

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza vlivu přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu

Ondřej Šmíd, DiS.

Bakalářská práce

2019

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Šmíd**
Osobní číslo: **D18709**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Analýza vlivu přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V tematice přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí betonu se požaduje zpracovat rešerše stávající míry poznání v ČR i v zahraničí. V experimentální části práce je požadováno zaměřit se na aplikaci těchto přísad. Lze využít "referenční" recepturu typového samozhutnitelného betonu (SCC). Vlastní experimentální zkoušky budou probíhat na autorem zhotovených zkušebních tělesech. Doporučuje se provést záznam vývinu hydratačního tepla. Požaduje se připravit a provést výrobu diferenčního kalorimetru.

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání

2) Experimentální část

Odběr čerstvého samozhutnitelného betonu

Zkoušení čerstvého SCC betonu (stanovení konzistence, objemová hmotnost) + záznam vývinu hydratačního tepla

Zkoušení ztvrdlého SCC betonu (krychelná pevnost, objemová hmotnost)

Výroba diferenčního kalorimetru

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Příloha zadání bakalářské práce

Seznam odborné literatury:

- ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- ČSN P 73 2404. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 196-8. Metody zkoušení cementu - Část 8: Stanovení hydratačního tepla - Rozpouštěcí metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- ČSN EN 196-9. Metody zkoušení cementu - Část 9: Stanovení hydratačního tepla - Semiadiabatická metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- ČSN EN 480-X. Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 934-X. Přísady do betonu, malty a injektážní malty. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN 73 1332. Stanovení tuhnutí betonu. Praha: Český normalizační institut, 1985.
- MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.
- TP 187: Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací. In: Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy ČR: Odbor infrastruktury, 2008.
- SCHUTTER, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA, 2008. Samozhutnitelný beton. Praha: ČBS Servis. ISBN 978-1904445-30-2.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury: **viz příloha**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **3. října 2018**

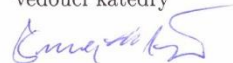
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2019**



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

L.S.

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry



V Pardubicích dne 3. ledna 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 5. 2019

Ondřej Šmíd, DiS.

Poděkování:

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D., za odborné vedení, za věcné připomínky a rady při zpracování této bakalářské práce. Mé poděkování patří též panu Lubošovi Sobotkovi z firmy H.A.N.S. stavby za umožnění vykonat přípravy, samotnou betonáž a zkoušky u nich ve firmě.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá analýzou vlivu urychlujících přísad na tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu. V experimentální části práce je vyroben diferenční kalorimetr, je popsána výroba a ošetřování zkušebních těles, zkoušení čerstvého betonu, stanovení pevnostních charakteristik, vývin hydratačního tepla. V závěru práce je vyhodnocení celého experimentu, kde je zahrnuta i ekonomická stránka použití urychlovačů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Samozhutnitelný beton, urychlovače betonu, hydratační teplo, pevnost v tlaku

TITTLE

Analysis of the influence of additives accelerating setting and hardening of self-compacting concrete.

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with an analysis of influence of accelerating additives on solidification and hardening of self-compacting concrete. In experimental part, the thesis deals with production of differential calorimeter. Next chapter describes production and treatment of test specimens, testing of fresh concrete, determination of strength characteristics and development of hydration heat. At the end of this bachelor thesis is an evaluation of whole experiment, including the economic aspects of accelerators.

KEYWORDS

self-compacting concrete, accelerating ingredient of concrete, hydration temperature, compressive strength

Obsah

0	ÚVOD.....	14
I.	TEORETICKÁ ČÁST	16
1	Samozhutnitelný beton obecně	16
1.1	Historie.....	16
1.2	Předpoklady k použití	16
1.3	Předpokládané použití SCC betonu s urychlujícími přísadami na tuhnutí a tvrdnutí	18
1.4	Metody urychlení počátečního náběhu pevností SCC	19
1.5	Chemické urychlování betonu.....	19
2	Složky SCC betonu.....	21
2.1	Kamenivo	21
2.2	Cement	22
2.3	Voda	22
2.4	Přísady.....	23
2.4.1	<i>Plastifikátory</i>	23
2.4.2	<i>Urychlující přísady</i>	24
2.5	Provzdušňující přísady	26
2.6	Ostatní přísady	26
2.7	Příměsi	27
2.7.1	<i>Popílek</i>	27
2.7.2	<i>Křemičitý úlet</i>	28
2.7.3	<i>Jemně mletá vysokopecní struska</i>	29
2.7.4	<i>Kamenné odprašky</i>	29

2.7.5	<i>Mikromletý vápenec</i>	30
2.7.6	<i>Keramický obrus</i>	30
3	Reologie.....	32
3.1	Binghamovo tečení.....	32
3.2	Newtonovské tečení	33
4	Vlastnosti čerstvého samozhutitelného betonu	34
4.1	Schopnost vyplňování bednění	34
4.2	Prostupnost.....	34
4.3	Odolnost proti rozměšování a sedání	35
4.4	Soudržnost betonu s výztuží.....	35
4.5	Smrštění a dotvarování.....	36
4.6	Trvanlivost	36
4.7	Pevnost v tlaku a moduly pružnosti	36
5	Zkoušení vlastností SCC.....	38
5.1	Zkouška sednutí-tekutosti	38
5.2	Zkouška V-trychtýřem	38
5.3	Zkouška L-boxem	38
5.4	Zkouška segregace při prosévání	39
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....		40
6	Použité měřicí přístroje.....	41
6.1	Váha Kern DS	41
6.2	Zatěžovací lis	41
6.3	Další pomůcky a nástroje použité při experimentu.....	41
7	Zkouška rozlití kužele.....	43

8	Zhotovení a ošetřování těles	46
8.1	Stanovení pevnosti	46
8.1.1	<i>Pevnostní charakteristiky po 18 hodinách</i>	<i>47</i>
8.1.2	<i>Pevnostní charakteristiky po 24 hodinách</i>	<i>48</i>
8.1.3	<i>Pevnostní charakteristiky po 7 dnech.....</i>	<i>48</i>
8.1.4	<i>Pevnostní charakteristiky po 28 dnech.....</i>	<i>49</i>
8.1.5	<i>Vyhodnocení pevnostních zkoušek.....</i>	<i>49</i>
8.2	Diferenční kalorimetr	50
8.3	Ekonomické zhodnocení	52
8.3.1	<i>Hodnocení z pohledu obrátkovosti</i>	<i>52</i>
8.3.2	<i>Hodnocení z hlediska ceny.....</i>	<i>53</i>
	Závěr.....	54
	CITACE.....	55
	DOKLADOVÁ ČÁST.....	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Závislost pevnosti na vodním součiniteli [24]	18
Obrázek 2 Vývoj pevnosti betonu v závislosti na teplotě prostředí [25]	19
Obrázek 3 Cement [7]	22
Obrázek 4 Popílek [8]	28
Obrázek 5 Křemičitý úlet [9]	29
Obrázek 6 Jemně mletá vysokopepční struska [13]	29
Obrázek 7 Mikromletý vápenec [14]	30
Obrázek 8 keramický obrus [15].....	31
Obrázek 9 Výztuž [16].....	35
Obrázek 10 Váha Kern DS	41
Obrázek 11 Zatěžovací lis ADR3000	41
Obrázek 12 Průběh zkoušky rozlíváním (vzorek bez urychlovače)	44
Obrázek 13 Naměřené hodnoty v čase T_{500}	45
Obrázek 14 Změřené rozlívání v čase T_{500}	45
Obrázek 15 Uložení zkušebních těles ve vodní lázni	46
Obrázek 16 Zkoušení pevnosti v tlaku	47
Obrázek 17 Naměřené hodnoty pevností.....	50
Obrázek 18 Část vnějšího obalu kalorimetru	51
Obrázek 19 Vývin hydratačního tepla	52

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty rozlití	43
Tabulka 2 Pevnost v tlaku po 18 hodinách	47
Tabulka 3 Pevnost v tlaku po 24 hodinách	48
Tabulka 4 Pevnost v tlaku po 7 dnech	48
Tabulka 5 Pevnost v tlaku po 28 dnech	49
Tabulka 6 Cenová kalkulace	53
Tabulka 7 Výpočet celkové ceny	53

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

SCC	samozhutnitelný beton
C ₃ S	alit
C ₂ S	belit
m _v	množství vody
m _c	množství cementu
m _p	množství aktivní příměsi
k	hodnota odpovídající dané minerální příměsi
τ ₀	napětí na mezi kluzu
γ'	smyková rychlost
μ	plastická viskozita
τ	smykové napětí
G	smykový modul
γ	přetvoření nebo deformace
SF	sednutí-rozlítí
d ₁	největší průměr rozlité
d ₂	průměr rozlité ve směru kolmém k d ₁
PL	je součinitel schopnosti průtoku
H ₁	průměrná hloubka betonu ve svislé části truhlíku
H ₂	průměrná hloubka betonu ve svislé části truhlíku
SR	je segregovaná část
m _{ps}	hmotnost dna síta včetně propadlého materiálu
m _p	hmotnost dna síta
m _c	počáteční hmotnost betonu vloženého na síto

0 ÚVOD

Jako téma své bakalářské práce jsem si zvolil analýzu vlivu přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu. Použití tohoto typu betonu v dnešní době je velmi využíváno, neboť díky němu lze docílit mnohem dříve potřebných vlastností a tím i rychlejší výrobu prefabrikátů.

Samozhutnitelný beton SCC je druh betonu, který lze charakterizovat jako vylepšený beton s cílem dosažení lepších vlastností jako jsou rozlití, tuhnutí, tvrdnutí. Při jeho výrobě se do směsi přidávají různé druhy chemikálií přísad a příměsí, které ovlivňují tyto vlastnosti.

Práce je rozdělena do dvou základních částí. Část první, teoretická, se zabývá stručným popisem historie SCC betonu, dále využití toho druhu betonu v ČR. Podrobněji je popsáno využití přísad tuhnutí a tvrdnutí, druhy, vlastnosti a jejich specifika.

Druhá část, experimentální, se zabývá zkoušením čerstvého betonu, kde budou provedeny zkoušky konzistence, objemové hmotnosti a během tvrdnutí cementové kaše také vývin hydratačního tepla v závislosti na čase. Následně budou vytvořeny vzorky, na kterých budou provedeny zkoušky krychelné pevnosti a objemové hmotnosti. Součástí bude vytvoření výkresové dokumentace, technologického postupu výroby a následné zhotovení diferenčního kalorimetru.

Práce je prováděna za účelem porovnání použitých přísad a vyhodnocení jejich reálných výsledků, které se mohou ihned přenést do praxe, kde mohou urychlit a zefektivnit výrobu a jejich vliv se může promítnout i do ekonomické stránky.

CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cíle bakalářské práce jsou následující:

- Zachytit historický a současný stav v poznání v oblasti samozhutnitelného betonu
- Zaměřit se na vliv urychlovače na tuhnutí a tvrdnutí SCC betonu
- Vyrobit diferenciální kalorimetr a využít ho při zaznamenávání vývinu hydratačního tepla a tuto teplotu vyhodnotit
- Provedení zkoušek vzorků na pevnost v tlaku
- Ekonomické hledisko použití urychlovače
- Popsat závěrečné vyhodnocení zkoušek

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Samozhutnitelný beton obecně

„Samozhutnitelný beton je beton vylepšených vlastností, který nevyžaduje zhutňování během vlastního zpracování. Je schopen téci působením vlastní tíhy, dokonale vyplnit bednění a docílit dokonalého zhutnění i v místech hustého vyztužení. Zatvrdlý beton je hutný, homogenní a má stejné technické vlastnosti a trvanlivost jako tradičně hutněný beton.“ [6].

