

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

**MOŽNOSTI REDUKCE SMRŠŤOVÁNÍ BETONŮ
A VÝVOJ RECEPTUR BETONŮ S OMEZENÝM
SMRŠŤOVÁNÍM**

POSSIBILITIES OF REDUCING SHRINKAGE OF CONCRETE AND DEVELOPMENT
OF CONCRETE RECIPES WITH LIMITED SHRINKAGE.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Stoklásek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2022



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	Martin Stoklásek
Název	Možnosti redukce smršťování betonů a vývoj receptur betonů s omezeným smršťováním
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- 1.ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- 2.ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace
- 3.Hela.R: Technologie betonu I a II, učební opory VUT FAST Brno
- 4.Sborníky z českých a mezinárodních konferencí
- 5.České a zahraniční časopisy
- 6.Internetové zdroje, Science Direct apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Smršťování betonů v čase od počátku tuhnutí cementové matrice do cca 1 roku je běžným jevem, zejména u betonů pevnostních tříd C25/30 a vyšších. Nadměrné hodnoty smršťování jsou příčinou vzniku smršťovacích trhlin, které pak snižují trvanlivost betonů v prostředích XF, XA a zvyšují riziko vzniku koroze ocelové výztuže. U vodohospodářských staveb nebo konstrukcí vodotěsných bílých van pak je vznik trhlin považován za vážnou vadu konstrukce. V současnosti se používají pro monolitické stavby konzistence stupně S4 a S5, které i přes použití účinných superplastifikačních přísad obsahují vyšší dávky záměsové vody, což zvyšuje hodnoty smrštění betonu při jeho vysychání.

Cílem práce v teoretické části bude sestavení rešerší komplexně popisujících typy objemových změn betonů a příčiny jejich vzniku. Obzvláště nutné je věnovat se vlivu různých typů cementů, hodnotám vodního součinitele, podmínkám betonáže (teploty betonu a prostředí, rychlost větru) a způsobům ošetřování konstrukcí. Dále popsat metody a přístupy k redukci objemových změn např. použitím protismršťovacích přísad, směsných cementů či aktivních příměsí, skladbou receptur betonů atd.

V praktické části navrhnete betony tříd C30/37 a C45/55 konzistence S4 s využitím zásad získaných rešeršemi. U těchto zjistíte vývoj smrštění v čase ihned po zamíchání do 60 dnů a současně vývoj pevností v tlaku v čase 2,7,28 a 60 dnů při teplotách zrání 20 až 25°C. Optimální hodnoty smrštění by měly být do 0,5mm/m do 60 dnů zrání.

Rozsah práce cca 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o problematice objemových změn betonu a jejich příčiny vzniku. V teoretické části jsou popsány jednotlivé druhy objemových změn betonů a příčiny jejich vzniku. Vliv vstupních surovin betonové směsi a podmínky betonáže na objemové změny. Dále jsou řešeny metody k redukci objemových změn. Experimentální část je zaměřena na vývoj receptur s omezenými objemovými změnami. U nichž je sledován vývoj smrštění od raného věku až po dobu 60 dní a současně je sledován i vývoj pevností v tlaku v čase 2,7, 28 a 60 dní.

KLÍČOVÁ SLOVA

Objemové změny, smršťování betonu, přísady redukující smrštění, vodní součinitel, vysokoteplotní popílek, fluidní popílek

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the issue of volume changes of concrete and their causes. The theoretical part describes the various types of volume changes in concrete and the causes of their occurrence. Influence of concrete mix design and concreting conditions on volume changes. Methods for reducing volume changes are also addressed. The experimental part is focused on the development of recipes with limited volume changes. In which the development of shrinkage is monitored from an early age up to 60 days and at the same time the development of compressive strengths at 2, 7, 28 and 60 days is also monitored.

KEYWORDS

Volume changes, shrinkage of concrete, Shrinkage reducing admixture, water cement ratio, high-temperature fly ash, fluidized bed combustion fly ash

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Martin Stoklásek *Možnosti redukce smršťování betonů a vývoj receptur betonů s omezeným smršťováním*. Brno, 2022. 73 s., 6 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Možnosti redukce smršťování betonů a vývoj receptur betonů s omezeným smršťováním* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23. 2. 2022

Martin Stoklásek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Možnosti redukce smršťování betonů a vývoj receptur betonů s omezeným smršťováním* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 2. 2022

Martin Stoklásek
autor práce

Poděkování

Rád bych v úvodu poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborné vedení při zpracování této práce, cenné rady a podněty, které mi poskytl v průběhu zpracování. Poděkování si také zaslouží Ing. Martin Ťažký a zaměstnanci ústavu THD, kteří mi byli nápomocni při experimentální části. Také bych chtěl poděkovat rodině, která za mnou stojí po celou dobu mého studia.

Obsah

Cíl práce.....	9
Úvod.....	10
TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1. Objemové změny betonu.....	11
1.1 Teorie objemových změn	12
1.2 Deformační změny betonu.....	12
1.3 Fáze objemových změn	12
1.3.1 Smrštění v rané fázi	13
1.3.1.1 Kapalná fáze.....	14
1.3.1.2 Plastická fáze.....	14
1.3.1.3 Tuhá fáze.....	14
1.3.2 Smrštění v dlouhodobé fázi.....	15
1.4 Typy smrštění	16
1.4.1 Plastické smrštění.....	16
1.4.1.1 Plastické sedání.....	17
1.4.2 Chemické a autogenní smrštění	18
1.4.3 Smrštění od vysychání	21
1.4.4 Karbonatační smrštění.....	22
1.4.5 Termální smrštění	23
2. Faktory ovlivňující objemové změny.....	24
2.1 Vliv cementu na objemové změny betonu.....	25
2.2 Vliv kameniva na objemové změny	30
2.3 Vliv vodního součinitele na objemové změny	31
2.4 Podmínky betonáže	32
2.5 Ošetřování	35
2.5.1 Způsoby ošetřování.....	36
3. Metody a přístupy k redukci objemových změn.....	38
3.1 Přísady snižující smrštění (Shrinkage reducing admixture; SRA)	38
3.2 Vlákna	41
3.3 Aktivní příměsi.....	42
3.3.1 Metakaolin	42
3.3.2 Vysokoteplotní elektrárenské popílky.....	43
3.3.3 Nízkoteplotní fluidní popílky	44
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	46
4. Cíl experimentální části	46
4.1 Metodika.....	46
4.2 Postup práce	46
4.3 Vstupní suroviny	47
4.3.1 Cement	47
4.3.2 Kamenivo.....	47
4.3.3 Voda.....	48

4.3.4	Superplastifikátor	48
4.3.5	Protismršťovací přísada	48
4.3.6	Příměsi	48
4.3.7	Vlákna.....	49
4.4	Složení receptur	50
5.	Stanovené zkoušky betonu – receptura I.....	52
5.1	Zkoušky čerstvého betonu	52
5.2	Zkoušky ztvrdlého betonu	52
5.3	Stanovení smrštění betonu.....	54
5.4	Diskuse výsledků.....	56
6.	Stanovené zkoušky betonu – receptura II.....	58
6.1	Zkoušky čerstvého betonu	58
6.2	Zkoušky ztvrdlého betonu	58
6.3	Stanovení smrštění betonu.....	60
6.4	Diskuse výsledků.....	63
7.	Závěr	65
8.	Bibliografie.....	66

CÍL PRÁCE

Bakalářská práce pojednává o problematice objemových změn betonu a zaměřuje se na jejich možnosti redukce. Cílem práce na základě sestavené rešerše, je vytvoření receptur, které disponují omezeným vývinem smrštění.

V teoretické části práce je sestavena komplexní rešerše, jenž pojednává o problematice vzniku objemových změn v různých fázích tuhnutí a tvrdnutí. Popisuje jednotlivé druhy objemových změn, příčiny jejich vzniku a průběh. Také je zde kladen důraz na vliv jednotlivých složek betonu a vlivu podmínkám betonáže s optimálním ošetřováním. Předmětem práce je i popis jednotlivých metod, kterými lze částečně či úplně potlačit vznik objemových změn.

V experimentální části bude zkoumán vliv rozdílného složení jednotlivých receptur betonů třídy C 30/37 a C 45/55. Pro každou třídu betonu bude navržena referenční směs, od které se bude odvíjet další rozdílně složení směsi s využitím poznatků z teoretické části práce. Budou použity složky, které jsou schopny omezit objemové změny svou povahou. U všech vyrobených směsí proběhne měření objemových změn a následně zhodnocení jejich dopadu na vývoj smrštění v čase.

ÚVOD

Beton je umělý kompozitní materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s chemickými přísadami, minerálními příměsemi nebo s vlákny nebo bez nich, který získává své vlastnosti hydratací cementu. [N1]

K výrobě betonu se používají vhodné anorganické (maltoviny) nebo organická pojiva (polymery), společně s plnivem. Plnivo bývá převážně zastoupeno, jako anorganický zrnitý materiál přírodního, umělého nebo recyklovaného původu, souhrnně nazývané jako kamenivo do betonu. Kamenivo bývá zastoupeno jemnými nebo hrubými frakcemi písku, drti nebo štěrku, již jsou spojeny s cementovým tmelem a společně se záměsovou vodou po zatuhnutí tvoří pevný kompozit. [1]

Proces tuhnutí a tvrdnutí betonu je doprovázen řadou chemických reakcí, které vedou ke vzniku hydratačních produktů, jenž vytváří z plastické směsi pevný kompozit, disponující vlastnostmi zatvrdlého betonu. Při hydrataci cementové matrice dochází k chemickým reakcím, které s sebou nesou nepříznivé krátkodobé i dlouhodobé objemové změny. Tento nežádoucí jev lze redukovat optimálním poměrem složek betonové směsi, použitím příměsí, přísad redukujících smrštění nebo vhodnou kombinací či správným ošetřováním betonu. [1]

TEORETICKÁ ČÁST

1. Objemové změny betonu

Objemové změny materiálů na bázi silikátových pojiv jsou provázány rozsáhlým spektrem vlivů, měnící svou velikost a charakter v závislosti na čase. Tyto objemové změny jsou především dány složením silikátových pojiv, jejich dávkou a množstvím hydratačních produktů. [2]

Vysoký měrný povrch jemně mletých pojiv s sebou nese vyšší sklony ke smršťování. Nezanedbatelný vliv na smršťování má i množství a druh použitého kameniva, s čímž je spjatý poměr a/c . Čím větší je poměr kameniva ku cementu, tím je tendence smršťování betonů menší. Dávka vody je dalším parametrem, na který je nutno brát ohled. S menší hodnotou vodního součinitele w/c se hydratujícímu silikátu dostává méně vody, která se nachází mezi zrny hydratujícího cementu a odchází z betonu ve formě výparu kapilární kondenzací a negativně ovlivňuje jeho vlastnosti, konkrétně zvýšenou pórovitost. S pojmem vodní součinitel je spjata používání superplastifikátorů, jež mají silný vliv na spotřebu vody při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu, ale narážíme zde na pojem autogenní smršťování, který bude popisován v pozdějších kapitolách. S objemovými změnami souvisí i použití mnoha přísad ovlivňující rychlost hydratačních reakcí, obsah vzduchu v betonu nebo například přidání rozptýlené výztuže s cílem zamezit plastickému smrštění v rané fázi. Významnou roli zde hrají protismršťovací přísady, jimž bude věnována pozornost v samostatné kapitole 3.1. [2] [3]

Výše zmiňované vlivy jsou úzce spjaty i s problematikou klimatických podmínek, které doprovází silikátový materiál po celou dobu jeho existence, tj. od počátku tuhnutí a tvrdnutí až po vyzrálý stav. Ve fázi tuhnutí a tvrdnutí, lze tyto klimatické vlivy eliminovat správným ošetřováním silikátu. [2]

1.1 Teorie objemových změn

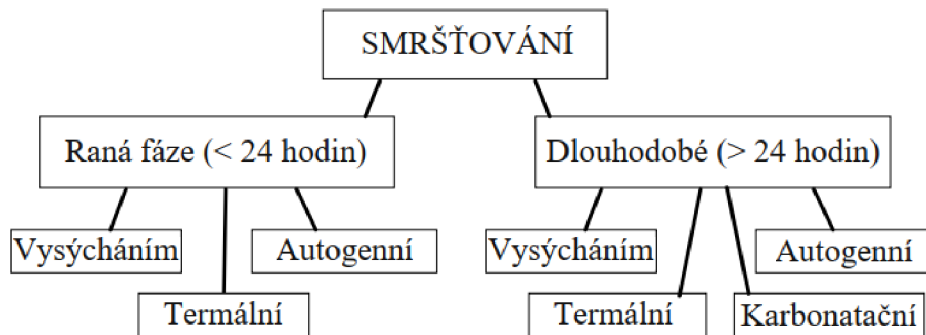
Objemové změny mají svůj původ v mikrostruktuře cementového tmelu, spojující zrna kameniva. Jeho základem je homogenní cementový gel s koloidním charakterem. Znamená to, že obsahuje chemicky vázanou vodu, koloidní vodu v pórech a vodu volnou v kapilárách a makropórech. Voda, která není chemicky vázaná, je vytlačována z mikropórů gelu (mikropóry jsou velikostně 100krát menší než kapiláry) do kapilár, z kterých se následně odpařuje. Tato migrace vody z mikropórů do makropórů je zapříčiněna účinkem dlouhotrvajícího napětí betonu. Odpařování vody je závislé na hygrometrických podmínkách prostředí. [4]

1.2 Deformační změny betonu

Pro deformace betonu je charakteristické protažení či stlačení tělesa. Beton z pohledu deformací, dělíme na reversibilní (vratné) a irreversibilní (plastické, nevratné). Děje vratné charakterizují pružné deformace spjaté s modulem pružnosti, teplotní délkovou roztažností a vlhkostí, která má za následek částečné smrštění betonu. Plastické deformace způsobují dotvarování betonu, při působení dlouhodobého zatížení a zároveň i částečné smrštění od hydratace a karbonatace. Jelikož deformace betonu řadíme do mechanických vlastností, nebudou již v dalších kapitolách rozebírány. Následující kapitoly budou věnovány redukci smršťování betonu. [5]

1.3 Fáze objemových změn

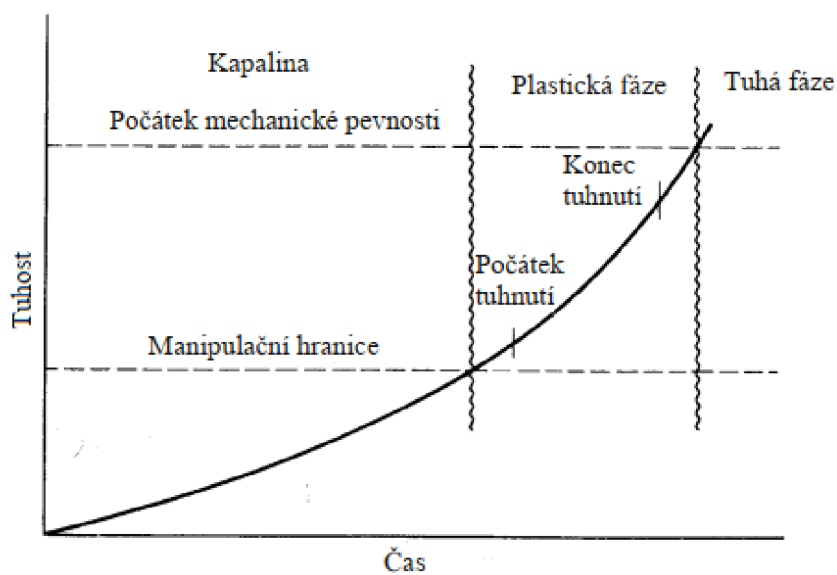
Jednotlivé fáze objemových změn betonu rozdělujeme dle časového hlediska na smršťování v rané fázi, která nastává v prvních dvaceti čtyřech hodinách procesu tuhnutí a na smršťování dlouhodobé, ve fázi tvrdnutí betonu po dvaceti čtyřech hodinách a více (obr. 1.1). Obě zmíněné fáze smršťování jsou spjaté s vlhkostí opouštějící čerstvý nebo zatvrdlý beton. Obecně lze tedy smršťování rozdělit do tří hlavních kategorií – plastické smrštění, chemické smrštění a smrštění vysycháním. Z dlouhodobého hlediska je nutno věnovat pozornost i smrštění v důsledku karbonatace. [6]



Obr. 1.1: Fáze objemových změn. [O1]

1.3.1 Smrštění v rané fázi

Pojem smrštění v rané fázi definuje objemové změny, nastávající bezprostředně po uložení betonu až po stáří přibližně dvaceti čtyř hodin. Tento časový interval, který je znázorněný na obr. 1.2, zahrnuje jednotlivé periody tuhnutí betonu od tekuté fáze smáčení zrn cementu, plastického stavu, až po počátek tvrdnutí [7]. V prvních hodinách této rané fáze dochází k plastickému smršťování. Plastické smršťování nastává do 10–12 hodin od uložení betonu, ale pouze pokud je beton v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu nižší než 95 % a vystaven větru a působením vysokých teplot [3]. Hydratace cementu v rané fázi způsobují tahové napětí, což má za následek zmenšení objemu a tvorbu vnitřního pnutí, způsobující smršťovací trhliny. Tyto trhliny mohou vést k závažným problémům, jako například narušení trvanlivosti betonových konstrukcí nebo korozi výztuže [8].



Obr. 1.2: Fáze smrštění v raném věku, přechod tuhnutí a tvrdnutí do tuhé fáze. [O2]

1.3.1.1 Kapalná fáze

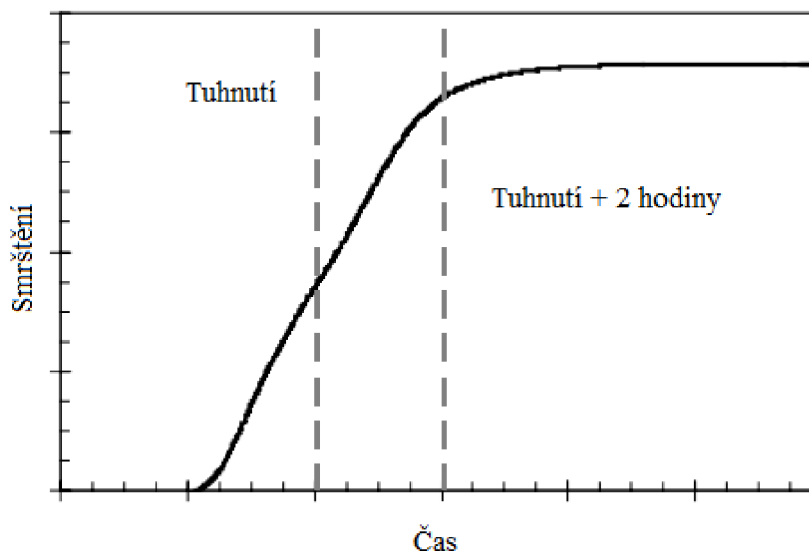
Po smíchání složek má beton tekutou formu, která nemá žádnou pevnou strukturu držící jednotlivé složky pevně na místě. V této fázi je beton náchylný na sedání těžších zrn kameniva a na krvácení betonu (bleeding). [7]

1.3.1.2 Plastická fáze

Reakce cementu s vodou má za následek tvorbu hydratačních produktů, které začínají tvořit pevnou kostru betonu, který z plastické fáze přejde do pevného stavu. Rychlost této tuhnoucí fáze betonu může být ovlivněna okolním prostředím, konkrétně teplotou nebo přísadami do betonu ovlivňující chemické reakce. [7]

1.3.1.3 Tuhá fáze

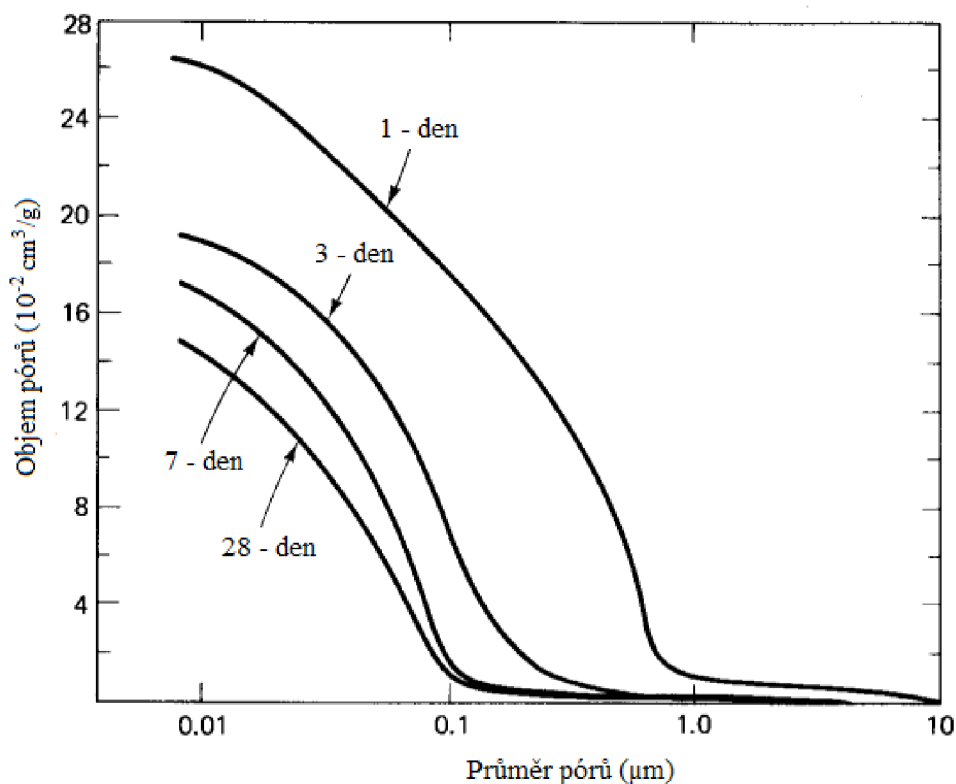
V této fázi mají jednotlivé složky betonového kompozitu stabilní strukturu a jsou schopny odolávat působícímu namáhání. Rychlost dodatečného vysychání nebo autogenního smršťování se zpomalí přibližně do dvou hodin od počátku tuhnutí (Obr. 1.3), protože beton má potřebnou pevnost, aby odolal působícímu napětí od smršťování. Pokud potřebná pevnost betonu není dostatečná, aby odolala těmto silám, dojde k vzniku trhlin. [7]



Obr. 1.3: Konec rané fáze vysychání smršťování v důsledku tvrdnutí betonu. [O3]

Dlouhodobá reaktivní povaha cementu způsobuje to, že ztvrdlý beton bude vykazovat objemové změny po dlouhou dobu jeho existence, dokud cement nedosáhne

svého plného potenciálu, nazývaný jako stupeň hydratace. Částice cementu pokračují v reakci v závislosti na čase a obsahu vody. S přibývajícím dobou se poréznost prázdných dutinek cementu snižuje, čímž dojde k celkovému poklesu objemu pórů, jak ukazují křivky zjištěné pomocí rtuťové porozimetrie pasty portlandského cementu na obr. 1.4. [7]



Obr. 1.4: Křivky rtuťové porozimetrie pro pastu portlandského cementu, zobrazující průměry pórů a jejich objem. [O4]

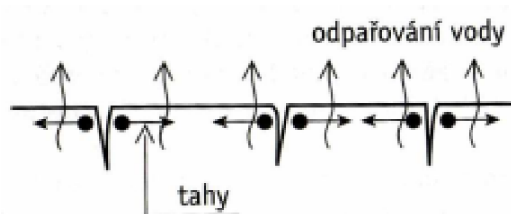
1.3.2 Smrštění v dlouhodobé fázi

Za dlouhodobé smršťování považujeme objemové změny, které nastaly až po dvaceti čtyřech hodinách od namíchání či uložení betonu [7]. Mladý beton má tendenci smršťovat se rychleji, později se rychlost zmenšuje, kdy po několika letech dojde k ustálení na konečné hodnotě [4]. Obecně se očekává, že k 80 % objemových změn vlivem smrštění, dojde přibližně do tří měsíců stáří betonu. Tato doba a hodnota smrštění závisí na rozměrech a tvaru betonové konstrukce. Konstrukce větších rozměrů se bude smršťovat po delší dobu, ale konečná hodnota smrštění může být nižší [7].

