Díky jemným částicím, které obalují větší částice, dochází ke zlepšení pevnosti betonu. Sharmila a Dhinakaran [58] zkoumali vliv jemně mleté strusky (velikost částic zrn 0,37 μm) s různou náhradou z hmotnosti cementu (5 %, 10 % a 15 %). Byly sledovány vlastnosti, jako je tlaková pevnost v různém věku betonu, pórovitost a odolnost proti pronikání chloridových iontů. Nejlepší vlastnosti, pokud se jedná o pevnost a odolnost betonu, vyšly z 10 % jemně mleté strusky. Při nižších dávkách (5 %) bylo množství nedostatečné pro získání pevnosti. Vyšší dávka (15 %) způsobovala agregaci částic, které nesloužily ke ztuhnutí struktury. Naopak takto velké částice vytvářely v betonu větší množství dutin [53, 58]. Vijayasarathy a Dhinakaran [52] zjistili, že je možné nahradit cement až z 50 % jemně mletou struskou bez ohrožení kvality jak na pevnost tak trvanlivost betonu. Při vyšším množství je však vyžadována delší doba vytvrzení pro dosažení vyšších pevností. M.A. Megat Johari a kol., nahradili cement 20 %, 40 % a 60 %. Vývoj počáteční pevnosti betonu je nižší než u běžného betonu, zejména při náhradě 60 %. Po 7 dnech měl beton s 20 % jemně mleté strusky pevnost v tlaku vyšší o 8 % a 28 % oproti betonu se 40 % a 60 % strusky. Po 28 dnech se pevnost zvýšila o 9 % a 10 %. Pokud strusky bylo přidáno méně než 20%, nebyl pozorován pevnostní nárůst. Z tohoto důvodu M.A. Megat Johari a kol., doporučují přidat minimálně 20 % strusky jako příměsi do betonu. S tímto se shodují i jiné výzkumy, které dosáhly požadované pevnosti 65 MPa [63].

3.6.5 ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK

Elektrárenský popílek je vedlejším produktem při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Konkrétně se jedná o nespálené zbytky, které jsou zachyceny z kouřových plynů. Následně se oddělují mechanickými nebo elektrickými odlučovači. Těžší nespálený materiál, ozn. jako roštový popel, klesá ke dnu pece [18]. Částice popílku jsou kulovitého skelného tvaru velikosti 1 až 150 μm s pucolánovými vlastnostmi [17]. Složení závisí na typu spalovacího systému, paliva a množství nečistot. Popílký se mohou také lišit tvarem, barvou, vzhledem a velikostí [14]. Některé popílký s vyšším množstvím vápníku ovlivňují reakci mezi cementem a vodou, tím že vyprodukují hydráty bez přítomnosti hydroxidu vápenatého. Tyto pucolánové reakce prospívají betonu tím, že zvyšují množství C-S-H gelu, zlepšují dlouhodobou pevnost a snižují propustnost. Díky tomu se zlepšuje trvanlivost betonu. Vliv působení popílku v betonu je ovlivněn

fyzikálními, mineralogickými a chemickými vlastnostmi, které závisí na složení spalovacího uhlí [18]. Popílek zlepšuje reologické vlastnosti čerstvého betonu, vytváří beton odolnější vůči chemicky agresivnímu prostředí a snižuje cenu betonu, neboť je levnější než cement [26]. Větší množství může způsobit zpomalení počáteční pevnosti, a tím může dojít ke snížení rychlosti výstavby. Tyto nedostatky se projeví i při chladném počasí [18].

Popílek se používá v rozmezí od 15 % do 25 % jako náhrada cementu. Aktuální množství se velmi liší v závislosti na aplikaci, vlastnosti popílku, geografické poloze a klimatu. M.A. Megat Johari a kol., nahradili portlandský cement 10 %, 20% a 30 % popílkem. Jak je už známo, nahrazení části cementu popílkem vede ke snížení počáteční pevnosti. To souvisí i s množstvím nahrazení. Při vyšším množství došlo ještě k většímu snížení pevnosti po 7 dnech a to na 71,7 MPa, 69,6 MPa a 61,6 MPa v daném pořadí. Po 28 dnech vykazoval nejvyšší pevnost beton s 10 % popílku 85,7 MPa [63].

Vyšší množství (30 % až 50 % z množství cementu) bylo použito u masivních konstrukcí ke kontrole zvyšující se hydratační teploty. V posledních desetiletích výzkumy dokázaly, že vysoká hladina dávkování (40 % až 60 % z množství cementu) může být použita v konstrukcích, kdy beton vykazuje dobré mechanické vlastnosti a odolnosti [18].

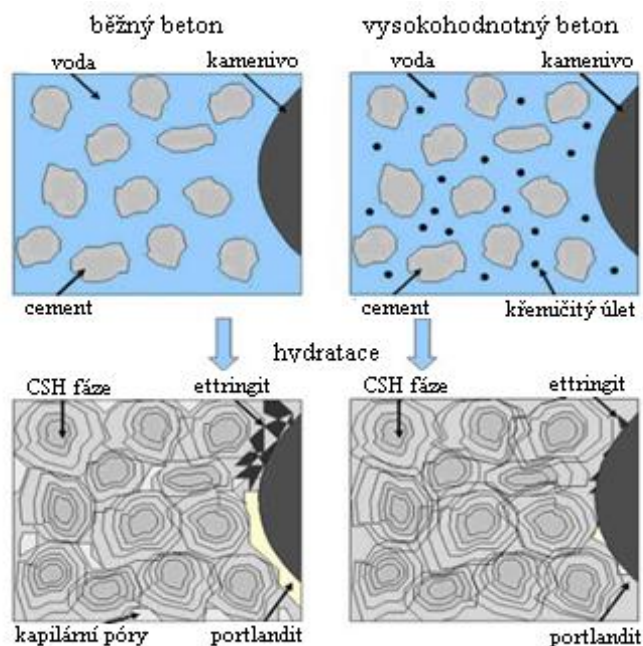
Jedna ze studií zkoumala vliv jemně mletého popílku (velikosti částic 45 μm). Cement byl nahrazen 0 %, 10 % a 15 %. Nejvyšší pevnosti v tlaku vyšly u vzorků obsahující 10 % jemně mletého popílku, kdy se pevnost zvýšila o 20 % oproti vzorku neobsahující příměs a o 10 % vyšší než s 15 % jemně mletého popílku. Při této náhradě došlo i ke zvýšení pevnosti v tahu ohybem a to o 13 % oproti vzorku bez příměsi a 12 % s 15 % příměsí. Dalším poznáním bylo, že vzorek s 10 % jemně mletého popílku dosáhl i nejvyššího modulu pružnosti 45,8 GPa. Další nevýhodou při vyšší náhradě (15 %) bylo, že došlo i k rychlému snížení zpracovatelnosti betonu [61].

3.7 KAMENIVO

Ve srovnání s běžným betonem se musí klást větší důraz na kontrolu a kvalitu při výběru kameniva. U HSC betonu s nízkým vodním součinitelem je matrice extrémně hustá a kamenivo se může stát slabým článkem ve vývoji mechanické pevnosti [2]. Optimální velikost kameniva, povrchové charakteristiky a vazba mezi cementovou pastou a kamenivem mohou omezit maximální pevnost HSC betonu [13]. Používá se drcené, tvrdé a kompaktní kamenivo, jako je vápenec, čedič, žula nebo syenit.

Hrubé kamenivo je nejsilnější a nejméně porézní součást betonu. U hrubého kameniva je důležitý především tvar zrna, který je ideálně kulovitý nebo kubického tvaru, nikoli tvaru destiček nebo tyčinek. Ovlivňuje to především reologii a množství vody, které se s nevhodným tvarem zrna zvyšuje [10, 13]. Během procesu míchání začne hrubší kamenivo vytvářet vyšší smykové napětí, které může zabránit shlukování cementové pasty.

Maximální velikost zrna je pro HSC betony z přírodních kameniv optimálně $D_{\text{max}} 16 \text{ mm}$. Pokud se zvětší D_{max} vzniká větší plocha pro možný vznik mikrotrhlin, pórů, aj. [5]. Vhodnou křivkou zrnitosti se sníží množství cementu a rovnoměrně se rozdělí napětí ve struktuře [14].



Obr. 4: Porovnání struktury běžného betonu a vysokohodnotného betonu [2]

Přibližně 75 % z objemu betonu je tvořeno kamenivem. Z toho tvoří přibližně 45 % hrubé kamenivo. Z čehož plyne, že celkové vlastnosti betonu značně ovlivní složení, velikost, tvar a drsnost kameniva, které dále ovlivní výkon betonu [64].

Cetin a Carrasquillo, zkoumali několik typů hrubého kameniva, kde se lišilo použité množství: 36 %, 40 % a 44 %. Záviselo na konkrétním objemu, aby byl vodní součinitel 0,28. Autoři dospěli k závěru, že optimální obsah hrubého kameniva se pohybuje mezi 36 % a 40 % z celkového množství kameniva. Vyšší obsah hrubého kameniva snižoval pevnost betonu v tlaku. Dále bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty pevností v tlaku a tahu ohybem byly získány při použití maximální velikosti kameniva 16 mm. Důležitou roli hraje také křivka zrnitosti, kdy při kombinaci tří zrnitých frakcí použitých ve směsi bylo docíleno lepšího rozložení částic kameniva. Nedošlo k vytvoření mezer mezi zrny a cementovou pastou [64].

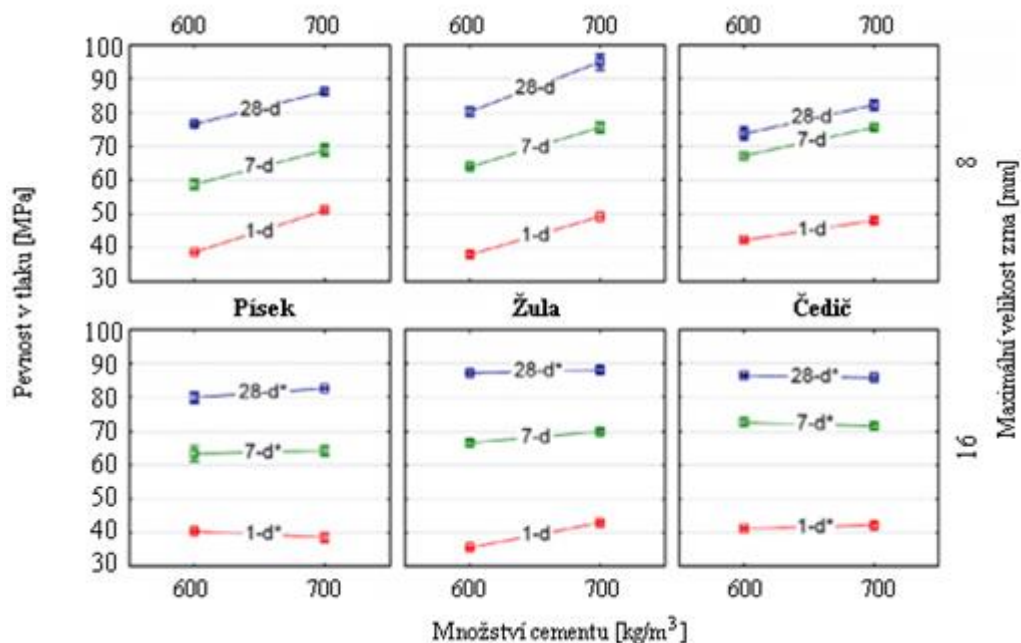
Kovler a Roussel, zkoumali vliv různých typů kameniva na pevnosti betonu. Gabro, čedič, křemenec, vápenec a pískovec byly testovány se stejnou recepturou. Bylo zjištěno, že čím pevnější je kamenivo, tím bylo dosaženo vyšší pevnosti betonu v tlaku i pevnost v tahu. Pískovec vykazující nejnižší pevnost dosáhl dle očekávání nejnižší hodnoty pevnosti. Další důležité zjištění bylo od Kiliç a kol, kteří během experimentu zjistili, že betony s kamenivem s vysokou pevností v tlaku (gabro a křemenec) měly nižší pevnost v tlaku, než je skutečná pevnost samotného kameniva. Zatímco betony s čedičem, vápencem či pískovcem měly velmi podobné pevnosti v tlaku jako pevnosti samotného příslušného kameniva. Z toho plyne, že pevnost betonů vyrobených s vyššími pevnostmi kameniva jsou omezeny pevností cementové pasty a nikoli pevností samotného kameniva [83].

Velký důraz se také musí brát na kontaktní oblasti mezi dvěma rozdílnými materiály (kamenivem a cementovou pastou), které se považují za nejslabší článek v materiálu. Nejvyšší kontaktní napětí vzniká v místech styku dvou různých materiálů s rozdílnými

moduly pružnosti. Tyto napětí hrají velkou roli v betonu při selhání. Giaccio a Zerbino popisují, jaký vliv mají zrna hrubého kameniva na šíření trhlin. To je závislé na vlastnostech, jako je povrchová struktura, tvar a tuhost zrna. Dalším poznatkem je, že celkový povrch je jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují vazbu mezi kamenivem a cementovou pastou, kdy lepší vazby mají hrubší povrchy kameniva [83].

Mnozí se zabývají problematikou vlivu maximální velikostí hrubých částic kameniv a na pevnosti beton. Aitcin uvádí, že zvýšíme-li velikost maximálního zrna kameniva, může dojít k vyvolání určitých problémů s kvalitou kontaktní zóny, která může být větší a heterogenní. Nicméně Aitcin dodává, že je možné dosáhnout jak dobré zpracovatelnosti betonové směsi, tak vysoké pevnosti betonu s kamenivem o maximální velikosti zrna 25 mm. Musí však pocházet z dostatečně silných a homogenních skal. V praxi se však převážně používá kamenivo menší velikosti především proto, aby se odstranily výše uvedené problémy [84].

Anna M. Grabiec a kol., prováděli experimenty s různým typem kameniva (písek, žula, drcený čedič) s odlišnou maximální velikostí zrn (8, 16 mm) a různým množstvím cementu (600, 700 kg/m³). Spolu s pucolánovým cementem CEM IV/B-V 32,5 R použili i vysoce účinnou superplastifikační přísadu a křemičitý úlet. Minimální pevnost 60 MPa po 28 dnech splnily všechny betony, kromě betonů s kamenivem o maximální velikosti 8 mm a s obsahem cementu 600 kg/m³. Na Obr. 5 můžeme vidět výsledky zkoušek. U nejpevnější horniny, tj. čediče, je patrné, že maximální velikost kameniva není rozhodující o zvýšení pevnosti betonu. Obecně můžeme říci, že lze získat lepší pevnosti při použití menšího maximálního zrna kameniva velikosti 8 mm a většího množství cementu (700 kg/m³), než s kamenivem maximální velikosti 16 mm. Při dlouhodobém pozorování, v závislosti na typu kameniva, vyšel o trochu lépe beton s čedičovým kamenivem s maximální velikostí 16 mm, než beton s drceným žulovým kamenivem [84].