1.1 Historie

Zlom při použití tohoto druhu betonu nastal v Japonsku v druhé polovině 80. let. První návrh složení představil v roce 1988 Kazumasa Ozawa z Univerzity v Tokiu. Tento druh betonu byl původně zařazen jako tzv. vysokohodnotný beton (HPC- High Performance Concrete) až později byl název upraven na Self-compacting High Performance concrete, v dnešní době se hojně používá už jen SCC- Self compacting concrete. Zpočátku tento druh betonu používalo jen pár velikých stavebních firem. Do Evropy se tato technologie dostala až na přelomu první a druhé poloviny devadesátých let minulého století. V té době byly zkušenosti s SCC betonem na už takové úrovni, že kromě drobných staveb došlo k použití tohoto typu betonu i na stavbách většího měřítka, nejprve v Japonsku a postupem času i v ostatních státech. V této době nastává problém s definicí skutečných vlastností SCC. Následně vzniká technická skupina nazývaná TC145-WSM (později TC145-SCC) pod vedením mezinárodního technického výboru RILEM, která má za úkol sjednotit pravidla a zkoušení SCC. Na základě studií a mezinárodních konferencí o speciálních a vysokohodnotných betonech, kam patří i SCC, je vydána první Evropská směrnice pro SCC v roce 2000. Následné předpisy a poznatky pak už řeší dílčí národní nebo evropské normy.

V současnosti je vývoj SCC betonu spojován s vývojem a použitím přísad do betonu a jeho použití i přes vyšší počáteční finanční náročnost na vzestupu. [1]

1.2 Předpoklady k použití

Ve stavitelství je beton jednou z nejvyužívanějších složek, bez které si stavbu jen těžko představit. Během vývoje konstrukcí a betonu, který jej tvoří, došlo k výraznému posunu směrem dopředu, a i přesto vývoj dále pokračuje. Současný trend staveb je architektonicky velmi zajímavý a někdy i složitý, že použití klasického stavebního materiálu jako jsou zdící

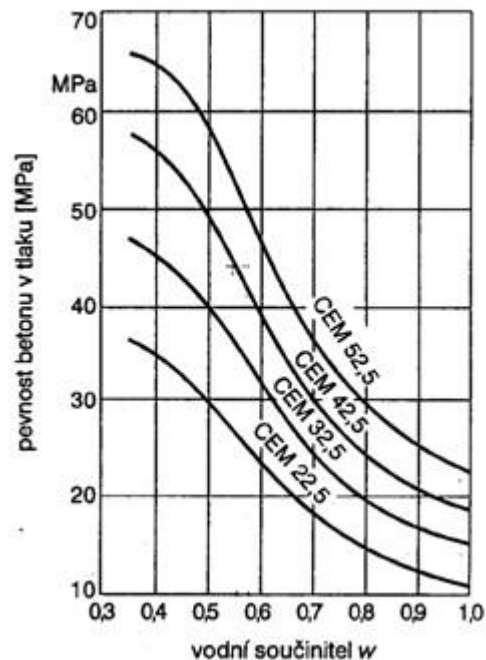
prvky, není možné. Nastupuje tedy varianta použití betonu, kdy se vytvoří monolitická konstrukce někdy i složitého tvaru. V dnešní době je mnoho druhů betonů s různými vlastnostmi a pevnostmi, jak v zatvrdlém stavu, tak i v čerstvém stavu. Pokud mluvíme o vlastnostech čerstvého betonu, tak mezi ně bezesporu patří konzistence a délka zpracovatelnosti. Vzhledem k technologickému hledisku by bylo vhodné používat betonu o konzistenci s nižším obsahem záměsové vody ($w=0,28$), která je využívána za účelem hydratace cementu (min $w=0,23$). Zbylý podíl vody, který je přidán nad rámec potřeby k hydrataci v průběhu tuhnutí a tvrdnutí se odplavuje a vytváří tak podlouhlé kapiláry, které mají za následek snížení výsledné pevnosti betonu. Namíchání takového betonu, s nízkým vodním součinitelem má za následek vznikající problémy při transportu, ukládání a hutnění a homogenity směsi v průřezu prvku (rozdílná kvalita). Ukládání betonu do složitých tvarů je časově velmi náročné a technologicky složité (např. čerpání směsi a její hutnění). Což je velmi zdoluhavé a pracné, ve výsledku finančně náročnější, zejména s ohledem na cenu lidské práce. Řešení můžeme spatřit právě v použití SCC betonu, kde tyto problémy odpadají, ale vznikají jiné problémy k řešení zejména těsnost bednění a tlaky čerstvého betonu v konstrukci bednění.

Mimo zmiňované nutnosti hutnění a vytvoření složitých tvarů je v dnešní době čím dál více využíván pohledový beton, kde je nutné při určitých požadavcích dosáhnout maximálního zhutnění z pohledových stran, kde po odbednění povrch neobsahoval kaverny a povrchové póry. Použití SCC řeší i tento problém a výsledný povrch je při správném složení, správné konzistenci a aplikaci téměř dokonalý. Výhodu použití SCC betonu lze spatřovat i při betonáži masivních konstrukcí například bloky o velkém objemu betonu nebo o konstrukci, ve které je použito velké množství betonářské výztuže bez možnosti hutnění. Jedná se například o konstrukce mostů nebo o přehradu.

Jako další výhodu použití SCC betonu lze spatřit v betonárnách prefabrikovaných dílců, kde se uplatní výše zmíněné klady, navíc dochází ke zlepšení podmínek pro dělníky, neboť odpadá nutnost vibrování, čímž se sníží hlučnost výroby. Jako další plus můžeme spatřit v trvanlivosti forem, ty nepodléhají vibracím a zvyšuje se tak jejich životnost. Dále odpadá nutnost pořízení a následná údržba různých druhů vibrátorů, jakožto ponorných, příložných nebo vibračních latí, stolů. Výše jmenované výhody vedou ke zvýšení efektivity výroby, menší náročnosti, a i k menším nákladům.

Přednosti SCC betonu lze spatřovat v:

- Zlepšení pracovních podmínek důsledkem vynechání vibrace, která byla prováděna ponornými vibrátory, nebo vibrační stoly,
- Lze realizovat složité architektonicky komplikované tvary a konstrukce, neboť beton dobře vyplní i obtížně dostupná místa,
- Velké plus lze spatřit ve snížení hladiny hluku, vyloučení procesu vibrování,
- Vysoká kvalita povrchu při použití kvalitního bednění a správného ošetření a trvanlivosti konstrukce,
- Největším požadovaným efektem je rychlý nárůst pevnosti, následné brzké odbednění,
- Nižší náklady (nároky na vybavení, menší počet zaměstnanců, rychlost prováděných prací) [1], [5], [6], [15].



Obrázek 1 Závislost pevnosti na vodním součiniteli [24]

1.3 Předpokládané použití SCC betonu s urychlujícími přísadami na tuhnutí a tvrdnutí

Použití tohoto druhu betonu se v praxi používá v menším množství, neboť jeho specifické vlastnosti vedou k použití jen při určitých betonážích. Při přidání urychlujících přísad dochází k urychlení nárůstu pevností, což při transportu je nežádoucí a docházelo by k problémům. Proto je tento druh betonu hojně využíván ve výrobnách prefabrikovaných dílců. Kde je požadována co nejvyšší tekutost po určitou dobu právě pro ukládání a zhutnění směsi.

1.4 Metody urychlení počátečního náběhu pevností SCC

Pokud mluvíme o urychlení počátečních náběhů pevností, máme na mysli urychlení tvrdnutí a tuhnutí betonu v počáteční fázi od doby uložení do bednění. Pro tyto potřeby se v praxi používá několik metod téměř shodných jako při urychlení tradičního vibrovaného betonu. Před použitím chemických přísad byla velmi rozšířená metoda proteplování (propařování) betonu. Tato metoda byla postupem času nahrazena použitím chemických přísad. Neboť byla velmi energeticky náročná a při jejím použití docházelo ke snížení konečné pevnosti betonu. Za moderní metodu lze uvažovat použití chemických přísad do betonu za účelem urychlení náběhu jeho pevnosti. Při aplikaci těchto přísad je nutné beton ukládat do bednění co nejdříve, neboť přísady začínají účinkovat velmi rychle. Tekutost a konzistence SCC betonu s přibývajícím časem postupně klesá. Jedná se o velmi krátký časový horizont (cca 15-30 minut). Do této doby je nutné beton uložit do bednění. Tento druh SCC betonu se hojně využívá právě v prefa výrobnách, kde je beton, ihned po smíchání složek včetně urychlovače, ukládán do bednění.



Obrázek 2 Vývoj pevnosti betonu v závislosti na teplotě prostředí [25]

1.5 Chemické urychlování betonu

Přidáním urychlující přísady (urychlovače) mluvíme o chemickém urychlení, které je v praxi hojně využívané a účinné. V porovnání s proteplováním, je tato metoda méně energeticky náročná z čehož vyplývá, že je i ekonomičtější. Při aplikaci se přísada přidává do míchačky těsně před záměsovou vodou dle předepsaného dávkování. Velikostí dávky a druhem

urychlovače lze ovlivnit míru urychlení tuhnutí a tvrdnutí. V čase od namíchání betonu s urychlovačem se mění reologie betonové směsi (vývin hydratačního tepla a voda jako složka kapalné přísady), proto, jak už bylo zmíněno, je nutné beton ukládat do bednění co nejdříve, za účelem co nejvíce využít efekt samozhutnění. Od počátečních tuhnutí a následném tvrdnutí, což je způsobeno hydratací cementu, dochází k vyššímu množství hydratačního tepla. Vlivem této vyšší teploty vzniká riziko odpaření částí záměsové vody z ploch, které nejsou v kontaktu s bedněním, z tohoto důvodu je nutné ošetřovat tento povrch, zejména v ranných stádiích zrání. Je ale nutné kontrolovat teplotu prvku, zejména uvnitř, aby nedošlo k překročení limitních teplot (většinou cca 65-70 °C). [9], [10].

2 Složky SCC betonu

Odlišnost samozhutnitelného betonu oproti tradičního betonu lze spatřit v obsahu jemných podílů. Skládá se převážně z těžného kameniva, cementu, vody a příměsi. Právě jemné podíly (částice příměsi a cementu-velikost zrna menší než 0,125mm popř. 0,063mm) dokáží velmi výrazně měnit konzistenci SCC v čerstvém stavu, čehož se v praxi využívá. Jemné podíly také dokáží dokonalé zaplnění mezer mezi zrny kamenivy, což má za výsledek vyšší pevnost a trvanlivost.

2.1 Kamenivo

Kamenivo lze považovat za největší složku betonu. Má velký vliv na vnitřní tření, tím pádem i na reologii SCC. Těžné kamenivo je vhodnější než drcené, neboť na těžné kamenivo je potřeba pro ovlhčení méně záměsové vody (smáčení, solvatace) oproti kamenivu drcenému, které má větší měrný povrch. Další výhodou těžného kameniva lze spatřit v lepším tvarovém indexu. V konečné fázi, použití těchto dvou druhů kameniva, rozhoduje ekonomická stránka, kdy se používá kamenivo, které je lépe dostupné. Vhodným výběrem kameniva lze ovlivnit také výsledné hodnoty modulů pružnosti. Pro dosažení co největší pevnosti se volí kamenivo s vyšší pevností. Dalším faktorem ovlivňující volbu použití těžného kameniva z vody lze spatřit v čistotě povrchu zrn kameniva, kde povrch nemusí obsahovat nežádoucí prachové částice, na druhou stranu je nutné zvážit znečištění např. organickými látkami či jíly apod. Při zvolení špatného druhu kameniva, je nutné kamenivo propírat, abychom docílili odstranění nežádoucích prachových částic a také jílové podíly případně organické látky, které způsobují rozplavování částic směsi. Dále mohou způsobit falešné tuhnutí a ovlivňují průběh hydratace cementu.