1.4 Typy smrštění

1.4.1 Plastické smrštění

Plastické smrštění (obr. 1.5) nastává ve fázi, kdy je beton ještě v plastickém stavu, důsledkem odvádění vody z betonu odpařováním nebo působením okolních suchých podkladových vrstev konstrukcí, jenž sají vodu z čerstvého betonu svými kapilárami. Tyto fyzikální pochody vody vyvolávají tahové napětí v povrchových vrstvách betonu a jelikož beton ve svém plastickém stavu nevykazuje téměř žádné pevnosti, dojde k popraskání povrchových vrstev betonu [9]. Lze tedy konstatovat, že k tvorbě mikrotrhlin dojde, pokud je tahové napětí vyšší než tahová pevnost betonu [3].

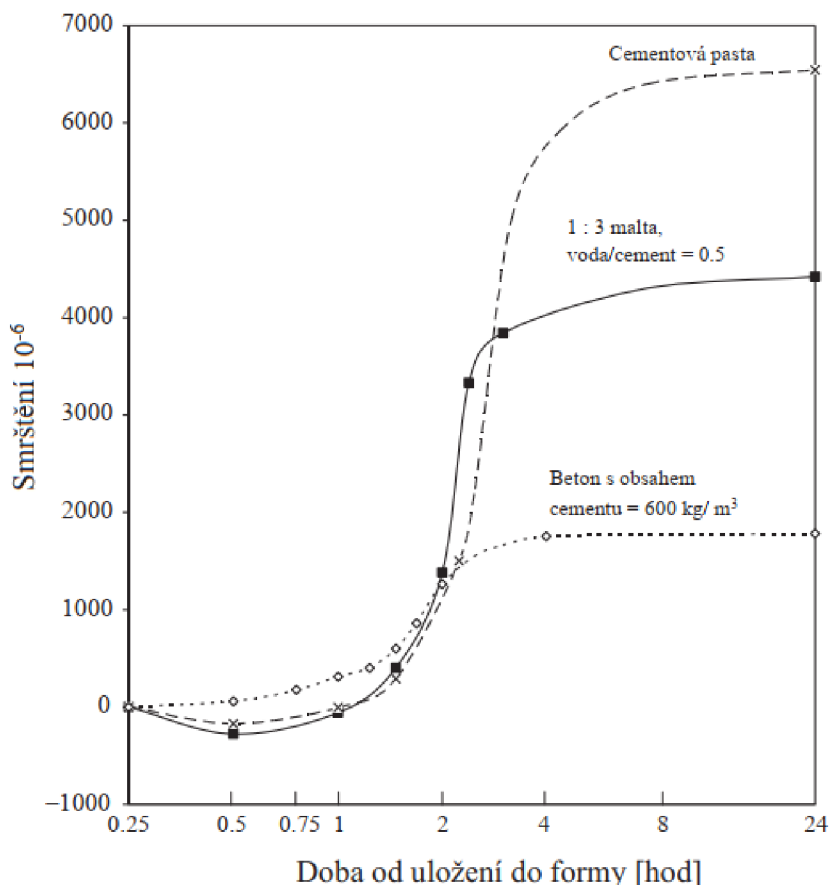


Obr. 1.5: Princip plastického smršťování. [05]

Trhliny od plastického smršťování jsou většinou problémem vodorovných ploch betonu a jejich výskyt indikuje lesknoucí se voda na vrchní vrstvě betonu. Délkové rozměry těchto trhlin se pohybují od několika centimetrů až po několik metrů [10]. Ačkoliv se trhliny mohou zdát zanedbatelného rozměru na povrchu betonu, po obroušení mohou dosahovat šířky až 3 mm a hloubky 80 mm [11]. V případě větších rozměrů, je zde riziko oslabení konstrukce a difuze vlhkosti a jiných agresivních vlivů, které by pronikaly do betonu. Narušení betonu od plastického smršťování může vést ke korozi výztuže [10].

Velikost plastického smrštění stoupá se vzrůstající rychlostí odpařování vody, což je závislé na teplotě vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru [9], přičemž rychlost větru je více podstatná, než teplota prostředí [11]. Při odpařování vody rychlejší než $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})$ dochází k nebezpečí vzniku mikrotrhlin na povrchu vysychajícího betonu [9].

S velikostí plastického smrštění také souvisí vodní součinitel s obsahem cementu a podíl kameniva ve směsi (obr 1.6), neboť se zvyšující se dávkou cementu stoupá hodnota plastického smrštění. Naopak se zvyšujícím se podílem kameniva se plastické smršťování snižuje. [9]



Obr. 1.6: Smrštění cementové pasty, malty a betonu. [O6]

1.4.1.1 Plastické sedání

Při ukládání betonu je nutno dbát na přiměřený obsah vody a teplotu betonu, abychom zabránili odpaření vody z povrchu betonové směsi, a tím snížili vznik plastického sedání. Plastické sedání lze definovat, jako poruchu vzniklou vodorovným přetvořením, které vzniklo rychlým vysycháním uloženého betonu v plastické fázi. Beton není schopen přenést tahová a smyková napětí, které zde vznikají od rozdílů svislých deformací, způsobené transportem vody na povrch betonu od ztuhnutí a následného odpařování a vzájemným pohybem cementového tmele s kamenivem, čímž přispívá ke vzniku trhlin od plastického smršťování. [11]

Významný vliv na plastické sedání hrají rozdílné tloušťky ukládaných vrstev betonu, protože nezraje v celém průřezu stejně rychle. Teplotní rozdíly a odchod vody vlivem vývinu hydratačního tepla způsobuje rozdílné tahové napětí v průřezu. [11]

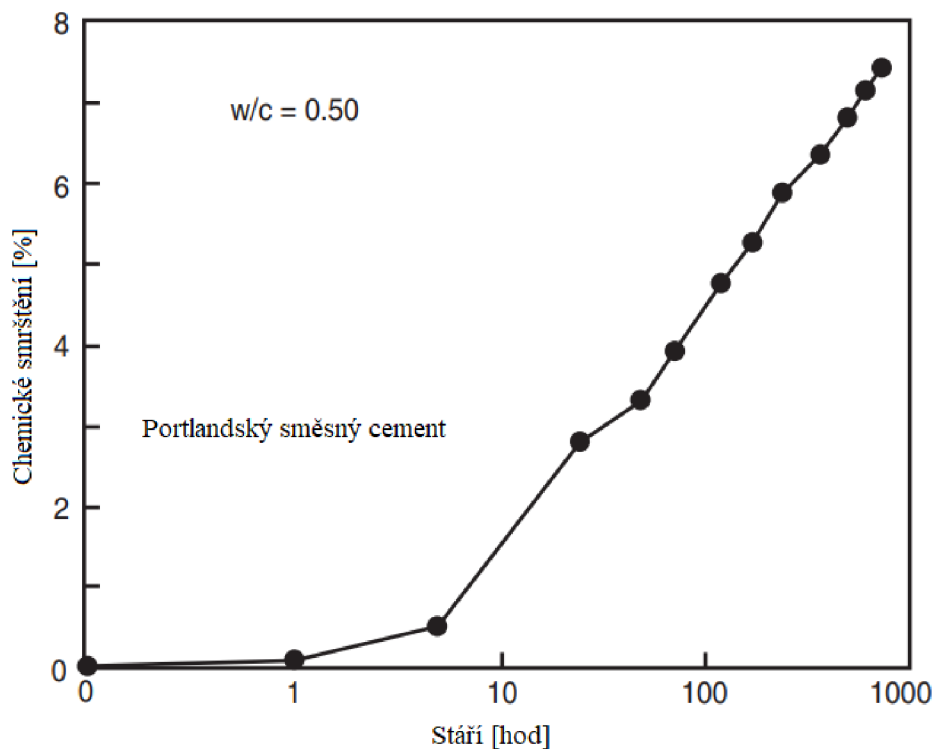
U deskových nevyztužených konstrukcí se plastické sedání projeví rovnoměrným poklesem po celé ploše. Při rozdílných tloušťkách průřezu či vyztužených konstrukcí se plastické sedání projeví vnikem trhlin. [11]

1.4.2 Chemické a autogenní smrštění

Pro autogenní smršťování bývá často používám nesprávný termín „chemické smrštění“, jelikož se jedná o dva rozdílné termíny, měly by být řádně definované. [12]

Chemické smrštění

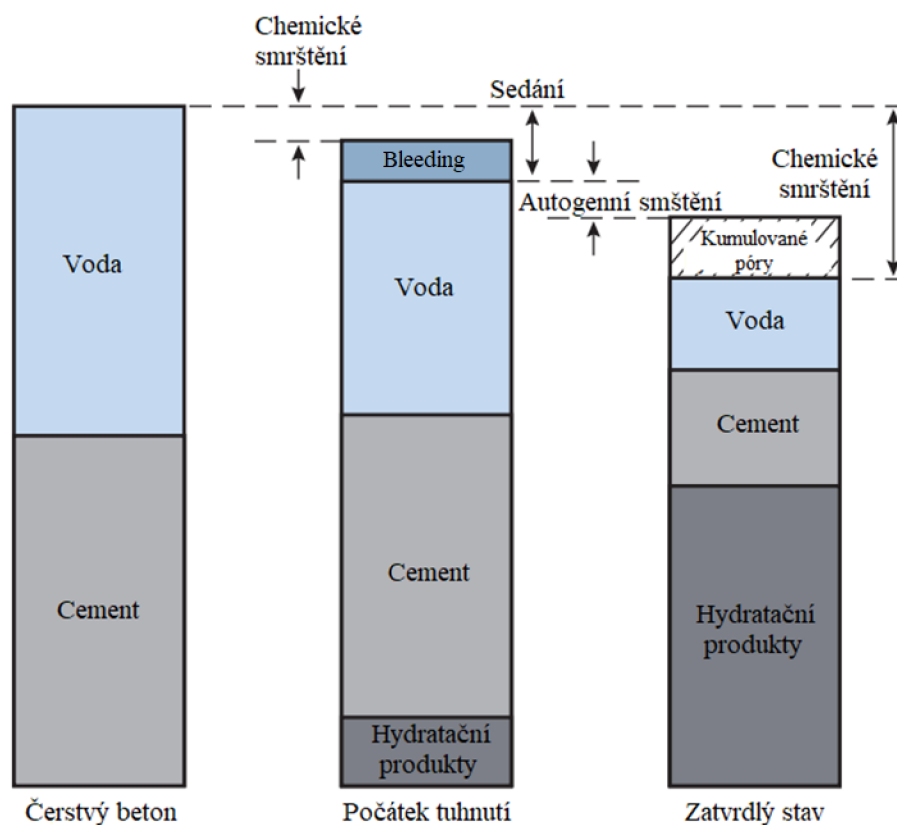
Chemické smrštění definujeme jako jev, při kterém je absolutní objem hydrátu vzniklého reakcí mezi nezhydratovaným cementem a vodou menší než celkový objem cementu a vody před hydratací [12]. Příčinou chemického smrštění je vznik hydratačních produktů všech slínekových minerálů [3]. Tato reakce je exotermického původu, a aby mohla probíhat, potřebuje k reakci vodu. To vede ke zmenšení objemu neboli chemickému smrštění [7]. V rané fázi tuhnutí tvoří hydratovaný cement pouze malou část celkového objemu, zbytek objemu zaujímají vodou naplněné kapiláry a nezhydratovaný cement. Proces chemického smrštění trvá v mikroskopickém měřítku po celou dobu hydratace cementu (*Obr. 1.7*). V tuhé fázi nedochází již k takovým deformacím, jako ve fázi plastické, což má za následek vznik dutin v mikrostruktuře, do nichž migruje voda z kapilár. Probíhající reakce v tuhé fázi jsou vnitřní a výrazně nemění viditelný vnější objem či rozměry betonového prvku [13].



Obr. 1.7: Chemické smrštění cementové pasty. [O7]

Autogenní smrštění

Autogenní smršťování lze popsat, jako zmenšení makroskopického objemu pevných a kapalných látek betonu, způsobené chemickým smršťováním a samovysycháním, v důsledku nepřetržité hydratace cementu v prostředí konstantní teploty a vlhkosti [14]. Makroskopické autogenní smršťování je mnohem menší než absolutní objemové zmenšení při chemickém smršťování, protože již započal počátek vytváření tuhé struktury betonu, jejich vzájemný vztah znázorňuje obr. 1.8 [13].



Obr. 1.8: Vzájemné vztahy chemického a autogenního smrštění. [O8]

Bezprostředně po smíchání vody a cementu, dochází k chemickému smršťování, v důsledku zmenšení objemu reakčních produktů, v této rané fázi, kdy je beton tekutý, je autogenní smršťování ekvivalentní chemickému smršťování. [7]

Jak již bylo zmíněno u chemického smršťování, tak v této fázi vytváření tuhého skeletu dochází k vytváření pórů, do nichž migruje voda z kapilárních pórů. Důsledkem toho se od povrchového napětí v kapilárách tvoří menisky, které působí na stěny kapilár silami, snažící se kapiláru uzavřít. Problematika migrace vody způsobuje samovysychání a je nutné jí věnovat pozornost obzvláště u vysokopevnostních betonů s nízkým vodním součinitelem, protože autogenní smrštění zde může dosáhnout hodnot až 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ [3].

Po zatvrdnutí betonu (> 1+ dní) a vytvoření pevné kostry betonu, je nutno věnovat pozornost správnému ošetřování, kvůli smršťování samovysycháním, které je způsobeno klesající relativní vlhkostí vlivem hydratace [7]. Collepardi ve své knize poukazuje na srovnání tří betonů, kdy každý vykazuje jiný druh smrštění: autogenní, plastické a smrštění vysycháním. Všechny tři betony jsou obaleny nepropustnou fólií, čímž nemůže

docházet k výměně vlhkosti mezi betonem a okolím, což má za následek, že nevzniká plastické smrštění, ani smrštění od vysychání. Dle výše popsané problematiky autogenního smrštění lze konstatovat, že nepropustná fólie či jiné ošetřující postřiky, nezabrání vzniku autogenního smršťování. Řádné ošetřování vodou či jiného zdroje vlhkosti po co nejdelší dobu, zabrání vzniku autogenního smrštění. [3]

1.4.3 Smrštění od vysychání

Smrštění od vysychání vzniká v důsledku zmenšení objemu kvůli úbytku vody v kapilárním systému. Volná voda uniká na povrch, kde se následně vlivem vnějších vlivů odpaří do okolního prostředí [7]. Odchod vody z betonu probíhá tak dlouho, dokud není vytvořena rovnováha mezi vlhkostí okolního prostředí a vlhkostí cementového kamene [11]. Smrštění vysycháním nastane, jakmile hydratující silikát nabyde počátečních mechanických pevností v rané fázi tvorbě skeletu. Lze tedy říct, že smrštění vysycháním navazuje na potenciálně vzniklé plastické smrštění [2].

Voda, která je obsažena ve velkých kapilárách blízko povrchu betonu, opouští beton přirozeně jako první, poněvadž je vázána nejmenšími kapilárními silami. S ubývají vlhkostí v betonu, jsou menisky tvořeny stále v jemnějších kapilárách, čímž roste napětí od kapilárních sil, které v betonu vznikají. Čím jsou kapilární síly silnější, tím obtížnější je tuto silně vázanou vodu z betonu odpařit. [15]

Stejně jako tomu bylo u chemického smrštění, i zde narážíme na tvorbu menisků v kapilárních pórech a odpařování vody. Proces vysychání nastává v celém objemu vodou neošetřovaném betonu homogenním způsobem. Naproti tomu odpařování, je lokalizovaným jevem, který začíná na povrchu betonu. Rychlost přechodu procesu odpařování na vysychání závisí na hutnosti mikrostruktury betonu a okolní vlhkosti prostředí. [15]

Beton s vodním součinitelem alespoň 0,45, který je chráněn před vysycháním například ošetřovacími nástřiky, které zabraňují unikání vody z betonu do okolního prostředí, bude vykazovat minimální objemové změny. Kdežto u betonu, který je uložený v prostředí s relativní vlhkostí menší než 95 %, dochází ke kapilární kondenzaci. Z tohoto důvodu se bude smršťovat po celou dobu jeho životnosti. Experimentálně bylo prokázáno, že rovnovážná relativní vlhkost pro beton je přibližně 94 %. Teoreticky

odpařování vody z betonu nebude probíhat v prostředí s relativní vlhkostí rovnu 100 %. [3]

1.4.4 Karbonatační smrštění

Současně se smršťováním v důsledku vysychání, beton podléhá zároveň i karbonatačnímu smrštění, ačkoliv jde o dva rozdílné mechanismy [1]. Celý proces karbonatace je založen na reakci oxidu uhličitého (CO_2) s hydratovaným cementem [9]. Jedná se o nevratnou objemovou změnu, způsobenou chemickou reakcí [16].

Oxid uhličitý společně v přítomnosti vlhkosti tvoří kyselinu uhličitou (H_2CO_3), která reaguje s krystaly hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), za vzniku uhličitanu vápenatého (CaCO_3), který se poté usadí v prázdných pórech. Celý tento proces se nazývá karbonatace [9]. Tento chemický proces má za následek mírné smrštění a snížení zásaditého pH betonu [holt], přičemž pokud pokles hodnoty pH ze zásadité hodnoty 12,6 klesne pod hodnotu 9, nastane narušení povrchové vrstvy výztuže, konkrétně ochranné vrstvy oxidů železa a nastane tzv. „depassivace“ výztuže a následně startuje koroze výztuže [17].

Houst v publikaci zmiňuje Powersovu hypotézu, kde karbonatační smršťování přisuzuje rozpouštění krystalů hydroxidu vápenatého, které se v důsledku smršťování od vysychání stlačují při tvorbě uhličitanu vápenatého v pórech. [18]

Množství a průběh karbonatace je značně ovlivněno vlhkostí, v němž se daný beton nachází. Vysoká relativní vlhkost zamezí vznikání CO_2 do cementového kamene, protože póry jsou zaplněné vodou a tím pádem vznik karbonatace je značně omezen. Při velmi nízké relativní vlhkosti vzniká kyselina uhličitá ve velmi omezené míře, protože póry neobsahují dostatečné množství vody. V důsledku toho se karbonatace zpomaluje, a tím i karbonatační smršťování. Nejintenzivnější průběh karbonatačního smršťování nastává při relativní vlhkosti 50 %. [1]

Rychlost karbonatace závisí na propustnosti betonu, jeho obsahu vlhkosti a obsahu CO_2 a okolní vlhkosti. Beton, který je nedostatečně vyzrálý s vysokým poměrem vody ku cementu bude více náchylný ke karbonataci, kvůli většímu obsahu pórů. [9]

1.4.5 Termální smrštění

Široká škála materiálů podléhá teplotní objemové kontrakci, nevyjímaje i beton. Ovšem beton se od ostatních materiálů liší tím, že při nabývání pevností se jeho teplota mění vlivem hydratace cementu [7]. Mechanické spoje vyvíjející se během procesu tvrdnutí betonu, vznikly při teplotě, jenž je jiná, než jaká bude během životnosti betonu [15].

