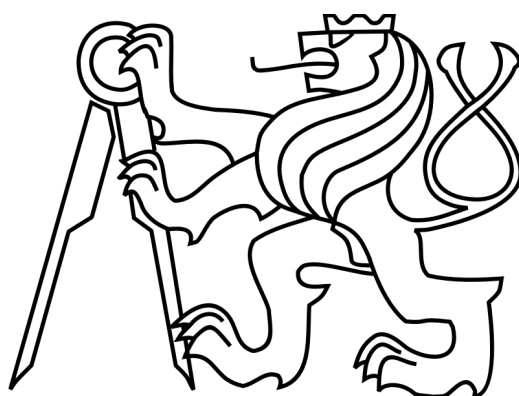


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv mikrosiliky na vybrané vlastnosti betonu

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Experimentální centrum

Vliv mikrosiliky na vybrané vlastnosti betonu

Impact of silica fume on specific properties of concrete

Diplomová práce

Autor: Bc. Filip Petřík

Vedoucí práce: doc. Ing. Bc. Radoslav Sovják, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Petřík Jméno: Filip Osobní číslo: 410064
 Zadávající katedra: K210 - Experimentální centrum
 Studijní program: Stavební inženýrství
 Studijní obor: magisterský navazující na bakalářský - Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv mikrosiliky na vybrané vlastnosti betonu

Název diplomové práce anglicky: Impact of silica fume on specific properties of concrete

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše současného poznání o použití mikrosiliky do cementových kompozitů. Popis vlivu mikrosiliky na vlastnosti čerstvé betonové směsi a ztvrdlého betonu. Reakce mikrosiliky při hydrataci cementu.

Průzkum současných dodavatelů mikrosiliky do ČR.

Návrh experimentálního programu pro splnění cílů diplomové práce - porovnání účinků různých druhů mikrosiliky (chemické složení, způsob skladování) na vlastnosti čerstvé betonové směsi a vybrané vlastnosti ztvrdlého betonu. Provedení experimentů a výroba zkušebních těles pro laboratorní zkoušky.

Vyhodnocení výsledků zkoušek a popis účinků jednotlivých druhů mikrosiliky na sledované vlastnosti betonu na základě těchto výsledků.

Závěr a shrnutí výsledků, popř. návrh na další výzkum v této oblasti.

Seznam doporučené literatury:

Malhotra V.M., Ramachandran V.S., Feldman R.F., Aitcin P.C.: Condensed Silica Fume in Concrete

Collepardi M.: The New Concrete

Aitcin P.C.: High-performance concrete

Collepardi M.: Use of fly ash, silica fume and natural pozzolans in Europe

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Bc. Radoslav Sovják, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 15.2.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 16.5.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém úseku příslušného ak. roku

[Signature]
Podpis vedoucího práce

[Signature]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

15.2.2021

Datum převzetí zadání

[Signature]
Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

Praha, 10. Května 2021

Bc. Filip Petřík

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Bc. Radoslavu Sovjákovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zhotovování této práce. Zároveň bych chtěl poděkovat zástupcům společností CS-BETON s.r.o. a Stachema CZ s.r.o. za vstřícnost při provádění zkoušek. Velký dík patří také členům rodiny a přítelkyni za neustálou psychickou podporu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem jednotlivých druhů mikrosiliky na vybrané vlastnosti čerstvé betonové směsi a ztvrdlého betonu. Pro vyhodnocení těchto vlastností byl navržen experimentální program, v rámci kterého byly prováděny zkoušky čerstvého betonu a zhotovena zkušební tělesa pro zjištění průběhu pevností v tlaku, odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám a rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Celkem bylo vyzkoušeno 6 druhů mikrosiliky. Pro zjištění vlivu jednotlivých druhů tohoto materiálu na vlastnosti čerstvého betonu byla touto příměsí nahrazována část cementu bez dalších změn v receptuře. V rámci objektivního porovnání vlastností ztvrdlého betonu byly pomocí chemických přísad sjednoceny vlastnosti čerstvého betonu a následně byly všechny výsledky vyhodnoceny.

Klíčová slova: mikrosilika, vlastnosti betonu, pevnost v tlaku, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, obsah vzduchu v betonu

Abstract

The aim of this paper is focused on impact of several types of silica fume on specific properties of fresh and hardened concrete. For evaluation of these properties there was designed experimental programme, during which the tests of fresh concrete were made and for finding out the compressive strength development, frost resistance and amount of void air in concrete, series of test specimen were produced. There was used 6 types of silica fume. For evaluation of impact of separate types of silica fume on fresh concrete properties, there was replaced some amount of cement for silica fume without further changes in the recipe. Due to objective comparison of hardened properties of concrete, the fresh concrete properties were united by using chemical additives. Thereafter were all properties evaluated.

Key words: silica fume, properties of concrete, compressive strength, frost resistance, void air in concrete

Obsah

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	11
Seznam grafů.....	13
1. Úvod.....	14
1.1. Motivace práce.....	15
1.2. Cíle práce.....	16
1.3. Rozsah práce.....	17
2. Vlastnosti mikrosiliky.....	18
2.1. Výroba mikrosiliky.....	18
2.2. Chemické složení.....	18
2.3. Fyzikální charakteristiky mikrosiliky.....	19
2.3.1. Objemová hmotnost.....	19
2.3.2. Měrná hmotnost.....	19
2.3.3. Velikost a tvar částic.....	20
2.3.4. Měrný povrch.....	21
2.3.5. Barva.....	23
2.4. Skladování a doprava mikrosiliky.....	23
3. Reakce mikrosiliky v cementovém kompozitu.....	26
3.1. Hydratace cementu.....	26
3.1.1. Hydratace aluminátů.....	26
3.1.2. Hydratace silikátů.....	27
3.2. Reakce aktivních příměsí.....	28
3.2.1. Pucolány.....	28
3.2.2. Struska.....	29
4. Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu.....	31
4.1. Vlastnosti čerstvé betonové směsi.....	31
4.2. Vlastnosti ztvrdlého betonu.....	32
4.2.1. Pevnost v tlaku.....	33
4.2.2. Youngův modul pružnosti.....	36

4.2.3.	Propustnost.....	36
4.2.4.	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování.....	37
5.	Porovnání vlastností mikrosiliky s ostatními aktivními přísadami do betonu	41
6.	Experimentální část	44
6.1.	Návrh receptur betonových směsí.....	44
6.1.1.	Kamenivo.....	44
6.1.2.	Cement.....	45
6.1.3.	Příměsi	46
6.1.4.	Přísady	48
6.1.5.	Voda.....	48
6.2.	Postup míchání směsi a výroba zkušebních těles.....	48
6.3.	Zkoušení čerstvého betonu.....	49
6.3.1.	Souhrnné výsledky zkoušek čerstvého betonu	50
6.3.2.	Konzistence čerstvé betonové směsi.....	51
6.3.3.	Množství vzduchu v ČB a objemová hmotnost.....	52
6.3.4.	Reologie cementových malt.....	54
6.4.	Zkoušení ztvrdlého betonu.....	58
6.4.1.	Parametry čerstvého betonu záměsí T22-T28	59
6.4.2.	Pevnost betonu v tlaku.....	60
6.4.3.	Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám.....	69
6.4.4.	Množství vzduchu ve ztvrdlém betonu – spacing factor	74
7.	Vyhodnocení a závěr	80
	Použitá literatura	83

Seznam obrázků

- Obr. 1 – Snímek částic mikrosiliky z rastrového elektronového mikroskopu
- Obr. 2 – Rozložení velikosti zrn jednotlivých druhů mikrosiliky
- Obr. 3 – Porovnání velikosti a tvaru částic cementu a mikrosiliky; (Δ) cement, (x) mikrosilika
- Obr. 4 – Porovnání barev jednotlivých druhů mikrosiliky
- Obr. 5 – Příklad skladování mikrosiliky pomocí big bagů
- Obr. 6 – Schematické znázornění hydratace a vývoje pevností kalcium-aluminátů v čase
- Obr. 7 – Schematické znázornění hydratace a vývoje pevností kalcium-silikátů v čase
- Obr. 8 – Rozložení atomů Si a O u křemene a amorfni siliky
- Obr. 9 – Schematické znázornění vlivu dávky mikrosiliky na pevnost betonu
- Obr. 10 – Obecný vztah mezi indexem efektivity mikrosiliky a jejím množstvím ve směsi (% cementu)
- Obr. 11 – Schematické znázornění významu hodnoty spacing factor
- Obr. 12 – Výsledky zkoušek mrazuvzdornosti betonu s použitím mikrosiliky
- Obr. 13 – $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ Ternární diagram složení cementových materiálů
- Obr. 14 – Výroba zkušebních těles
- Obr. 15 – Měření konzistence čerstvého betonu metodou rozlití
- Obr. 16 – Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou
- Obr. 17 – Uskladnění forem se zkušebními tělesy před odformováním
- Obr. 18 – Příklad porušení povrchu vzorků po zkoušce odolnosti vůči CHRL
- Obr. 19 – Detail porušení povrchu vzorku po zkoušce odolnosti vůči CHRL
- Obr. 20 – Příklad vyhovujícího výsledku zkoušky odolnosti vůči CHRL

Obr. 21 – Broušení vzorku brusným kotoučem

Obr. 22 – Vzorky po zbroušení

Obr. 23 – Vzorek připravený pro nasnímání mikroskopem

Obr. 24 – Snímání vzorku pod mikroskopem

Seznam tabulek

- Tab. 1 – Příklady chemického složení křemičitých úletů
- Tab. 2 – Objemové hmotnosti křemičitých úletů
- Tab. 3 – Měrné hmotnosti křemičitých úletů
- Tab. 4 – Střední průměr zrna jednotlivých druhů mikrosiliky
- Tab. 5 – Vliv náhrady mikrosiliky za cement na konzistenci čerstvého betonu
- Tab. 6 – Vliv náhrady mikrosiliky za cement na dávku plastifikátoru
- Tab. 7 – Příklad vývoje pevností betonu v tlaku v závislosti na množství mikrosiliky
- Tab. 8 – Přehled výsledků Youngova modulu pružnosti E
- Tab. 9 – Vliv vápna na tvrdnutí pucolánů a strusky
- Tab. 10 – Příklad složení cementových materiálů
- Tab. 11 – Příklady fyzikálních vlastností cementových materiálů
- Tab. 12 – Chemické složení cementu CEM I 42,5 R Mokrá
- Tab. 13 – Mechanicko-fyzikální parametry cementu CEM I 42,5 R Mokrá
- Tab. 14 – Vybrané vlastnosti použitých typů mikrosiliky
- Tab. 15 – Složení betonových směsí pro zkoušky čerstvého betonu
- Tab. 16 – Souhrnné výsledky zkoušek čerstvého betonu
- Tab. 17 – Porovnání tokových vlastností jednotlivých druhů mikrosiliky měřením při různých otáčkách
- Tab. 18 – Složení betonových směsí pro zkoušky ztvrdlého betonu
- Tab. 19 – Výsledky zkoušek čerstvého betonu záměsí T22-T28

Tab. 20 – Přehled pevností v tlaku

Tab. 21 – Porovnání pevností v tlaku v závislosti na jeho objemové hmotnosti

Tab. 22 – Porovnání vztahů mezi pevností v tlaku, obsahem vzduchu v ČB a objemovou hmotností pro betony s různými druhy mikrosiliky

Tab. 23 – Detailní výsledky jednotlivých vzorků na odolnost vůči CHRL

Tab. 24 – Průměrné hodnoty odolnosti vůči CHRL pro směsi s různými druhy siliky

Tab. 25 – Souhrnné výsledky charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Seznam grafů

- Graf 1 – Porovnání navržené křivky zrnitosti s ideální křivkou dle TKP 18
- Graf 2 – Vztah konzistence a obsahu vzduchu ČB
- Graf 3 – Závislost Objemové hmotnosti na obsahu vzduchu v ČB
- Graf 4 – Vliv mikrosiliky na reologii malt při konstantní rychlosti otáček při měření
- Graf 5 – Pevnost v tlaku ve stáří 1 den
- Graf 6 – Pevnost v tlaku ve stáří 7 dní
- Graf 7 – Pevnost v tlaku ve stáří 28 dní
- Graf 8 – Pevnost v tlaku ve stáří 60 dní
- Graf 9 – Průběh pevností betonu v tlaku
- Graf 10 – Porovnání pevností v tlaku 1D v závislosti na množství vzduchu v ČB
- Graf 11 – Porovnání pevností v tlaku 7D v závislosti na množství vzduchu v ČB
- Graf 12 – Porovnání pevností v tlaku 28D v závislosti na množství vzduchu v ČB
- Graf 13 – Porovnání pevností v tlaku 1D v závislosti na objemové hmotnosti ČB
- Graf 14 – Porovnání pevností v tlaku 7D v závislosti na objemové hmotnosti ČB
- Graf 15 – Porovnání pevností v tlaku 28D v závislosti na objemové hmotnosti ČB
- Graf 16 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám v průběhu po 25 cyklech
- Graf 17 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám po 100 cyklech
- Graf 18 – Charakteristika vzduchových pórů v ZB (záměsi T15-T21)
- Graf 19 – Charakteristika vzduchových pórů v ZB (záměsi T22-T28)

1. Úvod

V průmyslové výrobě vzniká vysoké množství odpadních produktů, pro které jsou v závislosti na stále se zvyšující nároky na ochranu životního prostředí hledána nejrůznější využití. Jedním z takových materiálů byla v minulosti mikrosilika (křemičitý úlet), což je vedlejší produkt výroby křemíku nebo různých křemičitých slitin v obloukových pecích. [1]

Přestože se první vědecké články o použití tohoto odpadního produktu do betonu objevily už v roce 1952, začala se mikrosilika využívat jako doplňková složka do betonu až koncem 70. let dvacátého století ve Skandinávii a počátkem 80. let v Severní Americe. Po mnoho let výrobci křemíku a ferrosilicia nechávali unikat křemičitý úlet do atmosféry, ale po zavedení přísných nařízení o ochraně životního prostředí byli nuceni začít tento vedlejší produkt zachycovat.

Po značných investicích do výkonných odlučovacích systémů získávali odpadní produkt, pro který ale neměli žádné využití. Manipulace s takto jemnými prachovými částicemi byla navíc velmi složitá, což ještě snižovalo možnosti použití. Po výzkumech, které provedl H. H. Bache v roce 1981, byly ale velmi rychle zjištěny mimořádné výhody použití mikrosiliky jako aktivní příměsi do betonu a po dalších výzkumných aktivitách v ostatních zemích byl křemičitý úlet zaveden jako příměs do betonu po celém světě během méně než pěti let. [2]; [3]

Křemičité úlety jsou složeny z mikrokuliček, které mají průměrnou velikost pod 0,1 μm , což je přibližně 100x méně, než je velikost zrna cementu. Vzhledem k této jemnosti je mikrosilika vysoce účinný pucolánový materiál, který se používá do betonu pro zlepšení jeho vlastností. Bylo zjištěno, že použití mikrosiliky zvyšuje pevnost a odolnost betonu, snižuje průsak vodou a tím chrání výztuž proti korozi. Křemičité úlety jsou tedy využívány především ve vysokohodnotných betonech s vysokými nároky na požadované vlastnosti. [4]

V průběhu let se z mikrosiliky stal velmi poptávaný materiál a v současné době už jsou křemičité úlety standardně užívanou složkou při výrobě betonů. Stejně jako v ostatních technologických odvětvích průmyslu vyvinuli výrobci křemičitých slitin celou řadu specifických produktů pro speciální využití. S rostoucími požadavky zákazníků na

vlastnosti křemičitých slitin se také začaly používat odlišné druhy primárních materiálů pro výrobu. V závislosti na produkci různých druhů křemičitých slitin v obloukových pecích začalo vznikat také velké množství typů mikrosiliky. [5]

1.1. Motivace práce

Na trhu s aktivními příměsemi do betonu se objevuje celá řada mikrosilik, které se liší chemickým složením, barvou, tvarem a velikostí částic, způsobem skladování a dávkování, měrným povrchem, měrnou hmotností, cenou a dalšími vlastnostmi.

Při výrobě křemíku a ferrosilicia jsou vstupní suroviny zcela čisté, proto zde může být předpoklad, že má křemičitý úlet z jedné pece stálé složení. To ale trvá pouze do té doby, než se změní typ vyráběné křemičité slitiny. Vzhledem k tomu, že v dobách, kdy byla většina obloukových pecí konstruována, byly křemičité úlety brány jako odpadní a problematický materiál bez obchodní hodnoty, se úlety vytvořené v různých pecích a při výrobě různých slitin smíchaly na jedné skládce dohromady. V takových situacích může být mikrosilika směsí jejích různých druhů, rozdílného chemického složení a proměnlivých pucolánových vlastností. [2]

Mikrosilika se tedy jako vedlejší produkt může v čase lišit svojí kvalitou a konzistentností vlastností, i když je na rozdíl od vzniku popílků výsledkem důsledně kontrolovaných procesů při výrobě slitin v obloukových pecích. Proto může koncový odběratel této příměsi nabýt dojmu, že mikrosilika zlepšuje vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu bez ohledu na to, z jakých primárních surovin je tento vedlejší produkt vyroben.

Zejména při výrobě betonů s vysokými požadavky na jejich vlastnosti je velmi důležité znát jasný původ křemičitých úletů a pravidelně zkoušet jejich složení a reaktivitu, aby mohlo být dosaženo stabilního používání tohoto materiálu.

V důsledku zvyšující se poptávky po tomto materiálu se mikrosilika stala několikanásobně dražší surovinou než cement. Kromě vysokohodnotných betonů se křemičité úlety přidávají i do standardních samozhutnitelných betonů, u kterých hraje poměr cena/kvalita významnou roli. V situaci, kdy je na trhu velmi různorodá nabídka vstupních materiálů, je důležité zjistit, které vlastnosti daných materiálů ovlivňují výsledné klíčové parametry betonu nejvíce a které pouze nepatrně.

Motivací této práce je porovnat, jaký vliv mají různé druhy mikrosiliky na ty vlastnosti betonu, kvůli kterým se do směsí primárně přidává. Je známo, že aktivní příměsi se do betonu přidávají mimo jiné z důvodu snížení dávky cementu, proto je v této práci porovnávána efektivita jednotlivých druhů mikrosiliky také s účinky portlandského cementu.

1.2. Cíle práce

Cílem této práce je vytvořit a vyhodnotit experimentální program, který komplexně porovná vliv druhu mikrosiliky na vlastnosti betonu. Aby se dal vliv přidané mikrosiliky objektivně vyhodnotit, musí být navržen takový beton, u kterého bude mít přidání této příměsi zásadní vliv na jeho výsledné vlastnosti. Zároveň musí být mikrosilika dávkována v takovém množství, aby její částice v co největší míře zreagovaly s portlanditem za vzniku druhotného C-S-H gelu. Pokud by mikrosilika fungovala ve standardním betonu z podstatné části pouze jako mikroplnivo, bylo by její využití neefektivní.

Prvním úkolem je zkoumání vlastností čerstvého betonu. Náhradou cementu za jednotlivé druhy mikrosiliky bez dalších úprav dávek přísad a vody zjistíme změnu sledovaných vlastností. Jedná se o konzistenci čerstvé betonové směsi, která se u typu navrženého betonu měří zkouškou rozlití dle ČSN EN 12350-5, množství vzduchu v čerstvé betonové směsi a dále reologické vlastnosti betonu.

Dalšími zkoumanými parametry jsou vlastnosti ztvrdlého betonu. Práce je zaměřena na průběh pevností betonu v tlaku, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám a množství vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu včetně jejich rozložení dle velikosti. Pro správné vyhodnocení účinků jednotlivých druhů mikrosiliky je potřeba vyrobit zkušební tělesa z betonů, které budou mít shodné vstupní materiály, stejný postup míchání směsi, postup výroby těles za daných laboratorních podmínek a dále musí být tělesa uložena a ošetřována v totožném prostředí.

Stejně tak je nutné v této fázi zkoušek sjednotit vlastnosti čerstvého betonu. Vzhledem k tomu, že záměnou cementu za mikrosiliku zásadně zvýšíme povrch částic ve směsi, předpokládá se v určité míře snížení hodnoty konzistence čerstvé směsi. Dosažení požadovaných hodnot se v rámci zachování shodného vodního součinitele zajistí přidáním plastifikační přísady. Objemová hmotnost betonu je závislá na množství

vzduchu ve směsi, proto bude tato veličina upravována do požadovaných hodnot dávkou provzdušňovací přísady.

1.3. Rozsah práce

V první části této práce je zpracována literární rešerše, která shrnuje aktuální poznání o použití mikrosiliky do cementových kompozitů. Jsou zde rozebrány vlastnosti mikrosiliky, její obecné účinky na parametry čerstvého a ztvrdlého betonu nebo její reakce při hydrataci cementu. V druhé části je popsán návrh experimentálního programu, provedení zkoušek včetně výroby zkušebních těles a následné vyhodnocení vlivu jednotlivých druhů mikrosiliky na zmíněné vlastnosti betonu.

2. Vlastnosti mikrosiliky

2.1. Výroba mikrosiliky

Mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt sérií chemických reakcí v elektrické obloukové peci při výrobě křemičitých slitin. Částice mikrosiliky vznikají oxidací plynného SiO, který se vytváří v reakční zóně pece. Když jsou následně pevné částice mikrosiliky unášeny proudícím vzduchem z pece, zachycují se na látkových pytlových filtrech.

Typ křemičité slitiny vyrobené v elektrické obloukové peci zásadně ovlivňuje chemické složení vedlejšího produktu v podobě mikrosiliky, protože teplota a chemické reakce v peci závisí na druhu a množství slinutého kovu a také na nečistotách obsažených v kovech nebo rudách.

2.2. Chemické složení

Nejčastější druhy křemičitých slitin vyráběných v elektrických pecích jsou ferrosilicium s různým obsahem SiO₂, Ferrochrom-silicium (FeCrSi) a dále slitiny s obsahem vápníku, manganu a hořčíku - CaSi, CaMnSi, SiMn nebo FeMgSi. Příklady složení mikrosiliky vzniklé při výrobě těchto typů slitin jsou znázorněny v tabulce Tab. 1. [5]

Typ slitiny	Si	šedé FeSi-75%	bílé FeSi-75%	FeSi-50%	FeCrSi	CaSi	SiMn
Složka							
SiO₂	94	89	90	83	83	54	25
Fe₂O₃	0,03	0,6	2,9	2,5	1,0	0,7	1,8
Al₂O₃	0,06	0,4	1,0	2,5	2,5	0,9	2,5
CaO	0,5	0,2	0,1	0,8	0,8	23,2	4,0
MgO	1,1	1,7	0,2	3,0	7,0	3,3	2,7
Na₂O	0,04	0,2	0,9	0,3	1,0	0,6	2,0
K₂O	0,05	1,2	1,3	2,0	1,8	2,4	8,5
C	1,0	1,4	0,6	1,8	1,6	3,4	2,5
S	0,2	0	0,1	0	0	0	2,5
MnO	0	0,06	0	0,2	0,2	0	36
ztráta žiháním	2,5	2,7	0	3,6	2,2	7,9	10

Tab. 1 – Příklady chemického složení křemičitých úletů [5]

2.3. Fyzikální charakteristiky mikrosiliky

2.3.1. Objemová hmotnost

Křemičité úlety jsou obvykle velmi lehké a je složité s nimi pracovat a dávkovat je. Jejich objemová sypaná hmotnost se pohybuje standardně mezi 200-500 kg/m³. Přibližné hodnoty objemových hmotností jednotlivých druhů mikrosiliky jsou uvedeny v tabulce Tab. 2. Tyto nízké hodnoty mají velký vliv na cenu dopravy a skladování, proto někteří výrobci nabízejí mikrosiliku zhutněnou do pelet. Manipulace s touto mikrosilikou včetně jejího dávkování a skladování je o mnoho jednodušší, ale je zde předpoklad, že ne všechny takto zhutněné částice jsou v mísícím bubnu důkladně rozmíchány. Proto může být vliv této mikrosiliky na výsledné vlastnosti betonu nižší než u práškových nezhutněných materiálů. [6]

	Si	FeSi-75%	FeSi-50%	FeCrSi	CaSi	SiMn	běžný cement
Objemová hmotnost [kg/m³]	260	230 - 405	310	330	530	535	800

Tab. 2 – Objemové hmotnosti křemičitých úletů [5]

2.3.2. Měrná hmotnost

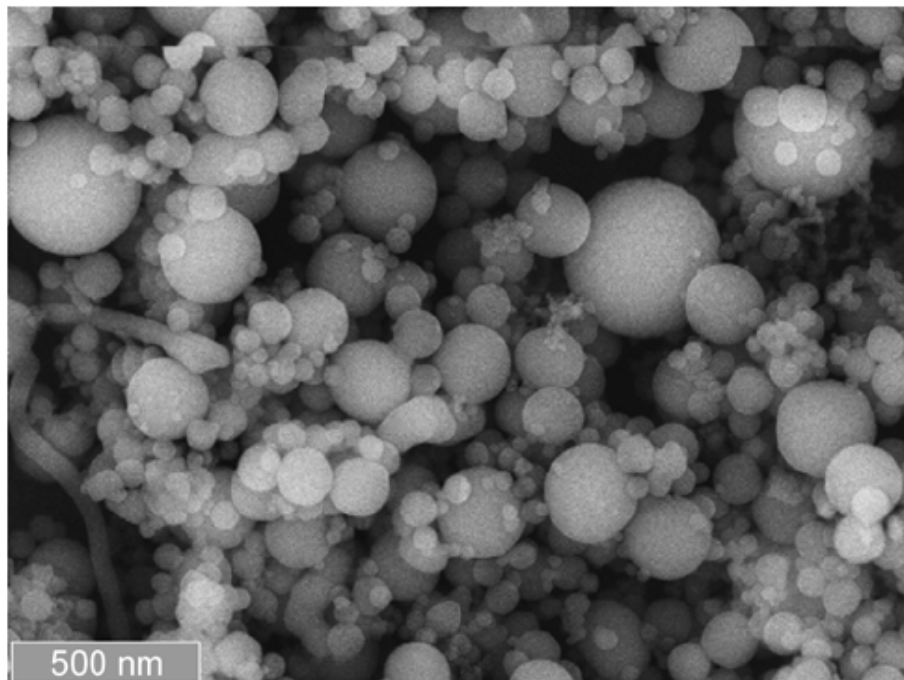
Mikrosilika se skládá především z křemičitých částic, jejichž měrná hmotnost se pohybuje okolo 2200 kg/m³. Na výslednou měrnou hmotnost mikrosiliky mají nicméně vliv různé nečistoty, které se v materiálu objevují, například částice železa, hořčíku nebo vápníku. Čím vyšší je obsah těchto vedlejších látek, tím vyšší je měrná hmotnost mikrosiliky. V tabulce Tab. 3 jsou uvedeny hodnoty měrných hmotností jednotlivých druhů křemičitých úletů.

