



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI BETONŮ VE
VYSOCE CHEMICKY AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ V
ZEMĚDĚLSTVÍ**

POSSIBILITIES OF INCREASING DURABILITY OF CONCRETE IN HIGHLY CHEMICAL
AGGRESSIVE ENVIRONMENT IN AGRICULTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Sláma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Radek Sláma
Název	Možnosti zvýšení trvanlivosti betonů ve vysoce chemicky agresivním prostředí v zemědělství
Vedoucí práce	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

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

dr.h.c.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Časopis Beton TKS

ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace

Drochytka, R.- Trvanlivost stavebních materiálů

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje, Science Direct apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V posledních letech dochází k výraznému zvýšení produkce betonů pro zemědělské stavby, zejména pro oblast působení vysoce chemicky agresivního působení. Jedná se o různé druhy hospodářských staveb jako jsou bioplynové stanice, silážní žlaby a budovy pro ustájení dobytka. Betony těchto staveb jsou vystaveny vysoké chemické zátěži, odpovídající stupni vlivu prostředí XA3. Cílem diplomové práce bude shrnutí poznatků o trvanlivosti betonu vystaveného působení vysoce chemicky agresivního prostředí a studium poznatků o návrhu a složení betonu pro konstrukce exploatované v tomto prostředí. Důraz bude kladen na odolnost vůči různým druhům chemické agresivity v těchto konstrukcích a možnosti, jak tuto odolnost zvyšovat.

Základní body diplomové práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních znalostí o trvanlivosti betonu vystaveného účinkům vysoce chemicky agresivního prostředí,
- shrnutí poznatků o jednotlivých druzích krystalizačních a polymerních přísad do betonu.

Experimentální část práce se bude zabývat studiem vlastností betonů, které byly vystaveny působení prostředí XA3. Tyto zkoušky budou prováděny na cementových maltách, kde bude sledován zejména vliv použití různých druhů přísad a příměsí na odolnost betonu proti chemické agresivitě. Bude použito běžné drobné kamenivo do betonu, aby sledované malty co nejvíce odpovídaly svým složením běžným betonům, hrubá složka kameniva bude vynechána. Experimentální část se bude zabývat těmito základními body: Použití křemičitých úletů, vodního skla, krystalizačních a vytvrzovacích přísad pro zvýšení trvanlivost betonu. Na takto navržených a vyrobených maltách budou sledovány základní parametry betonu, jako jsou pevnost betonu v tlaku v různém stáří, nasákavost, případně také vzduchová neprůzvučnost. Následně bude sledována trvanlivost, zejména v prostředí s velmi nízkým pH a v prostředí tzv. silážních šťáv. V neposlední řadě bude posouzena také odolnost těchto materiálů vůči působení mrazu.

Rozsah práce cca 80 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V posledních letech dochází k výraznému zvýšení produkce betonů pro zemědělské stavby, zejména v oblasti působení vysoce chemicky agresivního prostředí.

Cílem diplomové práce je popis a shrnutí dosavadních znalostí o trvanlivosti betonu vystaveného účinkům vysoce chemicky agresivního prostředí. Dále je kladen důraz na popis jednotlivých přísad a příměsí zvyšujících odolnost betonu proti působení škodlivých látek.

V experimentální části jsou laboratorně zkoumány vlivy jednotlivých druhů přísad, příměsí a uzavíracích nátěrů na zvýšení odolnosti betonů proti působení vysoce chemicky agresivního prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Koroze betonu, složky betonu, agresivní prostředí, hospodářské objekty, ochrana betonu

ABSTRACT

In recent years there has been a significant increase in the production of concretes for agricultural buildings, especially in the area of exposure to highly chemically aggressive environments.

The aim of the thesis is to describe and summarize the existing knowledge about the durability of concrete exposed to the effects of highly chemically aggressive environment. Furthermore, emphasis is placed on the description of individual additives and admixtures increasing the resistance of concrete to the effect of harmful substances.

In the experimental part, the effects of individual types of additives, admixtures and sealing coatings on increasing the resistance of concrete against the effect of highly chemically aggressive environment are investigated in the laboratory.

KEYWORDS

Concrete corrosion, concrete components, aggressive environments, farm buildings, protection of concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Radek Sláma. *Možnosti zvýšení trvanlivosti betonů ve vysoce chemicky agresivním prostředí v zemědělství*. Brno, 2020. 124 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Možnosti zvýšení trvanlivosti betonů ve vysoce chemicky agresivním prostředí v zemědělství* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Radek Sláma

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnosti zvýšení trvanlivosti betonů ve vysoce chemicky agresivním prostředí v zemědělství* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Radek Sláma

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych v první řadě chtěl poděkovat mé rodině a kamarádům, bez kterých by tato práce nikdy nemohla vzniknout. Děkuji zejména své mamce, že mi byla velkou oporou po celou dobu studia. Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce. Poděkování patří také panu Vladimíru Klímovi za pomoc při zkoušení vzorků v laboratoři.

OBSAH

ÚVOD	12
CÍL PRÁCE	13
A. TEORETICKÁ ČÁST	14
1 SUROVINY PRO VÝROBU BETONU S OHLEDEM NA TRVANLIVOST	14
1.1 KAMENIVO	14
1.2 CEMENT	15
1.3 VODA	16
1.4 PŘÍMĚSI	17
1.4.1 KŘEMIČITÉ ÚLETY (MIKROSILIKA)	18
1.4.2 ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK	20
1.4.3 VYSOKOPECNÍ STRUSKA	21
1.5 PŘÍSADY	21
1.5.1 PLASTIFIKAČNÍ A SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADY	22
1.5.2 PROVZDUŠŇOVACÍ PŘÍSADY	25
1.5.3 TĚSNÍCÍ PŘÍSADY	26
1.5.3.1 KRYSTALIZAČNÍ LÁTKY	26
1.5.3.2 HYDROFOBIZAČNÍ PŘÍSADY	28
1.5.4 PROTISMRŠŤUJÍCÍ PŘÍSADY	29
2 TRVANLIVOST BETONU	30
2.1 PLYNNÉ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ	31
2.1.1 KARBONATACE	32
2.1.2 SULFATACE	33
2.1.2.1 SULFATACE BETONU V PRAXI	34
2.1.3 VLIVY URYCHLUJÍCÍ PLYNNOU KOROZI	34
2.1.3.1 VLIV VLHKOSTI	35
2.1.3.2 VLIV KONCENTRACE CO ₂	35

2.1.3.3 Vliv difuze.....	35
2.2 KAPALNÉ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ.....	36
2.2.1 KOROZE I. DRUHU	36
2.2.2. KOROZE II. DRUHU	37
2.2.2.1 KOROZE KYSELÝMI VODAMI	37
2.2.2.2 KOROZE VLIVEM AMONIAKU	38
2.2.3 KOROZE III. DRUHU	38
2.2.3.1 KOROZE SÍRANOVÝMI VODAMI.....	39
2.2.3.2 KOROZE CHLORIDOVÝMI VODAMI	39
2.2.3.3 PŘÍKLAD AGRESIVNÍHO PROSTŘEDÍ III. TYPU V PRAXI.....	39
2.2.4 KOROZE MINERÁLNÍMI TUKY A OLEJI	40
2.2.5 BIOLOGICKÁ KOROZE BETONU.....	40
3 OBJEKTY VYSTAVENÉ PŮSOBNÍ CHEMICKY AGRESIVNÍHO PROSTŘEDÍ	41
3.1 SILÁŽNÍ ŽLABY.....	41
3.2 BIOPLYNOVÉ STANICE	42
3.3 ZEMĚDĚLSKÉ OBJEKTY PRO USTÁJENÍ A CHOV DOBYTKA	43
4 PROPUSTNOST BETONU.....	44
4.1 Vliv pórovitosti na propustnost betonu	44
4.2 PROPUSTNOST BETONU OVLIVNĚNÁ TRHLINAMI V BETONU	45
5 OCHRANA BETONU PRO ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI PROTI PŮSOBNÍ AGRESIVNÍCH LÁTEK.....	46
5.1 PRIMÁRNÍ OCHRANA.....	46
5.2 SEKUNDÁRNÍ OCHRANA	46
5.2.1 OCHRANA BETONU UZAVÍRACÍMI NÁTĚRY.....	47
5.2.1.1 VLASTNOSTI UZAVÍRACÍCH NÁTĚRŮ	48

B. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	49
6 METODIKA ŘEŠENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	49
6.1 VSTUPNÍ SUROVINY PRO VÝROBU BETONU.....	51
6.1.1 KAMENIVO	51
6.1.2 CEMENT	52
6.1.3 VODA.....	53
6.1.4 PŘÍSADY	53
6.1.5 PŘÍMĚSI	53
6.1.6 UZAVÍRACÍ NÁTĚRY	53
6.2 SLOŽENÍ MALT.....	54
7 PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY VLASTNOSTÍ	56
7.1 ZKOUŠKY V ČERSTVÉM STAVU	56
7.2 ZKOUŠKY VE ZTVRDLÉM STAVU	57
8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	67
8.1 ZKOUŠKY V ČERSTVÉM STAVU	67
8.2 ZKOUŠKY VE ZTVRDLÉM STAVU	68
8.3 STANOVENÍ NASÁKAVOSTI VLIVEM KAPILARITY	71
8.4 STANOVENÍ CELKOVÉ NASÁKAVOSTI.....	72
8.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK	73
8.6 STANOVENÍ ODOLNOSTI MALT PROTI PŮSOBENÍ MRAZU A SILÁŽNÍCH ŠŤÁV	76
8.7 STANOVENÍ ODOLNOSTI MALT PROTI PŮSOBENÍ MRAZU A ROZTOKU Kyseliny chlorovodíkové (nízké pH)	79
8.8 STANOVENÍ VZDUCHOVÉ PROPUSTNOSTI - TORRENT	81
8.9 STANOVENÍ PEVNOSTNÍCH CHARAKTERISTIK NA VZORCÍCH ULOŽENÝCH 150 DNÍ V CHEMICKY AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ.....	83
8.9.1 VÝSLEDKY VZORKŮ BEZ NÁTĚRU	83

8.9.2 VÝSLEDKY VZORKŮ S HYDROFOBIZAČNÍM NÁTĚREM OD SPOLEČNOSTI MAPEI	85
8.9.3 VÝSLEDKY VZORKŮ S NÁTĚREM LITHNÝM VODNÍM SKLEM	88
8.10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVOU METODOU .	89
8.10.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ Z PROSTŘEDÍ SILÁŽNÍCH ŠTÁV ...	89
8.10.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ Z PROSTŘEDÍ NÍZKÉHO pH.....	94
8.11 VIZUÁLNÍ ZHODNOCENÍ VZORKŮ	98
8.12 STANOVENÍ pH VE VÝLUHU	100
8.13 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA.....	101
8.14 SNÍMKY Z ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU	103
9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	104
10 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ	106
ZÁVĚR	110
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	113
SEZNAM OBRÁZKŮ	119
SEZNAM TABULEK	121
SEZNAM GRAFŮ	122
SEZNAM PŘÍLOH	124

ÚVOD

Beton je univerzální stavební materiál, který se používá pro nosné i nenosné konstrukce. Díky jeho velice dobrým vlastnostem, vysoké životnosti a poměrně malým nárokům na ošetřování se používá i pro velmi namáhané konstrukce.

Beton je kompozitní stavební materiál, který se skládá ze směsi kameniva cementu a vody. Jako další suroviny se používají různé druhy přísad a příměsí, kterými lze u betonu dosáhnout lepších konečných vlastností.

Za předpokladu odborného zpracování a správných poměrů použitých surovin je beton materiálem, který má vynikající odolnost proti škodlivým vlivům. I přes tyto skutečnosti však dochází k jeho degradaci, zejména vlivem vlhkosti. Voda je reakčním médiem destruktivních fyzikálních a chemických procesů, které se významně podílejí na znehodnocování betonových konstrukcí.

V posledních letech dochází k výraznému zvýšení produkce betonů pro zemědělské stavby. Jedná se o různé druhy hospodářských staveb, jako jsou například bioplynové stanice, silážní žlaby a budovy pro ustájení a chov dobytka. Betony v těchto konstrukcích jsou vystaveny vysoké chemické zátěži, která odpovídá stupni vlivu prostředí XA3. Jedná se zejména o dlouhodobé působení kontaminovaných vod, močůvky či silážních šťáv, které mívají velmi nízké pH.

Z těchto důvodů se v současné době stále více rozšiřuje výzkum této problematiky a je snaha o vyvinutí co nejodolnějších betonů vůči chemicky agresivnímu prostředí. K tomu se využívá různých druhů a kombinací přísad a příměsí, případně uzavíracích nátěrů.

CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo shrnutí poznatků o trvanlivosti betonu vystaveného účinkům vysoce chemicky agresivního prostředí v zemědělství a studium poznatků o návrhu a složení betonu pro konstrukce exploatované v tomto prostředí. Důraz byl kladen na posouzení odolnosti vůči různým druhům chemické agresivity a možnosti, jak tuto odolnost zvyšovat. Předmětem teoretické části práce byl popis vstupních surovin, zejména přísad a příměsí s ohledem na trvanlivost betonu a shrnutí znalostí o působení chemicky agresivního prostředí. Součástí byl také popis primární a sekundární ochrany a popis budov exploatovaných v chemicky agresivním prostředí.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo studium vlastností betonu, které byly vystaveny působení vysoce chemicky agresivního prostředí. Zkoušky byly prováděny na cementových maltách, kde byl sledován vliv účinků různých druhů přísad, příměsí a uzavíracích nátěrů na odolnost proti chemické agresivitě. V rámci experimentu byl proveden soubor zkoušek, které byly následně vyhodnoceny a na závěr byl posouzen případný ekonomický přínos pro stavební praxi.

A. TEORETICKÁ ČÁST

1 SUROVINY PRO VÝROBU BETONU S OHLEDEM NA TRVANLIVOST

1.1 KAMENIVO

Kamenivo je zrnitý, sypký a anorganický materiál s maximální velikostí zrna 63 mm, který v betonu slouží jako plnivo. Zastupuje 70 - 80 % celkového objemu betonu a propůjčuje mu lepší objemovou stálost a trvanlivost. Zrna kameniva spolu s cementovým tmelem vytváří po zatvrdnutí pevnou matici, která odolává tlakovým napětím. [1]

Vlastnosti použitého kameniva výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti betonu ve ztuhlém stavu. Velmi důležité je sledovat obsah nežádoucích látek, kterými jsou: chloridy, sírany, reaktivní silika (z důvodu alkalicko-křemičité reakce) a obsah jemných jílových a humusových podílů. [2]

Mezi nejčastější způsoby dělení kameniva patří podle:

- původu - přírodní, umělé a recyklované,
- způsobu vzniku - těžené, drcené a těžené předrcené,
- objemové hmotnosti - pórovité (do $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), hutné ($2000 - 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a těžké (nad $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- velikosti zrn - drobné (s maximálním zrnem do velikosti 4 mm) a hrubé (velikost zrn od 4 do 63 mm).

Na základě velikosti zrna je kamenivo tříděno do frakcí. Pojmem frakce se rozumí rozdělení kameniva podle velikosti od dolního (d) a horního (D) síta. Frakce je tedy množství zrn kameniva, které propadne horním sítem a zachytí se na spodním sítu. Velikostní rozmezí se zapisuje ve formě d/D. Frakce se dále dělí na širokou a úzkou, široká je definována poměrem otvorů D/d větší než 2 (například 0/4, 4/16, 8/22, 0/32, 0/64) a úzká je vymezena síty s poměrem otvorů menším nebo rovným 2 (například 0/2, 2/4, 4/8, 8/16, 11/22, 32/63). [3]

Zrnitost, respektive křivka zrnitosti, která znázorňuje zastoupení jednotlivých frakcí kameniva, je pro výslednou pevnost, spotřebu cementu a dobrou zpracovatelnost betonu velmi důležitá. Plynulé křivky zrnitosti se vypočítají dle vzorců:

- Vzorec pro výpočet křivky zrnitosti dle Fullera:

$$y = \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \cdot 100 \quad [\%]$$

- Vzorec pro výpočet křivky zrnitosti EMPA I:

$$y = 50 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right) \quad [\%]$$

- Vzorec pro výpočet křivky zrnitosti EMPA II:

$$y = 20 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + 4 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right) \quad [\%]$$

1.2 CEMENT

Cement je v dnešní době hlavní pojivovou složkou většiny betonových a maltových směsí. Hydraulické pojivo, to je jemně mletý anorganický materiál, které po smíchání s vodou tvoří pastu, která tuhne a tvrdne na základě hydratačních procesů a reakcí i pod vodou. [4]

Cement, je schopen, pokud je smíchán s vodou a kamenivem, vytvořit betony či malty, které mají dostatečnou dobu zpracovatelnosti a po daných časových úsecích nabývají vysokých pevností. Zároveň jsou dlouhodobě objemově stálé.

Cement jako takový, se skládá z několika složek. Hlavní složkou je portlandský slínek v kombinaci se sloučeninami síranu vápenatého, které v cementu působí jako regulátor (zpomalovač) tuhnutí. Bez těchto sloučenin by cement po smíchání s vodou zatuhl během několika sekund až minut. Může obsahovat také příměsi, které upravují některé jeho vlastnosti. Mezi tyto příměsi patří například vysokopecní struska, popílek, vápenec, či křemičitý úlet. Množství těchto surovin ovlivňuje různé výsledné vlastnosti ztvrdlé hmoty jako je například pevnost nebo rychlost vývinu hydratačního tepla. Na základě poměru těchto složek vzhledem k portlandskému slínku se cementy rozdělují na různé druhy. [5]

V současnosti se vyrábí a používá 5 druhů cementu. Tyto druhy se od sebe liší v závislosti na množství jednotlivých vstupních složek, ze kterých je cement tvořen. Dle ČSN EN 197 - 1, Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití se cementy označují velkými písmeny CEM a každý druh je označován římskou číslicí I až V a to:

- CEM I portlandský cement,
- CEM II portlandský cement směsný,
- CEM III vysokopecní cement,

- CEM IV pucolánový cement,
- CEM V směsný cement. [4]

V případě, že cement obsahuje kromě portlandského slínku ještě další příměsi, je k označení přidáno písmeno, které označuje druh dané složky: portlandský slínek (K), vysokopeční struska (S), popílek křemičitý (V), popílek vápenatý (W), kalcinování břidlice (T), vápenec (L, LL), křemičitý úlet (D), pucolány přírodní (P), pucolány kalcinované (Q). [2] [4]

Množství jednotlivých složek je udáváno evropskou normou ČSN EN 197-1, ve které jsou uvedeny všechny druhy cementů a jejich složení popsány v přehledné tabulce. [4]

Každý typ cementu může být výrobcem dodáván v následujících třídách pevnosti: 32,5N, 32,5R, 42,5N, 42,5R, 52,5N a 52,5R. Označení určuje minimální tlakovou pevnost cementové malty, která je vyjádřena v MPa. Pevnost se zjišťuje na trámečcích ve stáří 28 dní. [2]

1.3 VODA

Voda společně s cementem a kamenivem tvoří jednu ze tří hlavních složek při výrobě betonu a malt. Díky vodě, která se rozmísí s použitým pojivem je možné, aby cement hydratoval, vytvrdnul a výsledný beton tak získal své charakteristické vlastnosti. Ovšem ani přebytek vody není žádaný, jelikož způsobuje zhoršení kvality betonu z hlediska pevností a trvanlivosti. Přídavek vody nám může pomoci například pro zlepšení zpracovatelnosti, to je výhodné při ukládání betonu. [2]

Ve skutečnosti nesnižuje pevnosti a trvanlivost betonu přídavek vody, ale vysoký vodní součinitel (w/c , w - hmotnost vody, c - hmotnost cementu). Z toho vyplývá, že pokud chceme zlepšit zpracovatelnost přidáním vody, je potřeba současně zvyšovat i dávku cementu, aby se nezměnil výsledný vodní součinitel. [2]

Požadavky na vodu udává norma ČSN EN 1008, Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. [6]

Technologicky se voda rozděluje na záměsovou a ošetřovací. Záměsová voda se dává při mísení čerstvého betonu a ošetřovací voda se dodává po zatuhnutí betonu po dobu několika dnů pro udržení betonu ve vlhkém stavu. Vhodnost vody pro výrobu betonu závisí na jejím zdroji a z toho vyplývá její použitelnost. [7]

Zdroje vody používané do betonu mohou být:

- pitná voda - použitelná bez dalšího zkoušení,
- přírodní a povrchová voda - musí být vyzkoušená před jejím použitím,
- průmyslová odpadní voda - lze ji použít, ale musí splňovat určitá kritéria, která se kontrolují před jejím použitím,
- recyklovaná voda - používá se v uzavřeném technologickém cyklu při výrobě transportbetonu, denně se musí měřit její hustota, která nesmí přesahovat hodnotu $1010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Recyklovanou vodu nelze použít jako záměsovou pro stupně vlivu prostředí XF1 - XF4 a XA1 - XA3,
- mořská voda - použitelná pro prostý beton, ale pro vyztužený beton vhodná není z důvodu vysokého obsahu chloridových iontů, které způsobují korozi výztuže,
- splašková voda - do betonů se nesmí používat. [7]

1.4 PŘÍMĚSI

Příměsi jsou obvykle práškovité látky anorganického původu, které se přidávají do čerstvého betonu s cílem zlepšit jeho vlastnosti, a to jak v čerstvém, tak i ztuhlém stavu. Tyto látky obsahují zrna o maximální velikosti do 0,125 mm (zhruba o velikosti zrn cementu) a disponují velkým měrným povrchem. Z velké části jde o odpady zpracováváné ve stavebnictví, což se odráží na jejich ceně, která je ve většině případů nižší, než je cena cementu. Zároveň dochází ke snižování energetické náročnosti, která je spojená s výrobou cementu, což má pozitivní vliv na ekologii. Dle ČSN EN 206+A1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda se příměsi dělí na dva typy: [7] [8]

- **TYP I - téměř inertní příměsi**

Tento typ příměsí se do betonu přidává primárně pro dosažení hutnější struktury a pro vylepšení reologických vlastností, zejména u čerpatelného betonu. Inertní příměsi nejsou schopny díky svému chemickému složení tuhnout či tvrdnout, a to ani za přítomnosti budičů. Jejich funkce je zejména zvýšit hutnost struktury betonu, to znamená co nejvíce snížit obsah vzduchových pórů. Dále pak zvýšit množství jemné cementové malty, což je také důležitý faktor u již zmíněného čerpatelného betonu. V neposlední řadě se jedná o změnu barvy betonu, pomocí kamenné moučky či pigmentů. [9] [10]

- **TYP II - aktivní příměsi**

Tyto látky se díky svému chemickému složení aktivně podílí na růstu pevnosti cementového tmele. Podle způsobu působení se dělí na latentně hydraulické a pucolánové látky. Latentně hydraulické příměsi získávají své vlastnosti pomocí tzv. budičů (iniciátorů - cement, vápno, NaOH, CaSO₄, Na₂SO₄ a další). Dle povahy se budiče rozdělují na alkalické (pH > 7) a síranové, které mají za následek tvorbu ettringitu. Mezi latentně hydraulické látky patří zejména vysokopecní jemně mletá struska. [9] [10]

Pucolánové látky obsahují aktivní SiO₂ (rozpuštěný v alkalickém i v kyselém prostředí), který následně reaguje s portlanditem Ca(OH)₂. Ten má ve vlhkém prostředí za normální teploty hydraulické vlastnosti a vede ke vzniku C-S-H gelu. Toto chování se označuje jako pucolánová aktivita. Pucolánová aktivita je za normální pokojové teploty velmi pomalá reakce, která může trvat až několik měsíců. Velký vliv na rychlost reakce má zejména jemnost mletí pucolánů, tedy obsah amorfni fáze. Čím větší je obsah skelné fáze, tím reakce s vápnem probíhá rychleji. Bylo prokázáno, že během hydratace portlandského cementu se uvolňuje velké množství vápna jako výsledek reakce C₃S a C₂S. Vzniklý portlandit Ca(OH)₂ má velmi malý vliv na výsledné pevnosti cementové pasty a může způsobovat problémy s trvanlivostí betonu. Při použití pucolánů v omezeném množství (20 - 30 % z hmotnosti cementu), může teoreticky dojít k postupnému vyvázání vápna, které vzniká při hydrataci portlandského cementu, do C-S-H gelu. [2] [9]

Dle původu se aktivní příměsi dělí na přírodní (tufy, trasy, křemelina) a umělé (mikrosilika, vysokopecní popílký, jemně mletý cihlářský stěp).

V následující části diplomové práce budou podrobněji popsány příměsi, které díky svým vlastnostem zlepšují odolnost betonu a dále se s nimi pracovalo v experimentální části.