Křivka zrnitosti kameniva by měla být co nejplynulejší. Obsah jemných podílů musí vyhovovat normativním standardům. Při návrhu složení SCC betonu je složité určit přesnou hranici, do níž je kamenivo jemným podílem, aby bylo ve správném množství připočteno k celkovému obsahu jemným podílům ve směsi. Tato hodnota není přesně definovaná. Například v Japonsku se pracuje s propadem pod sítem 0,075 mm jako s jemným podílem, oproti tomu v Evropě je hraniční hodnota 0,125mm. Vhodný návrh křivky zrnitosti vychází zejména z přímých praktických zkušeností. [1], [2], [6].

2.2 Cement

Pro výrobu SCC betonu můžeme použít všechny druhy cementu, které splňují požadavky normy ČSN EN 197-1. Největší důraz je kladen na obsahu jemných podílů, aby byla zaručena dostatečná tekutost a absolutní výplň mezer mezi zrny kameniva. Nejpoužívanějším cementem se stal CEM I 42,5R a vyšší, aby byl zaručen rychlý náběh počátečních pevností. Množství cementu je v rozmezí 350–450 kg/m³, dle požadované pevnostní třídy. Pro SCC betony s rychlými náběhy je důležité složení cementu po mineralogické stránce, kde je podstatný poměr množství C₃S (alit), C₂S (belit) a C₃A (trikalciumaluminát) v cementu. Při větším množství alitu má za následek urychlení počátečních pevností betonu i konečnou pevnost a trvanlivost, což je v tomto případně vhodné. Rychlý reakce alitu má za následek vznik podstatného množství hydratačního tepla. Naopak belit reaguje pomaleji a jeho vývin hydratačního tepla není tak výrazný. Pokud porovnáme dlouhodobé pevnosti, zjistíme, že jsou srovnatelné u obou minerálů. V cementech většinou převažuje alit, a to v poměru 3:1.



Obrázek 3 Cement [7]

2.3 Voda

Pro samozhutnitelné betony se používá voda stejných kvalit jako u tradičního betonu. Voda podléhá normě ČSN EN 1008- Záměsová voda do betonu. Množství vody záleží na množství cementu a množství částic menších jak 0,125 mm (jemné podíly). Za ty lze považovat popílek, mletý vápenec, pigmenty atd. Vodní součinitel se rovná poměru z množství vody a cementu s jemnými podíly, včetně k-hodnoty, pokud je použita aktivní příměs.

$$W = \frac{m_v}{m_c + (k * m_p)} \quad (1)$$

kde:

m_v množství vody

m_c množství cementu

m_p množství aktivní příměsi

k hodnota odpovídající dané minerální příměsi

U samozhutnitelného betonu se hodnota vodního součinitele pohybuje v rozmezí 0,35-0,6. S vývojem superplastifikačních přísad se předpokládá snižování této hodnoty. Což má za následek zvýšení pevnosti, neboť čím vyšší je vodní součinitel, tím menší bude výsledná pevnost betonu a celkově bude mít beton v zatvrdlém stavu horší vlastnosti. Na vodním součiniteli závisí i moduly pružnosti, kde je to podobné jako u pevnosti.

Kalovou vodu lze používat, ale jen v určité míře. Protože obsahuje množství jemných podílů, které nelze dopředu určit. Maximální dávka kalové vody pro samozhutnitelné betonu se pohybuje v rozmezí 20-30 % zbylé množství se doplňuje vodou čistou. Pro provzdušněný SCC beton se kalová voda nesmí použít.

2.4 Přísady

Jako přísady lze považovat chemické látky, které přidáváme do betonu za účelem ovlivnění jeho vlastností, tyto přísady musí splňovat podmínky normy ČNS EN 934. Dávkování přísad se pohybuje v rozmezí 0,2-5 % z hmotnosti cementu. Pokud objem dávkované přísady větší jak 3 l/m^3 betonu, potom, toto množství je nutné přičíst vodní podíl přísady k množství vody, což má za následek ovlivnění hodnoty vodního součinitele. Jako hlavní přísada samozhutnitelného betonu se považuje tzv. superplastifikační přísada. S tím je spojená přísada ovlivňující viskozitu, dále lze použít stabilizátor a provzdušňovací či odpěňovací přísadu. Naopak pro zpomalení tuhnutí a tvrdnutí, lze přidat přísady ovlivňující tuhnutí a tvrdnutí. Před použitím kombinace přísad, je nutné zkontrolovat vlastnosti jednotlivých přísad, aby nedošlo k jejich vzájemnému ovlivňování. Tuto vhodnost kombinace udává výrobce v technickém listu přísady.

2.4.1 Plastifikátory

Přidáním standardních plastifikačních přísad snížíme množství záměsové vody do betonu minimálně o 10 % v dnešní době jsou na trhu k dostání superplastifikátory, které dokáží redukovat vodu až o 35 % a i přesto lze prodloužit zpracovatelnost. V betonu bez plastifikačních

přísad dochází výrazněji k flokuaaci částic cementu. Částice cementu přenáší na svém povrchu náboj, který zapříčiňuje jejich vzájemnou přitažlivost po smíchání s vodou. Jedná se například o ^{+}Ca ionty a $^{-}SiO_2$ ionty, které se vzájemně přitahují-aglomerují. Tento jev má vliv na chování betonu v čerstvém stavu a má za následek zhoršení zpracovatelnosti a menší kompaktnost a stejnorodost v zatvrdlém stavu. Oproti tomu při použití superplastifikátoru dochází k dispergaci částic. Zde částice cementu přenáší záporný elektrický náboj dodaný superplastifikátorem, to má za následek jejich vzájemnou odpudivost, k tomu všemu je voda vytlačována mezi zrna cementu, tím roste tekutost cementového tmele.

Mezi dispergátory patří například lignosulfany, naftaleny, melaniny-pro SCC nepoužitelné z důvodu špatných vlastností a polykarboxyláty. Poslední jmenovaný dosahuje při výrobě SCC betonu nejvyššího významu. Jeho vliv spočívá v možnosti vytvořit negativní náboj mezi zrny cementu, má ale i schopnost navázat se jedním koncem hlavního řetězce na zrno cementu, druhý konec řetězce rotuje kolem zrna cementu, kde je navázán. Takto se vytvoří prostorový efekt v blízkém okolí zrna cementu, který zabraňuje ostatním zrnům se přiblížit. Tento jev se nazývá tzv. stérické odpuzování. Vlivem možností nastavit chemické složení polykarboxylátů, můžeme upravovat délky hlavních řetězců, také hustotu a délku vedlejších řetězců. Tyto faktory mají za následek zásadní změny v chování betonu v čerstvém stavu, čehož se využívá nejen u samozhutnitelných betonů. Platí, že čím delší je boční řetězec vytvořený hydrofilními oxyethylenovými makromolekulami, tím můžeme dosáhnout většího ztekucení betonu. Polykarboxyláty navíc mají možnost regulace doby zpracovatelnosti (dobu zpracovatelnosti lze prodloužit až na 90 minut), regulaci tuhnutí a tvrdnutí betonu.

2.4.2 Urychlující přísady

Do této kategorie patří urychlovače tuhnutí, ty snižují čas počátku tuhnutí betonu. Další urychlující přísadou je urychlovač tvrdnutí. Ten má za následek rychlý nárůst počátečních pevností betonu. Účinnost těchto přísad je závislá na mnoha faktorech. Mezi ně patří objemová dávka urychlovače, čím větší množství přidáme, tím větší je míra urychlení. Také záleží na druhu cementu. Tento druh přísady působí na slínkové minerály, oproti tomu cementy směsné, neobsahující dávku slínku, která je nahrazena jinými hydraulickými příměsi mají v porovnání s portlandským cementem-CEM I při stejné dávce urychlovače menší účinnost. Dalším ovlivňujícím faktorem je samotný návrh betonové směsi, kde je účinek ovlivňován dalšími použitými příměsemi, přísadami (hlavně plastifikátory) a také na vodním součiniteli. Velkou roli také hraje okolní prostředí, které ovlivňuje účinek urychlovače a zejména počáteční teplota

směsi. S rostoucí teplotou čerstvé betonové směsi roste výrazněji vliv urychlující přísady. Při teplotách směsi kolem 5°-10°C je vliv urychlovače prakticky nezatelný.

1) Urychlovače tuhnutí

Mají za následek zkrácení času počátku tuhnutí. Přechod z plastického do tuhého stavu betonové směsi bez přísad ovlivňující rychlost tuhnutí, dle normy nastává po 45 minutách, ve skutečnosti je tato doba mnohem delší až 150 minut. To závisí na třídě cementu. Urychlovače tuhnutí se hojně využívají i ve výrobnách prefabrikovaných betonových dílů, kde je beton namíchán a během krátké doby (5-15 minut) ukládán do bednění. Použití má za následek zefektivnění výroby, kdy dojde k výraznému zkrácení doby do počátku doby tvrdnutí a zároveň k rychlejšímu nárůstu počátečních pevností vzhledem k možnosti manipulace s prvkem (odformování a přesun). Tuto dobu lze korigovat druhem a dávkou použitého urychlovače.

Jako nevýhodu můžeme spatřit u některých druhů urychlovačů ve snížení pevnosti betonu po 28 dnech. 28 denní pevnost urychlovaného betonu by měla být alespoň stejná jako pevnost referenčního vzorku betonu. Rozlišujeme dva typy urychlujících přísad tuhnutí. První je na bázi křemičitanu sodného. Tento typ je velmi účinný, dokáže zkrátit dobu tuhnutí na minimum. Ale obsahuje velké množství alkálií, které reagují s amorfním oxidem křemičitým obsaženým v kamenivu a vyvolávají alkalicko-křemičitou reakci. To způsobuje snížení dlouhodobé pevnosti betonu. Jako druhý typ lze považovat na bázi vodných emulzí síranu hlinitého. Oproti prvnímu typu, nedokáže tolik snížit dobu tuhnutí, ale neobsahuje alkálie, které jsou problematické. [1].

2) Urychlovače tvrdnutí

Tento typ urychlovače ovlivňuje nárůst počátečních pevností, a to k vyšším hodnotám. Použitím urychlujeme hydrataci cementu, což způsobuje nárůst hydratačního tepla, které má za následek další rychlejší reakce. Použití těchto přísad v praxi lze, jak u tradičního betonu, tak u samozhutnitelného betonu je hojně využíváno při betonáži za nižších teplot, neboť při použití se vytváří větší množství hydratačního tepla, které zabraňuje zamrznutí vody, potřebné k hydrataci cementu. Aby vše proběhlo v pořádku, je nutné, aby tento proces proběhl dříve, než nízké teploty začnou působit na beton. Důležitým faktorem je také teplota bednění, či místa betonáže a povětrnostní podmínky v místě.

Použitím urychlovače lze zvýšit efektivitu výroby, jak na stavbě, tak ve výrobnách prefabrikovaných betonových prvků. Kde dochází k brzkému odbednění. Tím zvýšíme

obrátkovost forem a bednění. Navíc urychlovač způsobuje zvýšení pevností, což napomáhá k dřívější manipulaci s prvkem nebo pro vnesené předpětí.

Urychlovače tvrdnutí lze dělit na chloridové a bezchloridové. První zmiňovaný typ je zastoupen na bázi chloridu vápenatého. Jako pozitiva lze považovat dobrou rozpustnost ve vodě, nízká pořizovací cena, vysoká účinnost a schopnost působit i za nižších teplot. Nejen že urychluje tvrdnutí, ale přispívá i ke zkrácení doby tuhnutí. Jako negativum lze považovat jeho korozivní účinky chloridových iontů na kovovou výztuž železobetonu. V dnešní době se používá velmi málo, nebo jen v omezené míře dle ČSN EN 206.