	Si	FeSi-75%	FeSi-50%	FeCrSi	CaSi	SiMn	běžný cement
Měrná hmotnost [kg/m³]	2230	2210-2230	2300	2420	2550	3130	3130

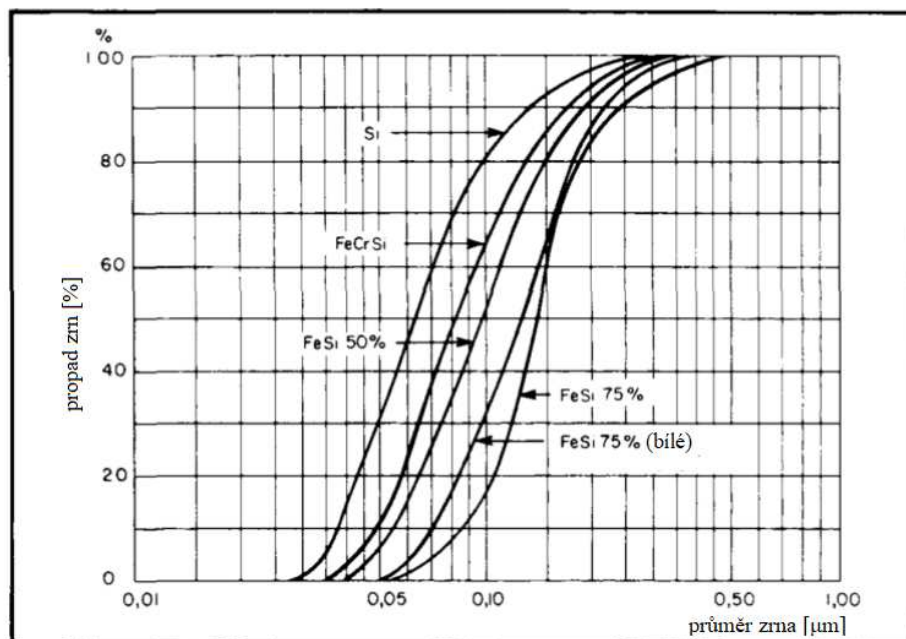
Tab. 3 – Měrné hmotnosti křemičitých úletů [5]; [7]

2.3.3. Velikost a tvar částic

Při sledování mikrosiliky na elektronovém mikroskopu lze zjistit, že její částice jsou téměř dokonale kulovité (Obr. 1). Průměr těchto částic má rozsah od 0,1 do 2 μm , jejich rozložení je vidět na Obr. 2 a průměrné hodnoty velikosti zrna jednotlivých druhů křemičitého úletu jsou znázorněny v tabulce Tab. 4.



Obr. 1 – Snímek částic mikrosiliky z rastrového elektronového mikroskopu [8]



Obr. 2 – Rozložení velikosti zrn jednotlivých druhů mikrosiliky [5]

	Si	šedé FeSi-75%	bílé FeSi-75%	FeSi-50%	FeCrSi
Průměr zrna mikrosiliky [μm]	0,18	0,26	0,23	0,21	0,18

Tab. 4 – Střední průměr zrna jednotlivých druhů mikrosiliky [5]

2.3.4. Měrný povrch

Měrný povrch daného materiálu je přímo závislý na velikosti jeho částic. U cementů, popílků a vysokopecní strusky jsou povrchy běžně posuzovány metodou dle Blaina a uváděny v m^2/kg (nebo v cm^2/g). Měrný povrch měřený permeabilní metodou podle Blaina je vypočítáný z času, který je potřeba pro průchod určitého množství vzduchu přes lůžko zhuštěného materiálu dané velikosti a porozity. [9]

Nicméně, tato metoda stanovení měrného povrchu částic materiálu nemusí být vhodná pro všechny minerální příměsi. Blaine počítá s předpokladem, že velikosti částic v daném materiálu se pohybují v relativně malém rozsahu. Navíc je to metoda srovnávací, takže se předpokládá, že existuje několik obecně uznávaných referenčních materiálů s vlastnostmi podobnými zkoušenému vzorku, což může být pro mikrosiliku limitujícím faktorem.

Dalším problémem je fakt, že je nemožné při tvorbě zhuštěného lůžka z mikrosiliky dosáhnout porozity 0,500, což je hodnota doporučená pro standardní měření dle ČSN EN 196-6. Při stlačení komůrky s materiálovým lůžkem pomocí pístu se mikrosilika chová pružně a po uvolnění pístu opět zvětší svůj objem. V tomto případě je pak čas naměřený při průchodu vzduchu v řádu nízkých jednotek sekund, což pro správné vyhodnocení zkoušky nemůže být považováno za dostačující. [10]

Měrný povrch křemičitých úletů je z výše uvedených důvodů nejčastěji měřen metodou adsorpce dusíku (také známá jako metoda B.E.T.), která spočívá v kvantifikování množství dusíkových molekul potřebných pro pokrytí povrchu vzorku materiálu. [9]

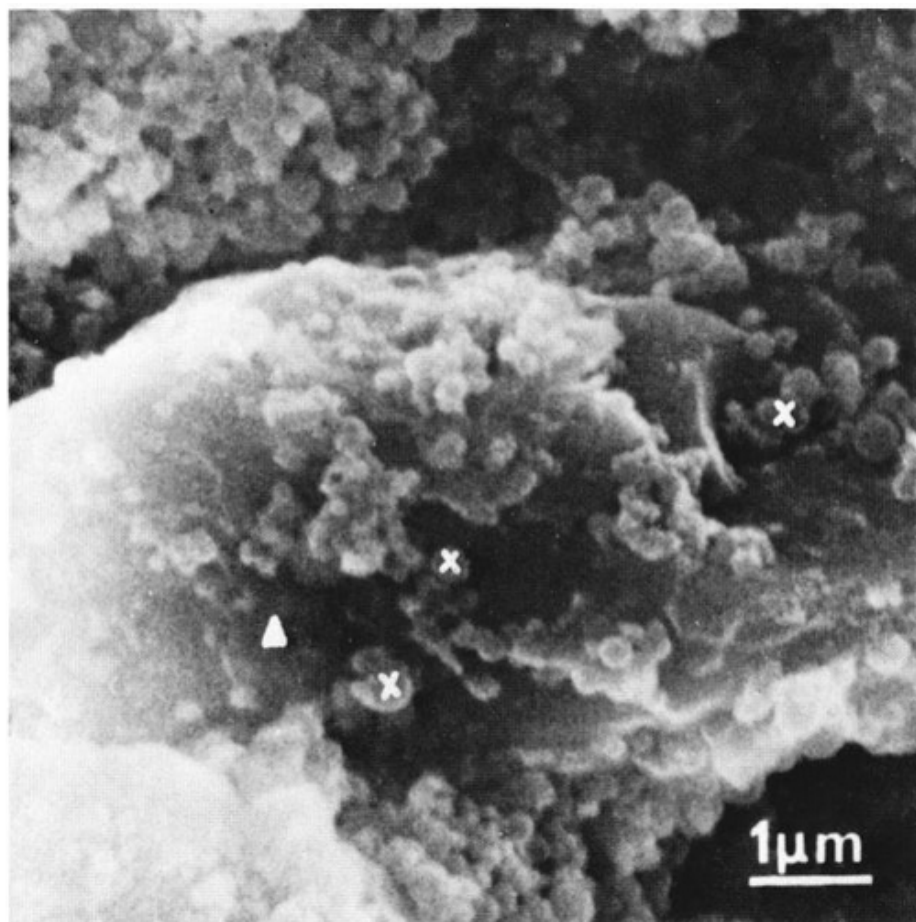
Při zkoušení cementu metodou adsorpce dusíku dostaneme odlišné hodnoty měrného povrchu v porovnání s měřením dle Blaina. Obecně, pokud má cement měrný povrch 3 000 – 4 000 cm^2/g dle Blaina, bude mít při měření metodou adsorpce dusíku povrch 10 000 – 15 000 cm^2/g .

Nevýhodou metody adsorpce dusíku je skutečnost, že u výsledného povrchu hraje roli množství a jemnost přítomného nespáleného uhlíku. Čím vyšší je ztráta žíháním a čím vyšší je obsah uhlíku v materiálu, tím vyšší je dle této zkoušky měrný povrch. Abychom

mohli interpretovat měrný povrch úplně přesně, měli bychom mít tedy k dispozici hodnoty ztráty žháním a obsahu uhlíku. [10]

Nejčastěji uváděné hodnoty měrného povrchu pro mikrosiliku jsou v rozmezí 180 000 – 200 000 cm²/g. Takto vysoký měrný povrch zajišťuje v betonu velmi výraznou pucolánovou reaktivitu a také způsobuje zvýšenou potřebu vody nebo plastifikačních přísad.

Měrný povrch mikrosiliky není 100x větší než u cementu (jako je poměr velikosti částic cementu a mikrosiliky), ale tento rozdíl je překvapivě nižší. Je to způsobeno tím, že částice křemičitého úletu mají téměř kulovitý tvar a hladký povrch, ale zrna cementu jsou nepravidelného tvaru a mají hrubý a členitý povrch, což výrazně zvyšuje výslednou hodnotu měrného povrchu. Porovnání velikostí, tvarů a povrchů částic cementu a mikrosiliky jsou znázorněny na obrázku Obr. 3. [5]

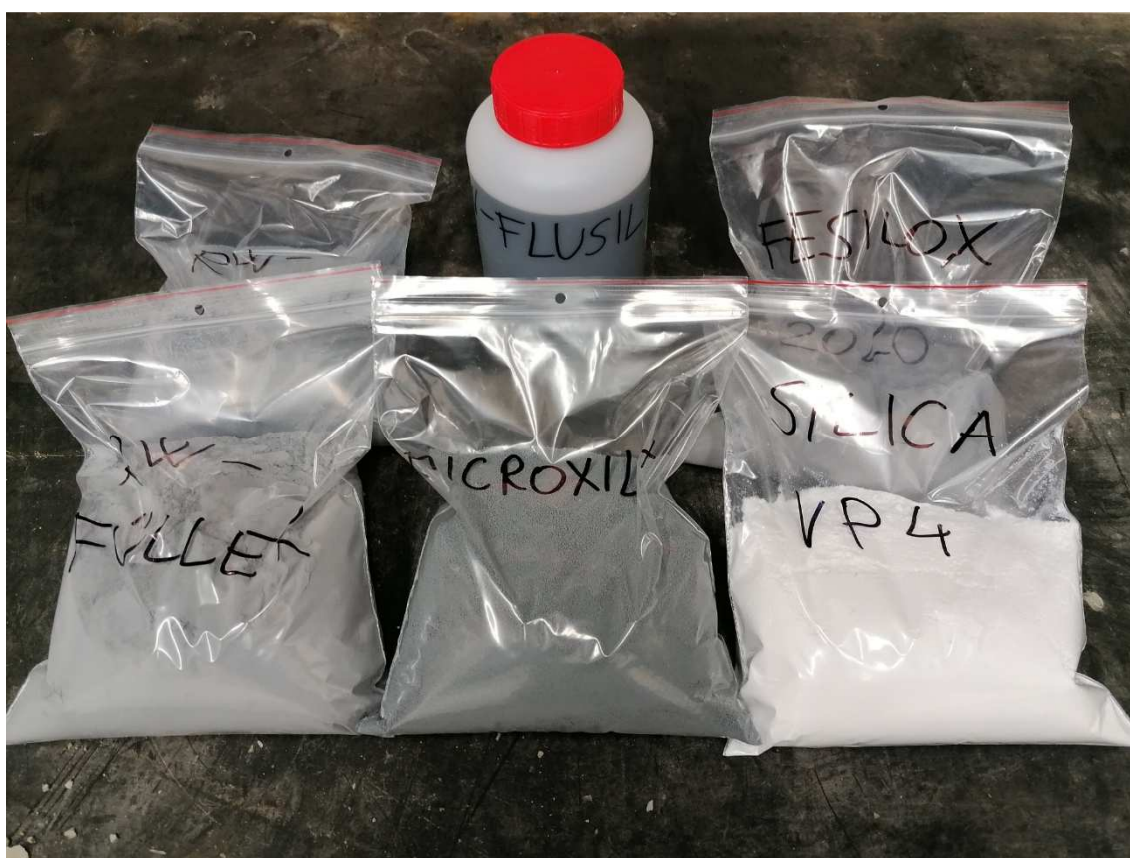


Obr. 3 – Porovnání velikosti a tvaru částic cementu a mikrosiliky; (Δ) cement, (x) mikrosilika

2.3.5. Barva

Barva mikrosiliky se pohybuje na škále od tmavě šedé až po bílou. Nejvíce ovlivňuje barvu přítomnost uhlíku, který se vytváří v pecích při užití dřevní štěpky. Použití této štěpky je nutné u výroby křemíku, ale pouze volitelné u produkce ferrosilicia. Proto je křemičitý úlet z výroby křemíku nejtmaší. V elektrických pecích, které využívají rekuperaci tepla, dojde ke spálení výrazné části uhlíku i po tom, co se křemičitý úlet dostane z pece. Mikrosilika z těchto typů výroby ferrosilicia je téměř bílá. [5]

Příklady barev jednotlivých druhů mikrosiliky jsou zobrazeny na obrázku Obr. 4.



Obr. 4 – Porovnání barev jednotlivých druhů mikrosiliky

2.4. Skladování a doprava mikrosiliky

Jak bylo popsáno výše, mikrosilika je velmi jemný a lehký materiál, což způsobuje problémy při její manipulaci od zachycování částic přes následné skladování až po dopravu a dávkování jako minerální příměsí. Vzhledem k nízké objemové hmotnosti mikrosiliky (pouze cca 10% výsledného objemu materiálu je složeno z pevných částic)

muselo být vytvořeno velké množství skladovacích ploch pro dočasné uschování materiálu uvnitř výrobních závodů.

Po sběru a uskladnění mikrosiliky je dalším problémem transport. Pro dopravu materiálu bylo použito několik přístupů, které se liší v závislosti na lokálních podmínkách. Někteří výrobci křemíku a ferrosilicia zhutňují odpadní látku v podobě mikrosiliky do pelet, aby snížili náklady na dopravu a usnadnili dávkování materiálu. V jiných závodech je zase mikrosilika míchána v daném poměru s vodou v auto-domíchávacích a následně je dopravována do nádrží, čímž se vytvoří suspenze tohoto materiálu. V současné době je mikrosilika nejčastěji dopravována v následujících formách: [5]

- Big bagy o hmotnosti 400 – 600 kg (zhutněná mikrosilika)
- Big bagy o hmotnosti 250 – 350 kg (nezhutněná mikrosilika)
- Pytle o hmotnosti 20-25 kg
- Suspenze v barelech o objemu 1 m³
- Pomocí cisteren a následným skladováním v silech



Obr. 5 – Příklad skladování mikrosiliky pomocí big bagů

Každá z těchto metod zpracování mikrosiliky má svoje výhody a nevýhody. Prášková nezhtutněná mikrosilika je nejhůře dávkovatelná, navíc při manipulaci s ní uniká vysoké množství prachových částic do prostoru.

Zhtutněná mikrosilika je sice příznivější z hlediska manipulace, ale objevily se výzkumy, že v pojivových složkách betonu zůstávají shluky tohoto zhtutněného materiálu, které nelze běžným procesem míchání rozpojit. Jádra těchto shluků se nezapojují do hydratace směsi a mohou být slabými místy v cementové pastě. [6]

U mikrosiliky dodávané ve formě suspenze může být problém se segregací pevné složky, proto musí být tento materiál neustále homogenizován přečerpáváním nebo mícháním. V případě, že tento postup není dodržován, mohou nastat výkyvy v dávkování účinné složky tohoto materiálu a tím dochází k nerovnoměrnosti výsledných parametrů betonu. Další nevýhodou suspenze je prodražení dopravy, protože množství sušiny v těchto suspenzích bývá pouze okolo 50%. [5]

3. Reakce mikrosiliky v cementovém kompozitu

3.1. Hydratace cementu

Mikrosilika se svými vlastnostmi řadí mezi minerální příměsi, které se aktivně zapojují do procesu hydratace cementu. Hydratace cementu je soubor chemických reakcí mezi cementem a vodou, které způsobují ve vzniklém materiálu proces tuhnutí a tvrdnutí, díky čemuž beton přechází z plastické hmoty do pevného a mechanicky odolného materiálu.

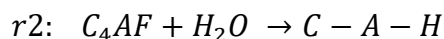
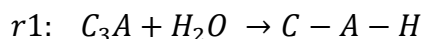
Portlandský cement se skládá ze slínku a síranu vápenatého ve formě sádrovce (popř. jiného minerálu obsahujícího CaSO_4). Slínek vzniká při výpalu vhodného poměru jílu a vápenců, čímž se vytváří směs surovin kalcium-silikátové a kalcium-aluminátové fáze. Portlandský slínek obsahuje dva kalcium-silikáty (C_3S a C_2S) a dva kalcium alumináty (C_3A a C_4AF). Jako první s vodou reagují kalcium-alumináty, které mají zásadní vliv během procesu tuhnutí, zatímco kalcium-silikáty hrají důležitou roli při tvrdnutí směsi. [11]

Při popisu hydratace cementu a s tím spojených chemických reakcí jsou běžně používány zkratky, které symbolizují příslušné oxidy. Jedná se o tyto:

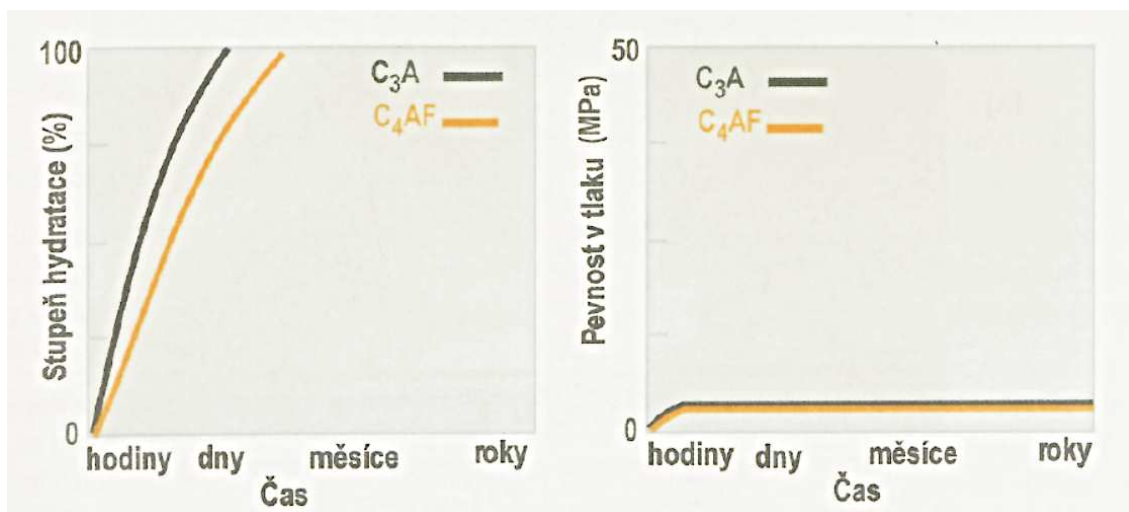
$\text{C} = \text{CaO}$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$, $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$ [11]

3.1.1. Hydratace aluminátů

Kalcium-alumináty obsažené ve slínku (C_3A a C_4AF) reagují po smíchání s vodou následovně:

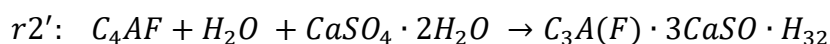
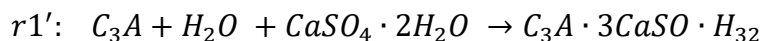


Vznikající C-A-H (kalcium-silikát-hydrát) nelze vnímat jako jednu chemicky čistou látku, která by se dala popsat vzorcem, ale jedná se o celou škálu produktů hydratace kalcium-aluminátů (např. C_3AH_6 , C_2AH_8 nebo C_4AH_{13}). [12]



Obr. 6 – Schematické znázornění hydratace a vývoje pevností kalcium-aluminátů v čase [11]

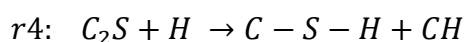
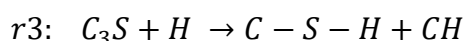
Alumináty obvykle reagují s vodou velmi rychle, čímž může docházet k okamžité ztrátě plasticity směsi a nemožnosti beton zpracovat. Z tohoto důvodu je ke slínku přimílán sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nebo anhydrit (CaSO_4), které zpomalují rychlost reakce dle následujících rovnic:



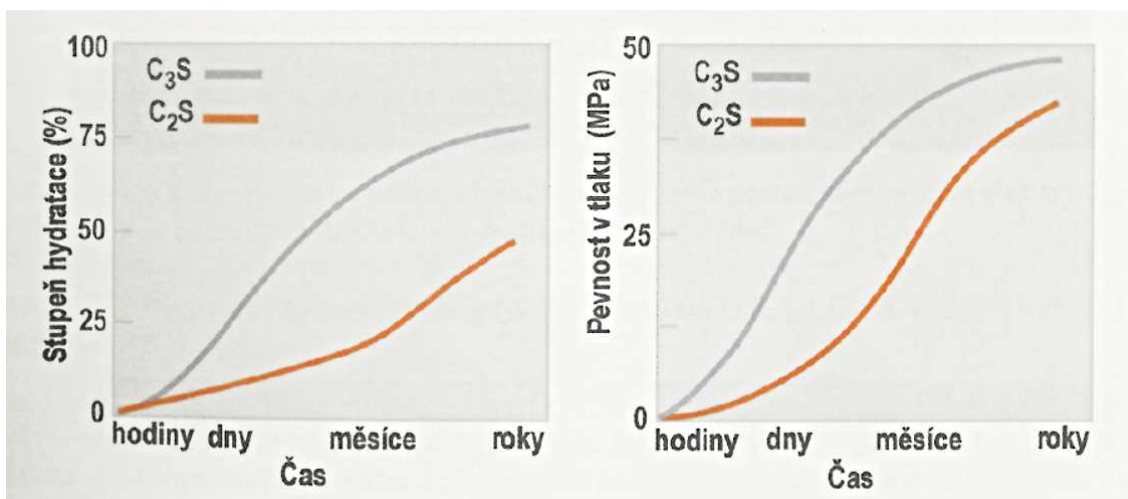
Sádrovec nebo anhydrit působí v reakci jako regulátor tuhnutí a snižují tak reakční rychlosti ($r1' < r1$ a $r2' < r2$). Podle rovnice výše také mění reakční produkt, kde namísto C-A-H vzniká ettringit ($\text{C}_6\text{ASH}_{32}$), který se v tomto případě při vzniku v prvních minutách hydratace označuje jako primární ettringit. [12]

3.1.2. Hydratace silikátů

Produkty hydratace kalcium-silikátů (C_3S a C_2S) jsou dle následujících rovnic C-S-H gel a portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (v kratším zápise CH):



Označením C-S-H gel jsou myšleny produkty amorfního charakteru (např. $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ a další). Tyto složky lze z tohoto důvodu jen velmi těžce identifikovat. [13]



Obr. 7 – Schematické znázornění hydratace a vývoje pevností kalcium-silikátů v čase [11]

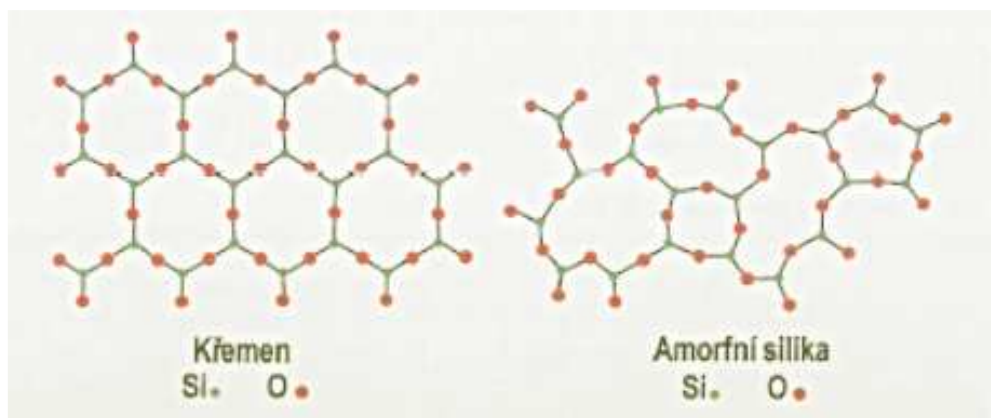
Reakční rychlost r_3 je vyšší než u r_4 , ale pro oba kalcium-silikáty je vývoj pevností v prvních hodinách zanedbatelný. Množství portlanditu, který vzniká reakcí C_3S , je vyšší než u hydratace C_2S , protože C_3S obsahuje vyšší množství vápníku. Portlandit ($Ca(OH)_2$) sám o sobě přispívá k pevnosti pouze nepatrně, ale zato hraje zásadní roli při použití aktivních příměsí. [13]

3.2. Reakce aktivních příměsí

Aktivní příměsí (pucolány a struska) obsahují amorfni siliku a jsou schopny reagovat s portlanditem vzniklým při hydrataci cementu. Touto reakcí vzniká C-S-H gel, který lze z důvodu chronologie označit jako druhotný. [11]

3.2.1. Pucolány

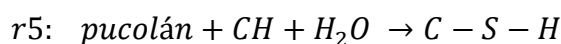
Pucolány jsou látky, které po smíchání s vodou netvrdnou, a to ani v případě, že jsou velmi jemně pomlety. Samy o sobě tedy nejsou hydraulickým pojivem. V přítomnosti vápna je ovšem pucolán schopen reagovat s vodou a přispívat tak k pevnosti i trvanlivosti vzniklého materiálu. Tato vlastnost se nazývá pucolánová aktivita a je založena na interakci amorfni siliky s vápnem a vodou v pastě. Amorfni silika je látka, v níž nejsou atomy Si a O dokonale uspořádány jako v krystalu křemene (Obr. 8).