Obr. 5: Vliv maximální velikost zrn kameniva na pevnosti betonu v tlaku (po 1, 7 a 28 dnech) v závislosti na typu kameniva a různému množství cementu [84]

Jiné výzkumy se zabývaly využitím expandovaného perlitu (EP), který nahradil drobné kamenivo (0-2 mm). S 10 %, 20 % a 30 % přídatku EP se snížila 28 denní pevnost v tlaku o 7 %, 16 % a 28 %. Pro vzorky s 10 % a 20 % EP, však překročila pevnost 60 MPa. Ke snížení pevnosti mohlo dojít díky slabé struktuře EP. Mnozí se však shodují, že pevnost v tlaku poklesla, protože objemová hmotnost klesá s množstvím použitého lehkého kameniva [57].

3.8 VODA

Používá se stejná kvalita vody, jako je používána u běžných betonů. Požadavky na vodu jsou určeny v normě ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu [24]. Voda se aktivně podílí na chemických reakcích s cementem a ovlivňuje zpracovatelnost směsi [14]. Čím menší množství vody použijeme, tím vznikne pevnější a méně porézní beton, kde jeho pevnost závisí především na vazbě hydratované cementové struktury. Požadavky na vodu by měly být sníženy tak, aby bylo dosaženo chemické reakce nehydratovaného cementu. Přebytek vody poté tvoří nežádoucí dutiny v cementovém kameni. Propustnost betonu je také citlivá na změny vodního součinitele. Pro dosažení nižšího vodního součinitele je zapotřebí použít superplastifikační přísadu [23].

4 PŘÍPRAVA HSC

Obecně jsou HSC betony chápány jako betony s nízkým vodním součinitelem. Dochází tak k rychlejší ztrátě zpracovatelnosti než u běžných betonů, proto je důležité naplánování celé fáze výroby [45].

4.1 MÍCHÁNÍ

HSC beton se vyrábí ve stejném výrobním zařízení jako běžné betony. Je však citlivější na přesné dávkování jednotlivých složek. Míchačky mohou být vertikální i horizontální, s nebo bez protichůdného pohybu lopatek. Doba míchání je obvykle delší než u běžného betonu, záleží však na určitém případě. Delší míchání nadále nezlepšuje zpracovatelnost ani homogenitu betonu.

Jeden z problémů může být dávkování superplastifikační přísady. Vhodné použití udává Aitcin. První způsob doporučuje přidat přísadu do směsi najednou. Výhodou je zkrácení doby míchání, snazší kontrola dávkování a rychlejší výroba. Spotřebuje se však větší množství superplastifikační přísady. Druhý způsob doporučuje přidat dvě třetiny superplastifikační přísady do směsi na začátku a poslední třetinu na konci míchání. Výhodou je menší použitá dávka superplastifikační přísady. Třetí způsob umožňuje použít plastifikační přísadu jen z části a zbývající se přidá až na stavbě. Někteří tvrdí, že dodatečné míchání nemusí zajistit dokonalé promíchání superplastifikační přísady ve směsi. Pokud si vybereme tento způsob je lepší superplastifikační přísadu rozmíchat ve vodě. Nesmí však dojít k sednutím větší než 250 mm (odpovídá rozliti 550 až 600 mm), jinak dochází k segregaci betonové směsi [6].

4.2 UKLÁDÁNÍ, HUTNĚNÍ A OŠETŘENÍ ČERSTVÉHO BETONU

Důležitá je zde spolupráce mezi odběratelem a výrobcem betonu, který musí být odvezen na staveniště v co nejkratší dobu.

Pokud je potřeba zvýšit zpracovatelnost čerstvého betonu, přidáme superplastifikační přísadu nikoli vodu [47]. Ukládání betonu lze provést pomocí čerpadla, jeřábů, koleček i dopravních pásů. Výběr záleží na složkách směsi, dostupnosti místa, rychlosti ukládání, klimatických podmínkách, aj. [6]. Beton musí být hutněn co nejdříve po umístění do bednění, aby byly odstraněny vzduchové bubliny. Nesmí však dojít k nadměrné vibraci, která může způsobit segregaci.

Ošetření HSC je důležitější než u běžných betonů. Musí se zajistit dostatečná vlhkost a příznivé teplotní podmínky. Jelikož betony obsahují velmi malé množství vody, je důležité ošetření ihned po uložení betonu, aby nedocházelo ke smršťování a vzniku trhlin. V betonu, který obsahuje křemičitý úlet, je známo, že nedochází k tzv. krvácení a je nezbytné ho chránit proti smršťování [47].

Smršťování

Smršťování betonu je deformace materiálu, která vzniká bez ohledu na působící zatížení [48]. Jak již bylo řečeno, nízký vodní součinitel má za následek pnutí betonu, které může dosáhnout hodnot překračující pevnosti betonu v tahu, a proto způsobí vznik trhlin [45, 48]. Chceme-li snížit riziko vzniku trhlin v důsledku předčasného smršťování, musíme snížit maximální rozdíly teplot mezi prostředím a povrchem betonu [45]. Dochází k němu díky zvětšování kapilárních sil nacházejících se v pórovém systému. To je způsobeno větším množstvím rozhraní voda – vzduch a v důsledku jejich případné deformace. Na betonu lze pozorovat různé typy smršťování [42]. Prvním typem je tzv. autogenní (chemické) smršťování, k němuž dochází z důvodu odstranění vnitřní vody v důsledku hydratace cementu [50]. Druhým typem je smršťování, které vzniká výměnou vlhkostí mezi betonem a okolím. Posledním uváděným typem je plastické smršťování, které vzniká ztrátou vody z neztvrdlého betonu [49].

Dotvarování

Dotvarování lze popsat jako opožděné napětí, které způsobuje deformaci ztvrdlého betonu. Velikost dotvarování závisí na vlhkosti okolního prostředí a zatížení konstrukce [50]. HSC v porovnání s běžným betonem, mají dotvarování betonu při stejných podmínkách menší [42].

5 VLASTNOSTI HSC

Díky mnoha typům HSC betonů a využitím různých materiálů, nelze přesně určit mechanické vlastnosti. Odlišné chování těchto betonů od běžných betonů je také dáno rozdílnou mikrostrukturou. To se projeví při zatížení, které vyvolá rozdílnou napjatost v betonu, při kterém materiály nereagují stejně.

O běžném betonu lze říct, že se jedná o homogenní a izotropní materiál, kde nejslabším článkem může být cementová pasta. Oproti tomu je HSC beton neizotropní kompozitní materiál, tvořený zatvrdlou cementovou pastou a zrny kameniva, které mají rozdílné mechanické znaky. Charakteristiky těchto vícesložkových materiálů jsou určeny vlastnostmi všech složek [6].

Chování betonu lze charakterizovat krátkodobými a dlouhodobými vlastnostmi.

Krátkodobé vlastnosti:

- pevnost v tlaku
- pevnost v tahu
- konzistence čerstvého betonu

Dlouhodobé vlastnosti:

- dotvarování
- smršťování
- trvanlivost
- chování při únavě betonu
- pórovitost, propustnost
- odolnost proti zmrazování a rozmazování, odolnost proti otěru [10].

Tab. 3: Základní mechanické parametry vysokopevnostního betonu [42]

Základní charakteristiky HSC		C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
Pevnost v tlaku [MPa]	f_{ck}	55	60	70	80	90	není definováno ČSN EN 1992-1-1 [41]
	$f_{ck,cube}$	67	75	85	95	105	
	f_{cm}	63	68	78	88	98	
Pevnost v tahu [MPa]	f_{ctm}	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	
	$f_{ctk0,05}$	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	
	$f_{ctk0,95}$	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	
E_{cm} [GPa]		38	39	41	42	44	

5.1 PEVNOST V TLAKU

Pevnost v tlaku je schopnost materiálu nebo struktury odolávat napětí bez vzniku trhlin. Hlavním kritériem pro vyhodnocení pevnosti v tlaku betonu je pevnost betonu po 28 dnech. Výsledkem testu je vyhodnocení kvality a tuhosti betonu [31].

Pevnost v tlaku závisí na celé řadě faktorů, včetně vlastností a poměrů jednotlivých materiálů, stupně hydratace, rychlosti zatěžování a geometrii vzorků. Je ovlivněna jemným a hrubým kamenivem, cementovou pastou, vodou a příměsí [10]. Poměr vody a cementu je rozhodujícím faktorem pro stanovení pevnosti betonu. Čím nižší je vodní součinitel, tím vyšší pevnosti v tlaku může být dosaženo. Pevnost betonu je také do značné míry ovlivněna kontrolou kvality použitých materiálů a technologií [31].

Tab. 4: Tlaková pevnost HPC v závislosti na hodnotě vodního součinitele [6]

Voda/cement + příměsi	Očekávaná pevnost v tlaku [MPa]
0,40-0,35	50-75
0,35-0,30	75-100
0,30-0,25	100-125
0,25-0,20	>125

HSC, který není provzdušněn, obsahuje 0,5 až 2,5 % vzduchu. Při použití provzdušňovacích přísad se obsah vzduchu zvětší na 4 až 6 %. Výhodou je zlepšení zpracovatelnosti a mrazuvzdornosti betonu, nevýhodou je snížení pevnosti v tlaku betonu o 4 až 6 % [6]. Struska a elektrárenský popílek jsou častou složkou u HSC. Díky tomu mají HSC pomalejší nárůst pevnosti po 28 dnech, než pevnost betonů s pojivem pouze na bázi portlandského cementu [42].

Tvar a velikost zkušebních vzorků výrazně ovlivňuje výsledky pevnosti v tlaku u HSC. Mnoho výsledků testovaných vzorků ukazuje, že se zvyšující se pevností v tlaku roste senzitivita na podmínky zkoušky. V ČR se nejčastěji stanovuje na vzorcích tvaru krychle o hraně 150 mm. U těchto vzorků je obtížné dodržet rovnoběžnost stran, které mohou způsobit výrazné snížení pevnosti. Proto by se zkušební strany měly ideálně zabrušovat. Zahraniční zkoušky se provádějí převážně na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm. Vzorky s vyšším poměrem výška/šířka jsou více odolné než vzorky tvaru krychle [2, 42, 73].

Pevnost v tlaku samozřejmě souvisí s pevností v tahu ohybem, která je také důležitá u HSC. Není však lineárně úměrná k pevnosti v tlaku, má pomalejší nárůst. U běžného betonu je celkem snadné najít vztah mezi pevností v tahu a příčném tahu, u kterých se hodnoty moc neliší. Závisí především na vlastnostech ztvrdlé cementové pasty. U HSC je to však složitější, jelikož se vodní součinitel a pevnost v tlaku může měnit v širokých mezích. Příměsi, které se vyskytují u těchto betonů, mohou způsobit stejné pevnosti v tlaku, ale velmi různé pevnosti v tahu ohybem [6]. Např. u HSC s pevností v tlaku 120 MPa lze očekávat pevnost v tahu jen okolo 6 MPa, což je podíl pouze z 1/20 [42].

5.2 TRVANLIVOST

Trvanlivost je schopnost betonu odolávat vnějším vlivům, jako jsou klimatické podmínky, vliv životního prostředí, chemické látky a mechanické poškození [25]. Patří mezi nejdůležitější vlastnosti HSC betonů, díky kterým se odlišují od běžného betonu. Obvykle vykazuje lepší odolnost povrchu proti otěru, sníženou propustnost chloridů a zlepšenou odolnost proti zmrazování a rozmrazování [46]. Tyto vlastnosti jsou docíleny hutnou strukturou, kdy nedochází k vzniku vody, vzduchu, chloridů, síranů a jiných škodlivých látek. Odolnost proti otěru HSC je velmi dobrá, a to nejen z důvodu vysoké pevnosti betonu, ale také dobré vazbě mezi hrubým kamenivem a matricí [10]. Trvanlivost je omezena chemickými a fyzikálními procesy ozn. jako koroze. Kvůli vysoké hutnosti HSC dochází ke zpomalení koroze. Obecná rychlost koroze je dána minimem rychlosti

tří procesů: rychlosti přísunu agresivních látek do oblasti probíhající koroze, rychlosti korozní reakce samotné a rychlosti odstraňování produktů korozní reakce.

Nevýhodou je, že tyto betony vykazují špatnou odolnost proti požáru. Velmi nízká propustnost betonu neumožňuje unikání páry vytvořené z vody v hydratované cementové pastě [45, 46].

5.3 MODUL PRUŽNOSTI

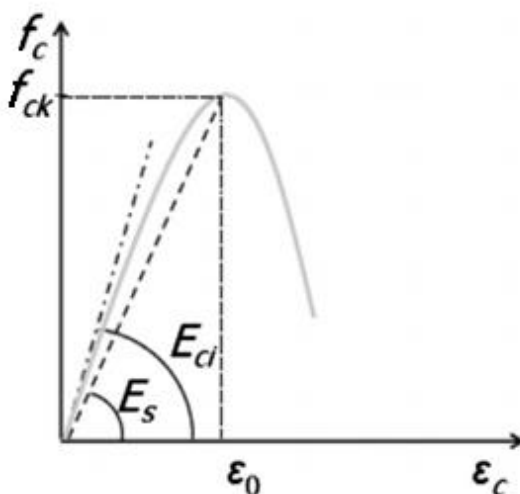
Důležitá charakteristika betonu, která vypovídá o přetvárných vlastnostech betonu a ovlivňuje deformační vlastnosti betonových konstrukcí. Se zvyšující se hodnotou modulu pružnosti se zmenšují deformace betonu. Význam modulu pružnosti narůstá se statickou náročností konstrukce. Všeobecně platí, že hodnota modulu pružnosti se zvyšuje s hodnotou pevnosti betonu. Tato závislost však není lineární [43, 34].

HSC dosahují vyššího modulu pružnosti než běžný beton. Pohybuje se v rozmezí od 38 až 44 GPa. Některé studie dokazují, že hodnota vzroste po 28 dnech zrání. To lze zjednodušeně vyjádřit vztahem $E_c \cong (f_c)^b$, kde $b=1/3$, b je v rozmezí 0,3 až 0,4, zatímco u běžného betonu je to okolo 0,5.

Při použití kameniva s vyšším modulem pružnosti, lze zvýšit modul pružnosti výsledného betonu. Např. čedičové kamenivo může zvýšit modul pružnosti betonu až o 20 %.

Všeobecně lze říci, že modul pružnosti se dá zvýšit těmito faktory:

- použití kameniva (zejména hrubého) s vysokým vlastním modulem pružnosti
- relativně vyšší podíl hrubého kameniva
- vysoká pevnost betonu v tlaku
- maximálně hutná struktura betonu s co nejnižším obsahem vzduchu
- nízký vodní součinitel [31, 42, 43].