Mezi bezchloridové urychlovače tvrdnutí lze zařadit na bázi rhodanidu. Zde je základní složkou thiokyanatan sodný nebo vápenatý. Tento typ přísad má podobné vlastnosti jako chloridové urychlovače, jsou velmi účinné, ale také působí korozivně na kovovou výztuž. Z čehož vyplývá, že jeho použití je omezené. Typ urychlovače tvrdnutí, který nepůsobí korozivně je na bázi dusičnanů. Například dusičnan vápenatý, který je účinný, ale po ekonomické stránce drahý. Jako další skupinu bezchloridových urychlovačů lze považovat na bázi síranu draselného nebo sodného, ale jejich použití se nedoporučuje, neboť jejich účinky snižují výsledné pevnosti. Reagují s alumináty z cementu a vzniká minerál syngenit, který má vyšší nukleační rychlost oproti ettringitu, to způsobuje zrychlení tuhnutí betonové směsi. [1]

2.5 Provdzdušňující přísady

Tento druh přísad používáme nejen u tradičních betonu, ale i v samozhutnitelných betonech za účelem vytvoření velkého množství malých pórů o velikosti 10-300 μm . Díky těmto pórům se zvýší mrazuvzdornost a odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Použití těchto provzdušňujících přísad pozitivně ovlivňuje i reologii čerstvého samozhutnitelného betonu, dále jako u tradičního betonu, provzdusnění zlepšuje čerpatelnost betonové směsi v čerstvém stavu a zlepšuje stabilitu, pokud je beton v zatvrdlém stavu, zlepši se tím i vodotěsnost. Mají i negativní vliv, a to snížení pevnosti s obsahem pórů, a to v poměru 5 % pevnosti ku 1 % objemu pórů.

2.6 Ostatní přísady

V praxi se používá většina přísad, je ale nutné držet se zásad a pokynů při návrhu složení SCC. Zvláště je důležité si zkontrolovat, aby se přísady navzájem neovlivňovali mezi sebou. Oproti urychlujícím přísadám existují i přísady zpomalující tuhnutí a tvrdnutí, které se nazývají tzv. retardační přísady. Ty se používají za účelem delší zpracovatelnosti, nebo ovlivnění

hydratačního tepla při tvrdnutí betonu. Dále se používají ještě provzdušňující přísady, které se využívají při výrobě lehkých samozhutnitelných betonů.

2.7 Příměsi

Jsou velmi podstatnou složkou samozhutnitelného betonu. Dokáží ovlivnit vlastnosti betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Z větší části svou velikostí spadají do kategorie jemných podílů, což ovlivňuje množství záměsové vody, zlepšení tekutosti směsi, s níž spojenou pohyblivostí a také zlepšení homogenity. Existují i příměsi, které mají tu schopnost částečně nahradit cement, aniž by se snížila konečná pevnost, to má za následek použití menšího množství cementu, kde v konečné fázi je beton levnější. Příměsi mají vliv i na nárůst pevnosti, se kterou je spojen vývin hydratačního tepla při tvrdnutí betonu.

Příměsi můžeme rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny lze zařadit tzv. inertní (neaktivní) příměsi. To jsou například kamenné odprašky-mikromletý vápenec, pigmenty, filery, keramický obrus. Tyto příměsi vyplňují v betonu mezery mezi zrny ostatních složek a působí jako mikroplnivo. Do druhé skupiny patří příměsi pucolánové a latentně hydraulické-křemičitý úlet, jemně mletá vysokopecní struska, popílek. Ty se aktivně podílí na hydratačních procesech za vzniku hydratačních produktů, to má za následek ovlivnění vývoje pevnosti. Za určitých okolností lze část těchto příměsí započítat do vodního součinitele.

Celkové množství těchto příměsí nesmí překročit maximální dávkování, které je dané výrobcem a nesmí být vyšší než 50 g na 1 kg cementu. Pokud není prokázáno, že větší množství nebude mít negativní účinky na vlastnosti a trvanlivost betonu. Použití těchto přísad je velmi výhodné, neboť tento materiál je podstatně levný a navíc ekologický, protože se tím zbavujeme odpadu.

2.7.1 Popílek

Popílek vzniká při spalování uhlí a je to vedlejší produkt. Rozlišujeme dva druhy popílku. Prvním typem je popílek fluidní a druhým vysokopecní. První jmenovaný má nepříznivé chemické složení a jeho použití do betonu je normou ČSN EN 206 zakázané. Vysokopecní popílek je normou povolen, ale musí splňovat požadavky ČSN EN405-1+A1. Vzhledem k tomu, že je popílek považován za odpad, jeho vlastnosti se liší z důvodu různého období spalování, které je navíc ovlivněno druhem spalované látky a také místem spalování. Rozdílná kvalita může být i z jednoho zdroje, kdy může v průběhu období značně kolísat.

Popílek je zařazen do skupiny aktivních přísad, které mají schopnost ovlivňovat průběh hydratace cementu a jeho použití je v praxi velmi rozšířené. Obsahuje minimálně 25 % amorfního SiO_2 . Velikost částic se pohybuje v rozmezí 5-90 μm a měrný povrch má srovnatelný s cementem, který se pohybuje v rozmezí 200-400 m^2/kg . Jeho kulová zrna dokáží snížit viskozitu směsi, tím se zlepší zpracovatelnost. Popílek ovlivňuje i tvrdnutí betonu, což má za následek pozvolnější a pomalejší náběh pevností z čehož vyplývá, že vývin hydratačního tepla je výrazně menší. Pevnost betonu s popílkem je po 28 dnech nižší než pevnost betonu s absencí popílku. Oproti tomu pevnost po 90 dnech je opačná. To způsobuje pomalejší a delší reakci, kde vznikají C-S-H gely z hydroxidu vápenatého, který je obsažen v cementu a z oxidu křemičitého, který je obsažen v popílkem.

V poslední době je použití popílku značně ovlivněno novou technologií čištění zplodin hoření v elektrárenském průmyslu za pomoci čpavku. Některé popílkem tak neumožňují použití z hlediska hygienických předpisů a užitných vlastností.



Obrázek 4 Popílek [8]

2.7.2 Křemičitý úlet

Jinak nazývaný jako mikrosilika, je také vedlejším produktem jako popílek, ale vzniká při výrobě ferosilicia. Tento druh řadíme jako aktivní přísadu, která obsahuje 80-98 % amorfního oxidu křemičitého. Měrný povrch zrna je velký a pohybuje se v rozmezí 10000-60000 m^2/kg . Mluvíme-li o velikosti zrna to je okolo 1 μm . Tato přísada se dávkuje 3-5 % z hmotnosti cementu. Použitím křemičitého úletu zvýšíme pevnost, a i moduly pružnosti.



Obrázek 5 Křemičitý úlet [9]

2.7.3 Jemně mletá vysokopecní struska

Tento druh příměsi je také odpadem, který vzniká při výrobě železa. Je ve formě granulované vysokopecní strusky, která má podobné chemické vlastnosti jako portlandský cement. Struska je ještě domílána, za účelem dosažení stejné velikosti zrn jako má cement. Použití strusky do samozhutnitelného betonu je méně časté, protože struska má negativní účinky na tekutost betonové směsi.



Obrázek 6 Jemně mletá vysokopecní struska [13]

2.7.4 Kamenné odprašky

Vznikají zejména při úpravě drceného kameniva a usazují se ve filtrech. Měrný povrch se pohybuje v rozmezí 200-360 m²/kg a velikosti zrn 0,5-100 μm. Jejich mechanické vlastnosti závisí na druhu kamenivu. Tento druh příměsi řadíme mezi inertní, kdy se používají u směsí, které mají nízkou pevnost a nahrazují cement. Tyto kamenné odprašky zaplňují mezery mezi zrny kameniva i cementu. Fungují tak jako mikropojivo. Směs je ideálně vyplněna, což zvyšuje

stabilitu, viskozitu i pohyblivost. Pokud kamenné odprašky vznikly drcením kameniva s vysokým modulem pružnosti, mají možnost zvýšit modul pružnosti výsledného betonu až o 2 GPa.

2.7.5 Mikromletý vápenec

V dnešní době hojně využívaný, jedná se o tradiční vytěžený vápenec, který je následně upravován a v konečné fázi se mele tak, aby byl 100 % propad sítem 0,125 mm a více jak 70 % propad na síti 0,063 mm. Ideální velikost zrn se pohybuje v rozmezí 70-90 μm . Beton s přidáním této příměsi má rychlejší náběh pevnosti v počáteční fázi hydratace, a i vývin hydratačního tepla je větší oproti betonu bez příměsi. Tyto reakce jsou způsobeny měrným povrchem, který je oproti cementu větší. Mikromletý vápenec se používá nejen při výrobě „vápenecových“ cementů, kde se využívá jeho vlastností, ale i jako příměs do samozhutitelného betonu, kde jemné namletí vápence ovlivňuje tekutost a konzistenci.



Obrázek 7 Mikromletý vápenec [14]

2.7.6 Keramický obruš

Tento druh odpadu vzniká při broušení cihlářských keramických broušených výrobků. Podobně jako kamenné odprašky, tak i keramický obruš má proměnlivé vlastnosti, které záleží na druhu obrušované keramiky. Vzhledem k tomu, že vyvíjí pucolánovou reakci, která vzniká pomocí obsahu hlinitanů a amorfních křemičitanů, jež mají za následek změnu procesu hydratace cementu, nemůžeme ho s jistotou zařadit mezi inertní příměsi.

Jako pozitivní se jeví použití keramického obrušu spolu s mikrosiliki do směsi samozhutitelného betonu, kde je znatelný nárůst pevnosti. Ovšem negativum lze spatřit v tom,

že keramický obrus má velký měrný povrch, je nasákavý a vznikají problémy s dávkováním vody do směsi SCC, čímž může být negativně ovlivněna tekutost s tím související vyplňování bednění a schopnost samozhutnění.



Obrázek 8 keramický obrus [15]

3 Reologie

Je to část vědy zabývající se deformací a toku hmoty. Objasňuje vztahy mezi chemickým složením, mechanickými vlastnostmi látky a strukturou. Řeší vztahy mezi přetvořením, napětím a časem a také napjatost viskózních kapalin. Toto odvětví vzniklo na začátku dvacátého století. Sledujeme ji nejen u betonu v čerstvé stavu, ale i ve ztvrdlém stavu. Pro samozhutnitelný beton hraje významnou roli hlavně v čerstvém stavu.

Při zkoumání reologie u čerstvých betonových směsí je beton považován za materiál o více fázích. Mezi které řadíme disperzi kameniva, ta zahrnuje kapalnou fázi, v našem případě cementový tmel. Ta obklopuje fázi pevnou, kterou tvoří kamenivo. Předpokládá se, že tyto fáze spolu spolupůsobí a tvoří homogenní materiál. Beton je tvořen asi z 80 % složkou kameniva, nejmenší složka betonu je tvořena částicemi přidaných příměsí. U tradičních betonů, kde se nepřidávají plastifikátory, je tečení betonu složité, protože záměsová voda nevytvoří vrstvy mezi zrny cementu a jemných podílů. Což má za následek použití vnější energie, za účelem překonání počátečního odporu směsi. Tyto betony, bez plastifikátoru, řadíme do skupiny kapalin, které se chovají jako Binghamské viskózní kapaliny. Oproti tomu samozhutnitelné betony, kde je přimísen plastifikátor, který má za následek vytvoření opačných nábojů na povrchu zrna cementu a jemných podílů. Kde voda může volně putovat mezi těmito zrny, čímž dojde ke ztekucení směsi až do takové míry, že lze hovořit o newtonovském tečení. Kde je zanedbatelná hodnota smykového napětí na mezi kluzu.

