



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

VÝVOJ SPECIÁLNÍCH VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ S NÍZKÝMI OBJEMOVÝMI ZMĚNAMI

DEVELOPMENT OF SPECIAL HIGH STRENGTH CONCRETE WITH LOW VOLUME CHANGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Meruňka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Milan Meruňka
Název	Vývoj speciálních vysokopevnostních betonů s nízkými objemovými změnami
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- Internetové zdroje z tuzemských a zahraničních konferencí, odborných časopisů a knih
- Diplomové práce publikované na VUT FAST za posledních 5 let
- Tuzemské a zahraniční odborné časopisy

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Užívání betonů pevností vyšších jak 65 MPa, které jsou v kategorii tzv. vysokopevnostních betonů, (HSC) je v praxi stále více vyžadováno. Pro dosažení vysokých pevností je nutné používat vysokých dávek cementů nad 450 kg/m³ betonu. Většinou jsou používány portlandské cementy CEM I 42,5 nebo i CEM 52,5. I přes využívání superplastifikačních přísad v nadprůměrných dávkách vykazují tyto betony relativně velké hodnoty negativních objemových změn – smršťování. Tyto hodnoty dosahují ve stáří do 60 dnů až 0,7 mm/m, což v praxi vyvolává i u železobetonových konstrukcí vznik trhlin.

V práci se v teoretické části zaměřte na rozbor typů objemových změn betonů vyvolaných jak jejich složením (autogenní, hydratační, karbonatační), vnějšími klimatickými vlivy (teplotní roztažnosti, vlhkostní vysychání) a dalšími vlivy. Popište přístupy k možné eliminaci jednotlivých typů smrštění. Hlavní pozornost zaměřte na využívání protismršťovacích přísad, možnosti příměsí do betonů jako např. jemně mleté strusky, vysoko i nízko teplotních popílků.

V experimentální části navrhnete 2 receptury HSC o pevnostech min. 75 a 90 MPa po 28 dnech zrání. Ověřte průběh smršťování na měřicích žlabcích do stáří 28 dnů, vývoj hydratačního tepla do 24 hodin od rozmíchání. Následně otestujte minimálně 3 typy protismršťovacích přísad a kombinaci aktivních příměsí. Současně ověřte vliv na pevnosti po 7 a 28 dnech NZ.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou objemových změn betonu, zejména smršťováním betonu. Jsou popsány jednotlivé druhy objemových změn betonů, příčiny, vzniky a způsoby, kterými je lze eliminovat. Experimentální část je zaměřena na sledování objemových změn betonu do 28 dnů zrání s použitím rozdílného druhu a dávky protismršťovací přísady, smrštění cementových past do 24 hodin od zamíchání, vývin hydratačních teplot betonů a cementových past.

Klíčová slova

Objemové změny, smršťování betonu, protismršťovací přísady, přísady redukující smrštění, voda, vysokoteplotní popílek, fluidní popílek, cementová pasta, vývoj hydratačních teplot,...

Abstrakt

The bachelor thesis deals with problems of volume changes of concrete, especially shrinkage of concrete. Types of concrete changes, causes, occurrences, and ways to eliminate them are described. The experimental part is focused on monitoring the volume changes of concrete within 28 days of maturing using a different type and dose of shrinkage reducing additions, a summary of cement pastes within 24 hours of mixing, the development of temperatures of the hydration temperatures of concrete and cement pastes.

Keywords

Volume changes, shrinkage of concrete, shrinking reducing additions, water, high-temperature fly ash, fluidized bed combustion fly ash, cement paste, development of hydration temperatures, ..

BIBLOGRAFICKÁ CITACE

Milan Meruňka, *Vývoj speciálních vysokopevnostních betonů s nízkými objemovými změnami*. Brno, 2018. 84 s. Bakalářské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2018

Milan Meruňka
Autor práce

Poděkování:

Chtěl bych velice poděkovat vedoucímu mé práce, prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. a Ing. Lucii Osuské, za veškeré cenné rady, náměty a připomínky při zpracování této bakalářské práce.

Také bych rád poděkoval všem ostatním zaměstnancům ústavu THD, kteří mi byli nápomocni při provádění jednotlivých zkoušek experimentální části a se kterými jsem mohl získané výsledky konzultovat.

Obrovské poděkování patří také přítelkyni a rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

1	CÍL PRÁCE	11
2	ÚVOD	12
3	TEORETICKÁ ČÁST	13
3.1	Vysokopevnostní beton	13
3.2	Objemové změny betonu	14
3.2.1	Plastické smrštění:.....	16
3.2.2	Autogenní smrštění.....	17
3.2.3	Smrštění od vysychání (odpařování, vlhkostní smrštění)	19
3.2.4	Karbonatační smrštění.....	19
3.2.5	Termální smrštění.....	21
3.3	Faktory ovlivňující velikost objemových změn betonu.....	21
3.3.1	Okolní prostředí	22
3.3.1.1	Teplota	22
3.3.1.2	Vlhkost.....	22
3.3.1.3	Vítr.....	22
3.3.2	Vodní součinitel	23
3.3.3	Cement.....	23
3.3.4	Kamenivo	24
3.3.5	Minerální příměsi	24
3.3.5.1	Vysokoteplotní úletový popílek.....	25
3.3.5.2	Fluidní popílky.....	26
3.3.5.3	Vysokopeční (granulovaná jemně mletá) struska (JMS)	28
3.3.5.4	Křemičité úlety	29
3.3.5.5	Metakaolin	30
3.4	Přísady redukující smrštění:	32
3.4.1	Protismršťovací přísady (SRA – shrinking reducing admixtures).....	32
3.4.1.1	Princip a vliv SRA	33
3.4.2	Rozpínavé přísady.....	34
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
4.1	Cíl	37
4.2	Vstupní suroviny.....	37
4.2.1	Cement.....	37
4.2.2	Kamenivo	38
4.2.3	Voda	38
4.2.4	Plastifikační přísada.....	38

4.2.5	Protismršťovací přísada	38
4.2.6	Mikrosilika	39
4.3	Beton s pevností v tlaku 75 MPa	40
4.3.1	Metodika výroby	40
4.3.2	Složení betonové směsi	40
4.3.3	Zkoušky prováděné v čerstvém stavu betonových směsí	41
4.3.4	Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu po 7 a 28 dnech zrání	41
4.3.5	Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění	42
4.3.6	Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění	43
4.3.7	Smrštění betonových směsí:	44
4.3.8	Smrštění betonových směsí – grafické znázornění	45
4.3.9	Průběh hydratačních teplot betonových směsí	46
4.3.10	Průběh hydratačních teplot betonových směsí – grafické znázornění ..	47
4.4	Cementová pasta	47
4.4.1	Zkoušky provedené v čerstvém stavu	48
4.4.2	Průběh smrštění cementových past	48
4.4.3	Průběh smrštění cementových past – grafické znázornění	49
4.4.4	Vývin hydratačních teplot v cementových pastách	50
4.4.5	Vývin hydratačních teplot u cementových past – grafické znázornění ..	51
4.5	Beton s pevností v tlaku 90 MPa	52
4.5.1	Metodika výroby	52
4.5.2	Složení betonové směsi	52
4.5.3	Zkoušky prováděné v čerstvém stavu betonových směsí	53
4.5.4	Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu po 7 a 28 dnech zrání	53
4.5.5	Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění	54
4.5.6	Pevnosti v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění	55
4.5.7	Smrštění betonové směsi:	56
4.5.8	Smrštění betonových směsí – grafické znázornění	56
4.5.9	Průběh hydratačních teplot betonových směsí	57
4.5.10	Vývin hydratačních teplot v betonových směsích – grafické znázornění	

4.6	Cementová pasta	59
4.6.1	Zkoušky provedené v čerstvém stavu	59
4.6.2	Průběh smrštění cementových past.....	60
4.6.3	Průběh smrštění cementových past – grafické znázornění	60
4.6.4	Vývin hydratačních teplot v cementových pastách.....	61
4.7	Možné příčiny nízkých pevností	63
5	ZÁVĚR.....	65
6	FOTODOKUMENTACE.....	67
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	69
7.1	Použitá literatura	69
7.2	Použité právní normy a předpisy	70
7.3	Použité zdroje obrázků.....	71
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	73
9	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	74
9.1	Seznam obrázků	74
9.2	Seznam tabulek	74
9.3	Seznam grafů.....	75
9.4	Seznam příloh.....	76

1 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce se zabývá vývojem vysokopevnostních betonů s nízkými objemovými změnami. Cílem práce je zjistit vliv dávkování přísad redukujících smrštění na objemové změny betonu, vliv na vývoj hydratačních teplot do 24 hodin od výroby betonových směsí a vliv přísad redukujících smrštění na pevnost betonu v tlaku po 7 a 28 dnech normového zrání.

Teoretická část se zaměřuje na různé typy objemových změn vysokopevnostních betonů vyvolaných jejich složením, vnějšími klimatickými vlivy a dalšími faktory ovlivňující jejich velikost. Zabývá se i eliminací těchto vlivů a možnosti předcházení velkých objemových změn.

V experimentální části byly navrženy dvě odlišné receptury pro vysokopevnostní beton. První receptura pro pevnost v tlaku přibližně 75 MPa po 28 dnech normového zrání, od které se poté odvíjelo dalších šest receptur. Každá od jiné přísady redukující smrštění v doporučeném minimálním a maximálním dávkování. Druhá receptura pro pevnost v tlaku přibližně 90 MPa po 28 dnech normového zrání. Od té se odvíjely další tři receptury, ve kterých byly použity tři rozdílné protismršťovací přísady ve shodném dávkování. U všech vyrobených betonových směsí byly měřeny délkové změny v průběhu zrání a vývin hydratačních teplot 24 hodin od zamíchání. Získaná data jsou shrnuta v tabulkách a zakreslena do grafů.

2 ÚVOD

Beton je umělý kompozitní stavební materiál, který se skládá z pojiva, plniva, vody, vzduchu, případně přísad a příměsí. Pro výrobu betonů se používají vhodná anorganická (maltoviny) nebo organická pojiva. Plnivem bývá převážně anorganický zrnitý materiál, který může být přírodního původu, uměle vyrobený nebo recyklovaný, nazývaný jako kamenivo do betonu. [1]

Současný výzkum v oblasti technologie betonu a zlepšování dostupnosti kvalitnějších materiálů stavební chemie dovolují vyrábět betonové konstrukce složitých tvarů, které při dodržování předepsaných technických parametrů mohou splňovat i funkci estetickou. V případě, že je beton správně navržený, vyrobený, uložený na stavbě a ošetřovaný dle zásad, dosahuje beton vysokých pevností a dlouhé trvanlivosti. [1]

Ve srovnání s jinými stavebními materiály, jako je například ocel, beton nepotřebuje ochranu v případě vystavení působení atmosférickým vlivům (déšť, sníh, slunce). Je nehořlavý a odolný proti požáru. V případě ocelových konstrukcí by při působení stejně vysokých teplot došlo k porušení a ztrátě stability konstrukce mnohem dříve, což může hrát velikou roli při požáru a záchraně lidských životů. [1]

Jednou z nevýhod konstrukcí z betonu jsou jeho objemové změny. Zejména v důsledku hydratace cementové matrice a snižující se vlhkosti materiálu dochází k velkému a nevratnému smršťování. Nadměrné objemové změny betonu jsou nežádoucí a lze pro jejich redukci postupovat několika možnými způsoby, jako jsou správný návrh betonové směsi, použití vhodných protismršťovacích přísad či příměsí nebo jejich vhodnou kombinací.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Vysokopevnostní beton

Dle ČSN EN 206+A1 [N1] je za vysokopevnostní beton (HSC – High strength concrete) označován beton obyčejný nebo těžký beton, který splňuje požadavky pevnostní třídy C 50/60, nejvýše však C 100/115 a lehký beton spadající do pevnostní třídy minimálně LC 50/55, nejvýše však LC 80/88. Vyšší pevnostní třídy jsou považovány za ultra vysokopevnostní betony (UHSC – Ultra high strength concrete).

Použití vysokopevnostního betonu dovoluje snížení stupně vyztužení, což umožňuje snadnější betonáž a delší životnosti konstrukcí díky zvýšené trvanlivosti v důsledku zvýšení hutnosti cementového kamene. Díky zlepšení mechanických parametrů betonů, lze navrhovat subtilnější konstrukce, díky čemuž dochází i ke snížení nákladů na stavbu, neboť objem konstrukce se snižuje. [3]

První stavby, kde byl použit HSC, se objevily v 60. letech minulého století v USA v oblasti Chicaga. Jako první byla postavena budova Lake Point Tower v roce 1965 s pevností betonu v tlaku okolo 53 MPa a následovala jí v roce 1976 budova River Plaza s pevností betonu v tlaku okolo 77 MPa. V prvopočátcích byl HSC použit na sloupy výškových budov v interiéru, na nosné konstrukce v exteriéru se začal používat až koncem 80. let. [2]

Lake Point
Tower,
Chicago



River
Plaza,
Chicago



Obr. 1: Příklady výškových staveb postavených v 60. a 70. letech z HSC [01,2]

V současné době není úlohou HSC nahradit obyčejné betony, které svými vlastnostmi plně vyhovují v celé řadě konstrukcí. Ve vyspělých západních zemích představuje výroba HSC přibližně 10 % objemu celkové produkce betonu. Stále více se však uvažují náklady na stavbu z pohledu její trvanlivosti, proto lze předpokládat, že zastoupení HSC se na trhu s betonem zvýší a v blízké budoucnosti bude představovat 25 – 35 % z celkové produkce betonu. Největší zastoupení ze střeoevropského regionu si HSC našel ve Francii, kde se používá převážně ke stavbě mostů. [1]

V porovnání s obyčejným betonem je HSC hutnější s nižší permeabilitou. Ta je závislá na mikrostruktuře cementové matrice a transiční zóně mezi ní a kamenivem, kterou pak lze považovat za nejslabší místo kompozitu. Její kvalita se odvíjí od druhu a množství hydratačních produktů, množství mikrotrhlin a charakteru pórovité látky. Ve srovnání s obyčejnými betony musí být tato zóna hutnější a pevnější. Z toho důvodu se ke zlepšení mikrostruktury HSC používají vhodné chemické přísady nebo příměsi s pucolánovou aktivitou. [1]

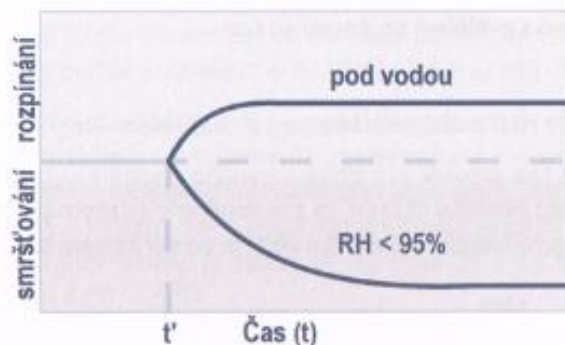
3.2 Objemové změny betonu

Objemové změny betonu jsou běžným jevem hydratačních procesů, které lze během jeho zrání pouze omezit nebo částečně kompenzovat, nikoliv však zcela odstranit. Jsou primárně určeny hydratací cementového tmele a sekundárně vysycháním a způsobem ošetřování.

Podstata smršťování je poměrně složitá kompilace jevů. Migrace vlhkosti mezi různě velkými kapilárami způsobuje úbytek vody v krystalové mřížce v závislosti na napětí vodních par okolního prostředí. Zároveň působí napětí na rozhraní cementového kamene a povrchu par okolního prostředí a dále napětí na rozhraní cementového kamene a povrchu kameniva. Na počátku tvrdnutí je radiální silou povrch kameniva stlačován, což snižuje hutnost cementového kamene na povrchu kameniva. Působením kapilárních sil dochází ke smršťování cementového kamene a stlačování zrn kameniva. Snížením deformace na povrchu zrn kameniva získáváme vyšší mechanické vlastnosti betonové směsi a zároveň nižší hodnoty smrštění, které ovlivňují následující podmínky: [3]

- složení betonu (typ a množství cementu, skladba kameniva, příměsi a přísady, rozptýlená výztuž)
- klimatické podmínky (vlhkost, teplota okolního prostředí, rychlost větru)
- struktura cementové matrice betonu
- velikost, tvar a stupeň vyztužení betonové konstrukce
- použití protismršťovacích přísad (druh, dávka)
- snížení vodního součinitele (plastifikační a superplastifikační přísady)

V případě ponoření obyčejného betonu do vodní lázně k jeho smrštění prakticky nedochází, což demonstruje Obr. 2. V technické praxi je ovšem téměř nereálné ošetřovat vybetonované konstrukce tímto způsobem. Z toho důvodu se používají nepropustné folie, které zabraňují odpařování vody z konstrukce povrchu nebo nasákavé tkaniny, které se udržují neustále vlhké či pouze mlžení vodou. [5]

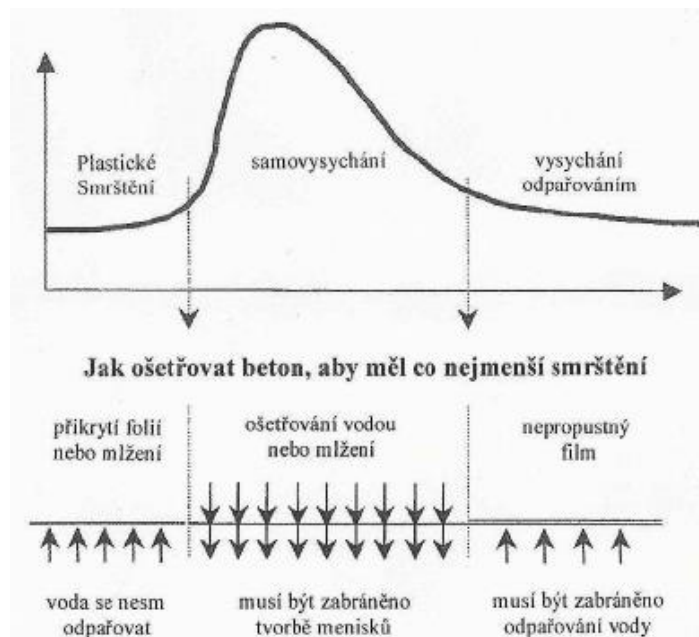


Obr. 2: Schématické znázornění objemových změn betonu v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí [O3]

Ošetřování betonu je tedy důležité ze dvou důvodů: aby zhydratovalo co největší množství cementu a dosáhlo se co nejvyšších pevností a druhým důvodem je minimalizování smrštění. To se skládá z kombinace několika dalších elementárních smrštění: [2],[4]

- plastické smrštění (odpařování vody z povrchu čerstvého betonu)
- autogenní smrštění (způsobeno hydratací cementu, též nazýváno samovysychání nebo chemické smrštění)
- smrštění od odpařování (úbytek vody v zatvrdlém betonu)

- termální smrštění (způsobeno poklesem teploty betonu)
- smrštění vlivem karbonatce (vliv CO_2 na cementový tmel)



Obr. 3: Nejvhodnější režim ošetřování betonu v průběhu hydratačních reakcí[O4]

Jednotlivá dílčí smrštění mohou nastat v různých fázích zrání betonů. Jejich velikost může být ovlivněna několika vlivy:

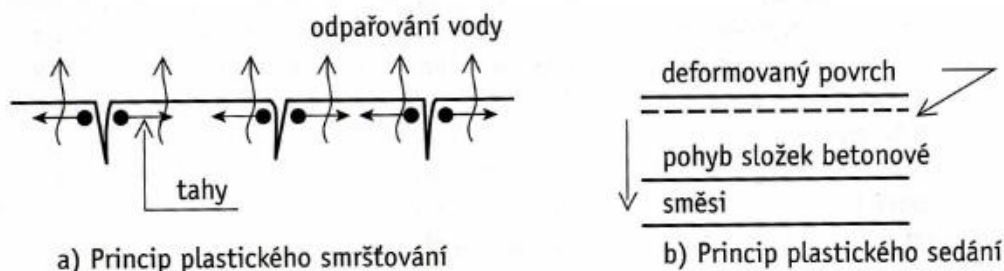
- Doba a způsob ošetřování
- Složení betonu (typ cementu, skladba kameniva, příměsi a přísady, stupeň vyztužení)
- Strukturou cementové matrice
- Velikostí, tvarem a stupněm vyztužení betonové konstrukce

3.2.1 Plastické smrštění:

Plastické smršťování probíhá ve chvíli, kdy je beton v plastickém stavu a z jeho povrchu se může odpařovat voda. Toto smrštění nastává u betonové konstrukce do 10 – 12 hodin od uložení a pouze v případě, že relativní vlhkost okolního prostředí je nižší než 95 %, je vystaven teplu a vysoké teplotě. Těmito třemi faktory je plastické smrštění ovlivněno nejvíce. [5]

Beton v této fázi ještě nemá takovou pevnost, aby byl schopen odolat objemovým změnám působením plastického smršťování a plastického sedání. Jedná se o dva jevy, které jsou způsobené stejnými faktory s rozdílným mechanismem. V případě plastického smršťování dochází ke vzniku tahových a smykových sil v důsledku rychlého odpařování vody z plastické hmoty, která v tu chvíli nemá dostatečnou pevnost, aby těmto účinkům odolala, což se projeví trhlinkami na povrchu betonu. [4]

Plastické sedání je důsledkem vzájemného relativního pohybu cementového tmele a kameniva ve ztuhnutém betonu a napomáhá ke zvýraznění trhlin od plastického smršťování, anebo je způsobuje a nelze je od sebe vzájemně oddělit. U deskových nevyztužených konstrukcí, u kterých je výška průřezu konstantní, dochází k poklesu povrchu betonu po celé ploše rovnoměrně a to nezpůsobuje žádné viditelné změny. Vliv plastického sedání se projeví v případě změny tloušťky konstrukce deformací povrchu nebo vznikem trhlin. U horně vyztužených konstrukcí se vytvářejí trhliny, které ve většině případů pokračují i pod výztuží, kterou obejdou. [3],[4]



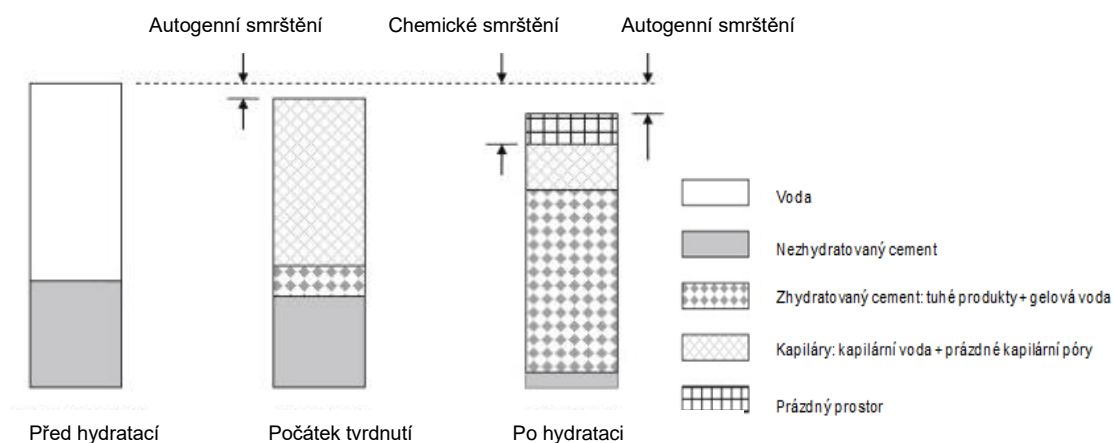
Obr. 4: Princip plastického smršťování a sedání [O5]