1.4.1 KŘEMIČITÉ ÚLETY (MIKROSILIKA)

Mikrosilika byla poprvé v betonu odzkoušena na počátku 50. let v Norsku. Její aplikace dokázala zlepšení zejména pevností a chemické odolnosti. [11]

Obecně lze říct, že se jedná o kondenzáty křemičitých par velmi jemné amorfni struktury. Křemičité úlety se nevyrábí záměrně, ale vznikají jako odpad v hutnických provozech při výrobě prvkového křemíku nebo jako vedlejší produkt při výrobě ferrosilicia (přísad pro legování oceli). Hlavní vstupním materiálem,

který je bohatý na křemík je obvykle křemičitý písek, dále pak ruda, uhlí a dřevěné štěpky. Směs se taví v elektrické odporové peci při teplotách nad 2000 °C, přičemž dochází k odpařování SiO_2 . Následně křemičité páry kondenzují na chladných kondenzátorech, kde tetraedry SiO_2 nejsou schopny díky velmi rychlé kondenzaci vytvořit krystalickou siliku. Složení taveniny se liší dle typu legovacích přísad

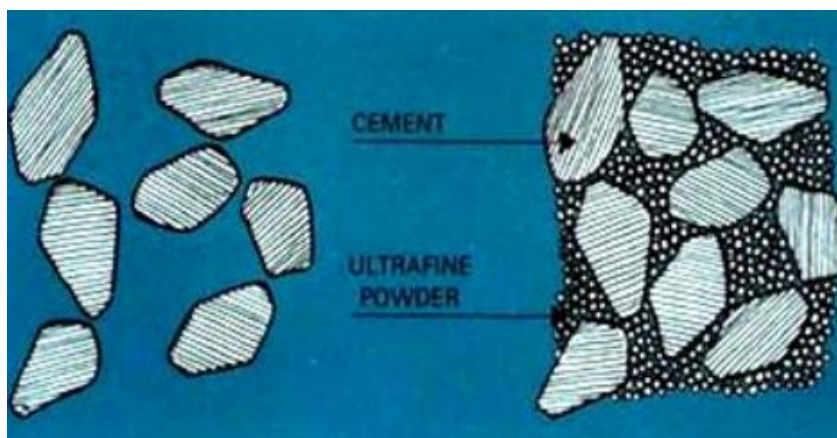
a teploty tavení. [12] [13]

Mikrosilika obsahuje 80 až 98 % amorfního SiO_2 . Tvar zrn je kulový, šedé barvy o průměru 0,1 až 0,2 μm (zrna cementu jsou zhruba 100krát větší). Měrný povrch je 15 000 až 25 000 m^2/kg a měrná hmotnost zhruba 2120 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Velký důraz musí být kladen na skladování, jelikož za přítomnosti zvýšené vlhkosti dochází k postupné hydrataci, při které ztrácí mikrosilika svou reakční schopnost. [14] [13]

Funkce mikrosiliky v betonu:

- vyplnění prostoru mezi zrny cementu (snížení pórovitosti)
- reakce aktivního SiO_2 s volným CaO v cementu

Mikrosilika díky své jemnosti vyplňuje v betonu prázdný prostor mezi zrny cementu a snižuje tak pórovitost celého cementového kamene (zvyšuje jeho hutnost). Zrna mikrosiliky obklopují zrno cementu, což vede ke zvýšení vnitřních povrchových sil a následnému zpevnění tranzitních zón na povrchu kameniva, to zlepšuje celkovou kohezi směsi. Lepší koheze omezuje tzv. stěnový efekt, který je nejčastěji příčinou deformace betonu při pevnostních zkouškách. Zároveň je beton tužší, což má negativní důsledky při ukládání betonu. Z tohoto důvodu by měla být mikrosilika dávkována spolu s plastifikačními nebo superplastifikačními přísadami. [2] [12]



Obrázek 1 - Schéma vyplnění mezer mikrosilikou mezi zrny cementu [13]

V čerstvém betonu má mikrosilika vliv na zpracovatelnost, zamezuje odloučení vody z betonu (bleedingu) a segregaci kameniva. Ve ztvrdlém stavu má podíl zejména na zvýšení konečných pevností, vodotěsnosti, trvanlivosti, mrazuvzdornosti a snížení roztažnosti při alkalicko-křemičité reakci kameniva. Nevýhodou použití mikrosiliky je vysoká pořizovací cena.

1.4.2 ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK

Popílek vzniká jako vedlejší energetický produkt v elektrárnách při spalování uhlí v práškovém stavu a je zachycován v odlučovačích, aby se nedostal do ovzduší. Kvalitu popílku ovlivňuje druh páleného uhlí, technologie spalování a způsob zachytávání. Pro použití do betonu jsou vhodnější popílký ze spalování černého uhlí (v ČR až 80 % popílků z hnědého uhlí). Dle teploty spalování se popílký dělí na vysokoteplotní a fluidní. Fluidní jsou nevhodné jako příměs do betonu z důvodu vysokého obsahu SO^{3-} . [15] [7]

Z mineralogického hlediska tvoří popílek zejména β - křemen a mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Chemicky se skládá zejména z SiO_2 (obsah sklovité fáze vyšší jak 50 %), Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO v omezeném množství, což se projevuje jeho pucolánovou povahou. Pucolanita se projevuje velmi pomalu a prakticky se projevuje až za 90 dní (doba ukončení pucolánové reakce dle studií přesahuje v některých případech i několik let). [15]

Zrnitost popílků je závislá na druhu použitých odlučovačů, v mechanických odlučovačích vzniká popílek hrubší (velikost zrn $> 0,09$ mm nad 20 %, sytná hmotnost $900 - 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), než z elektrostatických odlučovačů (obsah zrn $> 0,09$ mm do 20 %, sytná hmotnost okolo $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). [15]

Popílek má proměnlivé vlastnosti a musí se pravidelně kontrolovat, aby nedocházelo při jeho použití k degradaci betonu. Požadavky na popílký jsou popsány v normě ČSN EN 450 - 1+A1, Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Patří mezi ně například obsah volného CaO (max. 2,5 % z hmotnosti popílku), který způsobuje objemové změny. Maximální obsah SO^{3-} (3 % z hmotnosti popílku) a Cl^- (1 % z hmotnosti popílku), které by při překročení limitních hodnot mohli způsobovat korozi výztuže. [15] [16]

Použitím popílku do betonu se v čerstvém stavu zlepšuje jeho zpracovatelnost, hutnost cementové matrice a reologie. S vysokou dávkou křemičité složky se snižuje vývin hydratačního tepla v betonu. Ve ztvrdlém stavu je

beton odolnější vůči agresivnímu prostředí, díky zvýšenému obsahu C-S-H gelu a vykazuje vyšší dlouhodobé pevnosti. [15]

1.4.3 VYSOKOPECNÍ STRUSKA

Struska vzniká jako vedlejší produkt při výrobě železa ve vysokých pecích. Roztavená struska, která je odkloněná z vysoké pece se rychle zchladí a zůstane tak ve sklovité fázi, která má latentně hydraulické vlastnosti. Po ochlazení se struska rozemele, jemnost mletí je podobná jako u cementu (měrný povrch okolo 350 m²/kg). Z chemického hlediska se struska skládá z 30 - 50 % CaO, 30 - 43 % SiO₂, 5 - 18 % Al₂O₃ a 1 - 15 % MgO. [17]

Použitelnost strusky nám udává modul zásaditosti, který se vypočítá dle vztahu:

$$M = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} > 1$$

Pokud je výsledný modul zásaditosti $M_z > 1$, je struska vhodná jako aktivní příměs do betonu. Za předpokladu, že M_z vyjde < 1 lze strusku použít pouze jako kamenivo, protože je příliš kyselá.

Při vhodné aktivaci vykazuje struska dobré hydraulické vlastnosti. Aktivace může probíhat pomocí portlanditu, vodního skla nebo hydroxidu sodného. V závislosti na použitém budiči vzniká při hydrataci C-S-H a C-A-S-H gel. Ve výsledku vzniká velmi pevný materiál s hutnou mikrostrukturou, který je odolný proti působení agresivního prostředí. Jako nevýhoda použití strusky, se dle studií uvádí, že negativně ovlivňuje rychlost některých reakcí, například tuhnutí betonu. [9]

Požadavky na strusku udává norma ČSN EN 15167 - 1, Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. [18]

1.5 PŘÍSAKY

Beton, jako stavební materiál, nemá vždy dokonalé vlastnosti a použitelnost v každém prostředí a za každé situace a je potřeba jeho vlastnosti upravovat. Zlepšení celkových vlastností lze dosáhnout především vhodným návrhem složení pro danou aplikaci, či právě použitím přísad, které jsou schopny dále upravovat vlastnosti betonů a malt v čerstvém a ztvrdlém stavu. [19]

V současné době se již téměř nevyrábějí betony, ve kterých by nebyla použita alespoň jedna přísada ovlivňující některou jeho vlastnost. Dokonce se uvádí, že více než 85 % vyrobených betonů, obsahuje alespoň jednu z přísad, což potvrzují studie využití přísad do betonu. [19]

Dle ČSN EN 934 - 2+A1, Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem jsou přísady materiálem, který se do betonu přidává během míchání v množství do 5,0 % z množství cementu a který umožňuje úpravu vlastností směsi v čerstvém i ztvrdlém stavu. [20]

Přísady jsou nejčastěji uměle vyrobené chemické látky, které určitým způsobem ovlivňují chování hmoty betonu či malty a obvykle se dávkuje v rozmezí 0,1 - 2,0 % z množství pojiva. Již v takto nízkých dávkách ovlivňují chování betonu zásadním způsobem. Upravují vlastnosti jako jsou například zpracovatelnost, či zrychlování nebo zpomalování procesu tuhnutí a tvrdnutí. [7] [19]

Přísady, které se v praxi běžně používají jsou popsány evropskou normou ČSN EN 934 - 2+A1. Běžně používané přísady jsou následující: přísada urychlující tuhnutí, přísada urychlující tvrdnutí, přísada zpomalující tuhnutí, provzdušňovací přísada, stabilizační přísada, těsnící přísada, přísada upravující viskozitu, vodoredukující plastifikační přísada, silně vodoredukující/super plastifikační přísada. [20]

1.5.1 PLASTIFIKAČNÍ A SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADY

Problémem při výrobě betonů a malt je hranice, kdy je dosaženo ideálního poměru mezi množstvím záměsové vody a množstvím použitého pojiva. Tento poměr je označován jako vodní součinitel, který se při výrobě běžných betonů pohybuje v rozmezí od 0,40 do 0,60. Přebytečná voda, která není využita pro ovlhčení zrn pojiva a plniva výrazným způsobem ovlivňuje pevnost výsledného betonu. V roce 1949 publikoval americký chemik Treval Clifford Powers práci, ve které uvádí, že teoretický minimální vodní součinitel pro ovlhčení všech zrn cementu je 0,26. V praxi je zcela nemožné dosáhnout vhodné zpracovatelnosti při takto nízkém vodním součiniteli. Směs je sypká a nelze provést dokonalé zhuštění a zaplnění struktury. [5] [21]

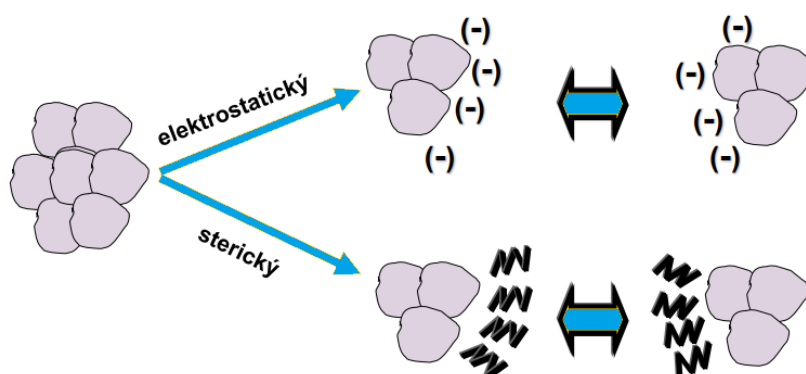
Důvodem, proč je nutno použít větší vodní součinitel, než je takzvaný teoretický vodní součinitel, je zejména problém se shlukováním zrn cementu.

Shlukování je způsobeno elektrostatickými jevy na površích cementových zrn, kdy jsou zrna cementu při jeho výrobě staticky nabitá a mají tendenci se shlukovat. Díky těmto shlukům, ve kterých je záměsová voda uzavřena, se směs jeví jako málo vlhká, to vede k dalšímu přidávání záměsové vody, což má za následek další snižování pevností ztvrdlého betonu. [22]

Použitím plastifikačních přísad lze výrazně snížit množství záměsové vody při zachování zpracovatelnosti čerstvého betonu a tím dosáhnout vyšších pevností. Zároveň se snižuje obsah cementu, výskyt smršťovacích trhlin a dotvarování betonu. V neposlední řadě se zvyšuje hutnost betonu a tím se beton stává odolnější proti působení okolních vlivů. Dle ČSN EN 934 - 3 + A1 se plastifikační přísady dělí dle jejich schopnosti redukovat množství záměsové vody při zachování stejných reologických vlastností. Základní rozdělení je na plastifikační, superplastifikační a v dnešní době se již také začínají objevovat takzvané hyperplastifikační přísady. [20] [22]

Rozdíl mezi plastifikačními a superplastifikačními přísadami je v množství vody, které dokážou zredukovat. Plastifikační přísady redukují vodu minimálně o 10 procent, superplastifikační minimálně o 22 procent. U superplastifikačních přísad se může dosáhnout hodnoty až 35 procent redukce vody. [23]

Samotné fungování těchto přísad je založeno na dvou principech, a to na elektrostatickém odpuzování a sterickém odpuzování. Principy jsou znázorněny v následujícím obrázku 2.



Obrázek 2 - Princip elektrostatického a sterického odpuzování částic [23]

ROZDĚLENÍ PŘÍRAD Z CHEMICKÉHO HLEDISKA:

- Lignosulfonany (LS) - soli či deriváty lignosulfonanů, které se vyrábí z odpadů při výrobě celulózy. Mají tmavohnědou barvu a jsou charakteristické svým dehtovým zápachem. Tyto látky dokážou redukovat potřebu záměsové vody maximálně o 15 % a dávkují se okolo 0,4 % z hmotnosti cementu. Jejich cena je velice příznivá, zhruba 10 Kč/kg. Lignosulfonany mají retardující účinky (zpomalují tuhnutí), proto se hodí pro letní betonáže. Zároveň jsou velice náchylné na předávkování. [23]
- Naftalensulfonáty (SNF) - sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty. Účinnost těchto látek je až 22 % a dávkují se v množství okolo 0,8 % z hmotnosti cementu. Tyto přísady mají velice dobré vlastnosti, jelikož nezpomalují ani neurychlují tuhnutí betonu a jejich použitím je možné do určité míry ovlivnit bleeding (krvácení) betonu. Nejsou náchylné na nepřesnosti v dávkování. [23]
- Melaminformaldehydy (SMF) - sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty, při jejichž použití je možné dosáhnout redukce záměsové vody až o 25 % a jejich dávkování se pohybuje rozmezí 0,9 až 1,3 % z hmotnosti cementu. Cena těchto plastifikátorů je poměrně vysoká, zhruba 35 Kč/kg, při této ceně a poměrně vysokému dávkování je jejich použití neekonomické a je velice omezeno. [23]
- Polykarboxyláty (PC, PCE) - polykarboxyláty, respektive polykarboxylethery. Díky těmto přísadám je možné redukovat množství záměsové vody až o 40 %. Dávkují se v rozmezí od 0,8 - 1,5 % z hmotnosti cementu. Cena těchto přísad bývala dříve poměrně vysoká, v dnešní době je však již přijatelná a jsou ekonomicky dostupné. [23]

Mezi výhodu těchto superplastifikačních přísad patří možnost upravovat jejich molekulární podobu. To znamená, že lze upravovat délky hlavního a postranních řetězců molekuly přísad a tím měnit jejich účinnost. V případě, že je hlavní řetězec dlouhý a postranní řetězce krátké, je docíleno rychlého nárůstu počátečních pevností a zkrácení doby zpracovatelnosti čerstvého betonu. Naopak je-li hlavní řetězec krátký a postranní řetězce dlouhé, je docíleno pomalého nárůstu pevností a tím i prodloužení doby zpracovatelnosti. Úpravami těchto řetězců se dají vyrobit plastifikační přísady potřebné přímo na konkrétní situaci využití. [23]

1.5.2 PROVZDUŠŇOVACÍ PŘÍSADY

Běžný neprovzdušněný beton obsahuje zhruba 2 % vzduchu. Tato hodnota provzdušnění nepřispívá ke zvýšení trvanlivosti betonu, protože póry nemají vyhovující velikost a rozložení. Aby byl beton chráněn, je potřeba vytvořit strukturu účinných pórů, které zvýší odolnost proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Potřebné jsou póry o účinných rozměrech a vhodném prostorovém rozložení. Pro vytvoření zvýšeného obsahu pórů se používají provzdušňovací přísady, které po zamíchání do betonu vytváří systém bublinek. Ve ztuhlém betonu po vzduchových bublinkách zůstávají mikropóry, které přerušují systém kapilárních pórů, tím se snižuje průnik vody do struktury betonu a zároveň se může mrznoucí voda v betonu bez následků rozpínat. Zvyšuje se tak odolnost betonu. Z chemického pohledu jsou provzdušňovací přísady na bázi syntetických a přírodních tenzidů. [7] Konkrétně se jedná o:

- soli dřevěných pryskyřic,
- syntetické detergenty,
- soli sulfonovaných ligninů,
- soli proteinových látek,
- mastné a pryskyřičné kyseliny a jejich soli,
- organické soli sulfonovaných uhlovodíků.

Provzdušňovací přísady nezvyšují pouze obsah vzduchu, ale mají vliv i na ostatní vlastnosti betonu. U betonu v čerstvém stavu zlepšují zpracovatelnost, čerpatelnost a stabilitu (snižují bleeding – tzv. krvácení betonu). Ve ztuhlém stavu zlepšují zejména mrazuvzdornost, odolnost proti průsaku tlakovou vodou a trvanlivost. Udává se, že 1 % vzduchu ve ztuhlém betonu snižuje jeho pevnost v tlaku o 3 - 5 %, tento jev je však redukován přidavkem plastifikačních respektive superplastifikačních přísad. [24]

Požadavky na pórovitost u provzdušněných betonů jsou následující:

- obsahu vzduchu v betonu 4 - 6 %,
- průměr pórů 0,025 - 0,3 mm,
- součinitel prostorového rozložení pórů $L < 0,200$ mm.

1.5.3 TĚSNÍCÍ PŘÍSADY

1.5.3.1 KRYSTALIZAČNÍ LÁTKY

Koncem 60. let 20. století vznikla v Kanadě přísada, která má vyřešit problém s pronikáním vody a agresivních látek do betonu – krystalizační přísada. V dalších letech se tato přísada dále vyvíjela a zdokonalovala a pomalu rozšiřovala do zbytku světa (u nás až počátkem 90. let 20. století). Dnes již existuje řada výrobců těchto přísad a její vlastnosti se běžně využívají při výstavbě po celém světě.

Krystalizační přísady jsou práškovité látky v odstínech šedé barvy vyráběné zpravidla z jemně mletého portlandského cementu, který představuje většinový podíl směsi 80 – 90 %. Dále z hydroxidu vápenatého s podílem na složení 10 –20 %, přispívající ke zvýšení odolnosti proti chemickým vlivům pomocí zvyšování alkalického prostředí. Dalšími složkami je jemný křemičitý písek a redukční činidlo. Zbylé prvky jsou takzvané aktivní chemikálie, které mají zapříčinit proces sekundární krystalizace pomocí hydratace slinkových minerálů v cementovém tmelu. [25]

Krystalizace je chemická (katalytická) reakce, kdy dochází k růstu krystalků a vytváření pravidelné struktury. V pórovém systému betonových konstrukcí případně v jejich trhlinách dochází k tzv. sekundární krystalizaci. K tomuto procesu dochází v případě, že na konstrukci působí voda, která je k vyvolání této chemické reakce nezbytně nutná. V konstrukci poté dochází k tomu, že čím více se voda snaží konstrukci prosakovat, tím více póry prorůstají krystalky a vodě je tak zabráněno pronikat dál. Po vyvázání vody z kapilár se růst krystalků zastaví. Produktem krystalizace je tedy sekundárně narostlý krystal v kapilárních pórech, který v budoucnu může sloužit k zabránění transportu vody pórovým systémem. V případě, že není zajištěno dostatečné množství vody, krystalizace neproběhne v plné míře a má pouze omezenou funkci. Z tohoto důvodu je důležité u těchto druhů betonů dbát na správné ošetřování v době tuhnutí a tvrdnutí betonu. Především v prvních dnech nesmí dojít k vysychání betonu. Je tedy zapotřebí ho několikrát denně vlhčit. [25]

Kompletní proces probíhá v celém objemu nikoliv pouze na povrchu (i v případě aplikace formou nátěru nebo nástřiku). V případě aplikace krystalizačního materiálu ve formě přísady dochází k započetí procesu až s určitým zpožděním, neboť je zapotřebí, aby primárně vznikla struktura

cementové matrice. Beton si zachovává svou paropropustnost i po vytvoření krystalků. [25]

Krystalizace může být ovlivněna několika faktory. Jak je uvedeno výše, na krystalizaci má dopad zejména množství vody, které na konstrukci působí. Dále záleží na pórovitosti cementového kamene, správném použití a aplikaci krystalizační přísady dle technologických listů. Samozřejmostí je i vliv okolního prostředí především teploty, která by v průběhu krystalizace neměla klesnout pod +5°C. [25]

Způsoby aplikace:

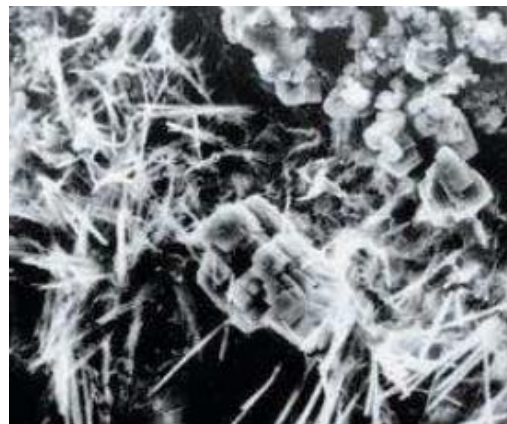
- **aplikace na povrch betonové konstrukce (nátěr, nástřik)** - jedná se o nejrozšířenější postup, je nejvýhodnější pro sanační práce na starších betonových konstrukcích zatížených vlhkostí. Aplikace je též možná na zděné konstrukce opatřené cementovou omítkou. Stáří konstrukce není podstatné, musí se jen prověřit její současný technický stav. To znamená, aby konstrukce měla spojitý povrch a dostatečnou soudržnost a pevnost. Po vyhodnocení podmínek, lze přistoupit k aplikaci krystalizační vrstvy. Aplikace krystalické impregnace ve formě nátěru na čistý a napřed navlhčený povrch umožní, že reaktivní chemické složky pronikají do struktury betonu a jako migrační roztok využívají vodu. Při pronikání těchto chemických látek přes kapiláry a póry dochází k chemické reakci s vedlejšími anorganickými produkty hydratace cementu a vzniká krystalizační struktura, která vyplní póry a trhliny v betonu. Impregnaci lze aplikovat pomocí štětce nebo stříkacím zařízením. Při aplikaci je důležité věnovat pozornost podmínkám, při kterých se aplikace provádí (příprava povrchu, zvlhčování povrchu, hloubce nátěru a času ošetření nátěru). [25]
- **přimíchání krystalizační látky ve formě příměsi přímo do betonu při výrobě** - přidáním krystalické látky do čerstvého betonu při procesu míchání ve výrobě, nebo přímo do autodomíchávače na stavbě zaručuje, že krystalizace proběhne rovnoměrně v celé konstrukci. Použitím této technologie se aktivují stejné chemické procesy jako při aplikaci nátěru, ale snižují se náklady, jelikož odpadá práce s povrchovým ošetřením jako u aplikace nátěrem. Ve většině případů je dávkování v množství 1 - 3 % z hmotnosti cementu. [25]

- **vsyp na čerstvý povrch betonu** - krystalickou impregnací je též možné aplikovat metodou suchého posypu. Povrch betonu se pomocí mechanického rozprašovače posype krystalizační látkou a ta se zapracuje do povrchu během finálního procesu úpravy betonu pomocí rotačních hladíček. Tato metoda je použitelná pouze u vodorovných konstrukcí. Zároveň slouží v betonu i pro zvýšení odolnosti proti skluzu. [25]
- **injektáže do zdiva** - tato metoda je navržena tak, že se do zdiva navrtají ve stanovených roztečích otvory, které se naplní řídkým cementovým mlékem a po jeho vytvrdnutí se do otvorů aplikuje směs krystalizační látky a vody.
- **jednosložkové ucpávky** - zabraňuje lokálním průsakům vody trhlinami v betonové konstrukci během jedné až dvou minut. Používá se vždy v kombinaci s krystalizačním nátěrem. [25]

Na obrázku 3 je znázorněna struktura neošetřeného betonu a na obrázku 4 je uvedena struktura betonu s krystalizační látkou.