Obr. 8 – Rozložení atomů Si a O u křemene a amorfní siliky [11]

Pucolánová aktivita je způsobena touto neuspořádaností atomů a díky ní je silika schopna reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který vzniká hydratací cementu. Mezi pucolány se řadí sopečné popely (přírodní pucolány), anebo některé umělé a průmyslové látky (mikrosilika, popílek). Pro správné působení pucolánů v pastě je nutné zvolit jeho vhodné množství v poměru k cementu tak, aby vzniklo dostatečné množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pro reakci.

Pucolány reagují s hydroxidem vápenatým takto:



Reakce r5 mezi pucolánem a CH je pomalejší než hydratace kalcium-silikátů. Pokud je tedy v betonu k dispozici dostatečné množství hydroxidu vápenatého a pucolánu, vytváří se C-S-H gel později a po dlouhou dobu. Při tvorbě sekundárního C-S-H gelu dochází ke snížení porozity v betonu v porovnání s pastou pouze z portlandského cementu při stejném w/c. [11]

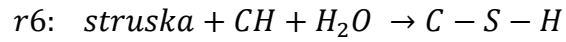
3.2.2. Struska

Reakce vysokopecní granulované strusky je založena na stejném principu, jaký byl zmíněn u pucolánů. Oproti pucolánům má však jednu zvláštnost. Vzhledem k tomu, že obsahuje více vápna než pucolány, tvrdne velmi pomalu po smíchání s vodou i bez přítomnosti dalšího $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Struska je latentně hydraulická látka a její hydrataci může aktivovat již malé množství hydroxidu vápenatého. Vápno pak funguje jako katalyzátor hydratačního procesu a urychluje tvrdnutí strusky. Z tohoto důvodu lze přidávat strusku do cementů ve velmi

širokém spektru poměrů. Přidání velkého množství strusky se pak projeví především na krátkodobých pevnostech. [11]

Reakce strusky s cementové pastě se dá vyjádřit takto:



Reakční rychlost procesu r_6 je vyšší než u reakce pucolánů, proto je možné použitím struskových cementů (při stejném množství příměsi) dosáhnout vyšších počátečních pevností než při použití pucolánového cementu. [11]

4. Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu

Použití mikrosiliky do betonu má vzhledem k výše zmíněným schopnostem tohoto materiálu vliv jak na zpracovatelnost čerstvé betonové směsi, tak na výsledné vlastnosti ztvrdlého betonu, především na pevnost a trvanlivost materiálu. V této kapitole budou rozebrány obecné účinky křemičitého úletu na vlastnosti betonu dle dřívějších výzkumů ve světě.

4.1. Vlastnosti čerstvé betonové směsi

S ohledem na pokusy, které byly provedeny s použitím mikrosiliky do betonu, lze konstatovat, že záměnou této složky za cement v určitém množství zásadně klesne hodnota konzistence a zhorší se zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. To je způsobeno velkým rozdílem v měrném povrchu cementu a mikrosiliky (cca 4 000 oproti 200 000 cm²/g), protože právě jemné částice mikrosiliky pohltnou velké množství superplastifikátoru. [14]

V roce 2005 provedli H. S. Wong a H. Abdul Razak pokusy, ve kterých byl cement ve směsi nahrazován mikrosilikou v množství 5%, 10% a 15% s tím, že nebyla měněna dávka plastifikátoru a vodní součinitel zůstal shodný. Ve třech variantách s w/c 0,27, 0,30 a 0,33 byly na betonu měřeny hodnoty konzistence pomocí zkoušky sednutím (slump test) a zkoušky Vebe. V tabulce Tab. 5 jsou naměřené výsledky zkoušek.

Složení směsi	w/c = 0,27		w/c = 0,30		w/c = 0,33	
	Zkouška sednutím [mm]	Zkouška Vebe [s]	Zkouška sednutím [mm]	Zkouška Vebe [s]	Zkouška sednutím [mm]	Zkouška Vebe [s]
Pouze cement	165	8	225	3	240	1
5% mikrosiliky	100	8	215	3	180	3
10% mikrosiliky	50	12	117	5	100	6
15% mikrosiliky	35	15	30	16	35	16

Tab. 5 – Vliv náhrady mikrosiliky za cement na konzistenci čerstvého betonu [15]

Z těchto výsledků je patrné, že čím více cementu je mikrosilikou nahrazeno, tím větší je rozdíl v konzistenci oproti referenčnímu vzorku. Tato skutečnost platí pro všechny zkoušené varianty vodního součinitele a pro obě metody měření. [15]

Toto chování bylo zjištěno také ve výzkumech, které v roce 2004 provedli M. Mazloom a kol., kteří naopak při záměně mikrosiliky za cement upravovali dávku plastifikátoru tak, aby byl výsledek zkoušky sednutím 100 ± 10 mm. To mělo za následek zvyšování dávky plastifikátoru při vyšším množství mikrosiliky ve směsi. Podrobné výsledky jsou znázorněny v tabulce Tab. 6. Při náhradě 15% cementu za mikrosiliku byla zvýšena dávka plastifikátoru o 63%. [16]

Složení směsi [kg/m ³]	Označení záměsi			
	OPC	SF6	SF10	SF15
Cement	500	470	450	425
Mikrosilika	-	30	50	75
Superplastifikátor	8,17	9,78	11,71	13,34

Tab. 6 – Vliv náhrady mikrosiliky za cement na dávku plastifikátoru [16]

Mikrosilika také pomáhá v betonu omezit segregaci jeho složek a odlučování vody. Tento jev, známý také jako krvácení betonu, se projevuje tím, že pevné částice směsi nejsou schopny udržet veškerou vodu v pastě, ta se odloučí na povrch a kamenivo obsažené v betonu má tendenci ve směsi klesat. Tímto se vytvoří v betonu otevřené kapiláry, které mají negativní vliv na pevnost a trvanlivost betonu.

Pozitivní vliv mikrosiliky na segregaci složek betonu je zdůvodňován tím, že vzhledem k jemnosti materiálu mikrosilika lépe váže vodu a nedochází k jejímu odlučování. Zároveň jemné částice mikrosiliky vyplňují prostor mezi jednotlivými zrny cementu, čímž redukuje kapiláry pro odlučování vody. [17]

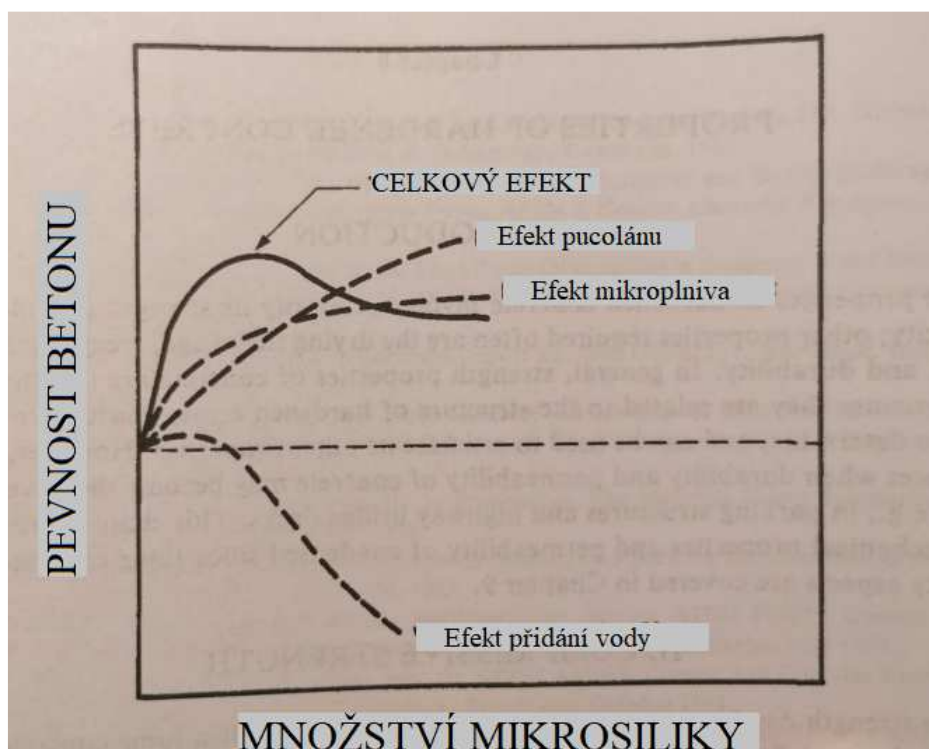
4.2. Vlastnosti ztvrdlého betonu

Pozitivní účinky mikrosiliky na vlastnosti ztvrdlého betonu nespočívají pouze v chemické pucoánové reakci, ale také ve fyzikální podstatě částic křemičitých úletů. Tyto velmi jemné částice mohou v betonu působit jako mikroplnivo, čímž zásadně zvyšují hutnost materiálu a tím ovlivňují některé vlastnosti ztvrdlého betonu.

4.2.1. Pevnost v tlaku

Vývoj pevností v tlaku u betonů obsahujících mikrosiliku je podobný jako u ostatních pucolánových materiálů s tím rozdílem, že u mikrosiliky je pucolánová reakce rychlejší a její efekt se na pevnostech projeví dříve. Je to z toho důvodu, že oproti ostatním pucolánům má tato příměs velmi jemné částice a vysoký obsah amorfního SiO_2 . [18]

Výsledný efekt mikrosiliky na pevnost betonu závisí na jejím celkovém množství v cementovém kompozitu, proto je při návrhu nutné vyhodnotit její optimální dávku. Na obrázku Obr. 9 je schematicky znázorněn efekt mikrosiliky jako mikroplniva (fileru) a jako pucolánu. Pozitivní trend těchto dvou účinků je vyrovnáván dávkou vody, jejíž potřeba se zvyšuje při vyšší dávce mikrosiliky. [19]



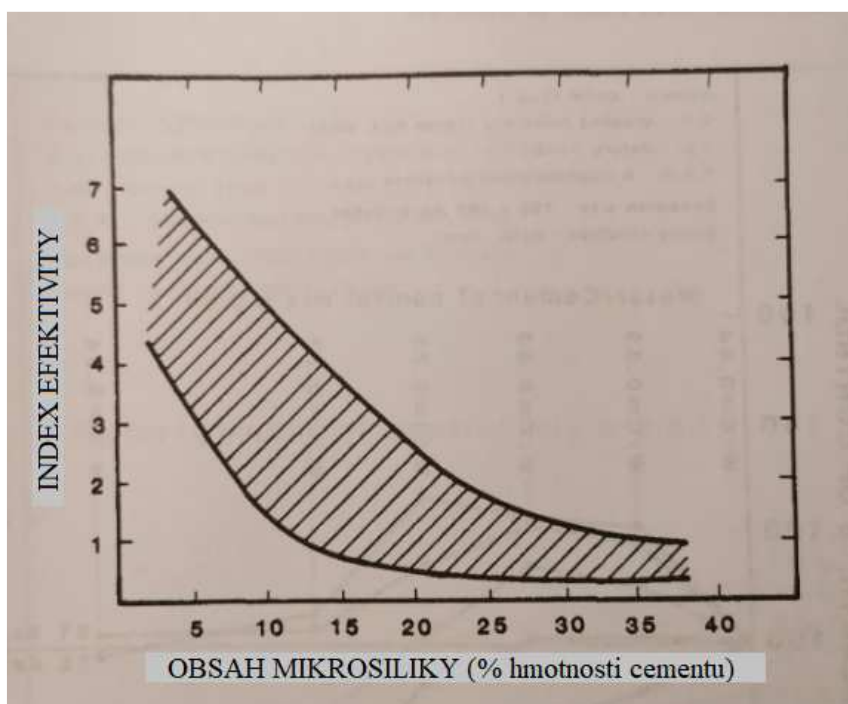
Obr. 9 – Schematické znázornění vlivu dávky mikrosiliky na pevnost betonu [5]

Pokud se tedy konzistence betonu nastavuje dávkou vody, je množství vody přímo závislé na množství mikrosiliky jako náhrady za portlandský cement. V takových případech dochází při vysoké dávce mikrosiliky ke zvýšení vodního součinitele, což má negativní efekt na mikrostrukturu cementové pasty a výsledné pevnosti a odolnosti mohou být horší než při nižší dávce mikrosiliky.

Efekt zvýšení pevnosti v tlaku se při přidání mikrosiliky projeví pouze při nižších vodních součinitelích, proto je potřeba při vysokých dávkách této příměsi regulovat konzistenci čerstvé směsi přidáním vhodného superplastifikátoru.

Při výzkumech vlivu náhrady cementu za mikrosiliky na pevnost betonu v tlaku, které prováděl P. Jahren v roce 1983, byl zaveden index efektivity, který určuje efektivitu použití mikrosiliky v závislosti na jejím množství. Zjednodušeně, pokud je index efektivity 3, lze nahradit 3 kg cementu za 1 kg mikrosiliky při zachování výsledných pevností.

Tento index je z velké části závislý na mnoha faktorech, jako jsou typ a složení betonu, způsob ošetřování a stáří vzorků atd., ale na základě rozsáhlých zkoušek byl stanoven rozsah indexu efektivity v závislosti na množství použité mikrosiliky v poměru k cementu. Tato závislost je znázorněna na Obr. 10. [19]



Obr. 10 – Obecný vztah mezi indexem efektivity mikrosiliky a jejím množstvím ve směsi (% cementu) [5]

Z tohoto grafu je patrné, že čím nižší dávka mikrosiliky v betonu je, tím efektivnější je její účinek na výslednou pevnost v tlaku.

Vývoj pevnosti v tlaku je při záměně mikrosiliky za cement v prvních dnech téměř shodný, a to bez ohledu na vodní součinitel nebo množství použité mikrosiliky. Je to dáno

tím, že vznik druhotného C-S-H gelu vyžaduje nějaké minimální množství Ca(OH)_2 , které vzniká hydratací kalcium-silikátů. Pouze s nižším vodním součinitelem a vyšší dávkou mikrosiliky lze malé rozdíly v pevnostech v porovnání s portlandským cementem zaznamenat po 3 dnech. [5]

Hlavní účinek mikrosiliky na pevnost betonu je ale patrný především z dlouhodobého hlediska. Zvýšené pevnosti v tlaku lze zaznamenat obvykle po 7 dnech a signifikantní rozdíl se dá pozorovat po 28 dnech. V roce 2005 provedli H. S. Wong a H. Abdul Razak rozsáhlé testy vývoje pevností v tlaku na betonech s 5%, 10% a 15% náhradou mikrosiliky za cement. Tyto betony byly namíchány s vodními součiniteli 0,27, 0,30 a 0,33.

Detailní výsledky z jejich zkoumání jsou znázorněny v tabulce Tab. 7. Bylo zjištěno, že čím více mikrosiliky je přidáno, tím pomalejší náběh pevností beton má, ale výsledné dlouhodobé pevnosti jsou vyšší. Nejvyšší rozdíl byl zaznamenán mezi 7. a 28. dnem, kdy po 7 dnech jsou pevnosti s mikrosilikou jen mírně vyšší, ale po 28 dnech dochází ke zvýšení pevností (s 15% náhradou cementu) o 18-20%. Po 90 dnech pak tyto betony vykazují ještě mírný nárůst pevností na 20-21% oproti referenčnímu vzorku. [15]

Složení směsi		Pevnost v tlaku [MPa]						
		1 den	3 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní	180 dní
w/c = 0,27	Pouze cement	39	68	72,5	84	86,5	87,5	90
	5% mikrosiliky	35	63	75,5	88,5	93	96,5	97,5
	10% mikrosiliky	25	61	79	95,5	100	104	107
	15% mikrosiliky	24,5	59,5	76,5	101	103,5	106	109
w/c = 0,30	Pouze cement	48	63,5	72	83,5	84,5	85,5	87,5
	5% mikrosiliky	46	62	81	91	95,5	95,5	97
	10% mikrosiliky	42	61,5	78,5	95	97	99	103
	15% mikrosiliky	38	57,5	74,5	98,5	101,5	104	106,5
w/c = 0,33	Pouze cement	41	58	62,5	75	78	79	81,5
	5% mikrosiliky	35	55	69,5	83	85	90	90
	10% mikrosiliky	32	53	70,5	89,5	90,5	92	93,5
	15% mikrosiliky	31	47,5	70,5	88,5	93	95,5	100,5

Tab. 7 – Příklad vývoje pevností betonu v tlaku v závislosti na množství mikrosiliky

[15]

4.2.2. Youngův modul pružnosti

Na základě pokusů, které prováděl V. M. Malhotra a kol., bylo zjištěno, že neexistuje žádný výrazný rozdíl mezi Youngovým modulem pružnosti E na betonech s mikrosilikou a bez ní. V tabulce Tab. 8 jsou zobrazeny detailní výsledky z testů, které byly prováděny na betonech s rozdílnými vodními součiniteli a s různým zastoupením příměsí. [20]

Složení směsi		Pevnost v tlaku [MPa]		Modul pružnosti E [GPa]
		7 dní	28 dní	28 dní
w/c = 0,40	Pouze cement	38,3	47,1	36,0
	50% strusky	25,7	46,7	36,3
	5% mikrosiliky	30,3	57,1	36,1
	10% mikrosiliky	34,3	59,3	36,9
	15% mikrosiliky	34,5	60,7	35,8
	20% mikrosiliky	37,6	60,1	34,9
w/c = 0,50	Pouze cement	30,4	36,5	33,3
	50% strusky	18,8	33,0	34,1
	5% mikrosiliky	20,7	38,9	33,6
	10% mikrosiliky	25,1	45,5	34,4
	15% mikrosiliky	28,5	48,8	34,0
	20% mikrosiliky	29,3	47,5	33,8
w/c = 0,65	Pouze cement	21,0	28,3	31,3
	50% strusky	10,0	20,6	32,6
	5% mikrosiliky	11,9	26,2	31,4
	10% mikrosiliky	15,7	31,7	32,8
	15% mikrosiliky	18,5	35,3	31,8
	20% mikrosiliky	22,7	38,0	31,3

Tab. 8 – Přehled výsledků Youngova modulu pružnosti E [20]

4.2.3. Propustnost

Propustnost betonu má velký vliv na jeho odolnost proti vodě a chemickým látkám. Je obecně známo, že čím méně je beton propustný, tím lepší je tato odolnost. Bylo zjištěno, že použití aktivních příměsí nahrazujících cement má pozitivní vliv na propustnost betonu, protože jemné částice těchto příměsí vyplňují póry ve struktuře betonu a tím zvyšují jeho hutnost.

Protože je mikrosilika velice účinnou pucolánovou přísadou s velmi jemnými částicemi, její použití dramaticky snižuje propustnost betonu. Z výsledků zkoušek, které provedli O. E. Gjorv a A. Markestad, lze vyvodit, že propustnost betonu se 100 kg/m³ cementu byla po přidání 10% mikrosiliky snížena z 1,6*10⁻⁷ m/s na 4,0*10⁻¹⁰ m/s. Dále bylo zjištěno, že při obsahu 100 kg/m³ cementu a 20% mikrosiliky je propustnost stejná jako u betonu s 250 kg/m³ cementu. U betonů s obsahem cementu 400 – 500 kg/m³ už má ale použití mikrosiliky pouze marginální vliv, protože zde se pohybuje propustnost v rozmezí 10⁻¹⁴ – 10⁻¹⁵ m/s i bez použití mikrosiliky. [21], [22]

4.2.4. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování lze měřit několika rozdílnými metodami a mnoho zemí na světě má svoje standardy, dle kterých tuto vlastnost zkouší. Jedná se o metody, které zkoumají vliv mrazu a rozmrazování za přítomnosti vody, případně vody s přidáním chemických rozmrazovacích látek.

První metodou jsou destruktivní zkoušky, kde se měří úbytek pevností po zmrazovacích cyklech oproti referenčnímu vzorku. Může se jednat o pevnosti v tlaku měřených na válcích nebo na krychlích, v České republice se pak zkouší mrazuvzdornost na trémkách měřením pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN 73 1322 – Stanovení mrazuvzdornosti betonu a určuje se součinitel mrazuvzdornosti.

Další metodou může být měření hmotnosti odpadlého materiálu z povrchu vzorku po zmrazovacích cyklech, kdy je tento povrch vystaven působení různých typů roztoků. Jednou z těchto používaných metod ve světě je americký postup ASTM C 666, u nás se běžně používá zkouška dle ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek automatickým cyklováním (metody A a C).