3.2.2 Autogenní smrštění

Autogenní smršťování je důsledkem chemického smršťování, které vyplývá ze snížení absolutních objemů pevných a kapalných fází produktů po hydrataci ve srovnání s absolutními objemy původního, nezhydratovaného cementu a vody. Protože snížení objemu je omezeno tuhou kostrou hydratační cementové pasty, vzniká zbytkový prostor v hrubém objemu pasty ve formě pórů. Pokud není konstrukce neustále ošetřována vodou, účinek omezeného

chemického smršťování hydratační pasty je zdánlivé snížení objemu, které nazýváme autogenním smrštěním. [14]

Obrázek 5 schématicky znázorňuje objemové kontrakce složek cementové pasty při míchání, počátku tvrdnutí a po hydrataci. V době počátku tvrdnutí tvoří zhydratovaný cement (tuhé produkty a gelová voda) jen malý podíl z celkového objemu, zbytek tvoří kapiláry vyplněné vodou a nezhydratovaný cement. Kontrakce objemu v tomto stadiu je důsledkem chemického smršťování. Od této fáze se vytváří tuhá mikrostruktura, která omezuje kontrakci v důsledku pokračujícího chemického smrštění, což vede k tvorbě dutin. Jak probíhá hydratace, objem pevných produktů a gelové vody se zvyšuje na úkor nezhydratovaného cementu a kapilární vody. V uzavřeném systému mohou kapilární póry být prázdné nebo zaplněné vodou v závislosti na velikosti vodního součinitele. Celkově tedy může být hydratovaná cementová pasta popsána jako tuhý skelet pevných produktů hydratace a gelových vodních pórů, které zahrnují dutiny, kapiláry zaplněné vodou a nezhydratovaný cement. V přítomnosti hrubého a jemného kameniva je chemické smrštění dále omezeno, takže autogenní smrštění betonu je menší než u cementové pasty. [14]



Obr. 5: Schématické znázornění objemových složek [O6]

3.2.3 Smrštění od vysýchání (odpařování, vlhkostní smrštění)

Smrštění od vysýchání je vyvoláno migrací vody v kapilárách. Největší podíl na tomto druhu smrštění mají kapiláry o velikosti 0,36 – 0,5 mm. Odpařování vody z kapilár probíhá do té doby, dokud nenastane rovnováha mezi relativní vlhkostí okolního vzduchu a cementového kamene. [3]

Zvlhčování a vysušování pórovité struktury cementového kamene je příčinou reversibilního smršťování, které představuje asi 2/3 celkového smrštění cementového kamene způsobeného migrací vlhkosti. [3]

V případě, že je beton chráněn před vysýcháním například vhodnými ošetřovacími nástřiky nebo je skladován v uzavřených formách, bude vykazovat nižší hodnoty smrštění vysýcháním. Voda totiž nebude z betonu unikat. V případě, že se beton bude nacházet v prostředí s relativní vlhkostí nižší než 95 %, bude beton vykazovat záporné objemové změny označované jako smrštění od vysýchání. V případě, že bude po celou dobu jeho životnosti relativní vlhkost okolního prostředí nižší než 95 %, bude smrštění od vysýchání probíhat po celou dobu životnosti konstrukce. [5]

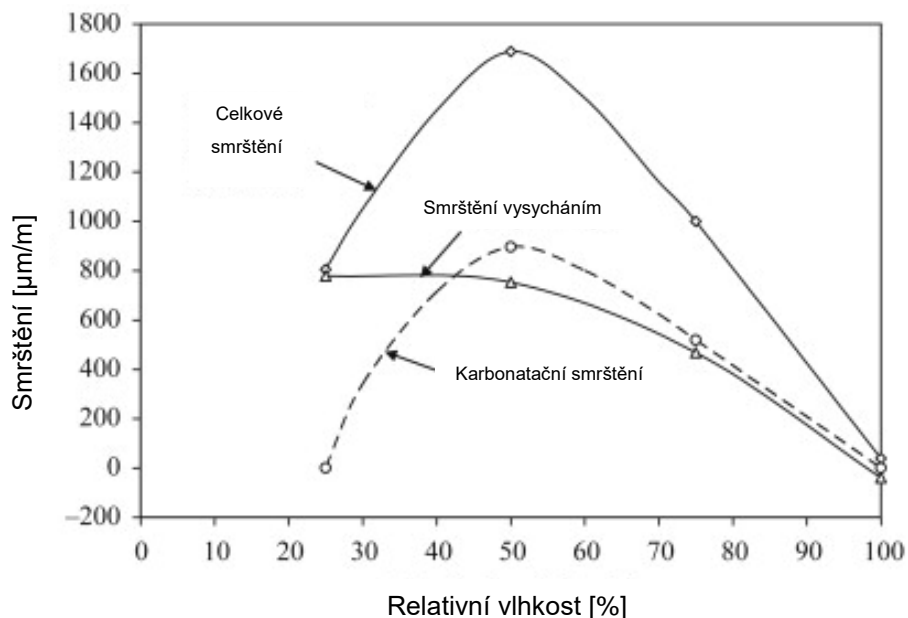
3.2.4 Karbonatační smrštění

Současně se smrštěním od vysýchání dochází i ke karbonatačnímu smrštění. Karbonatace vzniká reakcí CO_2 s portlanditem. Plynný CO_2 je v ovzduší přítomen v koncentraci 0,03 % objemových ve venkovském prostředí, 0,1 % v nevětrané laboratoři a až 0,3 % ve velkých městech. V přítomnosti vlhkosti vytváří CO_2 karbonovou kyselinu, která reaguje s krystaly $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku CaCO_3 , který se dostává do prázdných pórů. Procesu karbonatace je kontrakce betonu, která je z hlediska své povahy nevratná. [14]

Karbonatace probíhá z povrchu betonu směrem dovnitř, ale postupuje velmi pomalu. Skutečná rychlost karbonatace závisí na propustnosti betonu, jeho obsahu vlhkosti, obsahu CO_2 a relativní vlhkosti okolního prostředí. [14]

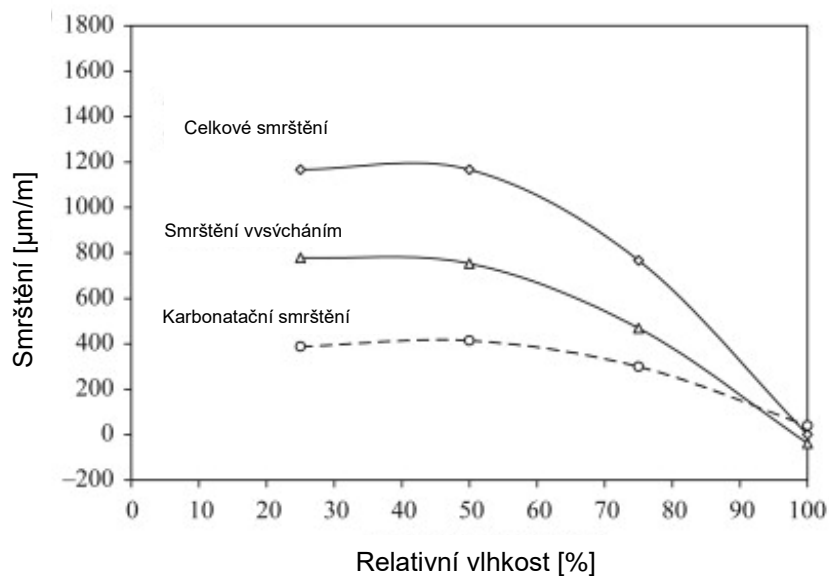
Obrázek 6 znázorňuje podíl karbonatačního smrštění ke smršťování vysýcháním vzorků malty uložené na vzduchu bez CO_2 a následně podrobených karbonataci, aby se dosáhlo celkového smrštění. V případě 25% vlhkosti není v pórech past dostatek vody pro CO_2 ke vzniku kyseliny uhličité.

V případě 100% vlhkosti jsou póry zcela zaplněné vodou a difúze CO_2 do pasty je velmi pomalá. Nejvyšší riziko karbonatace je při střední vlhkosti, kdy jsou póry cementové pasty zaplněny pouze z části a zároveň obsahují dostatek vody pro vznik kyseliny uhličitě. [14]



Obr. 6: Vysychání vzorků na vzduchu bez působení CO_2 [07]

Obrázek 7 znázorňuje současné sušení a karbonataci, aby se dosáhlo celkového smrštění, které je větší při nižší vlhkosti. Voda je k dispozici pro tvorbu kyseliny uhličitě, ale při vyšší vlhkosti. V praxi to znamená, že riziko karbonatace je větší v betonu chráněném před přímým deštěm, který je ale vystaven vlhkému vzduchu než v betonu, který je pravidelně opláchnutý deštěm.



Obr. 7: Současné sušení a působení karbonatce [O8]

3.2.5 Termální smrštění

S rozdílným průběhem teplot během roku mění beton svůj objem. S rostoucími teplotami beton svůj objem zvyšuje, se snižujícími se teplotami je tomu naopak. [13]

Z toho důvodu je nutné zřizování dilatačních spár, které umožní nezávislé přetváření konstrukce a zabrání vzniku trhlin. V případě jejich absence může dojít ke vzniku trhlin, které mohou vést až k fatálnímu poškození konstrukce. Změna délky se dá vyjádřit vztahem: [13]

$$\Delta l_t = \alpha \cdot l_t \cdot \Delta T \quad (1)$$

kde: Δl_t – délková změna konstrukce
 α – součinitel délkové teplotní roztažnosti (beton $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; ocel $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
 l_t – původní délka konstrukce
 ΔT – změna teploty [K]

3.3 Faktory ovlivňující velikost objemových změn betonu

Objemové změny betonu mohou zapříčinit vznik trhlin a mikrotrhlin v mikrostruktuře betonu, které se mohou postupem času zvětšovat a mohou mít také vliv na celkovou životnost konstrukce. Velikost smrštění betonové konstrukce může být ovlivněno několika vlivy:

3.3.1 Okolní prostředí

3.3.1.1 Teplota

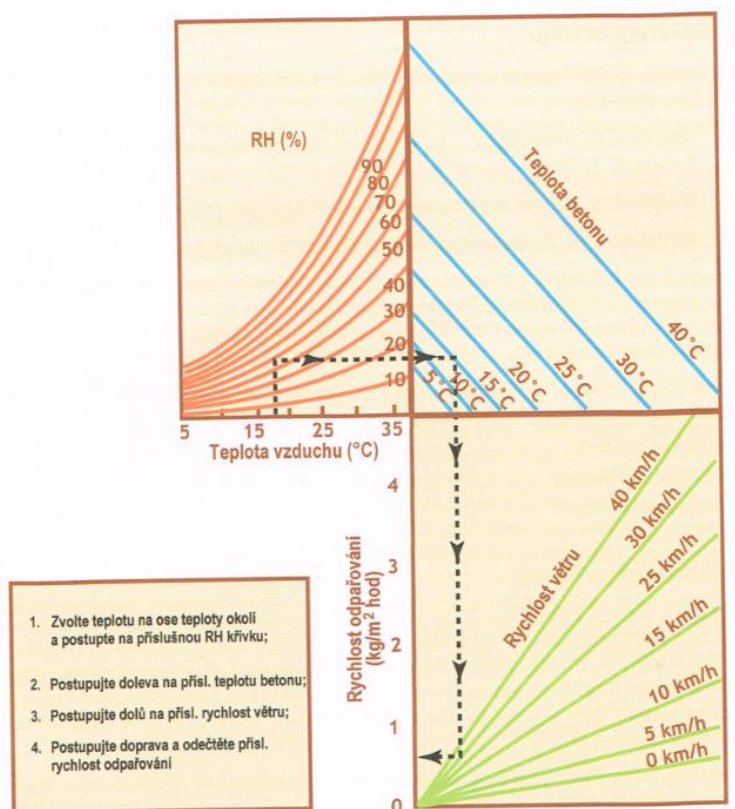
Se zvyšující se teplotou dochází k rychlejší hydrataci cementových zrn a ovlivnění struktury cementového kamene. Při betonování pod teplotu $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází ke snížení konečných pevností betonu. Obecně je doporučována teplota okolního prostředí pro zrání betonu $5 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. [4]

3.3.1.2 Vlhkost

Při relativní vlhkosti pod 95 % dochází ke smršťování betonu a s ubývající relativní vlhkostí okolního prostředí se smrštění zvyšuje.

3.3.1.3 Vítr

Rychlost proudění větru, či průvan, urychluje odpařování vody z povrchu betonu, což může být příčinou vzniku mikrotrhlinek.

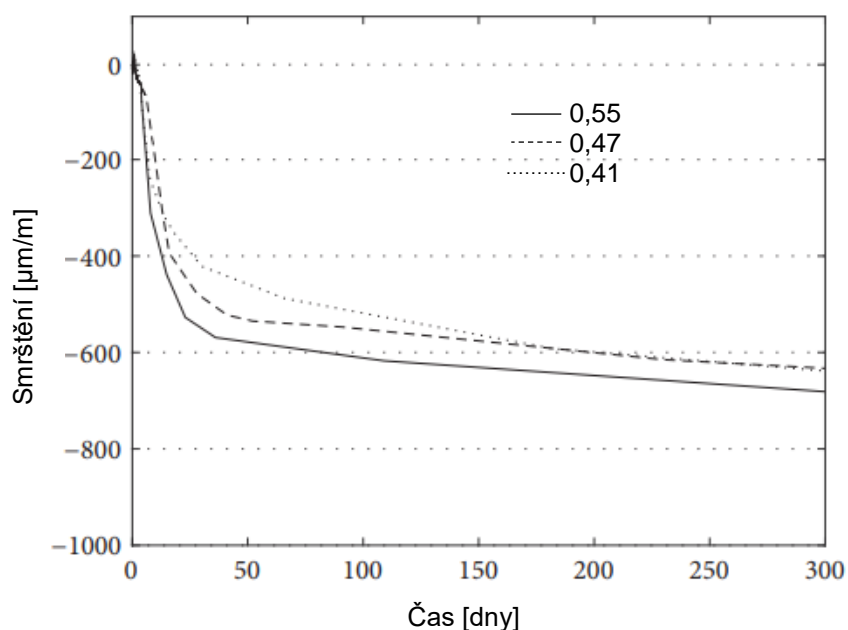


Obr. 8: Množství odpařené vody v závislosti na okolních podmínkách prostředí [O9]

3.3.2 Vodní součinitel

Experiment na obr. 9 znázorňuje tři betonové směsi s různým vodním součinitelem. Nejvyšší hodnoty smrštění vykazuje směs s nejvyšší hodnotou vodního součinitele (0,55) a se snižujícím se vodním součinitelem hodnoty smrštění klesají. To je způsobeno tím, že betony s nižším vodním součinitelem obsahují menší množství záměsové vody, která se během zrání směsi odpařuje. [6]

Množství záměsové vody se snižuje zejména použitím vhodným plastifikačních a superplastifikačních přísad.

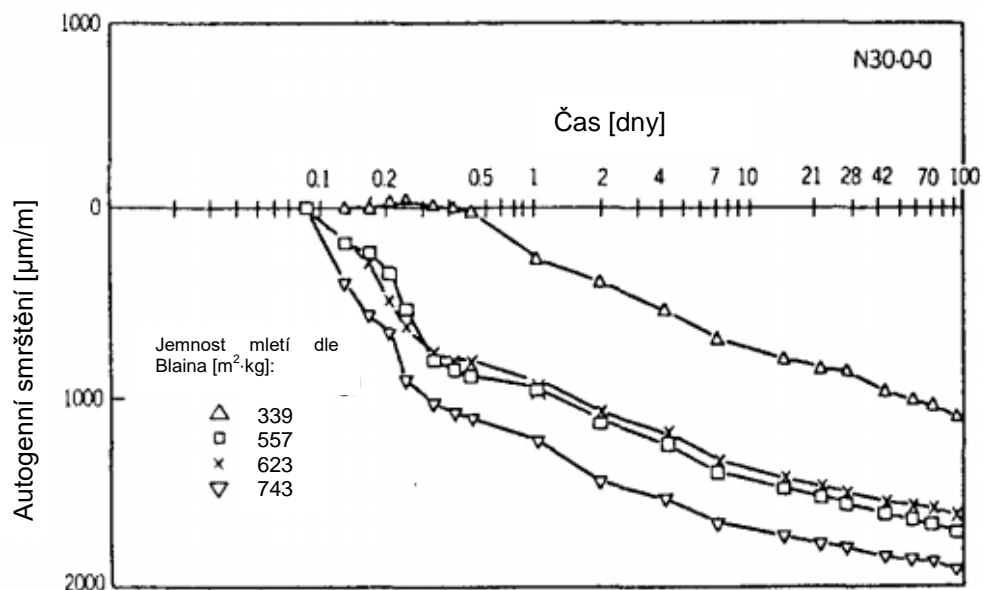


Obr. 9: Vliv vodního součinitele na smrštění betonu [O10]

3.3.3 Cement

Volba cementu a jeho množství je jednou z nejdůležitějších částí správného návrhu vysokopevnostního betonu. Ve výzkumu Tazawihho a Miyazawihho byl sledován vliv druhu cementu na autogenní smrštění, při hodnotě vodního součinitele 0,30. Cement s vysokou počáteční pevností (hlinitanový, portlandský) vykazuje velké počáteční autogenní smrštění i konečné smrštění. Cement s vyšším obsahem belitu vykázal nízké hodnoty autogenního smrštění. Lze tedy konstatovat, že pro snížení objemových změn betonu je z dostupných cementů nejvhodnější cement belitický, který má pozvolný vývoj hydratačního tepla a počátečních pevností. [7]

Vliv na celkové smrštění má i jemnost mletí cementu. Stejní autoři zkoušeli čtyři stejné cementy s rozdílnou jemností mletí. Nejvyšší hodnoty smrštění vykazovaly vzorky s největším měrným povrchem. Naopak nejnižší smrštění vykazoval vzorek s nejmenším měrným povrchem. To je způsobeno množstvím zrn cementu, které přicházejí do kontaktu s vodou, čímž se snižuje autogenní smrštění. [7]



Obr. 10: Vliv jemnosti mletí cementu na smrštění betonu [O11]

3.3.4 Kamenivo

Kamenivo je anorganický zrnitý materiál, který se používá jako plnivo do betonových směsí. Jeho hlavní úlohou je vytvoření pevného skeletu s co nejnižší mezerovitostí. Celkový objem kameniva v betonu se pohybuje od 70 % do 80 %. Běžně používaná kameniva jsou objemově stálá a smrštění betonu je závislé převážně na vlastnostech cementové pasty a objemovému zastoupení kameniva. S přibývajícím množstvím kameniva se bude velikost smrštění snižovat. Je ovšem nutné zvolit vhodnou granulometrii směsi. [8]

3.3.5 Minerální příměsi

Příměsi jsou práškovité materiály přidávané do betonové směsi s úmyslem zlepšení nebo docílení speciálních vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Rozdělují se dva druhy příměsí. První druh tvoří inertní

příměsí, které se nezúčastňují procesu hydratace. Do této skupiny patří například kamenný filler nebo pigmenty. Druhou skupinu tvoří latentně hydraulické příměsí, které mají skrytou schopnost zúčastnit se hydratace. Při reakci s Ca(OH)_2 tvrdnou ve vodním prostředí, což se projeví až po aktivaci pomocí aktivátoru (cementu). Do této skupiny patří například vysokoteplotní popílek nebo křemičité úlety. [15]

Z ekonomického a reologického hlediska je pro výrobu betonové směsi výhodné použití jedné příměsí či kombinace dvou až tří. Většina aktivních příměsí má jednu společnou vlastnost – obsahují formu křemičitanů skelné povahy, které v přítomnosti vody mohou i za pokojové teploty tvořit s vápnem kalcium-silikát-hydráty obdobné povahy, jako jsou ty, které vznikají během hydratace portlandského cementu. Pucolánová reakce se dá vyjádřit pomocí následujícího modelu: [2]



V případě, že jsou při výrobě cementu použity pucolány v přiměřeném množství, může být teoreticky veškerý Ca(OH)_2 vzniklý hydratací cementu, transformován do C-S-H gelu. Hydratační reakce takové adekvátní směsi portlandského cementu a pucolánu může být vyjádřena jako: [2]

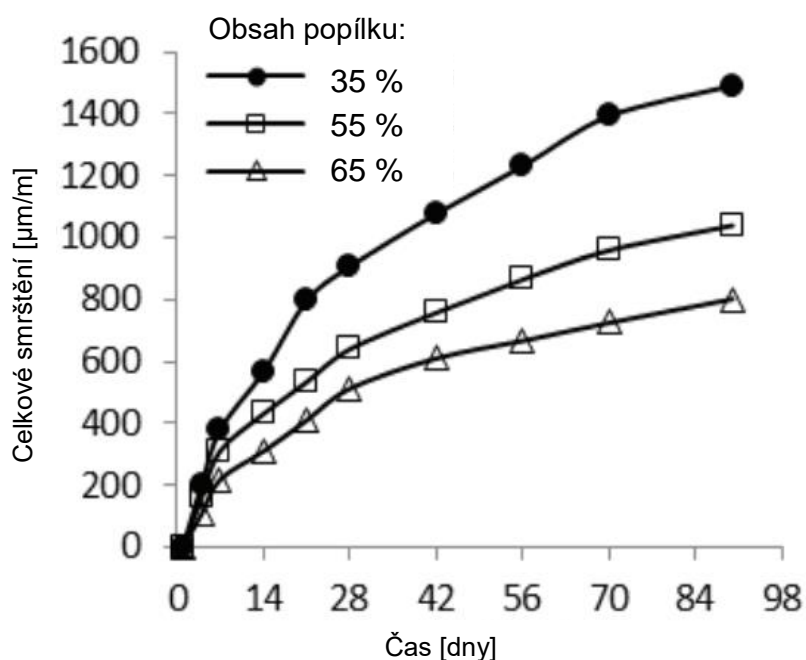


Většina pucolánů používající se k výrobě vysokohodnotných betonů jsou vedlejší průmyslové produkty. Největší zastoupení má vysokoteplotní popílek a křemičité úlety. Vysokoteplotní (granulovaná jemně mletá) struska se nejčastěji používá pro výrobu směsných cementů. V případě vysokohodnotných betonů má v porovnání s ostatními příměsemi nižší procento využití.