Obrázek 3 - Snímek z elektronového mikroskopu u neošetřeného betonu [25]



Obrázek 4 - Snímek z elektronového mikroskopu u vzorku opatřeného krystalizačním nátěrem [25]

Využití těchto přísad se pojí s konstrukcemi ve stálém, případně častém kontaktu s vodou, jiné omezení využitelnosti nemají. Krystalizační materiály se používají pro podzemní konstrukce, tunely, kanalizace a technologie ČOV, zemědělské stavby, mostní konstrukce nebo konstrukce ve styku s mořskou vodou. [25]

1.5.3.2 HYDROFOBIZAČNÍ PŘÍSADY

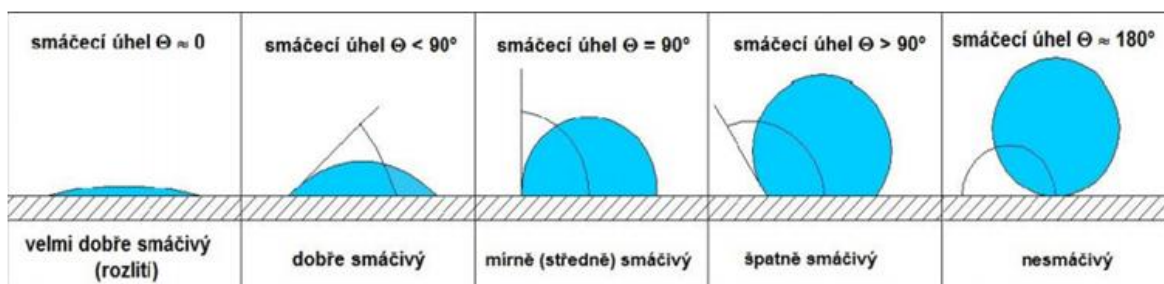
Hydrofobizačními přísadami jsou látky, kterými se dosahuje takzvané vnitřní hydrofobizace ve hmotě betonu. Zvětšují smáčecí úhel pro vodu (na obrázku 5) a zvyšují povrchovou energii částic. To snižuje kapilární migraci kapaliny a sťažuje

se tak pronikání vody do ztvrdlého betonu. Dávkuje se v množství 1 - 3 % z hmotnosti cementu. [26]

Hydrofobizační látky se dělí na tři typy, a to:

- přísady reagující s hydratačními produkty - kyselina stearová, mastné kyseliny, butylstearát, kyselina oktanová,
- koalescenční - hydrofobní emulze, polymerní vosky, silany, siloxany
- práškové nerozpustné látky - stearáty

Vnitřní vodoodpudivé prostředí brání vztlínání vody v betonu. Dochází tak ke zvýšení odolnosti betonu proti působení mrazu, tvorbě vápenných výkvětů a celkově zvýšení trvanlivosti. Působení hydrofobizačních přísad se označuje jako "lotosový efekt", protože z listů lotosu stéká dopadající voda v perličkách a listy lotosu zůstávají stále čisté. Shlukování vody do kapek na povrchu betonových výrobků je stejně jako u lotosového listu způsobeno povrchovým napětím a stejně jako u lotosového listu má toto shlukování vody do kapek takzvaný samočistící efekt. Samočistící efekt vodoodpudivého povrchu spočívá v tom, že odvalující se kapky vody na sebe nabalují nečistoty a odvádějí je pryč z povrchu betonu. [26]



Obrázek 5 - Přehled smáčecích úhlů θ [27]

1.5.4 PROTISMRŠŤUJÍCÍ PŘÍSADY

Pro vodotěsné betony a betony vystavené kapalným a plyným agresivním prostředím je uzavřený pórovitý systém bez trhlin základem trvanlivosti. Trhliny v betonu mohou urychlit difúzi nebo kapilární proudění škodlivých látek do betonu. Vznik trhlin je zapříčiněn smršťováním betonu. Pro snížení smršťování betonu během procesu hydratace a tím omezení tvorby trhlin, se používají protismršťující přísady, které se dělí na přísady ovlivňující chování kapaliny v betonu a rozpínavé přísady. [28] [2]

Protismršťující přísady ovlivňující chování kapaliny během procesu hydratace, snižují tvorbu trhlin, které vznikají autogenním a vlhkostním smrštěním. Přidáním této přísady do betonu se snižuje povrchové napětí vody v kapilárách a tím se

sníží tlak na vnitřní strukturu betonu, který voda vyvolává při její migraci a odpařování. Tyto látky se dávkuje do betonu v množství 1 - 2 % z hmotnosti cementu a jsou to většinou přípravky působící na bázi neo-pentyl glykolu. [2] [28]

Rozpínavé přísady jsou převážně sypké látky, které jsou založené na principu zvětšování objemu hydratovaných minerálů. Při odpařování a kapilární migraci kapaliny dochází ke smršťování betonu, které je eliminováno objemovou roztažností hydratovaných minerálů. Většinou se používají portlandské cementy s přísadou hlinitanových cementů a sádry, kdy při hydrataci těchto minerálů dochází ke tvorbě ettringitu, který zvětšuje svůj objem. Dále se používá měkce pálený oxid hořečnatý (MgO), který hydratací na hydroxid hořečnatý ($Mg(OH)_2$) zvětšuje svůj objem. [2] [28]

Protismršťující přísady se musí dávkovat velice přesně a nesmí dojít k jejich předávkování, které by vedlo k rozrušení betonu a tím ke ztrátě trvanlivosti. [28]

2 TRVANLIVOST BETONU

Vlivem působení vnějšího prostředí na beton dochází k jeho postupné a trvalé degradaci, vedoucí až k jeho rozpadu. Faktory působící na beton se dělí na fyzikální, chemické a biologické. Mezi fyzikální patří například porušení vlivem nárazů, tření, proudící vody, změny teplot (nad 150 °C se začínají rozkládat produkty hydratace cementu). Biologické faktory, které působí na beton jsou zejména mikroorganismy, chemické produkty životních pochodů živočichů a působení kořenových systémů stromů a rostlin. [29] [30]

Z hlediska skupenství se agresivní prostředí, se kterým beton přichází do styku dělí na kapalné, plynné a pevné. Kapalné prostředí se dále dělí na dva druhy a to na, přírodní vody (atmosférické, povrchové a podzemní) a odpadní vody (splaškové a průmyslové). Plynné prostředí není samo o sobě agresivní vůči hutnému vyzrálému betonu, ale oxid uhličitý (CO_2) z atmosféry může za určitých vlhkostních podmínek způsobovat karbonataci betonu. Udává se, že po 10 letech působení CO_2 z atmosféry, postoupí karbonatace do hloubky zhruba 30 mm pod povrch betonu. Pevným agresivním prostředím se rozumí suché půdy a prachy různého původu, které se na konstrukci usazují. Působení pevných látek je vždy podmíněno přítomností vody. [29]

Základní opatření, která mají za účel ochránit konstrukci proti daným degradačním vlivům, vychází z normy ČSN EN 206+A1. Tato norma klasifikuje prostředí, ve kterých má betonová konstrukce sloužit, do šesti základních kategorií, které se nazývají stupně vlivu prostředí. Stupně vlivu prostředí jsou označovány písmenem X, za kterým následuje ještě další písmeno, podle vlivu prostředí. [8] Následující tabulka popisuje stupně vlivu prostředí společně s jejich charakteristikou.

Tabulka 1 - Stupně vlivu prostředí

Stupeň vlivu prostředí	Charakteristika prostředí	
X0	bez nebezpečí koroze nebo narušení (interiéry budov s velmi nízkou vlhkostí)	
XC1 až XC4	koroze vlivem karbonatace	
XD1 až XD3	koroze způsobena chloridy (ne z mořské soli)	
XS1 až XS3	koroze způsobena chloridy z mořské soli	
XF1 až XF4	působení mrazu a rozmrazování (s / a nebo bez působení chemických rozmrazovacích látek (CHRL))	
	XF1 a XF3	bez CHRL
	XF2 a XF3	s vlivem CHRL
XA1 až XA3	chemicky agresivní prostředí	

2.1 PLYNNÉ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ

Mezi plyny, které mají degradující účinky na beton a způsobují jeho korozi patří zejména:

- oxid uhličitý - CO_2 ,
- oxid siřičitý - SO_2 ,
- oxidy dusíku - N_xO_y ,
- sulfan (sirovodík) - H_2S ,
- ostatní kyselinotvorné plyny - HCl , Cl_2 a další.

Zvýšenou pozornost je potřeba věnovat zejména oxidu uhličitému a oxidu siřičitému z důvodu jejich vysoké koncentrace v ovzduší a vysokému stupni agresivity. Koncentrace CO_2 se běžně ve vzduchu pohybuje okolo $60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Společně se vzdušnou vlhkostí proniká do betonových konstrukcí a způsobuje korozi betonu, kterou nazýváme karbonatace. Oxid siřičitý se ve vzduchu nenachází v takové míře jako oxid uhličitý, ale jeho agresivita vůči betonu je až 10krát vyšší. Oxid siřičitý ve vzduchu oxiduje na oxid sírový SO_3 . Korozi, která

vzniká tímto plynem nazýváme sulfatace. Tyto dva plyny jsou nejzákladnější, jelikož koncentrace ostatních plynů v ovzduší není tak vysoká. [29] [31]

2.1.1 KARBONATACE

Chemický proces, který je způsobený reakcí oxidu uhličitého se složkami cementového tmele v betonu. Zpočátku se karbonatace projevuje mírným zvýšením pevnosti povrchové vrstvy betonu. V průběhu reakcí dochází k neutralizaci hydroxidových iontů OH^- , tím se snižuje hodnota pH pórového roztoku. Hydroxidové ionty zajišťují vytvoření ochranné pasivační vrstvy na povrchu výztuže. Pokud dojde ke snížení hodnoty pH pod 9,6 pasivační vrstva se poruší a může docházet ke korozi výztuže. Rychlost postupování karbonatace závisí na mnoha faktorech, zejména na možnosti difuze CO_2 do struktury betonu a přítomnosti vlhkosti. [29] [32]

Celkový proces karbonatace můžeme popsat ve čtyřech etapách:

- I. etapa - na začátku těchto procesů se portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mezizrnném prostoru přeměňuje na nerozpustný kalcit CaCO_3 , který při tom částečně zaplňuje volné póry a zvyšuje tak hutnost cementového tmelu. Hlavní vlastnosti betonu se v tomto období stávají výhodnějšími. pH betonu klesá na hodnotu 11.
- II. etapa - ve druhé etapě probíhají přeměny ostatních hydratačních produktů cementu. Vznikající modifikace kalcitu CaCO_3 společně s amorfním gelem kyseliny křemičité zůstávají jako velmi jemnozrnné krystalické novotvary CaCO_3 . Hrubé krystalické novotvary se zde vyskytují pouze ojediněle. Mechanické vlastnosti betonu se příliš nemění, pH klesá na hodnotu 9,5.
- III. etapa - třetí období se vyznačuje překrystalizováním dříve vzniklých uhličitánových novotvarů, a to z mezizrnného roztoku. Přitom vznikají početné a velmi rozměrné, proti dřívějším útvarům, více než 10 krát větší krystaly kalcitu a aragonitu. Současně přitom mohou méně stále modifikace kalcitu CaCO_3 vlivem vlhkosti a déle trvající karbonatace nebo i vyšší teploty přecházet na modifikace stálejší. Mechanické vlastnosti betonu se během třetího období postupně zhoršují. Dochází k výraznému snížení hodnoty pH na 8.

- IV. etapa - se vyznačuje téměř stoprocentním stupněm karbonatace. Hrubé krystaly aragonitu a zejména kalcitu postupují celou strukturou cementového tmelu, což může mít za následek ztrátu jeho soudržnosti a pevnosti. V této etapě se hodnota pH sníží natolik (<8), že dochází k výrazné korozi výztuže v betonu a tím k destrukci celé konstrukce. [29] [32]

Koroze výztuže při karbonataci betonu postupuje rychleji, než dochází k rozrušení cementového tmele, z toho vyplývá, že výztuž a tím i konstrukce obvykle doslouží dříve, než nastane čtvrté stadium karbonatace. [32]

2.1.2 SULFATACE

Koroze cementové matrice vlivem SO_2 se v počátečních stádiích téměř neprojevuje. Již malé množství korozních novotvarů, zejména v přítomnosti vlhkosti, začíná ovlivňovat mechanické a fyzikálně chemické vlastnosti cementového tmelu. V důsledku koroze dochází postupně k významnému snižování hodnoty pH. S úměrně snižujícím se množstvím portlanditu Ca(OH)_2 narůstá množství korozních produktů. Na povrchu betonu se vytvářejí výkvěty hemihydrátu a dihydrátu síranu vápenatého CaSO_4 . Vlivem uvolněné vody povrchy vzorků navlhají a tato nestálost povrchových vrstev, kde sulfatace probíhá nejintenzivněji vede ke snížení mikrotvrdosti povrchu i pevností v tlaku. [29] [32]

Podobně jako u karbonatace i zde lze formulovat čtyři pomyslné etapy sulfatace:

- I. etapa - v prvním období se přeměňuje portlandit Ca(OH)_2 , respektive jeho roztok v mezizrnném prostoru na hemihydrát siřičitanu vápenatého CaSO_3 , který přitom částečně zaplňuje póry. Pevnosti betonu se zlepšují, ale výrazně se snižuje hodnota pH.
- II. etapa - zde probíhají přeměny ostatních hydratačních produktů cementu společně s primárně vzniklými karbonatačními novotvary. Produkty sulfatace zůstávají převážně v pseudomorfózách, ve tvarech pohydratačních a karbonatačních produktů, ale částečně i nadále zaplňují póry betonu. Mechanické vlastnosti vykazují mírné zvýšení hodnot, zároveň lze částečně uvažovat i s vlivem pokračující hydratace C_3S .
- III. etapa - je charakteristická překrystalizováním primárně vzniklého hemihydrátu siřičitanu vápenatého CaSO_3 na velice objemově rozměrné

krystaly sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, který zcela zaplňuje póry. Zpočátku této etapy dosahují pevnosti svého maxima, ale v průběhu třetího stadia a při přechodu do čtvrtého prudce klesají.

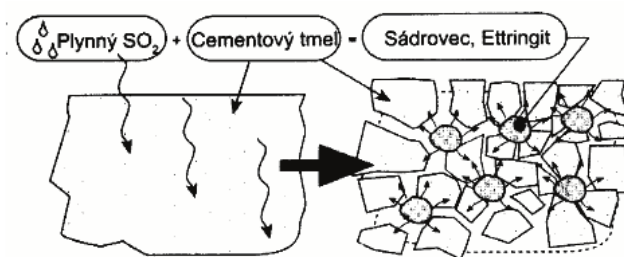
- IV. etapa - se vyznačuje naprostou ztrátou pevností a soudržností betonu a vznikem trhlinek. Hrubé krystaly sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ prostupují celou strukturou cementového tmelu.

Při střídavém provlhčování lze někdy zaznamenat i páté stadium, které je charakteristické zřetelnějším rozpadem betonu v důsledku vzniku trisulfátu, respektive monosulfátu vápenatého, což ovlivňuje hodnota pH. Při hodnotách pH nižších než 6,5 uvedené sloučeniny již nebyly nalezeny. Tato etapa může přímo nastat i po třetí etapě. [33]

2.1.2.1 SULFATACE BETONU V PRAXI

V praxi sulfatace neprobíhá samostatně, do reakce vstupuje zejména oxid uhličitý CO_2 a dochází k takzvanému synergickému působení plynů, to se vyznačuje prolínáním etap sulfatace a karbonatace. V důsledku mnohem vyššího obsahu CO_2 ve vzduchu dochází v prvním stadiu nejprve ke karbonataci portlanditu Ca(OH)_2 . Oxid uhličitý působí v hlouběji položených vrstvách materiálu, přičemž koroze oxidu siřičitého SO_2 se zpočátku omezuje na jemnozrnné novotvary karbonatace v povrchových vrstvách. Další etapy karbonatace jsou provázeny následnými sulfatačními přeměnami karbonatačních novotvarů na produkty sulfatace, které jsou již charakterizovány výraznějšími objemovými změnami. Z praktického hlediska jsou při nepřímé výrazné koncentraci SO_2 a CO_2 u hutných betonů a cementových malt procesy velmi dlouhodobými. [29] [32]

Na obrázku 6 je znázorněn postup sulfatace.



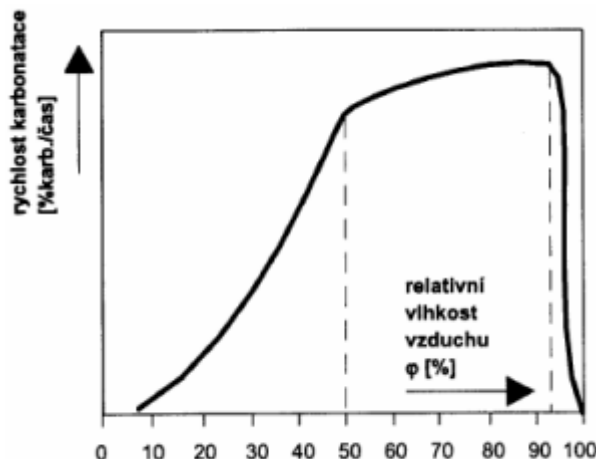
Obrázek 6 - Objemové změny v důsledku sulfatační přeměny C_3A na $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [32]

2.1.3 VLIVY URYCHLUJÍCÍ PLYNNOU KOROZI

Vlivů, které ovlivňují průběh karbonatace a sulfatace je velké množství. Zásadní roli ovšem hrají vlhkost, koncentrace plynu a difuze. [32]

2.1.3.1 VLIV VLHKOSTI

Vyplnění pórů vodou brání hlubšímu pronikání plynů do vnitřních částí betonu, ačkoliv se ve vodě rozpouštějí, jako je tomu právě u oxidu uhličitého CO_2 . Přítomnost určité vlhkosti v betonu je však podmínkou průběhu iontové reakce karbonatace. Zcela vysušený beton s CO_2 a jinými plyny vůbec nereaguje. Existují tedy určité meze relativní vlhkosti prostředí, při kterých probíhá karbonatace nejrychleji. [32]



Obrázek 7 - Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu dle Matouška [32]

Vlhkost má všeobecně velký vliv na průběh degradace betonu, jelikož ovlivňuje působení veškerých degradačních činitelů.

2.1.3.2 VLIV KONCENTRACE CO_2

Na množství oxidu uhličitého, který je potřebný pro karbonataci jednotky betonu, přímo závisí rychlost karbonatace. [32]

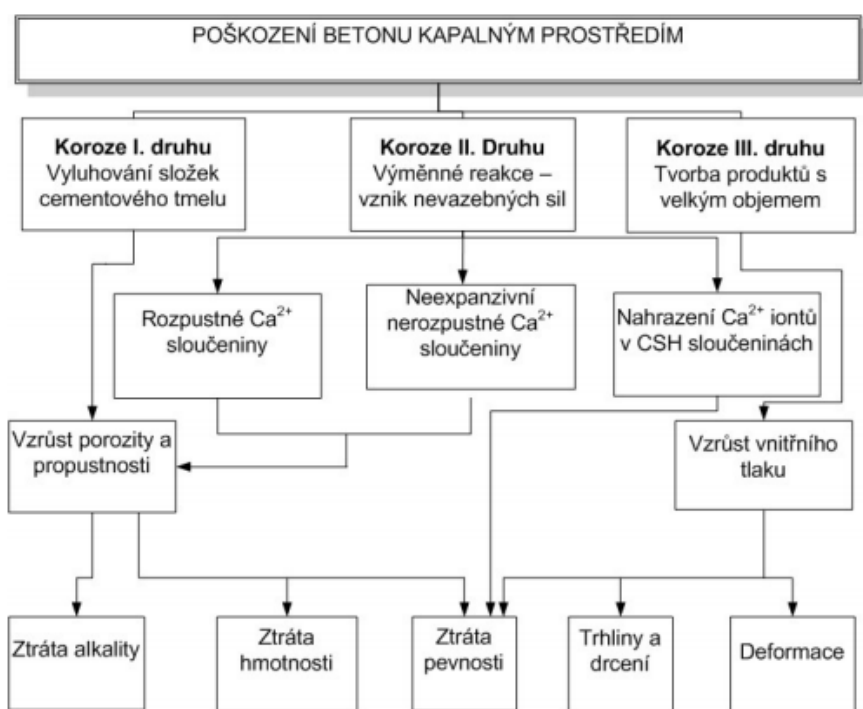
2.1.3.3 VLIV DIFUZE

V praxi je u betonových konstrukcí rozhodující především difuze oxidu uhličitého (CO_2) do betonu. Vodní pára a agresivní plyny obsažené v atmosféře pronikají kapilárně pórovitými materiály právě difuzí. Difuze se dá popsat jako transport látky v materiálu, respektive v jejích spojitých pórech, které jsou běžně vyplněny vzduchem. V pórech, které jsou zcela zaplněny vodou difuze neprobíhá a nedochází tak ke karbonataci. Součinitel difuzního odporu popisuje difuzi, velmi citlivě upozorňuje na strukturální změny betonu a nejlépe tak charakterizuje antikorozi chování materiálu. [32]

2.2 KAPALNÉ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ

Voda dobře smáčí hydrofilní povrch betonu i povrch kapilárních pórů, a tím může docházet k průniku agresivních látek do pórové struktury betonu, které reagují se složkami cementového tmele. Tyto reakce vedou k ztrátě zásaditosti, poškození betonu a v určitých případech až k jeho rozpadu (zejména povrchové vrstvy). V závislosti na podmínkách prostředí (množství vody, pohyb podzemní vody, změny teplot a vlhkosti) a kvalitě betonu (pórové struktury a přítomnosti trhlin) může být poškození betonu kapalným prostředím významné. [34]

Podle povahy produktů reakcí při kontaktu betonu s agresivním kapalným prostředím se koroze rozděluje do tří skupin, které jsou znázorněné na následujícím schématu (obrázek 8).



Obrázek 8 - Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [34]

2.2.1 KOROZE I. DRUHU

Koroze I. druhu představuje vyluhování hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 , který je v cementovém tmelu obsažen jak ve formě nasyceného roztoku, tak ve formě krystalů portlanditu. Vyluhováním se snižuje koncentrace hydroxidových iontů, tedy hodnota pH pórového roztoku. Při vyluhování se uplatňují vody s nízkou přechodnou tvrdostí (nízký obsah vápenatých a hořečnatých iontů). Jedná se o vody srážkové, říční a rybníční. Rychlost vyluhování hydroxidu vápenatého

(rozpuštěnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je 160 mg/100 g vody při 20 °C) závisí na propustnosti betonu pro vodu, u náporové vody na jejím hydrostatickém tlaku. Vyluhovaný hydroxid vápenatý ve styku se vzduchem karbonatuje a může vytvářet na podhledu betonové konstrukce krápníky nebo na povrchu betonu pevně lpící vrstvu kalcitu. [34] [35]

2.2.2. KOROZE II. DRUHU

Koroze II. druhu je charakterizována vznikem snadno rozpustných sloučenin, které nemají vazebné vlastnosti. Je způsobena reakcí portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s agresivním oxidem uhličitým CO_2 , hydroxidy, kyselinami, hořečnatými a amonnými solemi (mimo sírany). Výsledkem jsou buď rozpustné, nebo nerozpustné sloučeniny, které nemají vazebné účinky a nejsou expanzivní. [34] [35]

2.2.2.1 KOROZE KYSELÝMI VODAMI

Látky obsažené v těchto vodách vytvářejí s cementovým tmelem snadno rozpustné často nepevné sloučeniny, které se v betonu vyluhují a porušují jeho povrch.

S kyselinovou korozí se setkáváme u průmyslových odpadních vod a u vod přírodních. Kysele reagují i dešťové vody, jejichž pH klesá v průmyslových oblastech až na hodnotu 3 až 4. V praxi se nejčastěji vyskytují poškození způsobená kyselinou chlorovodíkovou, sírovou a dusičnou. Kyseliny reagují především s hydroxidem vápenatým a poté s hydrosilikáty a hydroalumináty vápenatými za vzniku vápenatých solí. Rychlost koroze betonu závisí zejména na rozpustnosti těchto vápenatých solí a na chování vrstvy vzniklých korozních produktů. [32] [35]

Kyseliny rozdělujeme do tří skupin:

- I. skupina - do této skupiny patří kyseliny a roztoky solí, v nichž hydrolýzou vznikají kyseliny vytvářející reakcí s cementovým tmelem na jeho povrchu jednosložkovou nebo vícesložkovou gelovou vrstvičku, neboť jejich vápenaté soli jsou dobře rozpustné. Z této skupiny způsobuje největší korozi cementového kamene kyselina solná a dusičná.
- II. skupina - do této skupiny patří kyseliny a roztoky solí, v nichž hydrolýzou vznikají kyseliny, jejichž reakční produkty tvoří na povrchu cementového tmelu gelové nebo krystalickogelové vrstvičky v závislosti na koncentraci

kyselin. Mezi nejznámější kyseliny této skupiny patří kyselina sírová, fosforečná, siřičitá.

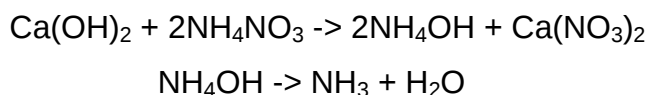
- III. skupina - do této skupiny patří kyseliny a roztoky solí, jejichž působením vznikají na povrchu cementového tmelu vrstvičky se zvýšenou hutností. Do této skupiny se řadí kyselina fluorovodíková, fluorokřemičitá a šťavelová. [33]

2.2.2.2 KOROZE VLIVEM AMONIAKU

Tento typ koroze se projevuje zejména v agrochemických podnicích, především tam, kde se manipuluje s průmyslovými hnojivy. Takových dusíkatých hnojiv je velké množství a patří mezi ně například síran amonný, ledek amonný s vápencem či močovina. Jedná se o práškové či krystalické látky, které při manipulaci silně práší a prach se ukládá na konstrukcích. Vysoká přítomnost amoniaku je také ve stájových objektech, kde je vysoká vlhkost a nedostatečné větrání. Hraje zde roli i počet a druh ustájených zvířat. [36]

Následky této koroze jsou patrné již po 2 až 3 letech užívání objektu.

Amonné soli mohou na beton působit agresivně při vyšší koncentraci NH_4^+ (více než 80 mg/l). Dochází k reakci spolu s OH^- ionty z hydroxidu vápenatého, uvolňuje se plynný amoniak NH_3 a současně vzniká rozpustný dusičnan vápenatý. [36] Reakce probíhá dle rovnice:

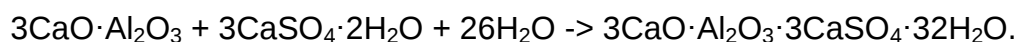


2.2.3 KOROZE III. DRUHU

Principem koroze III. druhu je porušení betonu tvorbou objemných sloučenin. Tento jev je způsobován především sírany, které reagují s portlanditem Ca(OH)_2 a tvoří málo rozpustný síran, čímž způsobují sádrovcovou korozi. Vznik sádrovce při této reakci je doprovázen nárůstem objemu až o 17 %. Při vhodné vlhkosti může dojít k rekrystalizaci za vzniku objemnějších krystalů a tlak v pórovém systému může dosáhnout až desítek MPa. Tyto sírany se běžně vyskytují v podzemních vodách a v některých druzích odpadních vod. [34]

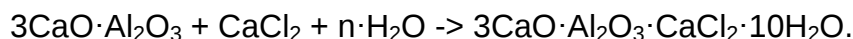
2.2.3.1 KOROZE SÍRANOVÝMI VODAMI

Síranové vody obsahují kyselinu sírovou (H_2SO_4) nebo sírany (SO_4^{2-}) a působením na cementový tmel vznikají sírany vápenaté (CaSO_4). Jejich další reakcí se slínekovými minerály vzniká v cementovém tmelu ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), který narušuje strukturu betonu, jelikož zvětšuje svůj objem až 2,27krát. Reakce probíhá dle rovnice. [34]



2.2.3.2 KOROZE CHLORIDOVÝMI VODAMI

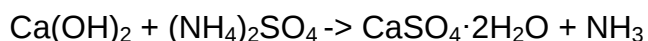
Ze skupiny chloridů je nebezpečný zejména chlorid sodný (NaCl) a chlorid hořečnatý (MgCl_2), reagující s vápenatými sloučeninami z cementového tmele za vzniku rozpustného chloridu vápenatého (CaCl_2). Reakci tohoto chloridu se slínekovými minerály lze popsat následující rovnicí: [34]



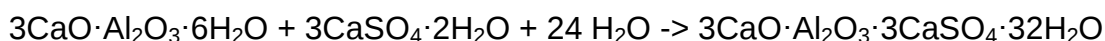
Vzniklá chemická sloučenina, která vyvoluje vysoké krystalizační tlaky, se nazývá Friedlova sůl.