Protože hydratace cementu je exotermická reakce, uvolňuje se zde určitý stupeň tepla. Portlandský cement má poměrně složité minerální složení. Každý minerál totiž reaguje s vodou několika způsoby a také množství uvolněného tepla je u každého minerálu rozdílné. Hodnoty hydratačního tepla pro hlavní složky portlandského cementu jsou uvedeny v tab. 1.1. [19]

Tab. 1.1: Specifické hydratační teplo hlavních minerálů portlandského cementu. [19]

Minerál	Uvolněné teplo, cal/g
C ₃ S	120
C ₂ S	62
C ₃ A	207
C ₄ AF	100

Vzniklé teplo při hydrataci a následné vývoje pevnosti betonu ovlivňují rozměry a geometrie betonového prvku a celkový obsah cementu. Klesající rychlost hydratace a následné snížení teploty způsobí, že beton podlehne termálnímu smrštění, protože v této fázi má již beton tvrdou mikrostrukturu. Na vývoj termálního smrštění v čase mají majoritní podíl především čtyři hlavní slídkové minerály v portlandském cementu, specifický měrný povrch cementu, počáteční teplota betonu a okolní teplota během průběhu hydratace a již zmíněný tvar betonového prvku. [19]

Konečná hodnota termálního smrštění je silně závislá na koeficientu tepelné roztažnosti. S tím souvisí střídání teplot působící na betonovou konstrukci a následné změny objemu. Nižší teploty vedou ke zkracování a rostoucí teploty naopak k nabývání objemu. Tyto nežádoucí objemové změny vlivem teplot lze účinně eliminovat vytvořením dilatačních spár, které umožní nezávislé přetvoření jednotlivých částí. [20]

2. Faktory ovlivňující objemové změny

Pohled na výrobu betonu nabývá dojmu, že se jedná o snadný úkon a zvládne to každý i bez technologických znalostí. Rozdíl mezi kvalitním a nekvalitním betonem nespočívá ani tak ve volbě složek, nýbrž v tom, jaký poměr jednotlivých složek použijeme na jeho výrobu a jakou pečlivost a pozornost věnujeme ukládání, zhutňování a ošetřování, které následuje po odbednění či odformování betonu. Dávky jednotlivých složek směsi jsou rozhodující pro výrobu kvalitního betonu, jak v čerstvém stavu, tak i ztvrdlém stavu. Ačkoliv zde narážíme na protichůdné vlastnosti čerstvého betonu a betonu ztvrdlého. Například pokud při návrhu snížíme dávku kameniva ve prospěch pojiva (cementu a vody), získáme tím lepší kohezi a plasticitu čerstvé směsi, což považujeme za výhodu při dopravě, ukládání a hutnění betonu. Byť získáme snížením dávky kameniva na úkor pojiva lepší zpracovatelnost, dostáváme se zde k problému s větším vývinem hydratačního tepla a následné tvorby trhlin od termálního smrštění (které roste s rostoucím obsahem cementové pasty) a smrštění od vysychání. Další problém může nastat i při zvyšování poměru voda/cement, tedy vodního součinitele. Zvyšováním vody na úkor cementu získáme lepší zpracovatelnost betonové směsi, ale dojde k zhoršení vlastností ztvrdlého betonu, jako například zvýšená pórovitost, která následně způsobí menší pevnosti betonu a jeho trvanlivost. Při úpravě poměru jemné frakce kameniva ve prospěch hrubého kameniva bude beton méně soudržný, náchylný ke krvácení a k segregaci. [3]

Výše zmiňované problémy poukazují, že návrh poměru jednotlivých složek není jednoduchá záležitost, a že k vytvoření optimálního betonu musíme věnovat péči každé jednotlivé fázi betonáže: míchání, doprava betonu, ukládání, zhutnění, odformování a zejména ošetřování [3]. Vliv správného ošetřování zajistí nejvyšší stupeň hydratace cementu, aby bylo dosaženo co nejvyšší pevnosti a nejnižší permeability a také minimalizuje smršťování betonu [15].

V následující části práce bude popsána problematika jednotlivých vstupních složek betonové směsi a jejich vliv na objemové změny. Bude zde i věnována pozornost již zmíněnému ošetřování betonu a podmínkám betonáže.

2.1 Vliv cementu na objemové změny betonu

Hydratace cementu je komplexní soubor exotermických chemických reakcí. Každá chemická sloučenina může reagovat s vodou různými způsoby. Každá reakce má svou vlastní objemovou stechiometrii a produkty reakce (nebo hydratace) mohou přecházet do různých forem. Existuje několik mechanismů, kterými cementová pasta mění svůj objem (smršťuje se nebo bobtná) během procesu hydratace. Mezi hlavní mechanismy patří výše zmíněné druhy smrštění betonu. Je třeba mít na paměti, že všechny objemové změny v cementové pastě nebo betonu, mohou nastat současně [21]. Také je nutno brát v potaz, že při daném poměru vody ku cementovým materiálům, bude smršťování lineárně narůstat se vzrůstajícím obsahem cementových materiálů v betonové směsi [22].

Hlavní složkou portlandského cementu je slínek a regulátor tuhnutí síran vápenatý. Všechny další cementy obsahují určité množství portlandského cementu a určité množství příměsí minerální povahy. Přidáním minerálních příměsí jako složka směsných cementů, lze získat pozitivní vlastnosti, které jsou ve výsledku schopny redukovat objemové změny. Dle určitého množství slínku a minerálních příměsí dělíme cementy do skupin: [3]

Typ I: Portlandský cement - >95 % slínku

Typ II: Směsné portlandské cementy - > 65 % slínku, další složky jsou zastoupeny v obsahu 6-20 %, což značíme písmenem A, nebo 21-35 %, což značíme písmenem B. Jednotlivé složky jsou značené: S struska, P přírodní pucolán, Q průmyslový pucolán, V křemičitý popílek, W vápenatý popílek, L vápenec, D křemičité úlety, T kalcinovaná břidlice. Značíme tedy CEM II-B/S – Portlandský směsný cement s obsahem strusky 21-35 %.

Typ III: Vysokopecní cement A, B nebo C – značení A, B, C určuje obsah slínku a je následující: A (36-65 %), B (66–80 %), C (extrémně nízký obsah slínku, někdy i pod 5 %). Zbylé procenta doplňuje struska. Jak již bylo zmiňováno dříve, slínkové minerály mají vliv na vývin hydratačního tepla. CEM III-C s obsahem slínku pod 5 % vykazuje velmi nízké hydratační teplo, což lze považovat za výhodu, zvláště u masivních

konstrukcí. Ovšem dosahuje pouze pevnostní třídy 32,5 R, právě kvůli nízkému obsahu slínku.

Typ IV: Pucolánový cement – s obsahem slínku 65–89 % značený A nebo B s obsahem slínku 45-64 %, zbytek tvoří křemičité úlety, popílky a pucolány

Typ V: Směsný cement – s obsahem slínku 40–64 % nebo 20–39 %, zbytek složek tvoří směs strusky, pucolánu a popílku. [3]

Protože chemické smršťování betonu je vyvoláno hydratací cementu, velikost chemického smršťování přímo souvisí s chemickou povahou cementu a stupněm hydratace cementu, respektive povahou slínkových minerálů. [21]

Trikalcium silikát (C₃S) - je zodpovědný za počáteční nárůst pevností, jelikož nástup jeho hydratačních reakcí je poměrně rychlý. Obecně platí, že počáteční pevnosti betonu narůstají s vyšším obsahem C₃S. [13]

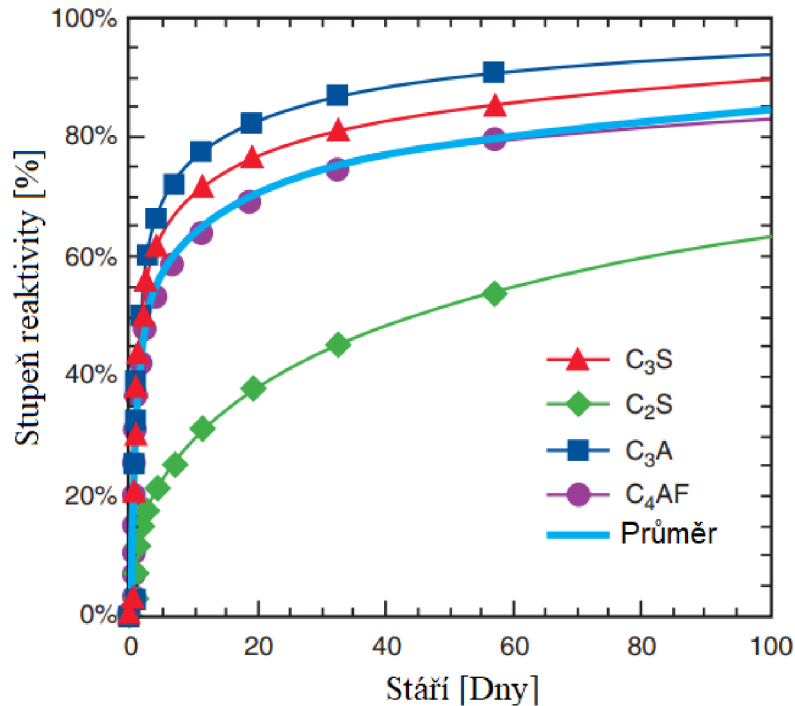
Dikalcium silikát (C₂S) - hydratuje a tvrdne pomalu, ve velké míře přispívá ke zvýšení pevností ve věku delším než jeden týden. [13]

Trikalcium aluminátu (C₃A) - tento minerál je zodpovědný za produkci velkého množství tepla v prvních dnech hydratace. Částečně také přispívá na vývoji pevností v rané fázi betonu. Cementy s vyšším obsahem C₃A jsou odolnější vůči agresivnímu prostředí obsahující sírany. [13]

Tetrakalcium aluminoforit (C₄AF) - produkt vzniklý od železitých a hlinitých surovin při výrobě cementu. Málo přispívá k nárůstu pevností. [13]

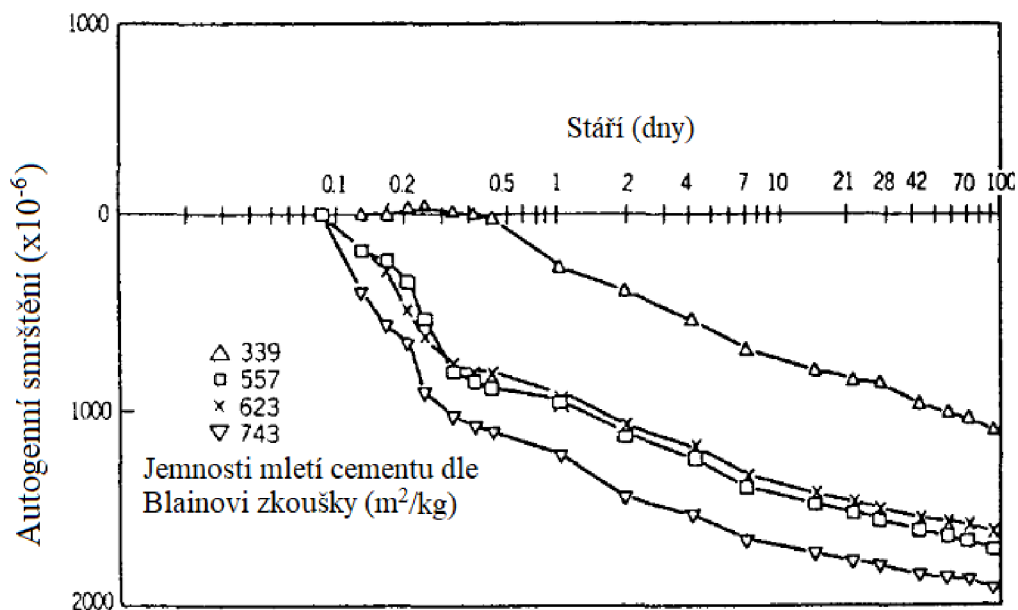
Sádrovec (CaSO₄·2H₂O) - složka která se přimílá ke slínku, zpomaluje tuhnutí slínkových minerálů a je potřebný pro vznik ettringitu v plastické fázi betonu. [3]

Přiložený obrázek 2.1, znázorňuje relativní aktivitu výše popisovaných slínkových minerálů v čase. Modrá křivka, jenž znázorňuje celkové zastoupení všech minerálů má přibližné složení 55 % C₃S, 18 % C₂S, 10 % C₃A a 8 % C₄AF, což odpovídá přibližnému složení cementu typu I [13].



Obr. 2.1: Relativní reaktivita slinkových minerálů [O9]

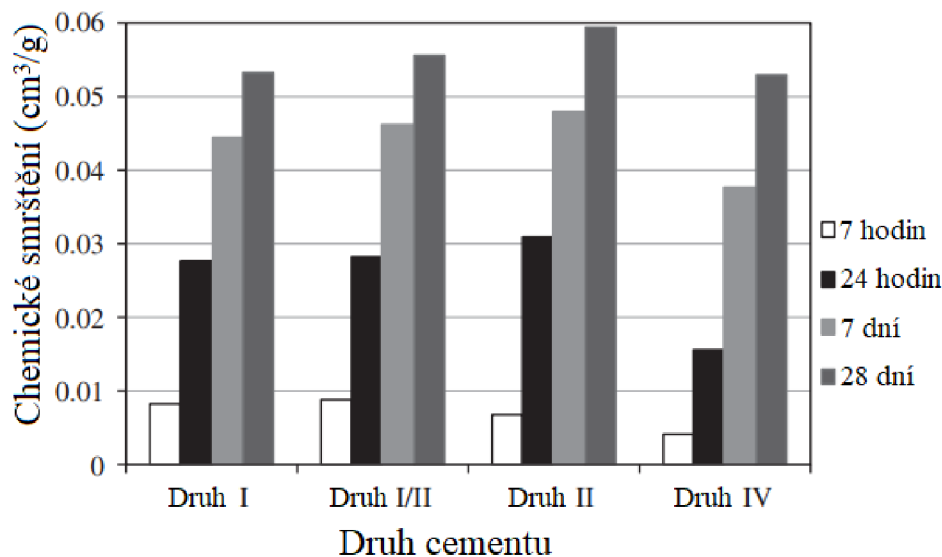
Bylo zjištěno, že obsah trikalciem aluminátu (C_3A), tetrakalcium aluminoferitu (C_4AF), oxidu draselného (K_2O) ovlivňují autogenní smrštění desetkrát více než dikalcium silikát (C_2S) a trikalciem silikát (C_3S). Geinker a Knudsen zjistili, že chemické smršťování cementových past rostlo se zvyšujícím se vodním součinitelem w/c a teplotou. Holt a Bentz a kolektiv uvádějí, že nejvýznamnější faktorem ovlivňující chemické a autogenní smrštění je jemnost mletí cementu [21]. Jemnější cement má větší měrný povrch a v důsledku toho jsou k dispozici vyšší reaktivní místa pro hydratační reakce a vytváří se jemnější mikrostruktura. V důsledku toho se zmenšuje průměr jednotlivých pórů a vznikají vyšší kapilární napětí, což má za následek vyšší smrštění [23]. Závislost autogenního smrštění na jemnosti mletí cementu znázorňuje obr. 2.2, kde je názorně vidět, že vysoká jemnost mletí způsobuje rychlejší nástup smrštění v dřívějším časovém intervalu. Tento fakt poukazuje, že měrný povrch cementu v rozmezí $250\text{--}400\text{ m}^2/\text{kg}$ je zcela optimální s ohledem na vývoj smrštění v rané fázi [24].



Obr. 2.2: Závislost autogenního smrštění na jemnosti mletí cementu [O10]

Bouasker a kolektiv uvedli, že vápencové pojivo zrychluje chemické smršťování ve velmi raném věku (<24 hodin), ačkoli velikost chemického smrštění nebyla významně ovlivněna. Příměsi také ovlivňují chemické smršťování, protože mění disperzi cementu a rychlost hydratace. Výzkumy také ukazují, že chemické smrštění cementové pasty lze určit podle jejího chemického složení. Základní reakce cementové fáze jsou obecně definovány čtyřmi složkami C_3S , C_2S , C_3A a C_4AF . Dle jejich molekulových hmotností a měnící se hustoty sloučeniny při změně reakčních produktů lze předpovědět změnu objemu matematickou rovnicí [21].

Yodsudjai s Wangem provedli výzkum, kde zkoumali chemické smrštění portlandských cementů typu I, II, I/II a IV. Na přiloženém obr. 2.3, lze vidět, že portlandské cementy druh I a II, vykazují vyšší chemické smrštění v porovnání s portlandským cementem IV, který nabývá poněkud nižších hodnot. Za tento fakt, může vyšší obsah C_3A a C_4AF u portlandských cementů I a II druhu. [21]



Obr. 2.3: chemické smrštění v různých časových intervalech. [O11]

Sadegh s Ghourchianem a kolektiv, prováděli výzkum náchylnosti portlandských cementů a směsných cementů k plastickému smršťování. Výzkum zahrnoval vzorky CEM I až CEM III. U všech zkoušených směsí byla konstantní dávka cementu a vody. Výsledky experimentu přinesly poznatky, že v důsledku snižujícího se obsahu slínku v cementu, roste náchylnost k plastickému smršťování. To je způsobeno pomalejším vývojem hydratace, neboť s nižším obsahem slínku rostou požadavky na vyšší jemnost mletí, kvůli zvýšení reaktivity slínkových minerálů. Pomalejší nástup hydratace vlivem nižší jemnosti mletí způsobí, že v betonu nevzniknou dostatečně pevné vazby na přenesení počátečních tahových napětí a dojde k deformacím vlivem odchodu vody z betonu v raném věku. [25]

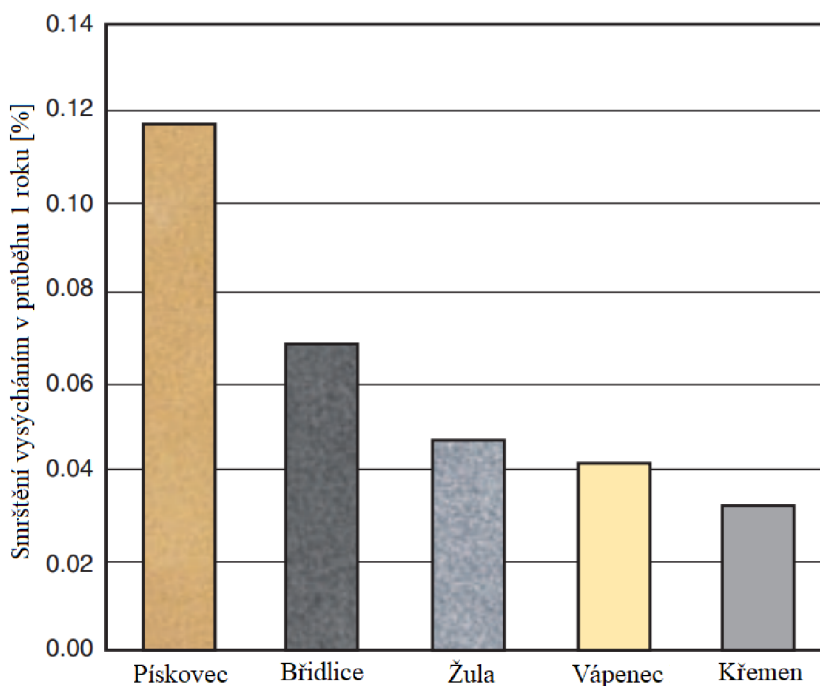
Starší literatura poukazuje na použití belitického cementu vykazující malé autogenní smrštění. Tazawa a Miyazawa, provedli výzkum, kde porovnávají vývin smrštění různých druhů cementu při konstantním vodním součiniteli $w/c = 30\%$. Hlinitanový cement a cement s vysokým počátečním nárůstem pevností vykazovaly vysoké autogenní smrštění, které způsobilo vyšší hodnoty celkového smrštění, naopak cement belitický, vykazoval nejmenší hodnoty smrštění [12]. Nízké hodnoty autogenního smrštění belitického cementu souvisí s jeho minerálním složením. Jedná se o druh portlandského cementu s nízkým obsahem C_3S a s cca 60% obsahem C_2S . Vyznačuje se

pozvolným pomalým nárůstem pevností a značně nízkým vývinem hydratačního tepla [26].

2.2 Vliv kameniva na objemové změny

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, pro dosažení optimálních a požadovaných vlastností betonové směsi, je nutno věnovat pozornost každé jednotlivé vstupní surovině ve směsi. Optimální volba a dávka jednotlivých frakcí kameniva je klíčová pro dávku cementu i vody. Složení směsi ovlivňuje výslednou zpracovatelnost, čerpatelnost, pórovitost, trvanlivost a smršťování betonu. Nevhodně zvolená křivka zrnitosti či absence frakce kameniva, může ovlivnit smršťování betonu. [13]

Různé typy kameniva disponují rozdílnou stlačitelností, modulem pružnosti a vlastnostmi smršťování související s vlhkostí. Kamenivo s vysokou absorpcí vlhkosti má vliv na smrštění vysycháním. Kameniva křemene a živce, spolu s vápencem a dolomitem, jsou považována za agregáty s nízkým smrštěním, zatímco kamenivo s obsahem pískovce, břidlice, droby či rohovce je spojováno s vysokým smrštěním betonu. Srovnání smrštění kameniva v jednoročním období je znázorněno na obr. 2.4. [13]

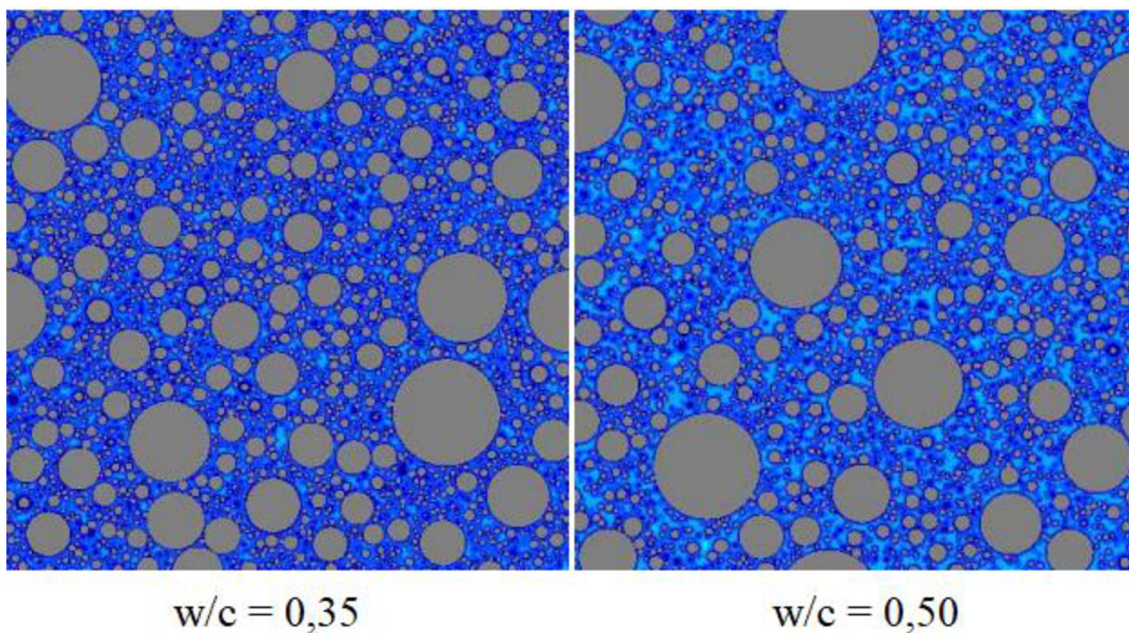


Obr. 2.4: Srovnání Smrštění od vysychání v jednoročním intervalu vybraných kameniv. [O12]

Ťažký a kol. provedli rozsáhlý výzkum, kde zkoumali vliv složení betonové směsi na její objemové změny. Z pohledu kameniva experiment zahrnoval porovnání těžného s drceným kamenivem a jejich vliv na objemové změny. Experiment ukázal, že vyšší měrný povrch zrn drceného kameniva má negativní vliv na potřebnou dávku záměsové vody a následné smrštění sušením. Dalším zajímavým poznatkem byl fakt, že maximální zrno kameniva a typ křivky zrnitosti s vynecháním frakce 4-8 mm, nemají významný vliv na objemové změny kompozitu [27], jako uvádí Kosmatka ve své knize [13].