3.3.5.1 Vysokoteplotní úletový popílek

Popílek je jemný, šedý prášek složený zejména ze sklovitých částic, který vzniká jako vedlejší produkt při spalování tuhých paliv v uhelných elektrárnách. Zachycuje se pomocí mechanických a elektrostatických odlučovačů z kouřových plynů. [16]

Vysokoteplotní úletový popílek se jako příměs s pucolánovou aktivitou podílí na hydratačních procesech pojivové složky betonu, avšak cementová matrice modifikovaná popílkem vykazuje nižší hodnoty objemových změn. Experiment, jehož výsledky jsou zachyceny na obr. 11, prokazuje, že vyšší náhrada cementu vysokoteplotním popílkem při zachování stejného objemu cementové pasty se příznivě projevuje na jejích objemových změnách. Vysokoteplotní úletový popílek se tak stává vhodnou příměsí pro kladné ovlivnění objemových změn betonu. Při jeho použití je však třeba pamatovat na pomalejší průběh a nástup jeho pucolánové reakce, díky čemu popílkové betony vykazují pomalejší náběh pevností, ačkoliv jejich výsledné pevnosti často značně převyšují pevnosti betonů bez popílku. [9]



Obr. 11: Vliv vysokoteplotního úletového popílku na smrštění betonu [O12]

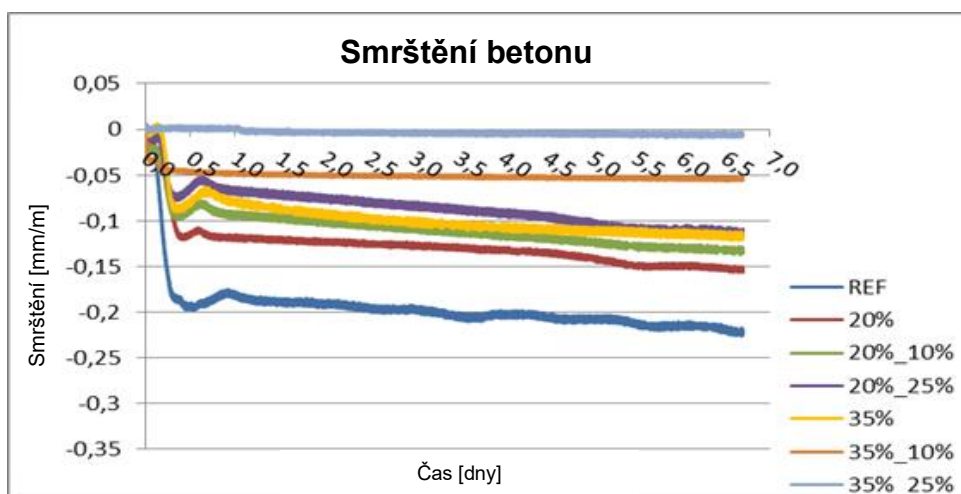
3.3.5.2 Fluidní popílky

Vzhledem k nevhodnému chemickému a mineralogickému složení je používání fluidních popílků jako příměsí do betonů řadou norem omezeno. Jeho vhodné uplatnění pro výrobu silikátových kompozitů je stále otázkou mnoha výzkumů. Jednou z možností se poté nabízí jeho uplatnění při výrobě cementu. Obsahuje totiž zvýšené množství volného aktivního CaO, síranů (SO_3) a nerozpustného anhydritu II. Tyto složky do jisté míry způsobují hydraulické

vlastnosti a v kombinaci s hlinitokřemičitou amorfni formou fluidních popílků ($x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2$) společně s aluminátovými bázemi portlandského slínku (převážně C_3A) dochází ke vzniku ettringitu ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), který zabraňuje rychlému tuhnutí cementu. [10]

Obecně rozšíření využití fluidního popílku do silikátových kompozitů brání právě vznikající ettringit, který může vznikat v již zpevněném kompozitu a vzhledem k velkému nárůstu svého objemu může narušovat konstrukci a způsobit její celkový kolaps. Z toho důvodu se fluidní popílek prozatím používá primárně pro zemní a rekultivační práce. [10]

Profesor Hela se svým kolektivem v experimentu zjistili, že fluidní popílek se dá ve vhodném poměru mísení s vysokoteplotním popílkem použít jako protismršťovací příměs. Předpokládali, že vyšší obsah CaO a SO_3 ve fluidním popílkem bude mít za následek tvorbu novotvarů vznikajících ještě v plastickém stavu betonu, kdy vzhledem k dostatečné tvárnosti betonu nezpůsobí tyto novotvary destrukci betonu a zároveň budou vzhledem k jejich charakteru působit pozitivně proti smrštění. Jak znázorňuje Obr. 12, nejvyšší hodnoty smrštění vykazovala zkušební záměs bez obsahu vysokoteplotního popílku či kombinace vysokoteplotního a fluidního popílku. Se zvyšujícím se obsahem příměsi či její kombinace hodnoty smršťování betonu klesaly. Jako nejvhodnější kombinace se jevila dávka 35 % vysokoteplotního popílku a jeho 25 % náhrada popílkem fluidním. Při této kombinaci došlo k minimální změně původního objemu. [19]



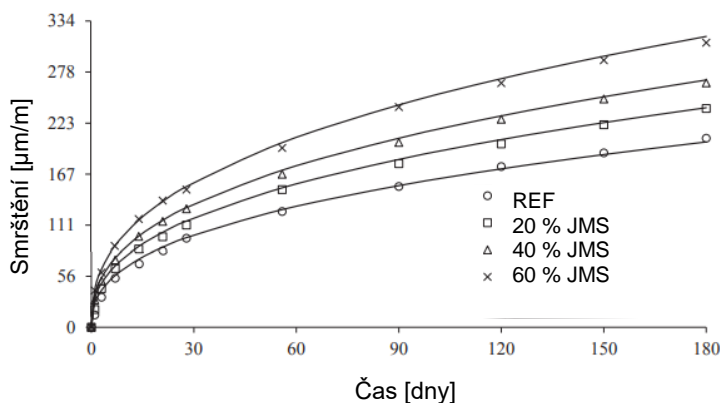
Obr. 12: Průběh smrštění betonu s náhradou vysokoteplotního popílku popílkem fluidním [O21]

3.3.5.3 Vysokopecní (granulovaná jemně mletá) struska (JMS)

Mletá vysokopecní granulovaná struska je latentně hydraulická látka, která vzniká ochlazováním tekoucí taveniny zásadité strusky vznikající při výrobě železa ve vysokých pecích. [3]

V porovnání s portlandským cementem probíhá hydratace strusky výrazně pomaleji. Je závislá na aktivaci Ca(OH)_2 a rozpustnými ionty alkálií dostupných při hydrataci portlandského cementu. Aktivita strusky je ovlivněna například chemickým složením, obsahem skelné fáze či jemností mletí. Aktivace strusky je poměrně pomalý proces, který způsobuje zpoždění hydratace strusky, což způsobuje pozvolnější nárůst pevností. Gelové hydratační produkty strusky zaplňují póry vzniklé v cementové pastě, čímž se cementová matrice stává více nepropustná vůči různým negativním vlivům, jako jsou například chloridy či sírany. Díky těmto produktům může být pozitivně ovlivněna nejen výsledná pevnost betonu, ale i jeho trvanlivost. [3]

V experimentu Shariqeho a jeho kolektivu bylo ověřeno rozdílné dávkování JMS na smršťování betonu. Referenční betonová směs obsahovala 400 kg/m^3 portlandského cementu a hodnota vodního součinitele byla 0,45. V dalších zkušebních záměsích byla pojivová složka nahrazena 20 %, 40 % a 60 % jemně mletou struskou při zachování konstantní hodnoty vodního součinitele. Nejnižší hodnotu smrštění betonové směsi vykazovala po 180 dnech zrání směs referenční, bez obsahu JMS. Se zvyšujícím se podílem JMS ve směsi se zároveň zvyšovala hodnota smrštění. Obsah této příměsi tedy negativně ovlivňuje smrštění a nedoporučuje se do betonů s požadavkem nízkých objemových změn. [20]



Obr. 13: Vliv jemně mleté granulované strusky na smršťování betonu [O23]

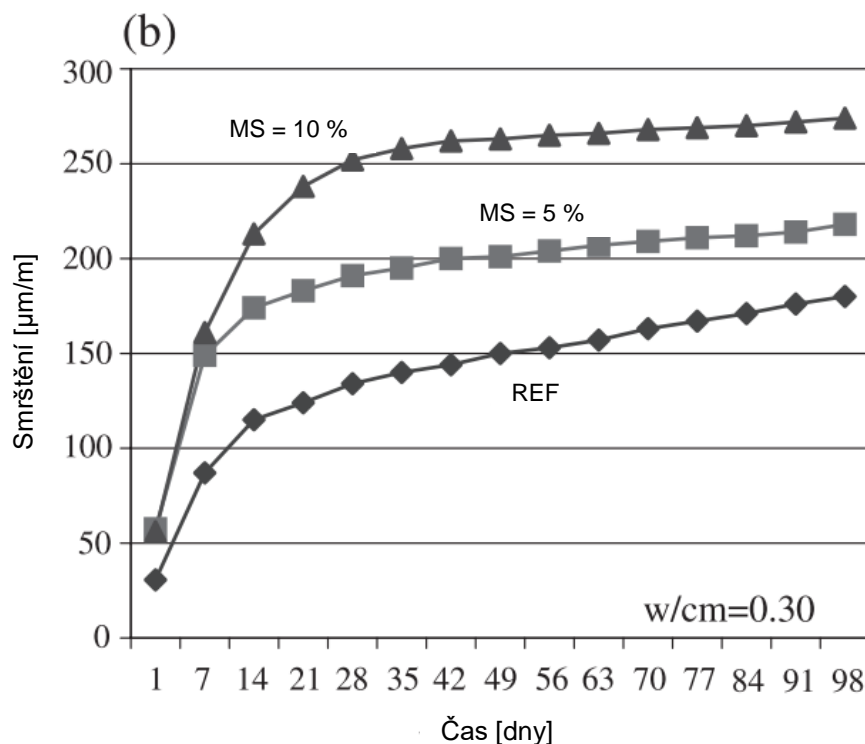
3.3.5.4 Křemičité úlety

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku. Křemík a jeho slitiny jsou vyráběny v obloukové elektrické peci, kde je křemen redukován v přítomnosti paliva. Během redukce křemene vzniká v dosahu elektrického oblouku plynný SiO. Jak tento plyn uniká k horní části pece, ochlazuje se, kondenzuje a oxiduje ve formě velmi jemných částic SiO₂, které jsou shromažďovány v odlučovacím systému. [2]

Z chemického hlediska jsou křemičité úlety tvořeny zejména silikou (SiO₂), proto se křemičité úlety také nazývají mikrosilikou. Obsah SiO₂ v křemičitých úletech kolísá v závislosti na typu produkované slitiny. Čím vyšší je obsah křemíku ve slitině, tím vyšší je obsah SiO₂ v křemičitém úletu. Běžně se obsah SiO₂ v křemičitých úletech pohybuje okolo 90 %. [2]

Z fyzikálního hlediska mají křemičité úlety dokonale kulovitý tvar o průměru 0,1 – 2 μm. To znamená, že průměrné zrno cementu je přibližně 100krát větší než částice křemičitého úletu, čímž zásadně ovlivňují mikrostrukturu betonu. Dochází k vyplnění prostorů mezi zrny cementu, čímž zvyšujeme mechanické parametry betonu. [5]

Dle experimentu Zhangeho a jeho kolektivu křemičité úlety negativně působí na smrštění betonu. V experimentu byla vytvořena referenční záměs bez použití křemičitých úletů, s obsahem cementu 497 kg/m³. Druhá zkušební záměs obsahovala 25 kg/m³ křemičitých úletů, 472 kg/m³ cementu se stejným vodním součinitelem. Třetí zkušební záměs obsahovala 50 kg/m³ křemičitých úletů, 447 kg/m³ cementu. Všechny záměsi měly stejnou hodnotu vodního součinitele – 0,30. Nejvyšší smrštění vykazovala zkušební směs s nejvyšším obsahem křemičitých úletů, viz Obr. 14). [18]



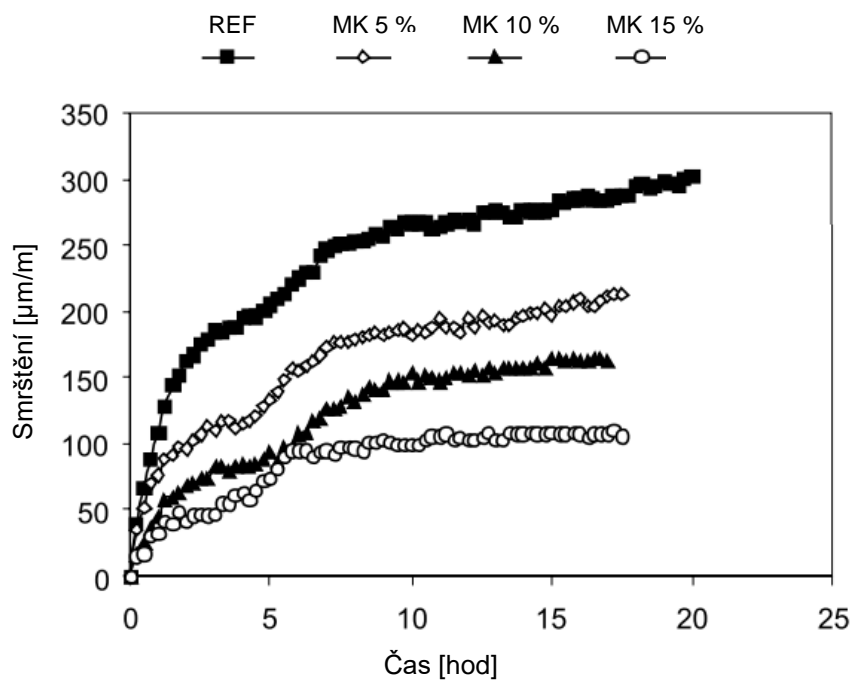
Obr. 14: Vliv dávkování křemičitých úletů na smrštění [O22]

3.3.5.5 Metakaolin

Metakaolin je cíleně vyráběný produkt z kaolinu nebo kaolinitických jíílů při teplotách v rozmezí 600 – 800 °C s měrným povrchem od 2 000 do 20 000 m²/kg. Metakaolin reaguje s Ca(OH)₂ za vzniku nových hydratačních produktů, které vznikají na místě slabého a rozpustného Ca(OH)₂, čímž dochází ke zvýšení trvanlivosti betonu. Tvorbou hydratačních produktů typu CSH a C₂ASH₈ zároveň dochází ke zkvalitnění mikrostruktury betonu. [3]

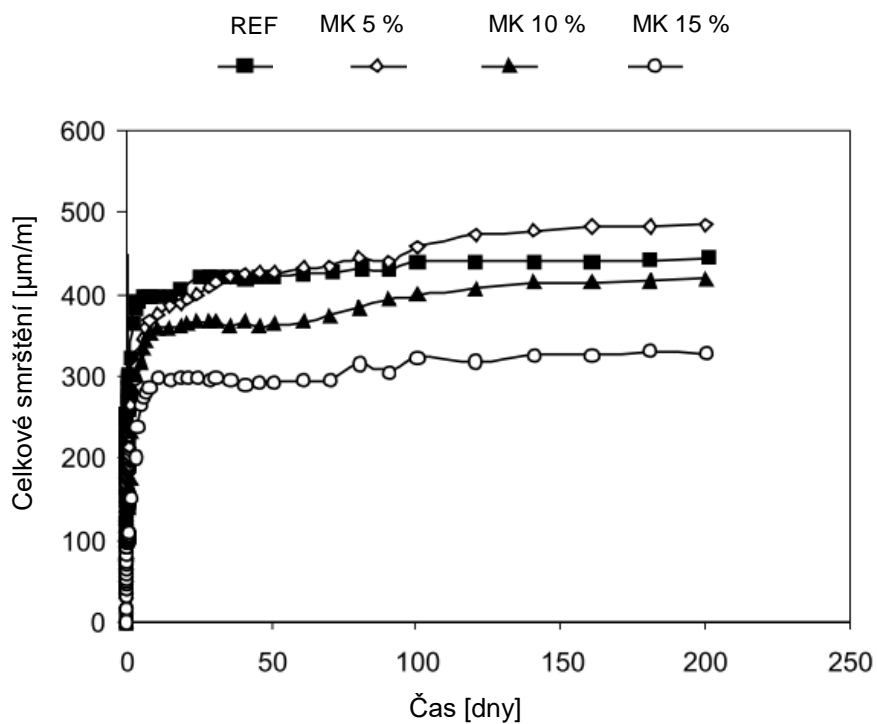
V porovnání s jinými minerálními příměsi, které jsou ve většině případů vedlejším energetickým produktem a mají variabilní složení, čistotu a reaktivitu, může být produkce metakaolinu pečlivě kontrolována, čímž lze dosáhnout vyššího stupně čistoty a pucolánové reaktivity. [11]

V experimentu Brookse bylo zjištěno, že nahrazením portlandského cementu metakaolinem se snižuje autogenní smrštění v počáteční fázi, viz obr. 15. [11]



Obr. 15: Vývoj počátečního autogenního smrštění v závislosti na dávce metakaolinu [O13]

Celkové smrštění ale ukázalo, že s přidavkem 5 % metakaolinu se hodnoty smrštění mírně zvyšují. Ke snížení smrštění dochází až při použití 10 a 15 % metakaolinitu, viz obr. 16. [11]



Obr. 16: Celkové smrštění v závislosti na dávce metakaolinu [O14]

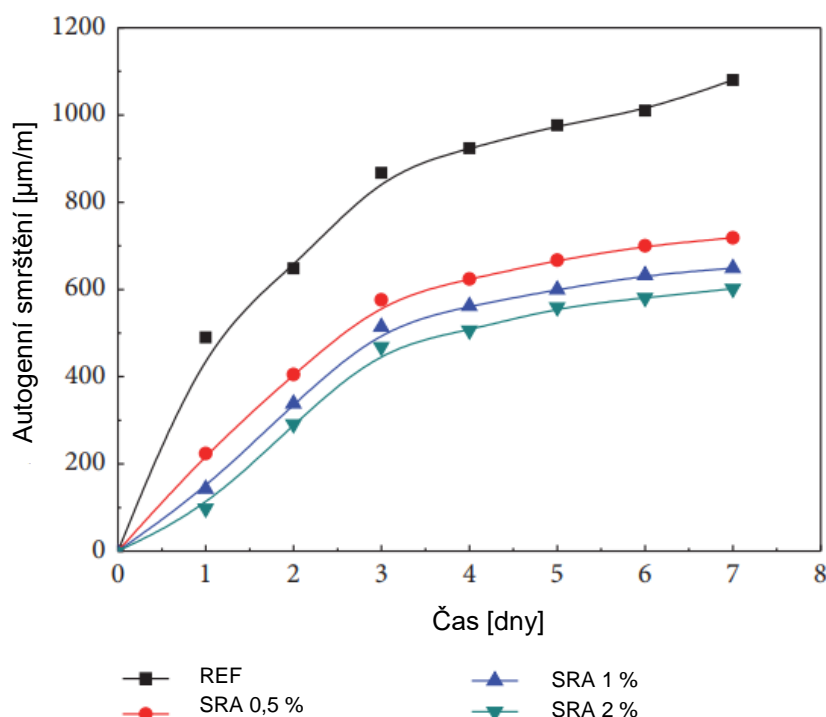
Pokud tedy chceme omezit smrštění nahrazením části cementu metakaolinem, doporučují se dávky minimálně 10 %, spíše 15 – 20 % z hmotnosti cementu.

3.4 Přísady redukující smrštění:

3.4.1 Protismršťovací přísady (SRA – shrinking reducing admixtures)

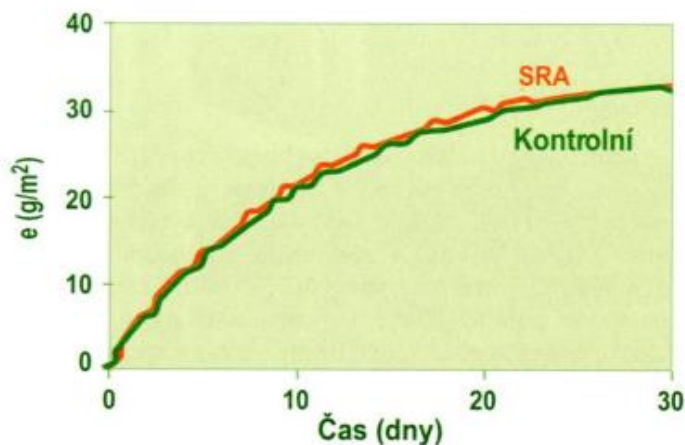
Pro snížení autogenního smrštění a smrštění od vysychání se doporučuje použití přísad redukujících smrštění (SRA). Dávkuje se obvykle v dávce 1 – 2 % z hmotnosti cementu a jsou na bázi neo-pentyl glykolu, případně podobných sloučenin (propylen-glykol), které mají za úkol snížit oba druhy smršťování.