2.2.3.3 PŘÍKLAD AGRESIVNÍHO PROSTŘEDÍ III. TYPU V PRAXI

V praxi je beton vystavován různým vlivům. V případě použití betonové konstrukce v průmyslové či zemědělské výrobě je beton vystavován koncentraci síranu amonného až 760 g/l při 25°C. Je-li beton vystaven přímému působení, může dojít k různým reakcím jako například alkalické reakci, korozi, rozkladu či rozpuštění hydrátů. Sírany reagují s trikalciem aluminátem C_3A v hydratovaném portlandském cementu. Tato reakce je rozpínavá a výsledné sloučeniny mají až dvojnásobný objem. Obecně mohou síranové ionty působit dvěma způsoby a to tak, že reakcí vzniká sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nebo ettringit $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. [36] Reakce lze popsat následujícími rovnicemi:



(sádrovec + amoniak)



(ettringit)

Výrazné zhoršení vlastností betonu v krátkém čase způsobují amonné sloučeniny. Míra poškození závisí na koncentraci, době trvání kontaktu a kvalitě betonu. [36]

2.2.4 KOROZE MINERÁLNÍMI TUKY A OLEJI

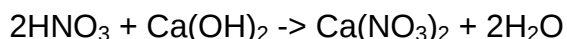
Z hlediska koroze stavebních konstrukcí zařazujeme do této skupiny výrobky z ropy, výrobky vznikající při zpracování uhlí. Jsou to například benzín, benzen, mazací oleje, vazelína. [32]

Korozní vlastnosti mají pouze látky, které jsou kyselé povahy. Jestliže uvedené sloučeniny kyselé povahy, v tucích a olejích nejsou, lze takové látky označit za beton nekorodující. Naopak výrobky obsahující kyseliny a fenolové sloučeniny způsobují korozi vyvolanou kyselinami nebo mají za příčinu vznik vápenatých fenolátů. Mezi látky, které se vyznačují složkami kyselé povahy patří zejména živočišné a rostlinné tuky. [32]

Nebezpečí je také ve snadném pronikání těchto látek do betonových konstrukcí. Pokud se tuky dostanou k výztuži, může zde následně docházet k jejímu prokluzování a snižování únosnosti celé konstrukce. [32]

2.2.5 BIOLOGICKÁ KOROZE BETONU

Výskyt biologické koroze a napadení povrchu betonu organismy je méně častým způsobem degradace betonu. Podmínkou růstu mikroorganismů je dostatečná vlhkost a teplota. Korozi betonu způsobují především sirné, nitrifikační a železité bakterie. Aerobní sirné bakterie způsobují biochemickou oxidaci sulfanu (H_2S), kterou vzniká kyselina sírová (H_2SO_4). Anaerobní nitrifikační bakterie se vyskytují v amoniakálním prostředí a oxidují amoniak (NH_3) až na kyselinu dusičnou (HNO_3), která ochotně reaguje s hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dle rovnice:



Rozpuštěním dusičnanu vápenatého dochází k vyluhování cementového kamene.

Železité bakterie uvolňují v přítomnosti kyslíku ze železitých sloučenin oxid uhličitý (CO_2), který následně ve vlhkém prostředí způsobuje výše zmíněnou karbonataci.

Další mikrobiologické vlivy se projevují sekundárními účinky. Za přítomnosti organických látek a vhodného prostředí se na povrchu betonu tvoří plísňe, které jsou ovšem pouze neestetickým prvkem. Pod vodní hladinou na betonu rostou řasy, které vyvolávají v trhlinách napětí a eventuálně i povrchové poškození betonu. Ve vlhkém prostředí mohou na betonu růst lišejníky, které obsahují vysoké

procento vody mění se v mrazu na led, který se rozpíná a dochází tak k degradaci betonu. [32] [35]

3 OBJEKTY VYSTAVENÉ PŮSOBENÍ CHEMICKY AGRESIVNÍHO PROSTŘEDÍ

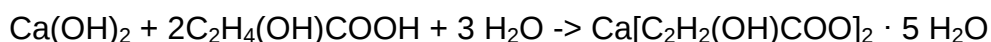
3.1 SILÁŽNÍ ŽLABY

Jedním ze způsobů skladování krmiva pro zvířata je jeho konzervace, takzvané silážování v betonových žlabech. Silážování je fermentační proces (proces kvašení), při kterém je krmivo uloženo v silážní jámě, za stálého zhutňování a poté je hermeticky uzavřeno. Tento proces konzervace udržuje na rozdíl od sušení sena krmivo v šťavnatém stavu. Konzervace krmiva se provádí působením mléčného kvašení cukrů obsažených v silážním krmivu, bez přístupu vzduchu, pro zachování obsahu živin a vitamínů. Pro zachování co nejvyšší kvality siláže, musí dojít k rychlému vzniku dostatečného množství kyseliny mléčné, která je základní konzervační látkou. [37]

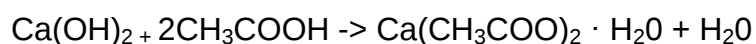
Hodnota pH siláže je obecně velmi nízká. Díky kyselému prostředí, omezení přístupu vzduchu společně s produkcí CO₂, se vytváří anareobní prostředí, ve kterém neprobíhá hnilobný proces. Pokud není dodržen technologický postup přípravy siláže nebo se používá nevhodné krmivo, dochází k aerobní degradaci - hnilobě. Během tohoto procesu se produkuje kyselina máslová, octová nebo mravenčí, díky kterým dochází k degradaci betonu, který je nejčastěji používaný materiál pro stavbu stěn a dna silážních žlabů. [37]

Nízká odolnost betonu vůči kyselému prostředí silážních šťáv je způsobena jeho vysokou zásaditostí (pH mladého betonu je vyšší než 13). Reakce kyselých šťáv s hydratačními produkty cementu způsobují korozi II. typu. [37]

- Účinek kyseliny mléčné na beton lze popsat následující rovnicí:



- Účinek kyseliny octové na beton lze popsat například takto:



Povrch betonu v silážních žlebech by měl být omyvatelný tlakovou vodou o tlaku minimálně 13 MPa a odolný proti:

- působení kapalin s nízkým pH,
- působení agresivního CO₂, který se vytváří během fermentace,
- působení mrazu,
- proti mechanickému poškození těžkou technikou při manipulaci se siláží.



*Obrázek 9 - Pohled na degradované
betonové panely v silážním žlabu [37]*



*Obrázek 10 - Puchýře na povrchu
konstrukce žlabu [37]*

3.2 BIOPLYNOVÉ STANICE

Bioplynové stanice jsou objekty, kde probíhá kontrolovaná fermentace biomasy za účelem vzniku bioplynu, který má velký obsah methanu. Vyrobený plyn se používá pro výrobu elektrické nebo tepelné energie.

Jako biomasa se využívají zemědělské produkty, exkrementy hospodářských zvířat a zemědělskopřemyslové odpady, které se souhrnně nazývají biomasa. Mezi hojně využívané materiály patří silážová kukuřice, díky vysokým ročním výnosům pěstování a bohatosti na energii.

Při návrhu bioplynové stanice je potřeba se zaměřit na různé části objektu, kde dochází k působení agresivních médií a zhodnotit jejich vliv na trvanlivost celé betonové konstrukce. [38]

Substrát v podobě travin, kukuřičné plodiny a ostatních druhů surovin rostlinného původu, který je uskladněn v otevřených betonových ohrádkách nebo nahaldovaný na betonové nášlapné vrstvě, může vlivem vlhkosti a teploty hnit. Při hnilobných procesech dochází k vytváření kyseliny mléčné a kyseliny octové, které mají nízkou hodnotu pH (5 a níže). Směs kyselin reaguje s portlanditem a vznikají

velmi rozpustné vápenné soli, které se následně vymyjí z betonu a zvětšují tak pórovitost struktury betonu. Tyto kyseliny způsobují korozi II. druhu.

Ve fermentoru dochází k velice agresivnímu účinku působení methanu, siřičitanu a oxidu uhličitého, které vytváří při působení na cementovou matici vlivem chemických reakcí korozi II. a III. druhu. [38]

Beton pro tyto konstrukce by měl stejné jako u silážních žlabů odolávat působení kyselin s nízkým pH, působení agresivního CO₂, který se vytváří během fermentace, působení mrazu a působení mechanického poškození těžkou technikou při manipulaci s materiálem.

3.3 ZEMĚDĚLSKÉ OBJEKTY PRO USTÁJENÍ A CHOV DOBYTKA

V objektech pro ustájení a chov dobytka dochází k degradaci betonových konstrukcí zejména vlivem organických kyselin. Ty se zde vytváří chemickými reakcemi ze zbytků krmiva, výměšků a podestýlky. Nejvíce postiženou částí stavby jsou podlahy, na které přímo působí exkrementy, zbytky krmiva a dobytek samotný. Dále zde dochází k působení plynného agresivního prostředí, zejména zvýšeného obsahu CO₂, z důvodu nedostatečného větrání těchto objektů. [39]

Zahraniční výzkum (Útok krmnými kyselinami na betonové podlahy ve vepřínech) [39] dokazuje velký vliv zbytků krmiva na degradaci betonových podlah. U jídel pro vepře dochází po 2 až 4 dnech ke snížení pH na hodnotu 3,8 až 4,5, to je způsobeno kyselinou mléčnou a kyselinou octovou. Směs těchto kyselin reaguje s portlanditem a vznikají rozpustné vápenné soli, které mají za následek vymývání povrchu betonu. Vzniká otevřená struktura betonu, kterou vnikají agresivní látky do betonu a dochází tak ke zvýšení jeho degradace. Výše popsaná reakce je koroze II. druhu. [39]

Beton pro podlahy těchto objektů by měl být navržen na stupeň vlivu prostředí XA3. Měl by být odolný proti mechanickému poškození způsobeného kopyty hospodářských zvířat a strojní mechanizací. Povrch betonové konstrukce by měl být omyvatelný tlakovou vodou při tlaku minimálně 13 MPa.

4 PROPUSTNOST BETONU

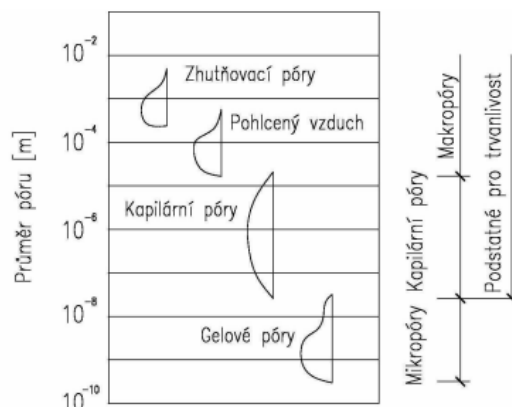
Propustnost povrchových vrstev betonu pro vodu a vzduch je jedním z nejvýznamnějších ukazatelů jeho životnosti a trvanlivosti. Vzájemné působení betonu a agresivního prostředí závisí především na porézní mikrostruktuře povrchové vrstvy betonu a také na transportních mechanismech plynů a kapalin. [40]

Propustnost betonové struktury je ovlivněna již od samého počátku výroby betonu. Zejména je ovlivněna výběrem materiálů, samotným návrhem, uložením čerstvého betonu, jeho hutněním a ošetřováním. Zvolenými postupy a technologiemi se určuje charakter struktury betonu a jeho výsledné vlastnosti. Při navrhování betonové stavby, která je vystavena působení chemických vlivů, se musí dbát na dostatečně velké provedení krycí vrstvy, obvykle 20 až 50 mm. [41]

4.1 VLIV PÓROVITOSTI NA PROPUSTNOST BETONU

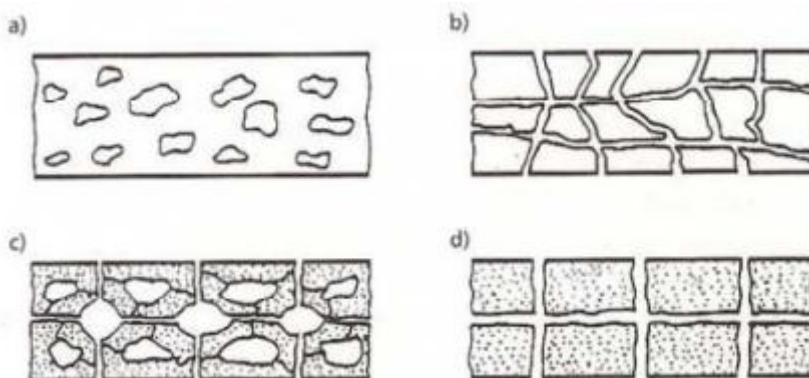
Transportní procesy, které probíhají v betonu úzce souvisí s jeho strukturou, a to zejména s její pórovitostí. Čím více je struktura betonu pórovitější, tím větší je propustnost betonu pro agresivní média. Důležitými faktory, které popisují strukturu cementové matrice je otevřená pórovitost a rozdělení velikosti pórů. Otevřenou pórovitostí je myšlena vzájemná propojenost pórů, ve kterých je umožněn pohyb kapalin, plynů a výměna rozpustných látek. [42] Podle způsobu vzniku a velikosti se póry rozlišují na:

- makropóry s průměrem nad 10^{-3} m - jedná se o pohlcený vzduch a zhutňovací póry,
- kapilární póry s velikostí 10^{-5} - 10^{-7} m - tvoří až 40 % objemu cementového tmelu,
- mikropóry s průměrem 10^{-7} - 10^{-9} m - zaujímají 20 - 30 % objemu cementového tmelu. [42]



Obrázek 11 - Rozdělení a velikost pórů v cementovém tmelu [42]

Pro trvanlivost betonu jsou rozhodující především kapilární póry, kterými voda prochází působením tlakového gradientu. Velikost těchto pórů je závislá především na množství přebytečné vody. S vzrůstajícím množstvím přebytečné vody objem kapilárních pórů výrazně narůstá a dochází ke snižování odolnosti betonů vůči propustnosti pro vodu. [41]



Obrázek 12 - Vztah permeability a pórovitosti dle Bakker [41]

a) pórovitý nepropustný materiál, b) pórovitý propustný materiál,
c) vysoká pórovitost, nízká propustnost materiálu, d) nízká pórovitost, vysoká propustnost materiálu

4.2 PROPUSTNOST BETONU OVLIVNĚNÁ TRHLINAMI V BETONU

Trhliny v betonu mají zásadní vliv na propustnost betonu pro vodu. Množství prosáknuté vody je závislé na hydraulickém spádu vody a rozměrech trhlin. Propustnost se zvětšuje s množstvím trhlin v tranzitní zóně, to je rozhraní mezi cementovým tmelem a kamenivem. S rostoucí velikostí kameniva v betonu roste i počet mikrotrhlin. Měřením propustnosti pro oleje bylo zjištěno, že propustnost betonových vzorků je zhruba stokrát větší, než na vzorcích z cementového tmelu. [43]

Může docházet i k procesu samoutěsňování trhlin, kdy prosakováním vody probíhá další hydratace cementu a trhliny se postupně zacelují cementovým tmelem a drobnými částčkami obsaženými ve vodě. Tento jev je podmíněn šířkou trhliny, která by se neměla rozšiřovat. Trhliny se rozdělují na trhliny vznikající v čerstvém betonu, trhliny vznikající v údobí tvrdnoucího betonu a trhliny vznikající v údobí ztvrdlého betonu. [41]

5 OCHRANA BETONU PRO ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI PROTI PŮSOBNÍ AGRESIVNÍCH LÁTEK

Proti působení agresivních látek na betony se užívají dva druhy ochrany a to:

- primární,
- sekundární.

5.1 PRIMÁRNÍ OCHRANA

Odolnost proti působení agresivních vlivů lze ovlivnit již při návrhu a výrobě betonu, pomocí použití vhodných materiálů a technologií.

Primární ochrana se navrhuje:

- volbou odolných materiálů,
- volbou vhodného geometrického tvaru konstrukce - redukce hromadění agresivních látek na povrchu,
- návrhem dostatečné krycí vrstvy výztuže betonem,
- omezení výskytu a velikosti trhlin. [32]

Při návrhu primární ochrany je nutné brát v úvahu vlastnosti materiálů používaných pro výrobu betonu. Vlastnosti a vliv jednotlivých materiálů na trvanlivost betonu jsou uvedeny v kapitole 1.

5.2 SEKUNDÁRNÍ OCHRANA

Sekundární ochrana spočívá v omezení nebo vyloučení působení agresivního prostředí na již zhotovenou betonovou konstrukci. V praxi se může navrhnout samostatně nebo kombinací s primární ochranou.

Pro sekundární ochranu se používají materiály, které vytvářejí na povrchu betonu ochranný film proti působení agresivních látek. Jedná se o nátěry, fólie, vyzdívky, obklady či povlaky. [32]

Pro výběr vhodného povrchového ochranného systému jsou rozhodující tato kritéria:

- očekávaná funkce betonového prvku nebo konstrukce,
- mechanické zatížení povrchu betonové konstrukce,
- působení zvláštních agresivních médií (například posypových solí),
- požadavky pro propustnost či nepropustnost betonu pro vodní páru podle charakteru provozu, prostředí a druhu konstrukce,
- vysoký difuzní odpor betonu vůči průniku CO_2 a SO_2 a jiných kyselinotvorných plynů,
- požadavky na vodotěsnost betonu,
- požadavky na překlenutí stabilních nebo pohyblivých trhlin v betonu. [40]

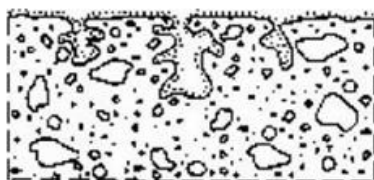
5.2.1 OCHRANA BETONU UZAVÍRACÍMI NÁTĚRY

Mnoho škodlivých činitelů je přenášeno vodou a vzduchem, z tohoto důvodu jsou vlastnosti povrchové vrstvy betonu velice důležité pro trvanlivost betonové konstrukce. Podle celosvětově prováděných výzkumů je ochrana povrchu betonu pomocí uzavíracích nátěrů velice efektivní způsob zlepšení kvality povrchové vrstvy. [41]

Základní rozdělení uzavíracích nátěrů definuje norma ČSN EN 1504-2, Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 2: Systémy pro povrchovou ochranu. [42]

Podle normy jsou nátěry rozděleny do tří skupin:

- hydrofobní impregnace,
- impregnace,
- nátěry (povlaky).



Obrázek 13 - Hydrofobní
impregnace [46]



Obrázek 14 - Impregnace
[46]



Obrázek 15 - Nátěr (povlak)
[46]

5.2.1.1 VLASTNOSTI UZAVÍRACÍCH NÁTĚRŮ

Mezi významné vlastnosti, které jsou použitím uzavíracích nátěrů zlepšovány, patří zejména snížení nasákavosti a kapilární vztlánavosti. Díky těmto materiálům lze dosáhnout snížení kapilární absorpce až v míře 90 %, závisí to na druhu použitého nátěru. Tyto látky výrazně snižují průnik oxidu uhličitého CO_2 a siřičitého SO_2 , zvyšují odolnost proti působení UV záření a biologickým vlivům. Zároveň zamezují vzniku skvrn a zvyšují odolnost betonu vůči chemickému a mechanickému poškození. Zlepšením uvedených vlastností se docílí výrazného zvýšení životnosti a trvanlivost betonových konstrukcí a výrobků.

Povrchové impregnační prostředky obvykle působí dvěma mechanismy a to:

- fyzicky - vytváří pevnou fyzickou bariéru oddělující betonový povrch od nepříznivého korozního prostředí,
- obsahem reaktivních látek - reaktivní látky, obvykle určité inhibitory či pigmenty, reagují mezi sebou nebo s betonovým podkladem, čímž vytvářejí sloučeniny, které napomáhají zlepšování vlastností betonu.

Uzavírací nátěry nabývají svých vlastností po vytvrzení. Vytvrzování probíhá samovolně na vzduchu, nebo za specifických podmínek, kterými je například vytvrzování nátěrů pomocí ultrafialového nebo infračerveného záření. [43] [44]

B. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části diplomové práce bylo posouzení účinku různých druhů příměsí, přísad a těsnících nátěrů na vlastnosti betonu ve vysoce chemicky agresivním prostředí. Pro zjištění těchto informací byly vzorky podrobeny různým zkouškám a zkušebními postupům. Postupy provádění zkoušek a jejich výsledky jsou prezentovány v následující části diplomové práce. Závěrem byl posouzen případný ekonomický přínos pro stavební praxi.

6 METODIKA ŘEŠENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Úkolem experimentální části bylo navrhnout a následně namíchat osm receptur malt s různými druhy cementů, přísad a příměsí. Zkoušky byly prováděny na cementových maltách, u kterých bylo použito běžné drobné kamenivo do betonu, aby se složení sledované malty co nejvíce přiblížilo běžným betonům.

Po zjištění potřebných parametrů malt, návrhu složení a výběru a posouzení vlastností vstupních surovin bylo provedeno namíchání receptur malt.

Sledované vlastnosti na maltách v čerstvém stavu byly:

- zpracovatelnost v čerstvém stavu,
- objemová hmotnost v čerstvém stavu.

Pro účely zkoušek byla z malt vyrobena zkušební tělesa ve tvaru krychle o hraně 200 mm v počtu 16 kusů (2 kus od každé receptury) a trámečky 40 x 40 x 160 mm v celkovém počtu 432 kusů (54 kusů od každé receptury). Vyrobená zkušební tělesa byla důkladně popsána, aby nemohlo dojít v průběhu zkoušek k jejich záměně a následně byla po dobu zrání uložena ve vodním prostředí.

Na ztvrdlých maltách byly prováděny následující zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu,
- stanovení pevnosti v tahu za ohybu po 7, 28 a 60 dnech,
- stanovení pevnosti v tlaku po 7, 28 a 60 dnech,
- stanovení nasákavosti vlivem kapilarity,
- stanovení celkové nasákavosti,
- stanovení odolnosti povrchu proti chemickým rozmrazovacím látkám,
- stanovení odolnosti proti působení silážních šťáv a nízkého pH modifikací zkoušky odolnosti proti CHRL a mrazuvzdornosti,

- stanovení vzduchové propustnosti - Torrent,
- ultrazvuková impulzová metoda,
- stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 150 dnech uložení v agresivním prostředí,
- stanovení pH ve výluhu,
- rentgenová difrakční analýza (RTG),
- rastrovací elektronový mikroskop (REM).

Zkoušky pevností, nasákavostí a odolností proti působení mrazu se prováděly na sadě těles, která se skládala ze dvou trámečků 40 x 40 x 160 mm. Pro zkoušky pevností, byla po uplynutí požadované doby zrání tělesa vyjmuta z vodního prostředí a odzkoušena.

Zkoušky nasákavostí a odolností proti působení mrazu byly pro účely diplomové práce na vzorcích provedeny po 60 dnech zrání, aby bylo co nejvíce využito vlastností příměsí II. typu, vzhledem k informacím získaným z teoretické části diplomové práce. Postup byl takový, že se vždy od každé receptury nechaly referenční sady vzorků bez nátěru. Sady těles určené pro aplikaci nátěru se po uplynutí doby zrání vyjmuly z vodního prostředí, nechaly se vyschnout a následně byly jejich povrchy opatřeny vybranými nátěry. Po vyschnutí nátěrů se provedly zkoušky.

Stanovení vzduchové propustnosti (Torrent) bylo provedeno na krychlích o hraně 200 mm, sada těles se skládala ze dvou krychlí. Měření se provádělo po 28 a 60 dnech zrání vzorků, na spodní straně krychle.

Vzorky určené pro dlouhodobé uložení v agresivním prostředí se nechaly zrán 28 dní, poté se sady těles, které se skládaly ze 4 kusů trámečků 40 x 40 x 160 mm, vyjmuly z vodního prostředí. Od každé receptury se nechaly referenční sady vzorků, ostatní sady vzorků se nechaly vyschnout a opatřily se vybranými nátěry. Po vyschnutí nátěrů se vzorky umístily do prostředí silážních šťáv, které mají hodnotu pH pod 5 a do prostředí nízkého pH (roztoku kyseliny chlorovodíkové (HCl)), kde se hodnota pH pohybovala od 3,5 do 4,5. Do každého prostředí v celkovém počtu 96 kusů (12 kusů od každé receptury: 4 bez nátěru, 4 s nátěrem vodního skla a 4 s hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei). Po 7 dnech uložení se na vzorcích provedlo měření ultrazvukovou impulzovou metodou pro získání vstupních hodnot. Poté se po uplynutí 30, 60, 90 a 150 dní provádělo

měření ultrazvukovou impulzovou metodou a bylo tak sledován průběh působení agresivního prostředí. Po uplynutí 150 dní působení agresivního prostředí se na vzorcích provedly zkoušky pevnostních charakteristik, které se porovnávaly s referenčními vzorky uloženými ve vodě a zároveň bylo provedeno vizuální zhodnocení. U vybraných vzorků se ponechaly úlomky po zkouškách pevností, ze kterých se odebraly vzorky pro zkoušku stanovení pH ve výluhu a rentgenové difrakční analýzy (RTG). Zároveň se vhodné úlomky využily pro zkoumání struktury na rastrovacím elektronovém mikroskopu (REM).

Po provedení všech zkoušek byly naměřené hodnoty vyhodnoceny. Výsledky byly zpracovány do přehledných tabulek a vyneseny do grafů. Výstupem experimentální části bylo porovnání výsledků zkoušek a zhodnocení případného ekonomického přínosu.

6.1 VSTUPNÍ SUROVINY PRO VÝROBU BETONU

6.1.1 KAMENIVO

Pro jednotlivé receptury bylo použito kamenivo frakce 0/4 mm a konkrétně se jednalo o:

- drobné kamenivo těžené z vody, frakce 0/4 mm Tovačov



Obrázek 16 - Sítový rozbor kameniva



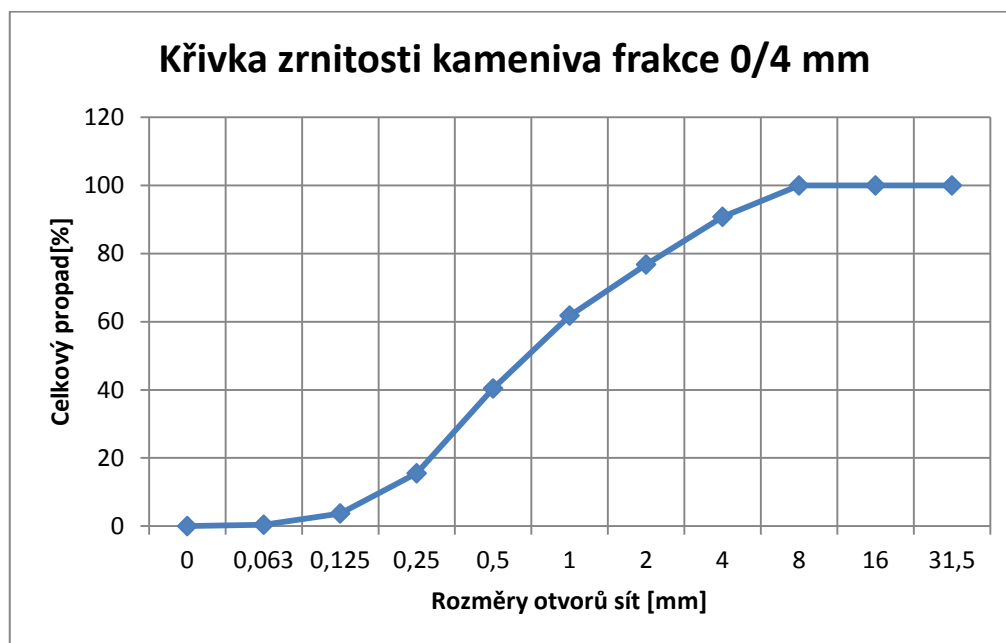
Obrázek 17 - Sušení kameniva

Na použitém kamenivu byla provedena zkouška stanovení zrnitosti kameniva dle ČSN EN 933 - 1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - sítový rozbor.