Obr. 6: Typické křivky modulu pružnosti pro HSC [43]

6 DOPORUČENÍ PRO DOSAŽENÍ VYSOKÝCH PEVNOSTÍ

Ze získaných poznatků z rešerší z odborných zahraničních studií, literatury a příspěvků z tuzemských a zahraničních konferencí lze určit vhodné suroviny a jejich poměr pro výrobu HSC:

- Není nutné použití zvláštních cementů. Nejvíce používaným cementem je CEM I 42,5 R. Množství CEM I se pohybuje od 350 do 550 kg/m³ dle požadavků na pevnost a čerpatelnost a množství použitých příměsí jako je křemičitý úlet, elektrárenský popílek, vysokopecní struska. Vyšší množství cementu může způsobit smršťování betonu a uvolnění vyššího množství hydratačního tepla. Beton se tak stává náchylnější na vznik trhlin.
- Nezbytné je použití příměsí, především křemičitý úlet, který zaručí vysokou hutnost a tím i pevnost betonu. Jeho optimální množství je 5 až 15 % z CEM I. Další použitou příměsí může být elektrárenský popílek, vysokopecní struska nebo metakaolin.
- Vhodná hodnota vodního součinitele je cca 0,23 až 0,4 a je dosažitelná zejména pomocí chemických přísad na bázi polykarboxylátů. Množství a typ plastifikační přísady závisí na druhu použitého cementu. Nesprávné použití může způsobit předčasné tuhnutí čerstvého betonu. Účinnost se pohybuje od 15 do 40 %.
- Použité kamenivo musí vykazovat vysokou pevnost s maximální velikostí zrna 22 mm.
- Pro dosažení vysoké pevnosti je vhodné použít vysokojakostní kamenivo s lepšími fyzikálními a mechanickými parametry. Písky mají vykazovat modul zrnitosti cca 2,5 (tj. poměrně hrubé, s min. obsahem jemných částic). Při použití jemného písku se musí jeho dávka omezit. Tvar zrna a charakter povrchu má velký vliv na množství vody, která je potřebná pro vhodnou konzistenci.
- Mezi nejúčinnější kamenivo patří např. čedič, vápenec či pískovec.
- Doba míchání bývá obvykle delší než u běžného betonu. Důležité je dávkovat jednotlivé složky ve správném pořadí a ve správném čase. Intenzita míchání musí být však taková, aby došlo k dokonalé homogenizaci čerstvého betonu.
- Díky nízkému vodnímu součiniteli se musí brát větší důraz na ošetření betonu, které musí nastat ihned po uložení betonu, pro vyloučení vzniku trhlin v důsledku smrštění vlivem samovysychání [3, 74].

7 VYUŽITÍ HSC BETONŮ V ČR

Díky použití HSC můžeme zvýšit kvalitu betonové konstrukce. Výhodou bývá snížení celkové spotřeby materiálu a zvýšení odolnosti konstrukce proti agresivnímu působení vnějšího prostředí, čímž se prodlouží celková životnost konstrukce nebo alespoň zvětší interval mezi sanačními zásahy. V ČR byl přechod z experimentálního stadia zkoumání HSC do stadia běžného použití ve stavebních konstrukcích pozvolný. Jedním z důvodů je např.

- doposud neexistující norma
- problémy s určitými vlastnostmi, jako je duktilita (též houževnatost)
- neuplatnění HSC v ČR, kde výstavba výškových budov není tak častá

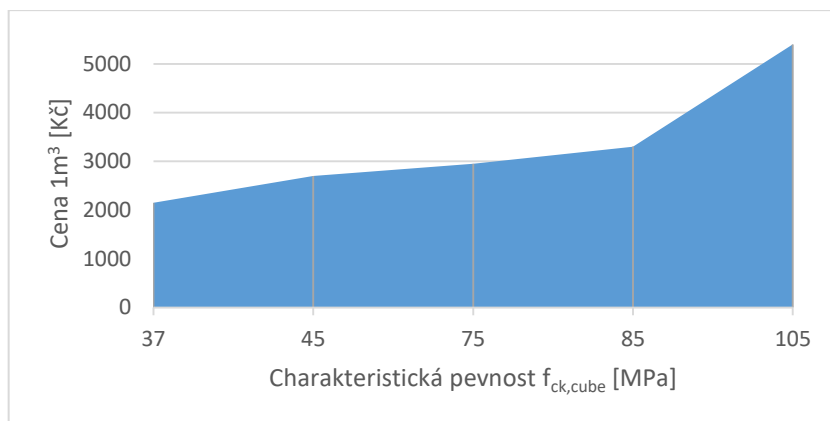
Proto HSC betony byly poprvé využity u mostních konstrukcí. Významně k tomu přispěla existence projektů Ministerstva průmyslu a obchodu FI-IM/185 „Nové úsporné konstrukce z HSC betonu“ a FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“, jakož i teoretické podklady získané v rámci činnosti výzkumného centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS a v rámci dalších projektů [32].

7.1 PŘESYPANÝ MOST NA DÁLNICI D1 VYŠKOV–KROMĚŘÍŽ

Tento most je označován jako první most v ČR postavený z HSC betonu. Nachází se v Jihomoravském kraji v problematickém úseku silnice I/47 procházející obcemi Ivanovice na Hané. Trasa dálnice přemostňuje potok Runzy, polní cestu a biokoridor. Stavba byla stavěna od roku 2003 do roku 2005. Díky velmi měkkému podloží tvořeného fluvialními jílovitými hlínami docházelo i při uvažování sanačních opatření k sedání konstrukce v řádu stovek milimetrů. Díky těmto podmínkám byla využita méně hmotná konstrukce z HSC betonu a vylehčené násypu pomocí bloků z expandovaného polystyrenu. Díky použití HSC betonu mohl být most postaven o jednom poli s rozpětím 35 m a světlé výšce cca 8 m. Opěry mostu jsou navrženy tak, aby přenesly veškeré zatížení do sanovaného podloží, které je tvořeno štěrkopískovými pilíři. Tyto opěry jsou vyztužené geotextiliemi Tensar Basetex. Odvodnění násypu je zajištěno průnikem vody nesoudržným materiálem násypu v celém jeho objemu. Horní část opěr je plošně založena na základových pasech. Sklon svahu 1:1,25 byl navržen s ohledem na předpokládané deformace během zpevnění základů. Pod mostem se nachází kamenná dlažba a v okolí mostu je provedeno ozelenění s využitím protierozní rohože [32, 33].

Popis konstrukce

Při volbě vhodné třídy betonu byla zohledněna jak cena betonu, tak výhoda zvýšení pevnosti betonu. Dle grafu 1 je patrné, že cena betonu od třídy C 70/85 prudce vzrůstá. Je to způsobeno drahými přísadami např. křemičitým úletem. Jedna z výhod u HSC je zmenšení průřezu konstrukce. Ukázalo se, že kvůli dodržení minimálních rozměrů pro rozmístění předpínacích kabelů a jejich zakotvení, nelze průřez úměrně zmenšovat s pevností betonu. Díky těmto faktům byly nosníky výšky 1,5 m vyrobené z betonu třídy C 60/75. Beton třídy C 90/105 byl v konstrukci použit jen experimentálně na jednom nosníku standardního průřezu, tj. průřezu navrženého pro beton C 60/75. Nad nosnou konstrukcí je umístěn vylehčený násyp výšky cca 4,5 m tvořený vrstvami z expandovaného polystyrenu (EPS), Liaporu, štěrku, nosné a ložné vrstvy vozovky, zeminou apod. Složení betonu a jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4. a 5. Pro spojení jednotlivých nosníků (mostovky) byl použit beton třídy C 55/67. Složení bylo stejné jako u betonu C 60/75, jen se snížila dávka cementu a přidaly se vlákna Anti-Crak HD pro omezení smršťovacích trhlin. Výroba nosníků i betonu pro monolitickou část konstrukce probíhala v provozovně Tovačov firmy Skanska Prefa, a. s.



Obr. 7: Cena 1 m³ betonu [32]

Tab. 5: Složení betonu C 60/75 [32]

Složka	Dávka 1m ³
CEM I 52,5 R Hranice [kg]	460
Voda [kg]	158
SP* FM 794 [kg]	5 až 6
SP* Glenium 110 [kg]	0 až 2
ZT** VZ 33 [kg]	2
DTK 0/4 mm Tovačov [kg]	710
HTK 4/8 mm Tovačov [kg]	230
HDK 8/16 mm Tovačov [kg]	950

*Superplastifikační přísada

**Zpomalovací přísada

Ze zkoušek, které byly provedeny během výroby nosníku, je patrné, že pevnost byla spolehlivě dosažena. Dlouhodobé sledování mostní konstrukce prokázalo, že se chová v souladu s výchozími předpoklady, což je velmi cenné zjištění pro obecnou použitelnost HSC betonu.

Tab. 6: Parametry všech použitých betonů dosažené při průkazných zkouškách [32]

Parametr	C 55/67	C 60/75	C 90/105
Konzistence (sednutí) [mm]	190	650	640
Pevnost v tlaku po 24 hod [MPa]	-	44,9	-
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	84,3	79,6	101,3
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	93,0	101,0	120,7
Pevnost v tahu ohybem po 24 hod [MPa]	-	5,8	-
Pevnost v tahu ohybem po 28 dnech [MPa]	10,1	8,7	-
Hloubka průsaku [mm]	12,0	8,3	-
Odolnost proti CHRL – odpad po 150 cyklech [g/m ²]	224,5	245,0	-
Statický modul pružnosti po 28 dnech [GPa]	43,3	46,9	45,5

Jediným záparem byl značný rozptyl dosažených hodnot pevnosti. To se však podařilo snížit u dalších konstrukcí vyrobených z HSC betonů. Nosníky, které byly popsány u tohoto mostu, byly využity i u dalších dvou mostů realizovaných na stavbách dálnic D1 a D47 [32, 33, 34].



Obr. 8: Celkový pohled na přesypaný most a pohled na nosníky mostu [32]

7.2 LÁVKA PŘES VLTAVU V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Lávka pro pěší a cyklisty slouží k přemostění řeky Vltavy nacházející se v Českých Budějovicích. Propojuje historickou část města se sportovní a rekreační oblastí. Byla vybrána oblouková konstrukce, která navazuje na doposud stávající budějovické obloukové mosty jen s modernější dynamikou stavby. Na konstrukci se nenachází žádné mezilehlé podpěry, čímž je tak tvořen čistý a jednoduchý tvar lávky. Díky tomu zapadá do krajiny a netvoří žádnou dominantu. Lávka byla stavěna od roku 2005 do roku 2006 [35], realizována firmou JHP, s.r.o. [32].

Konstrukce je převážně ocelová se spřaženou monolitickou mostovkou. Ta byla navržena z HSC betonu třídy C 55/67. Díky tomu má lávka dostatečnou tuhost i s malou šířkou konstrukce a oblouk jen na jedné straně mostovky.

Konstrukční řešení

Lávku tvoří skloněný oblouk o rozpětí 53,2 m, vzepětí 8 m a vetknutého do ocelobetonové mostovky. Oblouk je tvořen ocelovou rourou průměru 355,6 mm; mostovka pak dvěma okrajovými ocelovými rourami průměru 508 mm a 355,6 mm, které jsou vzájemně spojeny rovinnou příhradou. Při spřažení mostovky s ocelovými roury a horními pásnicemi diagonál byl použit HSC beton [36]. Ten nezaručuje nejen pevnost konstrukce, ale dosahuje i statického modulu pružnosti betonu po 28 dnech zrání minimálně 40 GPa, což výrazně omezí vznik trhlin v konstrukci.



Obr. 9: Celkový pohled na lávku v Českých Budějovicích [32]

Při návrhu bylo rozhodnuto, že se použije co nejvíce místních surovin, zejména místní kamenivo z lokalit Vrábče. Při porovnání receptur s hrubým těženým a hrubým drceným kamenivem, bylo rozhodnuto použít variantu s hrubým drceným kamenivem „Kobylí Hora“. Receptura s tímto kamenivem měla vyšší rezervu v tlakové pevnosti. Byla použita i přísady Sika Control 40 a skleněná vlákna Anti-Crak HD, které omezily vznik trhlin a smršťování konstrukce. Lávka získala doposud řadu ocenění: „Mostní dílo roku 2006“, „Stavba roku 2007“ a „Presta – prestižní stavba Jižních Čech 2004–2006“ [32, 35, 36].

Tab. 7: Složení variant betonu C 55/67 pro lávku v Českých Budějovicích [32]

Složka	Receptura „V“ s HTK Vrábče	Receptura „K“ s HDK Kobylí Hora
CEM I 42,5 R Radotín [kg/m ³]	430	435
Voda [kg/m ³]	153	157
SP* Addiment FM 350 [kg/m ³]	5	4,8
SP* Viscocrete 1045 [kg/m ³]	1,6	1,6
NP** Addiment VZ 1 [kg/m ³]	1,1	0,9
Přísada Sika Control 40 [kg/m ³]	-	(7,6)
Vlákna ANTI-CRAK HD [kg/m ³]	0,6	0,6
DTK 0/4 mm Vrábče [kg/m ³]	805	805
HTK 4/8 mm Vrábče [kg/m ³]	295	265
HTK 8/16 mm Vrábče [kg/m ³]	745	-
HDK 8/46 mm Kobylí Hora [kg/m ³]	-	785

*Superplastifikační přísada

**Napěňovací přísada

Tab. 8: Průměrné hodnoty vlastností variant betonu C 55/67 pro lávku [32]

Parametr	Limit	Receptura „V“ s HTK Vrábče	Receptura „K“ s HDK Kobylí Hora
Sednutí kužele [mm]	-	190	200
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	74,5	78,8	86,6
Pevnost hranolová po 28 dnech [MPa]	-	65,6	77,8
Modul pružnosti po 28 dnech [GPa]	-	44,4	46,6
Odolnost proti CHRL – odpad po 150 cyklech [g/m ²]	800	140,6	89,4
Hloubka průsaku [mm]	20	2,3 a 5	6,5 a 3

7.3 TROJSKÝ MOST PRAHA

Tento most přes Vltavu je unikátní tím, že vyniká jedním z nejplošších oblouků na světě. Je součástí souboru staveb Městského okruhu v Praze. Díky vysokohodnotnému betonu s pevností vyšší než 100 MPa mohla být vytvořena subtilní konstrukce bez opory v podobě pilířů v řece. U této unikátní stavby se osvědčilo použít technologické novinky. Ty spočívaly ve využití HSC s nízkým vývinem hydratačního tepla, aplikací vláken pro redukci trhlin od smršťování a použití chlazení betonu kapalným dusíkem. Složení muselo splnit požadavky na statické působení konstrukce a na dosažení vysoké životnosti mostu. Beton dodala společnost TBG Metrostav s. r. o., člen skupiny Českomoravský beton. Výstavba mostu začala v roce 2010 a byla dokončena v roce 2014 [37].