Obrázek 17 znázorňuje smršťování po týdnu vlhkého ošetřování betonů s konstantní dávkou cementu, vodním součinitelem 0,25, dávkou superplastifikační přísady 1,8 % a rozdílným dávkováním SRA přísady, od 0,5 % do 2 % z hmotnosti cementu. Nejvyšší hodnoty smrštění vykazuje referenční záměs a se zvyšující se dávkou SRA dochází ke snížení smrštění. [12]



Obr. 17: Porovnání vývoje smrštění u betonů bez SRA a s rozdílným množstvím SRA [O15]

Přísada ovšem nezabrání odpařování vody z betonu uloženého v prostředí s relativní vlhkostí okolního prostředí nižší než 95 %. Obrázek 18 porovnává ztrátu hmotnosti vody zkušebních vzorků betonů se SRA a bez přísady, po 30 dnech zrání. Zkušební tělesa byla vystavena shodným klimatickým podmínkám (relativní vlhkost vzduchu 60 %, teplota 25 °C). [5]



Obr. 18: Odpařování vody ze směsi obsahující SRA a bez přísady [O16]

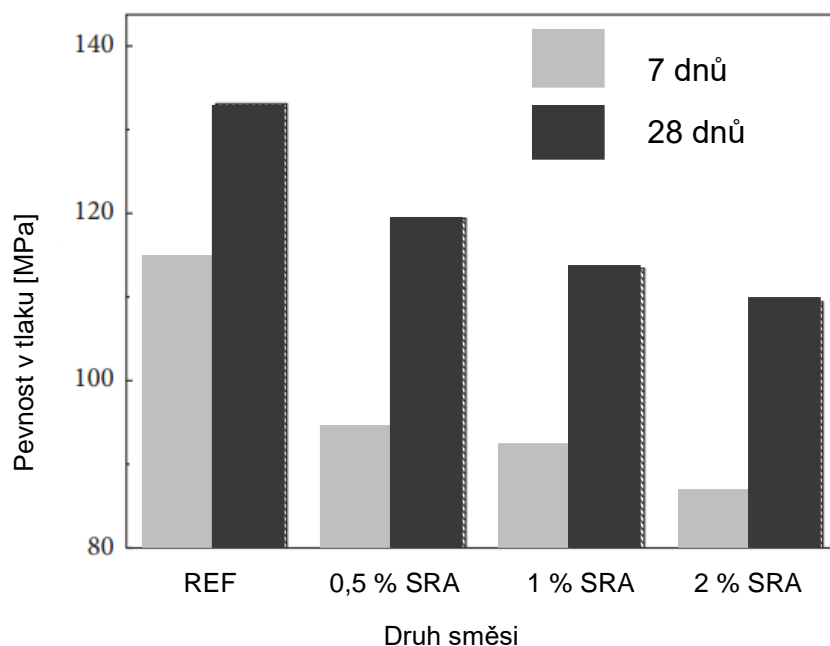
Vliv SRA na snížení hodnot smrštění betonu je přisuzováno snížení povrchového napětí vody (γ), čímž poklesne i kapilární tlak P . Ten je vyvolán vytvářením tvorbou vodních menisků v kapilárních pórech, jež způsobují smrštění cementové pasty. Kapilární tlak je povrchovým napětím dle rovnice:

$$P = 2\gamma/r\cos\theta \quad (4)$$

γ – povrchové napětí vody; r – poloměr pórů; θ – smáčecí úhel

3.4.1.1 Princip a vliv SRA

Jedním z faktorů smršťování betonu je vysychání vlivem povrchového napětí pórové vody, které se vyvíjí v malých pórech cementové pasty částečně ztvrdlého betonu. Protismršťovací přísada snižuje toto povrchové napětí vody, čímž se snižují i hodnoty smrštění. Nevýhodou je, že použití SRA zpomaluje hydrataci cementu a snižuje pevnosti v tlaku při použití 2 % z hmotnosti cementu až o 15 % ve srovnání s referenční směsí. V případě, že je takové snížení pevnosti betonu v tlaku nepřijatelné, je nutno zvýšit množství použité plastifikační přísady a zároveň mírně snížit dávku SRA. [8],[17], [12]



Obr. 19: Vliv protismršťovací přísady na pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech [O17]

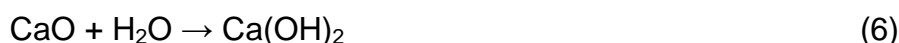
3.4.2 Rozpínavé přísady

Rozpínavé přísady jsou zvláštní anorganické látky, které po reakci s vodou expandují. Existuje několik skupin expanzivních činidel. Mezi nejvýznamnější patří skupina založená na kalcium-sulfo-aluminátu (C_4A_3S), ze kterého vzniká ettringit ($C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$) podle rovnice: [5]



Jedná se o tzv. primární ettringit, který působí jako regulátor tuhnutí C_3A a C_4AF , u kterých zpomaluje hydrataci. Tento ettringit, který vzniká v rozsahu několika minut či hodin od zamíchání, není považován za škodlivý, na rozdíl od sekundárního ettringitu. Ten se tvoří později a díky svému heterogennímu expanzivnímu působení poškozuje cementovou matici. [5]

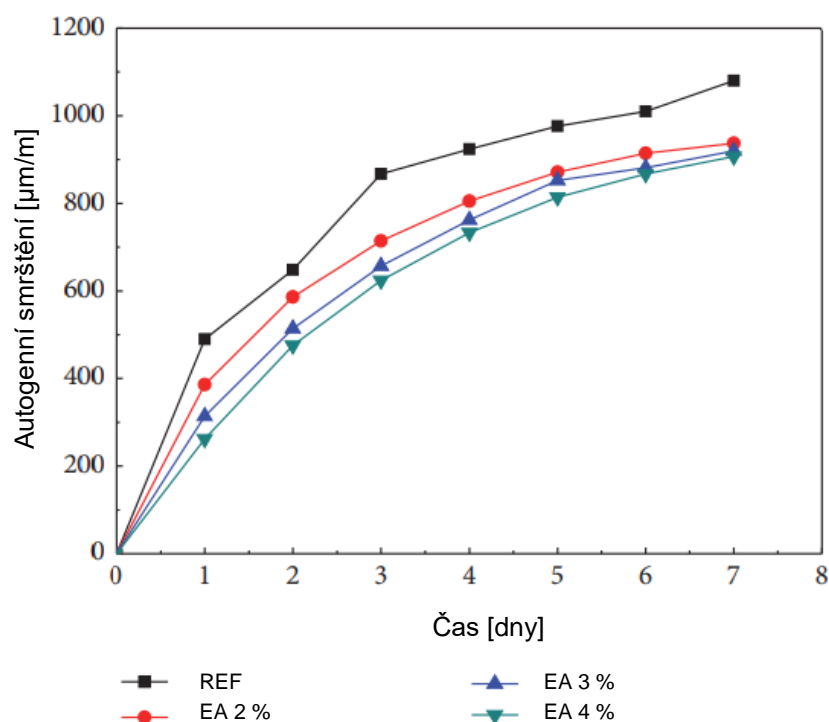
Mezi další expanzivní činidla se řadí mrtvě pálené CaO a MgO . Průběh jejich hydratace je dle rovnic: [5]



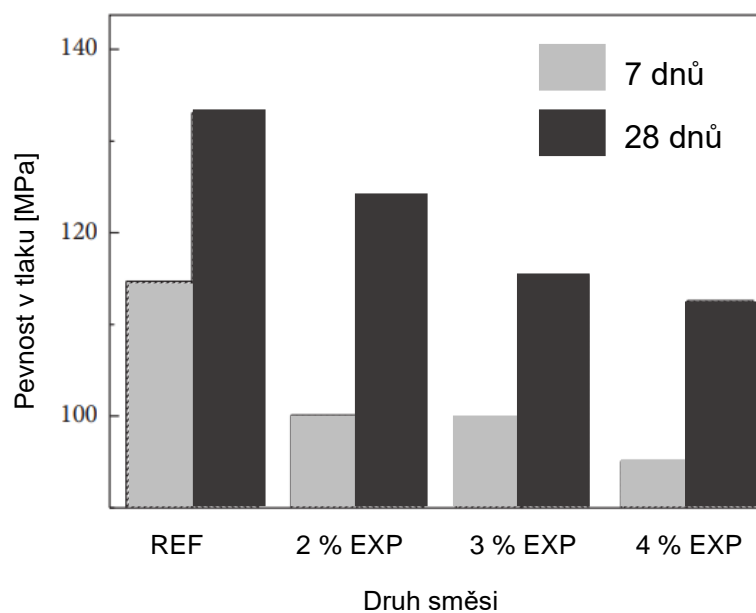
Běžně pálené CaO nebo MgO je páleno při teplotě $900\text{ }^\circ\text{C}$. Smícháním s vodou získáme vápenný hydrát $Ca(OH)_2$ nebo brucit $Mg(OH)_2$. Přeměna na

hydroxid nastává příliš velkou rychlostí v době, kdy je malta stále čerstvá. Z toho důvodu nejsou vhodné jako expanzivní přísady. V tu chvíli se totiž vyvíjí pevná vazba mezi betonem a výztuží. Beton je namáhán tlakovým napětím a výztuž tahovým, čímž získáme chemicky předpjatou konstrukci. [5]

Ve studii prováděné Su Anshuangem a jeho kolektivem bylo dokázáno, že s přibývajícím množstvím expanzivní přísady se smrštění betonové směsi snižuje (obr. 20). Tato studie také zjistila, že dávkováním expanzivního činidla vzrůstá obsah vzduchu v betonu a snižuje se tekutost čerstvého betonu. Dále bylo zjištěno, že s přibývajícím množstvím expanzivní přísady dochází k poklesu pevností v tlaku, zejména počátečních, ale s přibývajícím množstvím expanzivní přísady v betonové směsi se snižují i pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech normového zrání (viz Obr. 21). [12]



Obr. 20: Vliv expanzivních přísad na objemové změny betonu [O18]



Obr. 21: Vliv expanzivních přísad na pevnosti betonu v tlaku [O19]

Vliv expanzní přísady je podobný jako u protismršťovací přísady. S přibývajícím množstvím přísady se smrštění snižuje, ale zároveň dochází ke snížení konečných pevností.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Cíl

V rámci experimentální části bakalářské práce byly vyrobeny dva betony odlišných pevnostních tříd. Betonová směs s pevností v tlaku přibližně 75 MPa po 28 dnech normového zrání a betonová směs s pevností v tlaku přibližně 90 MPa po 28 dnech normového zrání. Hlavním cílem bylo stanovení vlivu SRA na objemové změny betonové směsi do 28 dnů zrání, vývin hydratačních teplot a zjištění vlivu na pevnost betonu v tlaku po 7 a 28 dnech normového zrání v rozdílném dávkování přísady. Pro ověření přesného dopadu SRA na vývoj hydratačních teplot a objemové změny směsi byly vyrobeny cementové pasty, které obsahovaly stejné procentuální zastoupení přísad jako zkušební betonové záměsi.

4.2 Vstupní suroviny

4.2.1 Cement

Jako pojivo byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R vyrobený společností Českomoravský cement, a. s. v závodě Mokrý. Základní informace o této surovině jsou uvedeny v Tab. 1. Zbylé informace jsou obsaženy v technickém listu poskytnutým výrobcem. [T4]

Tab. 1: Základní informace o CEM I 42,5 R

Surovina	Pevnost v tlaku za 2 dny [MPa]	Pevnost v tlaku za 28 dní [MPa]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]	Hydratační teplo [J·g ⁻¹]
CEM I 42,5 R	29	61	219	286	374	3110	310

4.2.2 Kamenivo

Pro výrobu vysokopevnostních betonů byly použity celkem 4 frakce kameniva v poměru mísení závislém na pevnostní třídě betonu. Základní informace o všech frakcích jsou obsaženy v Tab. 2. Zbylé informace jsou dostupné v technických listech jednotlivých frakcí. [T6],[T7],[T8],[T9]

Tab. 2: Základní informace o použitém kamenivu

Vlastnost	Kamenivo			
	0-4 Žabčice	4-8 Olbramovice	8-16 Olbramovice	11-22 Olbramovice
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2560	2 640	2630	2620
Nasákavost [%]	2	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Petrografický název	Fluviální sediment	Granodiorit		

4.2.3 Voda

Záměsová voda pro výrobu betonových směsí byla použita pitná voda z vodovodního řadu, který spravuje společnost Brněnské vodárny a kanalizace, a. s..

4.2.4 Plastifikační přísada

Ke snížení množství záměsové vody byla použita superplastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1035 CZ na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Doporučené dávkování od výrobce je 0,2 – 1,7 % z hmotnosti cementu. V rámci experimentu bylo pro beton s pevností v tlaku přibližně 75 MPa použito 1 % z hmotnosti cementu a v případě betonu s vyšší pevností v tlaku, přibližně 90 MPa, bylo použito 1,2 % této superplastifikační přísady. Veškeré informace o tomto výrobku jsou dostupné v technickém listu tohoto výrobku. [T10]

4.2.5 Protismršťovací přísada

Ke snížení objemových změn byly použity tři druhy protismršťovacích přísad od stejného výrobce. Doporučené dávkování výrobcem se pohybuje v rozmezí 0,5 – 2 % z hmotnosti cementu. V experimentu u betonu s nižší pevností v tlaku bylo zvoleno minimální a maximální množství každé přísady a byl sledován její vliv na objemové změny a vývin hydratačních teplot v betonové

směsi. U betonu s vyšší pevností v tlaku byla použita tato přísada v konstantní dávce 1,1 % z hmotnosti cementu a byly sledovány stejné parametry. Podrobné údaje o těchto protismršťovacích přísadách a jejich chemických bázích jsou uvedené v příložených technických listech. [T1], [T2], [T3]

4.2.6 Mikrosilika

Pro zlepšení mikrostruktury betonu s vyšší pevností bylo použito mikrosiliky z výrobního závodu OFZ z Istebné v dávce 40 kg/m³. Její základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 3. Další informace jsou uvedené v technickém listu tohoto materiálu. [T5]

Tab. 3: Základní vlastnosti použité mikrosiliky

Název	Průměr zrn [μm]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO + MgO [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	ZŽ [%]
Mikrosilika	0,1 – 0,2	91,0	0,3	1,5	1,5	0,5	1,3

4.3 Beton s pevností v tlaku 75 MPa

4.3.1 Metodika výroby

Konzistence všech zkušebních směsí byla navržena na metodu sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N2] v rozmezí 160 – 180 mm. Vstupními surovinami byl portlandský cement CEM I 42,5 R z lokality Mokrá, drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm z lomu Žabčice, hrubé drcené kamenivo 4-8 mm, 8-16 mm a 11-22 mm z lomu Olbramovice. Jednotlivé frakce kameniva byly míseny v poměru (od nejmenší frakce) 48 %, 10 %, 24 % a 18 %. Množství záměsové vody bylo voleno s ohledem na dosažení požadované konzistence a její rozdílné množství bylo kompenzováno množstvím kameniva v souladu s rovnicí absolutních objemů.

Celkem bylo vyrobeno 7 záměsí. Jedna záměs referenční, bez obsahu SRA a další zkušební záměsi, kde byly použity 3 druhy SRA, konkrétně Sika Control 40, Sika Control 60 a Sika Addiment SR 1; v rozdílném dávkování. Od každé SRA se vždy volilo minimální (0,5 % z hmotnosti cementu) a maximální (2 % z hmotnosti cementu) množství dávkování doporučené výrobcem těchto přísad. [T1], [T2], [T3]

4.3.2 Složení betonové směsi

Tab. 4: Složení betonových směsí

Druh směsi	Surovina [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]							
	CEM I 42,5 R	Voda	DTK 0-4	HDK 4-8	HDK 8-16	HDK 11-22	Plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035 CZ - 1 % z m_c	SRA
			Žabčice	Olbramovice				
REFERENČNÍ	450	175	840	175	419	315	4,5	0
CONTROL 40_0,5 %	450	175	840	175	419	315	4,5	2,25
CONTROL 40_2 %	450	160	859	178	429	322	4,5	9
CONTROL 60_0,5 %	450	175	840	175	419	315	4,5	2,25
CONTROL 60_2 %	450	160	859	178	429	322	4,5	9
ADDIMENT_0,5 %	450	175	840	175	419	315	4,5	2,25
ADDIMENT_2 %	450	160	859	178	429	322	4,5	9

4.3.3 Zkoušky prováděné v čerstvém stavu betonových směsí

Pro ověření dopadu SRA byly provedeny základní zkoušky na čerstvém betonu:

- Sednutí kužele v čase 5 minut dle ČSN EN 12350 – 2 [N2]
- Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350 – 6 [N3]

Vyhodnocení jednotlivých zkoušek betonových směsí v čerstvém stavu včetně hodnoty vodního součinitele betonové směsi je uvedeno v tabulce 5.

Tab. 5: Vodní součinitel, konzistence a objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu

Druh směsi	Vodní součinitel	Sednutí kužele [mm]	Konzistence	Ø D _{čb} [kg·m ⁻³]
REFERENČNÍ	0,39	180	S4	2410
CONTROL 40_0,5 %	0,39	170	S4	2410
CONTROL 40_2 %	0,36	160	S4	2410
CONTROL 60_0,5 %	0,39	180	S4	2410
CONTROL 60_2 %	0,36	170	S4	2400
ADDIMENT_0,5 %	0,39	170	S4	2390
ADDIMENT_2 %	0,36	160	S4	2410

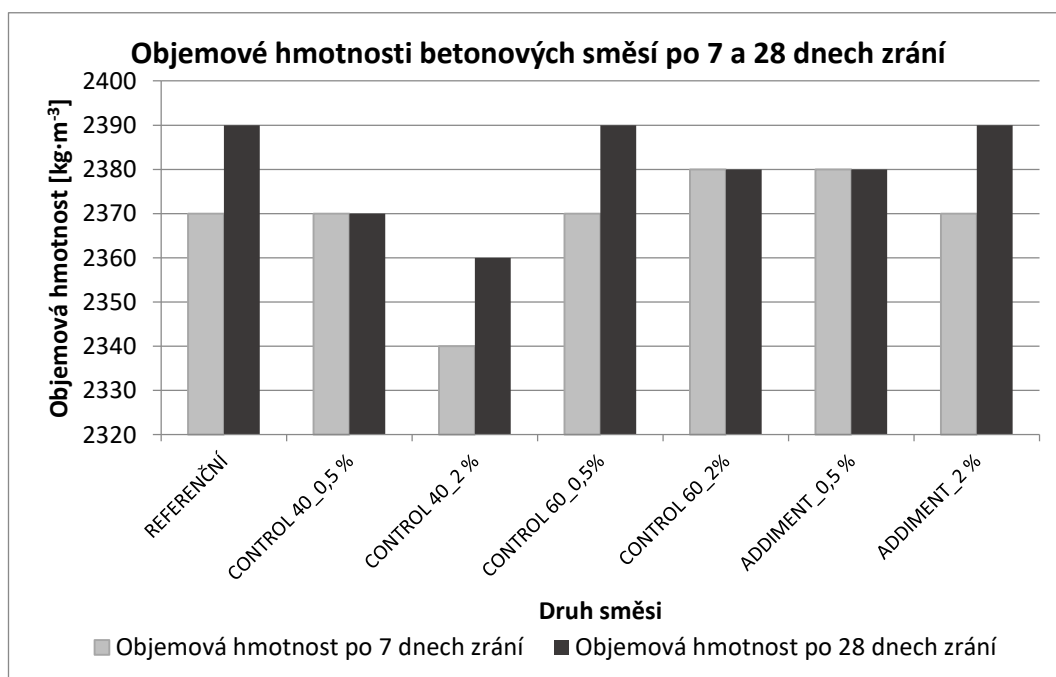
4.3.4 Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu po 7 a 28 dnech zrání

Stanovení objemové hmotnosti betonové směsi ve ztvrdlém stavu proběhlo po 7 a 28 dnech zrání v souladu s ČSN EN 12390 – 7 [N5] vždy na dvou zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm od každé betonové záměsi. Na stejných zkušebních vzorcích se následně stanovila pevnost v tlaku po 7 či 28 dnech zrání dle ČSN EN 12390 – 3 [N6]. Výsledné hodnoty obou zkoušek po 7 nebo 28 dnech zrání jsou stanoveny průměrem hodnot získaných na zkušebních tělesech a jsou uvedeny v tabulce 6, ve které je uveden i procentuální vliv SRA obsažené v betonové směsi na pevnost v tlaku v porovnání s referenční záměsí. Zároveň byly měřeny objemové změny betonové směsi pomocí smršťovacích žlabů. Popis této zkoušky je předmětem další kapitoly této práce.

Tab. 6: Mechanické parametry betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

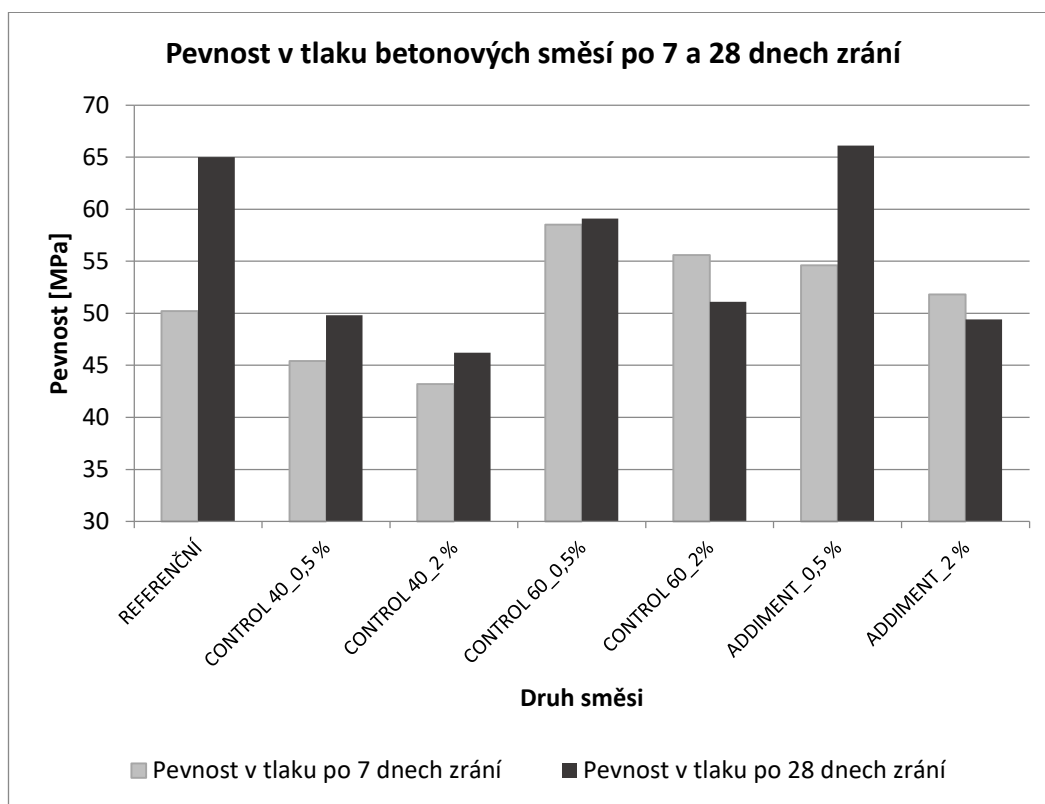
Druh směsi	$\emptyset D_{ZB7}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset f_{c7}$ [MPa]	Vliv SRA na f_{c7} [%]	$\emptyset D_{ZB28}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset f_{c28}$ [MPa]	Vliv SRA na f_{c28} [%]
REFERENČNÍ	2370	50,2	—	2390	65,0	—
CONTROL 40_0,5 %	2370	45,4	- 9,6	2370	49,8	-23,4
CONTROL 40_2 %	2340	43,2	- 13,9	2360	46,2	- 28,9
CONTROL 60_0,5%	2370	58,5	+ 16,5	2390	59,1	- 9,1
CONTROL 60_2%	2380	55,6	+ 10,8	2380	51,1	- 21,4
ADDIMENT_0,5 %	2380	54,6	+ 8,8	2380	66,1	+ 1,7
ADDIMENT_2 %	2370	51,8	+ 3,2	2390	49,4	- 24,0

4.3.4.1 Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění



Graf 1: Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

4.3.4.2 Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění



Graf 2: Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

Diskuze výsledků

Nejvyšší pevnost v tlaku po 7 dnech zrání vykazovala betonová záměs s přísadkou SRA Sika Control 40 v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu, konkrétně 58,5 MPa. Bylo očekáváno, že nejvyšší pevnosti v tlaku bude ze všech betonových směsí vykazovat směs referenční, bez přísadky SRA. Jak prokazují některé zahraniční studie citované v teoretické části této bakalářské práce, přísadka SRA zpomaluje proces hydratace cementu, což způsobuje pozvolný nárůst pevností. Toto tvrzení se však nepodařilo prokázat.

Maximální pevnost v tlaku po 28 dnech zrání vykazovala betonová směs s přísadkou SRA Sika Control 60 v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu, konkrétně 66,1 MPa. Opět bylo očekáváno, že nejvyšší pevnosti v tlaku bude dosahovat směs referenční, neboť se vzrůstajícím obsahem SRA ve směsi dochází ke snížení konečných pevností, tak, jak je uvedeno v rešerši výzkumné práce uvedené v teoretické části práce v kapitole 3.4.1.1 Princip a vliv SRA.

Dle složení betonové směsi byla očekávaná pevnost u referenční směsi pohybující se okolo 75 MPa. Možné důvody nedosažení předpokládaných pevností ani u referenční směsi jsou rozebrány v kapitole 4.7 Možné příčiny nízkých pevností.