V ostatních zemích jsou zavedené další odlišné postupy, například určování mrazuvzdornosti betonu na základě procentuálního snížení dynamického modulu pružnosti po zmrazovacích cyklech, ale tyto zkoušky nejsou u nás příliš běžné. [23]

Na základě výzkumných prací ve světě a po měření mnoha různými metodami bylo zjištěno, že odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování je z velké části ovlivněna přítomností vzduchových bublin ve struktuře betonu, které se ve směsi vytváří použitím

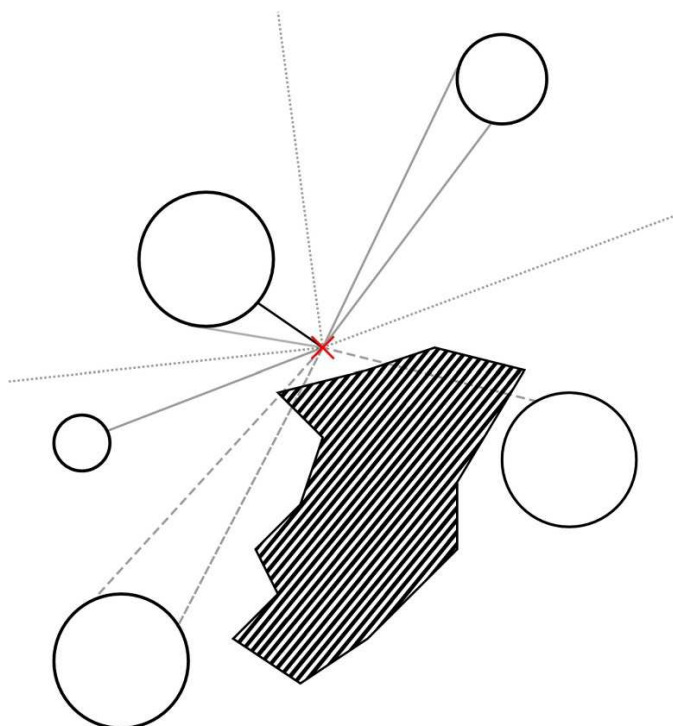
provzdušňujících přísad. Toto platí jak pro betony s použitím mikrosiliky, tak pro betony bez ní. [14]

Při snížení teplot pod bod mrazu se v kapilárách materiálu nasáklých vodou začíná tvořit led. Tato změna skupenství je doprovázena zvýšením objemu a přebytečná voda je tak vytlačována z míst, kde už tvorba ledu probíhá, což způsobuje vznik hydraulického tlaku ve struktuře materiálu.

Pokud cementová matrice nemá dostatečnou tahovou pevnost, aby odolala působení tohoto tlaku, dochází k rozvoji mikrotrhlin v materiálu, čímž se narušuje celková mikrostruktura betonu a dochází ke zhoršení jeho dlouhodobých vlastností. Pro zlepšení mrazuvzdornosti betonu je tedy důležité rovnoměrné rozložení vzduchových mikropórů, které fungují jako rezervoáry objemu pro rozpínavost vzniklou změnou skupenství vody. [24]

Bylo zjištěno, že nejefektivnější pro snížení hydraulického tlaku v mikrostruktuře betonu při rozpínání mrznoucí vody je obsah vzduchových pórů o průměru dutiny menší než 0,3 mm (300 μm). Tato hodnota je označována jako A_{300} a stanovuje se zkouškou dle ČSN EN 480-11 – Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.

Touto zkouškou se také určuje hodnota, která se nazývá spacing factor. Ta vyjadřuje rozložení vzduchových pórů v betonu a je definována jako maximální vzdálenost z jakéhokoliv místa v betonu, kterou musí vytlačovaná voda ve ztvrdlém kompozitu urazit k nejbližší vzduchové dutině (Obr. 11). Po rozsáhlých zkouškách běžných betonů bylo stanoveno, že hodnota spacing factoru 0,200 mm a nižší zajišťuje optimální mrazuvzdornost betonu. [25]



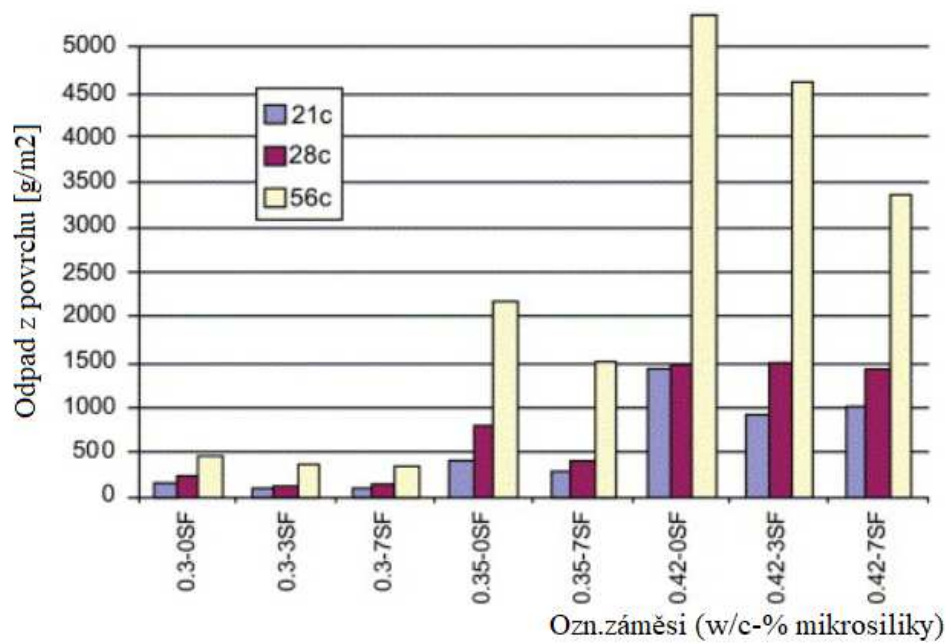
Obr. 11 – Schematické znázornění významu hodnoty spacing factor [26]

Použití mikrosiliky ale může u určitých typů betonů zajistit mrazuvzdornost i bez přidání provzdušňujících přísad. Dle výsledků testů, které provedl v roce 1993 R. D. Hooton na betonech s 1% obsahu vzduchu, došlo k rozpadu vzorků bez použití mikrosiliky, ale při přidání 10%, 15% a 20% mikrosiliky vyhovělo zkouškám mrazuvzdornosti více než 90% vzorků. [27]

Na mrazuvzdornost betonu má také velký vliv kvalita mezipovrchové tranzitní zóny (ITZ), která se vyskytuje na rozhraní cementové pasty a částic kameniva. Tato vlastnost se nejvíce projeví u vysokohodnotných betonů, u kterých je tranzitní zóna výrazně nejslabším místem v kompozitu. Negativní vliv na mezipovrchovou tranzitní zónu má především vyšší vodní součinitel, což bylo prokázáno zkouškami, které provedli A. Cwirzen a V. Penttala v roce 2005. V rámci tohoto výzkumu byly namíchány betony bez přidaného vzduchu s vodními součiniteli 0,30, 0,35 a 0,42 a obsahem mikrosiliky 0%, 3% a 7%.

Bylo zjištěno, že betony s vodním součinitelem 0,35 a 0,42 nevyhověly zkouškám bez ohledu na to, zda byla ve směsi přítomna mikrosilika. Tato příměs ale výrazně snižovala odpad z povrchu vzorků po zmrazovacích cyklech. To může být zdůvodněno tím, že mikrosilika zvyšuje díky svému vysokému měrnému povrchu hutnost mikrostruktury

mezipovrchové tranzitní zóny, což má pozitivní efekt na výslednou mrazuvzdornost betonu. Výsledky těchto zkoušek jsou znázorněny na Obr. 12. [28]



Obr. 12 – Výsledky zkoušek mrazuvzdornosti betonu s použitím mikrosiliky [28]

5. Porovnání vlastností mikrosiliky s ostatními aktivními příměsemi do betonu

V současné době se používá stále více materiálů nahrazujících cement, a to ve formě přimílání nebo přimíchávání přímo do cementu, nebo samostatným dávkováním při procesu míchání betonu. V České republice jsou jako tyto materiály kromě mikrosiliky nejčastěji používány popílky, které vznikají spalováním uhlí v elektrárnách, a vysokopecní granulovaná struska, což je vedlejší produkt při tavení železné rudy ve vysoké peci.

Používání těchto materiálů, u kterých už není potřeba proces slinutí, vede k výraznému snížení emisí CO₂ na tunu vzniklých cementových materiálů (mletí, míchání a doprava betonu spotřebovává o mnoho méně energie než výroba slínku) a zároveň se jedná a využití odpadních materiálů z ostatních průmyslových odvětví. [29]

Úlohy pucolánů a latentně hydraulických látek při hydrataci cementové pasty byly detailně popsány v předchozích kapitolách. Zjednodušeně lze jejich reakci po smíchání s vodou popsat dle následující tabulky Tab. 9:

mikrosilika + voda	→	netvrdne
mikrosilika + voda + vápno	→	tvrdne
popílek + voda	→	netvrdne
popílek + voda + vápno	→	tvrdne
struska + voda	→	tvrdne velmi pomalu
struska + voda + vápno	→	tvrdne rychle

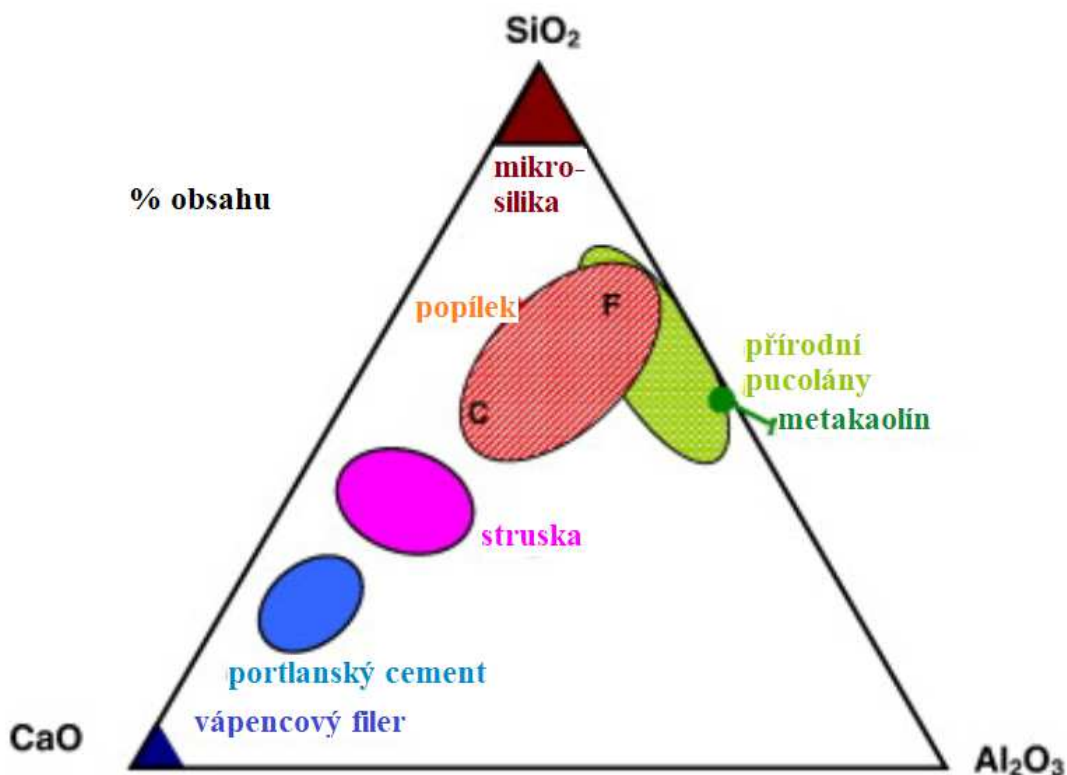
Tab. 9 – Vliv vápna na tvrdnutí pucolánů a strusky [11]

Jednotlivé příměsi do betonu se liší svým chemickým složením, tvarem a velikostí částic, měrnou hmotností, měrným povrchem a dalšími vlastnostmi, které ovlivňují výsledné vlastnosti betonu. Popílky a struska se svými vlastnostmi řádově blíží hodnotám běžného cementu, ale mikrosilika se v těchto vlastnostech výrazně liší, což při jejím správném použití zvyšuje možnosti dramatického zlepšení výsledných vlastností betonu v porovnání s ostatními příměsemi. V následujících tabulkách jsou porovnány vlastnosti mikrosiliky s popílkem, vysokopecní struskou a běžným cementem.

V tabulce Tab. 10 je porovnáno chemické složení aktivních příměsí do betonu. Mikrosilika vykazuje nejvyšší podíl SiO_2 , což způsobuje její efektivní využití v pucolánové reakci za vzniku druhotného C-S-H gelu.

Složka	Cement	Popílek (třída F)	Struska	Mikrosilika
SiO_2	20,7	52,8	31,8	95,5
Al_2O_3	4,8	49,5	14,8	0,4
Fe_2O_3	3,9	8,6	1,6	0,0
CaO	64,7	5,6	44,0	0,4
MgO	2,1	0,9	5,6	0,4
K_2O	0,5	1,4	0,4	0,3
Na_2O	0,1	0,7	0,3	0,3
SO_3	2,5	0,6	1,5	0,4
ztráta žháním	1,1	3,5	2,3	0,9

Tab. 10 – Příklad složení cementových materiálů [30]



Obr. 13 – CaO - Al_2O_3 - SiO_2 Ternární diagram složení cementových materiálů [29]

Porovnání fyzikálních vlastností aktivních příměsí a cementu je znázorněno v tabulce Tab. 11. Mikrosilika oproti ostatním materiálům vyniká především svým vysokým měrným povrchem, který přispívá k rychlejší pucolánové reakci v porovnání s dalšími aktivními příměsemi a zároveň díky své jemnosti nejlépe vyplňuje prostor mezi zrny cementu, čímž zlepšuje hutnost betonové směsi.

	Cement	Popílek (třída F)	Struska	Mikrosilika
Měrná hmotnost [kg/m³]	3120	2430	2250	2230
Měrný povrch [cm²/g]	4100	3000	5200	200000

Tab. 11 – Příklady fyzikálních vlastností cementových materiálů [30]

6. Experimentální část

Cílem experimentální části této práce je správně vyhodnotit vliv různých druhů mikrosiliky na vlastnosti betonu. Proto bylo potřeba zaměřit se na návrh receptur, zkušebních metod a celkových podmínek zkoušek tak, aby byly rozdíly použití mikrosiliky patrné a aby bylo možné na základě těchto experimentů určit závislosti jednotlivých parametrů použitých příměsí na vybrané vlastnosti betonu.

6.1. Návrh receptur betonových směsí

Pro zkoušky byla navržena referenční receptura betonu, se kterou byly následně porovnávány výsledky z ostatních záměsí. Pro pokusy byl vybrán provzdušněný vibrovaný beton s konzistencí F3-F4 dle ČSN EN 206+A1. Konzistence čerstvé betonové směsi se pro tento druh betonu zkouší metodou rozlití dle ČSN EN 12350-5. Cílem pro referenční záměs je dosáhnout ideálního množství vzduchu ve směsi 5-7%.

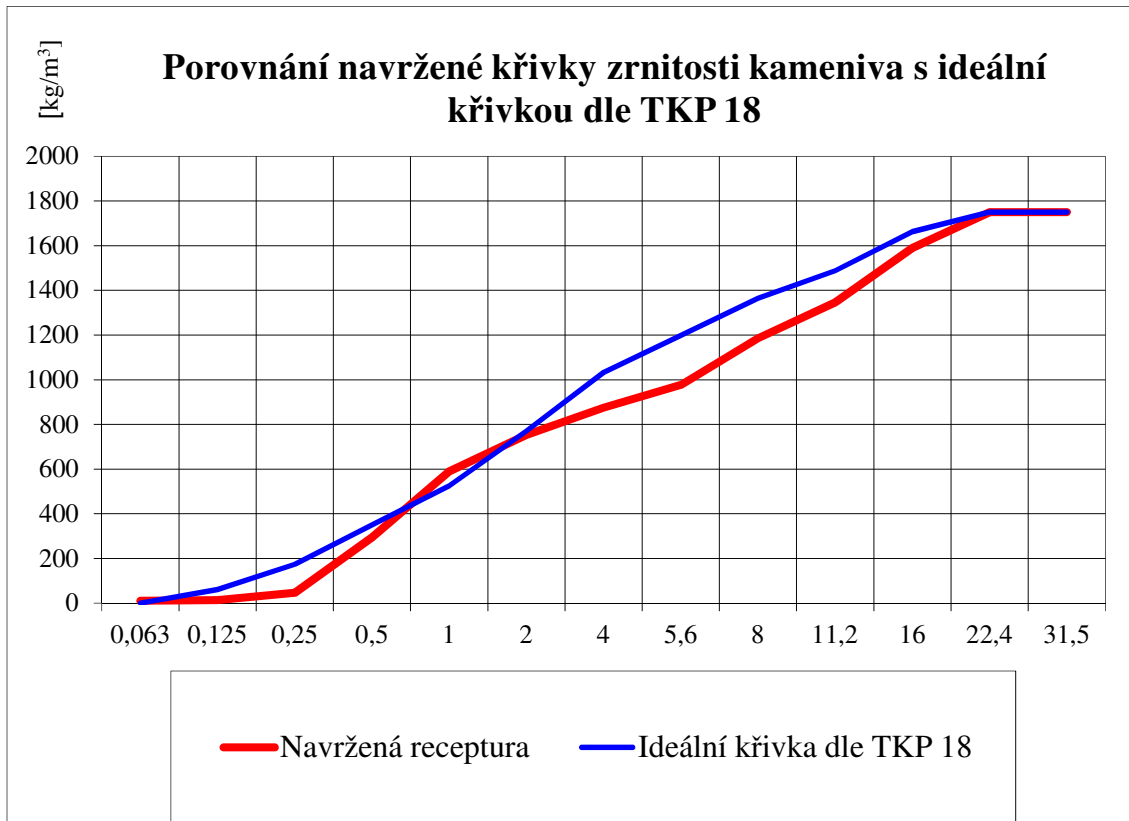
6.1.1. Kamenivo

Pro zkoušky byla použita standardní těžená kameniva frakcí 0/4, 4/8 a 8/16. Pro určení správných poměrů jednotlivých kameniv byly před návrhem receptury provedeny sítové rozbory a byla navržena křivka zrnitosti. Jako vzor byla použita ideální křivka zrnitosti dle TKP kap. 18 Ministerstva dopravy.

Výsledná křivka zrnitosti je zobrazena na grafu Graf 1. Vodorovná osa reprezentuje jednotlivé velikosti ok sít, kterými kamenivo propadává, na svislé ose jsou pak hodnoty celkových propadů těmito síty v kg/m^3 . Z křivky zrnitosti je vidět, že propad sítem 0,25 mm je velmi nízký a písku chybí tyto jemné částice, proto není výsledná křivka úplně ideální.

Kamenivo pro zkoušky bylo částečně vysušeno a rozhrnuto po ploše tak, aby vlhkost jednotlivých frakcí kameniva byla konstantní po celou dobu míchání a tato skutečnost následně neovlivňovala vlastnosti betonu. Před každým dnem míchání betonů v laboratoři byly změřeny vlhkosti všech použitých frakcí kameniva. Byla spočítána celková voda v kamenivu a tato hodnota byla připočítána k záměsové vodě při výpočtu vodního součinitele.

Celkové množství kameniva ve směsi bylo stanoveno na 1750 kg/m³, detailní rozložení jednotlivých složek je zobrazeno v tabulce Tab. 15.



Graf 1 – Porovnání navržené křivky zrnitosti s ideální křivkou dle TKP 18

6.1.2. Cement

Pro experimentální program byl vybrán cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá (Českomoravský cement a.s.). Čistý portlandský cement zajistí konzistentní vlastnosti pojivové složky a budou eliminovány účinky ostatních příměsí, které jsou používány ve směsných cementech. Mechanicko-fyzikální a chemické vlastnosti tohoto cementu jsou tak, jak je uvádí výrobce, uvedeny v tabulkách Tab. 12 a Tab. 13.

Dávka cementu byla u referenční záměsi stanovena na 340 kg/m³, což je minimální hodnota dle ČSN EN 206+A1 pro prostředí XF4. Tato hodnota by měla zajistit, že porovnávané pevnosti a odolnosti betonu budou v takovém rozsahu, že náhrada vhodného množství cementu za mikrosiliku tyto sledované vlastnosti výrazně ovlivní.

Parametr	Charakteristická hodnota	
Obsah [%]	CaO	63,2
	SiO ₂	19,5
	Al ₂ O ₃	4,7
	Fe ₂ O ₃	3,3
	MgO	1,5
	SO ₃	3,07
	Cl ⁻	0,066
	K ₂ O	0,78
	Na ₂ O	0,15
Na ₂ O ekvivalent [%]	0,66	
Nerozpustný zbytek [%]	0,67	
Ztráta žháním [%]	3,38	

Tab. 12 – Chemické složení cementu CEM I 42,5 R Mokrá

Parametr	Charakteristická hodnota
Počátek tuhnutí [min]	194
Konec tuhnutí [min]	260
Měrný povrch [cm ² /g]	3880
Měrná hmotnost [kg/m ³]	3130

Tab. 13 – Mechanicko-fyzikální parametry cementu CEM I 42,5 R Mokrá

6.1.3. Příměsi

Pro experimentální program bylo vybráno 6 druhů mikrosiliky, které se dají sehnat na našem trhu a kterými bude nahrazována část cementu. Aby se tato záměna projevila na výsledných vlastnostech betonu a aby bylo využití této aktivní příměsi efektivní, byla pro náhradu cementu zvolena hodnota 25 kg/m³, což je cca 7,4% hmotnosti cementu v referenční záměsi. Přesné složení jednotlivých záměsí je uvedeno v tabulce Tab. 15 a Tab. 18.

Jedná se o různé typy mikrosiliky, které se liší svým chemickým složením, mechanicko-fyzikálními vlastnostmi a způsobem skladování a dávkování. 3 typy mikrosiliky jsou práškové, 2 jsou zhutněné do pelet a 1 je suspenze o sušině 50%. Chemické složení a

vybrané vlastnosti jednotlivých druhů mikrosiliky jsou uvedeny v tabulce Tab. 14. Tyto hodnoty byly převzaty z údajů, které uvádějí výrobci jednotlivých druhů mikrosilik.

Název mikrosiliky	Microxil +	RW-Füller	RW-Compasil	RW-Flusil	Fesilox 2020	Silica VP4	
Typ mikrosiliky	zhutněná silika	prášková nezhut. silika	zhutněná silika	suspenze s 50% sušiny	prášková nezhut. silika	prášková nezhut. silika	
Způsob balení	600 kg big bag	20 kg pytel	20 kg pytel	25 kg kanystr	15 kg pytel	20 kg pytel	
Obsah [%]	SiO ₂	> 80,0	96 ± 1,5	96 ± 1,5	96 ± 1,5	96 ± 1,5	min. 96
	Si (elem.)	< 1,0	0,6 (max. 0,9)	0,6 (max. 0,9)	0,6 (max. 0,9)	0,6	-
	CaO	< 3,5	0,3 (max. 0,45)	0,3 (max. 0,45)	0,3 (max. 0,45)	0,3	-
	Al ₂ O ₃	-	0,2 (max. 0,3)	0,2 (max. 0,3)	0,2 (max. 0,3)	0,2	-
	Fe ₂ O ₃	-	0,05 (max. 0,15)	0,05 (max. 0,15)	0,05 (max. 0,15)	0,05	-
	MgO	-	0,25 (max. 0,4)	0,25 (max. 0,4)	0,25 (max. 0,4)	0,25	-
	SO ₃	< 4,0	-	-	-	-	-
	Cl ⁻	< 1,8	-	-	-	-	-
	K ₂ O	-	0,5 (max. 0,9)	0,5 (max. 0,9)	0,5 (max. 0,9)	0,5	-
	Na ₂ O	-	0,08 (max. 0,12)	0,08 (max. 0,12)	0,08 (max. 0,12)	0,08	-
	Na ₂ O ekv.	< 3,0	-	-	-	-	-
Ztráta žíháním [%]	< 4,0	1,2 (max. 2,0)	1,2 (max. 2,0)	1,2 (max. 2,0)	1,2	-	
Měrný povrch [cm ² /g]	-	180 000 – 220 000	180 000 – 220 000	180 000 – 220 000	200 000	1 500 000 – 2 000 000	

Tab. 14 – Vybrané vlastnosti použitých typů mikrosiliky

Další příměsí, která byla použita do zkoušených betonů, byl vápencový filer. Tato inertní příměs byla použita z důvodu absence jemných částic (propad sítem 0,25 mm)

v kamenivu frakce 0/4. Byla tak doplněna křivka zrnitosti a cílem bylo zlepšení chování čerstvé betonové směsi tak, aby nedocházelo k odlučování vody. Byl použit vápencový filer Čertovy schody D7 a jeho dávka byla stanovena na 40 kg/m³.

6.1.4. Přísady

Do betonu byly pro dosažení požadovaných vlastností použity 2 přísady vyráběné společností Stachema CZ s.r.o. První přísadou je superplastifikátor na bázi polykarboxylátů Stachement 1058, jehož optimální dávka byla po počátečních zkouškách stanovena na 2,5 kg. Pro zajištění správné hodnoty obsahu vzduchu byla do směsi dávkována provzdušňující přísada, jejíž hmotnost na m³ betonu byla na základě testů referenčního betonu určena na 0,3 kg.