SÍTOVÝ ROZBOR KAMENIVA

Tabulka 2 - Sítový rozbor drobného kameniva těženého z vody, frakce 0/4 mm, Tovačov

Tovačov 0/4 mm				
Rozměry otvorů na sítích [mm]	Dílčí zbytek na síti [%]	Celkový zbytek na síti [%]	Celkový propad sítím [%]	Podíl jednotlivých frakcí [%]
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
16	0,0	0,0	100,0	
8	0,0	0,0	100,0	
4	9,2	9,2	90,8	84,5
2	14,0	23,3	76,8	
1	15,0	38,2	61,8	
0,5	21,4	59,6	40,4	
0,25	24,9	84,5	15,5	
0,125	11,8	96,3	3,7	15,5
0,063	3,3	99,6	0,4	
0	0,4	100,0	0,0	
Kontrola	100,0	-	-	100,0



Graf 1 - Křivka zrnitosti drobného kameniva těženého z vody frakce 0/4 mm, Tovačov

6.1.2 CEMENT

Pro výrobu receptur byly použity cementy:

- CEM I 42,5 R Hranice (více uvedeno v technickém listu v příloze 1)
- CEM III/A 42,5 N Hranice (více uvedeno v technickém listě v příloze 2)

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti používaných cementů

Druh cementu	Pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
CEM I 42,5 R	33,7	61,8	154	233
CEM III/A 42,5 N	18,1	60,3	184	301

6.1.3 VODA

Voda byla použita z vodovodního řadu FAST VUT Brno.

6.1.4 PŘÍSADY

Pro účely této diplomové práce byla použita plastifikační přísada od firmy Stachema:

- plastifikační přísada Stachement 2489 - plastifikační přísada na bázi polykarboxylátu (více uvedeno v technickém listu v příloze 3)

6.1.5 PŘÍMĚSI

Pro účely diplomové práce byly použity tyto přísady:

- struska - pro výrobu malt byla použita mletá granulovaná vysokopecní struska z Dětmovic (více uvedeno v technickém listu v příloze 4),
- popílek - pro výrobu malt byl použit popílek z černého uhlí z elektrárny Dětmovice (více uvedeno v technickém listu v příloze 5),
- mikrosilika Stachesil S - prášková bezchloridová příměs do betonu (více uvedeno v technickém listu v příloze 6),
- XYPEX C - 1000 NF - prášková přísada do betonu pro zvýšení vodotěsnosti sekundární krystalickou reakcí (více uvedeno v technickém listu v příloze 7).

6.1.6 UZAVÍRACÍ NÁTĚRY

V diplomové práci byly pro úpravu povrchů použity dva druhy nátěrů a to:

- Planiseal WR 80 CREAM od společnosti Mapei. Jedná se o krémový hydrofobizační přípravek pracující na bázi silanu ve vodní emulzi. (více uvedeno v technickém listu v příloze 8),
- Litosil LP 46 - aditivovaná impregnace na bázi lithných silikátů (lithné vodní sklo) od společnosti Vodní sklo, a.s. (více uvedeno v technickém listu v příloze 9).

6.2 SLOŽENÍ MALT

Tabulka 4 - Složení malt

Surovina	kg·m ⁻³							
	REF I	REF II	1B	2B	1C	2C	1D	2D
CEM I 42,5 R Hranice	259	-	233	-	208	-	259	-
CEM III/A 42,5 N Hranice	-	315	-	384	-	252	-	315
DTK 0-4 mm, Tovačov	1750	1745	1750	1745	1750	1745	1750	1745
Voda	196	196	196	196	196	196	196	196
Struska Dětmárovice	56	-	56	-	56	-	56	-
Popílek Dětmárovice	56	56	56	56	56	56	56	56
Plast. př. Stachement 2489	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Mikrosilika STACHESIL S	-	-	25,9	31,5	51,8	63,0	-	-
XYPEX C - 1000 NF	-	-	-	-	-	-	3,9	4,7
Nátěr Planiseal WR 80	Použito u vzorků REF I Mapei až 2D Mapei							
Nátěr Litosil LP 46	Použito u vzorků REF I VS až 2D VS							

Pro účely zkoušek byly připraveny zkušební sady těles od každé receptury, které se lišily svým složením a povrchovou úpravou a to:

REF I - referenční receptura

REF II - referenční receptura

1B - receptura s 10 % mikrosiliky

2B - receptura s 10 % mikrosiliky

1C - receptura s 20 % mikrosiliky

2C - receptura s 20 % mikrosiliky

1D - receptura s 1,5 % krystalizační přísady XYPEX C - 1000 NF

2D - receptura s 1,5 % krystalizační přísady XYPEX C - 1000 NF

REF I Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

REF II Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

1B Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

2B Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

1C Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

2C Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

1D Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

2D Mapei - vzorek opatřený nátěrem od společnosti MAPEI

REF I VS - vzorek opatřený nátěrem lithným vodním sklem

REF II VS - vzorek opatřený nátěrem lithným vodním sklem

1B VS - vzorek opatřený nátěrem lithným vodním sklem

2B VS - vzorek opatřen nátěrem lithným vodním sklem

1C VS - vzorek opatřen nátěrem lithným vodním sklem

2C VS - vzorek opatřen nátěrem lithným vodním sklem

1D VS - vzorek opatřen nátěrem lithným vodním sklem

2D VS - vzorek opatřen nátěrem lithným vodním sklem

Toto značení je používáno dále v rámci experimentální části diplomové práce.



Obrázek 18 - Míchání receptur



Obrázek 19 - Výroba vzorků pro zkoušku
vzduchové propustnosti



Obrázek 20 - Výroba zkušebních trámečků
40 x 40 x 160 mm



Obrázek 21 - Uložení vyrobených vzorků ve
vodě

7 PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY VLASTNOSTÍ

7.1 ZKOUŠKY V ČERSTVÉM STAVU

ZKOUŠKA ZPRACOVATELNOSTI

Měření zpracovatelnosti se pro účely diplomové práce provedlo zkouškou sednutím kužele, která se provádí dle ČSN EN 12350 - 2, Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Při zkoušce sednutím se použila pro přípravu zkušebního tělesa kovová forma ve tvaru komolého kužele (Abramsův kužel o rozměrech: $h = 300 \pm 2$ mm, $d_s = 200 \pm 2$ mm, $d_h = 100 \pm 2$ mm). Forma se pevně zafixovala k podložce, naplnila se rovnoměrně ve třech vrstvách a každá vrstva se zhutnila 25 vpichy. Po naplnění se odstranila násypka a horní okraj se zarovnal. Abramsův kužel se zvedl svislým tahem směrem od podložky v průběhu 2 až 5 sekund. Ihned po zvednutí se změřila výška sednutí kužele oproti výšce formy

a výsledná hodnota se zaokrouhlila na nejbližších 10 mm. [45]

Výsledkem zkoušky je zatřídění betonu do třídy sednutí, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5 - Stupně sednutí

Stupeň	Sednutí [mm]
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	> 220

OBJEMOVÁ HMOTNOST V ČERSTVÉM STAVU

Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu bylo stanovena dle níže uvedeného postupu. Objemová hmotnost se vypočítala na základě hmotnosti prázdné nádoby o objemu 5 litrů, která se následně naplnila maltou ve dvou vrstvách. Každá vrstva se dokonale zhutnila a poté se zvážila plná nádoba.

Výsledná objemová hmotnost v čerstvém stavu se zaokrouhuje na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Objemová hmotnost čerstvého betonu se vypočítá podle vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde:

m_2 ... hmotnost plné nádoby [kg]

m_1 ... hmotnost prázdné nádoby [kg]

V ... objem nádoby [m^3]

D ... objemová hmotnost čerstvého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

7.2 ZKOUŠKY VE ZTVRDLÉM STAVU

OBJEMOVÁ HMOTNOST VE ZTVRDLÉM STAVU

Stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu bylo stanovena dle níže uvedeného postupu. Objemová hmotnost se vypočítala na základě hmotnosti a rozměrů zkušebních těles. Výsledná objemová hmotnost se zaokrouhluje na $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu se vypočítá podle vzorce:

$$D = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde:

V ... objem tělesa [m^3]

m ... hmotnost tělesa [kg]

D ... objemová hmotnost ztvrdlého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu se prováděla podle ČSN EN 196 - 1, Metody zkoušení cementu - část 1: Stanovení pevnosti. Pevnost v tahu za ohybu se stanovuje na trámečcích o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Zkušební tělesa se umístí na střed lisu tak, aby byla namáhána kolmo na směr hutnění. Rychlost zatěžování má být od 40 do 60 $\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledkem zkoušky je zjištěná maximální hodnota síly F , při porušení v N a pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles se udává v MPa s přesností na 0,1 MPa. [46]

Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá podle vzorce:

$$f_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}]$$

kde:

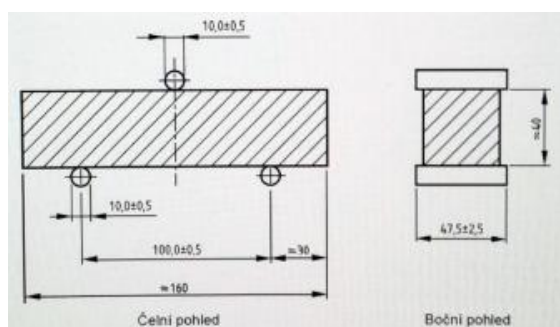
F ... nejvyšší zatížení při porušení [N]

l ... vzdálenost mezi podporami [mm]

b ... šířka zkušebního tělesa [mm]

h ... výška zkušebního tělesa [mm]

f_f ... pevnost v tlaku [MPa]



Obrázek 22 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnost v tahu za ohybu [46]



Obrázek 23 - Provádění zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí podle ČSN EN 196 - 1, Metody zkoušení cementu - část 1: Stanovení pevnosti. Pevnost v tlaku se stanovuje na zlomcích trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Zlomky se ukládají do lisu kolmo na směr hutnění a rychlost zatěžování má být od 2200 do 2600 N·s⁻¹. Výsledkem zkoušky je zjištěná maximální hodnota síly F , při porušení v N a pevnost v tlaku zkušebních těles se udává v MPa s přesností na 0,1 MPa. Výsledná pevnost vzorku je aritmetický průměr pevností jednotlivých polovin trámečků. [46]

Pevnost v tlaku se vypočítá ze vztahu:

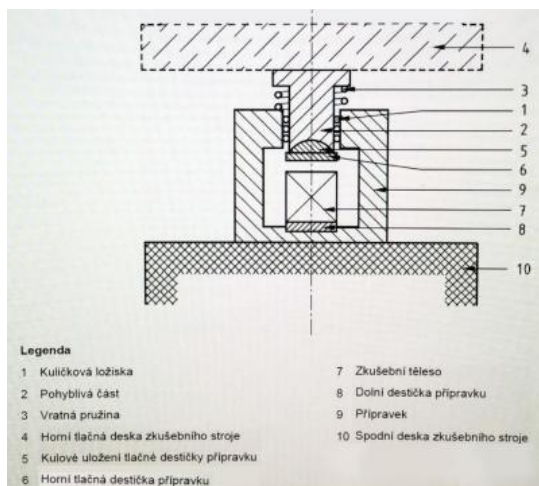
$$f_c = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}]$$

kde:

F ... nejvyšší zatížení při porušení [N]

A ... tlačná plocha (40 x 40 mm) [mm²]

f_c ... pevnost v tlaku [MPa]



Obrázek 24 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tlaku [46]



Obrázek 25 - Provádění zkoušky pevnosti v tlaku

STANOVENÍ NASÁKAVOSTI VLIVEM KAPILARITY

Pro účely diplomové práce byl pro stanovení nasákavosti vlivem kapilarity zvolen následující postup:

Bylo využito modifikace metody pro stanovení kapilární nasákavosti zdících prvků, při které se sleduje nasákavost pouze lícové vrstvy prvku. Zkouška nasákavosti zdících prvků vlivem kapilarity se provádění dle normy ČSN EN 772-11, Zkušební metody pro zdící prvky - část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdících prvků z umělého a přírodního kamene vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti zdících prvků.

Pro účely této diplomové práce se před začátkem zkoušky referenční vzorky, které nebyly primárně ošetřeny uzavíracím nátěrem, opatřily z bočních stran nátěrem, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků zkoušky vlivem nasákavosti bočních stěn.

Všechny vzorky se vysušily v sušárně do ustálené hmotnosti, zvážily se a poté se umístily lícovou plochou do vody tak, aby se plocha nedotýkala dna nádoby a zároveň voda nepřesahovala přes okraj nátěrů. Mezery mezi lícovou plochou a dnem nádoby bylo docíleno podložkami. Norma pro zdící prvky udává čas 10 minut pro ponoření zkoušených vzorků ve vodě. Pro účel diplomové práce se tato zkouška modifikovala a vzorky zůstaly ve vodní lázni do ustálení hmotnosti (do stavu, kdy už povrch vzorku betonu nepřijímal vodu), v našem případě po dobu 7 dní.

V časových intervalech 1, 2, 4, 6, 7 dní (24, 48, 96, 144, 168 hodin) se pravidelně vzorky vážily. Podle normy se výsledek kapilární nasákavosti udává v $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$, z důvodu modifikace této zkoušky se z hmotností vysušených vzorků a hmotností vzorků nasáklých vodou v uvedených intervalech vypočítá kapilární nasákavost, která se udává v %. Zkušebními vzorky byly trámečky 40 x 40 x 160 mm. [47]

Výsledná hodnota nasákavosti vlivem kapilarity se vypočítá podle vztahu:

$$NV_{kap} = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100 \quad [\%]$$

kde:

m_n ... hmotnost nasáklého vzorku v daném časovém intervalu [g]

m_s ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

NV_{kap} ... nasákavost vlivem kapilarity [%]

STANOVENÍ CELKOVÉ NASÁKAVOSTI

Stanovení celkové nasákavosti se provádělo podle následujícího postupu.

Zkušební tělesa se nejprve zvažila a poté se vložila do sušárny o teplotě 105 °C, kde se nechala po dobu, než došlo k ustálení hmotnosti. Po uplynutí požadované doby se trámečky ze sušárny vyjmuly a po ochlazení na teplotu místnosti se opět zvažily. Hodnota váhy se zaznamenala a vzorky se vložily do vany pro zkoušení tak, aby se nedotýkaly a mezery mezi dnem a trámečkem bylo docíleno podložkami. Takto připravené vzorky se zalily vodou, maximálně 20 mm nad horní povrch vzorku. V předem určených časových intervalech se vzorky vyjmuly z vody, osušily vlhkým hadrem a zvažily. Tělesa byla uložena ve vodě do té doby, dokud nedošlo k ustálení hmotnosti a vzorek již nepřijímal vodu. Konečná hodnota hmotnosti se zaznamenala a vypočítala se celková nasákavost, která se udává v %. Pro účely této diplomové práce byly zkušebními vzorky trámečky 40 x 40 x 160 mm.

Výsledná hodnota nasákavosti se vypočítá podle vztahu:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100 \quad [\%]$$

kde:

m_n ... hmotnost nasáklého vzorku [g]

m_s ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

NV ... celková nasákavost [%]

STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK (CHRL)

Pro účely diplomové práce byla provedena zkouška metodou A a poté se provádělo měření pomocí modifikace této zkoušky kombinací se zkouškou mrazuvzdornosti.

Zkouška se provádí dle ČSN 731326/Z1, Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek - automatické cyklování.

Metoda A (automatické cyklování I)

Podstatou této zkoušky je cyklické zmrazování a rozmrazování zkušebních vzorků v roztoku 3% chloridem sodným (NaCl) daným počtem cyklů. Maximální a minimální dosažené teploty jsou vždy po stanovenou dobu udržovány a poté dojde k ochlazení či oteplení.

Cyklické zmrazování a rozmrazování probíhá tak, že vzorky jsou ochlazovány na teplotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota se udržuje po dobu 15 minut. Následně se tělesa ohřívají na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tato teplota se opět udržuje po dobu 15 minut. Toto označujeme jako jeden cyklus a následně probíhá další.

Před ponořením vzorku do roztoku chloridu sodného je nutné zjistit plochu lícové vrstvy, která se zkouší. Vzorek se umístí do připravené misky a zalije se do výšky $5 \pm 1\text{ mm}$ 3% roztokem NaCl. Takto připravené vzorky se uloží do zkušebního zařízení, kde jsou vystavovány cyklickému zmrazování a rozmrazování. Po každých 25 cyklech se tělesa vyjmou ze zkušebního zařízení, vodou se opláchnou jejich povrch do misky a odloučené části betonu se nechají vysušit v sušárně do konstantní hmotnosti. Po vysušení se zaznamená váha odloučených částí betonu. Tělesa se opět umístí do zkušebního zařízení, dolije se roztok NaCl do stanovené výšky a celý postup se opakuje do doby, než uběhne stanovený počet cyklů.

Stanovený počet cyklů pro metodu A je 100 cyklů pro kontrolní zkoušky a 150 cyklů pro průkazní zkoušky. Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnosti odpadu vztaženého na 1 m^2 zkušební plochy ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), která se porovná s limitní hodnotou pro daný metodický postup. Zpravidla maximálně do $1000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. [48] Pro účely diplomové práce byla zkouška prováděna na trámečcích $40 \times 40 \times 160\text{ mm}$.

Výsledná hodnota se vypočítá podle vzorce:

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A} \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde:

ρ_a ... výsledná hmotnost vztažená na 1 m² [g·m⁻²]

Σm ... suma všech hmotností odpadů [g]

A ... velikost plochy vystavené působení chemických rozmrazovacích látek [m²]



Obrázek 26 - Uložení vzorků ve zkušebním zařízení

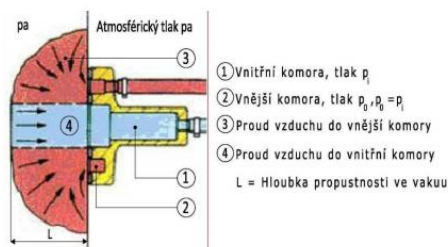
MODIFIKACE ZKOUŠKY

Pro účely diplomové práce se využilo kombinace zkoušky stanovení odolnosti proti CHRL a mrazuvzdornosti. Vzorky při této zkoušce byly ponořeny v prvním případě do silážní šťávy a ve druhém případě do prostředí nízkého pH vytvořeného roztokem kyseliny chlorovodíkové. V obou případech byly vzorky zality těmito látkami do výšky 30 ± 1 mm. Před samotným zkoušením se vzorky zvážily a následně byly podrobeny cyklickému zmrazování. Roztoky se po každých 25 cyklech měnily za nové. Po 100 cyklech se vzorky vyjmuly, zvážily se a následně na nich byly stanoveny pevnostní charakteristiky. Vyhodnocení se provádělo podle normy pro betony pro stanovení mrazuvzdornosti (ČSN 731322). Výsledkem zkoušky bylo stanovení koeficientu mrazuvzdornosti z pevností v tahu za ohybu (těles před zkouškou a po zkoušce), který se udává v % a zjištění úbytků hmotností zkušebních tělech v % hmotnosti. Výsledky byly porovnány s normovým požadavkem pro stanovení mrazuvzdornosti, kde nesmí být koeficient mrazuvzdornosti menší než 0,75 %. [49]

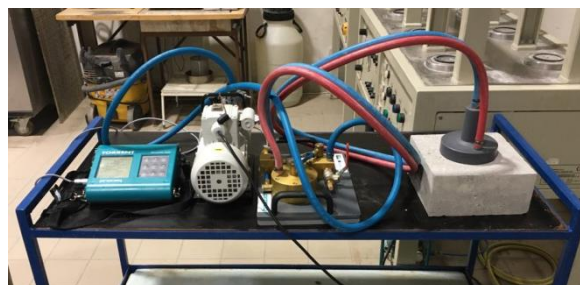
STANOVENÍ VZDUCHOVÉ PROPUSTNOSTI

Pro stanovení vzduchové propustnosti cementových kompozitů se nejlépe osvědčil přístroj TPT (Torrent Permeability Tester), který vyrábí švýcarská firma Proceq. A to především díky její nedestruktivní povaze a korelačním vztahům s již zavedenými laboratorními metodami. Měření Torrentovým přístrojem je považováno za velmi snadné a spolehlivé a lze ho použít pro svislé i vodorovné konstrukce. [54]

Hlavními částmi Torrentova přístroje jsou dvoukomorová vakuová komora s vnitřní komorou o průměru 32 mm a vnější o průměru 86 mm a tlakový regulátor, který zajišťuje proudění vzduchu kolmo k povrchu směrem do vnitřní komory.



Obrázek 27 - Schéma proudění vzduchu ve vakuových komorách [55]



Obrázek 28 - Torrentův přístroj pro měření vzduchové propustnosti

Principem měření je vytvoření vakua 1000 mbar, po jeho dosažení se pumpa vypne a sleduje se proud vzduchu procházejícího betonem do vnitřní komory přístroje. Měří se tlak snižujícího se vakua v betonu pod oběma komorami, až dojde v vyrovnání obou tlaků. V měřicím indikátoru se průběžně sledují oba tlaky a výsledkem měření je součinitel vzduchové propustnosti k_T . Rozměr je m^2 . Před začátkem měření se musí provést kalibrace přístroje na etalonu.

Čím je výsledný součinitel propustnosti nižší, tím je pórovitá struktura méně propustná pro agresivní plyny a kapaliny z okolního prostředí. Součástí přístroje je tabulka (tabulka 6) a diagram umožňující zařadit zkoušený beton do jedné z pěti tříd z hlediska kvality povrchové vrstvy. [54]

Tabulka 6 - Třídy kvality krycí vrstvy betonu

Kvalita krycí vrstvy betonu	Index	$k_T (10^{-16} m^2)$
velmi špatná	5	> 10
špatná	4	1,0 - 10
střední	3	0,1 - 1,0
dobrá	2	0,01 - 0,1
velmi dobrá	1	< 0,01

ULTRAZVUKOVÁ IMPULZOVÁ METODA ZKOUŠENÍ BETONU

Zkouška se provádí dle ČSN 731371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.

Princip je založen na průchodu impulsu podélných vibrací vyvolaných elektrostatickým budičem, který je přiložen na vzájemně kolmých stranách vzorku betonu. Po průchodu impulsu vibrací vzorkem o známé délce je impuls přeměněn snímačem na elektrický signál a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu. [50]

Zkušební zařízení se skládá z elektrického generátoru, budiče a snímače, zesilovače a elektronického měřiče rychlosti, který měří časový interval impulsu mezi budičem a snímačem. Pracovní kmitočet budiče by měl být v rozsahu 20 - 150 kHz. Zkušební zařízení musí odpovídat požadavkům normy ČSN EN 12504 - 4.

Před začátkem měření zkušebních těles se musí provést kalibrace přístroje na etalonu. Dokonalé působení sondy na měřený materiál zaručuje sono gel, který se maže na sondy. Po provedení kalibrace se může přistoupit k samotnému měření, zkušební tělesa se nejprve změří (s přesností 0,5 %) a zváží (s přesností na 0,1 % z hmotnosti) a poté se změří doba průchodu impulsu zkoušeným vzorkem. Na každém vzorku 2krát. Z naměřených hodnot se vypočítá rychlost šíření ultrazvukového impulsu a následně dynamický modul pružnosti. [51]

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu betonem se vypočítá podle vztahu:

$$V_L = \frac{l}{t} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

kde:

V_L ... rychlost šíření ultrazvukového impulsu betonem $[m \cdot s^{-1}]$

l ... délka vzorku $[m]$

t ... doba průchodu ultrazvukového impulsu betonem $[s]$

Dynamický modul pružnosti betonu se vypočítá podle vztahu:

$$E = D \cdot V_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad [GPa]$$

kde:

E ... dynamický modul pružnosti $[GPa]$

D ... objemová hmotnost ZB $[kg \cdot m^{-3}]$

V_L ... rychlost šíření ultrazvukového impulsu betonem $[m \cdot s^{-1}]$

k ... součinitel rozměrnosti prostředí dle ČSN 731371



Obrázek 29 - Zkušební přístroj pro měření ultrazvukového impulsu

STANOVENÍ pH VE VÝLUHU

Hodnota pH se u betonů sleduje z důvodu ověření pasivace výztuže a jiných ocelových vláken v betonu. Koroze výztuže a ocelových vláken probíhá, když hodnota pH klesne pod hodnotu 9,6.

Stanovení hodnoty pH ve výluhu se provádělo na vzorcích uložených v agresivním prostředí a ve vodě. Pro stanovení hodnoty byly odebrány vzorky z povrchu (0-5 mm). Odebraný vzorek se rozemlel a následně prosál sítem o velikosti otvorů 0,063 mm. Podíly, které prošly sítem se zhomogenizovaly, vysušily a kvartací se odebral vzorek o hmotnosti 2 g. Takto připravený vzorek se vyluhoval v exaktně stanoveném objemu destilované vody po určitou dobu. Na výluhu se provedlo stanovení hodnoty pH pomocí pH metru.