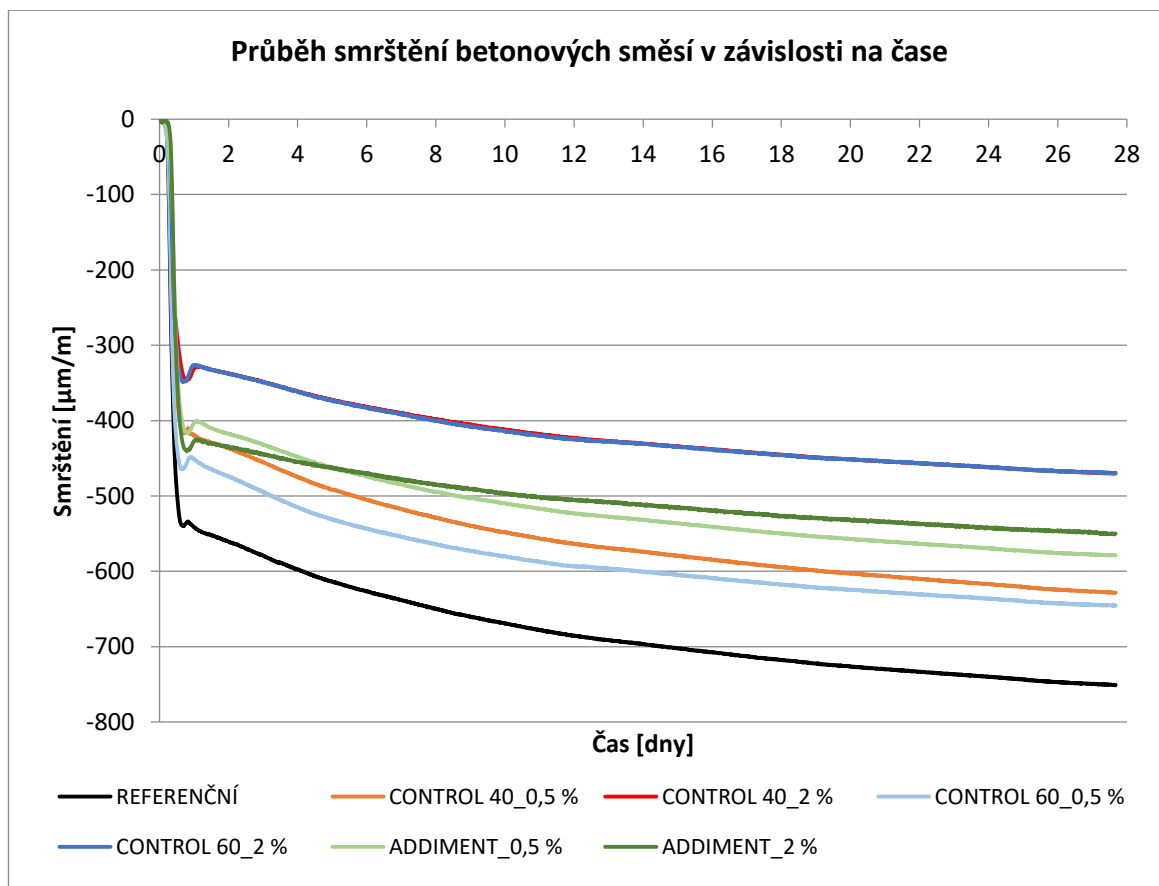
4.3.5 Smrštění betonových směsí:

Stanovení objemových změn betonu proběhlo pomocí zkušebních žlabů od firmy Schleibinger Geräte o rozměrech 60/100/1000 mm, který je na jedné straně opatřen pevnou, na druhé straně pohyblivou zarážkou. Pohyblivá zarážka je napojena na senzor, který zaznamenává objemové změny každých 15 minut po celou dobu měření. Celý zkušební postup odpovídá požadavkům rakouské normy OENORM B 3329. Tyto žlaby jsou zároveň znázorněny na Obr. 26 ve fotodokumentaci. Pro stanovení průběhu objemových změn betonových směsí byly od každé receptury naplněny vždy dvě zkušební formy a jako výsledná hodnota smrštění je brán průměr z těchto dvou stanovení. V tabulce 7 jsou zaznamenány hodnoty smrštění jednotlivých betonových směsí po 24 hodinách, 7 a 28 dnech od zamíchání. Zároveň je zde uvedena procentuální redukce smrštění v porovnání s referenční směsí v daných časech.

Tab. 7: Hodnoty smrštění a redukce smrštění u betonových směsí

Název směsi	Smrštění po 24 hod [μm/m]	Redukce smrštění [%]	Smrštění po 7 dnech [μm/m]	Redukce smrštění [%]	Smrštění po 28 dnech [μm/m]	Redukce smrštění [%]
REFERENČNÍ	541,39	—	638,43	—	750,89	—
CONTROL 40_0,5 %	419,47	23	517,12	19	628,36	16
CONTROL 40_2 %	330,20	39	390,02	39	470,28	37
CONTROL 60_0,5 %	450,44	17	554,20	13	645,29	14
CONTROL 60_2 %	326,08	40	392,00	39	469,21	38
ADDIMENT_0,5 %	402,83	26	484,47	24	578,92	23
ADDIMENT_2 %	427,86	21	478,98	25	550,08	27

4.3.5.1 Smrštění betonových směsí – grafické znázornění



Graf 3: Průběh smrštění betonových směsí v závislosti na čase

Diskuze výsledků

U betonu s pevností v tlaku po 28 dnech zrání přibližně 75 MPa bylo očekáváno, že nejvyšší hodnotu smrštění bude vykazovat směs referenční, dále směsi s obsahem SRA v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu a nejnižší hodnoty smrštění budou vykazovat směsi s přidavkem SRA v dávce 2 % z hmotnosti cementu. Toto očekávání bylo potvrzeno. Směs referenční vykazovala po 24 hodinách smrštění 541 $\mu\text{m}/\text{m}$, po 7 dnech zrání 628 $\mu\text{m}/\text{m}$ a po 28 dnech zrání 751 $\mu\text{m}/\text{m}$. Nejúčinnější protismršťovací přísadou byla v dávce 2 % z hmotnosti cementu přísada Sika Control 60 a Sika Control 40, které vykazovaly téměř totožný průběh smrštění a téměř stejnou redukci smrštění v porovnání s referenční směsí o 38 %. Mezi směsí s obsahem SRA Sika Addiment v dávce 0,5 % a 2 % z hmotnosti cementu nebyl příliš velký rozdíl. Zkušební záměs s nižším obsahem této přísady dokonce vykazovala

vyšší hodnotu redukce smrštění po 24 hodinách – 26 % a směs s vyšším obsahem přísady redukovala smrštění o 21 %. Po 28 dnech zrání tato směs redukovala smrštění o 27 % a směs s nižším obsahem přísady redukovala smrštění o 23 %. Sika Control 40 v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu redukovala smrštění v porovnání s referenční směsí po 28 dnech zrání o 16 % a nejnižší redukci vykazovala zkušební záměs s přídatkem SRA Sika Control 60 v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu – o 14 %.

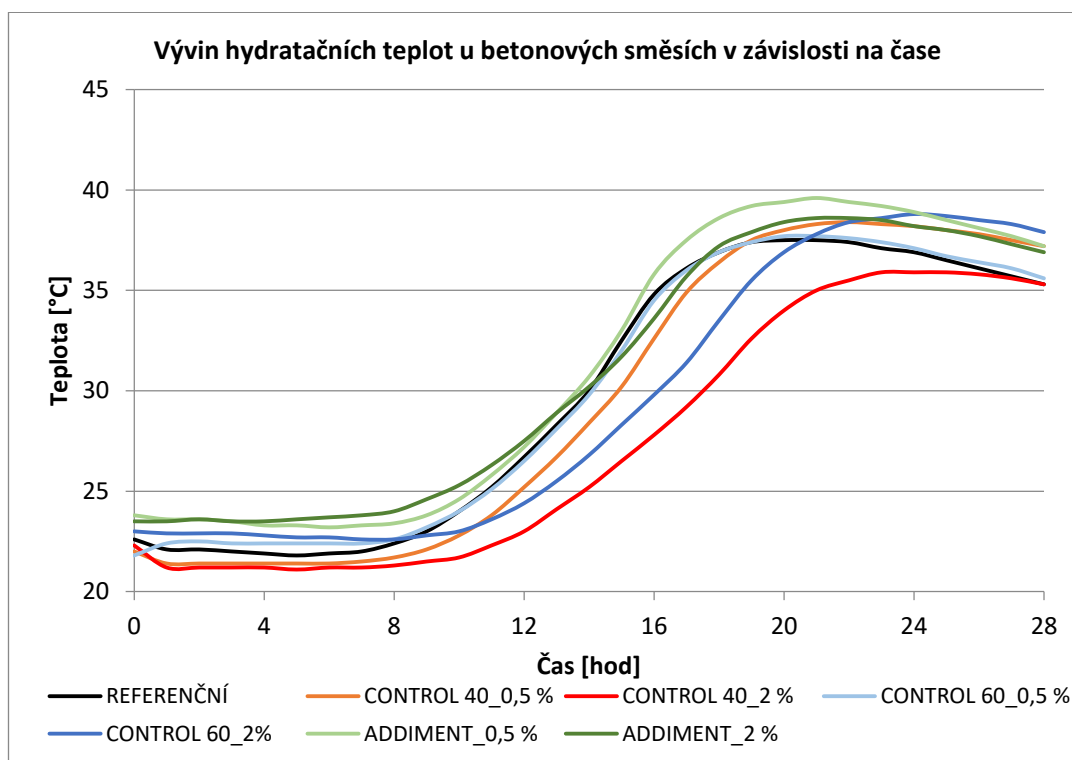
4.3.6 Průběh hydratačních teplot betonových směsí

V rámci experimentu bylo úkolem stanovení průběhu hydratačních teplot vyrobených betonových směsí. Toto měření probíhalo pomocí dataloggeru TESTO, který zaznamenával teploty betonu v intervalu 5 minut. Čidlo tohoto přístroje bylo umístěno přibližně uprostřed zkušební krychle o hraně 150 mm, která byla uložena v izolované formě a umístěná v laboratoři při standardních laboratorních podmínkách. Způsob měření je znázorněn ve fotodokumentaci. V tabulce 8 jsou zaznamenány maximální dosažené teploty betonové směsi a zároveň časy, které byly k dosažení této teploty potřeba.

Tab. 8: Maximální dosažené teploty betonových směsí a časy k nim potřebné

Název směsi	Maximální dosažená teplota [°C]	Čas dosažení maximální teploty [hod:min]
REFERENČNÍ	37,6	20:50
CONTROL 40_0,5 %	38,4	21:20
CONTROL 40_2 %	36,0	22:55
CONTROL 60_0,5 %	37,7	21:10
CONTROL 60_2 %	38,7	24:10
ADDIMENT_0,5 %	39,6	21:05
ADDIMENT_2 %	38,6	21:50

4.3.6.1 Průběh hydratačních teplot betonových směsí – grafické znázornění



Graf 4: Vývin hydratačních teplot v betonových směsích

Diskuze výsledků

Betonové směsi vykazovaly maximální dosaženou teplotu v rozmezí 37 – 40 °C. Kamenivo v betonových směsích akumuluje teplo, čímž ovlivňuje maximální dosažené výsledky a vyhodnocení maximálních teplot není tak zcela průkazné. Pro zjištění přesného vlivu SRA na cementový tmel betonové směsi, byly namíchány cementové pasty se stejným procentuálním zastoupením přísad jako v jednotlivých betonových směsích, na kterých je účinek SRA na vývin hydratačních teplot i objemové změny zřetelnější.

4.4 Cementová pasta

Pro ověření přesného dopadu protismršťovacích přísad na objemové změny a vývin hydratačních teplot v betonech byly vyrobeny cementové pasty z 1 kilogramu stejné pojivové složky jako u betonových směsí, tedy portlandského cementu CEM I 42,5 R, které obsahovaly stejné procentuální

zastoupení použitých přísad jako v jednotlivých betonových směsích. Složení jednotlivých cementových past je uvedeno v tabulce 9.

Tab. 9: Složení cementových past

Druh směsi	Surovina				
	CEM I 42,5 R [g]	Voda [g]	Plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035 - 1 % z m_c [g]	SRA [%]	SRA [g]
REFERENČNÍ	1000	260	10	0	0
CONTROL 40_0,5 %	1000	255	10	0,5	5
CONTROL 40_2 %	1000	230	10	2	20
CONTROL 60_0,5 %	1000	250	10	0,5	5
CONTROL 60_2 %	1000	215	10	2	20
ADDIMENT_0,5 %	1000	250	10	0,5	5
ADDIMENT_2 %	1000	215	10	2	20

4.4.1 Zkoušky provedené v čerstvém stavu

Množství vody bylo stanoveno variabilně pro dosažení stejného stupně konzistence všech vyrobených past. Konzistence byla stanovena rozlitím pomocí střešovacího stolku dle ČSN EN 1015 – 3 [N7] a pohybovala se v rozmezí 230 – 260 mm. Hodnoty vodního součinitele a průměry rozlití cementových past jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10: Vodní součinitel a rozlití cementových past

Cementová pasta	Vodní součinitel	Rozlití [mm]
REFERENČNÍ	0,260	235
CONTROL 40_0,5 %	0,255	250
CONTROL 40_2 %	0,230	240
CONTROL 60_0,5 %	0,250	235
CONTROL 60_2 %	0,215	250
ADDIMENT_0,5 %	0,250	225
ADDIMENT_2 %	0,215	260

4.4.2 Průběh smrštění cementových past

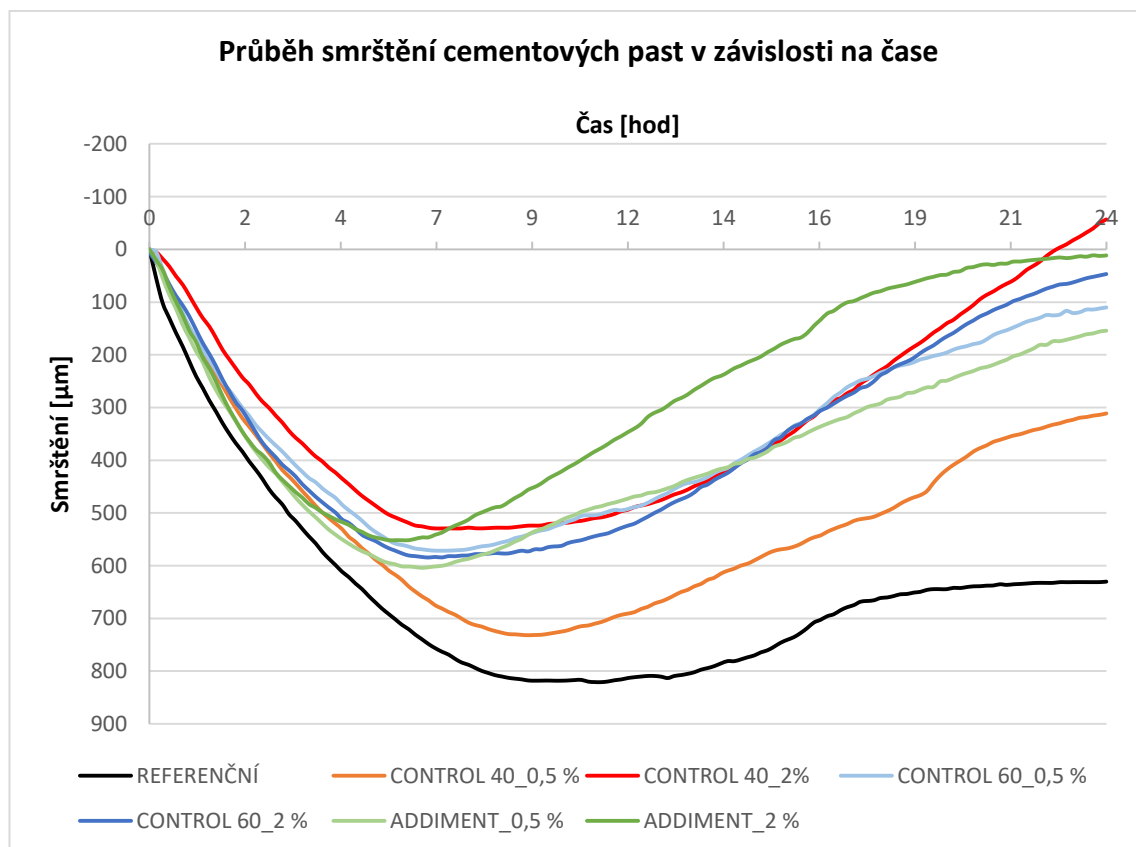
Namíchanými cementovými pastami se naplnily kónické kužely, které se umístily do zařízení měřící objemové změny pomocí laserového paprsku s rozlišením 1/10 mikrometru. Zařízení je vyrobeno firmou Schleibinger Geräte a je znázorněno ve fotodokumentaci. V tabulce 11 jsou uvedeny maximální

hodnoty smrštění cementové pasty a čas, za který bylo těchto hodnot dosaženo, hodnoty smrštění cementových past po 24 hodinách od zamíchání a procentuální snížení smrštění cementových past v porovnání s referenční cementovou pastou bez obsahu SRA.

Tab. 11: Maximální smrštění a smrštění po 24 hodinách u cementových past

Název směsi	Maximální smrštění [μm]	Čas k dosažení smrštění [hod:min]	Smrštění po 24 hod [μm]	Redukce smrštění po 24 hod [%]
REFERENČNÍ	820,87	11:20	630,28	—
CONTROL 40_0,5 %	731,86	8:55	311,26	51
CONTROL 40_2 %	529,36	7:10	-56,84	109
CONTROL 60_0,5 %	571,56	7:20	110,17	83
CONTROL 60_2 %	584,52	7:00	46,81	93
ADDIMENT_0,5 %	604,11	6:40	154,31	76
ADDIMENT_2 %	551,68	6:20	11,59	98

4.4.2.1 Průběh smrštění cementových past – grafické znázornění



Graf 5: Průběh smrštění cementových past v závislosti na čase

Diskuze výsledků

V případě cementových past nejvyšší smrštění vykazovala směs referenční, která dosáhla hodnoty smrštění 821 μm . Nejvyšší redukci objemové změny vykazovala směs s přídavkem SRA Sika Control 40 v dávce 2 % z hmotnosti cementu. U této směsi byla hodnota smrštění po 24 hodinách od zamíchání kladná, což znamená, že směs v tomto času mírně zvýšila svůj objem oproti původnímu stavu. S největší pravděpodobností se v této směsi začaly vlivem chemických reakcí tvořit novotvary, které měly větší objem. Toto tvrzení je podloženo grafem č. 5, na kterém je vidět, že veškeré směsi se po zamíchání smršťují a následně bobtnají. U této směsi byla fáze bobtnání nejvýraznější. Dá se ovšem předpokládat, že vlivem vysychání a dalších chemických reakcí by cementová pasta začala postupně svůj objem snižovat. Další nejvyšší redukci smrštění vykazovala zkušební směs s obsahem SRA Sika Addiment SR 1 a Sika Control 60 v dávce 2 % z hmotnosti cementu. Tyto zkušební směsi vykazovali redukci smrštění o 98 a 93 % v porovnání s referenční cementovou pastou. Jako neúčinnější směs s obsahem SRA v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu se jevila směs se Sika Control 60, která redukovala smrštění o 83 %, dále Sika Addiment SR 1 o 76 % a nejnižší redukci smrštění v této dávce vykazovala směs se Sika Control 40 o 51 %.

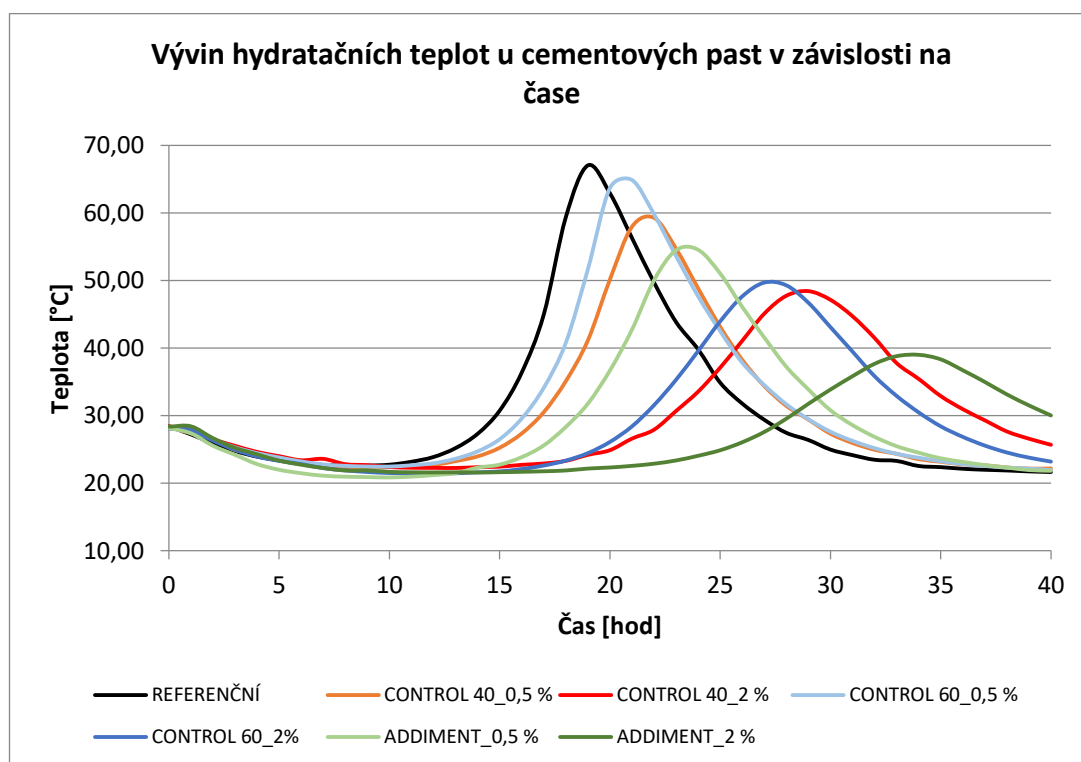
4.4.3 Vývin hydratačních teplot v cementových pastách

Měření vývoje hydratačního teplot probíhalo semiadiabatickou metodou dle ČSN EN 196 – 1 [N8]. Cementové pasty byly vloženy do kalorimetrů umístěných v klimatizační komoře při teplotě 20 °C. Hodnoty hydratačních teplot v cementových pastách byly pomocí senzorů zaznamenávány každé 2 minuty a následně zpracovány do grafů. Průběh měření je zaznamenán ve fotodokumentaci. Tabulka 12 udává maximální dosažené hodnoty cementových past a čas, za který těchto teplot dosáhly.