2.3 Vliv vodního součinitele na objemové změny

Pojem vodní součinitel w/c definujeme, jako poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu v betonové směsi. Tento pojem je spojován s pevností betonu; čím nižší w/c , tím větší pevnost betonu. Ovšem ve skutečnosti má vodní součinitel spojitost se vzdáleností mezi částicemi cementu v cementové pastě. Čím menší je tato vzdálenost, tím rychleji mohou hydratační produkty vyplnit mezery mezi částicemi cementu a vzniklé vazby nabývají vyšších pevností. Navíc, čím menší je tato vzdálenost, tím menší jsou velikosti pórů vzniklé v důsledku samovysychání, ale narůstá napětí generované autogenním smršťováním. Na obr. 2.5, je znázorněn vliv vodního součinitele při zachování stejné dávky cementu. Vodní součinitel $w/c = 0,35$ symbolizuje levá část obrázku, kde nižší dávka vody při stejné dávce cementu způsobila, že hydratační produkty vyplnily mezery mezi částicemi cementu a zmenšila se velikost pórů. Naopak pravá strana obrázku symbolizuje beton s hodnotou vodního součinitele $w/c = 0,50$, kde si můžeme všimnout zvýšení obsahu celkové pórovitosti, právě kvůli již zmiňované větší vzdálenosti mezi zrny cementu. [28]



Obr. 2.5: Snímek ($200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$) znázorňující různé vodní součinitele na obsah pórů v betonu. [O13]

Částice cementu jsou šedé a odstíny modré znázorňují vzdálenosti vody od nejbližšího povrchu cementových částic, se světlejší modrá barva označuje větší vzdálenost. [28]

Lze tedy konstatovat, že vodní součinitel jednoznačně souvisí s objemovými změnami betonu. Konkrétně s klesajícím vodním součinitelem narůstá množství autogenního smrštění. [12]

2.4 Podmínky betonáže

Podmínky betonáže na staveništi jsou klíčové pro výslednou kvalitu betonu. Jejich proměnlivý charakter závisí na teplotě, povaze klimatu, zda se jedná o suché či vlhké podmínky, dále je potřeba uvažovat o různých povětrnostních podmínkách, jako například rychlost větru. [13]

Horké povětrnostní podmínky nepříznivě ovlivňují kvalitu betonu, především tím, že urychlují rychlost ztráty vlhkosti a zrychlují hydrataci cementu, čímž se zvyšuje tendence ke potencionálnímu vzniku trhlin od termálního smrštění. Vyšší teplota betonu vede také k dlouhodobé ztrátě pevnosti a v krátkodobém hledisku snižuje dobu zpracovatelnosti. Problematika kratší doby zpracovatelnosti bývá často řešena přidáním

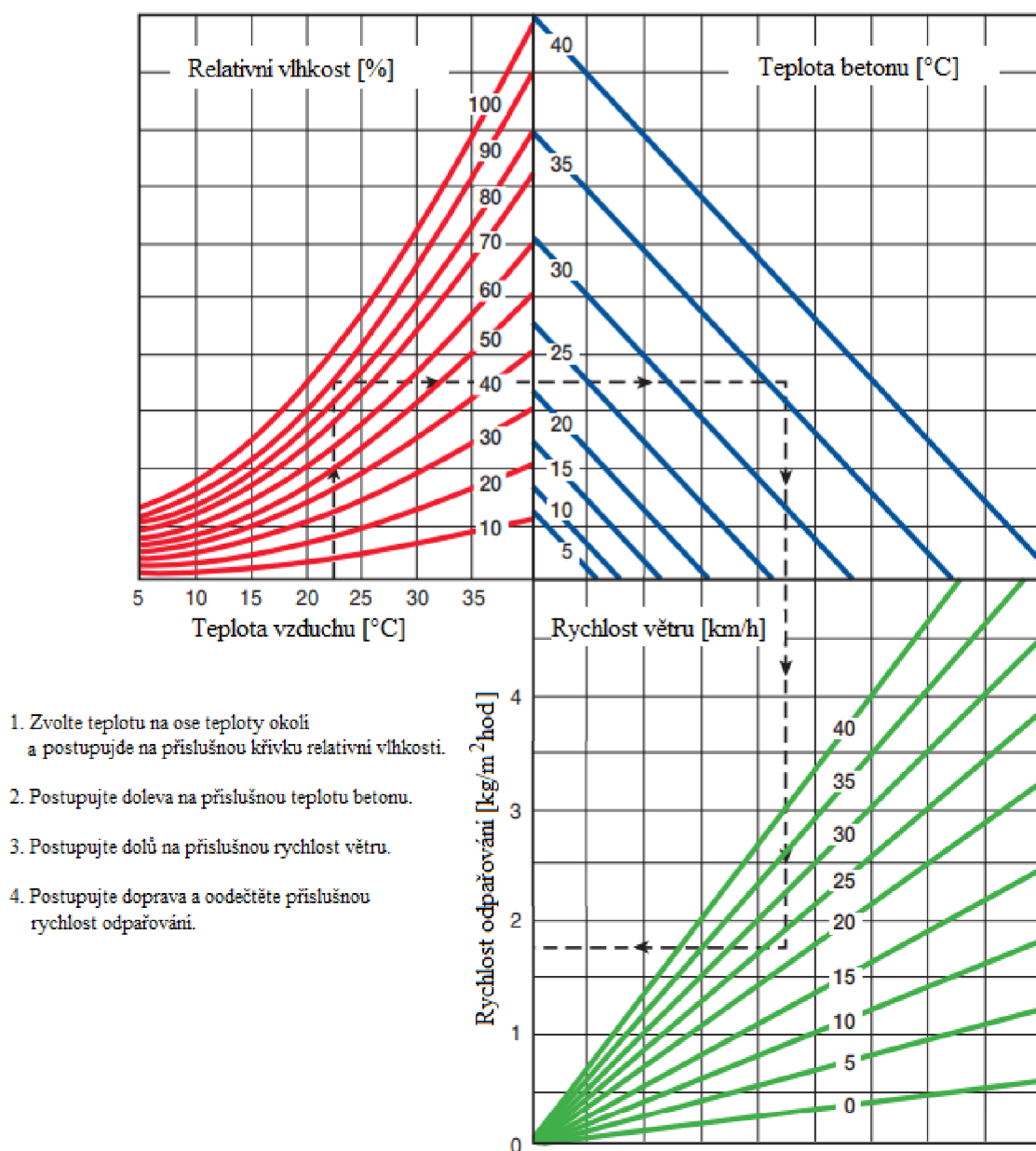
vody na staveništi, což je ovšem nevhodné řešení, které následně negativně ovlivní vlastnosti a použitelnost daného betonu. [13]

V horkém počasí by kamenivo a záměsová voda měly být udržovány co možná nejchladnější, jelikož tyto materiály ovlivňují teplotu čerstvého betonu v největší míře [13]. Část záměsové vody lze nahradit ledem, ovšem jen v případě, že se led do betonáže rozpustí [3]. Pro snížení teploty betonu lze také použít kapalný dusík do bubnu domíchávače. Přidání dusíku samo o sobě neovlivňuje množství záměsové vody [13]. Jednodušší řešení nabízí použití zpomalujících přísad nebo superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů pro snížení ztráty rozlitem obzvláště v teplém počasí [3].

Při betonáži v teplém počasí se nabízí myšlenka použití aktivních příměsí; popílek či granulovaná vysokopecní struska. Tyto materiály obecně zpomalují jak rychlost tuhnutí, tak i rychlost ztráty rozlitem. Narážíme zde však na problém související s povahou těchto příměsí, kdy rychlost krvácení může být pomalejší než rychlost odpařování a dojde k plastickému smršťování. [13]

Betonáži v ranních hodinách nebo naopak ve večerních hodinách, kdy je teplota nižší, docílíme nižšímu riziku vzniku trhlin od termálního smrštění a tvorbě trhlin. Transport betonu na stavbu a následné ukládání by mělo proběhnout v co nejkratším časovém intervalu. Nutno také dávat pozor na techniku ukládání betonu, abychom zabránili studeným spojům. [13]

Následující podmínky, jednotlivě nebo společně, zvyšují odpařování vlhkosti z povrchu betonu a způsobují plastické smršťování; vysoká teplota vzduchu, vysoká teplota betonu, nízká relativní vlhkost a vysoká rychlost větru. Závislost zmíněných vnějších činitelů je znázorněna na obr. 2.6, který umožňuje teoreticky určit rychlost odpařování v daných podmínkách. [13]

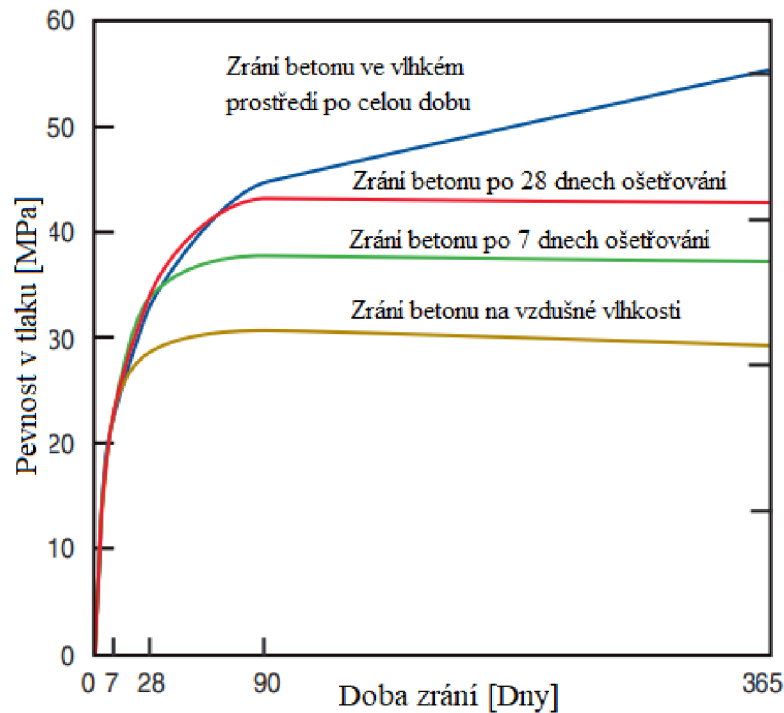


Obr. 2.6: Vliv okolních podmínek na rychlost odpařování. [O14].

Při betonáži v chladném prostředí by neměla být teplota čerstvého betonu klesnout pod 5 °C, pokud nejsou zabezpečené speciální podmínky pro průběh betonáže. Problémy při nízké teplotě způsobí pomalý vývin pevností betonu a možné zamrznutí záměsové vody v čerstvém betonu s téměř nulovou pevností. Hrozí zde i riziko vzniku trhlin od rozdílných teplot betonu a prostředí. Pro správný vývin pevností betonu v chladném počasí, lze zvednout teplotu betonu použitím teplé záměsové vody, popřípadě použitím prohřívaného kameniva. Další možností je vhodná tepelná izolace bednění či zabezpečení ohřevu vodní párou nebo teplým vzduchem, pro zajištění stálějších hydratačních teplot. Použitím teplého vzduchu se zvyšuje množství odpařené vody z betonu a hrozí zde vznik trhlin. Nutno také zmínit, že prudce ohřátý beton by neměl být vystavený nízké teplotě okolí, aby nedošlo k velkým teplotním dilatacím. [1]

2.5 Ošetřování

Dodržení správné vlhkosti a teploty betonu po určitou dobu bezprostředně po betonáži je zcela nezbytné, aby se mohly rozvíjet požadované vlastnosti, jenž má beton splňovat. Při smíchání cementu s vodou dojde k hydrataci. Rozsah, ve kterém je tato reakce dokončena, ovlivňuje výslednou povahu ztvrdlého betonu. Řádná péče má silný vliv na výsledné vlastnosti ztvrdlého betonu, konkrétně na trvanlivost, pevnosti, voděodolnost, odolnost proti obrusu, objemovou stálost a odolnost proti mrazu. Čerstvě namíchaný beton obsahuje více vody, než je potřeba pro hydrataci cementu v danou chvíli. V momentě, kdy dojde k nadměrné ztrátě této vody vlivem vysychání, může se proces hydratace zpozdit nebo dokonce nedojde k dostatečné hydrataci. Při optimálních teplotách a správnému ošetřování, tj. zabránění úniku vody z betonu, je proces hydratace poměrně rychlý a optimální. Vliv ošetřování na vývoj pevností znázorňuje obr. 2.7 [13], kde můžeme vidět, jak důležitá je minimální doba ošetřování pro vývoj pevností betonu. Nedostatečné ošetřování negativně ovlivní stupeň hydratace, protože došlo k odchodu potřebné vody z betonu. Vysokopevnostní betonu s nízkým vodním součinitelem $w/c < 0,40$ vyžadují vodní ošetřování co nejdříve, abychom zamezili ztrátám pevností, zejména v dlouhodobém časovém horizontu. [3]



Obr. 2.7: Vliv doby zrání v různých prostředí na nárůst pevnosti betonu [O15]

Důležitým aspektem, proč beton ošetřovat je redukce smrštění. Únik vlhkosti z betonu způsobí vysychání a následné smrštění. Problém nastává při produkci tahového napětí od smršťování, pokud překročí tahovou pevnost materiálů. To má za následek vznik trhlin a již zmiňované horší vlastnosti. [3]

2.5.1 Způsoby ošetřování

Způsoby ošetřování nebo jejich kombinace závisí na použitých materiálech, druhu konstrukce a na okolním prostředí probíhající betonáže [13]. Rozhodující je i vodní součinitel. Pro betony s vodním součinitelem nižším než 0,40, je ošetřování vodou nejvhodnější způsob, naopak betony s vodním součinitelem vyšším než 0,50, je vhodnější použít ošetřování ochrannými nástřiky [3]. Beton lze ošetřovat těmito způsoby:

- 1) Metody, které udržují přítomnost záměsové vody v betonu, během počátečních fází tvrdnutí betonu. Patří mezi ně ponoření do vodního prostředí, nástřiky či mlžení, popřípadě překrytí nasycenou přikrývkou, která částečně umožňuje ochlazování zejména při betonáži v teplejším počasí. [13]

- 2) Metody, které zabraňují odchodu záměsové vody z povrchu betonu. Toho lze dosáhnout pokrytím betonu nepropustnými membránami nebo plastovými fóliemi nebo aplikací vytvrzovacích směsí tvořících membránu. [13]
- 3) Metody, které urychlují nárůst pevnosti dodáním tepla a dodatečné vlhkosti do betonu. To se obvykle provádí pomocí páry, topných spirál nebo elektricky vyhřívaných forem nebo podložek. [13]

3. Metody a přístupy k redukci objemových změn

V této kapitole bude věnována pozornost metodice jistým vstupním surovinám, které lze při návrh složení betonu použít pro redukci či potlačení objemových změn.

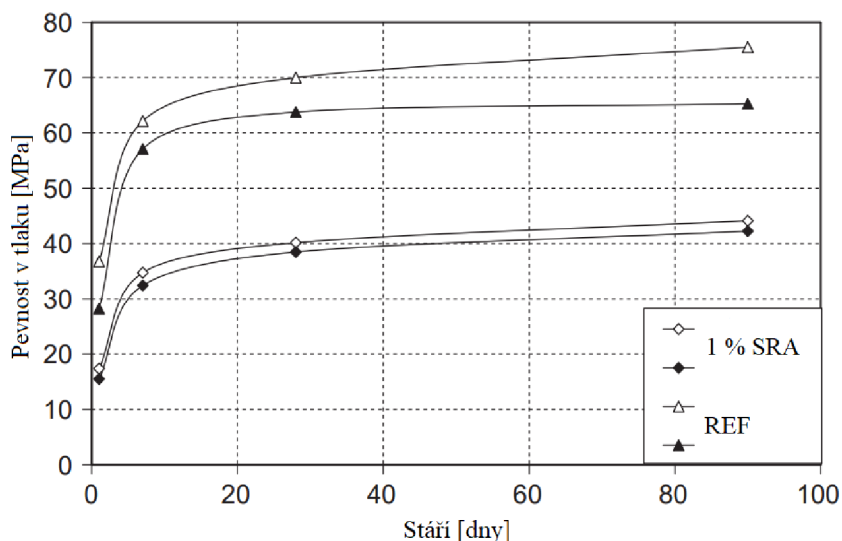
3.1 Přísady snižující smrštění (Shrinkage reducing admixture; SRA)

Přísady snižující smrštění (SRA) jsou chemické povrchově aktivní látky organických řetězců molekul. Řetězec je složen z hydrofilního konce a hydrofobního konce [29]. Mechanismus protismršťovacích přísad spočívá ve snížení povrchového napětí vody v pórech o průměru 2,5 až 50 nanometrů (v pórech větších než 50 nm je tažná síla ve vodě příliš malá na to, aby způsobila znatelné smrštění a v pórech menších než 2,5 nm se meniskus nemůže vytvořit) [30]. Když dojde k odchodu vody z kapilárních pórů, ať už vlivem hydratace, nebo v důsledku vystavení prostředí s nízkou relativní vlhkostí, v částečně prázdných pórech se vytvoří menisky vzduch-voda, které vytvářejí tahová napětí na stěnách pórů [29]. Povrchové napětí v tomto menisku táhne stěny pórů dovnitř a beton reaguje na tyto vnitřní síly smršťováním. [30]. SRA snižují kapilární napětí a následně smršťování betonu. Navíc zvyšují relativní vlhkost uvnitř pórů betonu, což také snižuje kapilární napětí. Tento efekt se zvyšuje s rostoucí teplotou [29].

Snížení povrchového napětí roztoku pórů je nejvýraznější při nízkých koncentracích SRA [29], běžná dávka pro tyto chemické přísady je 1–2 % na hmotnost cementu [3]. Se zvyšující se koncentrací její účinnost klesá nebo se případně ustálí, dokud nedosáhne „kritické koncentrace“, po jejímž překročení již větší dávka nevede k dalšímu snížení povrchového napětí [29].

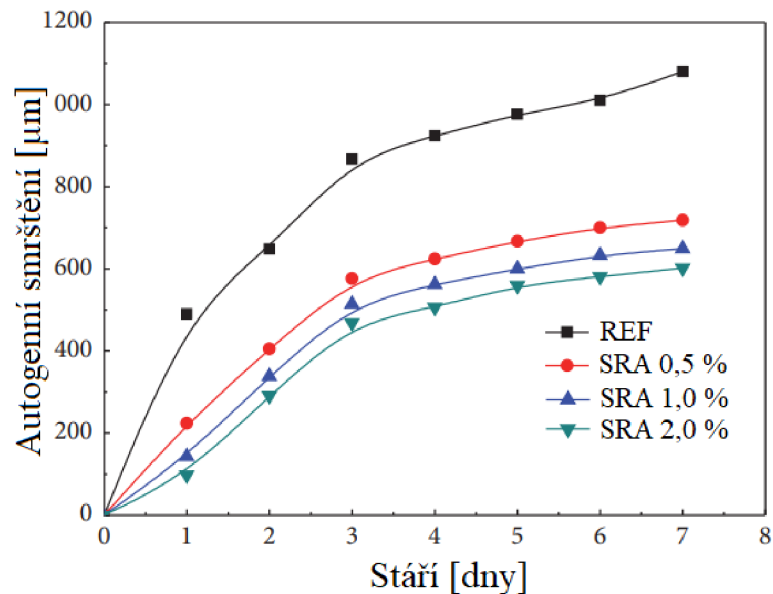
Brooks a kolektiv provedli výzkum, kde pozorovali zpoždění doby tuhnutí po přidání SRA. Doba zpoždění tuhnutí pro běžné betony byla relativně malá (méně než 10 %). Naopak u vysokopevnostních betonů, bylo zpoždění značné, což autor přisuzuje k interakci SRA se superplastifikátorem [31]. Jiné zdroje uvádějí, že rychlost hydratace se společně se vzniklým teplem snižuje, při použití SRA, což zapříčiní zmiňovaný pokles počátečních pevností [30].

Výzkum Saliba a kol. [32] zkoumal vliv SRA na vývoj pevností v tlaku betonu. Výzkum potvrdil mírné snížení pevnosti v tlaku, jako udávají jiné zdroje. Obecně se tvrdí, že v betonech s menším vodním součinitelem nedochází k větším poklesům pevnosti v tlaku při použití SRA [30]. Následující obr. 3.1 poukazuje na pokles pevnosti v tlaku betonu. Autor uvádí, že snížení pevnosti může být způsobeno zvýšenou pórovitostí při použití SRA [32].



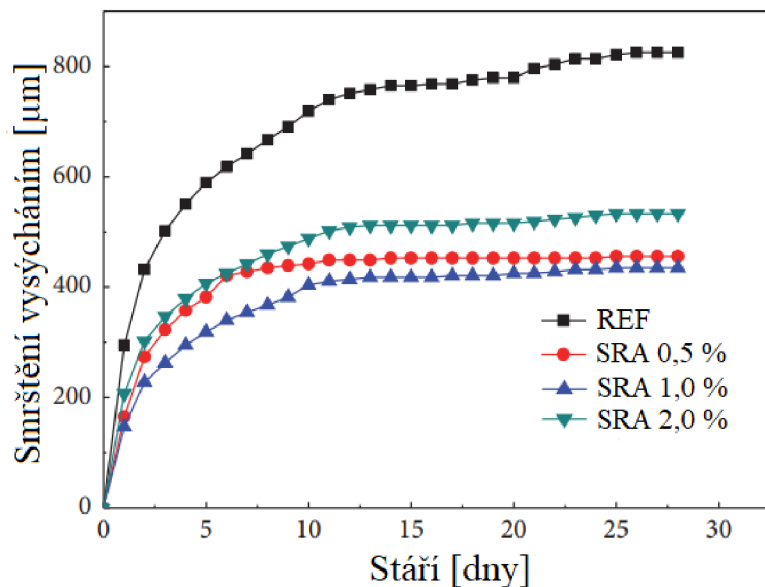
Obr. 3.1: Srovnání pevnosti v tlaku v závislosti na použité dávce SRA [O16]

Anshuang a kolektiv provedli výzkum, kde porovnávali různé dávky SRA na autogenní smrštění a smrštění od vysychání. Na obr. 3.2 je znázorněn vliv SRA na velikost autogenního smrštění, kdy jeho velikost byla dominantní v prvních třech dnech a poté měla rychlost růstu pomalejší průběh. Průběh autogenního smrštění klesal se zvyšující se dávkou SRA až do 2,0 %. [33]



Obr. 3.2: Vliv dávky SRA na autogenní smrštění [O17]

Stejní autoři prováděli tentýž výzkum i pro smrštění vysycháním (Obr.3.3). Opět se zde setkáváme s trendem strmého nárůstu smrštění v prvních pěti dnech, následně došlo k pomalejší tendenci narůstání smrštění od vysychání až do desátého dne, kde smrštění přestalo narůstat. Nejlepší hodnoty opět vykazovala směs s použitím dávky 2 % SRA na hmotnost cementu. [33]



Obr. 3.3: Vliv dávky SRA na smrštění vysycháním [O18]

3.2 Vlákná

Zakomponování vláken do cementové matrice má pozitivní vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Vlákná plní dvě hlavní funkce. První funkce je zamezení tvorby trhlin, vznikající díky tahovému napětí, které vzniká od plastického smršťování v rané fázi tuhnutí betonu, dále pak mají vlákna vliv na smrštění vysycháním a na autogenní smrštění [3]. Do této skupiny vláken lze zařadit vlákna disponující vysokou jemností, dělicí se na přírodní a syntetická. Díky své jemnosti vyztužují prostředí cementového kamene velmi rovnoměrně a odolávají počátečním napětím, které vzniká při rané fázi hydratace. Zástupci těchto vláken jsou vlákna polypropylenová, polyolefinová a vlákna skleněná [11].