6.1.5. Voda

Vodní součinitel referenční záměsi byl stanoven na 0,45, což je maximální povolená hodnota pro betony navržené do prostředí XF4 dle ČSN EN 206+A1. S takto nastaveným vodním součinitelem se předpokládá, že se významně projeví vliv použité mikrosiliky. Pro receptury, kde dochází k záměně cementu za mikrosiliku, se počítá s k-hodnotou pro mikrosiliku (dle ČSN EN 206+A1) jako k=1, což znamená, že 1 kg mikrosiliky se pro potřeby výpočtu vodního součinitele počítá jako 1 kg cementu.

6.2. Postup míchání směsi a výroba zkušebních těles

Aby byly výsledky experimentů co nejlépe porovnatelné, je potřeba dodržet shodný postup míchání směsi v laboratorních podmínkách tak, aby měření nezakreslovaly vnější vlivy.

Na začátku míchání bylo do míchačky nadávkováno částečně vysušené kamenivo, do kterého byla přidána mikrosilika. Z důvodu důrazu na správné homogenní rozložení mikrosiliky byla takto složená směs míchána 30 s (v případě referenční záměsi bez mikrosiliky byl tento krok vynechán). Následně byl nadávkován cement a do zapnuté míchačky byla postupně dodána voda a tekuté přísady. Doba míchání záměsi byla 60 s od dodávkování provzdušňující přísady.

Po skončení míchání byly provedeny zkoušky čerstvého betonu a vyrobena zkušební tělesa (krychle o hraně 150 mm). Zkoušky ČB (rozlití a množství vzduchu) byly

prováděny v čase 5 minut od skončení míchání. Nádoba na měření množství vzduchu a formy pro výrobu zkušebních krychlí byly po naplnění betonem jednou zavibrovány na vibračním stole po přesně stanovený čas. Na této nádobě (válec o objemu 8 dm³) byly určeny hodnoty objemových hmotností čerstvé betonové směsi. U každé záměsi byly změřeny teploty betonu a prostředí.



Obr. 14 – Výroba zkušebních těles

6.3. Zkoušení čerstvého betonu

Zkoušky čerstvých betonových směsí byly prováděny dle platných harmonizovaných evropských norem - Zkoušení čerstvého betonu. Pro vyhodnocení změny vlastností čerstvého betonu při přidání jednotlivých druhů mikrosiliky byla namíchána referenční záměs a následně byla část cementu nahrazována postupně šesti výše zmíněnými druhy mikrosiliky bez dalších změn celkového množství vody a přísad. Podrobné složení receptur pro tyto zkoušky jsou zobrazeny v tabulce Tab. 15.

Označení záměsi	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	340	315	315	315	315	315	337,5
Mikrosilika MICROXIL+	-	25	-	-	-	-	-
Mikrosilika RW-Füller	-	-	25	-	-	-	-
Mikrosilika RW-Compasil	-	-	-	25	-	-	-
Mikrosilika RW-Flusil	-	-	-	-	50	-	-
Mikrosilika Fesilox 2020	-	-	-	-	-	25	-
Mikrosilika Silica VP4	-	-	-	-	-	-	2,5
Vápečnový filer	40	40	40	40	40	40	40
Kamenivo frakce 0/4	850	850	850	850	850	850	850
Kamenivo frakce 4/8	400	400	400	400	400	400	400
Kamenivo frakce 8/16	500	500	500	500	500	500	500
Stachement 1058	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Microporan 2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Celková voda	150	150	150	150	125	150	150
Vodní součinitel w/c [-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Navržená objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283

Tab. 15 – Složení betonových směsí pro zkoušky čerstvého betonu

Nezávisle na těchto experimentech byly ještě provedeny zkoušky, ve kterých byl porovnáván vliv jednotlivých druhů mikrosiliky na reologii cementových malt. Bylo stanoveno objektivní hodnocení odporů malt proti míchání a jejich průběh v čase, a to dvěma rozdílnými způsoby dle metodiky laboratoře společnosti Stachema CZ s.r.o. Tyto zkoušky jsou detailně popsány v kapitole 6.3.4.

6.3.1. Souhrnné výsledky zkoušek čerstvého betonu

Označení záměsi	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21
Konzistence (rozlití) [mm]	565	445	455	420	440	440	375
Množství vzduchu v ČB [%]	6,2	8,5	8,5	7,4	7,5	6,9	6,2
Objemová hmotnost ČB (měřeno na válci o objemu 8 dm³) [kg/m³]	2288	2214	2222	2238	2226	2265	2288
Teplota ČB [°C]	18	17	17	17	17	17	18
Teplota prostředí [°C]	21	21	21	21	21	21	21

Tab. 16 – Souhrnné výsledky zkoušek čerstvého betonu

Všechny záměsi T15-T21 byly namíchány v jeden den ze stejných šarží materiálů a se stejnými vstupními podmínkami. Naměřené teploty čerstvého betonu a prostředí v průběhu zkoušek jsou velmi podobné a na základě těchto hodnot můžeme konstatovat, že teploty materiálů ani prostředí nemají vliv na výsledky zkoušek.

6.3.2. Konzistence čerstvé betonové směsi

Konzistence čerstvého betonu byla měřena dle ČSN EN 12350-5 – Zkouška rozlíváním. Tato metoda spočívá v naplnění kužele daných rozměrů betonovou směsí způsobem, který je popsán ve zmíněné normě. Tento kužel je položen na stráscací desce předepsaných parametrů (rozměry, výška zdvihu), pomocí které po zvednutí kužele dojde ke zhutnění vzorku. Po setřesení vzorku se změří průměry d_1 a d_2 a střední hodnoty těchto průměrů jsou v mm uvedeny v tabulce souhrnných výsledků ČB (Tab. 16).

Příklad měření konzistence dle ČSN EN 12350-5 je znázorněn na obrázku Obr. 15. U měření je také nutné zkontrolovat, zda nedochází k segregaci jednotlivých složek betonu a okolo vzorku se neobjevují místa s odloučenou vodou ze směsi.



Obr. 15 – Měření konzistence čerstvého betonu metodou rozlívání

Konzistence referenčního betonu byla změřena na 565 mm a dle očekávání došlo po záměně cementu za mikrosiliku u dalších záměsí k poklesu této hodnoty. Kromě záměsí T21 se hodnoty konzistencí s různými druhy mikrosiliky pohybovaly mezi 420-455 mm, což jsou relativně podobné hodnoty. V těchto výsledcích nebyla nalezena korelace mezi typem použité mikrosiliky a výsledkem této zkoušky.

Jediný zásadní rozdíl ve výsledku měření konzistence směsi byl zaznamenán při použití mikrosiliky Silica VP4 (záměs T21), což je bílá prášková příměs, která má oproti ostatním zkoušeným mikrosilikám výrazně vyšší měrný povrch ($2\,000\,000\text{ cm}^2/\text{g}$). Při namíchání této příměsi v množství 25 kg/m^3 došlo k extrémnímu zhoustnutí směsi v takovém rozsahu, že nebylo možné beton zpracovat a odzkoušet stejnou metodou.

Proto byla s tímto typem mikrosiliky odzkoušena receptura, která obsahovala pouze 2,5 kg materiálu Silica VP4 na m^3 betonu (určeno dle poměru měrného povrchu vůči ostatním mikrosilikám) a 337,5 kg cementu. I přesto výsledek měření konzistence u této záměsi vykazoval nejnižší hodnotu ze všech receptur. Proto lze konstatovat, že měrný povrch použité příměsi má zásadní vliv na konzistenci betonu při zachování ostatních parametrů receptury.

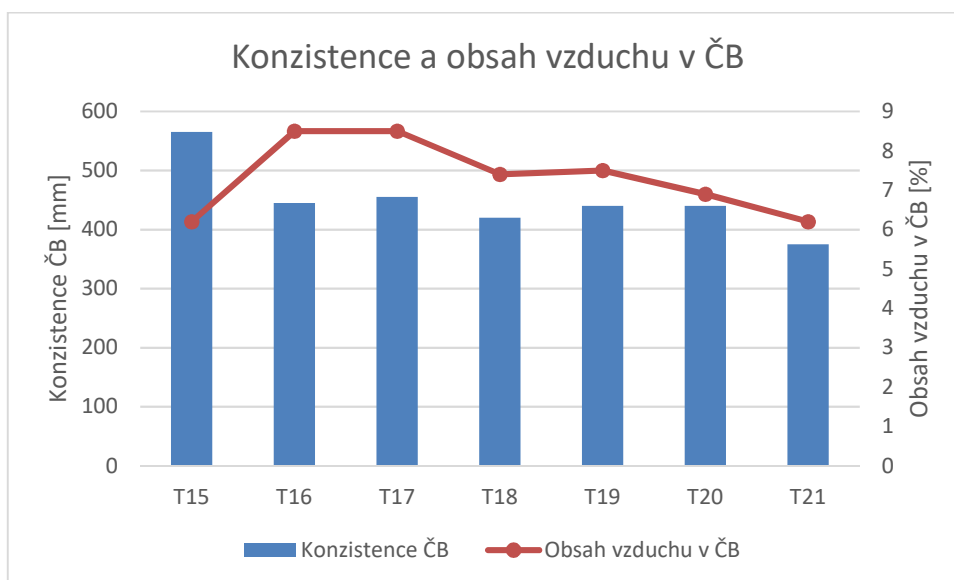
6.3.3. Množství vzduchu v ČB a objemová hmotnost

Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi byl měřen tlakovou metodou dle ČSN EN 12350-7 – Obsah vzduchu – Tlakové metody. Podstata této zkoušky je porovnávání známého objemu vzduchu o známém tlaku (0% vzduchu na stupnici tlakoměru) s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu. Kruhová stupnice tlakoměru je nastavena v jednotkách procentního podílu vzduchu ve vzorku betonu.

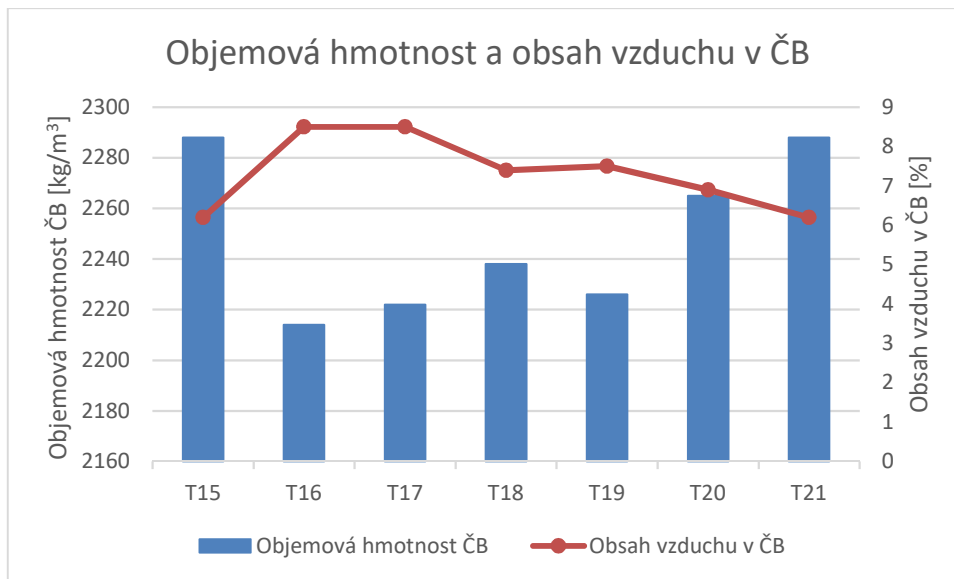
Referenční receptura obsahovala dle tohoto měření 6,2% vzduchu. Přidání mikrosiliky vyvolalo v betonu zvýšení této hodnoty, přičemž nejvyšší nárůst byl zaznamenán u materiálů MICROXIL+ a RW-Füller. Naopak u receptury s příměsí Silica VP4, kde byla zaznamenána největší ztráta konzistence, byla naměřena hodnota jako u referenční záměsi – tedy 6,2%. Z tohoto důvodu nelze usuzovat, že čím hustší je beton, tím více vzduchu v něm je, ale jedná se o vlivy vlastností jednotlivých druhů mikrosiliky. Graf 2 znázorňuje závislost konzistence betonu na množství vzduchu.



Obr. 16 – Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou



Graf 2 – Vztah konzistence a obsahu vzduchu ČB



Graf 3 – Závislost Objemové hmotnosti na obsahu vzduchu v ČB

Objemová hmotnost betonu přímo závisí na jeho obsahu vzduchu. Teoreticky by mělo 1% vzduchu u tohoto betonu odpovídat cca 22-23 kg/m³, což téměř odpovídá naměřeným hodnotám, kde nejnižší objemové hmotnosti (2214 a 2222 kg/m³ u záměsí T16 a T17) korespondují s nejvyššími naměřenými hodnotami obsahu vzduchu (8,5%). Závislost objemové hmotnosti na obsahu vzduchu v betonu je znázorněna na grafu Graf 3.

6.3.4. Reologie cementových malt

Reologie se zabývá studiem vnitřní reakce látek na působení vnějších sil. Cementové pasty a malty lze svým chováním přiřadit k látkám, které se svými vlastnostmi blíží kapalinám, u kterých se zkoumání reologie týká tokových vlastností. Matematickým vyjádřením těchto vlastností jsou tokové rovnice a grafickou podobou jsou to tokové křivky.

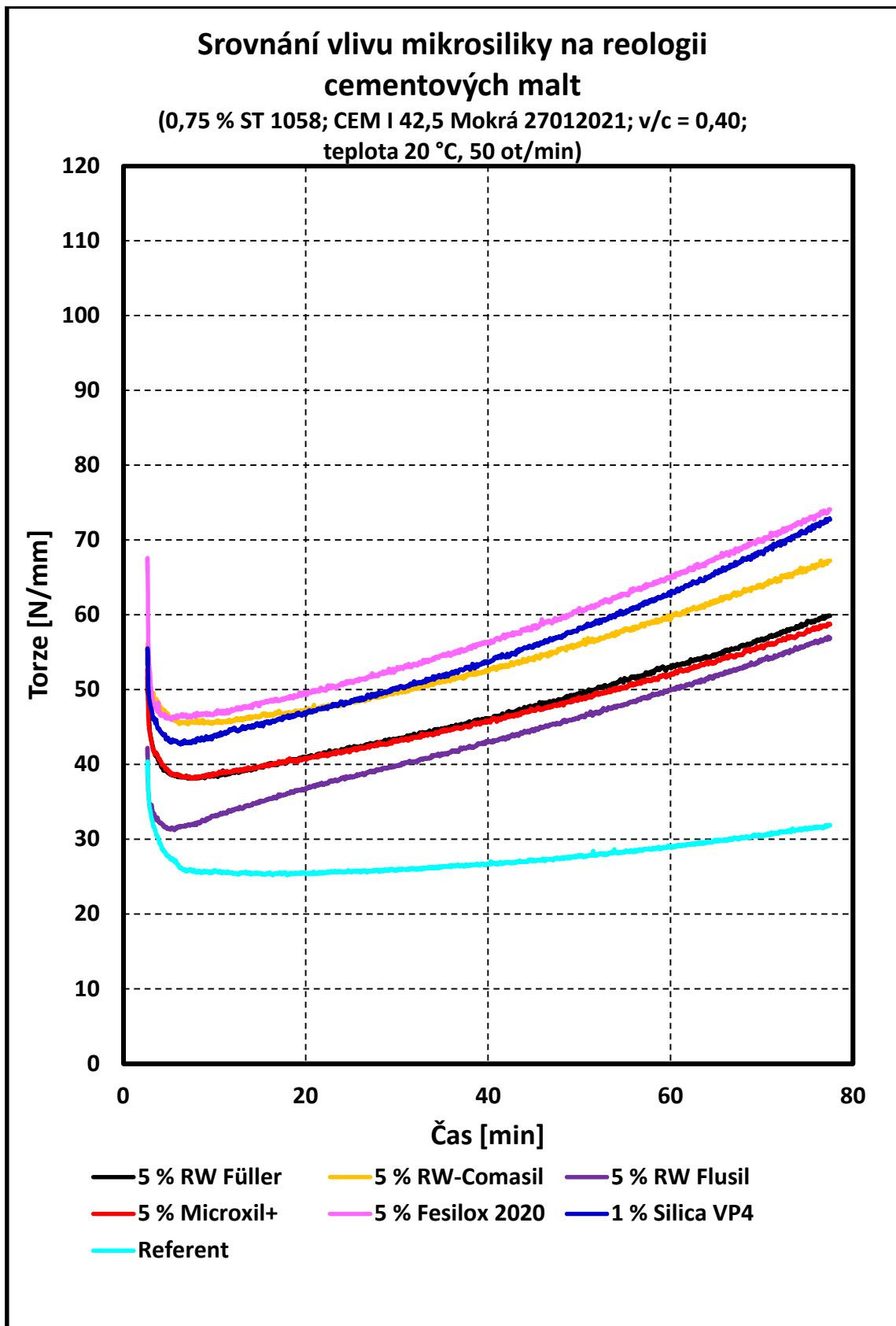
Reologická měření v této práci byla prováděna na cementových maltách, což jsou směsi cementu s vodou, které jsou navíc doplněné o významnou část drobného kameniva s velikostí zrna do 4 mm. Část cementu v této maltě může být nahrazena minerálními příměsími. Pro zkoušky reologických vlastností bylo navrženo složení referenčního vzorku, kdy byl poměr kamenivo/cement v maltě 1,6:1. V porovnávacích pokusech pak byla část kameniva nahrazována jednotlivými druhy mikrosiliky.

Měření byla prováděna na reometru Viskomat NT. Na tomto zkušebním zařízení lze měřit dle několika zkušebních postupů, prvním je měření odporu vůči míchání při konstantních

otáčkách míchání. Výsledkem tohoto způsobu měření je časová závislost odporu malty vůči míchání. Výsledek tohoto měření je zobrazen na grafu Graf 4.

Z grafu lze vyčíst, že při konstantní rychlosti měření vykazovala nejmenší odpor k míchání kapalná mikrosilika RW-Flusil, nejvyšší pak Fesilox 2020. Ostatní vzorky s použitím mikrosiliky se nacházely v hodnotách mezi těmito dvěma, přičemž rozdíly nebyly příliš výrazné. Také změna konzistence v čase nastávala u všech vzorků podobně. Všechny mikrosiliky ale vykazaly zvýšený odpor při míchání oproti referenčnímu vzorku.

Druhým typem měření je určování odporu vůči míchání cyklickým postupem při různých otáčkách míchání. Jako výstupy lze získat vypočtené hodnoty meze tečení a viskozitních koeficientů u jednotlivých cyklů měření. Tento způsob tedy umožňuje snadnější srovnávání různých malt pomocí číselných hodnot. Detailní výsledky jsou znázorněny v tabulce Tab. 17.



Graf 4 – Vliv mikrosiliky na reologii malt při konstantní rychlosti otáček při měření

Výsledky z předchozího grafu potvrzují i hodnoty z druhého způsobu měření. Rozdíly v hodnotách mezi tečením a viskozitními koeficienty jsou v jednotlivých časech pouze mírné. Největší rozdíl lze opět spatřit mezi referenčním vzorkem a měřeními s mikrosilikami. Mezi těmito vzorky lze lehce odlišné chování pozorovat zejména při použití materiálů Fesilox 2020 a Silica VP4. Tyto rozdíly závisí zřejmě na chemickém složení a mechanicko-fyzikálních parametrech těchto příměsí.

Mikrosilika	Kam. X	Silika Y	Teplota [°C]	Rozlítí [mm]
Referent	1,60	0,00	22,4	150
RW Füller	1,55	0,05	21,8	101
RW-Compasil	1,55	0,05	21,8	104
RW Flusil	1,55	0,05	21,4	100
Microxil+	1,55	0,05	21,6	100
Fesilox 2020	1,55	0,05	21,6	93
Silica VP4	1,59	0,01	22,5	97

Mikrosilika	Meze tečení [N/mm] v čase [min]				Změna
	5	20	40	60	60-5
Referent	10,1	9,7	9,5	11,3	1,3
RW Füller	16,2	23,5	29,2	33,4	17,2
RW-Compasil	13,0	19,1	27,3	33,8	20,8
RW Flusil	17,1	22,6	29,4	35,4	18,3
Microxil+	17,9	24,9	29,4	36,1	18,2
Fesilox 2020	18,8	25,4	36,5	45,9	27,1
Silica VP4	17,8	24,8	33,2	42,0	24,2

Mikrosilika	Viskozitní koeficienty v čase [min]				Odpor [N/mm] ve	
	5	20	40	60	35 s	210 s
Referent	0,15	0,18	0,27	0,33	52,3	41,9
RW Füller	0,40	0,29	0,29	0,36	66,9	48,4
RW-Compasil	0,40	0,45	0,43	0,47	77,5	61,1
RW Flusil	0,25	0,30	0,28	0,31	53,3	42,0
Microxil+	0,31	0,33	0,42	0,45	70,6	55,0
Fesilox 2020	0,42	0,54	0,51	0,54	85,1	68,8
Silica VP4	0,40	0,49	0,51	0,56	76,2	63,0

Tab. 17 – Porovnání tokových vlastností jednotlivých druhů mikrosiliky měřením při různých otáčkách

6.4. Zkoušení ztvrdlého betonu

Pro objektivní porovnání parametrů ztvrdlého betonu byla vyrobena zkušební tělesa z betonů, jejichž vlastnosti u čerstvých směsí byly v takovém rozsahu, aby výrazně neovlivňovaly výsledné hodnoty. Aby bylo docíleno sjednocení těchto vlastností, byly na základě předchozích zkoušek laděny dávky plastifikační a provzdušňující přísady. Vodní součinitel zůstal neměnný. Výsledné složení jednotlivých betonů je vypsáno v tabulce Tab. 18.

U jednotlivých záměsí byl sledovaný průběh pevností v tlaku měřený ve stáří 1 den, 7 dní, 28 dní a 60 dní. Tyto pevnosti byly porovnány s hodnotami záměsí T15-T21, které se lišily vlastnostmi čerstvého betonu. Dále byla zhotovena zkušební tělesa na zkoušku odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a na zkoušku rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu metodou spacing factor. Na všech zkušebních tělesech byly zároveň určeny hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu.

Všechny záměsi (T22-T28) byly míchány v jeden den za stejných podmínek a ze stejných materiálů jako záměsi T15-T21. Opět byly měřeny hodnoty konzistence, obsahu vzduchu v ČB, objemové hmotnosti ČB a teplot ČB i prostředí. Záměs T22 byla referenční a v ostatních záměsích byl nahrazován cement jednotlivými druhy mikrosiliky dle Tab. 18.