Obrázek 30 - Příprava vzorků pro stanovení
pH



Obrázek 31 - Měřící přístroj pro stanovení
pH

RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA

Pro stanovení mineralogického složení se používá rentgenová difrakční analýza. Ta vychází z principu krystalografického uspořádání látek a interakce rentgenového záření s částicemi, které tvoří krystalickou mřížku. Intenzita pronikajícího rentgenového paprsku je závislá na energii paprsků a úhlu dopadu paprsku. Základním vztahem rentgenové difrakce je Braggova rovnice, která má následující tvar:

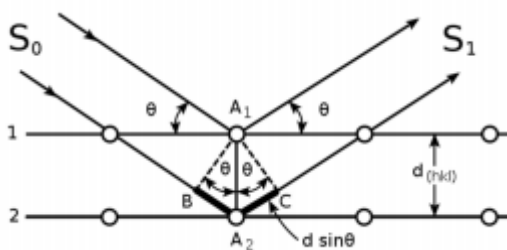
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

kde:

λ ... vlnová délka [m]

$n \cdot \lambda$... dráhový rozdíl paprsků [m]

θ ... úhel dopadu paprsků [°]



Obrázek 32 - Difrakce dopadajícího záření [49]

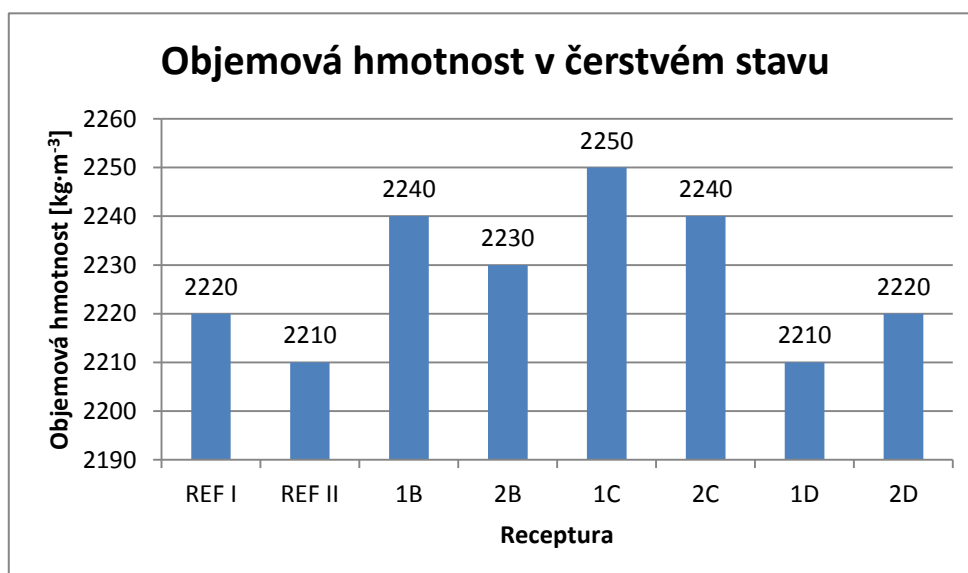
Vzorek pro zkoušení rentgenovou difrakční analýzou se rozemele a proseje sítem o velikosti otvorů 0,063 mm. Pro provedení zkoušky jsou potřeba zhruba 3 g přesátého vzorku. Výsledkem analýzy je difrakční záznam zvaný difraktogram, který lze vyhodnotit dvěma způsoby. První možností je vyhodnocení pomocí tabulek, ve kterých jsou udány hodnoty mezirovinných vzdáleností v nanometrech pro difrakční úhly 2θ . Podle takzvaných píků a jejich mezirovinných vzdáleností se určí hledaný minerál. Druhou možností je vyhodnocení pomocí softwaru. [49]

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

8.1 ZKOUŠKY V ČERSTVÉM STAVU

Tabulka 7 - Výsledky vlastností v čerstvém stavu

Receptura	Naměřené hodnoty sledovaných vlastností	
	Sednutí kužele [mm]	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
REF I	90	2220
REF II	90	2210
1B	70	2240
2B	60	2230
1C	60	2250
2C	60	2240
1D	90	2210
2D	80	2220



Graf 2 - Grafické vyhodnocení stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Konzistence všech receptur byla dle výsledků zkoušky sednutí S2. U receptur s použitím mikrosiliky se hodnota sednutí snižovala. Výsledky objemových hmotností v čerstvém stavu se pohybují v rozmezí od 2210 do 2250 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U receptur s přidavkem mikrosiliky se zvyšovala objemová hmotnost malt v čerstvém stavu z důvodu zahuštění struktury materiálu. Nejvyšší hodnota byla naměřena u receptury 1C s 20 % mikrosiliky, konkrétně 2250 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

8.2 ZKOUŠKY VE ZTVRDLÉM STAVU

Tabulka 8 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 7 dnech

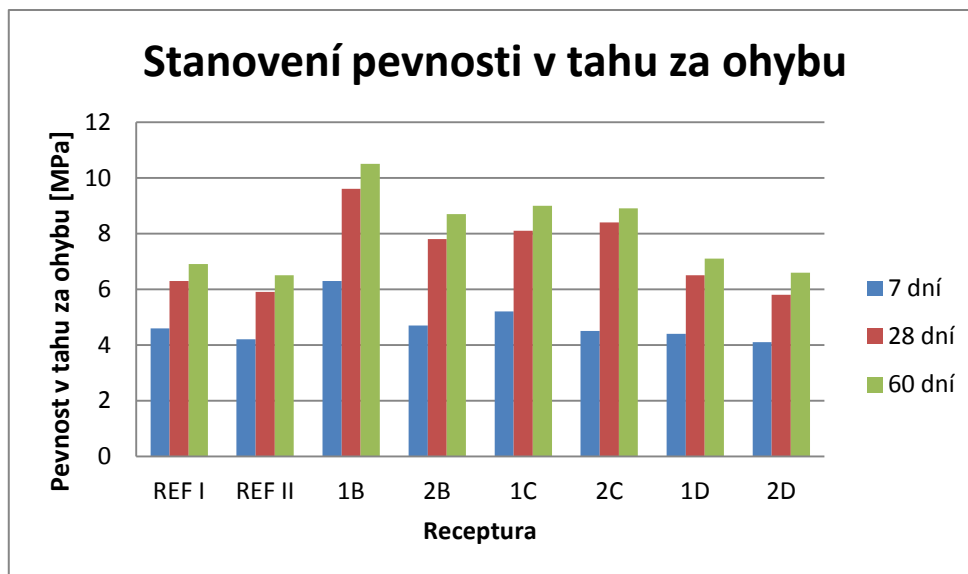
Označení vzorku	Naměřené průměrné hodnoty sledovaných vlastností		
	Objemová hmotnost po 7 dnech [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]
REF I	2200	4,6	20,2
REF II	2190	4,2	16,1
1B	2220	6,3	28,3
2B	2210	4,7	20,2
1C	2230	5,2	21,6
2C	2230	4,5	20,9
1D	2200	4,4	18,9
2D	2190	4,1	16,6

Tabulka 9 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 28 dnech

Označení vzorku	Naměřené průměrné hodnoty sledovaných vlastností		
	Objemová hmotnost po 28 dnech [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]
REF I	2190	6,3	30,8
REF II	2190	5,9	25,6
1B	2210	9,6	47,2
2B	2200	7,8	34,5
1C	2220	8,1	36,4
2C	2210	8,4	33,9
1D	2190	6,5	28,6
2D	2180	5,8	23,4

Tabulka 10 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 60 dnech

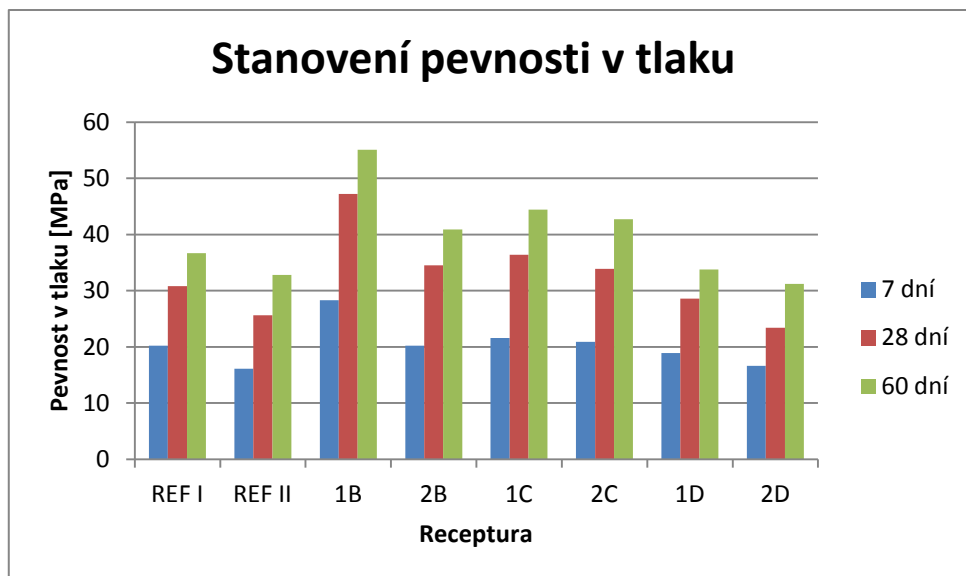
Označení vzorku	Naměřené průměrné hodnoty sledovaných vlastností		
	Objemová hmotnost po 60 dnech [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu po 60 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 60 dnech [MPa]
REF I	2190	6,9	36,7
REF II	2180	6,5	32,8
1B	2210	10,5	55,1
2B	2200	8,7	40,9
1C	2220	9,0	44,4
2C	2210	8,9	42,7
1D	2180	7,1	33,8
2D	2190	6,6	31,2



Graf 3 - Grafické vyhodnocení pevností v tahu za ohybu po 7, 28 a 60 dnech

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z naměřených hodnot a grafu je patrný rozdíl v použití cementu CEM I 42,5 R a CEM III/A 42,5 N. Receptury s cementem CEM I mají dle očekávání rychlejší nárůst pevností v tahu za ohybu v počátku zrání betonu, po 60 dnech se pevnosti skoro vyrovnávají, s výjimkou receptury 1B, kde je rozdíl oproti receptuře 2B o 1,8 MPa. U receptur REF I, REF II, 1D a 2D se pevnosti v tahu za ohybu po 60 dnech pohybují v rozmezí od 6,5 do 7,1 MPa. Z toho vyplývá, že krystalizační přísada XYPEX použitá u receptur 1D a 2D v našem případě neovlivňuje výsledky pevností v tahu za ohybu. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosahuje po 60 dnech vzorek 1B, a to 10,5 MPa. Je zde zaznamenán vliv mikrosiliky (dávka 10 %) na zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. U receptur 2B, 1C a 2C se hodnoty pevností v tahu za ohybu po 60 dnech pohybují v rozmezí od 8,7 do 9,0 MPa.



Graf 4 - Grafické vyhodnocení pevností v tlaku po 7, 28 a 60 dnech

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

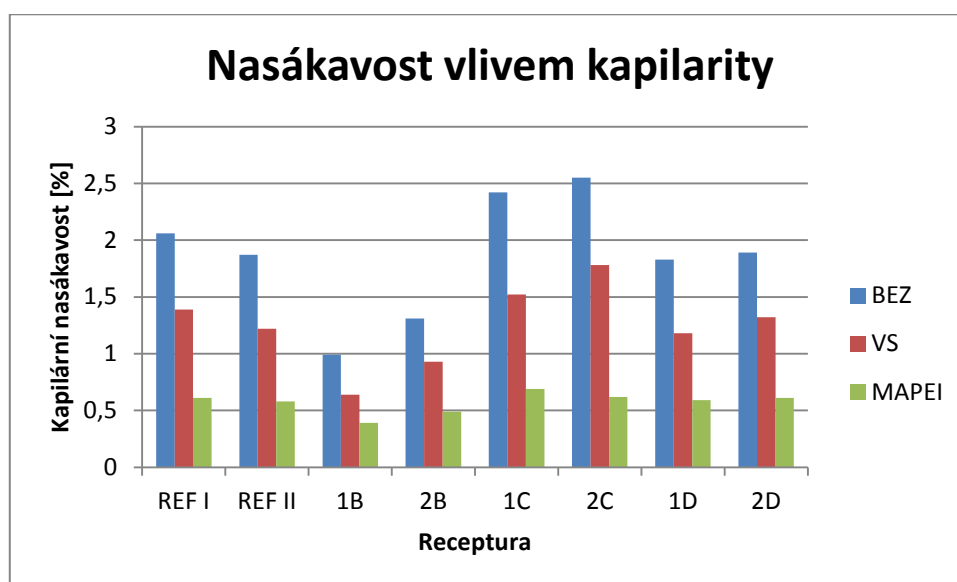
Z dosažených hodnot a grafu je patrný rozdíl v použití cementu CEM I 42,5 R a CEM III/A 42,5 N. Receptury s cementem CEM I mají rychlejší nárůst pevností v tlaku v počátku zrání betonu, ale po 60 dnech jsou pevnosti srovnatelné, s výjimkou receptur 1B a 2B, kde je rozdíl pevností po 60 dnech 14,2 MPa. U receptur REF I, REF II, 1D a 2D se pevnosti v tlaku po 60 dnech pohybují v rozmezí od 31,2 do 36,7 MPa. Vzorky 1D a 2D s krystalizační přísadou XYPEX dosahují nižších pevností oproti referenčním vzorkům, konkrétně o 5 - 8 %. Z toho vyplývá, že v našem případě použitím krystalizační přísady došlo ke snížení pevnosti malt v tlaku. Nejvyšší pevnosti v tlaku po 60 dnech dosahuje vzorek 1B, a to 55,1 MPa, je zde zaznamenán pozitivní vliv mikrosiliky (dávka 10 %) na zvýšení pevnosti v tlaku. U receptur 2B, 1C a 2C se hodnoty pevností v tlaku po 60 dnech pohybují od 40,9 do 44,4 MPa. U receptur 1C a 2C je použito 20 % mikrosiliky, při této dávce se neprojevuje tak velký vliv na zvýšení pevnosti v tlaku jako u varianty 1B. Z výsledků je zřejmé, že všechny receptury, kde byla použita mikrosilika, mají vyšší pevnosti v tlaku vůči recepturám bez ní. U všech receptur je viditelný pozitivní vliv použití příměsí typu II, kdy dochází v postupném růstu pevností v pozdějších dnech zrání malt.

8.3 STANOVENÍ NASÁKAVOSTI VLIVEM KAPILARITY

Tabulka 11 - Výsledné hodnoty nasákavosti vlivem kapilarity

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledované vlastnosti NV_{kap} [%]		
	BEZ	VS	MAPEI
REF I	2,06	1,39	0,61
REF II	1,87	1,22	0,58
1B	0,99	0,64	0,39
2B	1,31	0,93	0,49
1C	2,42	1,52	0,69
2C	2,55	1,78	0,62
1D	1,83	1,18	0,59
2D	1,89	1,32	0,61

Kde: NV_{kap} ... nasákavost vlivem kapilarity v čase [%]



Graf 5 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení kapilární nasákavosti

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

První zkouškou, kde se již zkoumal i vliv použitých nátěrů, byla zkouška kapilární nasákavosti. Z výsledných hodnot a vynesného grafu je patrné, že nejvyšší výslednou povrchovou nasákavost měl vzorek receptury 2C, konkrétně 2,55 %, u vzorku 1C vyšla hodnota jen o 0,13 % nižší. Tento jev mohl být zapříčiněn vysokou dávkou mikrosiliky (20 %) v těchto recepturách, kdy v průběhu hydratace mohlo docházet k vytváření smršťovacích trhlinek, kterými voda pronikala do struktury. Nejnižší nasákavost z receptur bez nátěru se projevila u vzorku 1B (10 % mikrosiliky), kde výsledná hodnota byla 0,99 %, vzorek 2B měl nasákavost o 0,32 % vyšší. U ostatních receptur byla naměřena kapilární

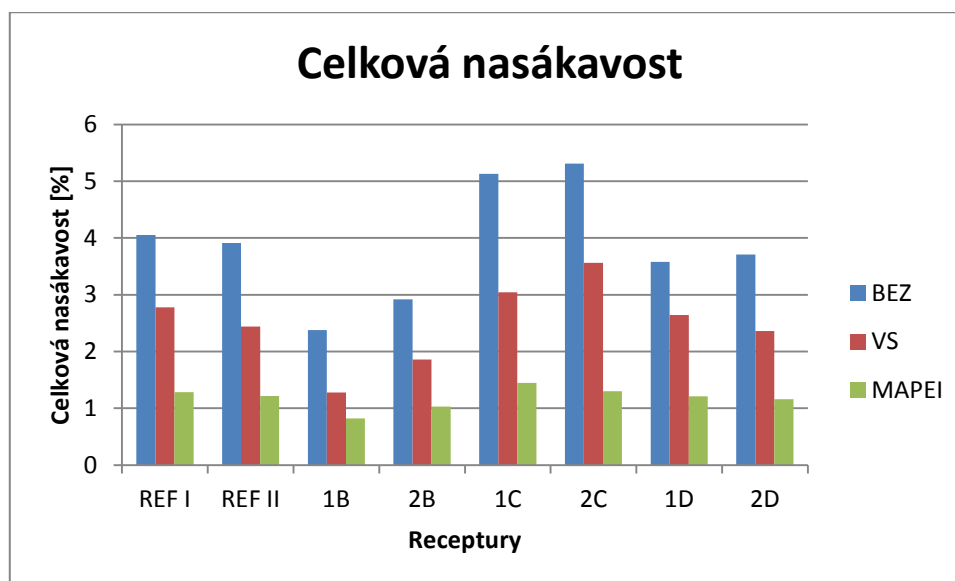
nasákavost v rozmezí od 1,83 do 2,06 %. Z výsledků je zřejmé, že oba nátěry dle očekávání snížily kapilární nasákavost jednotlivých vzorků. U vzorků opatřených hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei, byly výsledné hodnoty kapilární nasákavosti 2x nižší vůči vzorkům opatřených nátěrem lithného vodního skla. Nejnižších hodnot dosahoval vzorek 1B Mapei 0,39 %, vzorek 1B VS měl výslednou hodnotu o 0,25 % vyšší.

8.4 STANOVENÍ CELKOVÉ NASÁKAVOSTI

Tabulka 12 - Výsledné hodnoty celkové nasákavosti

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledované vlastnosti NV_c [%]		
	BEZ	VS	MAPEI
REF I	4,05	2,78	1,28
REF II	3,91	2,44	1,22
1B	2,38	1,28	0,82
2B	2,92	1,86	1,03
1C	5,13	3,04	1,45
2C	5,31	3,56	1,30
1D	3,58	2,64	1,21
2D	3,71	2,36	1,16

Kde: NV_c ... celková nasákavost v čase [%]



Graf 6 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení celkové nasákavosti

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z dosažených hodnot a vynesení grafu je patrné, že nejvyšší celková nasákavost byla nejvyšší stejně jako při zkoušce kapilární nasákavosti u vzorku 2C, konkrétně 5,31 %. Vzorek 1C měl nasákavost o 0,18 % nižší. U vzorků REF I byla výsledná hodnota 4,05 % a u vzorku 1D 3,58 %. Z těchto výsledků je patrné,

že krystalizační přísada XYPEX C - 1000 NF použitá u receptury 1D snižuje nasákavost jen nepatrně oproti referenčním vzorkům, konkrétně o 0,47 %. U vzorků REF II a 2D byly výsledné hodnoty podobné. Nejnižší nasákavost u vzorků, které nebyly opatřeny nátěrem vykazoval stejně jako u zkoušky kapilární nasákavosti vzorek 1B a to 2,38 %, vzorek 2B měl nasákavost o 0,54 % nižší.

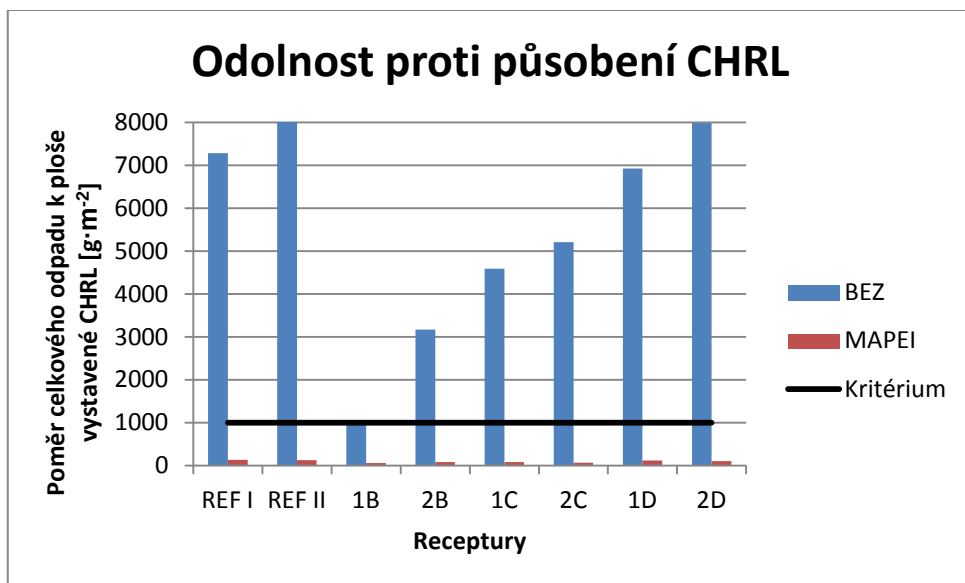
U vzorků opatřených nátěrem se nejnižší nasákavost projevila u vzorku 1 B Mapei a to 0,82 %. U vzorku 1B VS byla výsledná hodnota o 0,46% vyšší. Z výsledků je zřejmé, že oba nátěry snižují hodnotu nasákavosti. Nátěr od společnosti Mapei snižuje nasákavost až dvakrát více oproti nátěru lithným vodním sklem.

8.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK

Tabulka 13 - Výsledné hodnoty stanovení odolnosti proti působení CHRL

Označení vzorku	Průměrné naměřené hodnoty sledovaných vlastností			
	Počet cyklů			
	25	50	75	100
	$\varnothing \rho_a [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$	$\varnothing \rho_a [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$	$\varnothing \rho_a [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$	$\varnothing \rho_a [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$
REF I	382,4	1003,9	4703,5	7282,1
REF II	745,6	1323,4	4896,7	9820,8
1B	140,3	353,7	785,4	1035,6
2B	179,7	889,9	1512,2	3175,4
1C	83,4	785,6	2518,4	4591,8
2C	192,4	1123,5	3802,9	5206,2
1D	803,1	1850,4	4162,8	6925,7
2D	1160,9	2146,7	4418,2	7983,2
REF I Mapei	54,9	87,8	114,4	136,4
REF II Mapei	60,4	86,8	108,5	133,3
1B Mapei	26,5	35,9	46,8	60,8
2B Mapei	29,4	54,2	74,4	86,8
1C Mapei	35,9	46,8	60,9	87,4
2C Mapei	26,5	35,9	46,8	71,3
1D Mapei	48,0	84,7	102,3	124,7
2D Mapei	56,4	83,0	94,0	111,2
REF I VS	399,2	rozpad		
REF II VS	657,8	rozpad		
1B VS	68,2	812,2	rozpad	
2B VS	102,3	585,6	rozpad	
1C VS	144,1	764,6	rozpad	
2C VS	185,8	1342,3	rozpad	
1D VS	569,6	rozpad		
2D VS	469,3	rozpad		

kde: $\bar{\rho}_a$... průměrná hodnota poměru celkové hmotnosti odpadu k ploše vystavené působení chemických a rozmrazovacích látek [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]



Graf 7 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení odolnosti proti působení chemických rozmrazovacích látek

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Vzorky, které mají po 100 cyklech odpad vyšší jak $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ označujeme podle normy ČSN P 73 2404 jako nevyhovující. Norma pro prostředí XA3, neudává maximální hodnotu odpadu, ale pro účely diplomové práce byly výsledky porovnávány s výše uvedenou hodnotou.

Z výsledků u vzorků, které nebyly opatřeny nátěrem je patrné, že ani jeden vzorek nevyhověl hodnotě maximálního odpadu. Nejvyšší rezistenci vůči působení chloridu sodného a mrazu vykázal vzorek 1B s hodnotou odpadu $1035,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, což je s ohledem na jemnozrnný charakter zkoušené malty velmi dobrý výsledek. Projevil se zde účinek přídavku 10 % mikrosiliky, díky které došlo k utěsnění struktury cementové matrice, tím ke zvýšení pevností, a to vedlo k snížení průniku agresivních médií do struktury cementové matrice. U vzorku 2B byla výsledná hodnota $3175,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. U receptur REF I, REF II, 1C, 2C, 1D a 2D vyšly hodnoty několikanásobně vyšší oproti výsledku receptury 1B. Hodnoty odpadu se pohybovaly od $4591,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ do $9820,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Nejhorší výsledek byl u receptury REF II. Výsledné hodnoty receptur 1D a 2D byly podobné výsledkům referenčních receptur a nebyl tak zde zaznamenán vliv krystalizační přísady na zvýšení odolnosti proti působení CHRL.

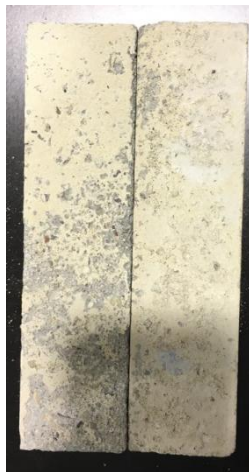
U vzorků opatřených nátěrem lithného vodního skla došlo během zkoušky k rozpadu vzorků všech receptur (obrázek 36). Tento jev mohl být zapříčiněn tím, že během zkoušky došlo k porušení nátěru, voda společně s chemickými rozmrazovacími látkami pronikala do struktury malt a díky nátěru na povrchu nemohla ze vzorku unikát. Při zmrazování tak docházelo k vytváření vysokých krystalizačních tlaků a tím k celkovému porušení struktury a rozpadu vzorků.

Naopak vzorky opatřené hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei vykázaly výborné výsledky odolnosti proti působení CHRL. Použitím nátěru došlo k výraznému snížení velikosti odpadů. Výsledné hodnoty odpadů se pohybovaly od $60,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ do $136,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, což je v porovnání s hodnotami vzorků bez nátěru rozdíl o 94 až 98 %. Nejnižší hodnota $60,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ byla naměřena u vzorku 1B Mapei, což je vynikající výsledek. Dle dosažených výsledků všechny vzorky opatřené nátěrem od společnosti Mapei vyhověly hodnotě maximálního odpadu $1000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ po 100 cyklech a splnily požadavky trvanlivosti dle normy.

Z dosažených výsledků je též patrné, že u všech receptur s cementem CEM I 42,5 R byla naměřena nižší velikost odpadu na rozdíl od receptur s cementem CEM III/A 42,5 N.