Zlepšení vlastností v oblasti objemových změn betonu je jedna z výhod použití vláken, ovšem mohou být vylepšeny také i další vlastnosti, jako rázová pevnost, odolnost proti abrazi nebo zlepšení protipožárních vlastností [3]. Pro tento účel slouží vlákna s dostatečnou pevností, dostatečným spolupůsobením s okolním betonem a vhodným modulem pružnosti. Vlákná spadající do této kategorie jsou vlákna ocelová a vlákna skleněná. Lze zde zařadit i vlákna uhlíková, ale z důvodů vysoké ceny nejsou oblíbená [11]. Ocelová vlákna neovlivňují smršťování betonu, pouze zpomalují lom zatvrdlého betonu a zmírňují relaxaci a dotvarování [13].

Pro prevenci vzniku trhlin, lze přidat vlákna o dávce alespoň 1 kg/m^3 a provést dokonalé rozmíchání v betonu. Polypropylenová vlákna v betonu mají hlavní přínos při snížení nebo úplným zastavení vývoje smrštění při působení synergického spolupůsobení více faktorů, kterými jsou superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, protismršťovací přísady (SRA) a již zmiňovaná polypropylenová vlákna. Superplastifikátory dovolují snížení dávky vody a cementu, při zachování stejných vlastností betonu. Tato metoda snižuje smrštění vysycháním. SRA redukuje autogenní smrštění a smrštění vysycháním, fungují na principu komplexních pochodů snižující povrchové napětí vody, a tedy i snížení kapilárního napětí. [3]

Polypropylenová vlákna nejsou doopravdy tím, co zamezí vzniku trhlin, nýbrž pouze „přemosťují“ a zastavují růst trhlin, jejichž množství je omezeno spolupůsobením superplastifikátoru a SRA. Nutno tedy konstatovat, že výše uvedené složky, nejsou sami

o sobě schopny výrazně omezit vznik trhlin vzniklé důsledkem smrštění vysycháním. V neposlední řadě je potřeba dbát na vhodné ošetřování v závislosti na typu konstrukce. [3]

3.3 Aktivní příměsi

Jak již bylo zmiňováno v kapitole o vlivu cementu na objemové změny (kap. 2.1), součástí složení cementu bývají aktivní příměsi, tvořící jejich určitou část. Jde o jemnozrné látky, velikosti menší než 0,125 mm s velkým měrným povrchem. Tyto příměsi vnikají většinou jako druhotné suroviny, ze spalování tuhých paliv v energetickém průmyslu, což se pozitivně odráží na jejich ceně. [34]

Složení těchto látek se aktivně podílí na hydrataci cementového tmelu a aktivně přispívá na vývoj pevností betonu. Při návrhu složení betonu, je nutno brát v potaz povahu těchto příměsí s ohledem na vodního součinitele. [34]

Dle způsobu reakce je rozdělujeme na latentně hydraulické látky a pucolánové látky. Reakci latentně hydraulických látek způsobují budiče. Zástupcem latentně hydraulické látky je například vysokopecní jemně mletá struska. Pucolánové látky sami o sobě nemají schopnost tuhnout a tvrdnout, tzv. nejsou latentně hydraulické. Za jejich reakci může amorfni oxid křemičitý, který je schopen reagovat s hydroxidem vápenatým za vzniku C-S-H gelu. Zástupci pucolánových látek jsou vysokopecní popílký, mikrosilika nebo například jemně mletý cihlářský stěp. [34]

3.3.1 Metakaolin

Metakaolin je vysoce reaktivní pucolán získaný výpalem kaolinů či kaolinitických jíílů při teplotách 600 až 900 °C. Má vysoký obsah oxidu křemičitého a oxidu hlinitého a obvykle se používá v betonu k dosažení vysoké pevnosti v raném věku. [29]

Literatura o vlivu metakaolinu na autogenní smršťování je rozporuplná. Brooks a Johari uvedli, že v prvních 24 hodinách se autogenní smrštění snižovalo s vyšší dávkou kaolinitu, ovšem dlouhodobé smrštění, měřené pod 24 hodin a déle, výrazně narůstá v dlouhém časovém horizontu [31]. Naopak Gleize a kol. uvádějí, že došlo k poklesu autogenního smrštění se zvyšující se dávkou kaolinitu při náhradě cementu (5 %, 10 %, 15 % a 20 %) [35]. Pokud jde o smrštění vysycháním, řada výzkumů uvádí, že došlo ke

snížení smrštění přidáním metakaolinu. To je přičítáno jeho rychlé reakci v raném věku a vyššímu procentu vody, která se spotřebuje v hydratačním procesu. Proto zde zůstává méně vody, která se může ztrácet vlivem odpařování [29].

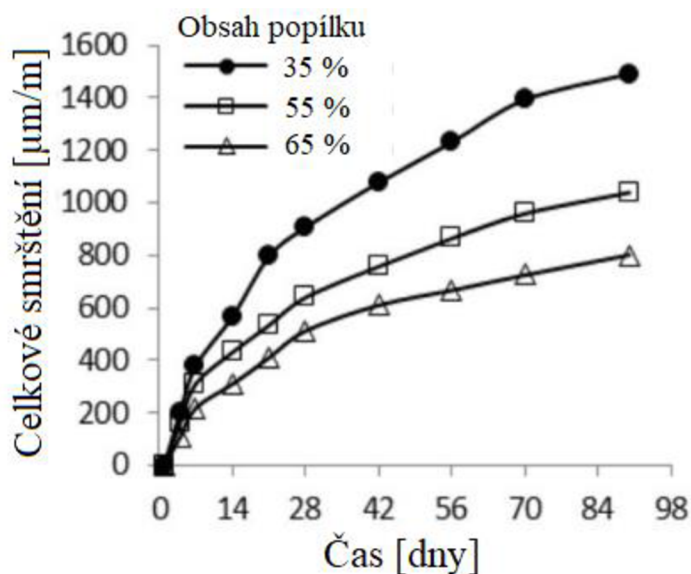
3.3.2 Vysokoteplotní elektrárenské popílky

Jemně mleté uhlí, vháněné do spalovací komory kotle, kde se při teplotách 1400 až 1600 °C spaluje. Následně je unášen spalinami a separován v odlučovačích pevných částic. Jejich chemické a mineralogické složení je značně rozdílné v závislosti na podmínkách spalování či zdroje uhlí. Černé uhlí se považuje za kvalitnější zdroj pro výrobu popílku než uhlí hnědé, jelikož popílky z černého uhlí mají podobný tvar zrna jako cement, hnědouhelné popílky jsou naopak nepravidelného tvaru. Míra reaktivity popílku závisí na obsahu oxidu křemičitého ve sklovité fázi. [34]

Vysokoteplotní popílky lze rozdělit na dva typy. Typ F, který při spalování antracitu nebo velmi kvalitního hnědého uhlí. Vykazuje vyšší obsah oxidu křemičitého a oxidu železitého a to okolo 70 %. Obsah oxidu vápenatého se pohybuje okolo 3 %, díky čemuž má pucolánové vlastnosti a k reakci potřebuje tedy aktivátor hydroxid vápenatý. Druhým typem popílku je Typ C, vzniklý spalováním mladého hnědého uhlí a ligninu. Obsah oxidu křemičitého, oxidu železitého a oxidu hlinitého se pohybuje okolo 50 %, přičemž obsah oxidu vápenatého je cca 20 %, přičemž nabývá hydraulických vlastností a nepotřebuje tedy aktivátor. [34]

Použití popílku jako náhrada části cementu snižuje vývin hydratačního tepla, čímž dojde i ke zpomalení nárůstu pevností. Literatura uvádí, že ke znatelnému nárůstu pevností dochází mezi 28 a 90 dnem. Snížení vývinu hydratačního tepla a pomalejší průběh hydratace, má za následek vyplnění vzniklých pórů a snížení jejich celkové velikosti. [34]

Autoři Kristiawan a Aditya, provedli výzkum, kde zkoumali dávku vysokoteplotních popílků na smrštění samozhutnitelných betonů. V této studii bylo zjištěno, že se zvyšující se dávkou vysokoteplotního popílku na úkor cementu, dostaneme nižší hodnoty celkového smrštění (*Obr. 3.4*). [36]



Obr. 3.4: Vliv vysokoteplotního elektrárenského popílku na celkové smrštění betonu [O19]

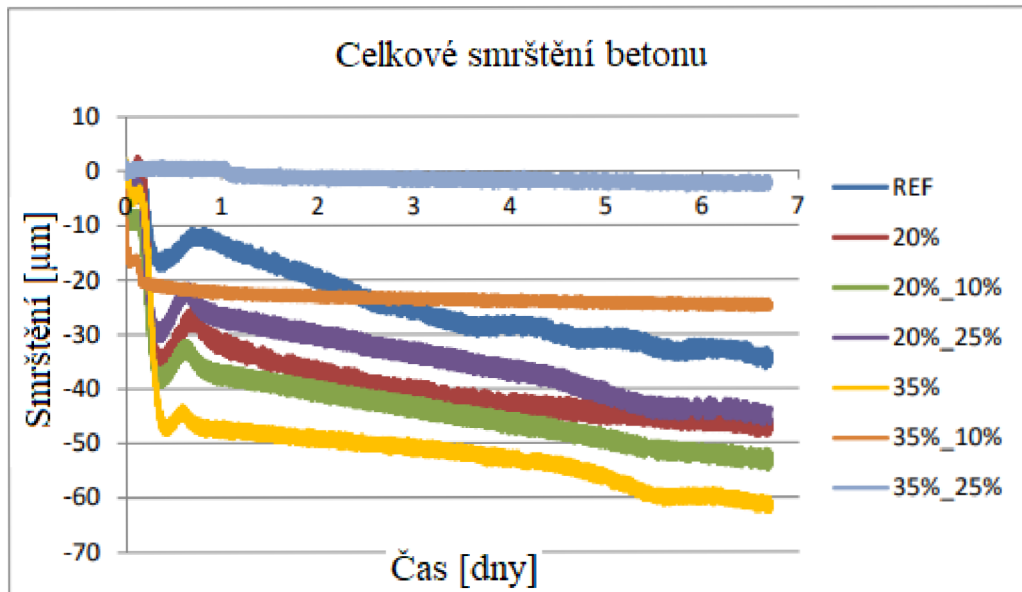
3.3.3 Nízkoteplotní fluidní popílky

Nízkoteplotní fluidní popílky vznikají při spalování o teplotách 700 až 900 °C ve fluidním loži fluidního kotle, kdy se podrcené uhlí vhání společně s vápencem. Nižší teploty spalování mají za následek vyšší obsah volného oxidu vápenatého ve formě měkce páleného vápna, jenž je reaktivní a oxidu sírového. S nízkou a nestabilní teplotou spalování také souvisejí jejich kolísavé vlastnosti odrážející se na chemickém složení. [34]

Výzkum provedený Osuskou a Helou se zabývá použitím vhodné kombinace vysokoteplotních a fluidních popílků k redukci objemových změn. Poukazují zde na předpoklad vzniku primárního etringitu a monosulfátu, právě kvůli obsahu volného vápna a síranů ve fluidním popílku. Při vzniku těchto minerálů dojde k tvorbě krystalů, jenž zabrání smršťování v plastickém stavu. U vysokoteplotního popílku se předpokládá vliv na snížení hydratačních teplot. [37]

Jak je možné vidět na obr. 3.5, vývoj celkového smrštění betonu s použitím kombinace popílků bylo značně omezené, při jejich vhodné kombinaci. Znázornění procent v levém sloupci, značí nahrazení obsahu vysokoteplotního popílku z hmotnosti cementu, pravý sloupec značí množství fluidního popílku. Výsledky měření poukazují na velmi nízké hodnoty celkového smrštění betonu při použití kombinace

35 % vysokoteplotního popílku a 25 % fluidního popílku z celkové dávky cementu. Dle jejich popisovaných vlastností lze konstatovat, že zpomalení procesu hydratace, kdy byl beton v plastickém stavu, téměř zamezí vzniku smršťovacích trhlin. [37]



Obr. 3.5: Smrštění betonu s použitím vysokoteplotního a fluidního popílku během 7 dní [O20]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. Cíl experimentální části

V rámci praktické části bakalářské práce bylo cílem navrhnout receptury betonů dvou odlišných tříd s rozdílným složením a požadovanou konzistencí, u kterých byl sledován vývoj smrštění v čase ihned po zamíchání do 60 dní a vývoj pevností v tlaku v čase 2, 7, 28 a 60 dnech.

4.1 Metodika

Byly navrženy dvě receptury betonu odlišných pevnostních tříd s maximální velikostí zrna $D_{\max}=22$ mm. Receptura I. třídy C 45/55 a receptura II. třídy C 30/37. U obou receptur byla navržena referenční receptura, od které se odvíjelo složení dalších receptur. Všechny zkušební receptury byly navrženy na sednutí kužele S4 dle normy ČSN EN 12350–2 [N2] v rozmezí 160–210 mm. Vstupními surovinami byl portlandský cement CEM I 42,5 R ze závodu Mokrá, jemné těžené kamenivo 0-4 mm z lokality Žabčice, hrubé drcené kamenivo 4-8 mm a 11-22 mm z lokality Olbramovice. Frakce kameniva jsou v receptuře I. procentuálně zastoupeny: 49 % 0-4 mm, 14 % 4–8 mm, 37 % 11-22 mm. V receptuře II: 47 % 0-4 mm, 11 % 4–8 mm, 42 % 11-22 mm. Dávka cementu byla konstantní pro každou recepturu s ohledem na třídu betonu. Obsah vody a dávka superplastifikační přísady byla zvolena dle požadované konzistence S4.

4.2 Postup práce

Pro každou požadovanou třídu, byly navrženy čtyři receptury, celkem tedy osm. Od referenční receptury se odvíjelo složení dalších experimentálních receptur, které zahrnovaly protismršťovací přísadu Sika Control-40, polypropylenová vlákna a kombinaci fluidního popílku s vysokoteplotním popílkem. Z každé zkušební receptury pro každou experimentální směs, bylo vyrobeno osm těles krychle o hraně 150×150×150 mm, pro stanovení pevností v tlaku v požadovaných časových intervalech dle ČSN EN 12390–3 [N3]. Stanovené zkoušky budou popsány dále v textu.

4.3 Vstupní suroviny

4.3.1 Cement

Pro výrobu všech receptur uvedených v této bakalářské práci, byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Českomoravský Cement, a.s. - Závod Mokrá, splňující požadavky normy ČSN EN 197-1 [N4]. Vybrané vlastnosti cementu jsou uvedeny v tab. 4.1. Zbylé vlastnosti a informace obsahuje technický list výrobce. [T4]

Tab. 4.1: Vybrané vlastnosti CEM I 42,5 R Mokrá [T4]

CEM I 42,5 R	
Vlastnost	Hodnota
Pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	30,3
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	50,3
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	59,5
Počátek tuhnutí [min]	211
Konec tuhnutí [min]	279
Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$]	410
Měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	3130

4.3.2 Kamenivo

Navržené receptury disponují celkem třemi frakcemi kameniva, a to těžené kamenivo frakce 0-4 mm z lomu PÍSEK ŽABČICE spol. s r.o., drcené kamenivo z lomu Českomoravský štěrk, a.s. Olbramovice frakce 4-8 mm a 11-22 mm. Základní informace byly převzaty z technických listů pro jednotlivé frakce kameniva a jsou uvedeny v tab. 4.2. [T1][T2][T3]

Tab. 4.2: Základní informace použitého kameniva [T1][T2][T3]

Vlastnost	Kamenivo		
Frakce, lokalita	Těžené kamenivo 0-4 Žabčice	Drcené kamenivo 4-8 Olbramovice	Drcené kamenivo 11-22 Olbramovice
Objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2560	2640	2620
Nasákavost [%]	≤ 2	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Petrografický název	Fluviální sediment	Granodiorit	Granodiorit

4.3.3 Voda

Ve všech navržených recepturách byla použita pitná voda z vodovodního řádu města Brna – Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. Voda splňuje požadavky na záměsovou vodu do betonu dle normy ČSN EN 1008 [N5]

4.3.4 Superplastifikátor

K redukci použitého množství záměsové vody, byla použita superplastifikační přísada Sika ViscoCrete-1035 CZ. Jedná se o superplastifikátor na bázi polykarboxylátů. Výrobce uvádí doporučené dávkování 0,2-1,7 % z hmotnosti cementu/pojiva. Další podrobnější informace obsahuje technický list výrobce. [T6]

4.3.5 Protismršťovací přísada

Jako přísada omezující smršťování betonu byla použita přísada Sika Control-40 společnosti SIKA CZ, s.r.o.. Z chemického hlediska se jedná o kombinaci vícesytných alkoholů, aktivně ovlivňující velikost povrchového napětí v pórovém systému betonu. Doporučené dávkování výrobce je 0,5 - 2,0 % na hmotnost cementu. Podrobnější parametry protismršťovací přísady jsou obsaženy v technickém listu výrobce. [T5]

4.3.6 Příměsi

V rámci pozorování vývoje smrštění u navržených receptur, je zde zahrnuto i použití aktivních příměsí, konkrétně jde o vysokoteplotní popílek Elektrárny Opatovice, a.s. a fluidní popílek ze závodu Teplárna Zlín s.r.o. Chemické složení fluidního popílku bylo poskytnuto Teplárnou Zlín s.r.o. a je uvedeno v tab. 4.3. Chemické složení vysokoteplotního popílku bylo zjištěno Laboratoří analytické chemie Černošice GEMATEST spol. s.r.o. a je uvedeno v tab. 4.4.

Tab. 4.3: Chemické složení fluidního popílku

Fluidní popílek	Ztráta žiháním	Sírany SO ₃	SiO ₂	CaO celkové	CaO volné	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂	CaO aktivní
Obsah [% hmot.]	2,29	8,56	21,01	30,62	8,56	0,3	0,26	11,78	10,04

Tab. 4.4: Chemické složení vysokoteplotního popílku

Vysokoteplotní popílek	Obsah [% hmotnosti]
Ztráta žháním	0,97
SiO ₂	53,49
Al ₂ O ₃	30,44
Fe ₂ O ₃	3,71
CaO celkové	4,68
CaO Volné	<0,10
Sírany SO ₃	0,01
Na ₂ O	0,3
K ₂ O	1,79
CO ₂	0,36

4.3.7 Vlákna

V rámci experimentu byla navržena receptura obsahující polypropylenová vlákna značky FIBRIBET – PPV 19 mm. Výrobce uvádí, že dávkování se pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 kg/m³ betonu.

4.4 Složení receptur

Receptura I. byla navržena s konstantní dávkou cementu pro všechny experimentální směsi. Dávka superplastifikátoru byla taktéž konstantní, a to 0,9 % z hmotnosti cementu. Byla navržena referenční směs, od které se odvíjelo složení dalších směsí v podobě drobných úprav, aby byl sledován vliv jednotlivých vstupních složek na objemové změny dané směsi. Ve směsi POPILEK V+F byla dávka cementu ze 40 % (173 kg) nahrazena kombinací popílku vysokoteplotního (30 % z celkové náhrady cementu, tj. 108 kg) a fluidního popílku (20 % z celkové náhrady cementu, tj. 65 kg). Další směsi obsahující jako jednu ze vstupní složky byly vlákna v dávce $0,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Byl také sledován vliv protismršťovací přísady na hodnoty objemových změn. Směs SRA obsahuje protismršťovací přísadu v dávce 1 % z hmotnosti cementu. Kompletní obsah všech jednotlivých složek je uvedený v tab. 4.5.

Tab. 4.5: Receptura I. betonu třídy C 45/55

Receptura I. C 45/55	Surovina [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]									
	CEM I 42,5 R	Voda	DTK 0-4 Žabčice	HDK 4-8 Olbramovice	HDK 11-22 Olbramovice	Superplastifikátor 0,9 % z m_c	SRA	Vlákna PPL	Vysokoteplotní popílek	Fluidní popílek
REF	430	175	855	250	650	3,9	0	0	0	0
POPILEK V+F	257	172	846	248	643	3,9	0	0	108	65
VLÁKNA $0,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	430	175	855	250	650	3,9	0	3,87	0	0
SRA 1 % z m_c	430	175	855	250	650	3,9	4,3	0	0	0

Receptura II. byla navržena a upravená, dle získaných poznatků a naměřených hodnot z receptury I. Proběhla zde mírná změna poměrů jednotlivých vstupních surovin pro dovršení konstantnějších výsledků požadovaných vlastností a sledovaných hodnot. Celková dávka vody byla snížena, společně s obsahem cementu. Snížená byla také dávka superplastifikátoru na hodnotu 0,8 % z hmotnosti cementu, pro dosažení požadované třídy sednutí S4. Dávka protismršťovací přísady byla navýšena na hodnotu 1,1 % z hmotnosti cementu. Kompletní obsah jednotlivých složek experimentálních směsí receptury II. jsou uvedené v tab. 4.6.