3.1 Binghamovo tečení

Do této kategorie zařazujeme tradiční vibrované betony, které mají rozdílné chování při konstantním smykovém napětí. Viskozita nezávisí na deformační rychlosti ani na velikosti napětí. Pokud hodnota rozliti stoupá, vzrůstá i hodnota napětí na mezi kluzu. Tento jev lze vyjádřit vzorcem:

$$\tau = \tau_0 + \mu * \gamma' \quad (2)$$

kde:

τ_0 napětí na mezi kluzu

γ' smyková rychlost

μ plastická viskozita

3.2 Newtonovské tečení

Vzniká v kapalině, která má srovnatelné vlastnosti s ideálně pevným tělesem. Pokud toto těleso zatížíme smykovým napětím. Dochází k přetvoření nebo k deformaci, které je lineárně závislé na působícím napětí. Tento vztah lze popsat vzorcem:

$$\tau = G * \gamma \quad (3)$$

kde:

τ smykové napětí

G smykový modul

γ přetvoření nebo deformace

Vzhledem k tomu, že pevné těleso není ideálně pevné, deformace nadále pokračuje po celou dobu působení smykového napětí, které určuje viskozitu newtonovské kapaliny a je vyvoláno deformační rychlostí.

4 Vlastnosti čerstvého samozhutnitelného betonu

Chování SCC betonu se značně liší od chování tradičního vibrovaného betonu měkké konzistence. Hlavním požadavkem na samozhutnitelný beton je tekutost, která udává následné základní vlastnosti SCC, do kterých zahrnujeme prostupnost a odolnost rozměšování, schopnost směsi vyplňovat bednění, blokaci, sedání a krvácení. Tyto vlastnosti se vztahují k tekutému stavu, jedná-li se o zatvrdlý stav, zde posuzujeme hlavně soudržnost betonu s výztuží, dotvarování, smrštění, trvanlivost a v poslední řadě pevnosti a moduly pružnosti.

4.1 Schopnost vyplňování bednění

Jak bylo výše zmíněno, jedná se o jednu ze základních vlastností samozhutnitelného betonu, která závisí právě na vlastní tekutosti směsi. Je to schopnost čerstvého betonu téci pouze pomocí vlastní tíhy a zcela vyplnit prostor v bednění. Tato vlastnost se často označuje jako „tečení“ nebo „tekutost“. Udává, jak daleko by mohl čerstvý SCC beton dotéci a do jaké míry je schopen vyplnit bednění, které může být i tvarově velmi složité. Vyplňovací vlastnost je také určující pro samozhutnitelnost, musí být dostatečně vysoká a směs musí být dostatečně tekutá, aby bylo umožněno odstranění vzduchu, který byl vnesen při procesu míchání nebo zachycený při ukládání za účelem dostatečně zhutněného betonu.

4.2 Prostupnost

Udává schopnost směsi protékat výztuží, zúženými prostory nebo otvory. Tok čerstvé betonové směsi může být zeslaben či dokonce zastaven vlivem hrubého kameniva, které se zaklíní nebo vytvoří strop mezi prvky výztuže. Pokud by tento jev nastal, mělo by to za následek shlukování kameniva v jednom místě nebo vytváření kleneb, což by mělo za následek nehomogenitu směsi. Směs samozhutnitelného betonu má oproti tradičnímu betonu vysokou propustnost, která je dána hlavně zvýšeným podílem jemných částic a přidáním superplastifikačních přísad.



Obrázek 9 Výztuž [16]

4.3 Odolnost proti rozměšování a sedání

Rozmísení čerstvého betonu je jev, který se vztahuje k plastické viskozitě a hustotě cementové pasty. Pevná látka je hustší než kapalina a má tendenci klesat, viskozí kapalina obtéká tuhá tělesa jen obtížně. Pokud dochází k rozmísení (segregaci), je tato směs málo stabilní a dochází tak k oddělení jednotlivých složek od sebe. Snahou je, aby bylo dosaženo co nejvyšší homogenity. Nejčastěji tento problém vzniká při manipulaci se směsí u hrubého kameniva, které se oddělí od cementového gelu. To nastává například při ukládání betonové směsi do bednění volným pádem. To má za následek, že hrubé kamenivo klesá ke dnu a cementový gel naopak stoupá k hladině. U samozhutitelného betonu, kde je velký podíl jemných částic, je sedimentaci z velké části zabráněno. Dalším negativním jevem, je únik kapaliny ze směsi směrem na hladinu nebo na stěny bednění, to je způsobeno velkým podílem záměsové vody, která byla do směsi dodána a dále objemovou hmotností, která je oproti s ostatním složkám nízká. To má za následek nekvalitní povrch, kde jsou známky, jak voda unikala po povrchu betonové směsi a odplavení části jemných podílů. Tento problém, lze vyřešit samotným návrhem betonové směsi, kdy zvolíme jiné množství záměsové vody, nebo přidáme vhodno příměs, která část záměsové vody pohltí.

4.4 Soudržnost betonu s výztuží

Oproti tradičnímu betonu má samozhutitelný beton mnohem hustší mikrostrukturu, což vede k předpokladu, že i při stejné pevnosti bude soudržnost vyšší. Podle dříve provedených

výzkumů a zkoušek má SCC beton lepší soudržnost až o 70 % oproti tradičnímu betonu stejné pevnostní třídy. Toto zjištění má velké uplatnění u předpínaných betonů, kde je kladen velký důraz právě na soudržnost. Problém nastává při použití chloridových přísad. Ty mají korozivní působení na kovovou výztuž

4.5 Smrštění a dotvarování

Velký vliv na smrštění a dotvarování má vývin hydratačního tepla a vodní součinitel. Záleží na množství záměsové vody, kdy při větším množství je také větší smrštění a dotvarování. Kdy je vytvořeno ve struktuře více kapilárních pórů při následném odpařování. Dále pak je ovlivněno pojivovou složkou, u SCC betonu se jedná o cement a jeho příměsi. Zde platí, že čím více bude ve směsi použito jemných podílů, tím větší bude smrštění a dotvarování betonovaného prvku. V našem případě u samozhutnitelného betonu je toto riziko omezeno použitím superplastifikačních přísad, kdy je použito menšího množství záměsové vody. Pokud při následném tvrdnutí je betonovaný prvek ve vlhkém prostředí či ošetřován vodou, jeho smrštění a dotvarování se téměř eliminuje. Avšak v porovnání samozhutnitelného a tradičně vibrovaného betonu, je smrštění a dotvarování u SCC betonu větší.

4.6 Trvanlivost

Pokud mluvíme o trvanlivosti u SCC betonů, jejich vyšší pevnost zvyšuje životnost a odolnost konstrukce. To je způsobeno propustností. Pokud se nachází na povrchu betonu kaverny, nebo kapilární póry, tak těmito místy mohou agresivní látky snadněji proniknout do struktury betonu a narušit ji. V oblasti trvanlivosti je třeba řešit problém s hloubkou průsaku, která má za následek korozi betonu. Ta se se zvyšujícím obsahem jemných částic směsi snižuje. Vzhledem k tomu, že samozhutnitelný beton obsahuje velké množství jemných částic a je tak hutnější, tak hloubka průsaku je minimální.

4.7 Pevnost v tlaku a moduly pružnosti

Rozdíl v pevnostech v tlaku, u modulu pružnosti mezi samozhutnitelným betonem a tradičním betonem po 28 dnech a déle, je minimální. Výraznější vliv na pevnosti lze sledovat v rámci hodin maximálně dnů. Pevnost v tlaku je u samozhutnitelných betonů ovlivňována především přidáním superplastifikačních přísad, které sníží hodnotu vodního součinitele, čímž se do směsi přidává menší množství vody. Další zlepšení mechanických vlastností způsobuje velké množství jemných podílů, jakožto přidáním většího množství cementu nebo jiné příměsi

například jemně mletého vápence. Výsledné moduly pružnosti závisí především na kvalitě kameniva a na množství jemných podílů.

5 Zkoušení vlastností SCC

Oproti tradičnímu betonu má samozhutnitelný beton velmi odlišné vlastnosti v čerstvém stavu. Oproti tomu ve stavu zatvrdlém se už zkouší stejně jako beton tradiční.

5.1 Zkouška sednutí-tekutosti

Tato zkouška slouží k posouzení tekutosti a průtokové rychlosti samozhutnitelného betonu. Je popsána v normě EN 12350-8. Jejím výsledkem je indikace schopnosti zaplnění bednění samozhutnitelným betonem. Viskozitu a rychlost tečení nám signalizuje čas t_{500} . Zkoušený čerstvý beton se vloží až po okraj do formy, která má tvar dutého komolého kužele. Zvednutím komolého kužele se beton začne roztékat po podkladní desce, měříme dobu, za kterou se beton od zvednutí komolého kužele rozteče na průměr 500 mm, čímž zjistíme čas t_{500} . Největší průměr zjistíme změřením ve dvou na sebe kolmých směrech. Po zprůměrování těchto dvou rozměrů a zaokrouhlení na nejbližších 10mm zjistíme hodnotu sednutí-rozlití. Výpočet je dán vztahem:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4)$$

kde:

SF je sednutí-rozlití [mm].

d_1 je největší průměr rozlití [mm]

d_2 je průměr rozlití ve směru kolmém k d_1 [mm]

5.2 Zkouška V-trychtýřem

Touto zkouškou posuzujeme viskozitu a schopnost zaplnění bednění samozhutnitelným betonem. Pro tento typ zkoušky slouží forma tvaru nálevky, která se naplní čerstvým SCC betonem. Při provádění zkoušky se zaznamenává doba výtoku betonu. [20]

5.3 Zkouška L-boxem

Tato zkouška slouží k posouzení schopnosti průtoku samozhutnitelného betonu úzkými mezerami například mezi mezerami mezi pruty výztuže. Zkoušku lze provádět dvěma způsoby, a to průtokem betonu mezi dvěma pruty nebo mezi třemi pruty. Druhá jmenovaná je vhodnější, neboť nám lépe simuluje rozložení výztuže. Odměřený objem čerstvého betonu necháme vodorovně protékat mezerami mezi svislými hladkými pruty výztuže. Změříme výšku H1 a na

konci H₂ a stanovíme poměr mezi těmito hodnotami, což je zjišťovaný součinitel schopnosti průtoku SCC betonu, který je dán vztahem:

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (5)$$

kde:

PL je součinitel schopnosti průtoku [-]

H₁ průměrná hloubka betonu ve svislé části truhlíku [mm]

H₂ průměrná hloubka betonu ve svislé části truhlíku [mm]

5.4 Zkouška segregace při prosévání

Podstatou zkoušky je posouzení odolnosti samozhutnitelného betonu proti segregaci při prosévání. Ta probíhá odběrem vzorku, který se následně nechá po dobu 15 minut v klidu, při které zaznamenáváme jakoukoli separaci odloučení vody. Určená horní část ze vzorku se následně vloží na síto, které má čtvercová oka o velikosti 5 mm. Po uplynutí doby 2 minut zvážíme materiál, který propadl sítem. Segregační součinitel vypočteme dle následujícího vzorce:

$$SR = \frac{(m_{ps} - m_p) * 100}{m_c} \quad (6)$$

kde:

SR je segregovaná část [%]

m_{ps} hmotnost dna síta včetně propadlého materiálu [g]

m_p hmotnost dna síta [g]

m_c počáteční hmotnost betonu vloženého na síto [g]

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly porovnávány druhy urychlovačů od firmy STACHEMA. Jednalo se o typy Betodur A5, Betodur GOLD A5.1. a Nanocat 100. Urychlovač Betodur A5 je bezchloridová kapalná přísada urychlující tvrdnutí malt a betonů, jejichž pojivem jsou portlandské a směsné cementy. Výrobce udává, že lze používat tuto přísadu v kombinaci s jinými výrobky od společnosti STACHEMA. Bohužel ohledně zbylých dvou urychlujících přísad, se nepodařilo sehnat více informací. Tyto produkty jsou novinkou z laboratoře firmy a ta nechtěla prozrazovat více informací, než se produkt dostane na trh. Celý průběh experimentální části probíhal v areálu firmy H.A.N.S. s.r.o.

6 Použité měřicí přístroje

6.1 Váha Kern DS

K provedení vážení byla použita váha Kern DS s přesností 0,1kg.