Trojský most je dlouhý 262,1 m, široký 36 m a nosná konstrukce má výšku 34 m. Ocelobetonový plnostěnný předpjatý síťový oblouk o rozpětí 200,4 m a vzepětím 20 m tvoří nosnou konstrukci s dolní mostovkou. Ta je předpjatá a spřažena s prefabrikovanými příčníky. Následuje betonový most, sloužící jako preventivní ochrana před povodní, tzv. inundační most.

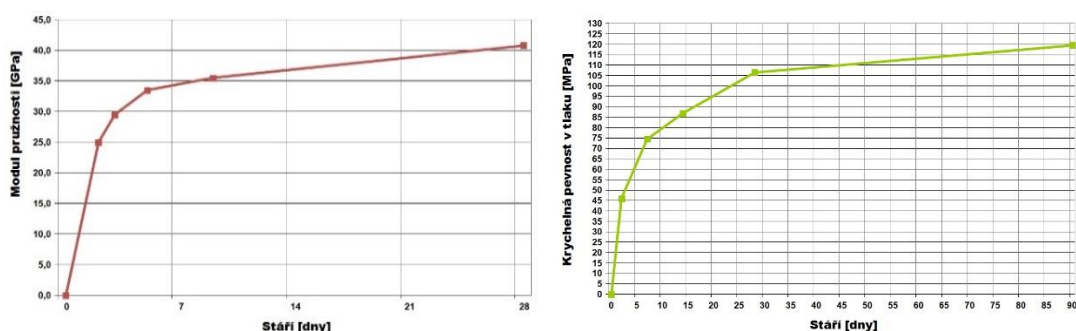


Obr. 10: Pohled na Trojský most [37]

Konstrukční řešení

Na obou stranách mostu je základová deska vytvořena z betonu třídy C 35/45 pro prostředí XF2. Na nich se nachází mohutné pilíře, které stojí na pilotách vrtaných ve skalním podloží na březích. V řece však musely být vytvořeny dočasné ocelové piloty pro dočasnou ocelovou konstrukci, která byla nutná pro vytvoření nosné konstrukce. Ta byla tvořena prefabrikovanými železobetonovými příčnicí, jejichž uspořádání odpovídalo tvaru oblouku mostovky hlavního pole. Deska byla vytvořena z betonu třídy C 50/60 pro prostředí XF2 s pevností betonu po 28 dnech 70 až 80 MPa. Betonáž mostovky probíhala i během zimního období, kdy se beton nechlادil a vývoj hydratačního tepla pomáhal k urychlení tvrdnutí betonu.

Velký důraz se bral na ošetření betonu, kdy se použily prostředky proti odparu, aby nedošlo ke smršťování betonu a vzniku trhlin (použity polypropylenová vlákna).



Obr. 11: Vývoj pevnosti v tlaku (mostovky) a modulu pružnosti [37]

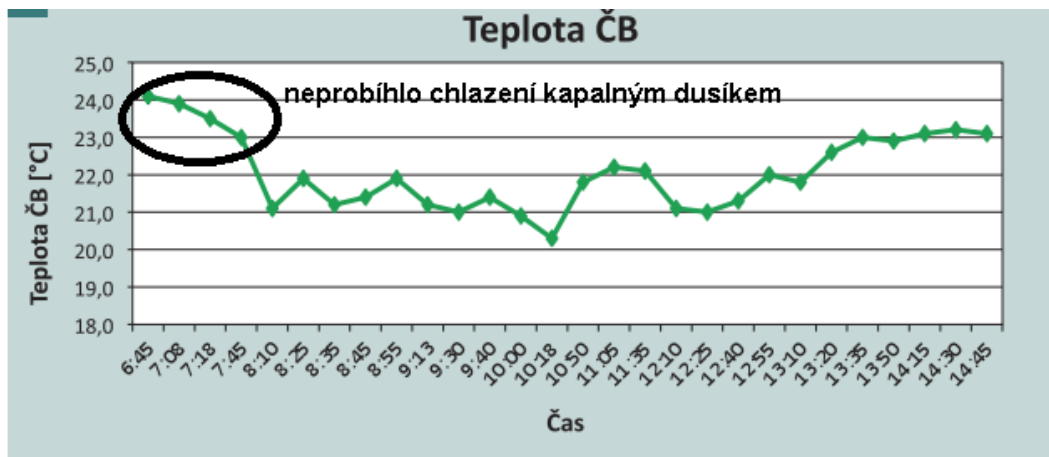
Při betonáži patek oblouku byly ocelové zárodky vetknuty do ŽB pilířů, v nichž končí podélníky mostu. Tyto zárodky byly vylity HSC betonem třídy C 80/95, který po 28 dnech vykazuje pevnost větší než 100 MPa. Beton odolal i prostředí stupně XF4.

Betonáž mostovky inundačního mostu probíhala na pevné skruži betonem C 50/60 pro prostředí XF2, kdy byla opět použita polypropylenová vlákna. Povrch byl hned po uhlazení ošetřen nástřikem, který omezil odpařování vody z betonu a po zatuhnutí byl zakryt geotextilií a PE folií. Díky těmto opatřením se eliminoval výskyt trhlin. Betonáž byla rozdělena celkem na tři etapy [37, 39].

Technologie chlazení

Chemické reakce mezi cementem a vodou způsobují tvrdnutí betonu. Vzniká vývin hydratačního tepla, který způsobuje zahřátí betonu. U masivních konstrukcí může dojít k potížím při úniku tepla do okolí. V jádře betonové konstrukce se však může shromažďovat teplo a zvyšovat se až o desítky stupňů Celsia. Díky těmto teplotním rozdílným teplotám na povrchu konstrukce a v jádře může dojít k ovlivnění kvality betonu, např. prnutím, které způsobuje trhliny [40]. Proto se snažíme minimalizovat teplotní rozdíl mezi povrchem (kde se teplota betonu blíží teplotě okolí) a jádrem betonové konstrukce (kde jsou teploty nejvyšší). Tyto problémy však mohou nastat i za horkého počasí, kdy dochází k rychlejší hydrataci cementu. Tyto nežádoucí účinky lze zmírnit složením betonové směsi. To díky požadavkům na rychlý nárůst pevnosti a modulu pružnosti nebylo možné provést. Proto byla v praxi při výstavbě mohutných

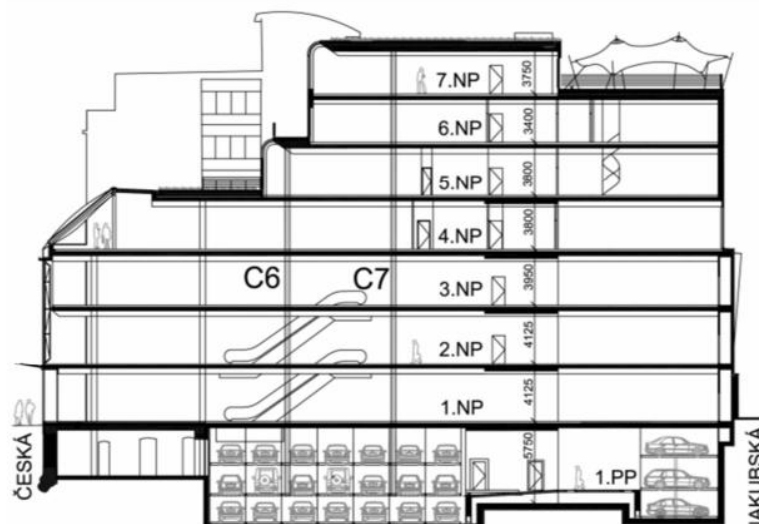
příčnicků indukčního pole Trojského mostu poprvé použita nová technologie chlazení za pomoci kapalného dusíku. V den betonáže měla teplota vzduchu více jak 28°C. Za pomoci této technologie směs nepřekročila teplotu 23,5°C, což splnilo požadavky. Kapalný dusík je inertní kapalina bez barvy, chuti a zápachu, která má při běžných podmínkách teplotu -196 °C. V kapalně fázi má 800 krát větší hustotu než v plynné fázi. Vzniká stlačováním a zchlazováním vzduchu, který obsahuje 78 % dusíku. V porovnání s technologií chlazení směsí ledovou drtí je tato metoda lepší, protože kapalný dusík volně difunduje v plynné fázi do okolí a neovlivňuje konzistenci směsi. Chlazení betonu kapalným dusíkem probíhá těsně po namíchání betonu [37, 39, 40].



Obr. 12: Teplota betonu dodávaného na stavbu během dne [40]

7.4 OBCHODNÍ DŮM „PASÁŽ MAGNUM“

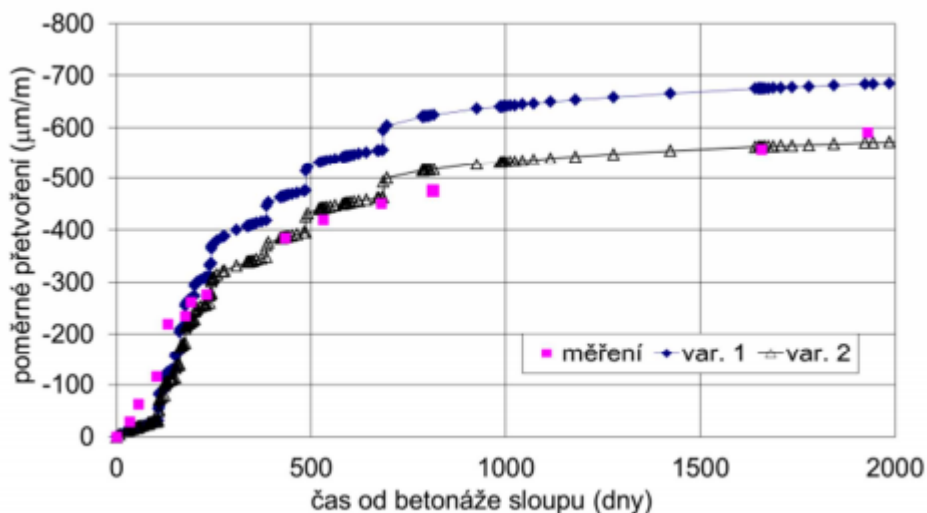
Další HSC byly použity na výstavbu sloupů v obchodním domě Magnum. Realizace stavby probíhala od roku 2005 do roku 2006 [77]. Budova je rozdělena na dvě části. V první části v prvních třech podlažích se nachází obchodní prostory a ve čtvrtém podlaží jsou kanceláře se zázemím obchodu. Druhá část terasovitě ustupuje a v pátém až sedmém patře se vyskytují kancelářské prostory. V podzemní části se nachází garáž.



Obr. 13: Příčný řez budovy [77]

Konstrukční řešení

Základy objektu jsou ze železobetonové monolitické desky tzv. bílé vany a velkopřůměrových vrtaných pilot. Pro dosažení prostorových požadavků musely být navrženy sloupy s omezenými rozměry. Sloup s vyšším zatížením byl navržen s půdorysnými rozměry 450 x 600 mm a druhý sloup s nižším zatížením s rozměry 350 x 600 mm. Pro dosažení těchto požadavků byl použit HSC třídy C 80/95. Jednalo se o první využití tohoto betonu v budově podzemní stavby. Z provedených zkoušek vyšel beton o jednu třídu nižší C 70/85. Použitý reologický model dle EN 1992 se ukázal jako dostatečně vyhovující pro analýzu navržených sloupů z HSC. Nadále výsledky ukázaly, jak problematické je sledování budovy oproti sledování mostů. Jedná se zejména o nejasné velikosti zatížení konstrukce (v průběhu výstavby i po dokončení) a obtížnému statickému schématu budovy. Výhodou sledování konstrukce je včasné odhalení případných poruch a pomoc při vývoji vysokopevnostních betonů [77, 78].



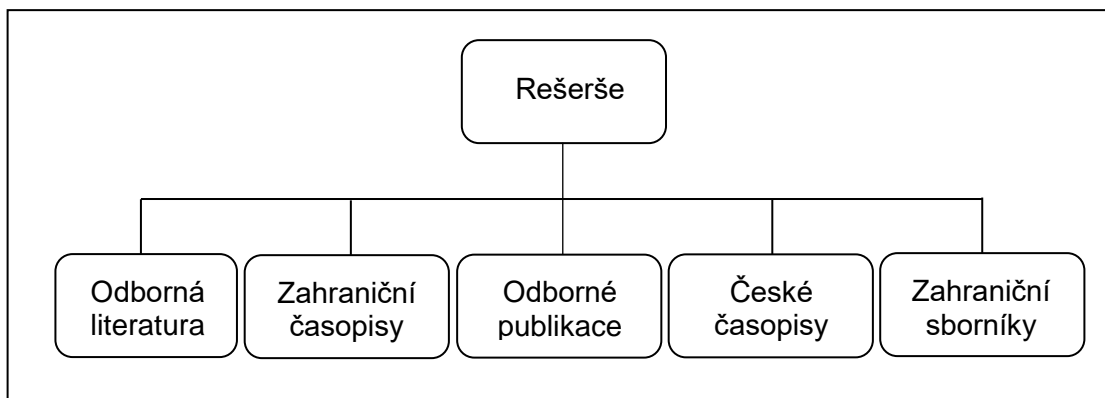
Obr. 14: Průběh měřeného přetvoření betonu ve sloupu C7 [77]

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8.1 METODIKA

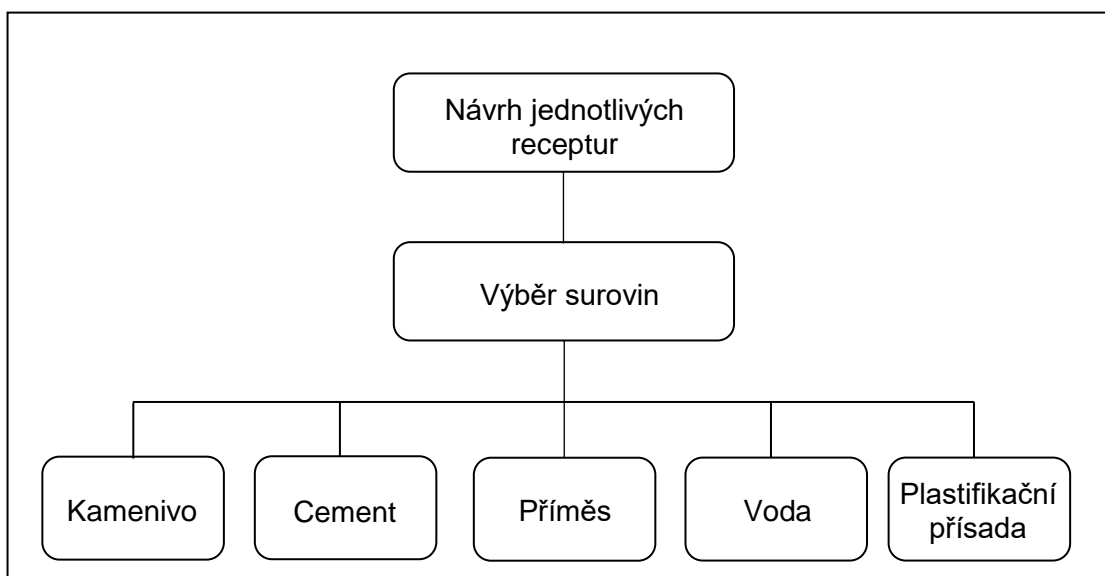
I. Etapa - Rešerše

V první řadě je záměrem práce získání základních poznatků v oblasti historie vývoje HSC, jejich základní vlastnosti a principy návrhu z dostupné odborné literatury, článků, vědeckých časopisů a sborníků, které byly popsány v teoretické části bakalářské práce.