Tab. 4.6: Receptura I. betonu třídy C 30/37

Receptura II. C 30/37	Surovina [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]									
	CEM I 42,5 R	Voda	DTK 0-4 Žabčice	HDK 4-8 Olbramovice	HDK 11-22 Olbramovice	Superplastifikátor 0,8 % z m_c	SRA	Vlákna PPL	Vysokoteplotní popílek	Fluidní popílek
REF	340	165	865	210	780	2,72	0	0	0	0
POPILEK V+F	170	165	865	210	780	2,72	0	0	102	68
VLÁKNA 0,9 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	340	175	865	210	780	2,72	0	3,06	0	0
SRA 1,1 % z m_c	340	165	865	210	780	2,72	3,8	0	0	0

5. Stanovené zkoušky betonu – receptura I.

5.1 Zkoušky čerstvého betonu

Při míchání navržených receptur, byly provedeny zkoušky čerstvého betonu. Byla stanovena konzistence betonu dle zkoušky sednutí kužele v čase 5 minut dle ČSN EN 12350–2 [N2] a také objemová hmotnost v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350–6 [N6]. Stanovené zkoušky čerstvého betonu znázorňuje tab. 5.1. Uvedené hodnoty objemové hmotnosti v tab. 5.1, jsou stanovené z aritmetického průměru hodnot, získaných vážení zkušebních těles při ukládání čerstvého betonu do forem.

Dále bylo provedeno uložení čerstvého betonu pro měření smršťování betonu v průběhu jeho zrání, pomocí měřicího žlabu Shleibinger, přičemž jde o žlab rozměrů 100×60×1000 mm, který slouží pro stanovení smrštění v raném stádiu tuhnutí betonu pomocí snímače měření, který provádí záznam délkových změn [2]. Na průběh měření má vliv okolní teplota a prostředí. Ukládání čerstvého betonu do měřicího žlabu bylo provedeno v souladu s ČSN EN 12390–2 [N8]. Vodní součinitel směsi s vysokoteplotním a fluidním popílkem, byl vypočítán s ohledem na k-hodnotu dle ČSN EN 206-1 [N7]. Vyhodnocení měření objemových změn žlabovou metodou bude diskutováno v další části textu.

Tab. 5.1: Stanovené zkoušky čerstvého betonu

Receptura I.				
Druh směsi	Vodní součinitel w/c [-]	Sednutí kužele [mm]	Třída	Ø D _{čb} [kg·m ⁻³]
REF	0,40	220	S5	2390
POP V+F	0,54	220	S5	2280
VLÁKNA	0,40	160	S4	2360
SRA	0,40	220	S5	2390

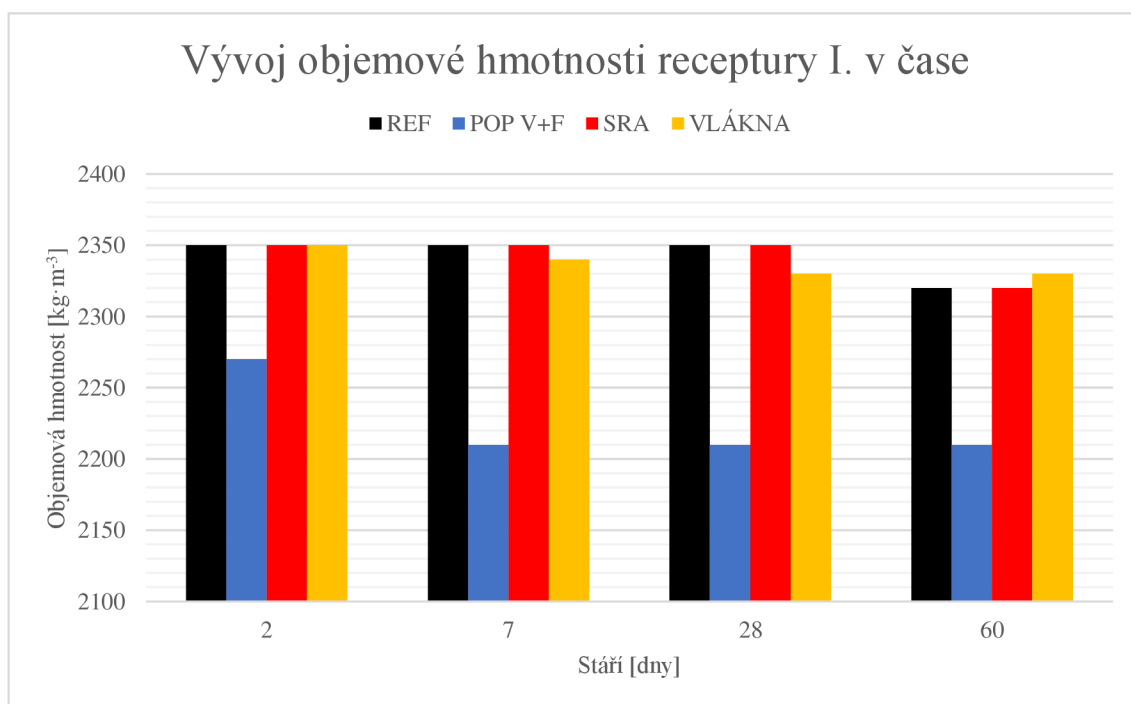
5.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

Byla stanovena objemová hmotnosti zatvrdlého betonu na zkušebních tělesech krychle o hraně 150 mm, v souladu s ČSN EN 12390–7 [N7], v časových intervalech 2, 7, 28 a 60 dní zrání, u receptury I. Stanovení probíhalo na dvou tělesech pro každou směs receptury I. Rovněž se stanovila na tělesech pevnost v tlaku po 2, 7, 28 a 60 dnech zrání,

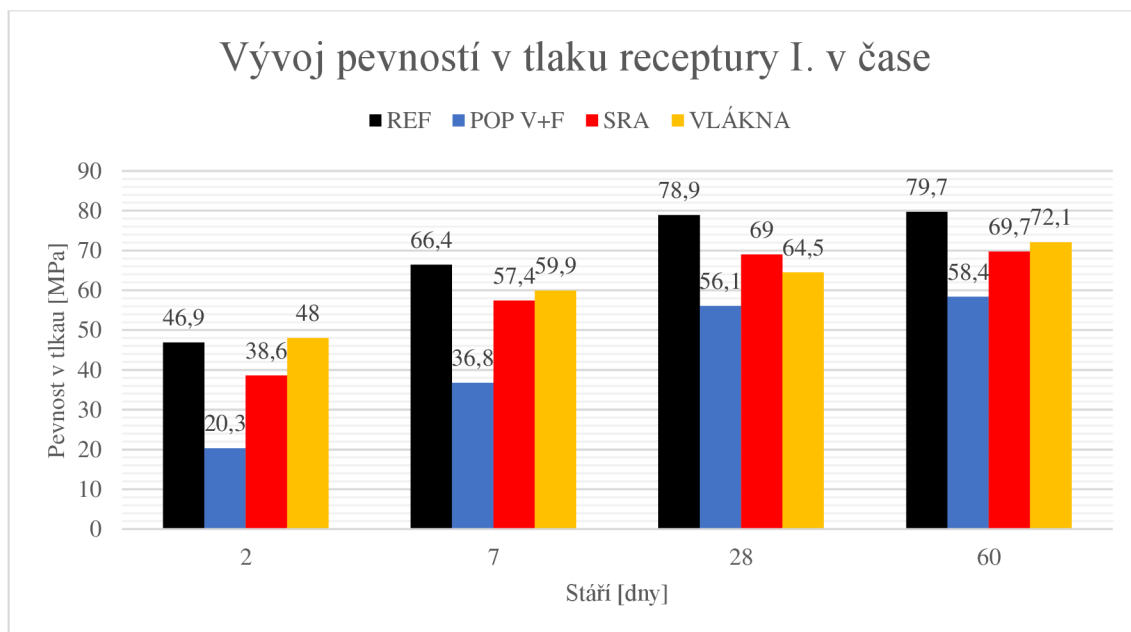
dle ČSN EN 12390-3 [N3]. Hodnoty objemových hmotností a pevností v tlaku ztvrdlého betonu jsou stanoveny z aritmetického průměru dvou zkušebních těles pro danou zkoušku v již zmíněném časovém intervalu. Výsledky provedených zkoušek na tělesech jsou uvedeny v tab. 5.2. Konkrétní hodnoty pro objemové hmotnosti ztvrdlého betonu jsou znázorněny v grafu 5.1. Hodnoty pevností v tlaku znázorňuje graf 5.2. Na ztvrdlém betonu proběhlo zároveň měření objemových změn stanovené pomocí měřicího žlabu Shleibinger. Výsledky měření budou okomentovány v samostatné kapitole.

Tab. 5.2: Stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu v časových intervalech

Receptura I.								
Druh směsi	Ø D _{ZB2} [kg·m ⁻³]	Ø fc ₂ [MPa]	Ø D _{ZB7} [kg·m ⁻³]	Ø fc ₇ [MPa]	Ø D _{ZB28} [kg·m ⁻³]	Ø fc ₂₈ [MPa]	Ø D _{ZB60} [kg·m ⁻³]	Ø fc ₆₀ [MPa]
REF	2350	46,9	2350	66,4	2350	78,9	2320	79,7
POP V+F	2270	20,3	2210	36,8	2210	56,1	2210	58,4
VLÁKNA	2350	48,0	2340	59,9	2330	64,5	2330	72,1
SRA	2350	38,6	2350	57,4	2350	69,0	2320	69,7



Graf 5.1: Vývoj objemové hmotnosti receptury I. v čase



Graf 5.2: Vývoj pevností v tlaku receptury I. v čase

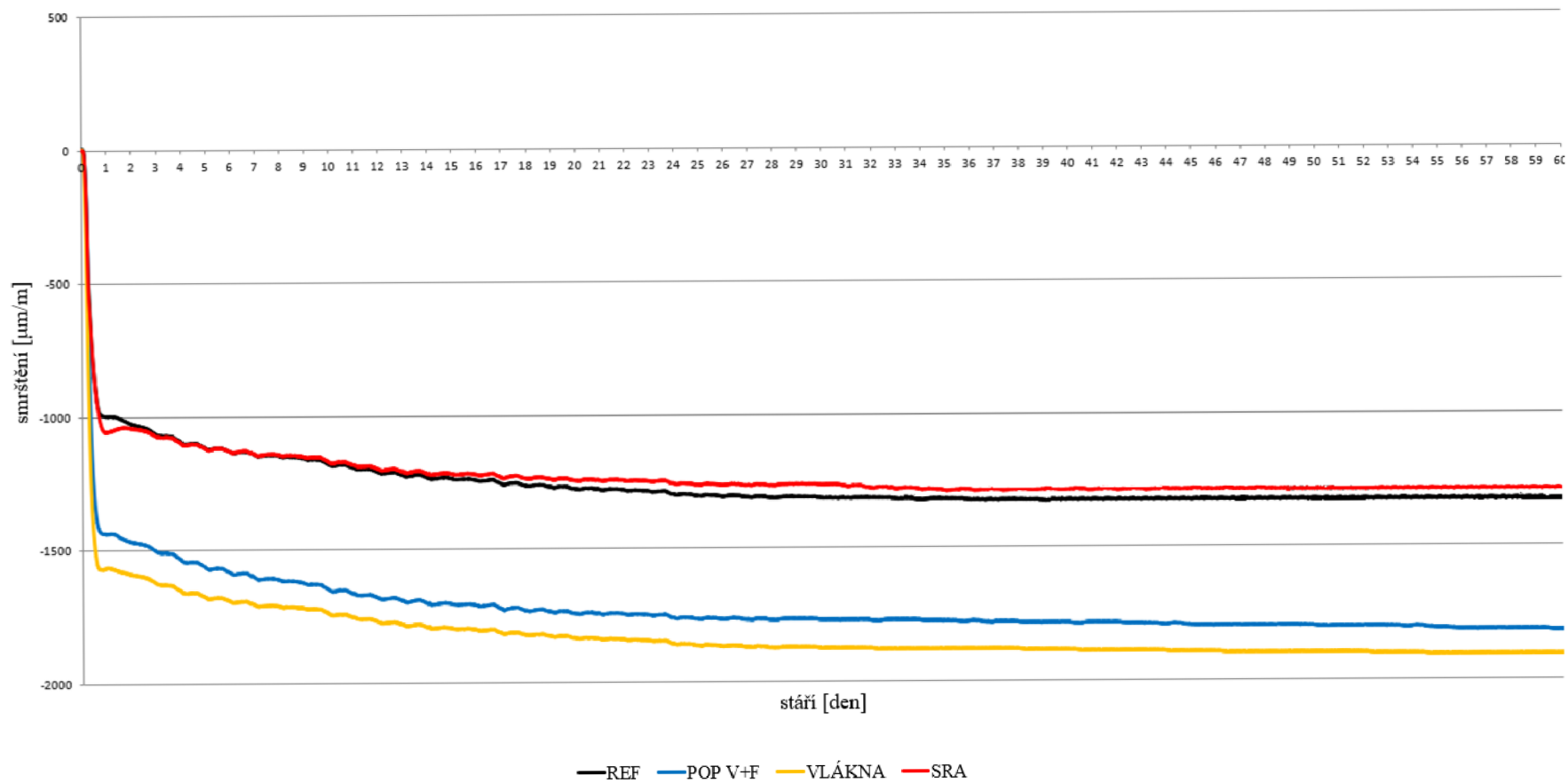
5.3 Stanovení smrštění betonu

Stanovení průběhu smrštění betonu v čase od zamíchání po 60 dní bylo provedeno pomocí měřicího žlabu Shleibinger. Následující tab. 5.3, uvádí hodnoty smrštění u jednotlivých betonových směsí v časovém období od 12 hodin po zamíchání až do 60 dne ukončení měření. Poslední sloupec tabulky poukazuje na redukci smrštění vůči referenční směsi. Kladná hodnota značí vyšší hodnotu smrštění oproti referenční směsi, a naopak záporná hodnota značí nižší smrštění, oproti referenční směsi.

Tab. 5.3: Hodnoty smrštění receptury I.

Receptura I.							
Druh směsi	Smrštění 12 hod [μm/m]	Smrštění 24 hod [μm/m]	Smrštění 2. den [μm/m]	Smrštění 7. den [μm/m]	Smrštění 28. den [μm/m]	Smrštění 60. den [μm/m]	Celková redukce smrštění po 60 dnech (vůči REF) [%]
REF	869	998	1027	1144	1313	1370	0
POP V+F	1335	1438	1469	1605	1771	1798	+31,2
VLÁKNA	1502	1565	1591	1707	1875	1908	+39,3
SRA	868	1057	1043	1142	1267	1311	-4,3

Objemové změny betonu receptury I.



Graf 5.3: Celkové smrštění betonových směsí receptury I. za 60 dní

5.4 Diskuse výsledků

V rámci provádění zkoušek čerstvého betonu receptury I. betonu C45/55 byla provedena zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [N2]. Referenční (REF) směs společně se směsí (POP V+F), která obsahovala kombinaci vysokoteplotního popílku s fluidním popílkem a směs s protismršťovací přísadou (SRA), nesplnila požadovanou konzistenci a při zkoušce sednutí kužele bylo sednutí o 10 mm větší, než požadovaná hodnota splňující rozmezí třídy S4 (160-210 mm). Směs s polypropylenovými vlákny (VLÁKNA) splnila požadovanou konzistenci a se svým sednutím kužele 160 mm, spadá do požadované třídy S4. Hodnoty sednutí kužele, disponují velkým rozptylem. Teoretické snížení dávky vody v případě směsi REF, POP V+F a SRA, způsobí splnění požadované konzistence S4 a také bude vykazovat vyšší pevnosti z důvodu snížení pórovitosti v průběhu tuhnutí a tvrdnutí betonu.

Při stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [N6], byla zjištěna objemová hmotnost čerstvého betonu. Směs obsahující kombinaci popílků (POP V+F) dosahuje nižších hodnot objemové hmotnosti, konkrétně $110 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Což je způsobeno vlastnostmi popílku a jeho nižší měrnou hmotností, oproti používanému cementu. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 [N7], poukazuje na hodnoty uvedené v grafu. Je zde vidět, že dochází k mírnému poklesu objemových hmotností v závislosti na době zrání. Tento jev poukazuje na postupný odchod vlhkosti z betonu vlivem okolního prostředí.

Receptura I. měla splňovat podmínky pro beton třídy C45/55. Výsledky měření ukazují, že třída pevnosti byla splněna. Všechny čtyři experimentální směsi dovršily pevnosti v tlaku po 28 dnech hodnot vyšších, než 55 MPa. Nadprůměrných hodnot dosáhla referenční směs, která měla pevnost v tlaku po 28 dnech 78,9 MPa. Směs popílku vysokoteplotního a fluidního naplnila tvrzení, jenž bylo konstatováno v kap. 3.3.2, že použití popílku jako náhrada části cementu, sníží vývin hydratačního tepla a tím zpomalí nárůst pevností. Tento fakt, jde vidět v grafu 5.2, kdy směs POP, nemá tak prudký nárůst pevností v krátkém časovém intervalu, ale po 28 dnech dovrší vysokých hodnot, přesně 56,1 MPa. V teoretické části v kapitole 3.1 je také popisován vliv protismršťovacích přísad na vývoj pevností betonu. Z grafu 5.2 je patrné, že protismršťovací přísada ve

směsi způsobila pokles pevností betonu, oproti referenční směsi ve stáří 28 dní o hodnotu 9,9 MPa. Beton obsahující vlákna, dovršil pevnosti značně nižší než referenční směs. Tento pokles směsi s vlákny, mohla způsobit zbytková vlhkost, která se držela na povrchu vláken, díky čemuž kompozit obsahoval celkově vyšší vlhkost na úkor snížení pevností.

Z výsledků měření smrštění pomocí měřicího žlabu Shleibinger v čase 60 dní od uložení čerstvého betonu jsou patrné tyto poznatky. Směsi s použitím vláken (vlákna) a kombinací popílku (POP V+F) vykazují nejvyšší hodnoty smrštění ze všech experimentálních směsí. Směs VLÁKNA, dosáhla o 39,3 % většího smrštění v celkovém čase 60 dní, v porovnání s referenční směsí (REF). Použití polypropylenových vláken v tomto případě nezamezilo nárůstu dlouhodobého smrštění v době 60 dní. Pro tuto problematiku by bylo vhodné provést další výzkum a podrobněji se věnovat například vlivu kombinací různých vstupních složek, které by zamezily vývoji objemových změn. Směs POP V+F bohužel v tomto experimentu neovlivnil nijak vývoj smrštění ve stáří 60 dní. Naopak zde nastal nárůst smrštění oproti referenční směsi o 31,2 %. Směs s použitím protismršťovacích přísad (SRA), pozitivně ovlivnila vývoj smrštění v čase 60 dní. Vykazovala menší hodnoty smrštění oproti referenční směsi o 4,3 %. Z těchto zjištěných výsledků je nutno konstatovat, že navržené postupy neovlivnily ve značné míře hodnoty smrštění v pozitivním slova smyslu. K vysoké hodnotě smrštění všech experimentálních směsí receptury I. mohla být také způsobena vyšším obsahem vody, která při odchodu z betonu způsobila značné smrštění vysycháním.

6. Stanovené zkoušky betonu – receptura II.

6.1 Zkoušky čerstvého betonu

Na receptuře II. byly provedeny zkoušky čerstvého betonu dle ČSN EN 12350–2 [N2], tj. zkouška sednutí kužele v čase 5 minut. Dále byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350–6 [N6]. Výsledné hodnoty zkoušek jsou znázorněné v tab. 6.1. Vodní součinitel směsi s vysokoteplotním a fluidním popílkem, byl vypočítán s ohledem na k-hodnotu dle ČSN EN 206-1 [N1]. Uvedené hodnoty objemové hmotnosti byly stanoveny z aritmetického průměru hmotností těles při ukládání čerstvého betonu do forem.

Tab. 6.1: Stanovené zkoušky čerstvého betonu

Receptura II.				
Druh směsi	Vodní součinitel w/c [-]	Sednutí kužele [mm]	Třída	Ø D _{čB} [kg·m ⁻³]
REF	0,49	200	S4	2360
POP V+F	0,69	160	S4	2280
VLÁKNA	0,51	190	S4	2350
SRA	0,49	190	S4	2360

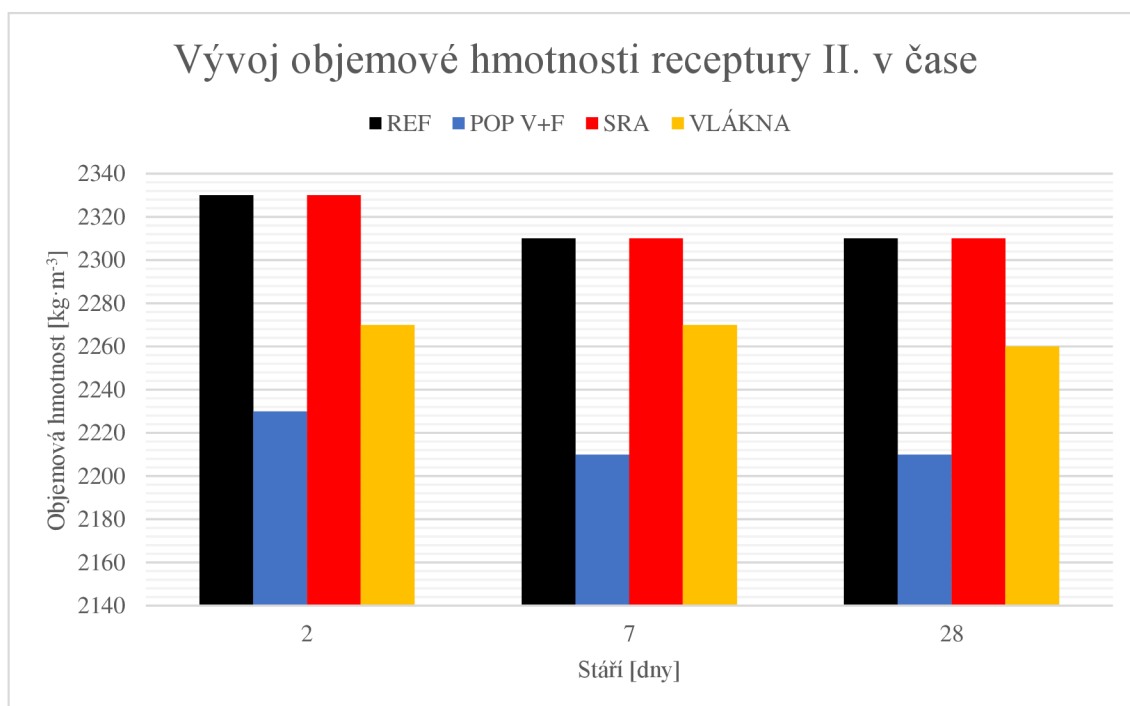
Dále byl čerstvý beton uložený do měřicího žlabu Shleibinger, pro měření smršťování betonu v průběhu jeho zrání. Uložení čerstvého betonu do zkušebního přístroje bylo proveden v souladu s ČSN EN 12390–2 [N8]. Diskuse výsledků měření smrštění bude v další části textu.