Obrázek 10 Váha Kern DS

6.2 Zatěžovací lis

Stanovení jednotlivých pevností bylo provedeno na zatěžovacím lisu ADR 3000



Obrázek 11 Zatěžovací lis ADR3000

6.3 Další pomůcky a nástroje použité při experimentu

- Zednické nářadí, štětce, formovací olej, stopky, svinovací metr

- Abramsův kužel
- Betonářská deska o rozměrech 1000 x1000x 21 mm od firmy PERI Birch

7 Zkouška rozlití kužele

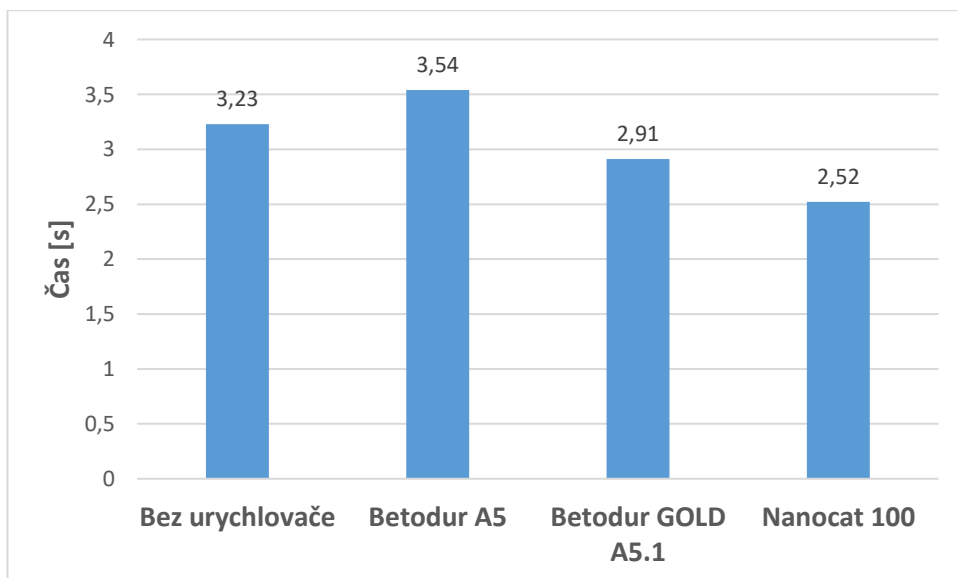
Tato zkouška slouží k posouzení tekutosti a průtokové rychlosti samozhutnitelného betonu. Provádí se dle normy ČSN EN 12350-8. Výsledkem zkoušky je hodnota sednutí-rozlitím SF v mm, v čase T_{500} . Podle hodnoty SF se následně beton zařídí do jedné ze tří kategorií (SF1 rozlití 550–650 mm, SF2 rozlití 660-750 mm, SF3 rozlití 760-850 mm). Na žádost společnosti H.A.N.S. s.r.o byla tato zkouška provedena nenormově, za účelem další práce s naměřenými hodnotami. Zkouška spočívala v ustavení Abramsova kuželu v opačné poloze. Místo ploché ocelové desky, byla použita deska z ruské březové překližky, která je potažená fenolovou pryskyřicí. Tuto záměnu jsme si mohli dovolit, neboť výsledné hodnoty budeme pouze porovnávat.

Tabulka 1 Hodnoty rozlití

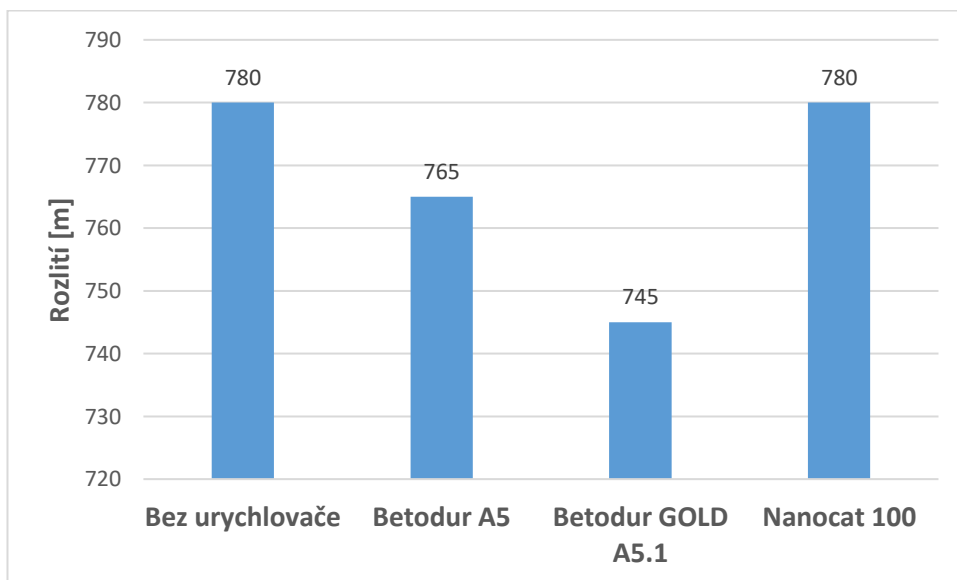
Typ vzorku	Čas T_{500} [s]	Směr 1 [mm]	Směr 2 [mm]	Aritmetický průměr [mm]	Rozlití SF [mm]
Bez urychlovače	3,23	800	760	780	780
Betodur A5	3,54	770	765	765	770
Betodur GOLD A5.1	2,91	740	740	745	750
Nanocat 100	2,52	770	790	780	780



Obrázek 12 Průběh zkoušky rozlitím (vzorek bez urychlovače)



Obrázek 13 Naměřené hodnoty v čase T_{500}



Obrázek 14 Změřené rozliti v čase T_{500}

8 Zhotovení a ošetřování těles

Zhotovení a ošetřování zkušebních těles probíhalo v souladu s normou ČSN EN 12350-1. Před mícháním proběhlo očištění zkušebních forem. Za účelem snadnějšího odformování byly formy natřeny formovacím olejem. Formy byly naplněny betonovou směsí. Horní povrch byl urovnán ocelovým hladítkem. Všechny formy se označili identifikačními čísly a byly zaznamenány jednotlivé časy zhotovení.

Takto naplněné formy byly uloženy a zakryty nerezovou plechovou tabulí o tloušťce 2 mm, která nemá vliv na betonovou směs. Celkem bylo zhotoveno 20 ks zkušebních těles, 5 ks forem se směsí bez urychlovače, 5 ks s urychlovačem Betodur A5, 5 ks s urychlovačem Betodur GOLD A5.1 a zbylých 5 ks s urychlovačem Nanocat 100.



Obrázek 15 Uložení zkušebních těles ve vodní lázni

8.1 Stanovení pevnosti

Stanovení pevnosti v tlaku probíhalo v souladu s normou ČSN EN 12390-3 [24]. Zkušební tělesa o rozměrech 150 x 150 x 150 mm byla nejprve očištěna a následně umístěna do zkušebního lisu ADR 3000. Tělesa byla zkoušena ve stáří 18 hodin, 7 dní, 14 dní a 28 dní. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky, ze které byl poté vytvořen graf, za účelem porovnání naměřených hodnot.



Obrázek 16 Zkoušení pevnosti v tlaku

8.1.1 Pevnostní charakteristiky po 18 hodinách

Tabulka 2 Pevnost v tlaku po 18 hodinách

Zkoušený urychlovač	Hmotnost [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]	% srovnání se vzorkem bez urychlovače
Bez urychlovače	7,875	15,455	±0,000
Betodur A5	7,914	20,623	33,439
Betodur GOLD A5.1	7,890	28,276	82,957
Nanocat 100	7,914	29,758	92,546

8.1.2 Pevnostní charakteristiky po 24 hodinách

Tabulka 3 Pevnost v tlaku po 24 hodinách

Zkoušený urychlovač	Hmotnost [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]	% srovnání se vzorkem bez urychlovače
Bez urychlovače	7,834	21,470	±0,000
Betodur A5	7,892	26,680	24,266
Betodur GOLD A5.1	7,893	34,540	60,876
Nanocat 100	7,965	34,880	62,459

8.1.3 Pevnostní charakteristiky po 7 dnech

Tabulka 4 Pevnost v tlaku po 7 dnech

Zkoušený urychlovač	Hmotnost [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]	% srovnání se vzorkem bez urychlovače
Bez urychlovače	7,804	64,890	±0,000
Betodur A5	7,924	70,040	7,937
Betodur GOLD A5.1	7,893	67,410	3,883
Nanocat 100	7,875	72,840	12,252

8.1.4 Pevnostní charakteristiky po 28 dnech

Tabulka 5 Pevnost v tlaku po 28 dnech

Zkoušený urychlovač	Hmotnost [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]	% srovnání se vzorkem bez urychlovače
Bez urychlovače	7,989	70,696	±0,000
Betodur A5	7,926	70,746	0,071
Betodur GOLD A5.1	7,885	73,130	3,443
Nanocat 100	7,903	81,616	15,446

8.1.5 Vyhodnocení pevnostních zkoušek

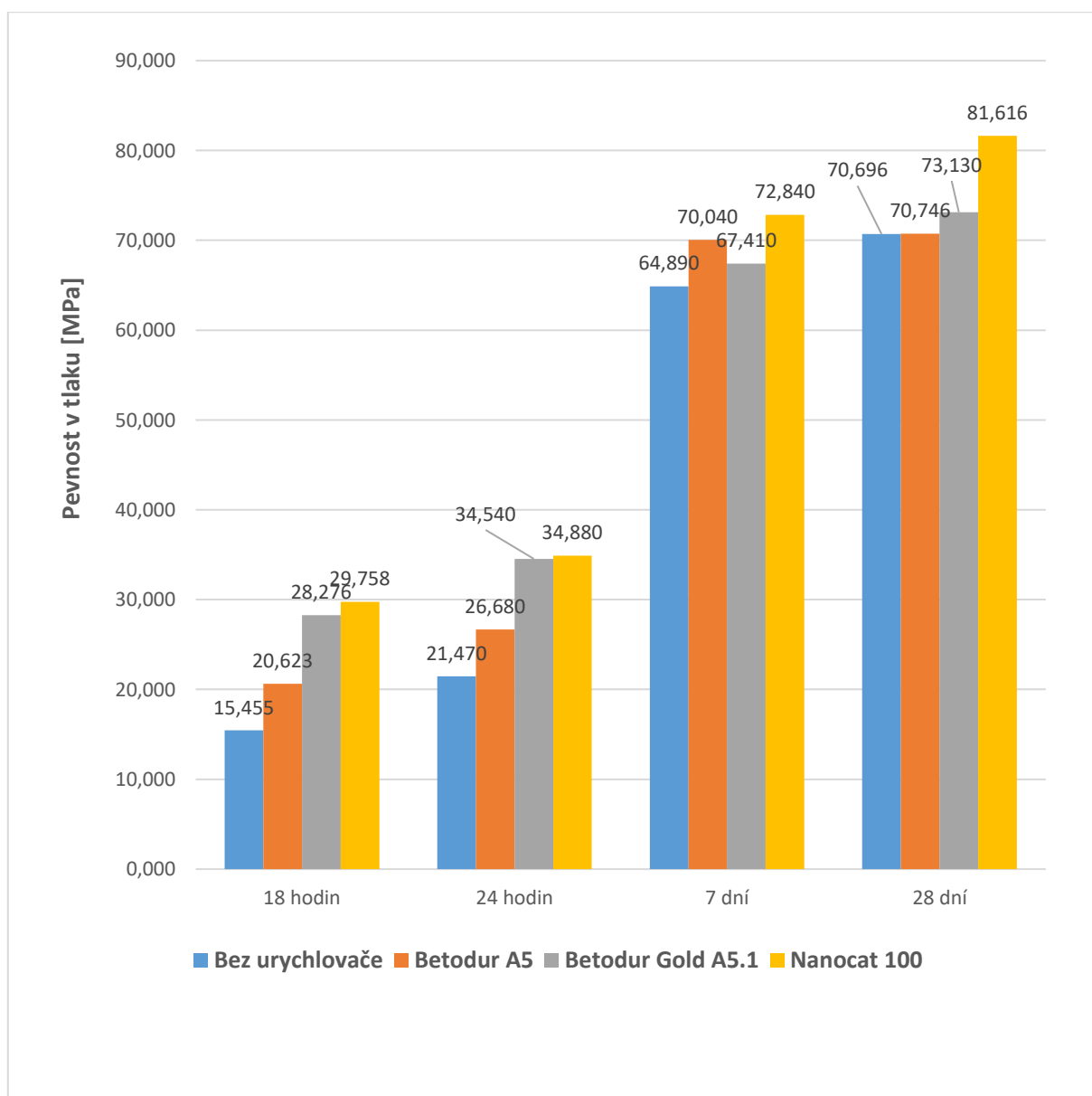
Nejvyšší počáteční pevnost po 18 hodinách vykazoval vzorek s urychlovačem Nanocat 100 o velikosti 29,785 MPa. Naopak nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku bez urychlovače a to 15,455 MPa. Což je oproti maximální hodnotě téměř poloviční pevnost v tlaku.