II. Etapa – Návrh receptur

Na základě získaných znalostí z teoretické části bakalářské práce, byly zjištěny vhodné suroviny pro výrobu vysokopevnostních betonů. Na základě těchto znalostí a dostupných materiálů byly navrženy čtyři receptury.



Pro dosažení požadované pevnostní třídy C 75/80 byly použity různé příměsi, jejich kombinace a různé druhy kameniva. Receptura 1 byla navržena s křemičitým úletem a kamenivem tří frakcí 0 – 4 mm, 4 – 8 mm a 8 – 16 mm. Receptura 2 obsahuje kombinaci příměsí křemičitého úletu a strusky s menším množstvím cementu než receptura 1. Receptura 3 obsahuje popílek a čedičové kamenivo tří frakcí. Receptura 4 obsahuje pouze cement bez náhrady příměsi. Oproti tomu receptura obsahuje kamenivo navíc s frakcí 11 – 22 mm. Vlastnosti těchto surovin jsou popsány níže.

Tab. 9: Navržené receptury HSC

Receptura [kg/m ³]		1	2	3	4
CEM I 42,5 R Mokr		450	360	460	465
Kamenivo	0 – 4 mm Žabčice	900	940	-	785
	4 – 8 mm Olbramovice	350	320	-	160
	8 – 16 mm Olbramovice	490	515	-	500
	11 – 22 mm Olbramovice	-	-	-	310
ediov kamenivo	0 – 4 mm Blice	-	-	755	-
	4 – 8 mm Blice	-	-	375	-
	8 – 16 mm Blice	-	-	630	-
Křemičitý ulet		45	20	-	-
Struska		-	180	-	-
Popílek		-	-	50	-
Superplastifikační prsada		4,5	4,4	5,9	5,5
Voda		145	156	130	150

Pouit suroviny

V experimentln časti prce byly pouivny následující suroviny: cement, kamenivo, voda, superplastifikační prsada, křemičitý ulet, struska, popílek

• Cement

Byl použit portlandsk cement CEM I 42,5 R. Vyrobcem je eskomoravsk cement, a.s., ze závodu Mokr u Brna. Jedná se o cement velmi vysok kvality pouivn pro beton vysokých pevností. Cement vykazuje pevnost v tlaku po 7 dnech prmrn 51 MPa a po 28 dnech 61 MPa. Vyrobce udává měrný povrch kolem 381 m²/kg [79].

• Kamenivo

Bylo použito drobn kamenivo frakce 0 – 4 mm z abic, hrub drcen kamenivo frakce 4 – 8 mm a 8 – 16 mm z Olbramovic, pro recepturu 4, bylo použito navíc kamenivo frakce 11 – 22 mm z Olbramovic (granodiorit). Pro recepturu 3, bylo použito ediov kamenivo tr frak 0 – 4 mm, 4 – 8 mm a 8 – 16 mm, vse z Blic [66].

• Voda

Voda byla použita ben pitn z vodovodního radu.

• Superplastifikační prsada

Byla použita vysoce uinn a univerzln superplastifikační prsada na bázi polykarboxylátů Sika ViscoCrete – 1035 CZ. Je vhodné pro betony s vyšší pevnostní tdou. Vyrazn zlepšuje prostorov rozptlen jemných podl, dispergaci, smen zrn

cementu, snižuje třecí síly mezi zrny cementu a kameniva a snižuje vodní součinitel. Doporučené dávkování je od 0,2 až 1,7 % z hmotnosti cementu [80].

- **Křemičitý úlet**

Byl zvolen křemičitý úlet – SIOXID®. Jedná se o extrémně jemnozrný silikátový materiál šedé barvy. Výrobce udává sypanou objemovou hmotnost v původní nezhutněné formě od 130 do 350 kg/m³ a v setřeseném stavu 450 až 650 kg/m³ s měrným povrchem v rozmezí 15 000 až 30 000 m²/kg, kdy většina částic má průměr 0,1 až 0,2 μm. Obsah SiO₂ je minimálně 90 %. Při použití vykazuje beton lepší pevnosti, odolnosti vůči opotřebením a lepší účinky proti korozi [65].

- **Struska**

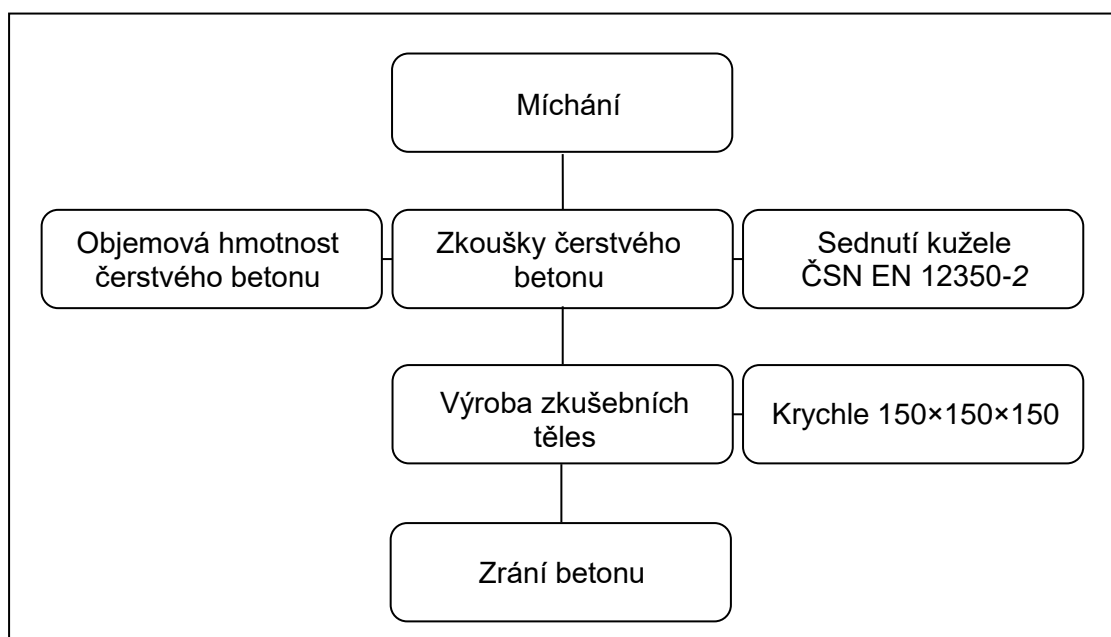
Struska byla použita od výrobce ČEZ Energetické produkty s.r.o., a to z elektrárny Dětmarovice. Sypanou hmotnost udává výrobce 1100 kg/m³ [69].

- **Popílek**

Výrobce popílku je společnost ČEZ Energetické produkty s.r.o., z elektrárny Chvaletice. Výrobce udává objemovou hmotnost 2 250 kg/m³, sypanou hmotnost 840 kg/m³ měrný povrch 290 m²/kg [81].

III. Etapa – Výroba zkušebních těles

Ve třetí etapě jsou jednotlivé suroviny naváženy dle potřebného množství betonu. Poté jsou jednotlivé suroviny dávkovány do míchačky s nuceným oběhem. Nejprve se dávkuje kamenivo od nejhrubší frakce k nejjemnější a přidá se cement. Mícháme tak dlouho, dokud se nevytvoří dokonale homogenní materiál. Dále přidáme příměs a cca 2/3 záměsové vody. Poté za soustavného míchání dávkujeme superplastifikační přísadu spolu se zbylým množstvím záměsové vody. Doba míchání musí být dostatečná, aby došlo k promísení všech složek a vznikl homogenní a kvalitní beton.



Na čerstvém betonu byla stanovena konzistence, objemová hmotnost čerstvého betonu a vodní součinitel.

Konzistence čerstvého betonu - ČSN EN 12350-2 - Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím

Zkouška sednutí kužele byla provedena pomocí Abramsova kužele. Ten se navlhčí spolu s vodorovnou podkladní deskou a propichovací tyčí. Kužel se naplní ve třech vrstvách. Každá vrstva je ztuhněna 25 vpichy propichovací tyčí tak, aby mírně zasahovaly do předchozí vrstvy. Po naplnění se přebytečný beton odstraní a okraj se zarovná. Plynulým pohybem se forma odstraní. Poté se zaznamená hodnota sednutí zaokrouhlená na 10 mm [85].



Obr. 15: Výsledek zkoušky sednutí kuželem

Vodní součinitel se vypočte dle vztahu:

$$w = \frac{m_v}{m_c + (k \cdot m_p)} \quad (2)$$

kde: m_v je množství vody [kg/m^3]
 m_c je množství cementu [kg/m^3]
 m_p je množství ostatního pojiva (křemičitý úlet, popílek, struska) [kg/m^3]
 k je konstanta, zohledňující použitá pojiva
 křemičitý úlet – 2,0
 popílek – 0,4
 struska – 0,6 [92]

Vodní součinitel se zaokrouhlí na 0,01.

Tab. 10: Hodnoty zkoušky sednutí kužele

Receptura	1	2	3	4
Sednutí kužele [mm]	80	50	50	80
Klasifikace podle sednutí kužele	S2	S2	S2	S2
Vodní součinitel	0,27	0,33	0,27	0,32

Objemová hmotnost čerstvého betonu

Čerstvý beton se před zkouškou musí promíchat. Zkušební forma o rozměrech 150x150x150 mm se zváží a zaznamená se hmotnost prázdné formy. Poté se naplní ve dvou vrstvách, kdy každá vrstva je zhutněna pomocí vibračního stolku. Musí dojít k dokonalému zhutnění bez segregace betonu. Po vibrování se povrch vzorku zarovná s okrajem formy. Naplněná forma se zváží, zaznamená se její hmotnost. Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³ [86].

Objemová hmotnost se vypočte dle vztahu:

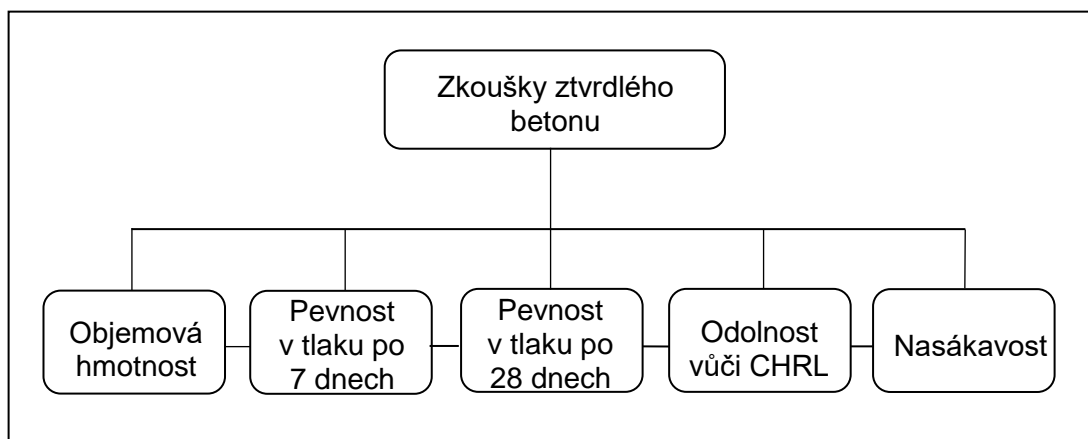
$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3)$$

kde: m_1 je hmotnost prázdné nádoby [kg]
 m_2 je hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem [kg]
 V je objem nádoby [m³]

Vytvořené zkušební krychle se označí a nechají 24 hodin v laboratorních podmínkách. Poté se vzorky odformují a nechají se zrát po dobu 7 a 28 dní v laboratorním prostředí.

IV. Etapa - Zkoušky ztvrdlého betonu

Čtvrtá etapa se zabývá vlastnostmi ztvrdlého betonu, kde je požadovaná zkouška pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech, odolnost vůči chemicky rozmrazovacím látkám a nasákavost betonu.



Pevnost v tlaku - ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

Pevnost v tlaku se prováděla na třech krychlích o hraně délky 150×150×150 mm. Zkouška byla provedena na vzorcích ve stáří 7 a 28 dnech. Nejprve se stanovily rozměry vzorku, kdy se provedla tři měření v každém na sebe kolmém směru. Průměrná plocha zatěžovaného povrchu se vypočítá z průměrných hodnot a zaokrouhlí se na 1 mm². Krychle se umístěna na střed tlačných desek zkušebního zařízení a osadí se tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr plnění. Zatěžuje se až do porušení vzorku. Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa [87].

Pevnost v tlaku se vypočte dle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4)$$

kde: f_c je pevnost v tlaku [MPa]

F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm²]

Na těchto vzorcích byla stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12 390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³ [88].

Objemová hmotnost se vypočte dle vztahu:

$$D = \frac{m}{V} \quad (5)$$

kde: m je hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V je objem zkušebního tělesa [m³]

Stanovení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám - ČSN EN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – Metoda A

Zkouška byla provedena na třech krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dní, kdy byla stanovena odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek za cyklického střídání kladných a záporných teplot. Zkouška se stanovila na 100 zkušebních rozmrazovacích cyklů. Vzorky jsou uloženy na 3 dny ve vodní lázni. Po uplynutí doby je vzorek vložen do misky s rozmrazovací látkou NaCl a probíhá automatické cyklování, kdy jsou tělesa ochlazována z kladné teploty na zápornou teplotu, a na této teplotě je po předepsanou dobu udržován. Následuje ohřátí na kladnou teplotu, na této teplotě je po předepsanou dobu udržován. Po 25 cyklech je vzorek vyjmut a je zjištěno množství uvolněných částic v g/m². Toto vážení se provádí celkem čtyřikrát. Vyhodnocením zkoušky je odolnost povrchu betonu při daném počtu cyklů zmrazování a rozmrazování [89].