Obrázek 33 - Vzorek 1B Mapei po 100 cyklech



Obrázek 34 - Vzorek REF I Mapei po 100 cyklech



Obrázek 35 - Vzorek 1B po 100 cyklech



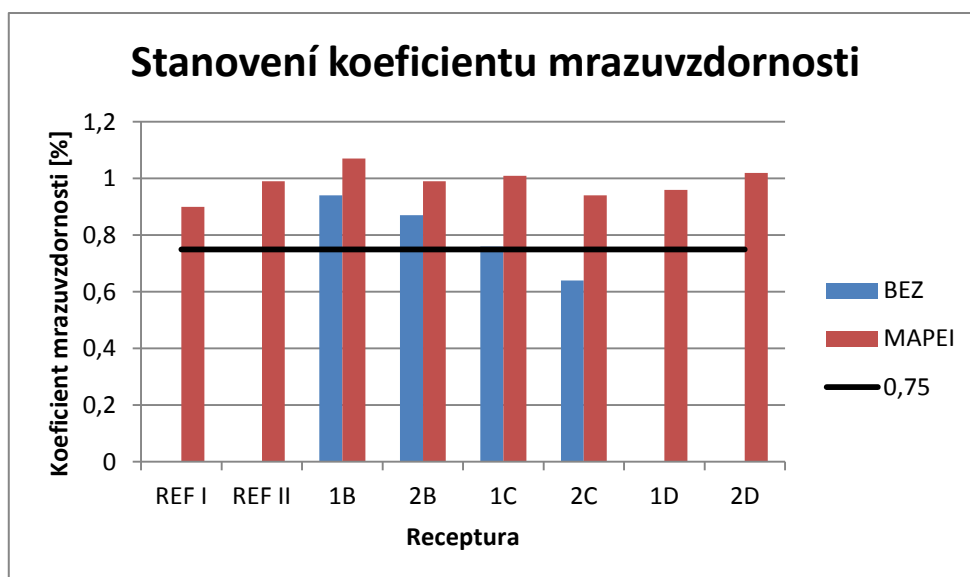
Obrázek 36 - Rozpadlé vzorky s nátěrem vodního skla

8.6 STANOVENÍ ODOLNOSTI MALT PROTI PŮSOBENÍ MRAZU A SILÁŽNÍCH ŠTÁV

U vzorků opatřených nátěrem lithným vodním sklem a u vzorků REF I, REF II, 1D a 2D došlo při provádění zkoušky k rozpadu, z tohoto důvodu nebyly jejich výsledky zahrnuty.

Tabulka 14 - Výsledné hodnoty odolnosti proti působení mrazu a silážních štáv

Označení vzorku	Výsledné hodnoty sledovaných vlastností				
	Doba	Ø f_f [MPa]	Ø f_c [MPa]	Koeficient mrazuvzdornosti z f_f [%]	Úbytek hmotnosti [%]
1B	před	10,5	55,1	0,94	- 0,86
	po	9,9	50,2		
2B	před	8,7	40,9	0,87	- 3,07
	po	7,6	39,8		
1C	před	9,0	44,4	0,76	- 1,29
	po	6,8	40,1		
2C	před	8,9	42,7	0,64	- 4,33
	po	5,7	34,5		
REF I Mapei	před	6,9	36,7	0,90	- 0,16
	po	6,2	36,8		
REF II Mapei	před	6,5	32,8	0,99	- 0,86
	po	6,4	33,4		
1B Mapei	před	10,5	55,1	1,07	- 0,10
	po	11,2	57,8		
2B Mapei	před	8,7	40,9	0,99	-0,22
	po	8,6	37,2		
1C Mapei	před	9	44,4	1,01	- 0,19
	po	9,1	40,3		
2C Mapei	před	8,9	42,7	0,94	- 0,96
	po	8,4	41,8		
1D Mapei	před	7,1	32,8	0,96	- 0,49
	po	6,8	33,8		
2D Mapei	před	6,6	31,2	1,02	- 0,40
	po	6,7	32,1		



Graf 8 - Grafické vyhodnocení koeficientu mrazuvzdornosti při působení mrazu a silážních šťáv

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

U vzorků opatřených nátěrem lithného vodního skla došlo během zkoušky k rozpadu vzorků všech receptur. Tento jev mohl být zapříčiněn tím, že stejně jako během zkoušky odolnosti proti CHRL došlo k porušení nátěru, voda společně se silážní šťávou pronikala do struktury malt a díky nátěru na povrchu nemohla ze vzorku unikát. Při zmrazování tak docházelo k vytváření vysokých krystalizačních tlaků a tím k celkovému porušení struktury a rozpadu vzorků. K rozpadu vzorků při této zkoušce došlo i u vzorků bez nátěru, a to u REF I, REF II, 1D, 2D, kde působením mrazu a silážní šťávy došlo k popraskání vzorků. Z tohoto důvodu se nebylo dále zabýváno jejich výsledky.

U vzorků opatřených nátěrem od společnosti Mapei se potvrdily výborné výsledky ze zkoušky odolnosti proti CHRL. Hodnoty koeficientů mrazuvzdornosti se pohybovaly od 0,90 do 1,07 %. Nejlepšího výsledku dosáhl vzorek 1B Mapei, kde výsledná hodnota koeficientu mrazuvzdornosti byla výše zmíněných 1,07 %.

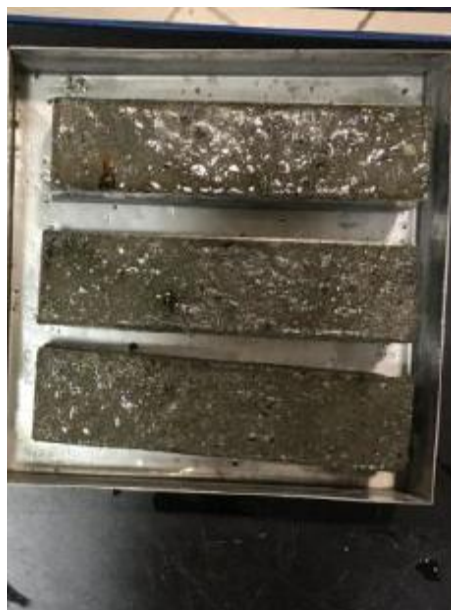
Ze vzorků bez nátěru měl nejlepší výsledek vzorek 1B (10 % mikrosiliky), u kterého byl výsledný koeficient mrazuvzdornosti 0,97 %. Vzorek 1C s hodnotou 0,76 % jen těsně vyhověl požadavku normy pro betony ČSN 731322 na minimální součinitel mrazuvzdornosti 0,75 %. Vzorek 2C tomuto požadavku nevyhověl o 0,11 %.

Úbytky hmotností se u vzorků opatřených nátěrem Mapei pohybovaly od 0,10 do 0,96 %. Nejnižší úbytek hmotnosti byl naměřen u vzorku 1B Mapei. Ze vzorků bez nátěru měl nejvyšší úbytek hmotnosti vzorek 1C, konkrétně 4,33 %.

Nejlepšího výsledku z receptur bez nátěru dosáhl vzorek 1B s hodnotou úbytku hmotnosti 0,86 %.



Obrázek 37 - Rozpadlé vzorky receptury REF I a REF II po 75 cyklech



Obrázek 38 - Vzorky receptury 1B po 100 cyklech



Obrázek 39 - Vzorky receptury 1D a 2D, opatřené nátěrem Mapei po 100 cyklech



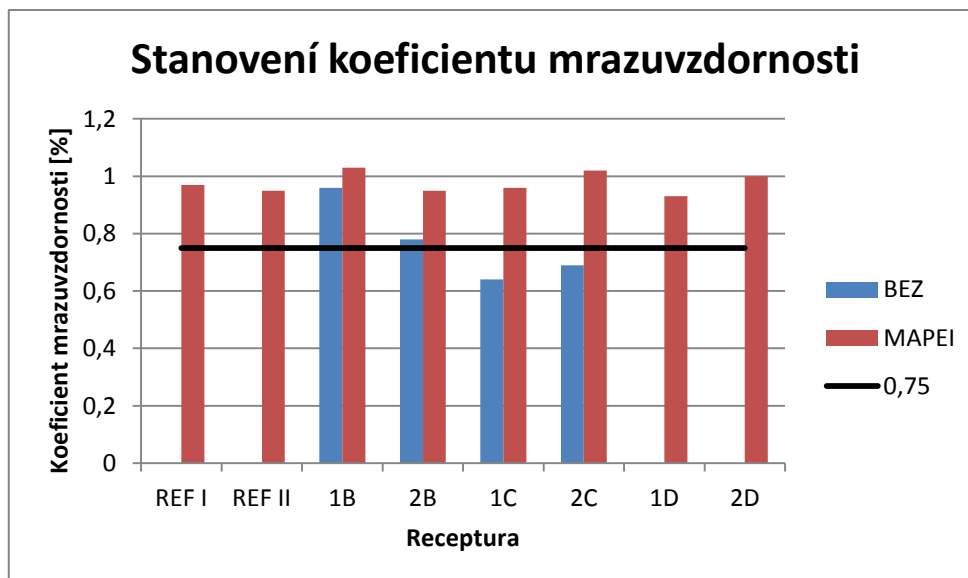
Obrázek 40 - Vzorek receptury REF I opatřený nátěrem Mapei po 100 cyklech

8.7 STANOVENÍ ODOLNOSTI MALT PROTI PŮSOBENÍ MRAZU A ROZTOKU KYSELINY CHLOROVODÍKOVÉ (NÍZKÉ pH)

U vzorků opatřených nátěrem lithným vodním sklem a u vzorků REF I, REF II, 1D a 2D došlo při provádění zkoušky k rozpadu, z tohoto důvodu nebyly jejich výsledky zahrnuty.

Tabulka 15 - Výsledné hodnoty odolnosti proti působení mrazu a velmi nízkého pH (roztok HCl)

Označení vzorku	Výsledné hodnoty sledovaných vlastností				
	Doba	σf_f [MPa]	σf_c [MPa]	Koeficient mrazuvzdornosti z f_f [%]	Úbytek hmotnosti [%]
1B	před	10,5	55,1	0,96	- 1,02
	po	10,1	52,4		
2B	před	8,7	40,9	0,78	- 3,37
	po	6,8	36,3		
1C	před	9,0	44,4	0,64	- 1,29
	po	5,8	31,3		
2C	před	8,9	42,7	0,69	- 4,56
	po	6,1	28,8		
REF I Mapei	před	6,9	36,7	0,97	- 0,20
	po	6,7	34,8		
REF II Mapei	před	6,5	32,8	0,95	- 0,19
	po	6,2	34,9		
1B Mapei	před	10,5	55,1	1,03	- 0,11
	po	10,8	60,8		
2B Mapei	před	8,7	40,9	0,95	- 0,23
	po	8,3	40,3		
1C Mapei	před	9,0	44,4	0,96	- 0,25
	po	8,6	43,4		
2C Mapei	před	8,9	42,7	1,02	- 0,99
	po	9,1	43,6		
1D Mapei	před	7,1	32,8	0,93	- 0,52
	po	6,6	31,4		
2D Mapei	před	6,6	31,2	1,0	- 0,49
	po	6,6	29,8		



Graf 9 - Grafické vyhodnocení koeficientu mrazuvzdornosti při působení mrazu a nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

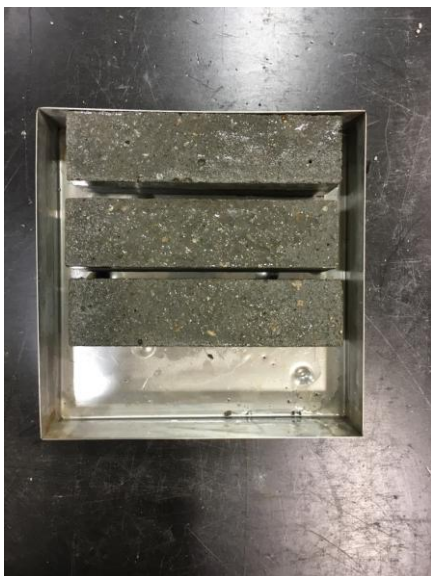
Stejně jako u zkoušky odolnosti proti mrazu v prostředí silážních šťáv, došlo i zde k rozpadu stejných vzorků. Z tohoto důvodu se nebylo dále zabýváno jejich výsledky.

U vzorků opatřených nátěrem od společnosti Mapei se při této zkoušce opět potvrdily výborné výsledky ze zkoušky odolnosti proti CHRL. Hodnoty koeficientů mrazuvzdornosti vypočítaných z pevností v tahu za ohybu v prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) se pohybovaly od 0,93 do 1,03 %. Nejlepšího výsledku dosáhl stejně jako při zkoušce v silážní šťávě vzorek 1B Mapei, kde výsledná hodnota koeficientu mrazuvzdornosti byla 1,03 %.

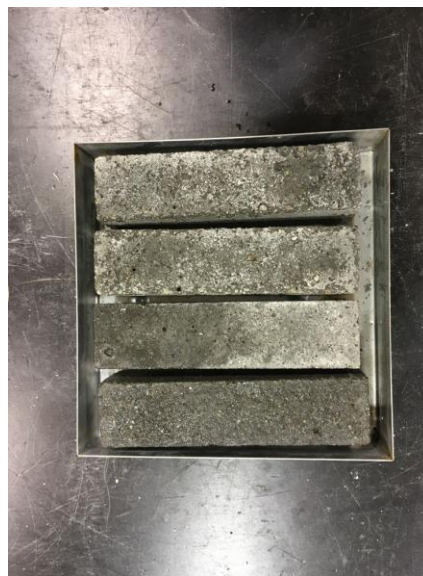
Ze vzorků bez nátěru měl nejlepší výsledek opět vzorek 1B, u kterého byl výsledný koeficient mrazuvzdornosti 0,96 %. Vzorek 2B vyhověl požadavku normy pro betony ČSN 731322 na minimální součinitel mrazuvzdornosti 0,75 % o 0,03 %. Vzorek 1C s hodnotou 0,64 % a vzorek 2C s hodnotou 0,69 % požadavku normy nevyhověly.

Úbytky hmotností se u vzorků opatřených nátěrem Mapei pohybovaly od 0,11 do 0,99 %. Nejnižší úbytek hmotnosti byl zaznamenán u vzorku 1B Mapei. Ze vzorků bez nátěru měl nejvyšší odpad vzorek 2C, a to 4,56 %. Nejlepšího výsledku z receptur bez nátěru dosáhl vzorek 1B s hodnotou úbytku hmotnosti 1,02 %.

Vzorek 2C (20 % mikrosiliky) měl největší úbytky hmotnosti i u zkoušky v silážních šťávách a u obou zkoušek nevyhověl požadavku normy na součinitel mrazuvzdornosti 0,75 %.



Obrázek 41 - Vzorky receptury 1B po 100 cyklech



Obrázek 42 - Vzorky receptury 2C po 100 cyklech (nahore dva vzorky bez nátěru, dole dva vzorky s nátěrem Mapei)

8.8 STANOVENÍ VZDUCHOVÉ PROPUSTNOSTI - TORRENT

Na vzorcích, které nebyly opatřeny nátěrem, byla provedena zkouška stanovení vzduchové propustnosti krycí vrstvy po 28 a 60 dnech zrání.

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty stanovení vzduchové propustnosti po 28 dnech

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledované vlastnosti po 28 dnech	
	$\bar{\phi} k_T [10^{-16} \text{ m}^2]$	Index kvality
REF I	0,212	3
REF II	0,472	3
1B	0,009	1
2B	0,049	2
1C	0,075	2
2C	0,165	3
1D	0,093	2
2D	0,072	2

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z výsledků zkoušky vzduchové propustnosti po 28 dnech je patrné, že nejlepší kvalita krycí vrstvy byla u vzorku 1B, jehož výsledek odpovídal indexu kvality 1. Výsledky ostatních receptur spadaly do rozmezí indexu kvality číslo 2, které je od 0,01 - 0,1 $k_T [10^{-16} \text{ m}^2]$, s výjimkou vzorků REF I a REF II a 2C. Nejhoršího

výsledku dosáhl vzorek REF II, u kterého byla výsledná hodnota součinitele k_T 0,472 a byl tak společně se vzorkem REF I a 2C zařazen do indexu kvality 3.

Tabulka 17 - Naměřené hodnoty stanovení vzduchové propustnosti po 60 dnech

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledované vlastnosti po 60 dnech	
	$\bar{\phi} k_T [10^{-16} \text{ m}^2]$	Index kvality
REF I	0,085	2
REF II	0,176	3
1B	0,005	1
2B	0,021	2
1C	0,043	2
2C	0,124	3
1D	0,018	2
2D	0,045	2

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

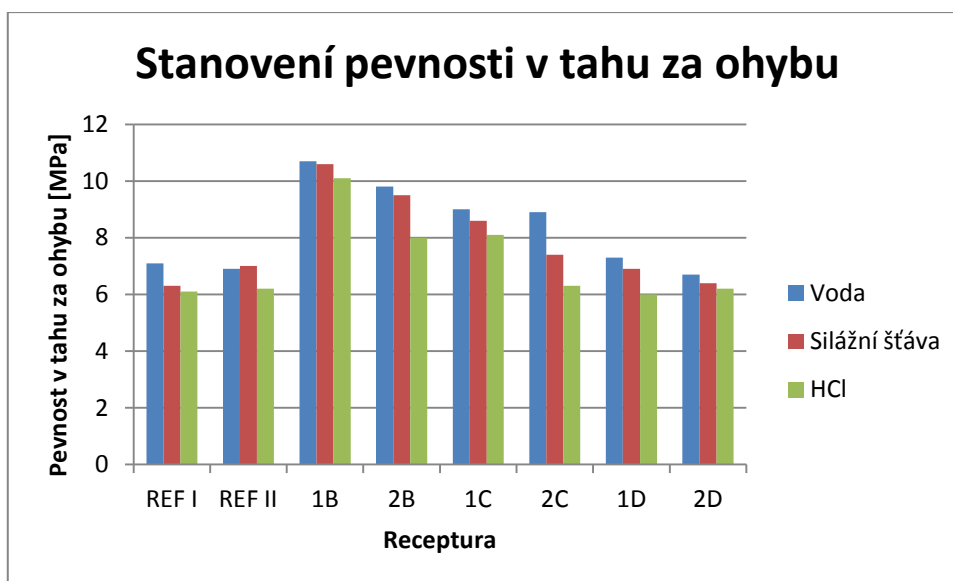
Z výsledků vzduchové propustnosti po 60 dnech je zřejmé, že nejlepší kvalita krycí vrstvy se potvrdila stejně jako při zkoušce po 28 dnech u vzorku 1B, kdy hodnota součinitele k_T klesla na 0,005 a u této receptury to jen potvrzuje její velice dobré dosavadní výsledky. Je potřeba konstatovat, že u všech receptur došlo po 60 dnech ke snížení vzduchové propustnosti vzhledem ke zkoušce po 28 dnech a je zde patrný pozitivní vliv použitých přísad a příměsí na zvýšení hutnosti cementové matrice. U receptury 1D došlo k poklesu z hodnoty 0,093 na 0,018 a poukazuje to tak na působení krystalizační přísady XYPEX, kdy došlo k vytvoření krystalů a tím k zaplnění struktury. Výsledky ostatních receptur, kromě receptury REF II a 2C se pohybují v rozmezí od 0,021 do 0,085 a spadají tak do indexu kvality číslo 2. U vzorku REF II vyšla hodnota vzduchové propustnosti 0,176 a u vzorku 2C 0,124, to znamená, že se jedná o stupeň kvality číslo 3.

8.9 STANOVENÍ PEVNOSTNÍCH CHARAKTERISTIK NA VZORCÍCH ULOŽENÝCH 150 DNÍ V CHEMICKY AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

8.9.1 VÝSLEDKY VZORKŮ BEZ NÁTĚRU

Tabulka 18 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků bez nátěru při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností					
	Voda		Silážní šťáva		HCl	
	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]
REF I	7,1	34,8	6,3	36,3	6,1	28,8
REF II	6,9	33,8	7,0	38,8	6,2	31,9
1B	10,7	55,4	10,6	54,4	10,1	51,9
2B	9,8	41,9	9,5	42,6	8,0	41,9
1C	9,0	45,3	8,6	46,2	8,1	42,5
2C	8,9	43,7	7,4	42,3	6,3	39,4
1D	7,3	35,1	6,9	36,1	6,0	28,5
2D	6,7	37,2	6,4	37,7	6,2	30,6



Graf 10 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt bez nátěru po dobu 150 dní

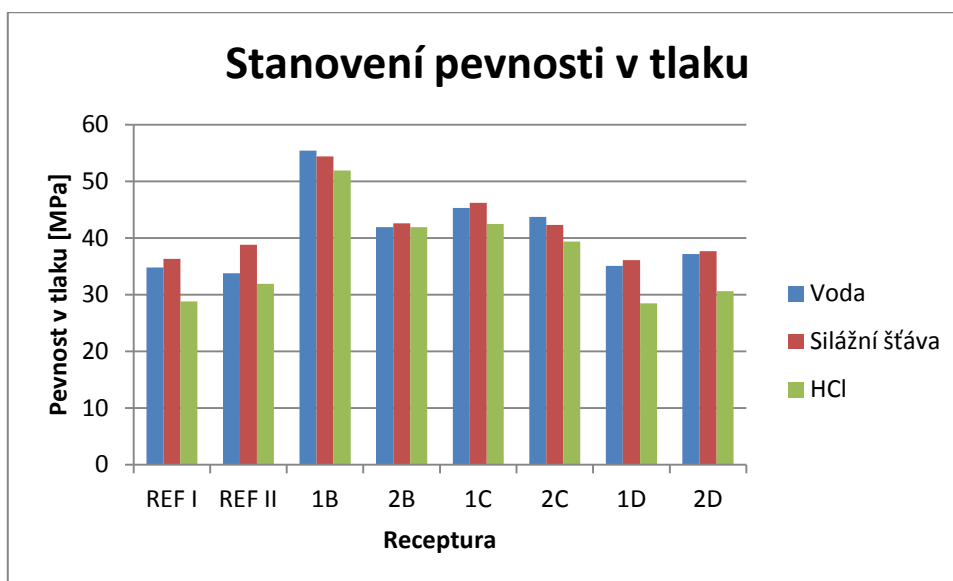
DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z dosažených výsledků a vyneseno grafu je patrné, že u vzorků, které byly vystavené působení agresivního prostředí došlo ke snížení pevností v tahu za ohybu vůči referenčním vzorkům uložených ve vodě. S výjimkou u receptury REF II vyjmuté z prostředí silážních šťáv, kde byla pevnost v tahu za ohybu

srovnatelná s referenčním vzorkem. Při pohledu na graf je zřejmé, že výraznější vliv na snižování pevností v tahu za ohybu mělo prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové). Nejmarkantnější rozdíl byl zaznamenán u vzorku 2C (20 % mikrosiliky), kde byl rozdíl v pevnosti v tahu za ohybu o 2,6 MPa nižší oproti referenčnímu vzorku, to je skoro o 30 %. Tuto skutečnost potvrzují i zkoušky ultrazvukovou metodou, kde tento vzorek rovněž nedosahoval dobrých výsledků. Nejvyšší hodnoty 51,9 MPa dosahuje vzorek 1B, kde jeho pevnost v tahu za ohybu i po působení nízkého pH (roztok HCl) převyšuje ostatní zkoušené vzorky. Je zde zaznamenán přínosný vliv mikrosiliky (v dávce 10 %), pro zvýšení rezistence proti působení agresivního prostředí.

Výsledky pevností v tahu za ohybu vzorků REF I, REF II, 1D a 2D mají dle přiloženého grafu podobné průběhy.

Z výsledků je patrné, že u většiny receptur s použitím cementu CEM III/A 42,5 N docházelo k většímu poklesu pevností v tahu za ohybu oproti recepturám s cementem CEM I 42,5 R.



Graf 11 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt bez nátěru po dobu 150 dní

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z výsledných hodnot a vynesení grafu je zjevné, že působením nízkého pH (roztoku HCl) došlo u všech zkoušených vzorků ke snížení pevností v tlaku. Vyšší rozdíly poklesu pevností v tlaku vůči referenčním vzorkům jsou u receptur REF I, 1D a 2D, konkrétně o 18 - 20 %. Jen u receptury 2B nedošlo k poklesu pevnosti v tlaku při působení prostředí s nízkým pH (roztok HCl), výsledná hodnota byla

stejná jako u referenčního vzorku, a to 41,9 MPa. Z výsledků je zřetelné, že u vzorků 1B, 2B, 1C a 2C, u kterých byla použita mikrosilika, dochází k nižším poklesům pevností v tlaku při působení HCl vůči recepturám REF I, REF II, 1D a 2D, u kterých tato příměs použita nebyla. Zhruba o 10 až 15 %.

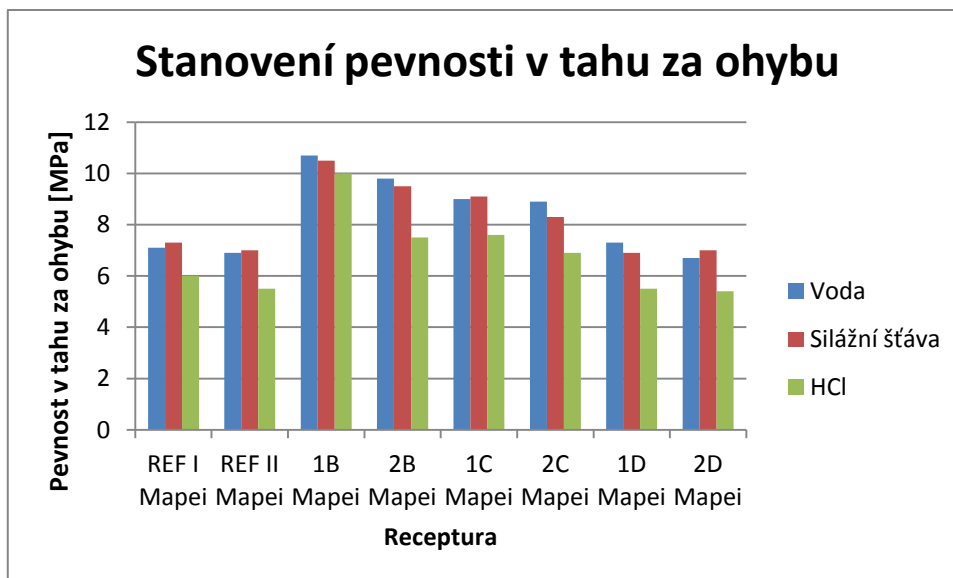
U vzorků uložených v prostředí silážní šťávy došlo u receptur REF I, REF II, 2B, 1C, 1D a 2D dokonce ke zvýšení pevností v tlaku. Nejvyšší rozdíl byl zaznamenán u receptury REF II, kde pevnost v tlaku vůči referenčnímu vzorku stoupla o 18 %. Tento fakt může být zapříčiněn tím, že struktura těchto vzorků byla zahuštěna nově vznikajícími novotvary, které vznikají reakcí portlanditu s kyselinou mléčnou a octovou. U receptury 1B a 2C byly poklesy pevností v tlaku minimální, konkrétně o 1,8 a 3,2 % vůči referencím.

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) má v našem případě výraznější vliv na snížení pevností v tlaku zkoušených vzorků.