Označení záměsi	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	340	315	315	315	315	315	337,5
Mikrosilika MICROXIL+	-	25	-	-	-	-	-
Mikrosilika RW-Füller	-	-	25	-	-	-	-
Mikrosilika RW-Compassil	-	-	-	25	-	-	-
Mikrosilika RW-Flusil	-	-	-	-	50	-	-
Mikrosilika Fesilox 2020	-	-	-	-	-	25	-
Mikrosilika Silica VP4	-	-	-	-	-	-	2,5
Vápečnový filer	40	40	40	40	40	40	40
Kamenivo frakce 0/4	850	850	850	850	850	850	850
Kamenivo frakce 4/8	400	400	400	400	400	400	400
Kamenivo frakce 8/16	500	500	500	500	500	500	500
Stachement 1058	2,5	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Microporan 2	0,3	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,25
Celková voda	150	150	150	150	125	150	150

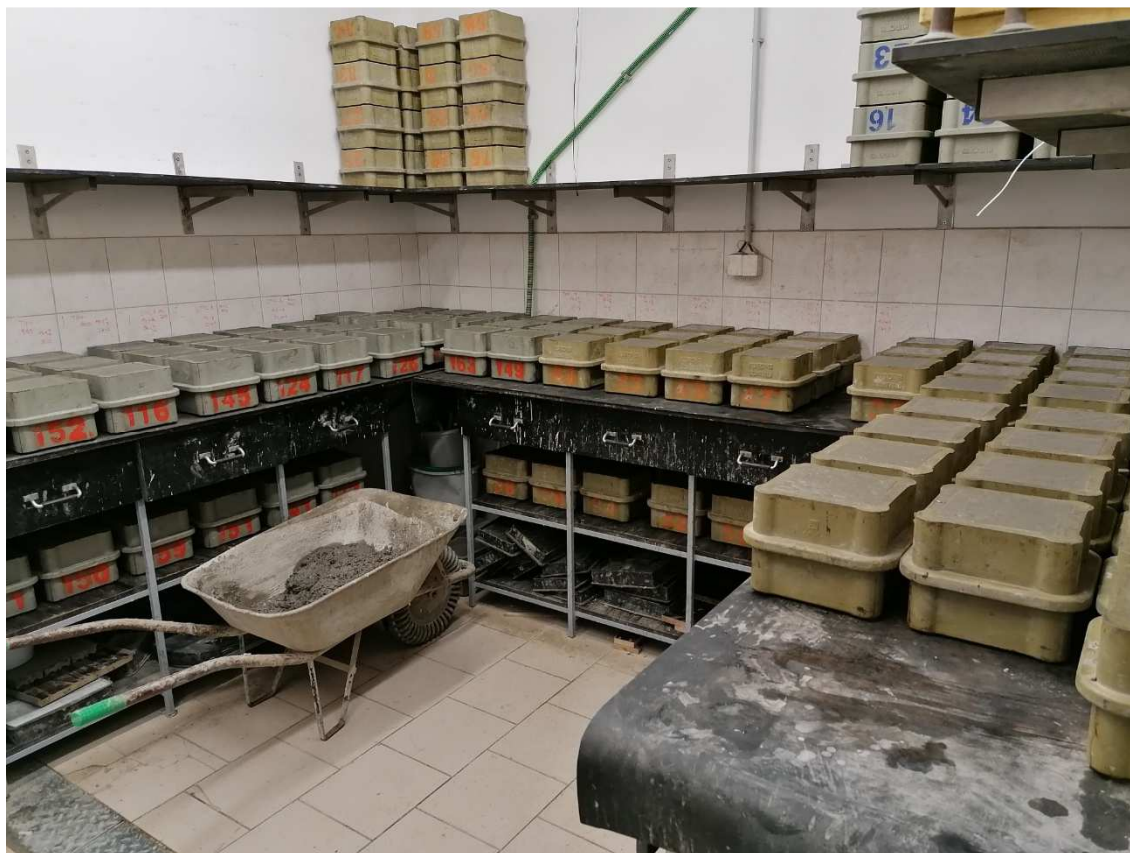
Tab. 18 – Složení betonových směsí pro zkoušky ztvrdlého betonu

6.4.1. Parametry čerstvého betonu záměsí T22-T28

Označení záměsí	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Vodní součinitel w/c [-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Navržená objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283
Konzistence (rozlití) [mm]	540	505	515	500	510	500	515
Množství vzduchu v ČB [%]	5,1	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9
Objemová hmotnost ČB (měřeno na válci o objemu 8 dm ³) [kg/m ³]	2312	2320	2305	2308	2300	2303	2308
Teplota ČB [°C]	18	18	18	19	18	18	18
Teplota prostředí [°C]	22	22	22	22	22	22	22

Tab. 19 – Výsledky zkoušek čerstvého betonu záměsí T22-T28

Z výsledných parametrů čerstvého betonu dle tabulky Tab. 18 je zřejmé, že se podařilo korekcí dávek tekutých přísad sjednotit vlastnosti směsí tak, aby bylo možné zjistit pouze vliv jednotlivých druhů mikrosiliky na pevnosti a odolnosti betonu.



Obr. 17 – Uskladnění forem se zkušebními tělesy před odformováním

6.4.2. Pevnost betonu v tlaku

Pro zkoušky pevnosti betonu v tlaku byla vyrobena zkušební tělesa ze záměsí T22-T28 (krychle o hraně 150 mm) v tomto množství:

- 1-denní pevnosti – 3 tělesa
- 7-denní pevnosti – 3 tělesa
- 28-denní pevnosti – 3 tělesa
- 60-denní pevnosti – 2 tělesa

Zároveň byly zhotoveny vzorky ve stejném množství (kromě 60-denních pevností) ze záměsí T15-T21 pro porovnání hodnot v jednotlivých časech v závislosti na množství vzduchu v čerstvé betonové směsi. Detailní výsledky všech zkoušek pevností v tlaku jsou uvedeny v tabulce Tab. 20. V této tabulce jsou zahrnuty i hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu, kde je uveden průměr této naměřené veličiny ze všech zkoumaných těles (9 kusů pro T15-T21 a 11 kusů pro T22-T28).

Označení záměsí	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21
Konzistence (rozlítí) [mm]	565	445	455	420	440	440	375
Množství vzduchu v ČB [%]	6,2	8,5	8,5	7,4	7,5	6,9	6,2
Objemová hmotnost ZB - průměr 9 hodnot [kg/m ³]	2277	2204	2240	2239	2230	2235	2257
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 1 [MPa]	16,23	14,49	15,28	14,18	14,91	14,71	16,51
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 2 [MPa]	15,99	14,06	15,28	13,97	15,16	14,33	17,23
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 3 [MPa]	15,99	13,43	15,24	14,18	15,54	14,39	17,13
Pevnost v tl. (1D) – průměr [MPa]	16,07	13,99	15,27	14,11	15,20	14,48	16,96
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 1 [MPa]	46,76	40,47	41,99	43,84	43,22	40,08	46,79
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 2 [MPa]	46,12	39,52	43,86	38,55	41,68	42,25	44,64
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 3 [MPa]	45,13	40,49	42,01	44,32	41,94	44,67	47,12
Pevnost v tl. (7D) - průměr [MPa]	46,00	40,16	42,62	42,24	42,28	42,33	46,18
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 1 [MPa]	49,48	53,77	55,76	55,27	56,80	53,85	49,79
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 2 [MPa]	49,36	52,25	55,10	53,39	56,96	55,65	50,16
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 3 [MPa]	53,72	54,23	57,34	54,03	57,28	56,68	52,58
Pevnost v tl. (28D) – prům. [MPa]	50,85	53,42	56,07	54,23	57,01	55,39	50,84

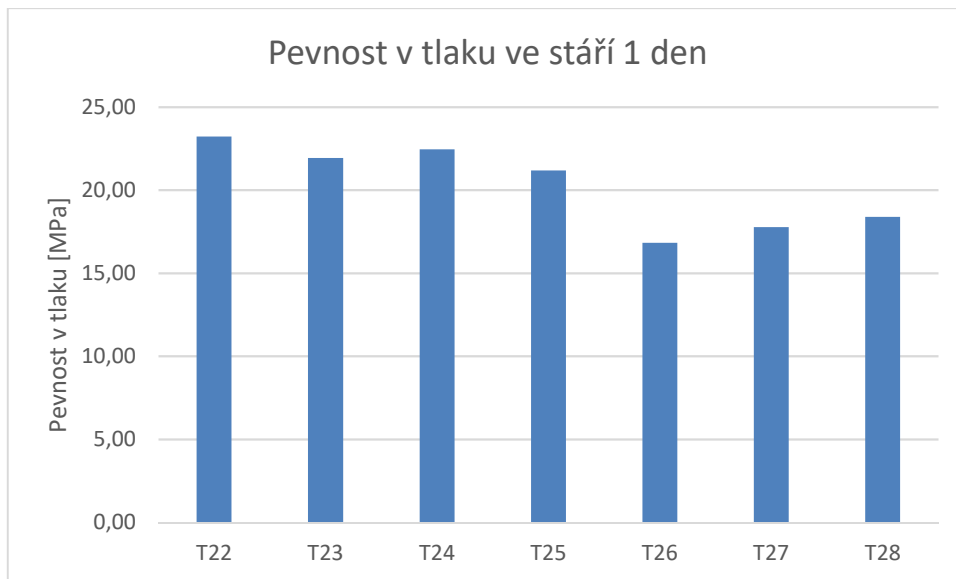
Tab. 20 – Přehled pevností v tlaku (záměsí T15-T21)

Označení záměsí	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Konzistence (rozlítí) [mm]	540	505	515	500	510	500	515
Množství vzduchu v ČB [%]	5,1	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9
Objemová hmotnost ZB - průměr 11 hodnot [kg/m ³]	2295	2298	2296	2285	2288	2274	2287
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 1 [MPa]	22,87	21,79	23,20	21,05	15,49	17,45	15,09
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 2 [MPa]	23,33	21,68	22,94	21,21	15,46	17,42	19,96
Pevnost v tl. (1 den) – vz. 3 [MPa]	23,47	22,36	21,21	21,29	19,54	18,44	20,10
Pevnost v tl. (1D) – průměr [MPa]	23,22	21,94	22,45	21,18	16,83	17,77	18,38
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 1 [MPa]	46,40	46,81	45,70	49,58	46,52	44,56	44,92
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 2 [MPa]	46,83	46,33	48,20	45,96	46,09	45,85	44,60
Pevnost v tl. (7 dní) – vz. 3 [MPa]	46,58	48,40	47,16	44,60	46,37	43,97	45,89
Pevnost v tl. (7D) - průměr [MPa]	46,60	47,18	47,02	46,71	46,33	44,79	45,14
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 1 [MPa]	56,51	70,69	66,17	65,85	58,58	53,00	52,81
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 2 [MPa]	57,15	70,78	68,15	69,56	57,70	55,40	52,00
Pevnost v tl. (28 dní) – vz. 3 [MPa]	59,51	70,36	67,61	66,33	57,25	53,84	51,92
Pevnost v tl. (28D) – prům. [MPa]	57,72	70,61	67,31	67,25	57,84	54,08	52,24
Pevnost v tl. (60 dní) – vz. 1 [MPa]	60,57	67,64	64,40	63,38	65,66	58,12	54,39
Pevnost v tl. (60 dní) – vz. 2 [MPa]	57,55	64,14	72,32	69,77	61,65	61,11	56,15
Pevnost v tl. (60D) – prům. [MPa]	59,06	65,89	68,36	66,58	63,66	59,62	55,27

Tab. 20 (pokračování) – Přehled pevností v tlaku (záměsí T22-T28)

V případě, že byly namíchány betony se stejným vodním součinitelem a shodnými vlastnostmi čerstvých směsí (záměsí T22-T28), vykazoval nejvyšší pevnosti po 1 dnu referenční beton bez mikrosiliky. Je to z toho důvodu, že pro pucolánovou reakci mikrosiliky je potřeba hydroxid vápenatý, který vzniká až reakcí kalcium-silikátů. Zároveň může ve vývoji pevností hrát roli dávka superplastifikátoru, která byla oproti referenční záměsí z důvodu dosažení stejné zpracovatelnosti zvýšena u vzorků s mikrosilikou o 0,6 kg na 3,1 kg/m³.

Přehled jednodenních pevností ukazuje Graf 5. Na grafu lze vidět, že náběhy pevností po 1 dni se v případě různých druhů mikrosiliky liší. Vzhledem k tomu, že vodní součinitel, dávka cementu i množství plastifikátoru jsou shodné, se dá předpokládat, že cement v kompozitu reaguje stejně rychle a vytváří podobné množství Ca(OH)₂. Rozdíly v takto brzkých pevnostech tedy zřejmě způsobuje rozdílná reaktivnost jednotlivých druhů mikrosiliky, což způsobuje u některých záměsí pomalejší pucolánovou reakci.



Graf 5 – Pevnost v tlaku ve stáří 1 den

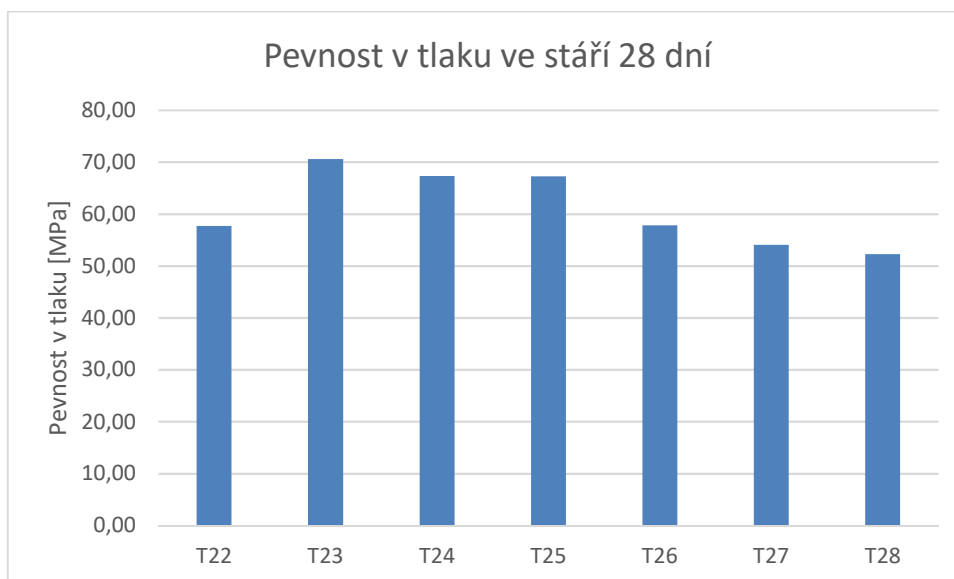
Nejnižší pevnost po 1 dni vykazuje fluidní mikrosilika RW-Flusil, nejrychlejší reakci lze naopak pozorovat u práškové nezhotněné siliky RW-Füller.

Pevnosti po 7 dnech jsou znázorněny na grafu Graf 6. Zde lze pozorovat první výraznější náběh pucolánové reakce mikrosiliky, která způsobila vznikem vyššího množství druhotného C-S-H gelu vyrovnání pevností s referenčním betonem, který vykazoval po 7 dnech pevnost 46,6 MPa. Z tohoto grafu lze vyčíst, že pevnosti ze záměsí s jednotlivými druhy mikrosiliky jsou téměř shodné, když rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší pevností je menší než 2,5 MPa.



Graf 6 – Pevnost v tlaku ve stáří 7 dní

Nejvyšší nárůst pevností byl ale dle předpokladů u receptur s mikrosilikou zaznamenán mezi 7 a 28 dny. 28-denní pevnosti znázorňuje Graf 7.

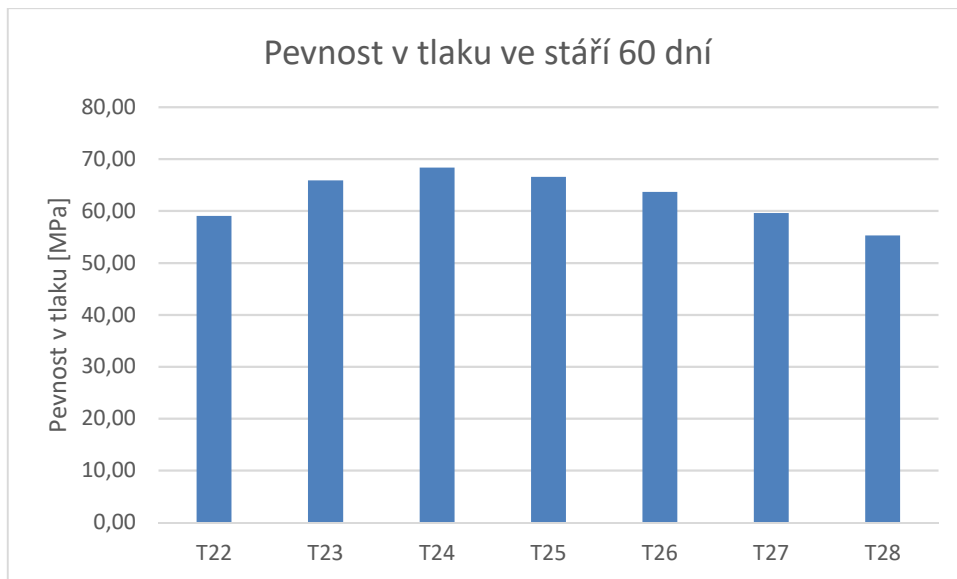


Graf 7 – Pevnost v tlaku ve stáří 28 dní

Zde lze pozorovat první velké změny v účincích jednotlivých druhů mikrosiliky. Zatímco 3 druhy mikrosiliky (MICROXIL+, RW-Füller a RW-Compasil) vykazují oproti referenčnímu betonu (57,7 MPa) výrazný nárůst pevností o 10-13 MPa, vzorek s kapalnou silikou RW-Flusil má pevnost téměř shodnou a ostatní vzorky dokonce nižší. Tyto rozdíly vznikají i přesto, že výrobci deklarují téměř shodné množství SiO_2 v materiálu a také podobné hodnoty měrných povrchů (kromě materiálu Silica VP4). Mikrosilika ale stejně jako ostatní pucolány reagují v betonu velmi dlouhou dobu a jejich účinky se mohou projevit později.

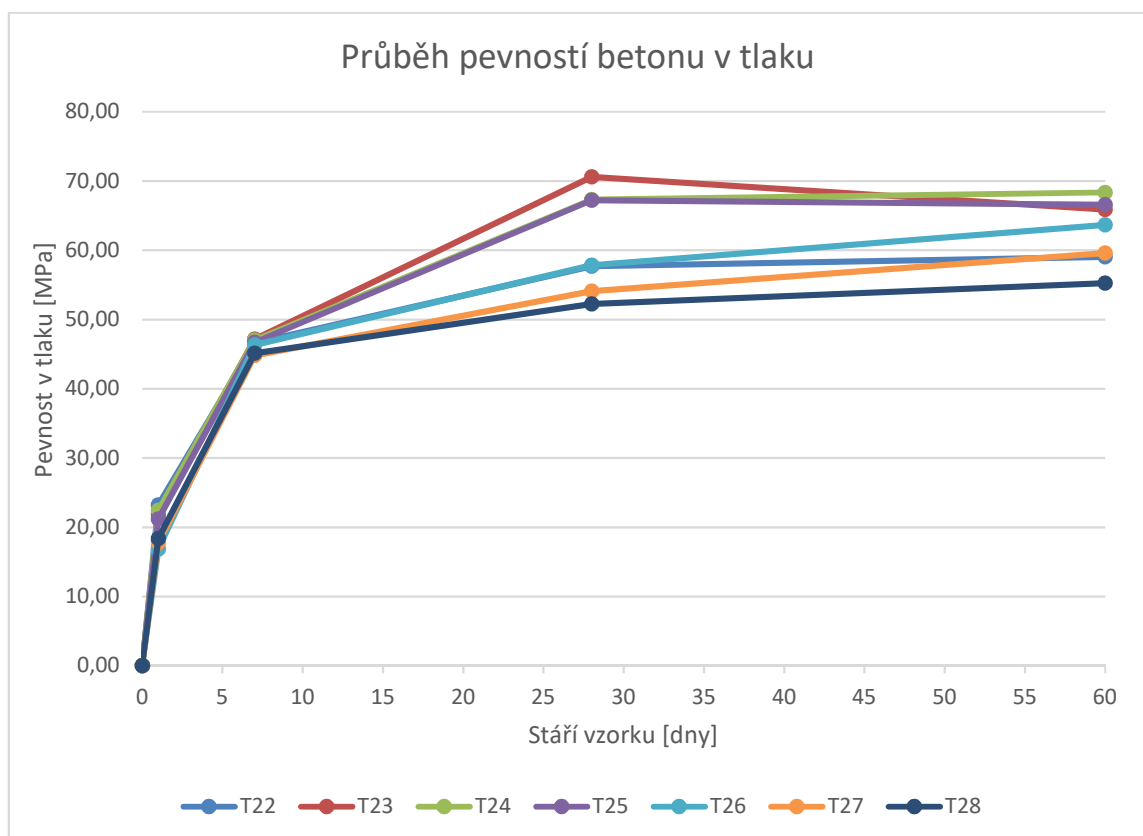
U záměsí T22-T28 byla z tohoto důvodu zhotovena zkušební tělesa i pro zjištění pevností po 60 dnech. Tyto hodnoty ukazuje Graf 8. Na tomto grafu je vidět další průběh reakce mikrosiliky. Zatímco pevnost referenčního betonu stoupla pouze o 1,3 MPa (od měření po 28 dnech), betony s mikrosilikami, které měly po 28 dnech podobné pevnosti (záměsí T26 – RW-Flusil a T27 – Fesilox 2020), vykázaly nárůst o 5-6 MPa.

Naopak u betonů s mikrosilikami, které už po 28 dnech měly pevnosti okolo 67-70 MPa žádný další nárůst zaznamenán nebyl. Naopak u materiálu MICROXIL+ nastal mírný pokles, což ale může být způsobeno chybou měření. Všechny receptury se záměnou 25 kg/m^3 cementu za mikrosiliku vykázaly zvýšení pevností po 60 dnech.



Graf 8 – Pevnost v tlaku ve stáří 60 dní

Jedinou výjimkou je receptura T28 s mikrosilikou Silica VP4. Zde bylo ale dávkováno z důvodu extrémního vlivu na vlastnosti čerstvého betonu pouze $2,5 \text{ kg/m}^3$. Zároveň lze dle průběhu pevností oproti referenčnímu betonu předpokládat její nárůst v dalších měsících. Průběhy pevností ze záměsí T22-T28 jsou zobrazeny v grafu Graf 9.



Graf 9 – Průběh pevností betonu v tlaku

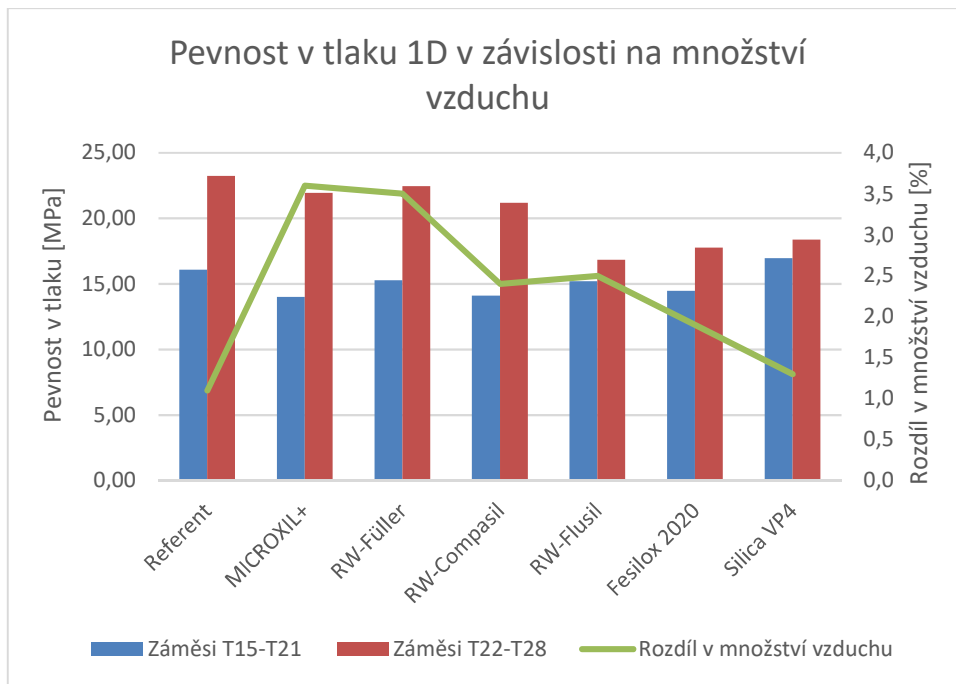
Pevnost betonu v tlaku může také záviset na jeho objemových hmotnostech a obsahu vzduchu. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici sadu téměř totožných betonů se stejným složením a stejným vodním součinitelem, které se liší pouze množstvím vzduchu v závislosti na dávce přísad, můžeme tyto betony porovnat z hlediska vlivu rozdílu množství vzduchu a objemových hmotností. Porovnání těchto hodnot je znázorněno v tabulce Tab. 21 a na následujících grafech.