Po 24 hodinách dosáhl nejvyšší pevnosti vzorek s urychlovačem Nanocat100 o velikosti 34,880 MPa, nejnižší opět vzorek bez urychlovače.

Další zkoušky pevností proběhly po 7 dnech od vytvoření vzorků, kde nejnižší hodnota pevnosti byla naměřena u vzorku bez urychlovače, nejvyšší naměřená hodnota byla opět u vzorku s urychlovačem Nanocat 100.

Poslední zkoušky byly provedeny po 28 dnech, kde měl nejvyšší pevnost opět vzorek s urychlovačem Nanocat 100. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku bez urychlovače, nutno podotknout, že rozdíl mezi touto hodnotou a druhou nejnižší činil pouhých 0,05 MPa, kde tato hodnota byla naměřena u vzorku s urychlovačem Betodur A5.

Dle naměřených hodnot lze usoudit, že největší vliv na rychlý náběh pevností měl urychlovač Nanocat 100, který dosáhl ve všech časových intervalech nejvyšších hodnot. Všechny výsledné hodnoty pevností jsou graficky znázorněny na obrázku 16.

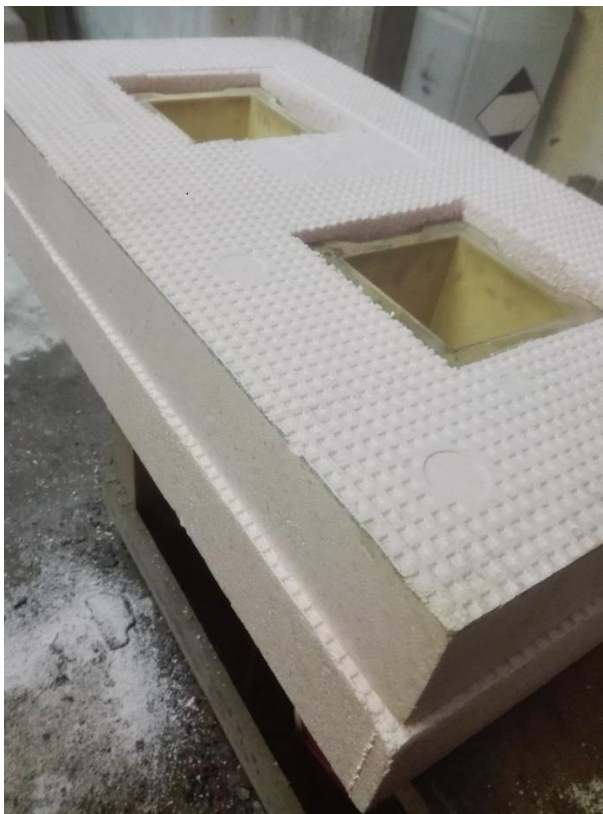


Obrázek 17 Naměřené hodnoty pevností

8.2 Diferenční kalorimetr

Vzhledem k tomu, že se bude zaznamenávat vývin tepla, je vhodné, aby se vnější obal skládal z termoizolačního materiálu. Proto jsme pro výrobu vnějšího pláště diferenčního kalorimetru zvolili extrudovaný polystyren o tloušťce 100 mm. Pomocí programu DraftSight jsme vytvořili výkres (viz. příloha č.1), podle kterého jsme desky následně upravili do požadovaných rozměrů. Vnější plášť se tak skládá ze 4 desek polystyrenu o rozměrech 870 x 510 mm. Do prostředních dvou desek se vyřízli čtvercové otvory, aby se do nich mohli uložit formy na zkušební krychle s čerstvou betonovou směsí. Do vrchní desky byly vyvrtány dva otvory, které poslouží pro

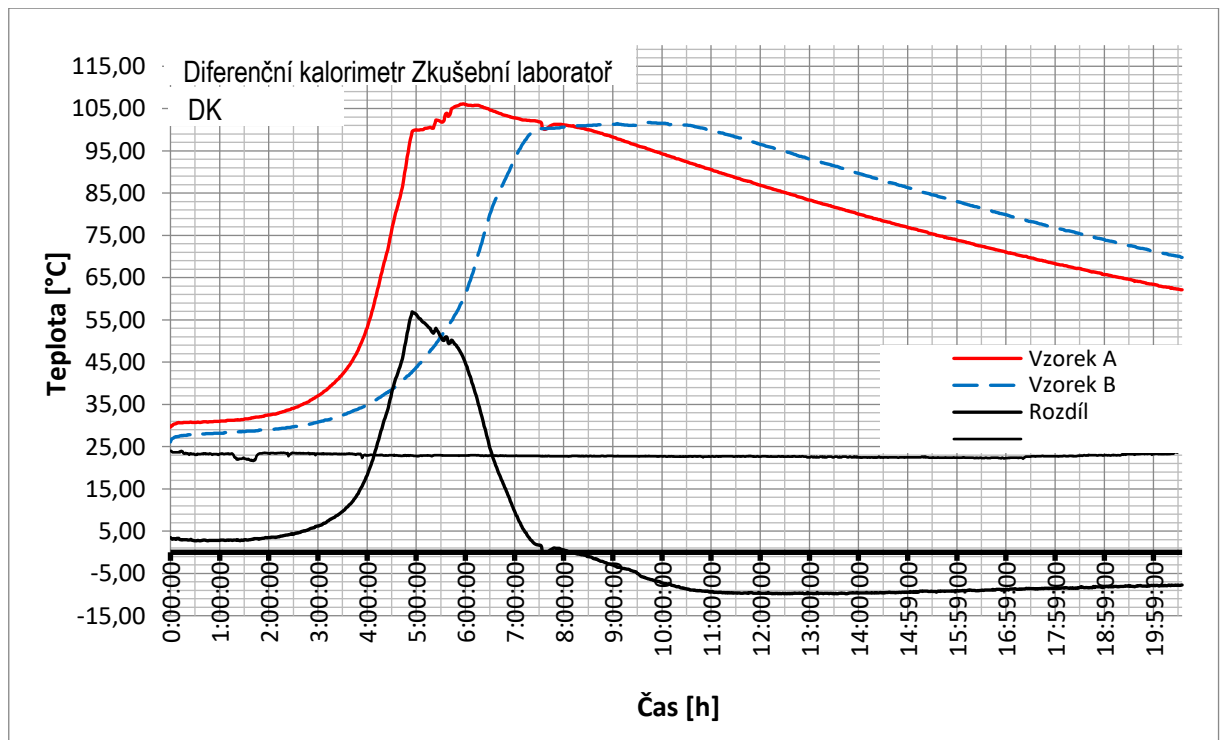
protažení kabelů od teplotního čidla. Následně jsme tři spodní desky spojili pomocí nízkoexpanzní montážní pěny, aby nedocházelo k únikům tepla.



Obrázek 18 Část vnějšího obalu kalorimetru

Před odběrem jsme protáhli teplotní čidla vrchní deskou a připravili si teplotní modul, který zaznamenává teplotu v čase. Ihned po odběru jsme vložili vzorky s cementovou pastou do vnějšího obalu, teplotní čidla jsme zasunuli do cementové pasty a přiložili vrchní desku, kterou jsme zatížili. Cementová pasta se skládala z cementu a urychlovače, byla zvolena z důvodu vyvinutí většího hydratačního tepla. Neboť kamenivo by mělo na vývin teploty chladící účinek a teplota by tak nedosáhla maximálních hodnot.

Ze zaznamenaných hodnot, byl vytvořen graf, ze kterého je patrná rozdílná teplota mezi vzorkem „A“ (s urychlovačem Betodur A5) a vzorkem „B“ (bez urychlovače). Už v prvních hodinách nastává u vzorku „A“ rapidní nárůst teploty. Maximální teploty dosahuje vzorek „A“ v 6. hodině, kdežto vzorek „B“ až v hodině 10.



Obrázek 19 Vývin hydratačního tepla

8.3 Ekonomické zhodnocení

Pro zhodnocení ekonomické efektivity je nutné porovnat navýšení ceny betonu s výslednou cenou produktu a zároveň s technologickou obrátkovostí výroby. Pro hodnotu odformování a manipulace s prvkem můžeme uvažovat hodnotu 20 MPa, tato hodnota představuje bezpečné odformování pro nenáročné konstrukce a minimálně 25 MPa pro náročné konstrukce

Materiálová cena je shodná (až na dávku urychlovače) pro všechny typy zkoušených betonů, a proto s nimi nebudeme uvažovat. Budeme počítat jen navýšení ceny za urychlovač. Pro výpočet z celkové ceny budeme uvažovat průměrnou cenu za hotový 1 m³ prefabrikátu (vyrobený + dodaný + namontovaný).

8.3.1 Hodnocení z pohledu obrátkovosti

Při době zrání betonu 18 hodin při taktu výroby 24 hodin (z hlediska výrobní technologie) musíme dosáhnout předepsané pevnosti. Bez použití urychlovače (vzorek A) toto není možné, dokonce i za dobu zrání 24 hodin, nelze náročnější konstrukce odformovat a tzn. nedodržení kontinuální výroby. Při použití standardního urychlovače (vzorek B) je dosaženo pevnosti pro jednoduché konstrukce již za 18 hodin ale pro složité je to 24 hodin zrání a tzn. stejně jako

v předchozím případě nedodržení kontinuální výroby. Při použití nové generace urychlovačů (vzorek C) je vše bezpečně splněno již za 18 hodin a toto platí i pro poslední druh nanourychlovačů (vzorek D). Z tohoto lze definovat, že z důvodu kontinuální výroby je nutno užít urychlovačů. Nutno zmínit, že i vzorek B je schopen splnit požadavky, ale to za jiných okolností (dávka, množství cementu a okolní teploty), ale zde hodnotíme účinnost různých druhů obecně. Sedmidenní pevnost je informační a dvacetiosmidenní již splní požadované hodnoty na výsledné pevnosti SCC betonu.

8.3.2 Hodnocení z hlediska ceny

Z první části hodnocení nám vychází nutnost použití urychlovačů, ale je nutné zhodnotit i z hlediska navýšení ceny. Pro jednoduché konstrukce nám nejlépe vychází vzorek B s navýšením ceny o 2,43 % u složitějších konstrukcí vzorek C s navýšením ceny o 3,13 %. Vzorek D má navýšení 8,69 %, ale poněvadž i vzorek C plní parametry na výrobní takt, je jeho použití již neekonomické. V absolutních číslech tyto rozdíly se ještě zviditelní.