Tab. 12: Maximální dosažené teploty v cementových pastách a časy k nim potřebné

Název směsi	Maximální dosažená teplota [°C]	Čas dosažení maximální teploty [hod:min]
REFERENČNÍ	67,08	19:00
CONTROL 40_0,5 %	59,79	21:34
CONTROL 40_2 %	48,48	28:54
CONTROL 60_0,5 %	65,87	20:42
CONTROL 60_2 %	49,82	27:18
ADDIMENT_0,5 %	55,19	23:40
ADDIMENT_2 %	39,01	33:44

4.4.3.1 Vývin hydratačních teplot u cementových past – grafické znázornění



Graf 6: Vývin hydratačních teplot v cementových pastách

Diskuze výsledků

Při měření vývoje hydratačních teplot bylo dle očekávání dosaženo nejvyšší teploty u směsi referenční – 67,08 °C, poté u směsí, které obsahovaly pouze 0,5 % SRA z hmotnosti cementu a to v pořadí Sika Control 60, Sika Control 40 a Sika Addiment SR1. U cementových past s obsahem SRA v dávce 2 % z cementu se maximální dosažená teplota v jednotlivých záměsích

pohybovala ve stejném pořadí, jako u obsahu SRA 0,5 %, tedy Sika Control 60, Sika Control 40 a Sika Addiment SR1. Dle průběhu grafu se dá tedy konstatovat, že se zvyšujícím se obsahem SRA ve směsi se snižuje maximální dosažená hodnota hydratační teploty cementové pasty a zároveň se prokazuje oddálení počátku a doby hydratace po použití SRA.

4.5 Beton s pevností v tlaku 90 MPa

4.5.1 Metodika výroby

Konzistence všech zkušebních směsí byla navržena na metodu sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N2] v rozmezí 160 – 180 mm. Vstupními surovinami byl opět portlandský cement CEM I 42,5 R z lokality Mokrá, drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm z lomu Žabčice, hrubé drcené kamenivo 4-8 mm, 8-16 mm a 11-22 mm z lomu Olbramovice. Jednotlivé frakce kameniva byly míseny v poměru (od nejmenší frakce) 40 %, 11 %, 28 % a 21 %. V této receptuře byla navíc použita mikrosilika v dávce 40 kg/m³ od výrobce OFZ z Istebné z důvodu zlepšení mechanických vlastností betonové směsi. [T5]

Celkem byly vyrobeny 4 betonové záměsi. Jedna záměs referenční, bez přídavku SRA a další 3 zkušební záměsi s přidáním rozdílné SRA v konstantní dávce 1,1 % z hmotnosti jemných částic, tedy celkové hmotnosti cementu a mikrosiliky.

4.5.2 Složení betonové směsi

Tab. 13: Složení betonových směsí

Druh směsi	Surovina [kg·m ⁻³]								
	CEM I 42,5 R	Mikrosilika	Voda	DTK 0-4 Žabčice	HDK 4-8	HDK 8-16	HDK 11-22	Plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035 CZ – 1,2 % z hmotnosti jemných částic	SRA
REFERENČNÍ	480	40	175	840	175	419	315	6,24	—
CONTROL 40_1,1 %	480	40	175	840	175	419	315	6,24	5,72
CONTROL 60_1,1 %	480	40	170	840	175	419	315	6,24	5,72
ADDIMENT_1,1 %	480	40	180	840	175	419	315	6,24	5,72

4.5.3 Zkoušky prováděné v čerstvém stavu betonových směsí

Pro ověření dopadu SRA byly provedeny základní zkoušky na čerstvém betonu:

- Sednutí kužele v čase 5 minut dle ČSN EN 12350 – 2 [N2]
- Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350 – 6 [N3]

Vyhodnocení jednotlivých zkoušek betonových směsí v čerstvém stavu včetně hodnoty vodního součinitele betonové směsi je uvedeno v tabulce 14.

Tab. 14: Vodní součinitel, konzistence a objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu

Druh směsi	Vodní součinitel	Sednutí kužele [mm]	Konzistence	Ø D _{čb} [kg·m ⁻³]
REFERENČNÍ	0,337	160	S4	2410
CONTROL 40_1,1 %	0,337	170	S4	2400
CONTROL 60_1,1 %	0,326	170	S4	2390
ADDIMENT_1,1 %	0,346	160	S4	2420

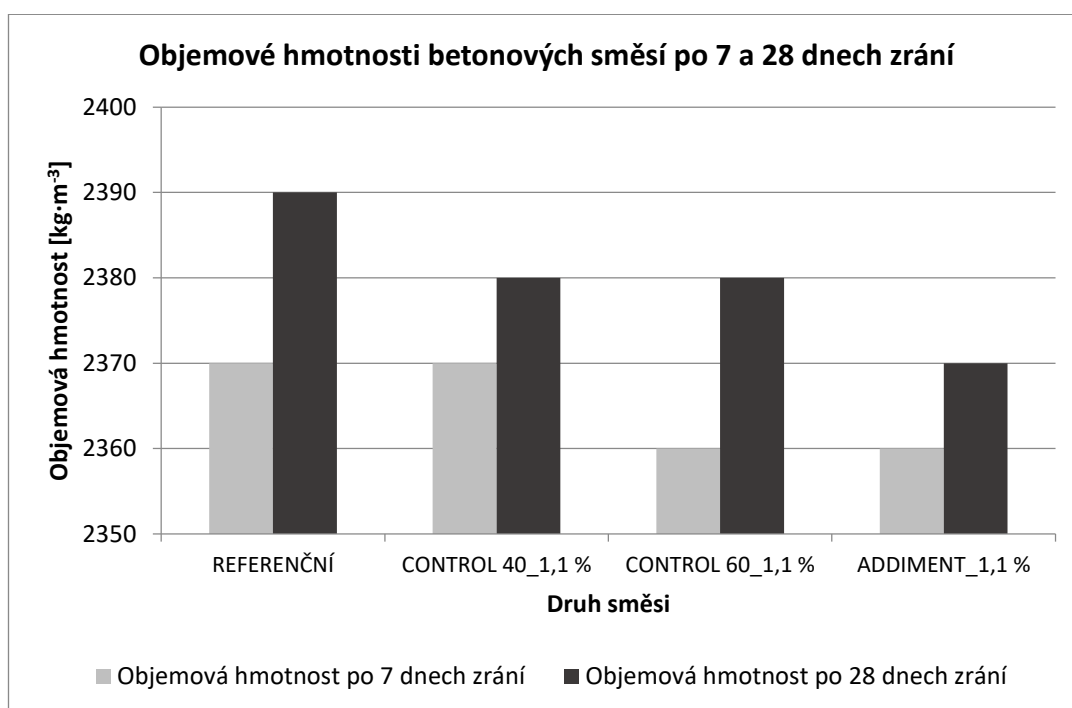
4.5.4 Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu po 7 a 28 dnech zrání

Stanovení objemové hmotnosti betonové směsi ve ztvrdlém stavu proběhlo po 7 a 28 dnech zrání v souladu s ČSN EN 12390 – 7 [N5]. Na stejných zkušebních vzorcích se následně stanovila pevnost v tlaku po 7 či 28 dnech zrání dle ČSN EN 12390 – 3 [N6]. V případě stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a jeho pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání byly použity tři zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 150 mm od každé betonové záměsi. V případě stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání byly použity dvě zkušební tělesa stejného tvaru. Výsledné hodnoty obou zkoušek jsou stanoveny průměrem hodnot získaných na zkušebních tělesech a jsou uvedeny v tab. 15. Zároveň je zde uveden procentuální vliv SRA obsažené v betonové směsi na pevnost v tlaku v porovnání s referenční záměsí. Stanovení objemových změn betonu proběhlo pomocí stejných zkušebních žlabů od firmy Schleibinger Geräte jako u betonu s pevností v tlaku přibližně 75 MPa.

Tab. 15: Mechanické parametry betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

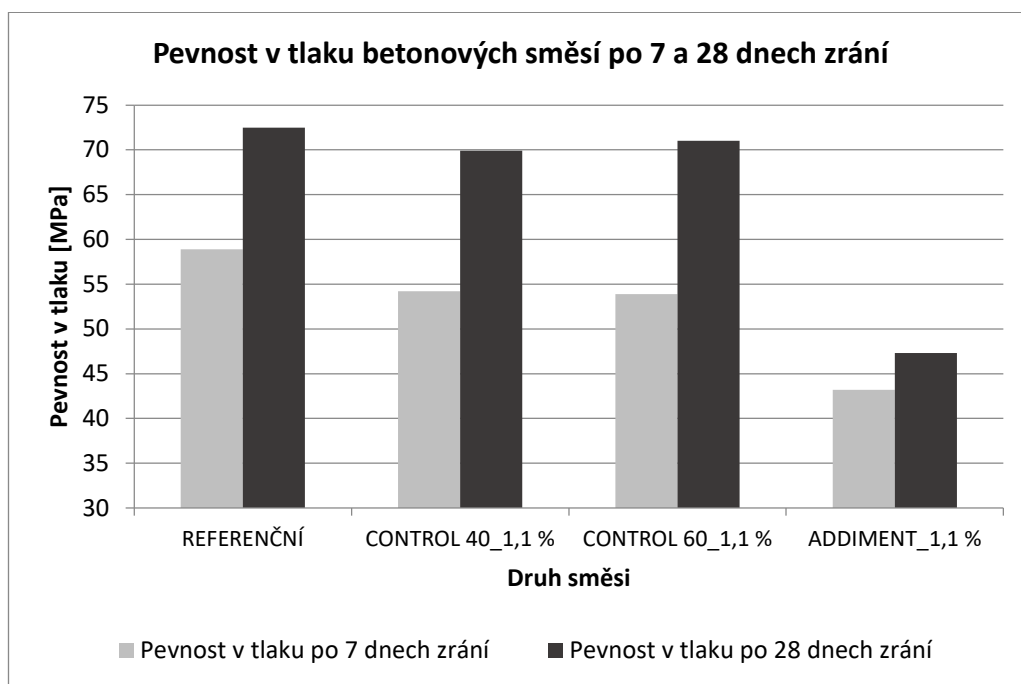
Druh směsi	$\emptyset D_{zB7}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset f_{c7}$ [MPa]	Vliv SRA na f_{c7} [%]	$\emptyset D_{zB28}$ [kg·m ⁻³]	$\emptyset f_{c28}$ [MPa]	Vliv SRA na f_{c28} [%]
REFERENČNÍ	2370	58,9	—	2390	72,5	—
CONTROL 40_0,5 %	2370	54,2	- 8,0	2370	69,9	- 3,6
CONTROL 60_0,5%	2360	53,9	- 8,5	2380	71,0	- 2,1
ADDIMENT_0,5 %	2360	43,2	-26,7	2370	47,3	- 34,8

4.5.4.1 Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění



Graf 7: Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

4.5.4.2 Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání – grafické znázornění



Graf 8: Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání

Diskuze výsledků:

Maximální pevnost v tlaku po 7 dnech zrání vykazovala dle očekávání směs referenční, konkrétně 58,9 MPa. Směsi s obsahem SRA vykazovaly nižší pevnosti v porovnání s referenční směsí. Přídavek SRA do betonové směsi způsobí pomalejší hydrataci cementu, potažmo pozvolnější nárůst počátečních pevností.

Maximální pevnost v tlaku po 28 dnech zrání vykazovala betonová směs referenční, konkrétně 72,5 MPa. Dle složení směsi bylo očekáváno pevností u referenční směsi pohybujících se okolo 100 MPa. Směsi s přídavkem SRA měly vykazovat nižší hodnoty pevností v porovnání s referenční přibližně o 10 %, tedy přibližně 90 MPa. Toto tvrzení je podloženo rešerší výzkumné práce uvedené v teoretické části práce v kapitole 3.4.1.1 Princip a vliv SRA. Možné důvody těchto nízkých pevností jsou rozebrány v kapitole 4.7 Možné příčiny nízkých pevností.

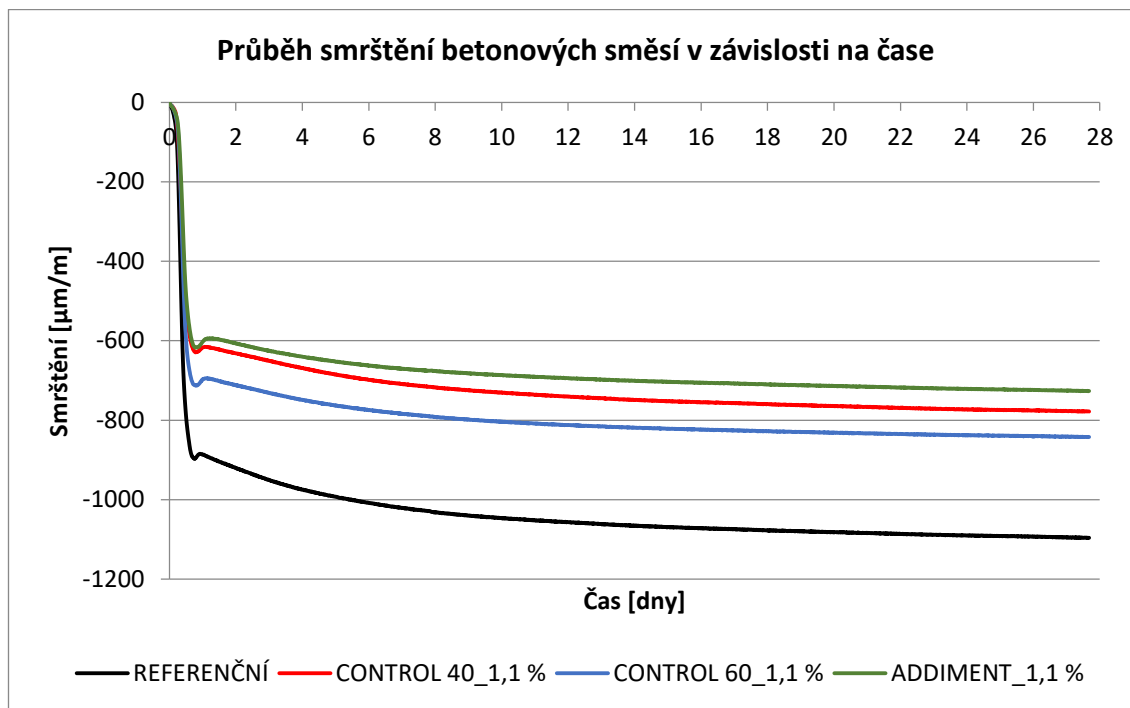
4.5.5 Smrštění betonové směsi:

Pro stanovení průběhu objemových změn betonových směsí byly použity od každé receptury vždy dvě zkušební formy a jako výsledná hodnota smrštění je brán průměr z těchto dvou stanovení. V tabulce 16 jsou zaznamenány hodnoty smrštění jednotlivých betonových směsí po 24 hodinách, 7 a 28 dnech od zamíchání. Zároveň je zde uvedena procentuální redukce smrštění v porovnání s referenční směsí v daných časech.

Tab. 16: Hodnoty smrštění a redukce smrštění u betonových směsí

Název směsi	Smrštění po 24 hod [μm/m]	Redukce smrštění [%]	Smrštění po 7 dnech [μm/m]	Redukce smrštění [%]	Smrštění po 28 dnech [μm/m]	Redukce smrštění [%]
REFERENČNÍ	886,08	—	1021,27	—	1095,89	—
CONTROL 40_1,1 %	617,53	30	708,77	31	778,05	29
CONTROL 60_1,1 %	697,79	21	783,39	23	842,14	23
ADDIMENT_1,1 %	602,57	32	670,32	34	726,47	34

4.5.5.1 Smrštění betonových směsí – grafické znázornění



Graf 9: Průběh smrštění betonových směsí v závislosti na čase

Diskuze výsledků:

U betonu s pevností v tlaku po 28 dnech zrání přibližně 90 MPa byly očekávány vyšší hodnoty smrštění ve srovnání s hodnotami smrštění betonových směsí s pevností v tlaku přibližně 75 MPa po 28 dnech zrání. Betonové záměsi vyšší pevnosti v tlaku obsahovaly nejen vyšší množství cementu v porovnání s betonem s nižší pevností v tlaku, ale také mikrosiliku, která negativně působí na objemové změny. Nejvyšší objemové změny vykazovala dle očekávání směs referenční, bez přídavku SRA. Po 24 hodinách dosahovala smrštění 886 $\mu\text{m}/\text{m}$, po 7 dní zrání 1021 $\mu\text{m}/\text{m}$ a po 28 dnech zrání v měřicím žlabu vykazovala hodnotu smrštění 1095 $\mu\text{m}/\text{m}$. Jako nejúčinnější protismršťovací přísada v dávce 1,1 % z jemných částic se jevila přísada Sika Addiment SR 1. Ve srovnání s referenční směsí redukovala smrštění po 24 hodinách, po 7 i 28 dnech zrání téměř o 34 %. SRA Sika Control 40 redukovala smrštění ve všech časových horizontech téměř o 30 % a nejnižší redukci smrštění vykazovala protismršťovací přísada Sika Control 60. Redukce snížení smrštění v porovnání s referenční směsí se pohybovala okolo 23 %.

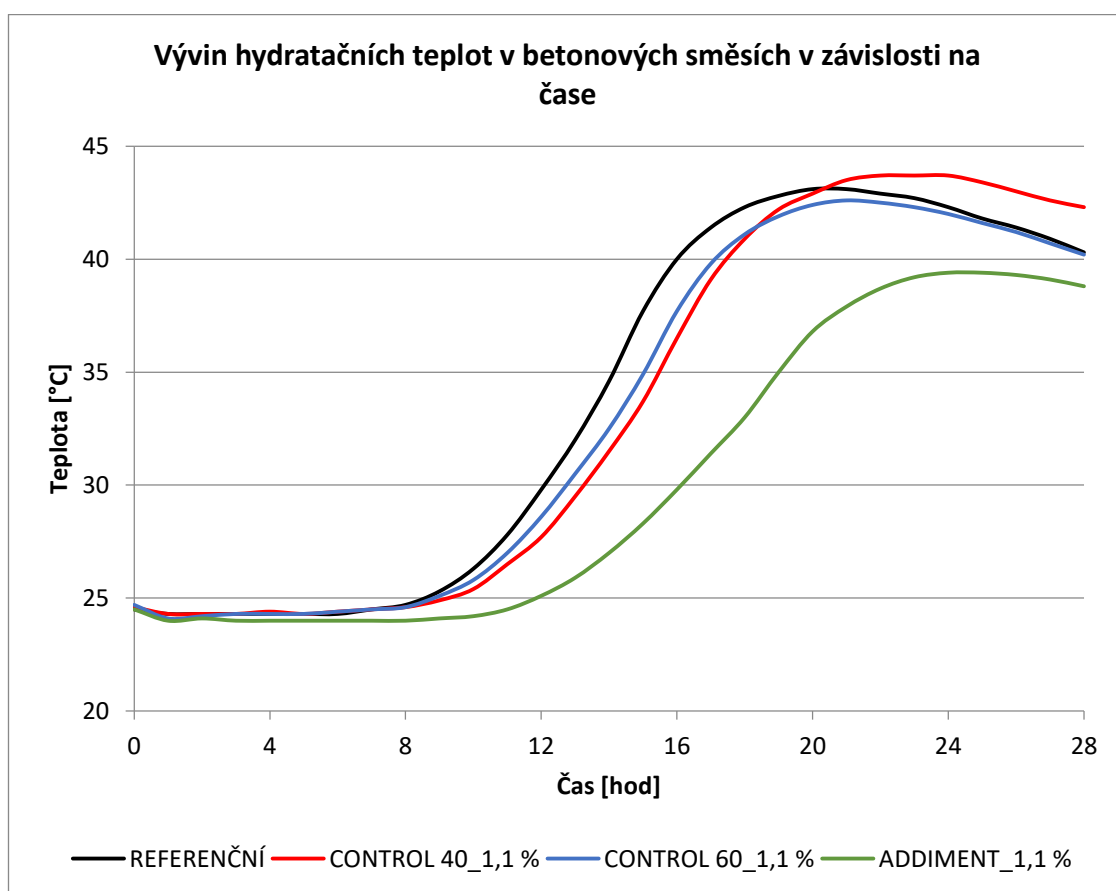
4.5.6 Průběh hydratačních teplot betonových směsí

Stejně jako u betonu s pevností v tlaku přibližně 75 MPa bylo úkolem stanovit vývin hydratačních teplot 24 hodin od zamíchání. Toto měření probíhalo pomocí dataloggeru TESTO, který zaznamenával teploty betonu v intervalu 5 minut. Čidlo tohoto přístroje bylo umístěno přibližně uprostřed zkušební krychle o hraně 150 mm, která byla uložena v izolované formě a umístěná v laboratoři při standartních laboratorních podmínkách. Způsob měření je znázorněn ve fotodokumentaci. V tabulce 17 jsou zaznamenány maximální dosažené teploty betonové směsi a zároveň časy, které k dosažení této teploty potřebovaly.

Tab. 17: Maximální dosažené teploty v betonových směsích a časy k nim potřebné

Název směsi	Maximální dosažená teplota [°C]	Čas dosažení maximální teploty [hod:min]
REFERENČNÍ	43,1	20:20
CONTROL 40_1,1 %	43,8	22:25
CONTROL 60_1,1 %	42,6	21:35
ADDIMENT_1,1 %	39,4	24:25

4.5.6.1 Vývin hydratačních teplot v betonových směsích – grafické znázornění



Graf 10: Vývoj hydratačních teplot v betonových směsích v závislosti na čase

Diskuze výsledků:

Betonová směs referenční a směsi s přidáním SRA Sika Control 40 a Sika Control 60 vykazovaly velmi podobnou maximální dosaženou teplotu v rozmezí 42 – 44 °C. Kamenivo ovšem v betonových směsích akumuluje teplo, čímž ovlivňuje maximální dosažené výsledky a vyhodnocení maximálních teplot není tak zcela průkazné. Betonová směs s obsahem SRA Sika Addiment SR 1

dosáhla přibližně o 3 °C nižší maximální teploty, konkrétně 39,4 °C, což může znamenat, že přidáním této SRA se vývin hydratačních teplot snižuje. Pro důkladnější ověření tohoto tvrzení byly vytvořeny cementové pasty, na kterých vývin hydratačních teplot není zkreslován akumulací schopností kameniva.

4.6 Cementová pasta

Pro ověření přesného dopadu protismršťovacích přísad na objemové změny a vývin hydratačních teplot byly vyrobeny cementové pasty z 1 kilogramu stejné pojivové složky jako v případě betonových směsí, tedy portlandského cementu CEM I 42,5 R, které obsahovaly stejné procentuální zastoupení použitých přísad jako v betonové směsi. Složení jednotlivých cementových past je uvedeno v tabulce 18.

Tab. 18: Složení cementových past

Druh směsi	Surovina					
	CEM I 42,5 R [g]	Mikrosilika [g]	Voda [g]	Plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035 CZ - 1,2 % z hmotnosti jemných částic [g]	SRA [%]	SRA [g]
REFERENČNÍ	923	77	245	12	—	—
CONTROL 40_1,1 %	923	77	230	12	1,1	11
CONTROL 60_1,1 %	923	77	236,5	12	1,1	11
ADDIMENT_1,1 %	923	77	236	12	1,1	11

4.6.1 Zkoušky provedené v čerstvém stavu

Množství vody bylo stanoveno variabilně pro dosažení stejného stupně konzistence všech vyrobených past. Konzistence byla stanovena rozlitím pomocí střešovacího stolku dle ČSN EN 1015 – 3 [N7] a pohybovala se v rozmezí 230 – 260 mm. Hodnoty vodního součinitele a průměry rozlití cementových past jsou uvedeny v tabulce 19.