Stanovení nasákavosti betonu – ČSN EN 1917 Vstupní a revizní šachty z prostého betonu, drátkobetonu a železobetonu

Zkušební vzorky jsou podrobeny zkoušce po 25 dnech zrání. Vloží se do vany s vodou, kdy hladina vody musí být 2 cm nad horním povrchem vzorku. Po 3 dnech je vzorek vyjmut, osušen vlhkým hadrem a zvážen. Vloží se zpět do vody, a takto se opět váží následující dny až do rozdílu 0,1 %. Po určení hmotnosti nasáklého vzorku je vložen do sušárny o teplotě 105 °C. Po uplynutí 3 dnů je vzorek vyjmut, ochlazen na teplotu místnosti a zvážen. Poté se opět vloží do sušárny a následující dny dochází k vážení až do rozdílu 0,1 %. Nasákavost vzorku se zaokrouhlí na nejbližší 0,01 % [90].

Nasáklost se vypočte dle vztahu:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (6)$$

kde: m_n je hmotnost zkušební vzorku nasáklého vodou [kg]
 m_s je hmotnost zkušební vzorku vysušeného [kg]

V. Etapa - Diskuze výsledků

Získané a vypočtené hodnoty všech zkoušek byly vyneseny do grafů a následně vyhodnoceny v kapitole 10. *Diskuze výsledků*.

Diskuze výsledků

9 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Tab. 11: Výsledky zkoušek po 7 dnech zrání

Receptura	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Ø Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
1	2320	2320	50,4	52,5
	2320		55,7	
	2310		51,5	
2	2330	2320	40,0	38,4
	2330		36,3	
	2310		38,8	
3	2610	2610	55,8	60,7
	2600		70,7	
	2630		55,5	
4	2350	2380	68,7	66,6
	2390		64,3	
	2400		66,8	

Tab. 12: Výsledky zkoušek po 28 dnech zrání

Receptura	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Ø Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
1	2340	2330	82,7	88,1
	2320		94,8	
	2320		86,9	
2	2330	2330	49,4	52,0
	2320		50,6	
	2330		56,1	
3	2580	2590	106,0	104,4
	2620		105,7	
	2580		101,5	
4	2390	2390	91,8	90,4
	2380		88,7	
	2390		90,8	

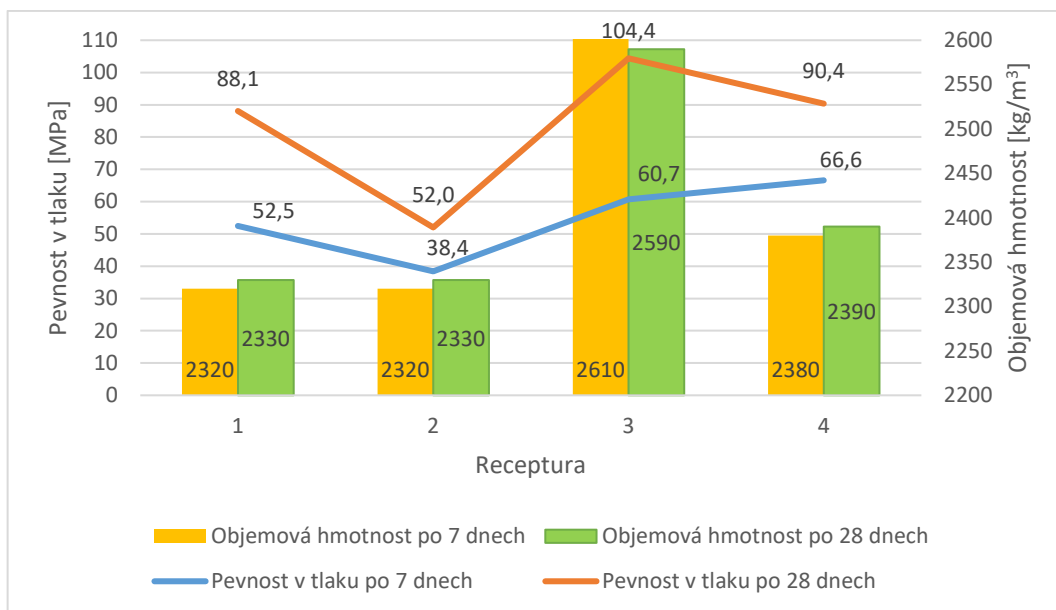
Tab. 13: Zařazení receptur do pevnostních tříd

Receptura	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	Pevnostní třída
1	88,1	C 70/85
2	52,0	C 40/50
3	104,4	C 90/95
4	90,4	C 70/85

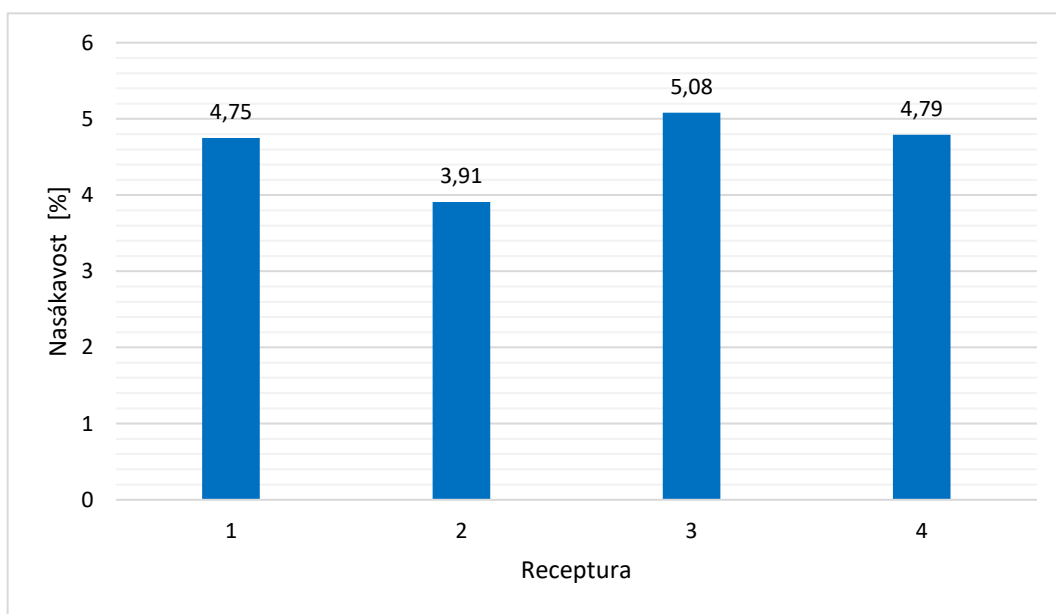
Tab. 14: Výsledky zkoušky nasákavosti a odolnosti vůči CHRL

Receptura	Nasákavost [%]	Ø Nasákavost [%]	CHRL [g/m ²]	Ø CHRL [g/m ²]
1	4,26	4,75	449,2	393,4
	4,88		368,5	
	5,12		362,4	
2	3,79	3,91	609,2	812,8
	3,80		1074,1	
	4,14		755,1	
3	5,09	5,08	146,8	130,2
	5,21		157,7	
	4,93		86,1	
4	4,69	4,79	194,7	220,8
	4,85		321,8	
	4,83		145,8	

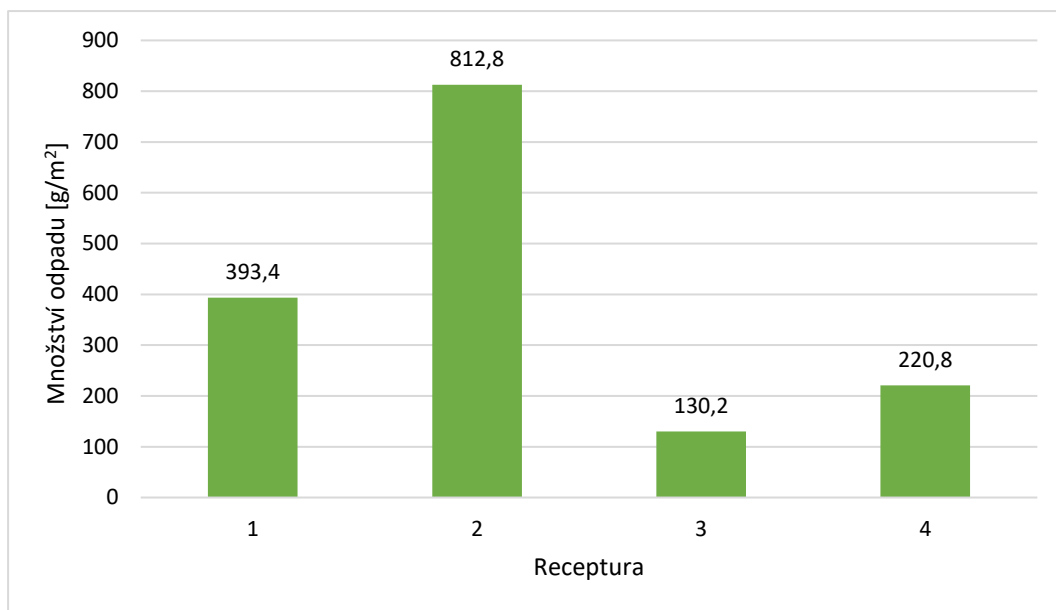
Grafy:



Obr. 16: Pevnost v tlaku a objemová hmotnost po 7 a 28 dnech zrání



Obr. 17: Nasákavost betonů



Obr. 18: Množství odpadu při zkoušce odolnosti vůči CHRL

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Složení betonu ovlivňuje všechny vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. U HSC je nejdůležitější vlastností pevnost betonu v tlaku. Z předložených rešerší se hodnota vodního součinitele u HSC pohybuje od 0,23 do 0,40. Vodní součinitel nebyl přesně zadán, ale všechny betony spadají do tohoto intervalu. U každé receptury bylo množství záměsové vody upraveno superplastifikační přísadou. Receptury 1 a 3 dosáhly nejnižšího vodního součinitele o hodnotě 0,27. Vodní součinitel 0,32 vyšel u receptury 4. Nejvyšší hodnota vodního součinitele 0,33 byla u receptury 2, kdy bylo použito nejvyšší množství pojivových složek 560 kg/m³.

Vodní součinitel 0,27 u receptury 1 byl vypočten z poměru množství použité záměsové vody, které bylo 145 kg/m³, ku množství pojivových složek 495 kg/m³. Superplastifikační přísada bylo použito 1,0 % z CEM I. Vodní součinitel 0,27 vyšel u receptury 3, kdy bylo použito nižší množství záměsové vody 130 kg/m³ na 510 kg/m³ pojivových složek. Superplastifikační přísada byla zvýšena na 1,2 % z CEM I. Hodnota vodního součinitele 0,32 vyšla u receptury 4, která byla vyrobena ze 150 kg/m³ záměsové vody, 465 kg/m³ pojivovými složkami a 1,2 % superplastifikační přísady z CEM I. Nejvyšší hodnota vodního součinitele 0,33 byla u receptury 2, kdy bylo použito 156 kg/m³ záměsové vody, nejvyšší množství pojivových složek 560 kg/m³ a 1,2 % superplastifikační přísady z CEM I. Konzistence čerstvých betonů byla pro všechny čtyři receptury stanovena na S2 (50 až 80 mm), dle metody sednutí kužele.

Vyšší objemová hmotnost ztvrdlého HSC, oproti běžnému betonu, je docílena nižším vodním součinitelem, vyšším množstvím cementu a převážně objemovou hmotností a pevností hrubého kameniva. Jeho vlastnosti mají rozhodující vliv na pevnost betonu v tlaku. To se nám potvrdilo i v receptuře 3, kdy bylo použito čedičové kamenivo. Objemová hmotnost betonu 2590 kg/m³ byla docílena díky objemové hmotnosti čedičového kameniva, pohybující se kolem 2970 kg/m³. Vliv na objemovou hmotnost má

také vysoké množství cementu, kdy cementový tmel vykazuje nižší objemovou hmotnost, než objemová hmotnost kameniva. Druhá nejvyšší objemová hmotnost 2390 kg/m^3 byla dosažena u receptury 3. Množství kameniva použitého v této záměsi se od ostatních receptur výrazně nelišilo. Vyšší objemové hmotnosti bylo docíleno přidáním další frakce kameniva a to 11–22 mm. Receptury 1 a 2 měly stejnou objemovou hmotnost 2330 kg/m^3 , kde bylo použito kamenivo frakce 0 – 4 mm, 4 – 8 mm a 8 – 16 mm z Olbramovic.

Jak již bylo řečeno, podstatný vliv na pevnost betonu má druh kameniva. To bylo ověřeno u receptury 3 s čedičovým kamenivem, které dosahuje vysoké pevnosti. Pevnost betonu v tlaku po 7 dnech byla 60,7 MPa a po 28 dnech 104,4 MPa. Receptura 4, kde byla přidána navíc frakce 11 – 22 mm, dosahovala pevnosti v tlaku po 7 dnech 66,6 MPa a po 28 dnech 90,4 MPa. Při použití větších zrn, však může dojít k nesourodosti betonu. To může způsobit nerovnoměrnou koncentraci napětí při zatížení a to vést ke snižování pevnosti betonu. Nižší pevnosti, než bylo očekáváno, bylo dosaženo u receptury 1. Návrh složení receptury byl převzat z odborného článku [91] a byly použity stejné vstupní suroviny s výjimkou znalostí původu křemičitého úletu a superplastifikační přísady. Námi dosažené maximální pevnosti však vyšly přibližně o 25 % nižší po celou dobu zrání betonu. Pevnosti v tlaku po 7 dnech dosahovaly hodnoty 52,5 MPa, předpokládaná pevnost však byla 82,0 MPa. Po 28 dnech byla pevnost 88,1 MPa, kdy byla očekávána pevnost 112,8 MPa. Receptura 2 dosáhla po 7 dnech pevnosti v tlaku 38,4 MPa a po 28 dnech 52,0 MPa. Pro zatřídění betonu jako HSC je požadována minimální pevnost v tlaku po 28 dnech 65 MPa. Tudíž tuto recepturu nelze použít pro návrh HSC. Tyto nízké pevnosti mohly být zapříčiněny použitím příliš velké náhrady cementu struskou a křemičitým úletem. Velmi vysoké množství strusky 180 kg/m^3 (50 % z CEM I) pravděpodobně zapříčinilo nižší počáteční i konečné pevnosti po 28 dnech zrání. Dalo by se však očekávat navýšení pevností v čase, kdy se obecně nárůst pevností u betonů s příměsí projeví po 56 či 90 dnech zrání. Naopak nízké množství křemičitého úletu, 20 kg/m^3 (6 % z CEM I), se zdá být nedostatečné pro ovlivnění pevností.