6.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

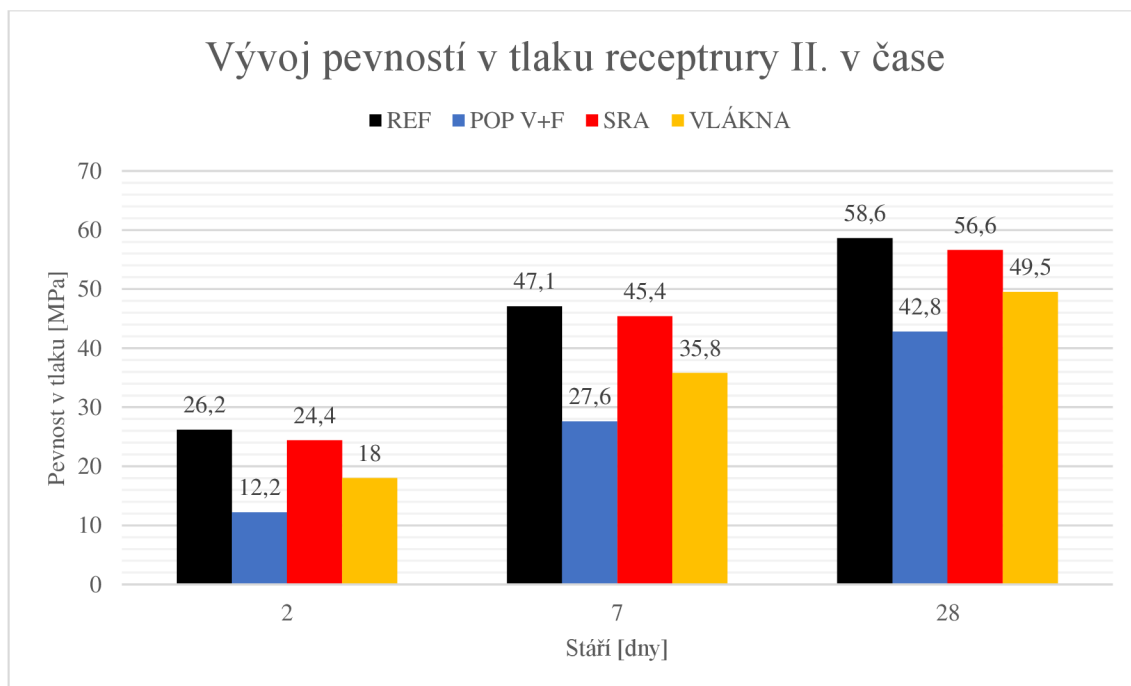
Proběhlo stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu na krychlích o hraně 150 mm, v souladu s ČSN EN 12390–7 [N7] a byly zjišťovány pevnosti v tlaku v intervalech 2, 7 a 28 dní, dle ČSN EN 12390–3 [N3]. Získané výsledné hodnoty zkoušek jsou uvedené v tab. 6.2, hodnoty byly stanoveny z aritmetického průměru zjištěných charakteristik dvou zkušebních těles pro každou betonovou směs. Grafické znázornění a porovnání výsledných hodnot vývoje objemových hmotností v časových intervalech, je uvedeno v grafu 6.1. a vývoje pevností v tlaku znázorňuje graf 6.2.

Tab. 6.2: Stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku zatvrdělého betonu v časových intervalech

Receptura II.						
Druh směsi	$\emptyset D_{ZB2}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset fc_2$ [MPa]	$\emptyset D_{ZB7}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset fc_7$ [MPa]	$\emptyset D_{ZB28}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset fc_{28}$ [MPa]
REF	2330	26,2	2310	47,1	2310	58,6
POP V+F	2230	12,2	2210	27,6	2210	42,8
VLÁKNA	2270	18,0	2270	35,8	2260	49,5
SRA	2330	24,4	2310	45,4	2310	56,6



Graf 6.1: Vývoj objemové hmotnosti receptury II. v čase



Graf 6.2: Vývoj pevnosti v tlaku receptury II. v čase

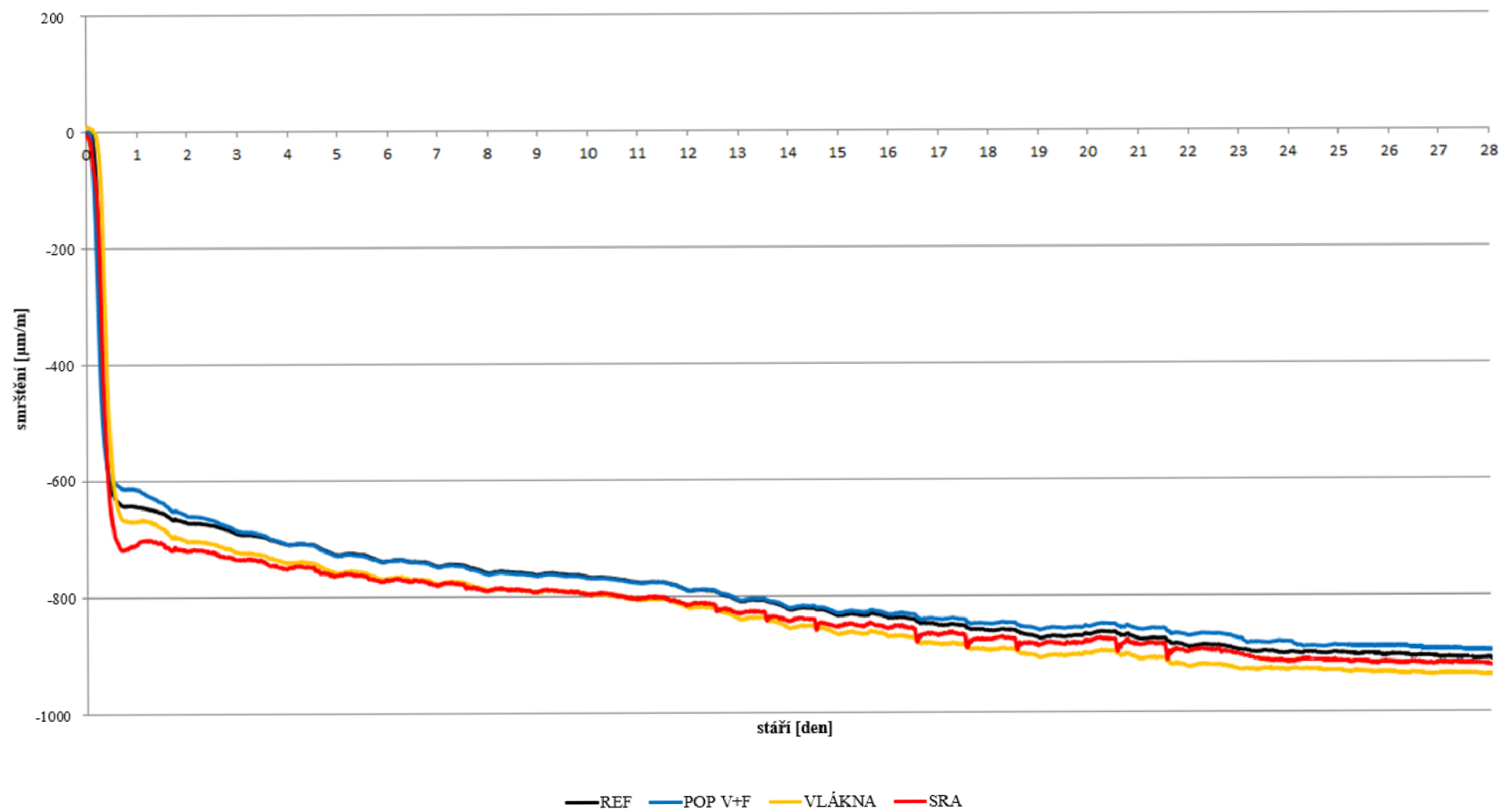
6.3 Stanovení smrštění betonu

Sledování průběhu smrštění v závislosti na různém složení receptury II. proběhlo v čase 28 dní pomocí měřícího žlabu Shleibinger. Průběh a velikost smrštění je znázorněno na graf 6.3. Následující tab. 6.3, zobrazuje záznam hodnot smrštění od 12 hodin po uložení čerstvého betonu v jednotlivých vybraných intervalech, až po dobu 28 dní. V posledním sloupci tabulky jsou uvedeny hodnoty smrštění v porovnání s referenční směsí. Kladná hodnota značí vyšší hodnotu smrštění oproti referenční směsi, a naopak záporná hodnota značí nižší smrštění, oproti referenční směsi.

Tab. 6.3: Hodnoty smrštění receptury I.

Receptura II.						
Druh směsi	Smrštění 12 hod [μm/m]	Smrštění 24 hod [μm/m]	Smrštění 2. den [μm/m]	Smrštění 7. den [μm/m]	Smrštění 28. den [μm/m]	Celková redukce smrštění po 28 dnech (vůči REF) [%]
REF	620	643	670	747	911	0
POP V+F	598	614	660	748	886	-25
VLÁKNA	592	668	702	776	939	+28
SRA	676	708	718	780	925	+14

Objemové změny betonu receptury II.



Graf 6.3: Celkové smrštění betonových směsí receptury II. za 28 dní

6.4 Diskuse výsledků

V rámci zkoušek čerstvého betonu na receptuře II. betonu třídy C30/37, byla provedena zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [N2]. Všechny experimentální směsi receptury II. dosáhly požadované třídy S4. Při zkoušení směsi POP V+F bylo dosaženo nižší konzistence ve srovnání s ostatními směsi. Tento jev může být připisován částečné absorpce vody zrnny popílku při míchání této směsi.

Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [N6], ukázalo jistý pokles objemové hmotnosti směsi POP V+F, jako tomu bylo u receptury I. Měrná hmotnost popílku je řádově nižší než měrná hmotnost cementu, proto zde nastane pokles objemové hmotnosti čerstvého betonu. Hodnoty uvedené v grafu 6.1 opět poukazují na trend, klesajících objemových hmotností ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 [N7]. Dochází zde k poklesu objemových hmotností v závislosti na době zrání. Dochází zde k postupnému odchodu vlhkosti z betonu do okolního prostředí.

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu na krychlích o hraně 150 mm, v souladu s ČSN EN 12390-7 [N7] proběhlo v intervalech 2, 7, 28. Opět zde dochází k podobným jevům, jako tomu bylo v případě receptury I. Největší pevnosti v tlaku vykazuje směs REF a to 58,6 MPa ve stáří 28 dní. U směsi POP V+F je opět vidět postupný nárůst pevností, kdy jeho pevnost po dvou dnech byla 12,2 MPa a postupně narůstala až do 28 denní pevnosti 42,8 MPa. Směs SRA, opět vykazuje popisovaný trend v předchozích kapitolách a je zde patrný pokles pevností, ve srovnání s referenční směsí. Směs SRA dosáhla po 28 dnech pevnost 56,6 MPa. Pevnosti v tlaku směsi s vlákny dosahovaly po 28 dnech hodnoty 49,5 MPa. S ohledem na výsledné pevnosti lze konstatovat, že každá směs receptury II. dosáhla požadovaných pevností a splnila pevnostní třídu betonu C 30/37.

Při stanovení smrštění betonu došlo k výraznému snížení smrštění v čase 28 dnů od uložení betonu do měřicího žlabu. Lze říci, že částečně za to může i výrazně menší množství použitého cementu oproti receptuře I. Jak je možné vidět v grafu 6.3, největší smrštění opět vykazuje směs (VLÁKNA) s obsahem polypropylenových vláken. V porovnání s referenční směsí, bylo smrštění v době 28 dní o celých 28 % větší. Zde opět nutno konstatovat, že pokud mají vlákna zamezit celkovému smrštění, bude potřeba

vložit energii do dalšího experimentu, aby bylo dosaženo účinného složení vláknobetonu. Směs SRA v této části experimentu dosáhla vyšších hodnot smrštění, celkem 14 %, ve srovnání s referenční směsí. Přičemž tento nárůst smrštění mohl být způsobený nepatrným zvýšením dávky protismršťovací přísady oproti receptuře I. Jak bylo popisováno v kap. 3.1. zvýšení dávky protismršťovací přísady neznamena vždy lepší účinek, proto je potřeba zajistit optimální dávkování pro nejlepší účinek přísady. V této části experimentu nejlépe obstála směs POP V+F, na rozdíl od předchozího experimentu, kdy vykazovala jedny z nejhorších výsledků. Kombinace popílků se v tomhle případě osvědčila a lze říci, že nástup nižšího vývinu hydratačního tepla a postupný nárůst pevností způsobil menší nástup smrštění v prvních dnech, což je patrné z grafu 6.3. Jak zmiňuje literatura [37], lze předpokládat, že zde došlo ke tvorbě novotvarů vlivem kombinace popílku, jenž vznikají v plastické fázi betonu.

7. Závěr

Bakalářská práce se zabývala možnostmi redukce smršťování betonu a vývojem receptur betonu, které by měly pozitivní vliv na smršťování betonu.

Teoretickou část tvořila rešerše pojednávající o problematice objemových změn betonu, kde byla popsána problematika vzniku objemových změn v různých fázích tuhnutí a tvrdnutí betonu, Následně byly popsány typy smrštění, jejich principy vzniku a průběh. Dále byla věnována pozornost vlivu různým druhům cementů, kameniva, vodního součinitele na jednotlivé objemové změny. Pro jejich vhodnou redukci byl popsán také vliv ošetřování betonu a vliv okolních podmínek. V samostatné kapitole byly popisovány vybrané vstupní složky betonu, které svými vlastnostmi napomáhají k redukci objemových změn betonu. Jejich následný vliv na smršťování je součástí experimentální části práce.

V experimentální části práce bylo zkoumáno rozdílné složení betonových receptur s použitím poznatků zmíněných v teoretické části. Byly vytvořeny dvě receptury betonu tříd C30/37 a C45/55. Na základě referenční směsi byly vytvořeny další směsi s použitím minerálních příměsí, protismršťovacích přísad a zakomponování vláken do cementové matrice. Následně byl pozorován jejich vývoj pevností, objemová hmotnost a smrštění.

Na základě výsledků měření a provedených zkoušek, lze konstatovat, že při použití protismršťovací přísady v receptuře I. a receptuře II., byl znatelný pokles pevností, ve srovnání s referenčními recepturami jednotlivých tříd betonů C 45/55 a C 30/37, jak již bylo zmíněno v teoretické části práce. Z dlouhodobého hlediska tento experiment nepotvrdil účinnost protismršťovací přísady SikaControl-40, jelikož v receptuře II. smrštění betonu nebylo výrazně ovlivněno při použití přísady. Při srovnání receptur s použitím polypropylenových vláken, nedošlo v ani jednom případě k výrazné redukci objemových změn v delším časovém horizontu. Taktéž použití kombinace fluidního a vysokoteplotního popílku v experimentu je diskutabilní. U receptury betonu třídy C 45/55, kde byl vyšší obsah cementu než u betonu třídy C 30/37, tj. receptura II., nebyl ověřen jeho pozitivní vliv na objemové změny. Pro zajištění optimálních hodnot z dlouhodobého hlediska, by bylo vhodné použít kombinaci jednotlivých složek betonu a sledovat jejich účinek, pro dosažení co nejlepších výsledků v oblasti objemových změn.

8. Bibliografie

Použitá literatura

- [1] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 8080760322.
- [2] NOVÁČEK, Jaroslav. *Studium objemových změn pojivových silikátových směsí*. Vysoké učení technické v Brně, 2013. Disertační práce. Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] ŠMERDA, Zdeněk a Vladimír KŘÍSTEK. *Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Odborné publikace pro projektanty a statiky.
- [5] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [6] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Petr DANĚK, Dalibor KOCÁB a Petr MISÁK. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2017(2017), 1-11 [cit. 2022-04-16]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2017/3027301
- [7] HOLT, Erika Elaine. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. ProQuest Dissertations Publishing, 2001. ISBN 978-0-493-24348-1.
- [8] ZHANG, Lifeng, Xiaoqian QIAN, Junying LAI, Kuangliang QIAN a Minghui FANG. Effect of different wind speeds and sealed curing time on early-age shrinkage of cement paste. *Construction & building materials* [online]. Elsevier Ltd, 2020, 255, 119366 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119366
- [9] BROOKS, jeffrey. *Concrete and masonry movements*. I. Title. Amsterdam: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-801525-4.
- [10] ALMUSALLAM, A.A, M MASLEHUDDIN, M ABDUL-WARIS a M.M KHAN. Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. *Construction & building materials* [online]. Elsevier Ltd, 1998, 12(6), 353-358 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/S0950-0618(98)00019-1
- [11] HELA, Rudolf. *Technologie betonu II: Modul M 01*. BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2007.

- [12] TAZAWA, Ei-ichi, Shingo MIYAZAWA a Tetsuro KASAI. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cement and concrete research* [online]. Elsevier Ltd, 1995, **25**(2), 288-292 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(95)00011-9
- [13] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [14] TANG, Shengwen, Desheng HUANG a Zhen HE. A review of autogenous shrinkage models of concrete. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2021, **44**, 103412 [cit. 2022-04-22]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2021.103412
- [15] AİTCİN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 8086769399.
- [16] YE, Hailong, Aleksandra RADLIŃSKA a Juliana NEVES. Drying and carbonation shrinkage of cement paste containing alkalis. *Materials and structures* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017, **50**(2), 1-13 [cit. 2022-05-01]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-017-1006-x
- [17] Karbonatace betonu. In: *EBeton* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/karbonatace-betonu/>
- [18] HOUST, Y. F. *Carbonation Shrinkage of Hydrated Cement Paste* [online]. CANMET, Ottawa, Canada, 1997, 481-491 s. [cit. 1.5.2022]. Dostupné z: <https://infoscience.epfl.ch/record/29449>
- [19] KOVLER, Konstantin a Semion ZHUTOVSKY. Overview and Future Trends of Shrinkage Research. *Materials and structures* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006, **39**(9), 827-847 [cit. 2022-05-02]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-006-9114-z
- [20] DRBUŠKOVÁ, Magdaléna. *Numerické simulace objemových změn vybraných cementových kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
- [21] YODSUDJAI, Wanchai a Kejin WANG. Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements. *Construction & building materials* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **40**, 854-862 [cit. 2022-05-09]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.053
- [22] WANG, Xuhao a Taylor PETER. *Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA): Factors Influencing Drying Shrinkage*. [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272090559_Concrete_Pavement_Mixture_Design_and_Analysis_MDA_Factors_Influencing_Drying_Shrinkage/citation

- [23] SHARMA, Achintyamugdha, Todd SIROTIK, Xuhao WANG, Peter TAYLOR, Prokshit ANGADI a Scott PAYNE. Portland limestone cement for reduced shrinkage and enhanced durability of concrete. *Magazine of concrete research* [online]. London: ICE Publishing, 2021, **73**(3), 147-162 [cit. 2022-05-09]. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/jmacr.19.00165
- [24] Měrný povrch cementu. In: *EBeton* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/merny-povrch-cementu/>
- [25] GHOURCHIAN, Sadegh, Mateusz WYRZYKOWSKI, Luis BAQUERIZO a Pietro LURA. Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking. *Cement & concrete composites* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **85**, 44-55 [cit. 2022-05-09]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.10.002
- [26] WALTER, Martin. *Vlastnosti portlandských cementů s ohledem na ekonomickou a ekologickou efektivitu výroby* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/29854>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
- [27] ŤAŽKÝ, Martin, Lenka BODNÁROVÁ, Lucia ŤAŽKÁ, Rudolf HELA, Milan MERUŇKA a Petr HLAVÁČEK. The Effect of the Composition of a Concrete Mixture on Its Volume Changes. *Materials* [online]. Switzerland: MDPI AG, 2021, **14**(4), 828 [cit. 2022-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040828
- [28] AÏTCIN, Pierre-claude. The Hidden Meaning of Water-Cement Ratio. *Concrete international* [online]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008, 51 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0162-4075. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234838616_The_Hidden_Meaning_of_Water-Cement_Ratio
- [29] ZAYED, Abla, Natalia SHANAHAN, Victor TRAN, Markandeya ANANYA, Williams ANDREW a Elnihum AHMED. *Effects of chemical and mineral admixtures on performance of Florida structural concrete* [online]. University of South Florida. Dept. of Civil and Environmental Engineering [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/30987>
- [30] ANNE, BALOGH. *New Admixture Combats Concrete Shrinkage* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/new-admixture-combats-concrete-shrinkage_o
- [31] BROOKS, J.J, M.A MEGAT JOHARI a M MAZLOOM. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cement & concrete composites* [online]. Elsevier Ltd, 2000, **22**(4), 293-301 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(00)00025-1
- [32] SALIBA, J, E ROZIÈRE, F GRONDIN a A LOUKILI. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. *Cement & concrete*

- composites* [online]. Elsevier Ltd, 2011, **33**(2), 209-217 [cit. 2022-05-13]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.006
- [33] ANSHUANG, Su, Qin LING, Zhang SHOUJIE, Zhang JIAYANG a Li ZHAOYU. Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Admixture on the Volume Deformation of Ultrahigh Performance Concrete. *Advances in materials science and engineering* [online]. New York: Hindawi, 2017, **2017**, 1-7 [cit. 2022-05-13]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2017/6384859
- [34] HELA, Rudolf. PŘÍMĚSI DO BETONU. *Beton* [online]. **86**(20152) [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2015-2-04.pdf>
- [35] GLEIZE, Philippe J.P, Martin CYR a Gilles ESCADEILLAS. Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. *Cement & concrete composites* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2007, **29**(2), 80-87 [cit. 2022-05-13]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.09.005
- [36] KRISTIAWAN, Stefanus A a M. Taib M ADITYA. Effect of High Volume Fly Ash on Shrinkage of Self-compacting Concrete. *Procedia engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2015, **125**, 705-712 [cit. 2022-05-14]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.11.110
- [37] HELA, Rudolf a Lucia OSUSKÁ. Use of Fluidized Bed Combustion Fly Ash as Addition Reducing Shrinkage of Concrete. *Materials Science Forum* [online]. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2016, **865**, 141-144 [cit. 2022-05-14]. ISBN 3038357405. ISSN 0255-5476. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.865.141

Použité normy

- [N1] ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ, 2017
- [N2] ČSN EN 12 350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N3] ČSN EN 12 390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N4] ČSN EN 197-1 ed. 2. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [N5] 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: ÚNMZ, 2003
- [N6] ČSN EN 12350–6 Zkoušení čerstvého betonu – část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N7] ČSN EN 12390–7 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2012
- [N8] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009

Zdroje použitých obrázků

- [O1] HOLT, Erika Elaine. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. ProQuest Dissertations Publishing, 2001. ISBN 978-0-493-24348-1.
- [O2] HOLT, Erika Elaine. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. ProQuest Dissertations Publishing, 2001. ISBN 978-0-493-24348-1.
- [O3] HOLT, Erika Elaine. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. ProQuest Dissertations Publishing, 2001. ISBN 978-0-493-24348-1.
- [O4] HOLT, Erika Elaine. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. ProQuest Dissertations Publishing, 2001. ISBN 978-0-493-24348-1.
- [O5] HELA, Rudolf. *Technologie betonu II: Modul M 01*. BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2007.
- [O6] BROOKS, jeffrey. *Concrete and masonry movements*. I. Title. Amsterdam: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-801525-4.
- [O7] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [O8] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [O9] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [O10] TAZAWA, Ei-ichi, Shingo MIYAZAWA a Tetsuro KASAI. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cement and concrete research* [online]. Elsevier Ltd, 1995, **25**(2), 288-292 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(95)00011-9
- [O11] YODSUDJAI, Wanchai a Kejin WANG. Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements. *Construction & building materials* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **40**, 854-862 [cit. 2022-05-09]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.053
- [O12] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [O13] AiTCIN, Pierre-claude. The Hidden Meaning of Water-Cement Ratio. *Concrete international* [online]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008, 51 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0162-4075. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234838616_The_Hidden_Meaning_of_Water-Cement_Ratio
- [O14] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.