Tab. 19: Vodní součinitel a průměr rozlití cementových past

Druh směsi	Vodní součinitel	Ø Rozlití [mm]
REFERENČNÍ	0,245	255
CONTROL 40_1,1 %	0,230	240
CONTROL 60_1,1 %	0,237	255
ADDIMENT_1,1 %	0,236	250

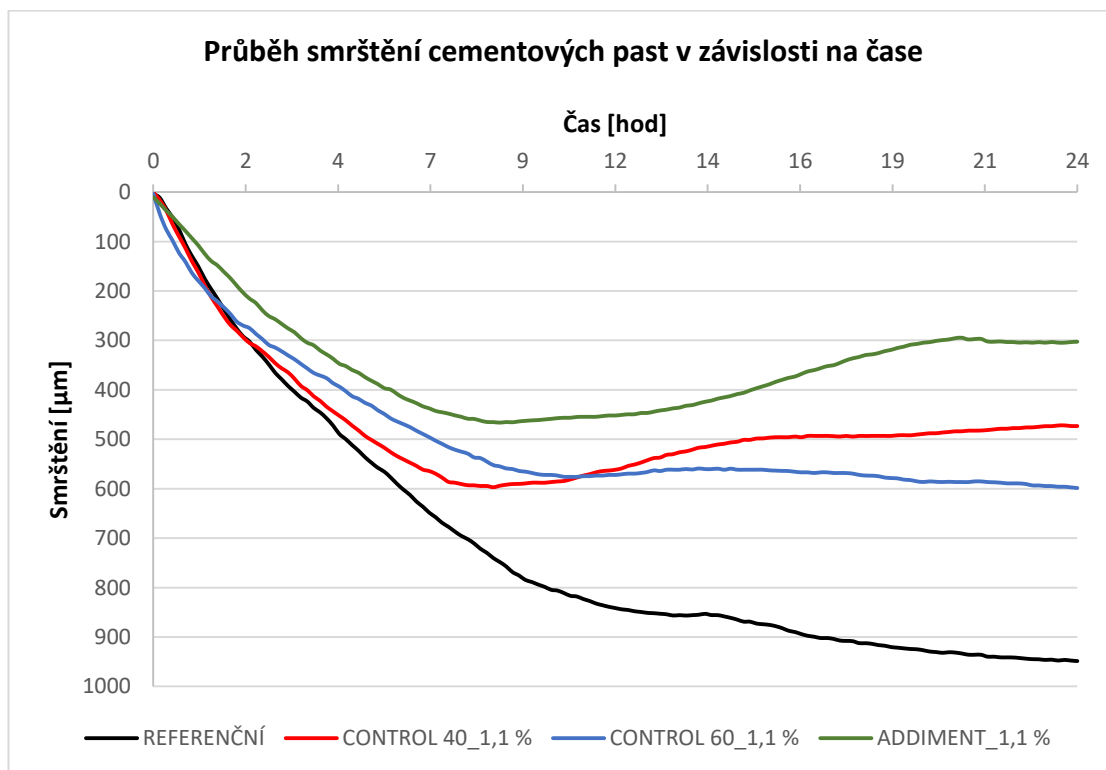
4.6.2 Průběh smrštění cementových past

Namíchanými cementovými pastami se naplnily kónické kužely, které se umístily do zařízení měřící objemové změny pomocí laserového paprsku s rozlišením 1/10 mikrometru. Zařízení je vyrobeno firmou Schleibinger Geräte a je znázorněno ve fotodokumentaci na obr 27. V tabulce 20 jsou uvedeny maximální hodnoty smrštění cementové pasty a čas, za jaký těchto hodnot dosáhly a zároveň hodnoty smrštění cementových past po 24 hodinách od zamíchání a účinnost SRA v cementové pastě.

Tab. 20: Maximální smrštění a smrštění po 24 hodinách u cementových past

Název směsi	Maximální smrštění [μm]	Čas dosažení maximálního smrštění [hod:min]	Smrštění po 24 hod [μm]	Redukce smrštění po 24 hod [%]
REFERENČNÍ	958,28	24:00	958,28	—
CONTROL 40_1,1 %	594,56	8:30	465,74	51
CONTROL 60_1,1 %	614,31	24:00	614,31	36
ADDIMENT_1,1 %	466,36	9:00	324,30	66

4.6.2.1 Průběh smrštění cementových past – grafické znázornění



Graf 11: Průběh smrštění cementových past v závislosti na čase

Diskuze výsledků:

Nejvyšší hodnotu smrštění vykazovala směs referenční – 958 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tuto hodnotu nejvíce redukovala protismršťovací přísada Sika Addiment SR 1, téměř o 66 %, dále Sika Control 40 o 51% a nejméně Sika Control 60 o pouhých 36 %. Rozdílnost účinnosti redukce smrštění v betonových směsích a cementových pastách je dána obsahem kameniva v betonových směsích, které tvoří tuhou kostru zabraňující smršťování.

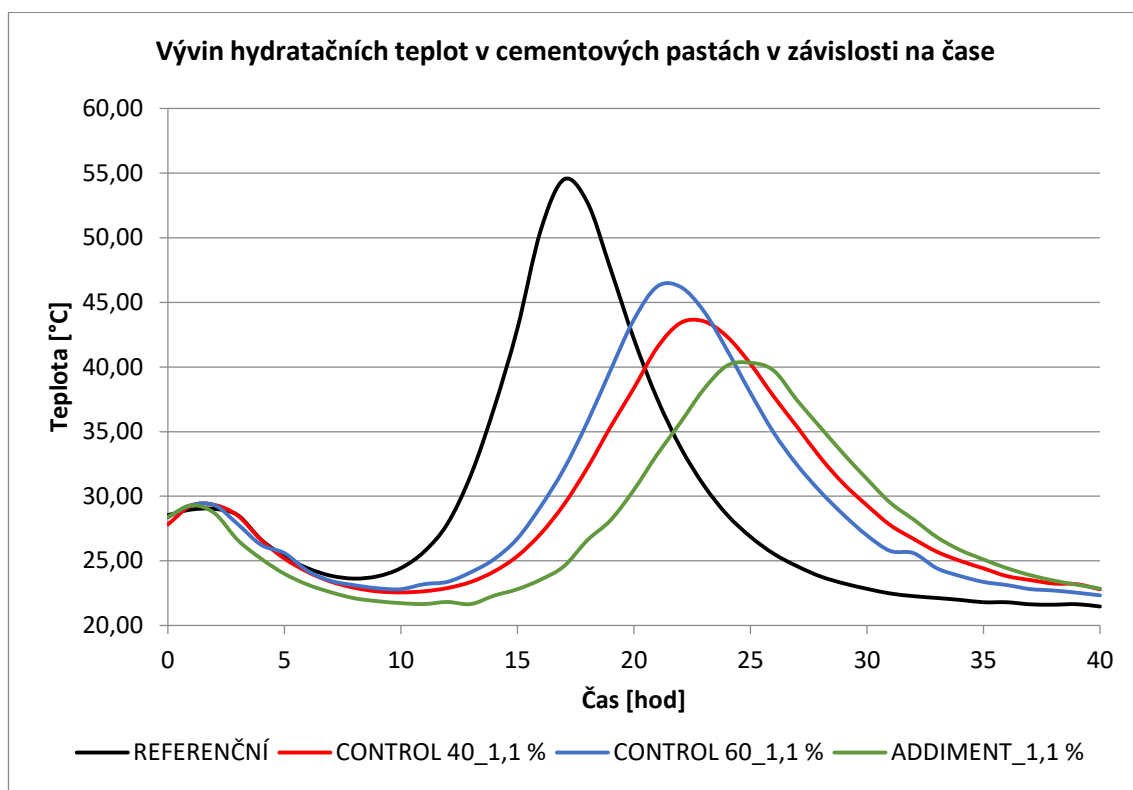
4.6.3 Vývin hydratačních teplot v cementových pastách

Měření vývoje hydratačního teplot probíhalo semiadiabatickou metodou dle ČSN EN 196 – 1 [N8]. Cementové pasty byly vloženy do kalorimetrů umístěných v klimatizační komoře při teplotě 20 °C. Hodnoty hydratačních teplot v cementových pastách byly pomocí senzorů zaznamenávány každé 2 minuty a následně zpracovány do grafů. Průběh měření je zaznamenán ve fotodokumentaci. Tabulka 21 udává maximální dosažené teploty cementových past a čas, za který těchto hodnot dosáhly.

Tab. 21: Maximální dosažené teploty v cementových pastách a čas k nim potřebný

Název směsi	Maximální dosažená teplota [°C]	Čas dosažení maximální teploty [hod:min]
REFERENČNÍ	54,62	17:12
CONTROL 40_1,1 %	43,72	22:38
CONTROL 60_1,1 %	46,58	21:36
ADDIMENT_1,1 %	40,36	24:44

4.6.3.1 Vývin hydratačních teplot v cementových pastách – grafické znázornění



Graf 12: Vývoj hydratačních teplot v cementových pastách v závislosti na čase

Diskuze výsledků

Dle očekávání nejvyšší dosaženou teplotu vykazovala cementová pasta referenční, bez obsahu SRA, konkrétně 54,62 °C. U ostatních zkoušených cementových past došlo s přidavkem SRA ke snížení maximální dosažené teploty a zároveň k prodloužení času, který byl potřeba pro dosažení této teploty.

Podobný průběh vývinu hydratačních teplot byl sledován i u betonových směsí, kde ovšem vlivem obsahu kameniva ve směsi a jeho akumulacním schopnostem nejsou maximální dosažené hydratační teploty zcela průkazné.

4.7 Možné příčiny nízkých pevností

Úkolem této bakalářské práce bylo namíchat dva druhy betonu odlišných pevnostních tříd. Beton s nižší pevností v tlaku – okolo 75 MPa po 28 dnech zrání a beton s vyšší pevností v tlaku – okolo 90 MPa po 28 dnech zrání.

Ani u jedné betonové směsi nebyl tento požadavek splněn. U betonu s nižší pevností v tlaku bylo dosaženo nejvyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání 66,1 MPa, konkrétně u směsi s přídatkem SRA Addiment v dávce 0,5 % z hmotnosti cementu. U betonu s vyšší pevností v tlaku bylo dosaženo nejvyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání 72,5 MPa u referenční směsi bez přídatku SRA.

Příčin těchto nízkých pevností může být několik. Tou nejpravděpodobnější příčinou se jeví špatné zhutnění betonové směsi ve zkušebních formách, které byly plněny ve dvou vrstvách. První vrstva zaplnila zkušební formu do 2/3 jejího objemu a poté byla 8 sekund hutněna. Druhá vrstva zaplnila zbytek objemu zkušební formy a hutnila se 10 sekund. Při hutnění druhé vrstvy všech betonových záměsí a všech zkušebních těles se beton nechoval podle očekávání. Betonová směs se zjevně rozsegrovovala po okolí, čímž nedošlo k dostatečnému snížení obsahu vzduchu v betonu a k propojení s předchozí vrstvou. Na Obr. 22 je znázorněno porušení zkušebních těles po stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390 – 3 [N6]. Veškeré zkušební vzorky byly poškozeny pouze na jedné straně, která byla zároveň horní vrstvou. Tato vrstva měla snížené mechanické vlastnosti a při zatěžování ve zkušebním lisu došlo k její destrukci dříve. Spodní část zkušební krychle nebyla nikdy zatěžováním poškozena (viz. Obr. 23), což svědčí o vyšších mechanických parametrech. V ideálním případě by se mělo porušené zkušební těleso po zatěžovací zkoušce podobat tvaru hyperbolického paraboloidu.

Příčinou špatného hutnění je s největší pravděpodobností vibrační stůl, na kterém byla zkušební tělesa vyráběna. Mohou zde být poškozené například silentbloky, které ovlivňují interferenci kmitání.

Dle složení jednotlivých betonových směsí byla u betonu s nižší pevností v tlaku očekávaná pevnost v tlaku přibližně 75 MPa po 28 dnech zrání a u betonu s vyšší pevností byla očekávaná pevnost v tlaku přibližně 100 MPa po

28 dnech zrání. Dále bylo očekáváno, že nejvyšší pevnosti obou druhů betonu budou vykazovat směsi referenční a se zvyšujícím se obsahem SRA ve směsi budou pevnosti betonu v tlaku klesat. Toto tvrzení se nepodařilo potvrdit.



Obr. 22: Porušení zkušebních těles po zkoušce stanovení pevnosti dle ČSN EN 12390 – 3 [N6] – porušená horní vrstva



Obr. 23: Porušení zkušebních těles po zkoušce stanovení pevnosti dle ČSN EN 12390 – 3 [N6] – neporušená dolní vrstva

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo ověření vlivu protismršťovacích přísad na objemové změny vysokopevnostních betonů dvou odlišných pevnostních tříd, vlivu na pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání a vlivu na vývin hydratačních teplot. Tyto přísady se obvykle dávkuje v rozmezí 0,5 % – 2 % z hmotnosti cementu. Se zvyšujícím se množstvím dochází ke snížení hydratačních teplot a potažmo i snížení objemových změn, což se podařilo prokázat. Zároveň ale dochází ke zpomalení hydratace cementu, což způsobuje nižší pevnosti po 7 a 28 dnech zrání. Toto tvrzení se v rámci této práce nepodařilo zcela prokázat, ale je součástí výzkumné práce, která je popisována v kapitole 3.4.1.1 Princip a vliv SRA. Ta prokázala, že dávkování protismršťovací přísady v množství 2 % z pojivových složek může snížit pevnosti až o 15 % ve srovnání se směsí referenční.

Teoretická část práce se z velké části zabývá jednotlivými fázemi smrštění a popisuje vlivy jednotlivých příměsí či přísad a jejich dávkování na smršťování betonové směsi.

Praktická část práce se zabývá ověřením vlivu protismršťovací přísady na objemové změny betonových směsí s pevností v tlaku okolo 75 MPa po 28 dnech zrání v rozdílném dávkování, její vliv na vývin hydratačních teplot a vliv na pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání. Pro porovnání byly zároveň vyrobeny cementové pasty ve stejném poměrovém zastoupení pojivových složek, u kterých byl též sledován vliv SRA na objemové změny a vývin hydratačních teplot. U betonových směsí s pevností v tlaku po 28 dnech přibližně 90 MPa bylo použito SRA v konstantní dávce a byl sledován její vliv na stejné parametry jako u betonů s nižší pevností. I v tomto případě byly vyrobeny cementové pasty ve stejném poměrovém zastoupení pojivových složek, u kterých byly sledovány stejné parametry jako u cementových past betonů s nižší pevností.

Na základě všech provedených analýz je možno konstatovat, že SRA jednoznačně ovlivňuje vývoj hydratačních teplot. Se zvyšující se dávkou snižuje nejvyšší dosažené teploty v cementových pastách a zároveň se zvyšující se dávkou oddaluje nárůsty těchto teplot. Dále kladně působí na objemové změny betonu. Se zvyšující dávkou SRA se podařilo dokázat, že se smrštění

cementových pastí i betonových směsí snižuje. Vliv SRA na pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech normového zrání se vlivem nedokonalého zhutnění nepodařilo dokázat, ale v zahraničních pracích, které se zabývali výzkumem vlivu SRA na mechanické vlastnosti betonu, je negativní vliv SRA na pevnosti betonové směsi v tlaku potvrzen.

Používání SRA se projevilo na eliminaci objemových změn efektivně. Při jeho použití je ale nutno pamatovat na to, že s přibývajícím množstvím klesají i pevnosti betonové směsi. To může hrát významnou roli u konstrukcí, na které je kladen požadavek vysokých pevností v tlaku. Jednou z možností, jak tento nedostatek vyřešit je úprava receptury, konkrétně zvýšení dávky superplastifikační přísady, čímž se sníží množství záměsové vody a zároveň i hodnoty smrštění betonové směsi.

Na základě provedených analýz bylo zjištěno, že při přidavku SRA Sika Addiment SR 1 v minimálním a maximálním doporučeném dávkování od výrobce je dopad na redukcii smrštění betonu velmi podobný. U přidavku SRA Sika Control 40 a Sika Control 60 v minimálním doporučeném dávkování se hodnoty smrštění opět velmi podobaly a se zvyšující dávkou této SRA do betonové směsi vykazovaly zkušební záměsi nižší hodnoty smrštění. Při maximálním doporučeném dávkování tyto SRA vykazovaly téměř totožný průběh smrštění. Jako nevhodnější ze zkoušených SRA se jevila přísada Sika Addiment SR 1, která při konstantním dávkování 1,1 % z hmotnosti cementu vykazovala nejvyšší redukcii objemových změn betonu v porovnání s ostatními SRA ve shodném dávkování.

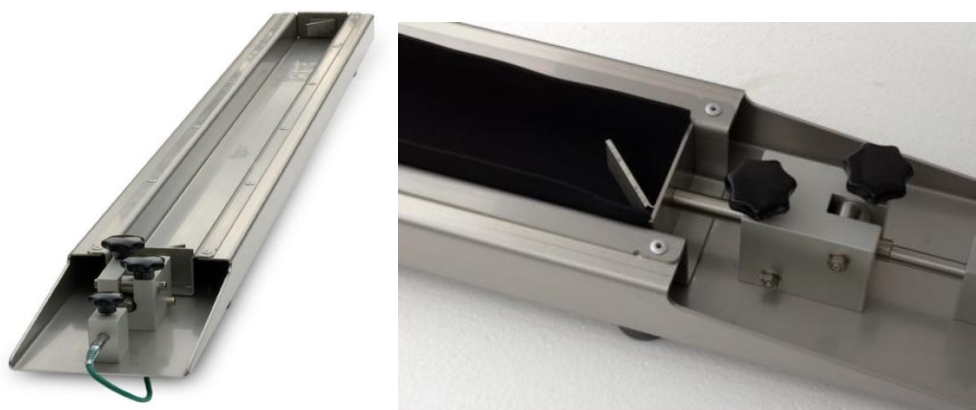
6 FOTODOKUMENTACE



Obr. 24: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 a cementové pasty pomocí střešacího stolku dle ČSN EN 1015 – 3



Obr. 25: Měření vývoje hydratačních teplot u betonu a cementových past



Obr. 26: Žlaby použité k měření objemových změn betonu [O20]



Obr. 27: Měření objemových změn betonové směsi a cementové pasty

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

7.1 Použitá literatura

- [1] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 8080760322.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 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.
- [3] HELA, Rudolf. *Technologie betonu II: Modul M 01, BJ15 - Technologie betonu II*. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2007.
- [4] Bc. Lucia Osuská *Vývoj vysokohodnotných betonů s využitím druhotných surovin*. Brno, 2016. 51 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [5] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. *Betonové stavitelství*. ISBN 9788087093757.
- [6] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Petr DANĚK, Dalibor KOCÁB a Petr MISÁK. *Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete* [online]. , 12 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1155/2017/3027301. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/69364/3027301.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] TAZAWA, Ei-Ichi a Shingo MIYAZAWA. *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste* [online]. , 7 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00010-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695000100?via%3Dihub>
- [8] Jana Húšťavová *Vývoj betonů s omezenými objemovými změnami*. Brno, 2016. 63 s., 1 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [9] KRISTIAWAN, Stefanus A. a M. Taib M. ADITYA. *Effect of High Volume Fly Ash on Shrinkage of Self-compacting Concrete* [online]. , 8 [cit. 2018-05-04]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.110>. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S187770581503427X/1-s2.0-S187770581503427X-main.pdf?_tid=59dedfa5-fbe5-43c0-a43e-5be2abf4c6c4&acdnat=1525459967_eb2a07f5a395f7ee4046f7720c74ebbb
- [10] Martin Ťažký *Vývoj konstrukčních betonů s elektrérenskými popílkami*. Brno, 2014. 91 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [11] BROOKS, J.J. a M.A MEGAT JOHARI. *Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete* [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00095-0). Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0958946500000950/1-s2.0-S0958946500000950-main.pdf?_tid=0889a476-84a0-409e-a8ff-5ad19e9e390e&acdnat=1525502436_6e48d49943fdc47643963701839d4961
- [12] 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* [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6384859>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/6384859/>

- [13] DRBUŠKOVÁ, M. Numerická analýza smršťování vybraných silikátových kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavební mechaniky, 2014. 112 s., z toho 56 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., specialista/konzultant Ing. Petr Frantík, Ph.D.
- [14] BROOKS, Jeffrey. Shrinkage of Concrete [online]. , 49 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/B9780128015254000066/3-s2.0-B9780128015254000066-main.pdf?_tid=d00f99d6-e49b-4848-b74a-eebb7ee8166f&acdnat=1525691427_abd45242a84056deacb8733b5da9700d
- [15] Příměsi. EBETON [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/primesi>
- [16] Fly Ash Australia: What is fly ash [online]. Dostupné z: <http://www.flyashaustralia.com.au/whatisflyash.aspx>
- [17] PALACIOS, M. a F. PUERTAS. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars[online]. , 10 [cit. 2018-05-07]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.014>. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S000888460400451X/1-s2.0-S000888460400451X-main.pdf?_tid=2d060a4a-f12b-4583-8611-62e2920d6743&acdnat=1525695378_3bfdb0cbff90e73ca2db04e5d1e29e63
- [18] ZHANG, M.H., C.T. TAM a M.P. LEOW. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete[online]. , 8 [cit. 2018-05-09]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00149-2). Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0008884603001492/1-s2.0-S0008884603001492-main.pdf?_tid=a5040399-ee44-4ff5-ad33-98844d87ad6b&acdnat=1525860993_41dbb41339e429f8d1c9d31b26ba3ebb
- [19] OSUSKÁ, L.; HELA, R. Use of fluidized bed combustion fly ash as addition reducing shrinkage of concrete. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum. Switzerland: Trans Tech Publication, 2016. p. 141-144. ISSN: 1662-9752.
- [20] SHARIQ, M., J. PRASAD a H. ABBAS. Creep and drying shrinkage of concrete containing GGBFS [online]. 2015, , 11 [cit. 2018-05-13]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.004>. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0958946516300166/1-s2.0-S0958946516300166-main.pdf?_tid=6a64dd74-2323-40f4-95ec-9dc3436c48fd&acdnat=1526205162_546fe8e2ea7363911c91a122fdf3e2e

7.2 Použité právní normy a předpisy

- [N1] ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ, 2017
- [N2] ČSN EN 12350 – 2 Zkoušení čerstvého betonu – část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N3] ČSN EN 12350 – 6 Zkoušení čerstvého betonu – část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N4] ČSN EN 12390 – 2 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N5] ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: ÚNMZ, 2009
- [N6] ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2012
- [N7] ČSN EN 1015 – 3 Zkušební metody malt pro zdivo – část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku). Praha: ÚNMZ, 2007

[N8] ČSN EN 196 – 9 Metody zkoušení cementu – část 9: Stanovení hydratačního tepla – Semiadiabatická metoda. Praha: ÚNMZ, 2010

7.3 Použité zdroje obrázků

[O1] Lake Point Tower. William-zbaren-9hua.squarespace.com [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://william-zbaren-9hua.squarespace.com/lake-point-tower/5ulsplyfna6ank94335gy7iribz5qk>

[O2] River Plaza. Archive.li [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://archive.li/vCFvB#selection-6.11-316.0>

[O3] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.