	Cena urychlovače [Kč]	Dávka urychlovače [kg]	Cena dávky [Kč]	Materiál [Kč]	Suma [Kč]
Bez urychlovače	0	8	0	1500	1500
Betodur A5	35	8	280	1500	1780
Betodur GOLD A5.1	45	8	360	1500	1860
Nanocar 100	125	8	1000	1500	2500

Tabulka 6 Cenová kalkulace

	Cena/m ³ [Kč/m ³]	% z ceny	Výroba/měs. [m ³]	Cena [Kč]
Bez urychlovače	11500	0,00	3500	
Betodur A5	11500	2,43	3500	980000
Betodur GOLD A5.1	11500	3,13	3500	1260000
Nanocar 100	11500	8,70	3500	3500000

Tabulka 7 Výpočet celkové ceny

Závěr

Cílem této bakalářské práce byla analýza vlivu vybraných urychlovačů na tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu. Dále vytvoření diferenčního kalorimetru, který byl použit pro záznam vývinu hydratačního tepla, které má vliv na rychlý nárůst pevnosti za podmínek, kdy teplota nepřesáhne hranici 65°C v jádru prvku. Provedenými zkouškami jsme zjistili, že použití těchto urychlovačů, má velký vliv na chování a vlastnosti betonu, jak v čerstvém, tak ve stavu ztvrdlém. Použitím urychlovače dosahujeme rychlého nárůstu pevnosti. To má za následek zvýšení efektivity výroby. Ta spočívá v dřívějším odbednění a manipulaci s prvkem, kdy při taktu výroby 24 hodin (z hlediska výrobní technologie) musíme dosáhnout předepsané pevnosti.

Z výše uvedeného nám vychází potřeba použití urychlovačů. Pro jednoduché konstrukce plně vyhovuje vzorek s urychlovačem Betodur A5, pro složitější konstrukce vzorek s urychlovačem typu Betodur GOLD A5.1. Při složení výroby 75 % jednoduchých prvků a 25 % složitých je vhodné do výroby z hlediska optimalizace výrobních nákladů použít dva výrobky (Betodur A5 a Betodur GOLD A5.1), čímž se zajistí požadované parametry a nebude zbytečně docházet k prodražování výrobků jednoduchých konstrukcí. Navíc z hlediska výsledků vzorku s urychlovačem Betodur GOLD A5.1 (nad požadované parametry) je zde možnost pro optimalizaci dávky urychlovače. Vzorek z urychlovačem typu Nanocat 100 je pro výrobu neekonomický.

Na základě zjištěných poznatků je výrobně doporučeno použití u jednoduchých konstrukcí urychlovač typu Betodur A5, pro složitější konstrukce urychlovač Betodur GOLD A5.1 a zaměřit se u tohoto typu na optimalizaci dávky.

V použití urychlovačů, ale nejen nich, ale i v dalších chemických přísadách lze spatřit velký potenciál a jejich široké využití v budoucnu.

CITACE

- [1] Schutter, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMODE, John GIBBS a Rudolf HELLA. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS servis, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Vyd. 1. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] HELA, Rudolf. *Technologie Betonu I*. Brno, 2005. Skriptum VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [4] PYTLÍK, Petr. *Technologie Betonu*. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [5] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [6] Ebeton: *Samozhutnitelný beton* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/samozhutnitelny-beton-scc>
- [7] GharPedia: *Types of cement used modern construction* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://gharpedia.com/cement-types-their-purposes/>
- [8] SiloTransport: *Popílek* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.silotransport.cz/popilek>
- [9] TIPKA, Martin. *Složení, Návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu* [online] Praha, 2011 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_prip_rava_HSC_a_UHSC.pdf
- [10] TREFIL, Vladislav. *Technický stav betonových konstrukcí panelových budov* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://assets.master-builders-solutions.basf.com/cs-cz/sn%C3%AD%C5%BEen%C3%AD%20n%C3%A1klad%C5%AF%20na%20v%C3%BDr%20prefabrik%C3%A1t%C5%AF%20pou%C5%BEit%C3%ADm%20modern%C3%AD%20p%C5%99%C3%ADsady%20urychluj%C3%ADc%C3%AD%20tvrdnut%C3%AD.pdf>
- [11] Můj beton. *Chemické přísady do betonu* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/chemicke-prisady-do-betonu>

- [12] ASB-portal. *Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/urychlovace-tuhnuti-atvrdnuti-betonu>
- [13] Superior. *Microsilika in concrete ppt* [online]. [cit. 2019-05-15] Dostupné z: <http://www.microsilica-fume.com/microsilica-concrete-ppt.html>
- [14] Get. *Vysokoprocenní vápence* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.get.cz/cz/jamajka-vapence/>
- [15] Cihelna Trojanovski. *keramický obrus* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://cegielniatroyanowscy.pl/en/produkt/brick-powder/>
- [16] Beton server. *Ocelové výztuže* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/ocelove-vyztuze>
- [17] ASB-portal. *Betony s rychlým náběhem pevností* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/betony-s-rychlým-nabehem-pevnosti>
- [18] ČSN EN 206+A1. *Beton- specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2018.
- [19] ČSN EN 12350-8 *Zkoušení čerstvého betonu- Část 8: Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2010.
- [20] ČSN EN 12350-9 *Zkoušení čerstvého betonu- Část 9: Zkouška V-trychtýřem*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2010.
- [21] ČSN EN 12350-10 *Zkoušení čerstvého betonu- Část 10: Zkouška L-skříň*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2010.
- [22] ČSN EN 12350-11 *Zkoušení čerstvého betonu- Část 11: Zkouška segregace proséváním*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2010.
- [23] ČSN EN 12350-12 *Zkoušení čerstvého betonu- Část 12: Zkouška J-kroužkem*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2010.
- [24] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2012.

[25] ČSN EN 12390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2012.

[26] VŠB Ostrava. *Návrh složení cementového betonu* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5304028/>

[27] Ebeton: *Vývoj pevnosti betonu* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vyvoj-pevnosti-betonu>

DOKLADOVÁ ČÁST

Obsah dokladové části:

- A. Prohlášení o vlastnostech: Urychlující přísada Betodur A5
- B. Prohlášení o vlastnostech: Cement CEM I 52,5R
- C. Protokol o zkoušce cementové pasty
- D. Příloha č.1 Výkres vnějšího obalu diferenčního kalorimetru

A. Prohlášení o vlastnostech: Urychlující přísada Betodur A5

BETODUR A5
PROHLÁŠENÍ O VLASTNOSTECH
Č. 10700005000/1

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:

EN 934-2: T 7 //3

2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:

Přísada urychlující tvrdnutí do betonu dle EN 934-2+A1:2012

3. Jméno, firma nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle čl. 11 odst. 5:

STACHEMA CZ s.r.o.
Hasičská 1, Zibohlavý
280 02 Kolín

4. Případně jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce, jehož plná moc se vztahuje na úkoly uvedené v čl. 12 odst. 2:

Nebyl ustanoven

5. Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků, jak je uvedeno v příloze V:

Systém 2+

6. Harmonizovaná norma a oznámený subjekt

Harmonizovaná norma: ČSN EN 934-2 + A1:2012

Oznámený subjekt: Oznámený subjekt č. . 0921- QDB se sídlem Mainzer Landstraße 55 D-60329 Frankfurt am Main provedla počáteční inspekci v místě výroby a řízení výroby ve výrobním závodě i průběžného dohledu, posuzování a schvalování řízení výroby u výrobce v souladu se systémem 2+ a vydal: Certifikát řízení výroby číslo 0921-CPR-2000.

7. Vlastnosti uvedené v prohlášení

Základní charakteristiky	Vlastnost	Harmonizované technické specifikace
Obsah chloridových iontů	≤ 0,1 hm. %	EN 934-2
Obsah alkálií	≤ 8 %	EN 934-2
Korozivní vlastnosti	Výrobek obsahuje složky: dusičnan vápenatý, uvedené v příloze A.2 z EN 934-1:2008	EN 934-2
Pevnost v tlaku	Při teplotě 20°C a po 24 hodinách: zkušební směs ≥ 120 % kontrolní směsi Při teplotě 20°C a po 28 dnech: zkušební směs ≥ 90 % kontrolní směsi Při teplotě 5°C a po 48 hodinách: zkušební směs ≥ 130 % kontrolní směsi	EN 934-2
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi, pokud výrobce nestanovuje jinak	EN 934-2
Nebezpečné látky	viz MSDS	EN 934-2

8. Příslušná technická dokumentace a/nebo specifická technická dokumentace (čl. 36 – 38 nařízení (EU) č.305/2011)

Nevztahuje se

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Bc. Martin Váša, výrobní ředitel

Zibohlavý, 30.10.2014

(místo a datum vydání)

(podpis)

B. Prohlášení o vlastnostech: Cement CEM I 52,5R

Prohlášení o vlastnostech

č. 1020-CPR-040 039098

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:
Portlandský cement EN 197-1 – CEM I 52,5 R
2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití:
Příprava betonu, malty, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a pro výrobu stavebních výrobků
3. Výrobce:
Českomoravský cement, a.s., Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov, Česká republika,
Závod Mokrá
4. Systém POSV:
1+
5. Harmonizovaná norma:
EN 197-1:2011
Oznámený subjekt:
Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, NB 1020
6. Deklarované vlastnosti

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Cement pro obecné použití - složení	CEM I	EN 197-1:2011
Pevnost v tlaku (počáteční a normalizovaná pevnost)	52,5 R	
Počátek tuhnutí	splněno	
Nerozpustný zbytek	splněno	
Ztráta žíháním	splněno	
Objemová stálost	splněno	
Obsah síranů	splněno	
Obsah chloridů	splněno	

Toto prohlášení o vlastnostech je zpřístupněno na internetové stránce výrobce: [www.cmoem.cz]

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarováných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Ing. Petr Schořik



V Mokrém dne 4.12.2017

Tímto se ruší vydání prohlášení o vlastnostech ze dne 01.07.2013

C. Protokol o zkoušce cementové pasty



HANS stavby a.s.
Zkušební laboratoř PREFA Čeperka
PREFA Čeperka, Průmyslový areál Malá Čeperka 335,533 44 Staré Ždánice
Holušická 2253, 148 00 Praha 4 Chodov
zapsaná v OR vedeném u Městského soudu v Praze oddíl B, č. vložky 9157



Protokol č.: DK 2019/005
o zkoušce cementové pasty:
Průběh teploty v jádru stanovené diferenčním kalorimetrem

Výrobce: **HANS stavby a.s.** Datum provedení zkoušky: **26.4.2019**
Lokalita: **Profa Čeperka**

Vnější reference č.0: **Teplota interiéru zkušební laboratoře HANS Stavby a.s. Čeperka**
Vzorek č.1: **Vzorek A** Datum odebrání vzorku: **26.4.2019**
Silo č.1: Stáří vzorku při zkoušce: **0** dní

Vzorek č.2: **Vzorek B** Datum odebrání vzorku: **26.4.2019**
Silo č.2: Stáří vzorku při zkoušce: **0** dní

1. Složení cementové pasty: Vzorek č.1: **Vzorek A** Záměs č.1: 1200 g
Silo č.1: 540 ml

Celková hmotnost: 1740 g

Vzorek č.2: **Vzorek B** Záměs č.1: 1200 g
Silo č.2: 540 ml
Chemie 21,81 g

Celková hmotnost: 1762 g

- 2. Průběh zkoušky:**
1. rozmíchání záměsí pomocí míchadla
záměs z vzorku č.2 vydatelněji než záměs č.1
 2. vložení do tepelněizolovaných nádob kalorimetrů
 3. připojení čidel a zapnutí záznamového zařízení
 4. záznam prováděn každou 1 minutu, záznam veden digitálně lozem

Zkoušku provedl: **Luboš Sobotka**
Místo: **Profa Čeperka-zkušebna**
Provedení: **v pořádku**

Ve Starých Ždánicích dne: 26.4.2019

Luboš Sobotka
Vedoucí laboratoře

D. Příloha č.1 Výkres vnějšího obalu diferenčního kalorimetru