Označení záměsi	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21
Množství vzduchu v ČB [%]	6,2	8,5	8,5	7,4	7,5	6,9	6,2
Objemová hmotnost ČB (měřeno na válci o objemu 8 dm³) [kg/m³]	2288	2214	2222	2238	2226	2265	2288
Označení záměsi	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Množství vzduchu v ČB [%]	5,1	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9
Objemová hmotnost ČB (měřeno na válci o objemu 8 dm³) [kg/m³]	2312	2320	2305	2308	2300	2303	2308
Pevnost v tl. (1D) – T15-T21 [MPa]	16,07	13,99	15,27	14,11	15,20	14,48	16,96
Pevnost v tl. (1D) – T22-T28 [MPa]	23,22	21,94	22,45	21,18	16,83	17,77	18,38
Pevnost v tl. (7D) – T15-T21 [MPa]	46,00	40,16	42,62	42,24	42,28	42,33	46,18
Pevnost v tl. (7D) – T22-T28 [MPa]	46,60	47,18	47,02	46,71	46,33	44,79	45,14
Pevnost v tl. (28D) – T15-T21 [MPa]	50,85	53,42	56,07	54,23	57,01	55,39	50,84
Pevnost v tl. (28D) – T22-T28 [MPa]	57,72	70,61	67,31	67,25	57,84	54,08	52,24

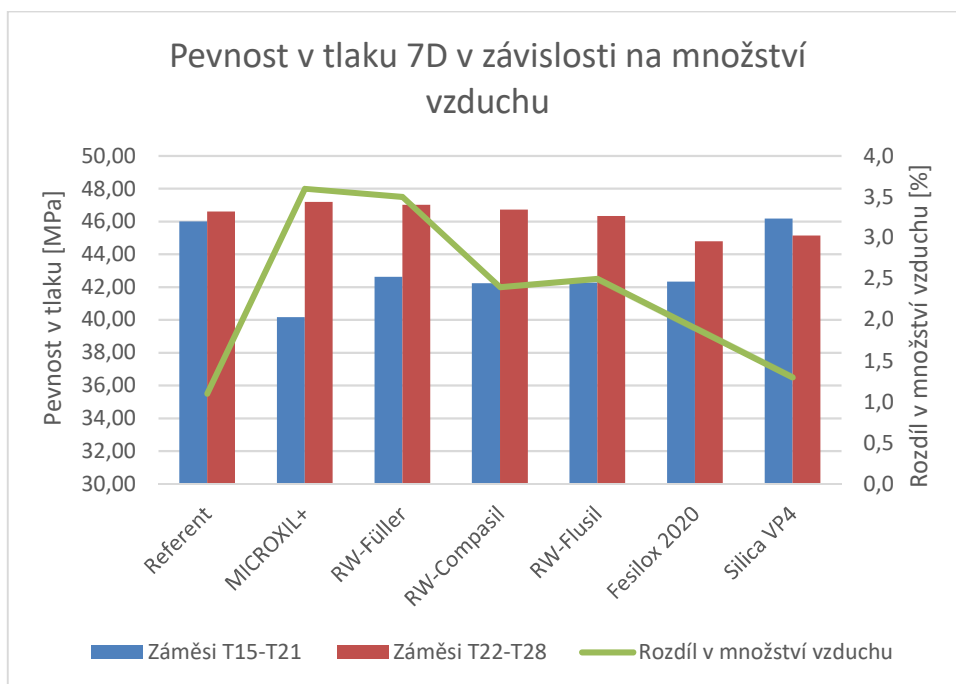
Tab. 21 – Porovnání pevností v tlaku v závislosti na jeho objemové hmotnosti

Vztah mezi pevnostmi v tlaku a množstvím vzduchu v ČB ukazují Graf 10, Graf 11 a Graf 12. Porovnání pevností v závislosti na objemové hmotnosti je zobrazeno v grafech Graf 13, Graf 14 a Graf 15.

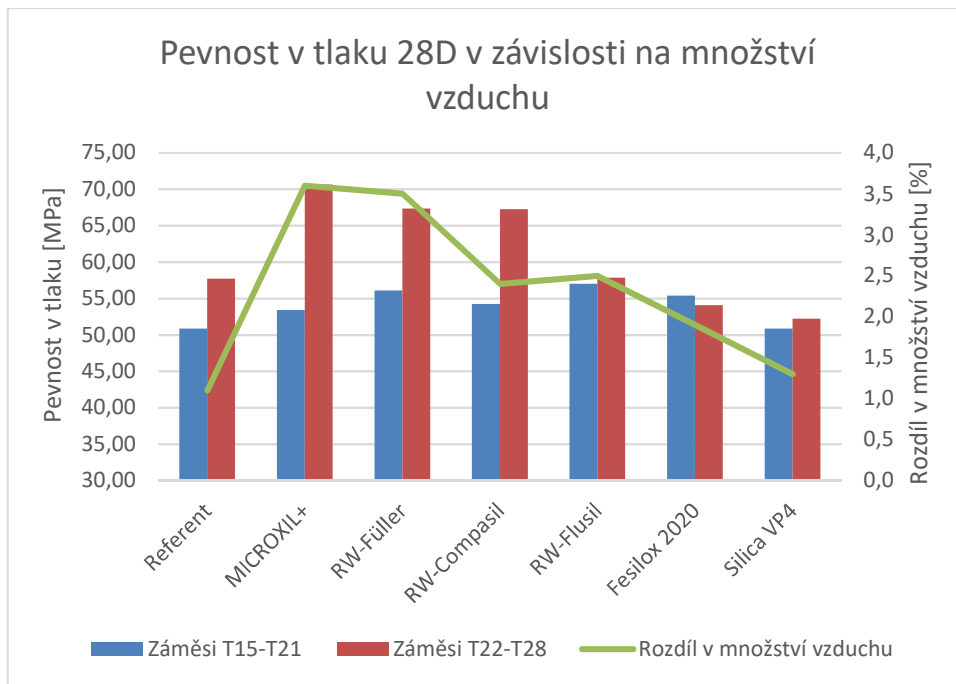
Z grafů je vidět, že pevnosti korelují s množstvím vzduchu i s objemovou hmotností čerstvého betonu, proto byly následně tyto závislosti přepočítány na hodnoty MPa/% vzduchu a MPa/kg/m³. Tyto hodnoty jsou pro jednotlivé druhy mikrosilik znázorněny v tabulce Tab. 22.



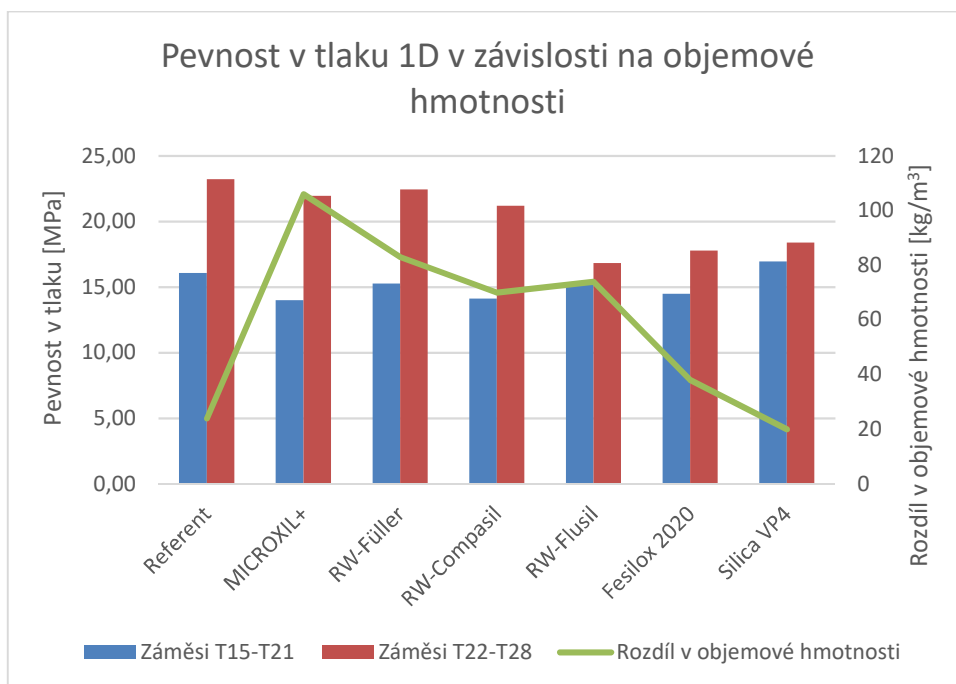
Graf 10 – Porovnání pevností v tlaku 1D v závislosti na množství vzduchu v ČB



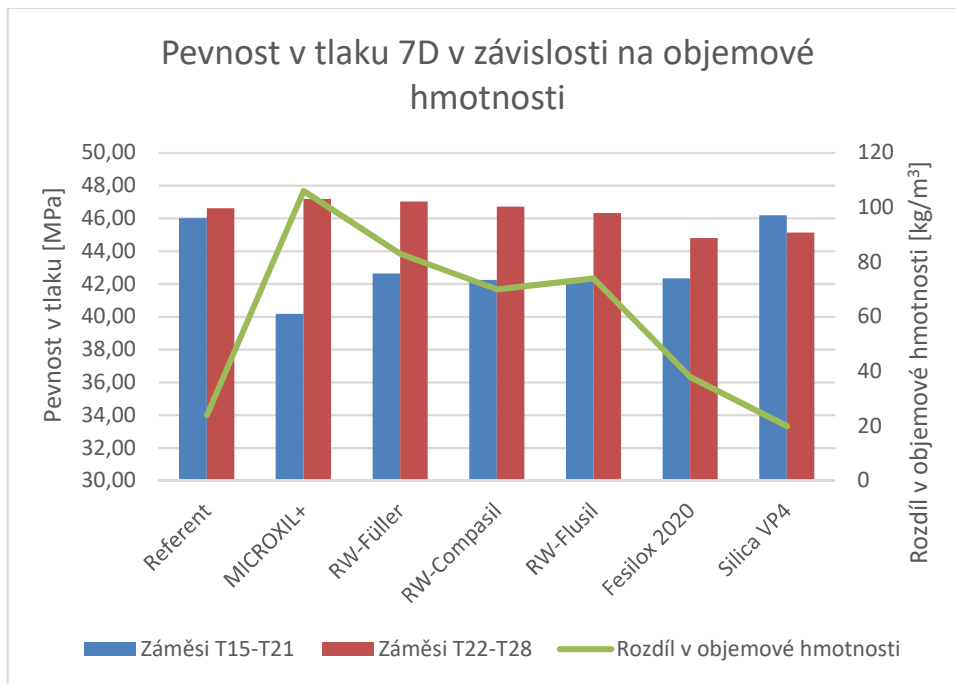
Graf 11 – Porovnání pevností v tlaku 7D v závislosti na množství vzduchu v ČB



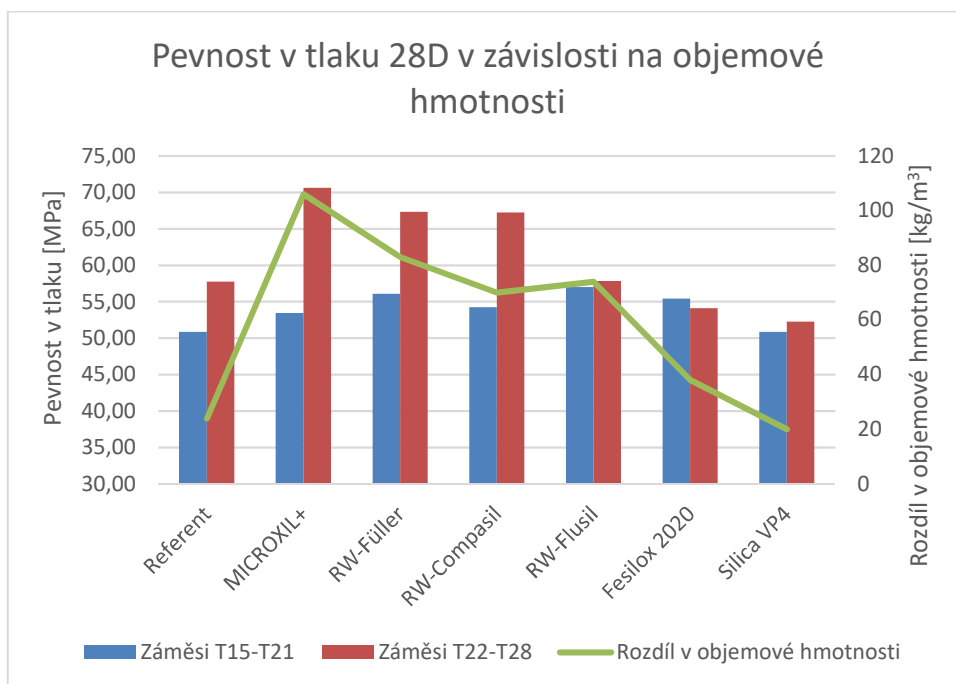
Graf 12 – Porovnání pevností v tlaku 28D v závislosti na množství vzduchu v ČB



Graf 13 – Porovnání pevností v tlaku 1D v závislosti na objemové hmotnosti ČB



Graf 14 – Porovnání pevností v tlaku 7D v závislosti na objemové hmotnosti ČB



Graf 15 – Porovnání pevností v tlaku 28D v závislosti na objemové hmotnosti ČB

Z následující tabulky (Tab. 22) lze vyvodit, že čím vyšší je obsah vzduchu a čím nižší je objemová hmotnost betonu, tím nižší je pevnost v tlaku nezávisle na stáří vzorku. Tento vztah platí pro všechny použité receptury kromě dvou hodnot (Fesilox 2020 po 28 dnech a Silica VP4 po 7 dnech). Pokud bychom ale chtěli určit nějaký číselný vztah, o kolik

MPa (nebo o kolik %) vzroste pevnost v tlaku při poklesu množství vzduchu v betonu o 1% (nebo při vzrůstu objemové hmotnosti o určitou hodnotu), tak zjistíme, že se jedná o velmi proměnlivé hodnoty. U stejného betonu se tedy můžeme spolehnout na určitou korelaci, ale výslednou pevnost ovlivňuje mnoho dalších faktorů.

Druh mikrosiliky	Referent	MICROXIL+	RW-Füller	RW-Compasil	RW-Flusil	Fesilox 2020	Silica VP4
Rozdíl v množství vzduchu [%]	1,1	3,6	3,5	2,4	2,5	1,9	1,3
Rozdíl v objemové hmotnosti [kg/m³]	24	106	83	70	74	38	20
Rozdíl v pevnostech 1D [Mpa]	7,15	7,95	7,18	7,07	1,63	3,29	1,43
Rozdíl v pevnostech 7D [Mpa]	0,60	7,02	4,40	4,48	4,05	2,46	-1,05
Rozdíl v pevnostech 28D [Mpa]	6,87	17,19	11,24	13,02	0,83	-1,31	1,40
Hodnota MPa/% vzduchu 1D	6,50	2,21	2,05	2,95	0,65	1,73	1,10
Hodnota MPa/kg/m³ 1D	0,30	0,08	0,09	0,10	0,02	0,09	0,07
Hodnota MPa/% vzduchu 7D	0,55	1,95	1,26	1,87	1,62	1,29	-0,81
Hodnota MPa/kg/m³ 7D	0,03	0,07	0,05	0,06	0,05	0,06	-0,05
Hodnota MPa/% vzduchu 28D	6,25	4,78	3,21	5,42	0,33	-0,69	1,08
Hodnota MPa/kg/m³ 28D	0,29	0,16	0,14	0,19	0,01	-0,03	0,07

Tab. 22 – Porovnání vztahů mezi pevností v tlaku, obsahem vzduchu v ČB a objemovou hmotností pro betony s různými druhy mikrosiliky

6.4.3. Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Z každé záměsi T22-T28 (se stejnými parametry čerstvého betonu) byly zhotoveny 3 zkušební tělesa (krychle o hraně 150 mm) na zkoušku odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám. Tato odolnost byla zkoušena dle ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek a byla vybrána metoda A podle této normy.

Na základě výsledků této zkoušky se v České republice zařazují betony do stupně vlivu prostředí XF, které jsou definovány v ČSN EN 206+A1 a se zahrnutím této zkoušky také v ČSN P 73 2404, což je národní doplňková norma pro specifikaci a vlastnosti betonu. Dle této normy musí beton pro zařazení do kategorie XF4 projít touto zkouškou

automatického cyklování s maximálním odpadem 1000 g/m² plochy po 100 zmrazovacích cyklech.

Zkoušku odolnosti vůči CHRL automatickým cyklováním může ovlivnit velké množství faktorů, především způsob přípravy vzorků a jejich následné uložení a ošetřování. Pro správné vyhodnocení této zkoušky je velice důležité, aby bylo se všemi vzorky nakládáno stejným způsobem. Pro potřeby těchto experimentů byly zkušební krychle uloženy ve zrací komoře, kde je udržováno prostředí se 100% vlhkostí. Následně byly všechny vzorky zkoušeny ve stejném stáří, které bylo při začátku automatického cyklování 32 dní.

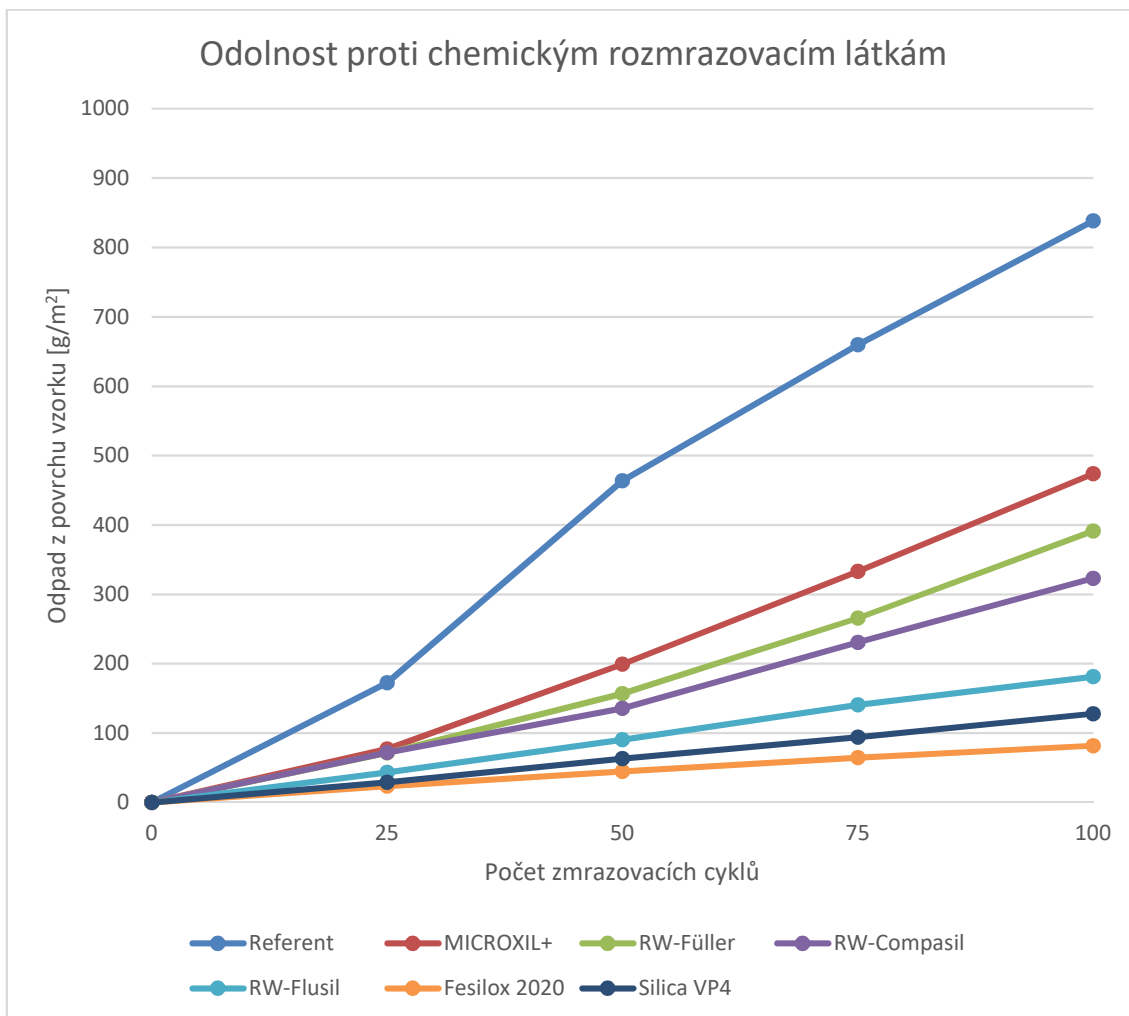
Výsledky odolnosti vůči CHRL jsou zobrazeny v tabulkách Tab. 23 a Tab. 24 a v grafech Graf 16 a Graf 17.

Označení vzorku	Objemová hmotnost tělesa [kg/m ³]	Odpad po 25 cyklech [g/m ²]	Odpad po 50 cyklech [g/m ²]	Odpad po 75 cyklech [g/m ²]	Odpad po 100 cyklech [g/m ²]
T22 - A	2313	163,8	410,7	645,1	817,5
T22 - B	2306	251,2	741,1	976,6	1260,8
T22 - C	2295	102,4	238,7	357,9	436,4
T23 - A	2308	70,4	199,7	312,5	442,0
T23 - B	2310	79,6	184,7	309,0	427,5
T23 - C	2306	81,2	213,7	377,3	551,8
T24 - A	2288	100,9	221,8	428,0	646,7
T24 - B	2291	66,2	154,5	235,5	362,3
T24 - C	2304	47,1	94,5	133,3	165,1
T25 - A	2309	55,7	104,6	163,4	235,5
T25 - B	2314	49,9	76,2	108,4	157,5
T25 - C	2300	110,7	226,5	419,9	576,3
T26 - A	2307	9,0	15,7	20,5	25,2
T26 - B	2306	45,3	98,5	150,5	198,9
T26 - C	2304	75,6	157,1	251,5	319,6
T27 - A	2265	23,5	44,8	66,2	81,3
T27 - B	2270	24,4	47,2	64,1	78,6
T27 - C	2263	22,9	42,2	62,7	85,6
T28 - A	2306	40,7	96,0	150,5	215,3
T28 - B	2299	33,5	72,3	100,4	122,8
T28 - C	2294	12,2	21,3	31,5	45,7

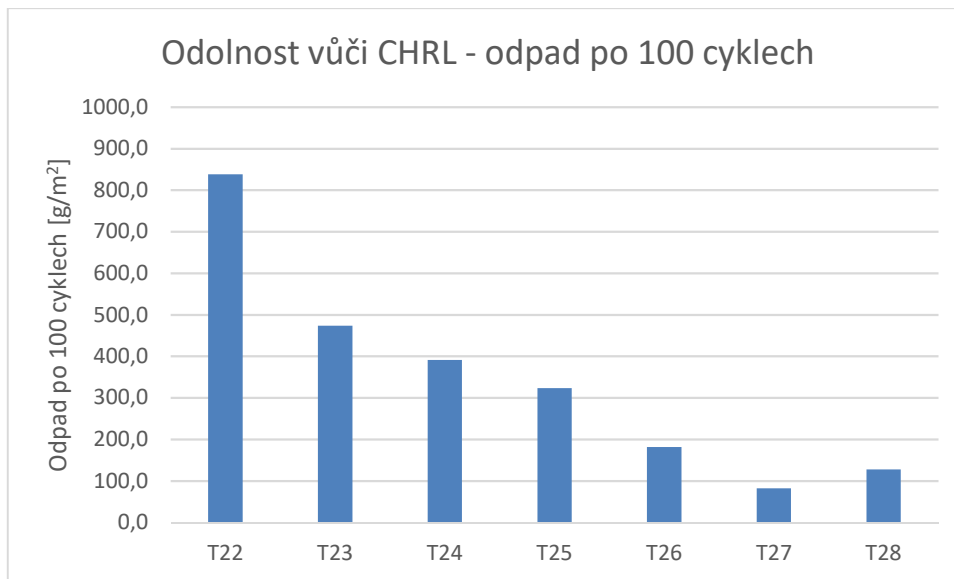
Tab. 23 – Detailní výsledky jednotlivých vzorků na odolnost vůči CHRL

Označení záměsi	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Objemová hm. tělesa [kg/m ³]	2305	2308	2294	2308	2306	2266	2300
Odpad po 25 cyklech [g/m ²]	172,5	77,1	71,4	72,1	43,3	23,6	28,8
Odpad po 50 cyklech [g/m ²]	463,5	199,4	156,9	135,8	90,4	44,7	63,2
Odpad po 75 cyklech [g/m ²]	659,9	332,9	265,6	230,6	140,8	64,3	94,1
Odpad po 100 cyklech [g/m ²]	838,2	473,8	391,4	323,1	181,2	81,8	127,9

Tab. 24 – Průměrné hodnoty odolnosti vůči CHRL pro směsi s různými druhy siliky



Graf 16 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám v průběhu po 25 cyklech



Graf 17 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám po 100 cyklech

Z předchozích tabulek a grafů je vidět, že použití mikrosiliky výrazně zlepšuje odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám. Rozdíl v množství odpadu po 100 cyklech mezi referenční recepturou a ostatními záměsemi je větší než rozdíly mezi recepturami s jednotlivými druhy mikrosiliky. Na základě těchto zkoušek můžeme tedy konstatovat, že mikrosilika zlepšuje odolnost povrchu betonu vůči CHRL bez ohledu na její druh, ale ve výsledných odpadech mohou být rozdíly na základě rozdílných vlastností jednotlivých příměsí. Nejpriznivější hodnoty vykazuje prášková mikrosilika Fesilox 2020.

Všechny grafy vykazují téměř rovnoměrný postup rozpadu povrchu vzorku. Na žádném vzorku nebylo po dokončení zkoušky pozorováno nějaké lokální poškození (např. ulomený roh), které by ovlivnilo výsledek zkoušky. Příklady struktury povrchů po dokončení zkoušky v mrazícím zařízení jsou znázorněny na Obr. 18, Obr. 19 a Obr. 20.