[O4] HELA, Rudolf. Technologie betonu II: Modul M 01, BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2007.

[O5] HELA, Rudolf. Technologie betonu II: Modul M 01, BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2007.

[O6] BROOKS, Jeffrey. Shrinkage of Concrete [online]. , 49 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/B9780128015254000066/3-s2.0-B9780128015254000066-main.pdf?_tid=d00f99d6-e49b-4848-b74a-eebb7ee8166f&acdnat=1525691427_abd45242a84056deacb8733b5da9700d

[O7] BROOKS, Jeffrey. Shrinkage of Concrete [online]. , 49 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/B9780128015254000066/3-s2.0-B9780128015254000066-main.pdf?_tid=d00f99d6-e49b-4848-b74a-eebb7ee8166f&acdnat=1525691427_abd45242a84056deacb8733b5da9700d

[O8] BROOKS, Jeffrey. Shrinkage of Concrete [online]. , 49 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/B9780128015254000066/3-s2.0-B9780128015254000066-main.pdf?_tid=d00f99d6-e49b-4848-b74a-eebb7ee8166f&acdnat=1525691427_abd45242a84056deacb8733b5da9700d

[O9] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.

[O10] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Petr DANĚK, Dalibor KOCÁB a Petr MISÁK. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete [online]. , 12 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1155/2017/3027301. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/69364/3027301.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[O11] TAZAWA, Ei-Ichi a Shingo MIYAZAWA. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste [online]. , 7 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00010-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695000100?via%3Dihub>

[O12] KRISTIAWAN, Stefanus A. a M. Taib M. ADITYA. Effect of High Volume Fly Ash on Shrinkage of Self-compacting Concrete [online]. , 8 [cit. 2018-05-04]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.110>. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S187770581503427X/1-s2.0-S187770581503427X-main.pdf?_tid=59dedfa5-fbe5-43c0-a43e-5be2abf4c6c4&acdnat=1525459967_eb2a07f5a395f7ee4046f7720c74ebbb

[O13] BROOKS, J.J. a M.A MEGAT JOHARI. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00095-0). Dostupné z: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0958946500000950/1-s2.0->

S0958946500000950-main.pdf?_tid=0889a476-84a0-409e-a8ff-5ad19e9e390e&acdnat=1525502436_6e48d49943fdc47643963701839d4961

[O14] BROOKS, J.J. a M.A MEGAT JOHARI. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00095-0). Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0958946500000950/1-s2.0-S0958946500000950-main.pdf?_tid=0889a476-84a0-409e-a8ff-5ad19e9e390e&acdnat=1525502436_6e48d49943fdc47643963701839d4961

[O15] 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 [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6384859>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/6384859/>

[O16] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.

[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 [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6384859>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/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 [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6384859>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/6384859/>

[O19] 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 [online]. , 8 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6384859>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/6384859/>

[O20] Měřicí žlab pro stanovení objemových změn: Zkoušení betonu. <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz> [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>

[O21] OSUSKÁ, L.; HELA, R. Use of fluidized bed combustion fly ash as addition reducing shrinkage of concrete. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum. Switzerland: Trans Tech Publication, 2016. p. 141-144. ISSN: 1662-9752.

[O22] ZHANG, M.H., C.T. TAM a M.P. LEOW. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete [online]. , 8 [cit. 2018-05-09]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00149-2). Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0008884603001492/1-s2.0-S0008884603001492-main.pdf?_tid=a5040399-ee44-4ff5-ad33-98844d87ad6b&acdnat=1525860993_41dbb41339e429f8d1c9d31b26ba3ebb

[O23] SHARIQ, M., J. PRASAD a H. ABBAS. Creep and drying shrinkage of concrete containing GGBFS [online]. 2015, , 11 [cit. 2018-05-13]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.004>. Dostupné z: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0958946516300166/1-s2.0-S0958946516300166-main.pdf?_tid=6a64dd74-2323-40f4-95ec-9dc3436c48fd&acdnat=1526205162_546fe8e2ea7363911c91a122ddf3e2e

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HSC	Vysokopevnostní beton
UHSC	Ultra vysokopevnostní beton
SRA	Protismršťovací přísada
CO ₂	Oxid uhličitý
Ca(OH) ₂	Hydroxid vápenatý, portlandit
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý
C-S-H	Kalcium silikát hydrát
CaO	Oxid vápenatý
SO ₃	Oxid sírový
C ₃ A·3CaSO ₄ ·32H ₂ O	Ettringit
C ₃ A	Trikalcium aluminát
C ₄ AF	Tetra aluminnát ferit
SiO	Oxid křemičnatý
SiO ₂	Oxid křemičitý
C ₂ ASH ₈	Hydrát vápenatého hlinitokřemičitanu
MgO	Oxid hořečnatý
Mg(OH) ₂	Hydroxid hořečnatý, brucit
H ₂ O	Voda
JMS	Vysokopevní (jemně mletá granulovaná) struska
VUT	Vysoké učení technické v Brně
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílů

9 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

9.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Příklady výškových staveb postavených v 60. a 70. letech z HSC [O1,2].....	13
Obr. 2: Schématické znázornění objemových změn betonu v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí [O3].....	15
Obr. 3: Nejvhodnější režim ošetřování betonu v průběhu hydratačních reakcí [O4].....	16
Obr. 5: Schématické znázornění objemových složek [O6]	18
Obr. 6: Vysýchání vzorků na vzduchu bez působení CO ₂ [O7]	20
Obr. 7: Současné sušení a působení karbonatace [O8].....	21
Obr. 8: Množství odpařené vody v závislosti na okolních podmínkách prostředí [O9].....	22
Obr. 9: Vliv vodního součinitele na smrštění betonu [O10].....	23
Obr. 10: Vliv jemnosti mletí cementu na smrštění betonu [O11]	24
Obr. 11: Vliv vysokoteplotního úletového popílku na smrštění betonu [O12]	26
Obr. 12: Průběh smrštění betonu s náhradou vysokoteplotního popílku popílkem fluidním [O21]	27
Obr. 13: Vliv jemně mleté granulované strusky na smršťování betonu [O23]	28
Obr. 14: Vliv dávkování křemičitých úletů na smrštění [O22]	30
Obr. 15: Vývoj počátečního autogenního smrštění v závislosti na dávce metakaolinu [O13]	31
Obr. 16: Celkové smrštění v závislosti na dávce metakaolinu [O14].....	31
Obr. 17: Porovnání vývoje smrštění u betonů bez SRA a s rozdílným množstvím SRA [O15]..	32
Obr. 18: Odpařování vody ze směsi obsahující SRA a bez přísady [O16].....	33
Obr. 19: Vliv protismršťovací přísady na pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech [O17].....	34
Obr. 20: Vliv expanzivních přísad na objemové změny betonu [O18]	35
Obr. 21: Vliv expanzivních přísad na pevnosti betonu v tlaku [O19]	36
Obr. 22: Porušení zkušebních těles po zkoušce stanovení pevnosti dle ČSN EN 12390 – 3 [N6] – porušená horní vrstva.....	64
Obr. 23: Porušení zkušebních těles po zkoušce stanovení pevnosti dle ČSN EN 12390 – 3 [N6] – neporušená dolní vrstva	64
Obr. 24: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 a cementové pasty pomocí střešovacího stolku dle ČSN EN 1015 – 3.....	67
Obr. 25: Měření vývoje hydratačních teplot u betonu a cementových past	67
Obr. 26: Žlaby použité k měření objemových změn betonu [O20].....	68
Obr. 27: Měření objemových změn betonové směsi a cementové pasty	68

9.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Základní informace o CEM I 42,5 R.....	37
--	----

Tab. 2: Základní informace o použitém kamenivu	38
Tab. 3: Základní vlastnosti použité mikrosiliky	39
Tab. 4: Složení betonových směsí	40
Tab. 5: Vodní součinitel, konzistence a objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu.....	41
Tab. 6: Mechanické parametry betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání	42
Tab. 7: Hodnoty smrštění a redukce smrštění u betonových směsí.....	44
Tab. 8: Maximální dosažené teploty betonových směsí	46
Tab. 9: Složení cementových past.....	48
Tab. 10: Vodní součinitel a rozlité cementových past.....	48
Tab. 11: Maximální smrštění a smrštění po 24 hodinách u cementových past.....	49
Tab. 12: Maximální dosažené teploty v cementových pastách	51
Tab. 13: Složení betonových směsí.....	52
Tab. 14: Vodní součinitel, konzistence a objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu.....	53
Tab. 15: Mechanické parametry betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání	54
Tab. 16: Hodnoty smrštění a redukce smrštění u betonových směsí.....	56
Tab. 17: Maximální dosažené teploty v betonových směsích	58
Tab. 18: Složení cementových past.....	59
Tab. 19: Vodní součinitel, konzistence a objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu.....	59
Tab. 20: Maximální smrštění a smrštění po 24 hodinách u cementových past.....	60
Tab. 21: Maximální dosažené teploty v cementových pastách	61

9.3 Seznam grafů

Graf 1: Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání	42
Graf 2: Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání.....	43
Graf 3: Průběh smrštění betonových směsí v závislosti na čase	45
Graf 4: Vývin hydratačních teplot v betonových směsích	47
Graf 5: Průběh smrštění cementových past v závislosti na čase	49
Graf 6: Vývin hydratačních teplot v cementových pastách	51
Graf 7: Objemové hmotnosti betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání	54
Graf 8: Pevnost v tlaku betonových směsí po 7 a 28 dnech zrání.....	55
Graf 9: Průběh smrštění betonových směsí v závislosti na čase	56
Graf 10: Vývoj hydratačních teplot v betonových směsích v závislosti na čase.....	58
Graf 11: Průběh smrštění cementových past v závislosti na čase	60
Graf 12: Vývoj hydratačních teplot v cementových pastách v závislosti na čase.....	62

9.4 Seznam příloh


[T1] – Sika Control 40

Technický list
Datum vydání: 06/2016
Identifikační č.: 021403041000000001
Verze č. 01
Sika® Control-40

Sika® Control-40

Přísada do betonu a malt redukující smrštění

Popis výrobku	Sika® Control-40 je přísada redukující smrštění betonů a malt. Minimalizuje smrštění během procesu tuhnutí a vysychání.
Použití	Sika® Control-40 se používá pro přípravu vysoce jakostního betonu se sníženým smrštěním. Tím je podstatně ovlivněna a prodloužena trvanlivost betonu. Sika® Control-40 se používá především u následujících aplikací: <ul style="list-style-type: none">■ konstrukce s vysokými požadavky na omezení šířky trhlin■ u betonů s požadavkem na nízké smrštění■ u betonových podlah, kde snížené smrštění redukuje vznik trhlin Sika® Control-40 ovlivňuje kromě vlastností čerstvého betonu rovněž jeho vlastnosti po úplném vytvrdnutí.
Výhody	Použitím Sika® Control-40 se dosáhne následujících předností: <ul style="list-style-type: none">■ snížení plastického smrštění v průběhu tuhnutí■ snížení smrštění v průběhu vysychání■ vlastnosti čerstvého betonu nejsou nepříznivě ovlivněny■ lze kombinovat s provzdušňovacími přísadami■ snížení kapilární nasákavosti■ neobsahuje chloridy ani látky urychlující korozi výztuže
Zkušební zprávy	
Testy	VUT Brno, fakulta stavební – Zpráva o vlivu přísady Sika® Control-40 na smršťování betonu
Údaje o výrobku	
Barva	Načervenalá tekutina.
Balení	Sud: 200 kg Kontejner: 1000 kg Další balení na vyžádání.
Podmínky skladování / Trvanlivost	12 měsíců od data výroby pouze v originálních, neotevřených, nepoškozených obalech při teplotě +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením a mrazem. Kontejnery musí být před dalším plněním důkladně vypláchnuty.
Technické údaje	
Chemická báze	Kombinace vícesytných alkoholů
Objemová hmotnost	~ 1,00 kg/l (při +20 °C)
Hodnota pH	~ 10,5 ± 0,5



Aplikační podrobnosti

Dávkování	Doporučené dávkování: 0,5 – 2,0 % na hmotnost cementu Poznámka: Zvýšení dávkování může snížit účinek.
------------------	---

Aplikační podmínky / Omezení

Kompatibilita	Sika® Control-40 je kompatibilní s mnoha dalšími produkty Sika. Důležité: Při kombinování více přísad Sika vždy proveďte průkazní zkoušky a pro více informací kontaktujte technické oddělení firmy Sika.
----------------------	--

Aplikace

Míchání	Sika® Control-40 se přidává do míchačky společně se záměsovou vodou. Lze jej také přidávat přímo na staveništi k předem vyrobenému betonu.
----------------	--

Postup aplikace / Nářadí	Pro betony s přísadou Sika® Control-40 platí všeobecná pravidla pro přípravu a zpracování betonu.
---------------------------------	---

Čištění nářadí	Veškeré použité nářadí a vybavení očistěte ihned po použití vodou. Vytvrzený materiál lze odstranit pouze mechanicky.
-----------------------	---

Důležitá upozornění	<p>Sika® Control-40 se přidává do míchačky společně se záměsovou vodou. Lze jej také přidávat přímo na staveništi k předem vyrobenému betonu. Je nutné dodržet dobu míchání pro každý m³ obsahu míchačky v trvání 1 minuty. U betonu je nutné vyzkoušet homogenitu.</p> <p>Pro betony s přísadou Sika® Control-40 platí všeobecná pravidla pro přípravu a zpracování betonu.</p> <p>Teplota čerstvého betonu nesmí klesnout pod +5°C. Pro dosažení vysoké odolnosti proti mrazu nebo posypovým solím by měl být podíl vzduchových pórů v čerstvém betonu větší jak 5,5 %. Jako provzdušňovač lze použít např. SikaAer®.</p> <p>Přísadu Sika® Control-40 lze kombinovat s těmito přísadami:</p> <ul style="list-style-type: none">- Sikament®- SikaAer® a další provzdušňující přísady firmy Sika- řada Sika® ViscoCrete® <p>Při kombinaci s těmito přísadami doporučujeme vždy provést průkazní zkoušky.</p>
----------------------------	---

Platnost hodnot

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naší kontrolu.

Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu - Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.

Construction

Technický list
Datum vydání: 06/2016
Identifikační č.: 02140304100000011
Verze 01
Sika® Control -60

Sika® Control -60

Přísada do betonu redukující smrštění

Popis výrobku Sika® Control -60 je přísada redukující smrštění betonů.

Použití Sika® Control-60 se používá pro přípravu vysoce kvalitního betonu se sníženým smrštěním. Redukce smrštění betonu má za následek zvýšení trvanlivosti betonu.
Sika® Control-60 se používá především u následujících aplikací:

- konstrukce s vysokými požadavky na omezení šířky trhlin
- u betonů s požadavkem na nízké smrštění
- u betonových podlah, kde snížené smrštění redukuje vznik trhlin

Výhody

- snížení plastického smrštění v průběhu tuhnutí
- snížení smrštění v průběhu vysychání
- vlastnosti čerstvého betonu nejsou nepříznivě ovlivněny
- lze kombinovat s provzdušňovacími přísadami
- snížení kapilární nasákavosti

neobsahuje chloridy ani látky urychlující korozi výztuže

Zkušební zprávy

Testy

Údaje o výrobku

Barva	Namodralá tekutina.
Balení	Sud: 200 kg Kontejner: 1000 kg Další balení na vyžádání.
Podmínky skladování / Trvanlivost	12 měsíců od data výroby pouze v originálních, neotevřených, nepoškozených obalech při teplotě +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením a mrazem. Kontejnery musí být před dalším plněním důkladně vypláchnuty. Zmrzlý Sika® Control-60 lze použít po rozmrazení při pokojové teplotě a důkladném promíchání.

Technické údaje

Chemická báze	Kombinace vícesytných alkoholů a povrchově aktivních látek
Homogenita	Homogenní.
Objemová hmotnost	~1,0 kg/l (při +20 °C)
Hodnota pH	~5,5
Obsah alkálií	≤1,0 %

1 Sika® Control®-60 1/3

Obsah chloridů	≤0,1 %
Aplikační podrobnosti	
Dávkování	Doporučené dávkování: 0,5 – 2,0 % na hmotnost cementu
Aplikační podmínky / Omezení	
Aplikace	
Míchání	Sika® Control-60 se přidává do suché směsi společně se záměsovou vodou nebo současně se záměsovou vodou přímo do autodomíchávače.
Postup aplikace / Nářadí	Použitím přísady Sika® Control-60 lze dosáhnout vysoké kvality vyráběného betonu. Během betonáže dodržujte běžná pravidla pro betonování. Po betonáži dodržujte pravidla pro ošetřování čerstvého betonu.
Kompatibilita	Sika® Control-60 je kompatibilní s mnoha dalšími produkty Sika. Fro-V5-A Fro-V10 Sika LPS A-94 Sika LPS V Sikament® SikaRapid®-1 SikaRapid®-2 Sika Perfin-300 Sika® Ferrogard-901 Sika® FS 1 Sika® Retardér Sika® Stabilizer-4R Sika® ViscoCrete® Při kombinování více přísad Sika vždy proveďte průkazní zkoušky a pro více informací kontaktujte technické oddělení firmy Sika. V kombinaci se zpomalujícími přísadami může dojít k výraznému prodloužení doby tuhnutí. Při nízkých teplotách může Sika® Control-60 způsobit prodloužení doby tuhnutí
Platnost hodnot	Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu. Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu. Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz .
Bezpečnostní předpisy	Ochranná opatření <ul style="list-style-type: none"> ▪ Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci. ▪ Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice. ▪ Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu. ▪ Odstraňování odpadu - Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech. ▪ Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.
Místní omezení	V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Costruzioni

Product data sheet
Edizion 30.08.16
Addiment SR 1

Addiment SR 1


LIQUID ADMIXTURE FOR REDUCING THE DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE AND MORTAR


General indication

Description	Shrinkage Reducing Admixture
Action	<p>ADDIMENT SR 1 is a liquid admixture based on synthetic glycols which is able to reduce the surface tension of the water in the capillary pores of the cement paste increasing their dimensional stability and resistance. As a consequence, the reduction of the medium-long term shrinkage of the system as a whole is reduced up to 40%. ADDIMENT SR 1 does not contain expansive agents.</p> <p>ADDIMENT SR 1 has no fluidifying effect. Depending on the dosage, ADDIMENT SR 1, may retard the setting times (30-60 min). It may also cause a slight decrease (5-10%) in early and later age compressive strengths.</p> <p>ADDIMENT SR 1 is a chloride-free product so it can be used in pre-stressed reinforced concrete.</p>
Fields of application	<p>ADDIMENT SR 1 is particularly suited in all those cases where a strong reduction of the effect of drying shrinkage (cracks and curling), is required. ADDIMENT SR 1 is recommended for :</p> <ul style="list-style-type: none"> high performance and durable concrete; waterproof concrete where a total absence of cracks is required (canals, tanks, etc.); Industrial flooring concrete to reduce the curling phenomena and consequently increase the distance between contraction joints; shrinkage compensated concrete. The use of ADDIMENT SR 1 in combination with ADDIMENT ESPANSE BETON expansive agent produces a synergistic effect in addition to the expected lower shrinkage that maximizes the initial expansion even under non-wet curing conditions.

Characteristics

Aspect	Liquid / Yellowish
Delivery	Cupac 25 lt – Drums 210 lt – Megacupac 1.000 lt
Shelf life and storage	If stored properly in closed containers, approx. 12 months.





Main constituent	synthetic glycols
Density	0,920 kg/dm ³
Temperature	for application: minimum +1°C

Application

Direction for use The recommended dosage rates are 1,0 to 2,0% of cement weight. The effectiveness also depends on the water/powder ratio. The lower the water/powder ratio the higher the shrinkage reduction.
 ADDIMENT SR 1 should be added to the mixing water. Pretesting of the concrete mix should be performed before use.
 ADDIMENT SR 1 is fully compatible with the complete line of Addiment admixtures. Due to its defoaming side effect it may causes difficulties in the production of air-entrained concrete mixes subjected to freeze-thaw cycles.

Important notes

Legal Notes The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Sika Italia S.p.A.
 Via L. Einaudi 6 – 20068 Peschiera Borromeo (MI)
 Tel. + 39 02 54778.111 – Fax + 39 02 54778.119
Stabilimento di Calusco:
 Via Piave 1334 - 24033 Calusco (BG)
Stabilimento di Siderno:
 Contrada Limarri – Siderno Marina (RC)



[T4] – CEM I 42,5 R, Mokrá

CEM I 42,5 R Portlandský cement

EN 197-1

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

Technický list

září 2017



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

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 OHSAS 18001
- 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

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

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

Technický list

září 2017

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	Obsah [%]	CaO	64,2	EN 196-2
	2 dny	29	EN 196-1		SiO ₂	19,5	EN 196-2
	7 dní	53	EN 196-1		Al ₂ O ₃	4,7	EN 196-2
	28 dní	61	EN 196-1		Fe ₂ O ₃	3,2	EN 196-2
	56 dní	66	EN 196-1		MgO	1,3	EN 196-2
	90 dní	67	EN 196-1		SO ₃	3,2	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1		Cl ⁻	0,047	EN 196-2
	2 dny	6	EN 196-1		K ₂ O	0,78	EN 196-2
	7 dní	8	EN 196-1		Na ₂ O	0,09	EN 196-2
	28 dní	9	EN 196-1		Na ₂ O ekvivalent [%]	0,6	EN 196-2
	56 dní	9	EN 196-1	Ner rozpustný zbytek [%]	0,8	EN 196-2	
	90 dní	9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,2	EN 196-2	
Normální konzistence [%]		27,8	EN 196-3	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).			
Počátek tuhnutí [min]		219	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]		286	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]		374	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg m ⁻³]		3110	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v autocisterně		980	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	310	EN 196-8				

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404

Bez rizika	Koroze způsobená karbonátací				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 pucolánové příměsí (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.

- [T5] OFZ A.S. *Technický list mikrosilica - SIOXID* [online]. 2008, , 4 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://siroka.ofz.company/prilohy/TL_SIOXID_1_SK.pdf
- [T6] ZEPIKO GROUP. *PÍSEK Žabčice CE 0-4 neprané EN 12620 EN 13242: Pískovna Žabčice* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.zepiko.cz/certifikace>
- [T7] HEIDELBERGCEMENT GROUP CZECH REPUBLIC. *Dokumenty ke stažení: Prohlášení o vlastnostech DK Olbramovice 4/8* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni>
- [T8] HEIDELBERGCEMENT GROUP CZECH REPUBLIC. *Dokumenty ke stažení: Prohlášení o vlastnostech DK Olbramovice 8/16* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni>
- [T9] HEIDELBERGCEMENT GROUP CZECH REPUBLIC. *Dokumenty ke stažení: Prohlášení o vlastnostech DK Olbramovice 11/22*[online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni>
- [T10] *Sika ViscoCrete-1035 / CZ: Produkty a řešení > Dokumentace > Produktové listy > Technické listy produktů skupiny Sika ViscoCrete*[online]. 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/dokumentace/PDS/PDS_G_Sika_ViscoCrete.html