Díky hutné struktuře betonu a minimálnímu objemu vzduchových pórů všechny HSC mají nižší nasákavost než 6 %. Nejvyšší nasákavost 5,08 % vyšla u receptury 3. Receptury 1 a 4 s kamenivem z Olbramovic měly nasákavost cca 4,77 %. Nejnižší nasákavost 3,91 % byla u receptury 2, která obsahovala největší množství příměsí. Ty působí jako mikroplnivo, pomáhají vytvářet hutnější strukturu a tím snižují nasákavost betonu.

Zkouška odolnosti proti chemicky rozmrazovacím látkám vyšla nejlépe u receptury 3, kdy hmotnost odpadu z povrchu zkušebního tělesa, byla vypočtena na $130,2 \text{ g/m}^2$. Tento vzorek byl zatříděn dle [89] jako slabě narušený. Receptura 2 s $812,8 \text{ g/m}^2$ odpadu byla zatříděna jako narušený vzorek. Receptura 1 vykazovala hodnotu odpadu $393,4 \text{ g/m}^2$ a receptura 4 vykazovala hodnotu odpadu $220,8 \text{ g/m}^2$. Obě receptury se s těmito hodnoty řadí jako slabě narušený.

11 ZÁVĚR

Přestože jsou HSC betony používány již od 70 let, dochází k jejich neustálému vývoji. Všechny navržené receptury je zapotřebí experimentálně ověřit (postupy dávkování, míchání směsi, ukládání, hutnění, ošetření, aj.) a optimalizovat dle zadaných požadavků.

Cílem bakalářské práce bylo popsat současný stav poznání a vývoje v oblasti HSC. Návrh složení čerstvého betonu hraje významnou roli při přípravě HSC. Teoretická část bakalářské práce se proto zabývá popsáním vstupních surovin a doporučením, jak dosáhnou vysokých pevností. Jsou zde popsány výhody při použití ekonomicky dostupnějších odpadních surovin jako je struska, elektrárenský popílek, metakaolin a křemičitý úlet. Tyto kapitoly vychází z odborné tuzemské i zahraniční literatury, kde jsou jejich přínosy shrnuty. Dále byly popsány základní vlastnosti tohoto betonu a zákonitosti při jeho provádění. Samostatná kapitola uvádí již několik realizovaných staveb z HSC v ČR. Přechod z experimentálního stádia zkoumání HSC do stádia běžného použití ve stavebnictví je v ČR však pozvolný. HSC betony jsou doposud používány zejména na mostní konstrukce, lávky, sloupy či piloty a mikropiloty. V ČR prozatím nedochází k tak časté realizaci výškových staveb, tudíž je to jedna z nevýhod, které eliminují využití těchto HSC betonů v našich podmínkách.

Praktická část bakalářské práce vycházela ze znalostí získaných z rešerší a následného návrhu čtyř odlišných receptur. Betony měly dosáhnout pevností v tlaku po 28 dnech minimálně 80 MPa, tj. pevnostní třída C 75/80. K naplnění tohoto požadavku bylo dosaženo pouze u třech ze čtyř navržených receptur. U receptury 1 až 4 bylo dosaženo pevností 88,1; 52,0; 104,4 a 90,4 MPa po 28 dnech zrání betonu. K těmto pevnostem odpovídají pevností třídy C 70/85, C 40/50, C 90/95 a C 70/85. Receptura 1 se vyznačovala použitím křemičitého úletu v 10 % náhrady CEM I. U druhé receptury bylo nevhodně zvoleno množství příměsí, kdy křemičitého úletu byla zvolena příliš nízké množství 20 kg/m³ (6 % z CEM I) pro zvýšení pevností. Naopak 180 kg/m³ (50 % z CEM I) strusky bylo příliš velké množství, což zpomalilo vývoj počátečních pevností. Pevností nad 100 MPa bylo dosaženo při použití čedičového kameniva. Zde se nám potvrdilo, že lze dosáhnout vyšší pevnosti betonu s kamenivem vyšší jakosti. Na výsledné pevnosti se pozitivně projevilo použití vyššího D_{max} 22 mm u receptury 4, vyznačující se složením CEM I a čtyř frakcí kameniva bez použití příměsí. Dále bylo ověřeno, že použití odpadních surovin ve formě aktivních příměsí, jako částečná náhrada cementu, má pozitivní vliv na vývoj pevností. Musí však být dodržena kvalita a vhodné množství příměsí. Nicméně při použití elektrárenského popílku a strusky se musí většinou počítat s pomalejším vývojem počáteční pevnosti. Součástí experimentu bylo posouzení trvanlivosti navržených betonů. Stanovena byla nasákavost a odolnost vůči CHRL. Všechny betony vyhověly požadavku maximální 6 % nasákavosti. Překvapivě nejlepší hodnota nasákavosti 3,91 % byla dosažena u betonu, který nesplnil požadavek na pevnostní třídu a pevnost betonu byla pouze 52,0 MPa. Naopak nejhorší výsledky CHRL korespondují právě s dosaženou pevností. U ostatních receptur betonů bylo dosaženo srovnatelných hodnot, kdy množství odpadu odpovídalo pevnosti betonu v tlaku. Nejnižší množství odpadu 130,2 g/m² bylo dosaženo u receptury 3 s nejvyšší pevností 104,4 MPa. Druhá nejnižší hodnota odpadu 220,8 g/m² vykazala receptura 4 s pevností 90,4 MPa a receptura 1 s pevností 88,1 MPa vykazala 393,4 g/m² odpadu.

Všechny receptury, které byly označeny jako HSC (receptury 1,3 a 4) dosahují dobré trvanlivosti.

Výsledky experimentu prokázaly, že důležitou roli hraje použité množství všech vstupních surovin, způsob míchání čerstvého betonu a dostatečné zhutnění, které máji významný vliv na výslednou hodnotu pevnosti v tlaku a dalších vlastností ztvrdlého betonu, zejména z pohledu trvanlivosti betonu.

HSC betony vynikají svými vlastnostmi, avšak je nutné dodržet zásady kvalitního návrhu složení betonů, kdy následný vývoj a výzkum v oblasti těchto vysokohodnotných betonů může přinést jejich další rozvoj a větší uplatitelnost při realizaci betonových konstrukcí.

12 SEZNAM LITERATURY

- [1] Technické podmínky TP 226. Vysokohodnotné betony pro mosty PK. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [2] *High-Strength versus High Performance Concrete* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://theconstructor.org/concrete/high-strength-vs-high-performance-concrete/8617/>
- [3] COLLEPARDI, M. Moderní beton. 1. vydání. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 344 s. Betonové stavitelství. ISBN 989-808093-75-7.
- [4] [online]. [cit. 2017-01-19]. DOI: EBETON. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokopevnostni-beton-hsc>
- [5] High-Strength Concrete. Penn State Engineering [online]. Dostupné z: <http://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/concreteprop/highstrengthconcrete/highstrength.html>
- [6] AICTIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton 1. české vydání. 2005. Praha 2: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [7] WANG, Daiyu, Zhenyu WANG, Scott T. SMITH a Tao YU. Seismic performance of CFRP-confined circular high-strength concrete columns with high axial compression ratio. *Construction and Building Materials*. 2017, Volume 134, 91-103. ISSN S0950061816320281. (Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061816320281>)
- [8] ONDRÁČEK, M. Vývoj vysokopevnostních betonů definovaných vlastností s využitím druhotných surovin. Brno, 2013, 154 s. disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [9] HELA, R. *Technologie betonu I.* - studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno, 2005, 110 s.
- [10] Civil Engineering: HIGH PERFORMANCE CONCRETE. Civil Engineering [online]. Dostupné z: <http://civil-resources.blogspot.cz/2010/06/high-performance-concrete.html>
- [11] HELA R., *Technologie betonu II* - studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT FAST Brno, 2007
- [12] ČSN EN 206. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2014
- [13] Steven H. & Panarese, Beatrix KERKHOFF a William C. Panarese PANARESE. High-Performance Concrete. *Design and Control of Concrete Mixtures* EB001 [online]. Portland Cement Assn, 2003, 14th edition, Pages 299-314 [cit. 2017-05-05]. ISBN 0-89312-217-3. Dostupné z: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap17.pdf
- [14] Bílý Petr, Vysokohodnotný beton: Úvod, složení [online prezentace]. Praha: Katedra betonových a zděných konstrukcí Fakulta stavební ČVUT [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~bilypet1/vyuka/YVHB/YVHB_01.pdf

- [15] PATEL Vatsal a SHAH Niraj. A Survey of High Performance Concrete Developments in Civil Engineering Field. *Open Journal of Civil Engineering* [online]. 2013(Vol.3 No.2), 69-79 [cit. 2017-05-05]. ISSN 2164-3172. Dostupné z: http://file.scirp.org/pdf/OJCE_2013053014160390.pdf
- [16] KOLÁŘ, K. a P. REITERMAN. *Stavební materiály pro SPŠ stavební* [online]. Praha: Grada Publishing, 2012 [cit. 2017-05-19]. ISBN 978-80-247-4070-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=T33R4wIVSpsC&printsec=frontcover&dq=Stavebn%C3%AD+materi%C3%A1ly+pro+SP%C5%A0+stavebn%C3%AD&hl=cs&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Stavebn%C3%AD%20mater%C3%A1ly%20pro%20SP%C5%A0%20stavebn%C3%AD&f=false
- [17] Rovnaníková P., Vlastnosti betonů modifikovaných minerálními příměsemi [online prezentace]. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/KS2011_Rovnanikova.pdf
- [18] Thomas, Michael, Ph.D., P. Eng., Professor of Civil Engineering, University of New Brunswick, *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*, Portland Cement Association, 2007, 24 pp. Dostupné z: http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf
- [19] JEDLA, Pavel. *Přířady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.
- [20] BOTULA, Jiří a Vlastimil ŘEPKA. *Možnosti recyklace jemnozrnných hutních odpadů ze starých zátěží* [online]. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2002 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2002/sbornik/papers/17.pdf>
- [21] INDRA, Bc. IVO. *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI ALKALICKY AKTIVOVANÉ VYSOKOPECNÍ STRUSKY S PŘÍDAVKEM ELEKTRÁRENSKÝCH POPÍLKŮ*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.
- [22] Sika ViscoCrete – 225 Powder. Technický list. Vydání: 06/2014, verze č. 1.
- [23] *High Strength Concrete*, Engineered Concrete Solutions [online]. 1999 [cit. 2017-05-12]. Dostupné: http://www.holcim.co.nz/holcimcms/uploads/NZ/ECS_High_Strength_Concret.pdf
- [24] ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [25] Trvanlivost a živostnost betonových konstrukcí. *Beton TKS*, 2013, č. 6, s. 2, 18-19 ISBN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2013-06.pdf
- [26] HELA, R.. Příměsi do betonu. *Beton TKS* [online]. 2015, (2), s. 4-10 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>
- [27] LEMBÁK M., VÁCLAVÍK V., MOŠAŘ B. *VYUŽITÍ PRŮMYSLOVÉHO ODPADU V TECHNOLOGII VÁLCOVANÉHO BETONU V PŘEHRADNÍM STAVITELSTVÍ*. Ostrava: p. 83-90, 2004. ISSN 0474-8476.
- [28] ŠKOPÁN M. *RECYCLING 2006 - Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Vysoké učení technické v Brně, 2006. ISBN 80-214-3142-3.

- [29] ZOBAL O., PADEVĚT P., ŠMILAUER V., Wilson Ricardo L., MUŽÍKOVÁ B. Beton TKS. *Vliv popílků na vybrané vlastnosti cementových pojiv*. 2005, č. 2, s. 42-47. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-2-42_0.pdf
- [30] FIALA, Ctislav. *VYSOKOHODNOTNÉ A ENVIRONMENTÁLNĚ EFEKTIVNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY, KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE*. Praha, 2007
- [31] LESSARD, M., O. CHALLAL a Pierre-Claude ATICIN. Testing High-Strength Concrete Compressive Strength. *Materials Journal* [online]. 1993, Volume: 90, 303-307 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/3876>
- [32] TERZIJSKI, I. *Mosty z vysokopevnostního betonu v České republice*. Beton TKS, 2010, č. 4, s. 34-43 ISBN 1213-3116.
- [33] HUBÍK P., NACHTNEBLOVÁ K. Použití vyztužené zeminy při výstavbě mostních opěrek. *Mosty.cz* [online]. 2005 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2071>
- [34] ZICH, M. Beton TKS. *Sledování mostu z vysokopevnostního betonu*. 2010, č. 4, s. 82-86 Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-4-82_0.pdf
- [35] STRÁNSKÝ, J. Lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích. *Časopis stavitelství* [online]. 2008, (01) [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/lavka-pres-vltavu-v-ceskych-budejovicich_N551
- [36] Terzijski, I.: Identifikace konstrukčně významných charakteristik vysokopevnostního betonu, studie možnosti jejich zlepšení, část 3c. *Etapová zpráva projektu FI-IM/185 „Nové úsporné konstrukce z vysokopevnostního betonu“*. Brno, VUT-FAST, prosinec 2005
- [37] Vysokohodnotné betony v konstrukci Trojského mostu. In: *iMateriály* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/vysokohodnotne-betony-v-konstrukci-trojskeho-mostu_105648.html
- [38] Směry světového vývoje vysokohodnotného betonu. In: *iMateriály* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/smery-svetoveho-vyvoje-vysokohodnotneho-betonu_101483.html
- [39] Vltavu překlenul nový Trojský most z vysokohodnotných betonů, které umožnily vytvořit subtilní konstrukce bez opory. In: *Transport beton* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/vltavu-preklenul-novy-trojsky-most-z-vysokohodnotnych-betonu-ktere-umoznily-vytvorit-subtilni-konstrukci-bez-opory.html>
- [40] CHMELÍKOVÁ K. Beton TKS. *Problematika chlazení betonu kapalným dusíkem..* 2012, č. 4, s. 68-70 Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-4-68_0.pdf
- [41] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*
- [42] TERZIJSKI, I. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky. Část II. Vlastnosti vysokopevnostního betonu a jejich zkoušení. *Beton TKS*, 2011, roč. 2011, č. 4, s. 44-53. ISSN: 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-4-44_0.pdf