Na Obr. 18 se vzorky z referenční receptury bez obsahu mikrosiliky je vidět rozpad struktury povrchu namáhaného působením mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Na Obr. 19 je zobrazen detail tohoto porušení. Zkoušená plocha je na té straně zkušební krychle, která při výrobě tělesa není v kontaktu s formou. Jedná se tedy o horní stranu, proto není povrch této strany úplně dokonale rovný. Vyhovující výsledek zkoušky je zobrazen na Obr. 20.



Obr. 18 – Příklad porušení povrchu vzorků po zkoušce odolnosti vůči CHRL



Obr. 19 – Detail porušení povrchu vzorku po zkoušce odolnosti vůči CHRL



Obr. 20 – Příklad vyhovujícího výsledku zkoušky odolnosti vůči CHRL

6.4.4. Množství vzduchu ve ztvrdlém betonu – spacing factor

Analýza množství vzduchu ve ztvrdlém betonu byla prováděna dle ČSN EN 480-11 – Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Tímto postupem lze zjistit celkový obsah vzduchu A [%], součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů L [mm] a obsah mikroskopického vzduchu A_{300} [%].

Vzorky pro tuto zkoušku se připraví rozříznutím tělesa ztvrdlého provzdušněného betonu kolmo k horní povrchové ploše tělesa. Tyto vzorky se následně zbrousí a naleští tak, aby se vytvořil rovný a hladký povrch pro mikroskopickou analýzu. Struktura vzduchových pórů se stanovuje podrobným snímáním povrchu, kdy se zaznamená počet vzduchových pórů protnutých měřicími přímkami včetně jednotlivých délek tětív. Popis systému vzduchových pórů se provede pomocí matematické analýzy naměřených dat a určí se veličiny zmíněné výše.

Pro analýzu vzduchových pórů byly vyrobeny krychle o hraně 150 mm z každé záměsi (T15-T28). Tyto vzorky byly po nařezání zbroušeny různými brusnými kotouči tak, aby bylo dosaženo požadovaného povrchu (Obr. 21 a Obr. 22).



Obr. 21 – Broušení vzorku brusným kotoučem



Obr. 22 – Vzorky po zbroušení

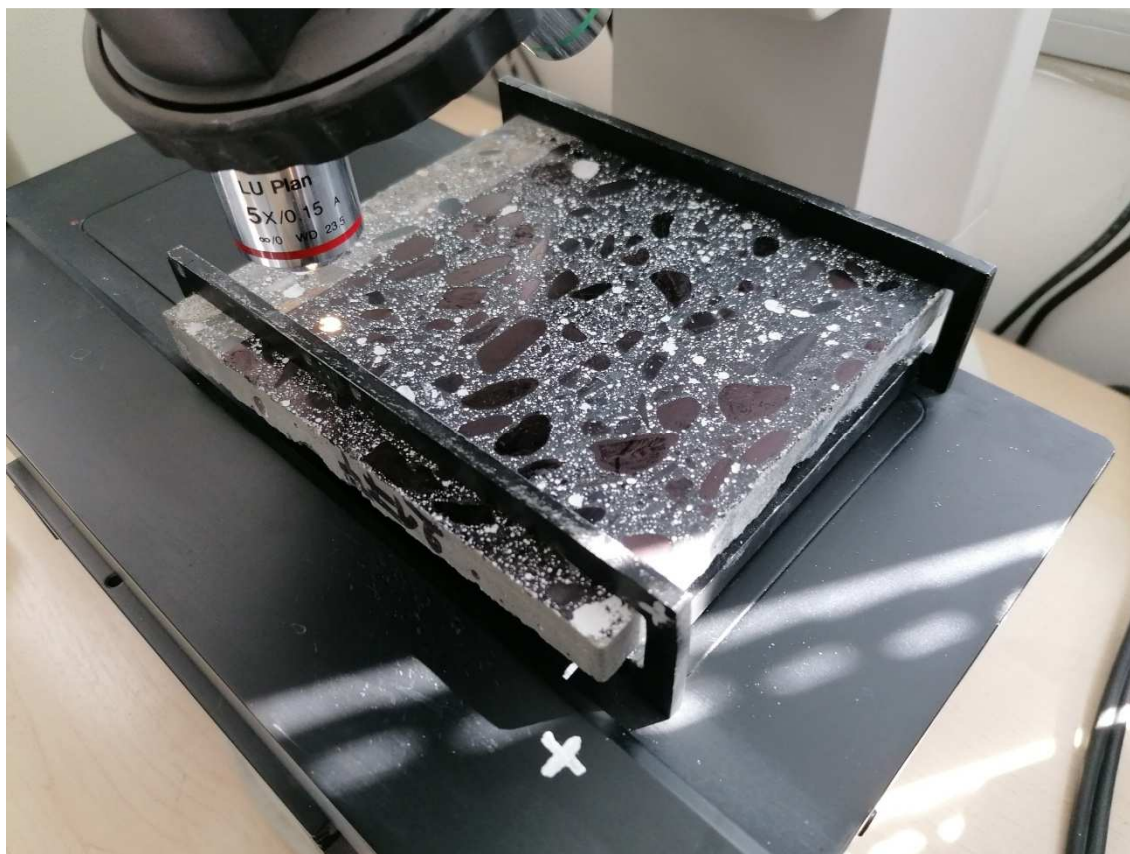
Po zbrúšení vzorku je nutné povrch upravit tak, aby se vytvořil lepší kontrast mezi cementovým tmelem a vzduchovými póry. Na povrch vzorku bylo nejprve nanášeno černé barvivo a následně byla celá plocha pokryta kontrastní látkou (síran barnatý) tak, aby byl tento prášek důkladně vtlačen do vzduchových pórů. Přebytečný prášek byl odstraněn stěrkou.

Obsah vzduchu zjišťujeme pouze v cementovém tmelu, proto je potřeba na vzorku eliminovat různé praskliny a póry v kamenivu. Tyto nedokonalosti se analyzují pod lupou a před nasnímáním mikroskopem se vyretušují neprůhledným fixem. Vzorek, který je připravený k nasnímání, je zobrazen na Obr. 23.



Obr. 23 – Vzorek připravený pro nasnímání mikroskopem

Zkušební vzorky se umístí pod mikroskop na manipulační stolek tak, aby měřicí přímky procházely rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Po ustavení vzorku a zaostření čočky se zapne automatické snímání. Příklad uložení vzorku při snímání je znázorněn na Obr. 24.



Obr. 24 – Snímání vzorku pod mikroskopem

Kompletní výsledky měření charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu jsou vidět v tabulce Tab. 25. Limitní hodnoty pro splnění parametrů prostředí XF4 dle ČSN P 73 2404 jsou stanoveny na:

$A = \text{min. } 4,5 \%$

$L = \text{max. } 0,20 \text{ mm}$

$A_{300} = \text{min. } 1,8 \%$

Z výsledků v Tab. 25 je patrné, že hodnoty celkového vzduchu ve ztvrdlém betonu A jsou obecně vyšší, než hodnoty při měření množství vzduchu v čerstvém betonu. U betonu bez mikrosiliky je tento rozdíl 1,2 – 1,6%, ale u záměsí s mikrosilikami můžeme najít rozdíly 2-4%. Při porovnání množství vzduchu a objemových hmotností je pravděpodobné, že přesnější měření poskytla tlaková metoda při měření ČB. Vzhledem k tomu, že odchylka se vyskytuje u všech měření, nejedná se o náhodnou chybu (např. uříznutí vzorku v místě s lokální koncentrací vyššího množství vzduchových pórů), ale zřejmě byla použita lehce

odlišná metodika, než je běžné, protože při přípravě vzorku vstupuje do procesu vysoké množství proměnných.

Přesto lze z naměřených hodnot vypočítat určitý trend.

Označení záměsi	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21
Obsah vzduchu dle měření ČB [%]	6,2	8,5	8,5	7,4	7,5	6,9	6,2
Celkový obsah vzduchu A [%]	7,8	10,0	10,9	10,1	12,3	10,2	8,3
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů L [mm]	0,18	0,12	0,13	0,13	0,08	0,15	0,19
Obsah mikroskopického vzduchu [%]	1,96	3,19	2,09	2,42	4,21	2,55	1,63
 							
Označení záměsi	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Obsah vzduchu dle měření ČB [%]	5,1	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9
Celkový obsah vzduchu A [%]	6,3	7,0	8,0	7,4	7,9	8,7	9,4
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů L [mm]	0,18	0,22	0,23	0,28	0,24	0,16	0,12
Obsah mikroskopického vzduchu [%]	1,98	1,26	1,35	1,25	1,34	1,69	2,34

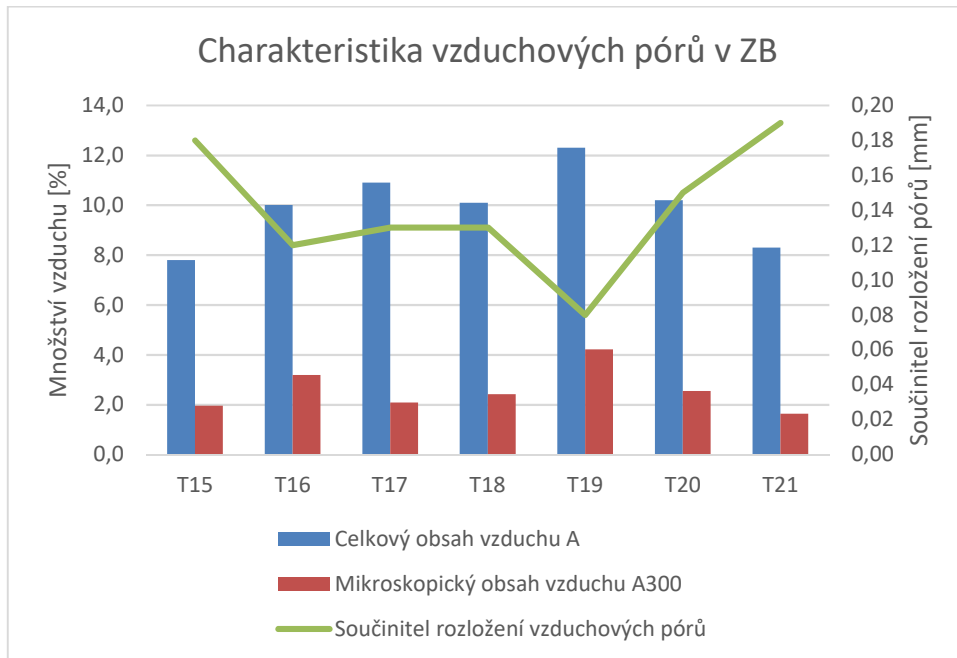
Tab. 25 – Souhrnné výsledky charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

U obou referenčních záměsí (T15 a T22) byly při standardních hodnotách provzdušnění splněny všechny 3 limity pro prostředí XF4. Přidání mikrosiliky u záměsí T16-T21 (bez další úpravy betonu) způsobilo velmi výrazné zvýšení množství vzduchu, a proto byly tyto podmínky také splněny. Jedinou výjimkou byla záměs s mikrosilikou Silica VP4 (A₃₀₀ = 1,63%), u které byla na čerstvém betonu naměřena stejná hodnota provzdušnění jako u referenční záměsi.

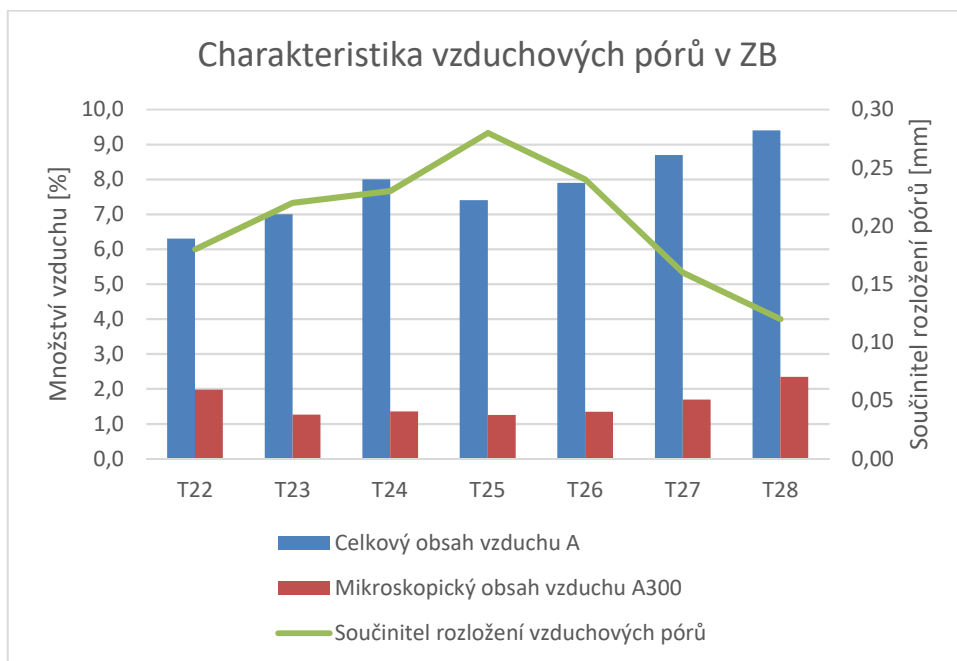
Zajímavé hodnoty pak byly naměřeny u záměsí T23-T28. Zde byly naměřeny vyšší hodnoty celkového vzduchu A oproti referenční záměsi, ale na rozdíl od ní nesplnily 4 záměsi z 6 hodnotu součinitele rozložení vzduchových pórů L a dokonce 5 záměsí z 6 nesplnilo limit na obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀. Jedinou výjimku opět tvoří Silica VP4.

Na základě těchto měření lze tedy konstatovat, že jednotlivé druhy mikrosiliky mají podobný vliv na výsledky rozložení vzduchu ve ztvrdlém betonu, ale neovlivňují pozitivně důležité hodnoty pro splnění požadavků na prostředí XF4. U mikrosilik MICROXIL+, RW-Füller, RW-Compasil a RW-Flusil byly naměřeny hodnoty

prostorového rozložení vzduchových pórů v rozmezí 0,22 – 0,28 a mikroskopický obsah vzduchu A300 byl naměřen v rozsahu 1,25 – 1,35%. Naopak referenční beton bez mikrosiliky vykazoval ideální rozložení vzduchu při $L = 0,18$ mm a $A300 = 1,98\%$.



Graf 18 – Charakteristika vzduchových pórů v ZB (záměsi T15-T21)



Graf 19 – Charakteristika vzduchových pórů v ZB (záměsi T22-T28)

7. Vyhodnocení a závěr

V této práci byl vyhodnocen vliv jednotlivých druhů mikrosiliky z hlediska vybraných vlastností čerstvé betonové směsi a ztvrdlého betonu. Tyto vlastnosti byly vyhodnoceny na základě experimentálního programu, který byl navržen tak, aby záměrně vynikly účinky mikrosiliky v cementovém kompozitu.

Všechny zkoušky byly navrženy a provedeny dle harmonizovaných evropských norem nebo dle zavedených místních postupů. Podmínky při provádění zkoušek (příprava a druh vstupních materiálů, postupy míchání, postupy zkoušení, výroba a ošetřování zkušebních těles, prostředí v laboratoři apod.) byly stanoveny tak, aby byly po celou dobu experimentů neměnné a aby nežádoucím způsobem neovlivňovaly výsledky zkoušek.

Na základě těchto experimentů lze konstatovat, že všechny druhy mikrosiliky výrazně zlepšují pevnost a odolnost betonu, čímž byly potvrzeny teoretické předpoklady, které byly stanoveny na základě dřívějších výzkumů ve světě. Zásadní zjištění této práce ale je, že existují výrazné rozdíly mezi jednotlivými příměsemi i přesto, že výrobci deklarují velmi podobné hodnoty chemických složení i mechanicko-fyzikálních vlastností.

Ve výsledcích měření čerstvého a ztvrdlého betonu nebyla nalezena závislost hodnot na typu mikrosiliky (prášková/zhutněná/kapalná). Nelze tedy říct, že by některý druh mikrosiliky ovlivňoval vlastnosti betonu z důvodu odlišného způsobu dávkování. Při správné homogenizaci fluidní, přesném dávkování práškové a správném rozmíchání zhutněné mikrosiliky bude tato příměs v betonu reagovat dle jejích skutečných chemických a mechanicko-fyzikálních vlastností.

Po analýze výsledků zkoušek nebyla objevena ani korelace mezi vlivem mikrosiliky na vlastnosti betonu a hodnotami chemického složení a mechanicko-fyzikálních parametrů uváděných výrobcem. Pouze Silica VP4, která se svými vlastnostmi výrazně liší od ostatních příměsí, vykazovala u některých zkoušek odchylky od ostatních záměsí. To ale mohlo být způsobeno tím, že se této příměsi dávkovalo výrazně menší množství na m^3 .

Zajímavé zjištění z experimentů v této práci je fakt, že ty mikrosiliky, které nejvíce ovlivnily vlastnosti čerstvého betonu (nejvíce zvýšily obsah vzduchu a snížily hodnotu konzistence), ve výsledku vykazovaly nejvyšší hodnoty pevností v tlaku. Dá se

předpokládat, že tyto materiály měly největší předpoklady pro správnou pucolánovou reakci oproti ostatním mikrosilikám.

Tuto reakci ovlivňují především hodnoty měrného povrchu a hodnoty obsahu amorfního SiO_2 v materiálu. Je tedy pravděpodobné, že hodnoty, které uvádějí výrobci, se mohou v čase lišit. To může být způsobeno několika faktory.

Mikrosilika je stejně jako ostatní umělé pucolánové příměsi odpadní materiál, jehož výsledné vlastnosti nejsou primárním cílem průmyslových výrobců. I přes to, že je výroba křemíku a křemičitých slitin v obloukových pecích důsledně kontrolovaným procesem, u kterého se při výrobě používají chemicky čisté materiály, mohou se vlastnosti vedlejších produktů lišit.

Stále také existují pece na výrobu křemičitých slitin, které jsou konstruovány tak, že zachytávají křemičité úlety z více pecí na jedné skládce, což může způsobit při častých změnách výroby rozdíly ve výsledných vlastnostech mikrosiliky.

Dalšími faktory, které ovlivňují reaktivnost mikrosiliky v čase, mohou být stáří vzorku, způsob uložení, vnější podmínky uložení (teplota prostředí, vlhkost) apod.

Pokud bychom chtěli tyto faktory detailně prozkoumat a přesně vyhodnotit důvody rozdílných účinků jednotlivých druhů mikrosiliky, bylo by potřeba provést vlastní zkoušky chemického složení, měrných hmotností a měrných povrchů dle dostupných metod. Námětem na další výzkum v tomto oboru by tedy bylo zjištění závislosti obsahu SiO_2 při stejném měrném povrchu na vlastnosti zkoumané v této práci a také vliv rozdílných měrných povrchů na náběh pevností v tlaku.

Zároveň by bylo vhodné vyzkoušet průběh pevností v tlaku i v delším časovém horizontu. Je totiž možné, že některé mikrosiliky mají pucolánovou reakci pouze pomalejší než ostatní materiály, ale po 90 nebo 180 dnech se mohou hodnoty pevností vyrovnat. Betony s mikrosilikami, které vykazovaly vysokou pevnost už po 28 dnech, už další nárůst nezaznamenaly, naopak betony s nižšími pevnostmi na začátku stále postupně rostly.

Závěrem této práce je zjištění, že v případě návrhu betonů, ve kterých hraje mikrosilika velkou roli a u kterých jsou velmi vysoké nároky na požadované vlastnosti, je nutné znát detailní složení tohoto materiálu včetně nejdůležitějších mechanicko-fyzikálních

vlastností, aby bylo možné správně vyhodnotit vliv této příměsi na výsledné parametry betonu.

Uživatelé křemičitých úletů by pro důležitá použití měli pečlivě sledovat kvalitu zdroje mikrosiliky a provádět potřebné zkoušky pro ověření stálosti vlastností, nebo odebírat tento materiál ze zdrojů, které tyto zkoušky pravidelně provádějí a nabízejí dlouhodobé sledování základních vlastností mikrosiliky.

Použitá literatura

- [1] T. Nochaiya, W. Wongkeo, and A. Chaipanich, "Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete," *Fuel*, vol. 89, no. 3, pp. 768–774, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.003.
- [2] P.-C. Aïtcin, *High performance concrete*. CRC press, 1998.
- [3] H. H. Bache, "Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based Materials," *Second Int. Conf. Superplast. Concr.*, no. 0 6, pp. 1–34, 1981.
- [4] Y. Jeong, S. H. Kang, M. O. Kim, and J. Moon, "Acceleration of cement hydration from supplementary cementitious materials: Performance comparison between silica fume and hydrophobic silica," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, p. 103688, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103688.
- [5] V. M. Malhotra, *Condensed Silica Fume in Concrete*. CRC Press, 2018.
- [6] Z. Zhang, B. Zhang, and P. Yan, "Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 82–93, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.045.
- [7] M. A. El-Sayed and T. M. El-Samni, "Physical and Chemical Properties of Rice Straw Ash and Its Effect on the Cement Paste Produced from Different Cement Types," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 21–29, Jan. 2006, doi: 10.1016/S1018-3639(18)30845-6.
- [8] R. Snellings, G. Mertens, and J. Elsen, "Supplementary Cementitious Materials," *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 74, pp. 211–278, 2012, doi: 10.2138/rmg.2012.74.6.
- [9] T. Wang, T. Ishida, and R. Gu, "A comparison of the specific surface area of fly ash measured by image analysis with conventional methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 1163–1172, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.131.
- [10] E. C. Arvaniti *et al.*, "Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques," *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 11, pp. 3687–3701, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0431-3.

- [11] M. Collepardi, *The New Concrete*. Grafiche Tintoretto, 2006.
- [12] M. Collepardi, G. Baldini, M. Pauri, and M. Corradi, "Tricalcium aluminate hydration in the presence of lime, gypsum or sodium sulfate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 8, no. 5, pp. 571–580, Sep. 1978, doi: 10.1016/0008-8846(78)90040-6.
- [13] M. Collepardi and L. Massidda, "Hydration of tricalcium silicate," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 54, no. 9, pp. 419–422, 1971.
- [14] M. I. Khan and R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 57, pp. 30–35, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.09.016.
- [15] H. S. Wong and H. A. Razak, "Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 696–702, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.051.
- [16] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 347–357, May 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00017-9.
- [17] W. H. Huang, "Properties of cement-fly ash grout admixed with bentonite, silica fume, or organic fiber," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 3, pp. 395–406, Mar. 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00032-X.
- [18] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 11. Elsevier, pp. 923–932, Sep. 01, 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.012.
- [19] P. Jähren, "Use of Silica Fume in Concrete," *ACI Symp. Publ.*, vol. 79, doi: 10.14359/6715.
- [20] V. M. Malhotra, G. G. Carrette, and P. C. Aitcin, "Mechanical properties of Portland cement concrete incorporating blast furnace slag and condensed silica fume," in *Proceedings, RILEM/ACI Symposiums on Technology of Concrete When Pozzolans, Slag and Chemical Admixtures are Used, Monterrey, Mexico*, 1985, pp. 395–414.

- [21] O. E. Gjorv, "Durability fo Concrete containing condensed silica fume," *ACI Symp. Publ.*, vol. 79, doi: 10.14359/6719.
- [22] A. Markestad, *An investigation of concrete in regard to permeability problems and factors influencing the results of permeability tests*. Forskningsintitutet for Cement og Betong, 1977.
- [23] L. Nicula, O. Corbu, and M. Iliescu, *Methods for Assessing the Freeze-Thaw Resistance of Road Concrete Used in our Country and at European Level Methods for Assessing the Freeze-Thaw Resistance of Road Concrete Used in our Country and at European Level*, vol. 877. 2020.
- [24] O. Coussy and P. J. M. Monteiro, "Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 40–48, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.006.
- [25] J. Elsen, "Automated air void analysis on hardened concrete: Results of a European intercomparison testing program," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 1027–1031, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00517-8.
- [26] J. Schock, S. Liebl, K. Achterhold, and F. Pfeiffer, "Obtaining the spacing factor of microporous concrete using high-resolution Dual Energy X-ray Micro CT," *Cem. Concr. Res.*, vol. 89, pp. 200–205, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.08.008.
- [27] R. D. Hooton, "Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing, and Alkali-Silica Reactivity," *ACI Mater. J.*, vol. 90, no. 2, doi: 10.14359/4009.
- [28] A. Cwirzen and V. Penttala, "Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 671–679, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.009.
- [29] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, "Supplementary cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12. Pergamon, pp. 1244–1256, Dec. 01, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

[30] Z. Guo, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, and D. E. Lehman, “Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117115, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117115.