- [O15] KOSMATKA, Steven H, Beatrix KERKHOFF a William C PANARESE. *Design and control of concrete mixtures*. 14th ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2002, x, 358 s. : il. ISBN 0-89312-217-3.
- [O16] SALIBA, J, E ROZIÈRE, F GRONDIN a A LOUKILI. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. *Cement & concrete composites* [online]. Elsevier Ltd, 2011, **33**(2), 209-217 [cit. 2022-05-13]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.006
- [O17] ANSHUANG, Su, Qin LING, Zhang SHOUJIE, Zhang JIAYANG a Li ZHAOYU. Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Admixture on the Volume Deformation of Ultrahigh Performance Concrete. *Advances in materials science and engineering* [online]. New York: Hindawi, 2017, **2017**, 1-7 [cit. 2022-05-13]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2017/6384859
- [O18] ANSHUANG, Su, Qin LING, Zhang SHOUJIE, Zhang JIAYANG a Li ZHAOYU. Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Admixture on the Volume Deformation of Ultrahigh Performance Concrete. *Advances in materials science and engineering* [online]. New York: Hindawi, 2017, **2017**, 1-7 [cit. 2022-05-13]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2017/6384859
- [O19] KRISTIAWAN, Stefanus A a M. Taib M ADITYA. Effect of High Volume Fly Ash on Shrinkage of Self-compacting Concrete. *Procedia engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2015, **125**, 705-712 [cit. 2022-05-14]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.11.110
- [O20] HELA, Rudolf a Lucia OSUSKÁ. Use of Fluidized Bed Combustion Fly Ash as Addition Reducing Shrinkage of Concrete. *Materials Science Forum* [online]. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2016, **865**, 141-144 [cit. 2022-05-14]. ISBN 3038357405. ISSN 0255-5476. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.865.141

Seznam grafů

Graf 5.1: Vývoj objemové hmotnosti receptury I. v čase	53
Graf 5.2: Vývoj pevností v tlaku receptury I. v čase	54
Graf 5.3: Celkové smrštění betonových směsí receptury I. za 60 dní	55
Graf 6.1: Vývoj objemové hmotnosti receptury II. v čase	59
Graf 6.2: Vývoj pevnosti v tlaku receptury II. v čase	60
Graf 6.3: Celkové smrštění betonových směsí receptury II. za 28 dní.....	62

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Specifické hydratační teplo hlavních minerálů portlandského cementu. [19]	23
Tab. 4.1: Vybrané vlastnosti CEM I 42,5 R Mokrý [T4]	47
Tab. 4.2: Základní informace použitého kameniva [T1, T2, T3]	47
Tab. 4.3: Chemické složení fluidního popílku	48
Tab. 4.4: Chemické složení vysokoteplotního popílku	49
Tab. 4.5: Receptura I. betonu třídy C 45/55	50
Tab. 4.6: Receptura I. betonu třídy C 30/37	51
Tab. 5.1: Stanovené zkoušky čerstvého betonu	52

Tab. 5.2: Stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku zatvrdlého betonu v časových intervalech...	53
Tab. 5.3: Hodnoty smrštění receptury I.	54
Tab. 6.1: Stanovené zkoušky čerstvého betonu	58
Tab. 6.2: Stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku zatvrdlého betonu v časových intervalech...	59
Tab. 6.3: Hodnoty smrštění receptury I.	61

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Fáze objemových změn. [O1].....	13
Obr. 1.2: Fáze smrštění v raném věku, přechod tuhnutí a tvrdnutí do tuhé fáze. [O2]	13
Obr. 1.3: Konec rané fáze vysychání smršťování v důsledku tvrdnutí betonu. [O3]	14
Obr. 1.4: Křivky rtuťové porozimetry pro pastu portlandského cementu, zobrazující průměry pórů a jejich objem. [O4]	15
Obr. 1.5: Princip plastického smršťování. [O5]	16
Obr. 1.6: Smrštění cementové pasty, malty a betonu. [O6]	17
Obr. 1.7: Chemické smrštění cementové pasty. [O7]	19
Obr. 1.8: Vzájemné vztahy chemického a autogenního smrštění. [O8]	20
Obr. 2.1: Relativní reaktivita slínekových minerálů [O9]	27
Obr. 2.2: Závislost autogenního smrštění na jemnosti mletí cementu [O10]	28
Obr. 2.3: chemické smrštění v různých časových intervalech. [O11].....	29
Obr. 2.4: Srovnání Smrštění od vysychání v jednoročním intervalu vybraných kameniv. [O12]	30
Obr. 2.5: Snímek (200 μm x 200 μm) znázorňující různé vodní součinitele na obsah pórů v betonu. [O13]	32
Obr. 2.6: Vliv okolních podmínek na rychlost odpařování. [O14].	34
Obr. 2.7: Vliv doby zrání v různých prostředí na nárůst pevnosti betonu [O15]	36
Obr. 3.1: Srovnání pevnosti v tlaku v závislosti na použité dávce SRA [O16]	39
Obr. 3.2: Vliv dávky SRA na autogenní smrštění [O17]	40
Obr. 3.3: Vliv dávky SRA na smrštění vysycháním [O18].....	40
Obr. 3.4: Vliv vysokoteplotního elektrárenského popílku na celkové smrštění betonu [O19]	44
Obr. 3.5: Smrštění betonu s použitím vysokoteplotního a fluidního popílku během 7 dní [O20]	45

Seznam příloh

- [T1] ZEPIKO GROUP. PÍSEK Žabčice CE 0-4 neprané_EN 12620_EN 13242: Pískovna Žabčice [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <http://www.zepiko.cz/certifikace>
- [T2] HEIDELBERGCEMENT GROUP CZECH REPUBLIC. Dokumenty ke stažení: Prohlášení o vlastnostech DK Olbramovice 4/8 [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni>
- [T3] HEIDELBERGCEMENT GROUP CZECH REPUBLIC. Dokumenty ke stažení: Prohlášení o vlastnostech DK Olbramovice 11/22[online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni>
- [T4] CEM I 42,5 R, Mokrý – technický list, Českomoravský cement a.s., závod Mokrý
- [T5] Sika Control 40 – produktový list, SIKAZ, s.r.o.
- [T6] Sika ViscoCrete - 1035 CZ – produktový list, SIKAZ, s.r.o.

[T4]

CEM I 42,5 R Portlandský cement EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list
duben 2022



Charakteristické vlastnosti:

- rychlý nárůst pevnosti
- vysoká počáteční pevnost
- vysoká konečná pevnost
- rychlý vývin hydratačního tepla
- vyšší celkové hydratační teplo

Použití:

- betony běžných a vyšších pevnostních tříd
- betony s rychlým nárůstem pevnosti
- předpínané betony
- suché omítkové směsi a malty
- betonové zboží

Český cement:

- Symbol v národních barvách odkazuje na český původ zboží a českou identitu.
- Značka reprezentuje nový přístup, pokrok a úspěchy českého cementářského průmyslu.



Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků, respekt k životnímu prostředí, důraz na bezpečnost zaměstnanců a hospodárné využívání energetických zdrojů patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN ISO 45001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001
- Management hospodaření s energií ČSN EN ISO 50001



Způsob dodání:

- volně ložený v autocisternách nebo železničních vagonch Raj
- balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na vratných paletách o celkové hmotnosti 1,4 t

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95–100 %
Doplňující složka		0–5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

[T4]

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list

duben 2022

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti		
Parametr		Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16,5	EN 196-1	Obsah SO ₃ [%]	3,01*	EN 196-2
	2 dny	30,3*	EN 196-1	Obsah Cl ⁻ [%]	0,062*	EN 196-2
	7 dní	50,3	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]	0,68*	EN 196-2
	28 dní	59,5*	EN 196-1	Nerozpustný zbytek [%]	0,77*	EN 196-2
	56 dní	65,6	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,29*	EN 196-2
	90 dní	67,8	EN 196-1			
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4,2	EN 196-1	*Průměrné hodnoty získané z měsíčních statistických dat za rok 2021		
	2 dny	6,2*	EN 196-1	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr ⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).		
	7 dní	8,1	EN 196-1			
	28 dní	9,0*	EN 196-1			
	56 dní	9,6	EN 196-1			
	90 dní	9,7	EN 196-1			
Normální konzistence [%]		27,2*	EN 196-3			
Počátek tuhnutí [min]		211*	EN 196-3			
Konec tuhnutí [min]		276*	EN 196-3			
Objemová stálost [mm]		0,7*	EN 196-3, Le Chatelier			
Měrný povrch [m ² kg ⁻¹]		410*	EN 196-6, Blaine			
Měrná hmotnost [kg m ⁻³]		3130	EN 196-6			
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v autocisterně		1070	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.			
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v síle		1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.			
Hydratační teplo [J.g ⁻¹]	7 dní	326	EN 196-11			

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404

Bez rizika	Koroze způsobená karbonáty				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
X0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO₄²⁻ vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO₄²⁻ - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou puclánové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT
HEIDELBERGCEMENT Group

[T5]

STAVÍME NA DŮVĚŘE



PRODUKTOVÝ LIST

SikaControl®-40

PŘÍSDA DO BETONU REDUKUJÍCÍ SMRŠTĚNÍ

POPIS PRODUKTU

SikaControl®-40 je tekutá přísada redukující smrštění betonů a malt. Minimalizuje smrštění během procesu tuhnutí a vysychání.

POUŽITÍ

SikaControl®-40 se používá pro přípravu vysoce kvalitního betonu se sníženým smrštěním. Redukce smrštění betonu má za následek minimalizaci rizika vzniku trhlin betonové konstrukce a tím dochází k podstatnému zvýšení její trvanlivosti. SikaControl®-40 se používá především u následujících aplikací:

- Konstrukce s vysokými požadavky na minimální výskyt trhlin, či v případech jejich vzniku s požadavkem na minimalizaci jejich šířky
- Samonivelační cementové potěry
- Bezspáré betonové podlahy opatřené vsypem

VLASTNOSTI / VÝHODY

SikaControl®-40 díky změně velikosti povrchového napětí v pórovém systému betonu aktivně ovlivňuje distribuci vody nutné k hydrataci cementového pojiva. Pomocí tohoto mechanismu dochází ke snížení smrštění betonu a pravděpodobnosti vzniku trhlin.

Výhody používání SikaControl®-40:

- Výrazné snížení smrštění v průběhu vyzrávání betonové konstrukce
- Výrazně zlepšená nepropustnost betonu, a tím pádem jeho vyšší trvanlivost
- Bez negativních vlivů na vlastnosti čerstvého i vytvrzeného betonu

INFORMACE O PRODUKTU

Chemická báze	Kombinace vícesytných alkoholů.
Balení	1000 kg IBC kontejner 200 kg sud
Vzhled / Barva	Načervenalá homogenní kapalina.
Skladovatelnost	12 měsíců od data výroby v uzavřeném a neporušeném originálním obalu.
Podmínky skladování	Skladovat při teplotách +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením, mrazem a znečištěním.
Objemová hmotnost	~1,0 kg/l (při +20°C)
pH	~ 8,5
Celkový obsah chloridových iontů	≤ 0,10 % hmot.
Ekvivalent oxidu sodíku	≤ 1,0% hmot.

Produktový list
SikaControl®-40
Prosinec 2018, Verze 01.01
02140304100000001

1 / 3

[T5]

TECHNICKÉ INFORMACE

Způsob betonáže	Při výrobě a pokládce betonu musí být dodržována pravidla řádné betonáže. Ihned po betonáži musí být čerstvý beton dostatečně ochráněn proti nadměrnému odparu záměsové vody užitím ošetřujícího prostředku. Před samotnou betonáží doporučujeme provést laboratorní testování, obzvlášť v případě změny poměru, či druhu jednotlivých složek betonu.
Vliv na tuhnutí	SikaControl®-40 může prodloužit dobu tuhnutí.

APLIKAČNÍ INFORMACE

Doporučené dávkování	Doporučené dávkování: 0,5 - 2,0 % na hmotnost cementu.
Kompatibilita	SikaControl®-40 je možné kombinovat s dalšími přísadami firmy Sika. Při kombinaci SikaControl®-40 s provzdušňovacími přísadami může být negativně ovlivněna jejich provzdušňovací schopnost. Pro bližší informace kontaktujte vždy technické oddělení firmy Sika.
Dávkování	SikaControl®-40 doporučujeme přidávat současně se záměsovou vodou a plastifikačními přísadami, eventuálně ihned po jejich nadávkování. Pro optimální využití vlastností přísady doporučujeme minimální dobu míchání 60 vteřin. K zamezení předávkování záměsové vody doporučujeme spustit konečné dávkování vody po uplynutí 2/3 doby míchání betonové směsi.
Omezení	SikaControl®-40 smí být dávkován pouze na zvlhlý cement.

OMEZENÍ

V případě přečerpávání výrobku do skladovacích nádrží u zákazníka a skladování výrobku v těchto nádržích, lze výrobek přečerpávat pouze do čistých nádrží. Zmíněné nádrže je nutné minimálně jednou ročně čistit a desinfikovat. V případě zmrznutí může být výrobek SikaControl®-40 opětovně použit po jeho postupném rozpuštění a promíchání. V závislosti na dávce způsobuje přísada zpomalení procesu hydratace cementu (v porovnání s betonem bez přísady). Ve všech případech je nutné provést předbežné testy výrobku pro ověření jeho vlivu na vlastnosti čerstvého i vytvrzeného betonu.

PLATNOST HODNOT

Veškeré technické údaje uvedené v tomto produktovém listu vycházejí z laboratorních zkoušek. Z důvodu okolností, jež nejsme schopni ovlivnit, mohou být skutečně naměřené hodnoty odlišné.

MÍSTNÍ OMEZENÍ

Upozorňujeme, že v důsledku zvláštních místních předpisů se mohou účinky výrobku v jednotlivých zemích lišit. Přesný popis možných způsobů použití naleznete v místním produktovém listu.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Informace a pokyny týkající se bezpečné manipulace, skladování a likvidace chemických výrobků najdete v aktuálním vydání Bezpečnostního listu, který obsahuje také fyzikální, ekologické, toxikologické a ostatní údaje týkající se bezpečné manipulace s výrobkem.

Produktový list
SikaControl®-40
Prosinec 2018, Verze 01.01
021403041000000001

2 / 3

STAVÍME NA DŮVĚŘE



[T6]

STAVÍME NA DŮVĚŘE



PRODUKTOVÝ LIST

Sika® ViscoCrete®-1035 CZ

UNIVERZÁLNÍ A VYSOCE ÚČINNÝ SUPERPLASTIFIKÁTOR

POPIS PRODUKTU

Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je univerzální, velmi účinný superplastifikátor na bázi polykarboxylátů, vhodný zejména pro výrobu transportbetonu.

POUŽITÍ

Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je vhodný především pro výrobu transportbetonu s prodlouženou dobou zpracovatelnosti, za současného požadavku na nízký vodní součinitel a dobrou tekutost betonu. Sika® ViscoCrete®-1035 CZ umožňuje:

- Dosáhnout středních až vysokých hodnot (do 40 %) redukce záměsové vody.
- Bezproblémovou výrobu betonů s nízkým podílem jemných částic, či obsahem "obtížného" kameniva.
- Výrobu betonu s požadavky na prodlouženou dobu zpracovatelnosti a dopravy.
- Výrobu samozhutnitelných (SCC) betonů.

VLASTNOSTI / VÝHODY

Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je vysoce účinný superplastifikátor s rychlou adsorbí na povrch cementových zrn, kombinující sterický a elektrostatický mechanismus účinku. Díky těmto mechanismům Sika® ViscoCrete®-1035 CZ umožňuje dosáhnout:

- Požadovanou konzistenci betonu i při nízkém vodním součiniteli.
 - Účinné ztekucení betonu umožňující jeho snadnou pokládku.
 - Nízkých vodních součinitelů betonu a tím zvýšení jeho soudržnosti, hutnosti, snížení nasákavosti a dosažení vyšších pevností.
 - Nižšího smrštění vytvrdlého betonu.
 - Zvýšenou odolnost betonu vůči karbonatáci.
- Sika® ViscoCrete®-1035 CZ neobsahuje chloridy, ani žádné jiné látky, které mohou podporovat korozi vyztuže, a je proto vhodný pro výrobu betonu určeného pro vyztužené či předepjaté konstrukce.

SCHVÁLENÍ / STANDARDY

Superplastifikační / vodoredukující přísada do betonu podle EN 934-2, tab. 3.1/3.2, vydáno Prohlášení o vlastnostech č.02 13 01 01 100 0001339 1180, certifikováno Oznaměným subjektem č.1020, certifikát č. 1020-CPR-020027779 a označeno CE značkou.

INFORMACE O PRODUKTU

Chemická báze	Vodný roztok modifikovaného polykarboxylátu
Balení	1000 kg IBC kontejner, jiná balení na vyžádání
Vzhled / Barva	Nažloutlá kapalina
Skladovatelnost	12 měsíců od data výroby v uzavřeném a neporušeném originálním obalu
Podmínky skladování	Skladovat při teplotách +5 °C až +30 °C. Chránit před přímým slunečním světlem, mrazem a kontaminací.
Objemová hmotnost	~ 1,06 kg/litr (při +20 °C)

Produktový list
Sika® ViscoCrete®-1035 CZ
Duben 2018, Verze 01.01
02130101100001339

1 / 3

[T6]

pH	~ 4,5
Obsah sušiny	~ 33 % hmot.
Celkový obsah chloridových iontů	≤0,1 % hmot.
Ekvivalent oxidu sodíku	≤1,0 % hmot.

TECHNICKÉ INFORMACE

Způsob betonáže	Při výrobě a pokládce betonu musí být dodržována pravidla řádné betonáže. Ihned po betonáži musí být čerstvý beton dostatečně ochráněn proti nadměrnému odparu záměsové vody užitím ošetřujícího prostředku. Před samotnou betonáží doporučujeme provést laboratorní testování, obzvlášť v případě změny poměru či druhu jednotlivých složek betonu.
-----------------	--

APLIKAČNÍ INFORMACE

Doporučené dávkování	0,2 - 1,7 % z hmotnosti cementu/pojiva
Kompatibilita	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je možné kombinovat s dalšími přísadami firmy Sika. Pro bližší informace kontaktujte vždy technické oddělení firmy Sika.
Dávkování	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ doporučujeme přidávat současně se záměsovou vodou a zamíchat do betonu před přidáním případných dalších přísad. Pro optimální využití vlastností přísady doporučujeme minimální dobu míchání 60 vteřin. K zamezení předávkování záměsové vody doporučujeme spustit konečné dávkování vody po uplynutí 2/3 doby míchání betonové směsi.
Omezení	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ smí být dávkován pouze na zvlhlý cement.

OMEZENÍ

V případě přečerpávání výrobku do skladovacích nádrží u zákazníka a skladování výrobku v těchto nádržích, lze výrobek přečerpávat pouze do čistých nádrží. Zmíněné nádrže je nutné minimálně jednou ročně čistit a desinfikovat. V případě zmrznutí může být výrobek Sika® ViscoCrete®-1035 CZ opětovně použit po jeho postupném rozpuštění a promíchání. V závislosti na dávce způsobuje přísada zpomalení procesu hydratace cementu (v porovnání s betonem bez přísady). Při použití nadbytečného množství přísady nebo záměsové vody může dojít k odlučování vody na povrchu betonu a k segregaci betonové směsi. V porovnání s betonem bez přísady setrvává beton ošetřený pomocí přísady Sika® ViscoCrete®-1035 CZ déle v plastickém stavu. Tuto skutečnost je třeba vzít v potaz při návrhu bednění, a obzvlášť v případě samozhutnitelných betonů zohlednit tlaky působící na bednění. Ve všech případech je nutné provést předbežné testy výrobku pro ověření jeho vlivu na vlastnosti čerstvého i vytvrzeného betonu.

PLATNOST HODNOT

Veškeré technické údaje uvedené v tomto produktovém listu vycházejí z laboratorních zkoušek. Z důvodu okolností, jež nejsme schopni ovlivnit, mohou být skutečně naměřené hodnoty odlišné.

MÍSTNÍ OMEZENÍ

Upozorňujeme, že v důsledku zvláštních místních předpisů se mohou účinky výrobku v jednotlivých zemích lišit. Přesný popis možných způsobů použití naleznete v místním produktovém listu.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Informace a pokyny týkající se bezpečné manipulace, skladování a likvidace chemických výrobků najdete v aktuálním vydání Bezpečnostního listu, který obsahuje také fyzikální, ekologické, toxikologické a ostatní údaje týkající se bezpečné manipulace s výrobkem.

Produktový list
Sika® ViscoCrete®-1035 CZ
Duben 2018, Verze 01.01
021301011000001339

2 / 3

STAVÍME NA DŮVĚŘE