- [43] ŠEVČÍK P., NAJDENÁ I. Modul pružnosti betónu. *Betón a konštrukcie z betónu* [online]. 2010 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.tsus.sk/o_tsus/publikacie/sevcik_najdena_stavebnickarocenka_def.pdf
- [44] FALLAH, Saber a Mahdi NEMATZADEH. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2017, Volume (132), 170-187. ISSN S0950061816318682. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061816318682>
- [45] Geiker, Mette R. / Larsen, Erik Stoklund. Application of high performance concrete. *IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht* [online]. Zürich, 1996, s. 263-268 [cit. 2017-05-20].
- [46] WEISS, W. J., W. YANG a S. P. SHAH. Factors Influencing Durability and Early-Age Cracking in High-Strength Concrete Structures. *International Concrete Abstracts Portal* [online]. 2000, Volume: 189, Pages 387-410 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=5863>
- [47] ATAĞAN, H., M.A. TAŞDEMİR a O.N. OKTAR. Factors determining the correlations between high strength concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2011, Volume 25, s. 2214–2222. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061810005179>
- [48] VINKLER, M. a J. VÍTEK. Vysychání a smrštění betonu. *Beton TKS* [online]. 2016, (2), s.40 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2016-2-40.pdf>
- [49] HAVLÁSEK, P. *Modely pro dotvarování a smršťování betonu*. Praha, 2010. Studentská vědecká a odborná činnost. České vysoké učení technické v Praze Fakulta stavební.
- [50] MERTOL, H.C., S. RIZKALLA, P. ZIA a A. MIRMIRAN. Creep and shrinkage behavior of high-strength concrete and minimum reinforcement ratio for bridge columns. *PCI JOURNAL* [online]. 2010, , s.138-154 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI_Journal/2010/DOI_Articles/JL-10-SUMMER-12.pdf
- [51] KIM, B. a CH. YI. Experimental Study on the Shrinkage Properties and Cracking Potential of High Strength Concrete Containing Industrial By-Products for Nuclear Power Plant Concrete. *Nuclear Engineering and Technology* [online]. 2017, Volume 49, Pages 224–233 [cit. 2017-05-05]. ISSN 1738-5733. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1738573316301280>
- [52] DHINAKARAN, G., K. REVANTH KUMAR, S. VIJAYARAKHAVAN a M. AVINASH. Strength and durability characteristics of ternary blend and lightweight HPC. *Construction and Building Materials* [online]. March 2017, Volume 134, Pages 727–73 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061816321225>
- [53] PATEL, Vatsal a Niraj SHAH. A Survey of High Performance Concrete Developments in Civil Engineering Field. *Open Journal of Civil Engineering* [online]. 2013, Pages 69-79 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://file.scirp.org/pdf/OJCE_2013053014160390.pdf

- [54] ELRAHMAN, M. A. a B. HILLEMEIER. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, Volume 58, Pages 225–233 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061814001792>
- [55] TERZIJSKI, I. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky. Část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu. *Beton TKS*, 2011, roč. 2011, č. 1, s. 54-63. ISSN: 1213- 3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-1-54_0.pdf
- [56] GRABIEC, A.M., D. ZAWAL a J. SZULC. Chapter 6 – Binder and Carbon Dioxide Intensity Indexes as a Useful Tool to Estimate the Ecological Influence of Type and Maximum Aggregate Size on Some High-Strength Concrete Properties. *Handbook of Low Carbon Concrete* [online]. 2017, , Pages 111–137 [cit. 2017-05-12]. ISSN 9780-1280. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128045244000063>
- [57] KARAKOÇ, M.B., R. DEMIRBOĞA a I. CAN. Effect of expanded perlite aggregate on cyclic thermal loading of HSC and artificial neural network modeling. *Scientia Iranica* [online]. 2012, Volume 19, Pages 41–50 [cit. 2017-05-05]. ISSN 1026-3098. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S102630981100246X>
- [58] SHARMILA, P. a G. DHINAKARAN. Compressive strength, porosity and sorptivity of ultra fine slag based high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, Volume 120, Pages 48–53 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816308224>
- [59] BHANJA, S. a B. SENGUPTA. Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2005, Volume 35, Pages 743–747 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S000888460400225X>
- [60] EL-DIN, H. K. S., A. S. EISA, B. H. A. AZIZ a A. IBRAHIM. Mechanical performance of high strength concrete made from high volume of Metakaolin and hybrid fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, Volume 140, Pages 203-209 [cit. 2017-05-12]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061817303161>
- [61] HAQUE, M.N. a O. KAYALI. Properties of high-strength concrete using a fine fly ash. *Cement and Concrete Research* [online]. 1998, Volume 28, Pages 1445–1452 [cit. 2017-05-12]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884698001252>
- [62] RAJ, R.R., E.B. Perumal PILLAI a A.R. SANTHAKUMAR. Evaluation and Mix Design for Ternary Blended High Strength Concrete. *Procedia Engineering* [online]. 2013, Volume 51, Pages 65-74 [cit. 2017-05-05]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705813000131>
- [63] MEGAT JOHARI, M.A., J.J. BROOKS, S. KABIR a P. RIVARD. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, Volume 25, Pages 2639–2648 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061810006902>

[64] MEDDAH, M.S., S. ZITOUNI a S. BELÂABES. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, Volume 24, Pages 505–512 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061809003468>

[65] Microsilica-Sioxid. In: OFZ Istebné [online]. [cit. 2017-05-12]. (dostupné na: <http://www.ofz.sk/sk/vyrobný-program/stavebne-vyrobky/microsilica-sioxid.html>)

[66] Kamenolom Olbramovice. *Českomoravský štěrk* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/olbramovice>

[67] ALSALMAN, A., C. N. DANG a W. M. HALE. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, Volume 133, Pages 135–145 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061816319468>

[68] LI, H., F. HUANG, Y. XIE, Z. YI a Z. WANG. Effect of water–powder ratio on shear thickening response of SCC. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, Volume 131, Pages 585–591 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061816318219>

[69] Struska In: *ČEZ Energetické produkty* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: In: *ČEZ Energetické produkty* [online]. [cit. 2016-05-20].

[70] VEJMEJKOVÁ, E., M. PAVLÍKOVÁ, M. KEPPERT, Z. KERŠNER, P. ROVNANÍKOVÁ, M. ONDRÁČEK, M. SEDLMAJER a R. ČERNÝ. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, Volume 24, Pages 1404–1411 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061810000292>

[71] SHAFIQ, N., M.F. NURUDDIN, S.U. KHAN a T. AYUB. Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, Volume 81, Pages 313–323 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095006181500197X>

[72] HURTA, Jan. *Vysokopevnostní betony s příměsmi tepelně aktivovaných kaolínů*. Ostrava, 2006. Studentská vědecká odborná činnost 2006. Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Martin Vavro, Ph.D.

[73] SARSAM, K. F., T.S. AL-ATTAR. a M. M. AL-SAQI. Effect of Height to Diameter Ratio on the Behaviour of High Performance Concrete Specimen with Different Shapes under Compression Load. *Engineering & Technology Journal* [online]. 2014, Volume 32, Pages 2734-2744 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&ald=100024>

[74] ŘEZÁČ, Miloslav a Jaroslava VESELÁ. *Užití nových technologických prvků mostních objektů v povodňových územích* [online]. I. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001 [cit. 2017-05-12]. ISSN 1213-1962. Dostupné z:

<https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/34362/2001-1-ro%C4%8Dn%C3%ADk%20I.-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[75] SHAFIQ, N., M. F. NURUDDIN, S. U. KHAN a T. AYUB. Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, Volume 81, Pages 313–323 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095006181500197X>

[76] MELICHAR, Tomáš, David PROCHÁZKA a Vít ČERNÝ. Studium fyzikálně-mechanických parametrů lehkých vysokopevnostních betonů s pórovitým kamenivem na bázi spékaných popílků. *Beton TKS* [online]. 2010, 4, s. 54-60 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-4-54_0.pdf

[77] ZICH, Miloš. *Projekty sledování, jejich realizace a analýza dlouhodobého chování betonových konstrukcí* [online]. Brno: VUTIUM, 2012 [cit. 2017-05-12]. ISBN 978-80-214-4497-3. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4497-3.pdf>

[78] ZICH, Miloš. Sloupy z vysokopevnostního betonu v obchodním domě Magnum. *Beton TKS* [online]. 2011, 6, s. 6-10 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-06_0.pdf

[79] Českomoravský cement a.s. Technický list. Mokrý. Vydání: 06/2016

[80]] Sika® ViscoCrete® – 1035 CZ. Technický list. Vydání: 06/2016, verze č. 01.

[81] MELICHAR, T. a D. PROCHÁZKA. Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC. *Beton TKS* [online]. 2011, 6, s. 66-73 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-66_0.pdf

[82] LIM, J. C. a T. OZBAKKALOGLU. Influence of silica fume on stress–strain behavior of FRP-confined HSC. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, Volume 63, , Pages 11-24 [cit. 2017-05-12]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061814003079>

[83] BEUSHAUSEN, H. a T. DITTMER. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, Volume 74, , Pages 132-139 [cit. 2017-05-12]. ISSN 0950-0618. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061814009672>

[84] GRABIEC, A. M., D. ZAWAL a J. SZULC. Influence of type and maximum aggregate size on some properties of high-strength concrete made of pozzolana cement in respect of binder and carbon dioxide intensity indexes. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, Volume 98, Pages 17–24 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0950-0618. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061815303251>

[85] ČSN EN 12350-2 - *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím* Praha: Český normalizační institut, 2009

[86] ČSN EN 12350-6 - *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*

Praha: Český normalizační institut, 2000

- [87] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu - část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [88] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu - část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [89] ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: Československý normalizační institut, 1985
- [90] ČSN EN 1917 Vstupní a revizní šachty z prostého betonu, drátkobetonu a železobetonu. Nasákavost betonu.
- [91] MELICHAR, Tomáš a David PROCHÁZKA. Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC. *Beton TKS* [online]. 2011, (6), s. 66-73 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-66_0.pdf
- [92] CHROMÁ, M., P. ROVNANÍKOVÁ a B. TEPLÝ. TRVANLIVOST: EN 206 – KONCEPT K-HODNOTY – MODELOVÁNÍ. *Beton TKS* [online]. 2013, (6), s. 56-59 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-6-56_0.pdf

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Návrh třídění vysokohodnotných betonů [11].....	14
Tab. 2: Hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, závislé na vodním součiniteli a množství použité superplastifikační přísady [47].....	16
Tab. 3: Základní mechanické parametry vysokopevnostního betonu [42].....	25
Tab. 4: Tlaková pevnost HPC v závislosti na hodnotě vodního součinitele [6].....	26
Tab. 5: Složení betonu C 60/75 [32].....	30
Tab. 6: Parametry všech použitých betonů dosažené při průkazných zkouškách [32]..	30
Tab. 7: Složení variant betonu C 55/67 pro lávku v Českých Budějovicích [32].....	32
Tab. 8: Průměrné hodnoty vlastností variant betonu C 55/67 pro lávku [32].....	33
Tab. 9: Navržené receptury HSC.....	38
Tab. 10: Hodnoty zkoušky sednutí kužele.....	40
Tab. 11: Výsledky zkoušek po 7 dnech zrání.....	43
Tab. 12: Výsledky zkoušek po 28 dnech zrání.....	44
Tab. 13: Zařazení receptur do pevnostních tříd.....	44
Tab. 14: Výsledky zkoušky nasákavosti a odolnosti vůči CHRL.....	44

14 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Porovnání velikosti částic cementu a křemičitého úletu [55].....	16
Obr. 2: Pevnost v tlaku po 28 dnech s různými procenty křemičitého úletu [59].....	17
Obr. 3: Vývoj hydratačního teplo s použitím strusky a bez ní [29].....	19
Obr. 4: Porovnání struktury běžného betonu a vysokohodnotného betonu [2].....	21
Obr. 5: Vliv maximální velikost zrn kameniva na pevnosti betonu v tlaku (po 1, 7 a 28 dnech) v závislosti na typu kameniva a různému množství cementu [84].....	22
Obr. 6: Typické křivky modulu pružnosti pro HSC [43].....	27
Obr. 7: Cena 1 m ³ betonu [32].....	30

Obr. 8: Celkový pohled na přesýpaný most a pohled na nosníky mostu [32]	31
Obr. 9: Celkový pohled na lávku v Českých Budějovicích [32].....	32
Obr. 10: Pohled na Trojský most [37]	33
Obr. 11: Vývoj pevnosti v tlaku (mostovky) a modulu pružnosti [37]	34
Obr. 12: Teplota betonu dodávaného na stavbu během dne [40]	35
Obr. 13: Příčný řez budovy [77].....	35
Obr. 14: Průběh měřeného přetvoření betonu ve sloupu C7 [77].....	36
Obr. 15: Výsledek zkoušky sednutí kuželem	40
Obr. 16: Pevnost v tlaku a objemová hmotnost po 7 a 28 dnech zrání	45
Obr. 17: Nasákavost betonů.....	45
Obr. 18: Množství odpadu při zkoušce odolnosti vůči CHRL	46

15 SEZNAM ZKRATEK

HSC	High Strenght Concrete – Vysokopevnostní beton
UHPC	Ultra High Performance Concrete – Ultra vysokohodnotný beton
HPC	High Performance Concrete – Vysokohodnotný beton
SCC	Self Compacting Concrete – Samozhutnitelný beton
LWHSC	Lightweight High Strength Concrete – Lehké vysokopevnostní betony
C–S–H gel	Kalcium silikátový hydrát
CHRL	Chemické rozmrazovací látky
zovací látky	
SP	Superplastifikační přísada
ZP	Zpomalovací přísada
NP	Napěňovací přísada
ČSN	Československá norma (Česká soustava norem, Česká technická norma)
EN	Evropská norma
CEM I	Portlandský cement
CEM II	Portlandský cement směsný
42,5 R (N)	Minimální pevnost v tlaku po 28 dnech 42,5 MPa, R – rychlý počáteční nárůst pevností N – nízký počáteční nárůst pevností
w/c	Voda/cement
ČR	Česká republika
D _{max}	Maximální zrna kameniva
CHRL	Chemické rozmrazovací látky
DTK	Drobné těžené kamenivo
HDK	Hrubé drcené kamenivo
HTK	Hrubé těžené kamenivo
f _{ck}	Charakteristická pevnost betonu v tlaku (válcová)
f _{ck,cube}	Charakteristická pevnost betonu v tlaku (krychelná)

f_{cm}	Střední hodnota pevnosti betonu v tlaku
E_{cm}	Sečnový modul pružnosti v tlaku
f_{ctm}	Průměrná pevnost v dostředném tahu
$f_{ctk0,05}$	Charakteristická pevnost v tahu (0,05 kvantil)
$f_{ctk0,95}$	Charakteristická pevnost v tahu (0,95 kvantil)
C_3A	Trikalcium aluminát
MnO	Oxid manganatý
MgO	Oxid hořečnatý
Fe_2O_3	Oxid železitý
CO_2	Oxid uhličitý
$Ca(OH)_2$	Hydroxid vápenatý
SiO_2	Oxid křemičitý
Al_2O_3	Oxid hlinitý
CaO	Oxid vápenatý
k–hodnota	Součinitel zohledňující účinnost příměsi druhu II
EP	Expandovaný perlit
EPS	Expandovaný pěnový polystyren