8.9.2 VÝSLEDKY VZORKŮ S HYDROFOBIZAČNÍM NÁTĚREM OD SPOLEČNOSTI MAPEI

Tabulka 19 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků s hydrofobizačním nátěrem Mapei při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností					
	Voda		Silážní šťáva		HCl	
	Ø f _f [MPa]	Ø f _c [MPa]	Ø f _f [MPa]	Ø f _c [MPa]	Ø f _f [MPa]	Ø f _c [MPa]
REF I Mapei	7,1	34,8	7,3	32,5	6,0	31,3
REF II Mapei	6,9	33,8	7,0	30,2	5,5	29,4
1B Mapei	10,7	55,4	10,5	54,2	10,0	53,9
2B Mapei	9,8	41,9	9,5	42,8	7,5	39,7
1C Mapei	9,0	45,3	9,1	42,3	7,6	40,6
2C Mapei	8,9	43,7	8,3	42,5	6,9	37,4
1D Mapei	7,3	35,1	6,9	29,4	5,5	27,5
2D Mapei	6,7	37,2	7,0	34,8	5,4	30,1

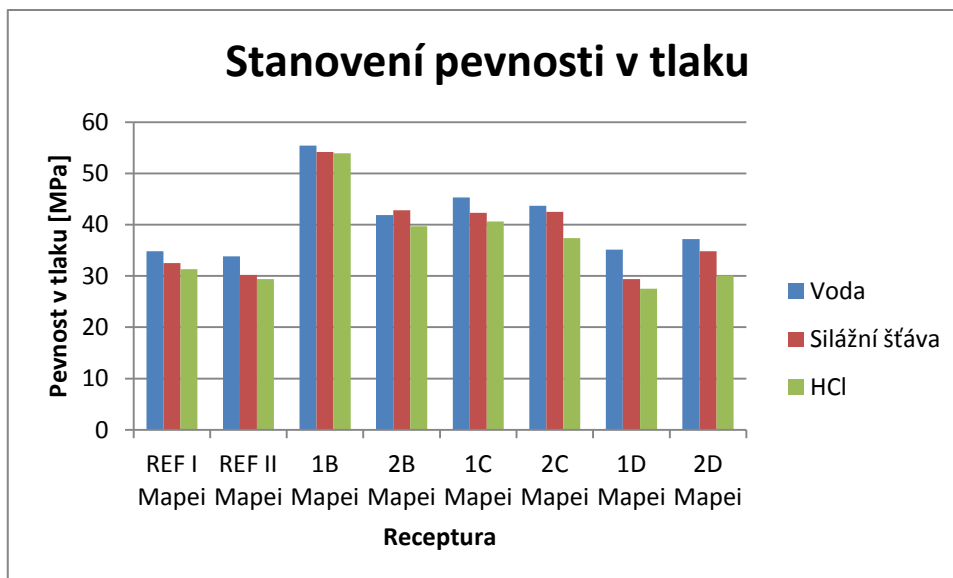


Graf 12 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei po dobu 150 dní

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z vypočítaných hodnot a grafu je zřejmé, že u vzorků opatřených hydrofobizačním nátěrem došlo k výraznému poklesu pevností v tahu za ohybu v prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) vzhledem k referenčním vzorkům, a to průměrně o 10 až 20 %. S výjimkou receptury 1B Mapei, kde je rozdíl nejnižší, konkrétně 6 %. Nejvyšší rozdíl je naopak u receptur 2B Mapei a 1D Mapei, kde rozdíl mezi pevnostmi v tahu za ohybu vůči referencím činí 23 %. Tyto poklesy pevností v tahu za ohybu mohou být zapříčiněné tím, že vzorky se nechaly po uplynutí 28 dní zrání vyschnout a poté byly opatřeny nátěrem, který utěsnil povrchy vzorků proti pronikání vlhkosti. Nemuselo tak dojít k úplné hydrataci všech složek cementové matrice a tím mohlo dojít ke zpomalení růstu pevností u těchto vzorků. Zároveň mohlo vlivem kyseliny chlorovodíkové dojít k narušení nátěru na povrchu vzorků a roztok pak snadněji pronikal do struktury vzorků.

V prostředí silážních šťáv byly pevnosti v tahu za ohybu téměř srovnatelné s referenčními vzorky.



Graf 13 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei po dobu 150 dní

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

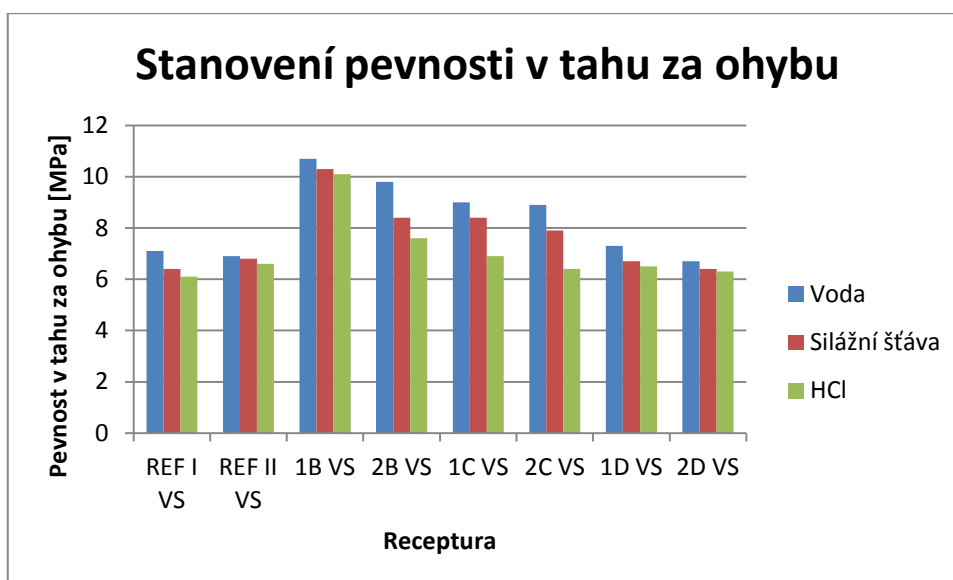
Z výsledných hodnot a grafu je patrné, že působením agresivních prostředí na vzorky opatřené hydrobizačním nátěrem Mapei docházelo k poklesu pevností v tlaku. S výjimkou vzorku 2C Mapei, u kterého byla pevnost v tlaku vyšší, ale jen o 0,9 MPa, což je zanedbatelná hodnota.

Nejnižších poklesů v pevností v tlaku vůči referenčnímu vzorku vykazuje receptura 1B Mapei (10 % mikrosiliky), kde je rozdíl jen 1,5 MPa. Nejvýraznější rozdíl je pak zaznamenán u receptury 1D Mapei, kde je rozdíl mezi výsledkem referenčního vzorku a vzorku uloženého v kyselině chlorovodíkové 7,6 MPa, to je zhruba 22 %. Dosažené výsledky opět potvrdily, že vyšší vliv na snižování pevností v tlaku má prostředí nízkého pH (roztok HCl).

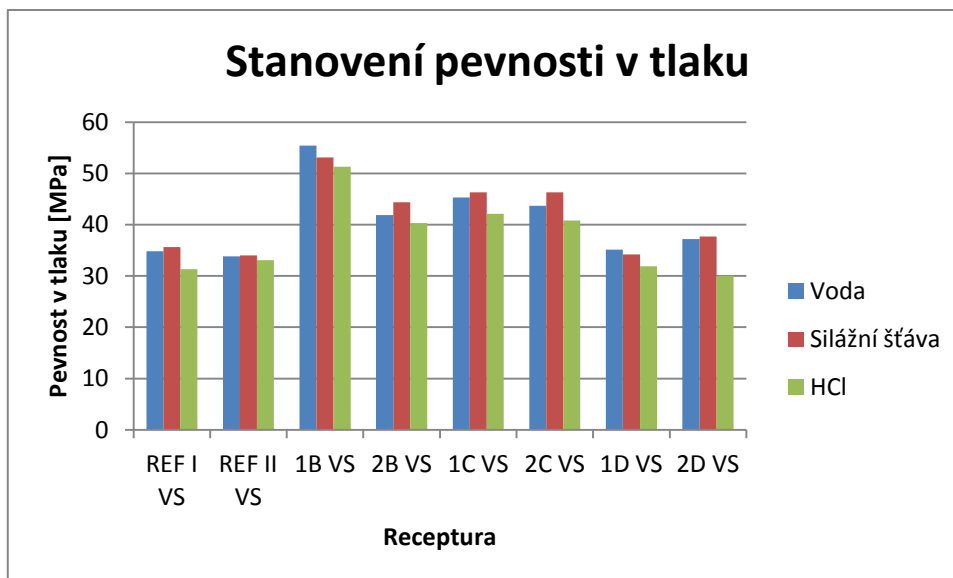
8.9.3 VÝSLEDKY VZORKŮ S NÁTĚREM LITHNÝM VODNÍM SKLEM

Tabulka 20 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků s nátěrem lithným vodním sklem při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností					
	Voda		Silážní šťáva		HCl	
	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]	$\emptyset f_f$ [MPa]	$\emptyset f_c$ [MPa]
REF I VS	7,1	34,8	6,4	35,6	6,1	31,3
REF II VS	6,9	33,8	6,8	34,0	6,6	33,1
1B VS	10,7	55,4	10,3	53,1	10,1	51,3
2B VS	9,8	41,9	8,4	44,4	7,6	40,3
1C VS	9,0	45,3	8,4	46,3	6,9	42,1
2C VS	8,9	43,7	7,9	46,3	6,4	40,8
1D VS	7,3	35,1	6,7	34,2	6,5	31,9
2D VS	6,7	37,2	6,4	37,7	6,3	30,0



Graf 14 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem po dobu 150 dní



Graf 15 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem po dobu 150 dní

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

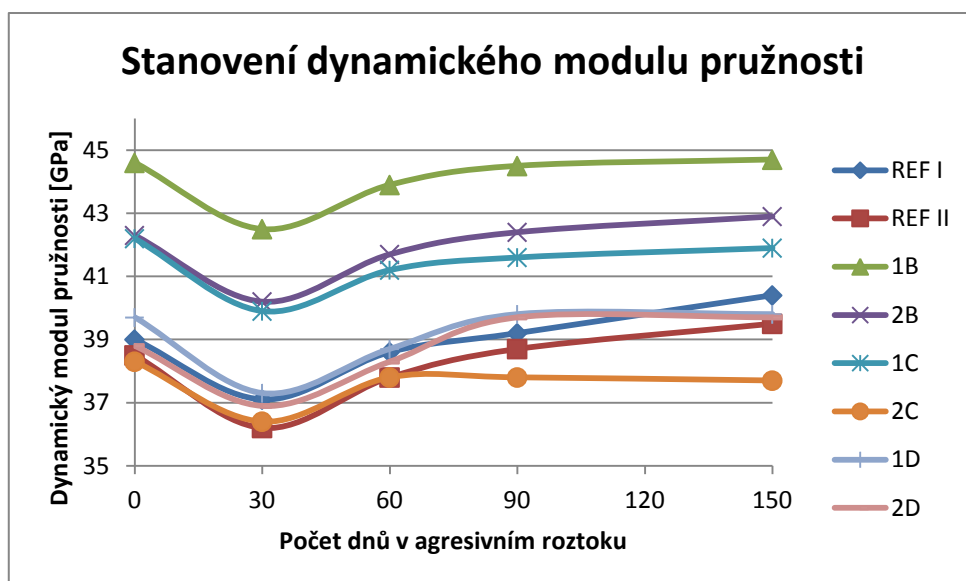
Výsledky pevností v tlaku a v tahu za ohybu naměřené u vzorků opatřených nátěrem lithného vodního skla vykazují podobný průběh jako u referenčních vzorků. Stejně jako u ostatních prováděných zkoušek se potvrdilo, že nátěr lithným vodním sklem nemá v našem případě vliv na zlepšení vlastností zkoušených malt.

8.10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVOU METODOU

8.10.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ Z PROSTŘEDÍ SILÁŽNÍCH ŠTÁV

Tabulka 21 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles bez nátěru z prostředí silážních štáv

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$\emptyset E_0$ [GPa]	$\emptyset V_{L,30}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$\emptyset E_{30}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,60}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$\emptyset E_{60}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,90}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$\emptyset E_{90}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,150}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$\emptyset E_{150}$ [GPa]
REF I	4228	39,0	4110	37,1	4194	38,6	4231	39,2	4295	40,4
REF II	4198	38,5	4082	36,2	4165	37,8	4212	38,7	4257	39,5
1B	4494	44,6	4369	42,5	4458	43,9	4485	44,5	4499	44,7
2B	4398	42,3	4276	40,2	4363	41,7	4390	42,4	4414	42,9
1C	4344	42,2	4224	39,9	4310	41,2	4327	41,6	4346	41,9
2C	4162	38,3	4046	36,4	4129	37,8	4138	37,8	4133	37,7
1D	4260	39,7	4141	37,3	4226	38,7	4274	39,8	4272	39,8
2D	4216	38,8	4099	36,9	4183	38,3	4255	39,7	4257	39,7



Graf 16 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem po dobu 150 dní

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z naměřených hodnot a vynesení grafu je patrná závislost dynamického modulu pružnosti zkoušených malt na době uložení vzorků v agresivním prostředí, konkrétně v silážních šťávách, které mají nízké pH. V prvních 30 dnech dochází ke snižování hodnoty modulu pružnosti, tento jev poukazuje na snižování hutnosti vzorků, které je způsobeno vymýváním cementové matrice agresivními ionty. V pokračujících měřeních po 60 a 90 dnech dochází k růstu dynamického modulu pružnosti u všech zkoušených receptur, to naznačuje zvyšování hutnosti (dochází k zaplňování pórů a kapilár, které zpomalují průchod ultrazvukového impulsu) cementové matrice zkušebních těles, s výjimkou receptury 2C, u které vyšla hodnota dynamického modulu po 60 dnech stejná jako po 90 dnech, a to 37,8 GPa.

Výsledky měření mezi 90 a 150 dny jsou téměř konstantní, nebo se jen lehce zvyšují. Tyto výsledky poukazují na již zahuštěnou strukturu cementového tmelu při působení silážní šťávy, která má nízké pH a dochází tak k reakci s portlanditem a vytváří se ve struktuře nové krystalizační novotvary, které vyplňují cementovou matici.

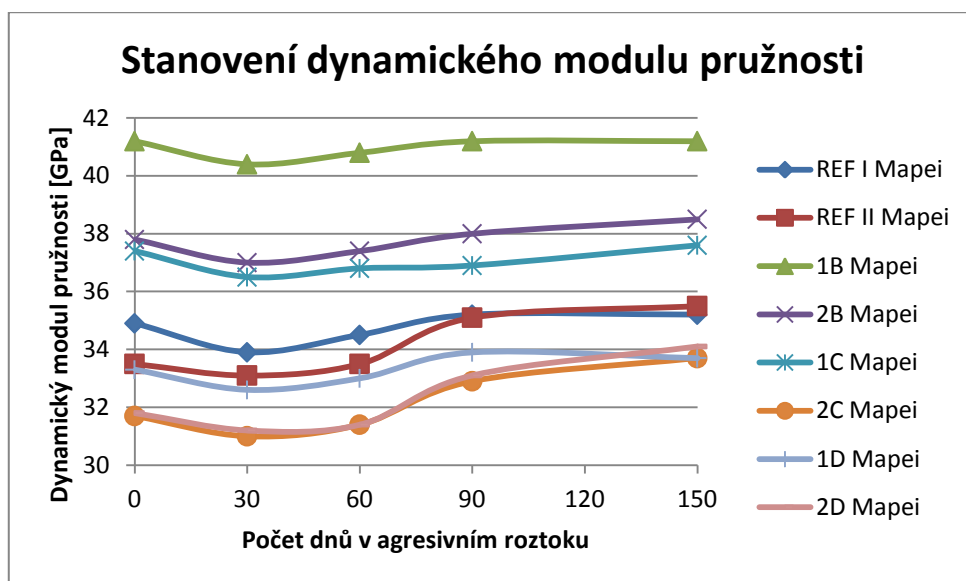
Výrazně nejvyšších hodnot dynamického modulu pružnosti ve všech obdobích dosahuje vzorek 1B s dávkou 10 % mikrosiliky, po 150 dnech se hodnota dynamického modulu pružnosti zastavila na 44,7 GPa, to je o 15,4 % více oproti vzorku 2C.

U receptur 2B a 1C jsou výsledky dynamického modulu pružnosti podobné a vychází zhruba o 5 % nižší oproti vzorku 1B. Vzorky REF I, REFII, 1D a 2D mají hodnoty dynamického modulu pružnosti od 39,5 do 40,4 GPa, to je zhruba o 10 % méně vůči vzorku 1B.

Z výsledků je rovněž patrné, že u receptur, které se lišily rozdílným druhem použitého cementu, dosahují u všech receptur vyšších modulů pružnosti v prostředí silážních šťáv vzorky s cementem CEM I 42,5 R, vůči recepturám, kde byl použit CEM III/A 42,5 N.

Tabulka 22 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s hydrofobizačním nátěrem Mapei z prostředí silážních šťáv

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_0 [GPa]$	$\emptyset V_{L,30} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{30} [GPa]$	$\emptyset V_{L,60} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{60} [GPa]$	$\emptyset V_{L,90} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{90} [GPa]$	$\emptyset V_{L,150} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{150} [GPa]$
REF I Mapei	3988	34,9	3944	33,9	3968	34,5	4011	35,2	4010	35,2
REF II Mapei	3940	33,5	3896	33,1	3920	33,5	4013	35,1	4037	35,5
1B Mapei	4318	41,2	4271	40,4	4297	40,8	4317	41,2	4318	41,2
2B Mapei	4146	37,8	4100	37,0	4125	37,4	4156	38,0	4181	38,5
1C Mapei	4091	37,2	4047	36,5	4071	36,8	4076	36,9	4115	37,6
2C Mapei	3789	31,7	3747	31,0	3770	31,4	3861	32,9	3907	33,7
1D Mapei	3908	33,3	3866	32,6	3889	33,0	3941	33,9	3934	33,7
2D Mapei	3808	31,8	3766	31,2	3789	31,4	3886	33,1	3944	34,1



Graf 16 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí silážních štáv na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei v různých časech

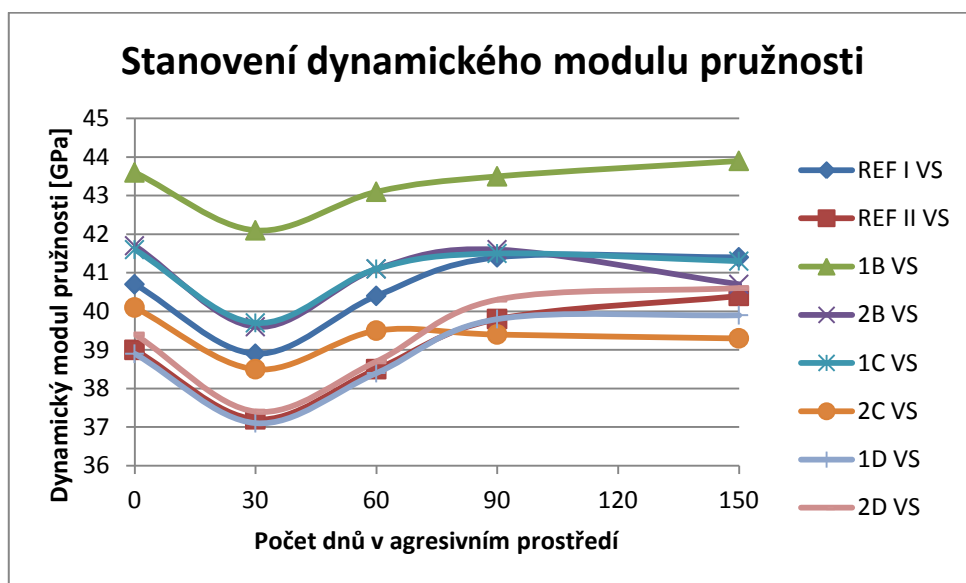
DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

U vzorků, které byly opatřeny hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei jsou výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti zhruba o 10 % nižší vzhledem k výsledkům u vzorků bez nátěru. Tato skutečnost může být zapříčiněná tím, že se vzorky před uložením do agresivního prostředí nechaly vysušit a následně byly opatřeny nátěrem, který utěsnil povrch vzorků a nedocházelo tak k průniku vody, se kterou jsou do struktury vnášeny i agresivní média. Matrice vzorků tak nebyla zaplněna vodou a nově vzniklými krystalizačními novotvory a při měření vycházely nižší rychlosti průchodu ultrazvukového impulzu z důvodu nezahuštěné struktury. Utěsnění povrchu nátěrem se projevilo i na mírnějším poklesu modulu pružnosti po 30 dnech zkoušení oproti referenčním vzorkům.

Nejhorších hodnot zde dosahoval opět vzorek 2C Mapei (20% mikrosiliky), u kterého byl výsledný modul pružnosti 33,7 GPa. Nejvyšší hodnota byla naopak zaznamenána u vzorku 1B Mapei (10 % mikrosiliky), konkrétně 41,2 GPa, to je o 22 % více vůči vzorku 2C Mapei. U vzorků 2B Mapei a 1C Mapei byl výsledný dynamický modul pružnosti o zhruba 8 % nižší oproti vzorku 1B Mapei. U vzorků REF I Mapei, REF II Mapei a 2D Mapei se hodnoty modulu pružnosti pohybovaly od 34 do 36 GPa, to je o 14 až 22 % méně oproti vzorku 1B Mapei.

Tabulka 23 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s nátěrem lithným vodním sklem z prostředí silážních šťáv

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_0$ [GPa]	$\emptyset V_{L,30}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{30}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,60}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{60}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,90}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{90}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,150}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{150}$ [GPa]
REF I VS	4310	40,7	4211	38,9	4284	40,4	4346	41,4	4346	41,4
REF II VS	4230	39,0	4134	37,2	4205	38,5	4272	39,8	4305	40,4
1B VS	4444	43,6	4342	42,1	4417	43,1	4448	43,7	4455	43,9
2B V2	4342	41,7	4243	39,6	4316	41,1	4346	41,6	4303	40,7
1C VS	4329	41,6	4230	39,7	4303	41,1	4326	41,5	4311	41,3
2C VS	4247	40,1	4150	38,5	4222	39,5	4220	39,4	4216	39,3
1D VS	4223	38,9	4127	37,1	4198	38,4	4272	39,8	4278	39,9
2D VS	4231	39,4	4134	37,4	4206	38,7	4288	40,3	4305	40,6



Graf 17 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí silážních šťáv na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem v různých časech

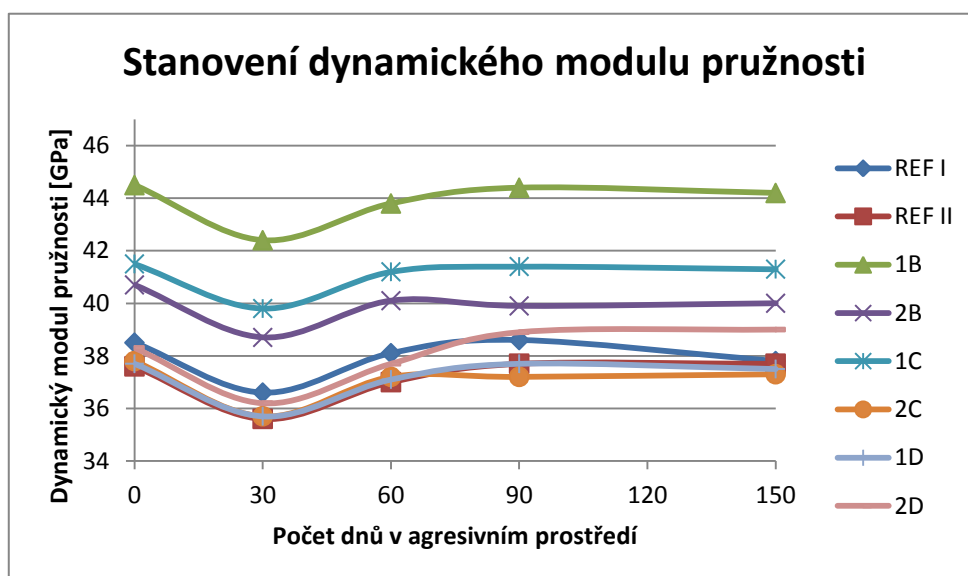
DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

U vzorků opatřených nátěrem lithného vodního skla jsou průběhy výsledků dynamických modulů pružnosti podobné jako u referenčních receptur. Nátěr lithným vodním sklem nemá dle dosažených hodnot vliv na výsledky měření rychlosti průchodu ultrazvukových vln.

8.10.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ Z PROSTŘEDÍ NÍZKÉHO pH

Tabulka 24 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles bez náteru z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_0$ [GPa]	$\emptyset V_{L,30}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{30}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,60}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{60}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,90}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{90}$ [GPa]	$\emptyset V_{L,150}$ [m·s ⁻¹]	$\emptyset E_{150}$ [GPa]
REF I	4206	38,7	4090	36,6	4173	38,1	4196	38,6	4154	37,8
REF II	4154	37,6	4039	35,6	4121	37,0	4159	37,7	4161	37,7
1B	4490	44,5	4365	42,1	4454	43,8	4480	44,4	4471	44,2
2B	4301	40,7	4182	38,5	4267	40,1	4258	39,9	4265	40,0
1C	4158	38,4	4043	36,3	4308	41,2	4316	41,4	4315	41,3
2C	4137	37,8	4022	35,7	4104	37,2	4105	37,2	4106	37,3
1D	4161	37,7	4045	35,7	4128	37,1	4161	37,7	4149	37,5
2D	4181	38,3	4065	36,2	4148	37,7	4215	38,9	4218	39,0



Graf 18 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) na vzorky malt bez náteru v časech různých časech

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z naměřených hodnot a vynesení grafu je zřejmá závislost dynamického modulu pružnosti zkoušených malt na době uložení v agresivním prostředí, konkrétně nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové), kde se hodnota pH pohybovala od 3,5 do 4,5. Průběh od počátku uložení do agresivního prostředí doby 60 dní je podobný jako u silážních šťáv. Po prvních 30 dnech dochází

k poklesu modulu pružnosti, což má za následek působení agresivních iontů, které vymývají cementovou matici a snižují tak její hutnost. V období mezi 60 a 90 dnem zkoušení dochází u všech receptur k nárůstu modulu pružnosti, to poukazuje na zvyšování hutnosti struktury matrice vlivem zaplňování pórů a kapilár.

Mezi 90 a 150 dnem zkoušení jsou hodnoty dynamického modulu pružnosti téměř konstantní, u některých vzorků dokonce mírně klesají. K tomu dochází proto, že portlandit reaguje s kyselinou chlorovodíkovou a touto reakcí vzniká chlorid vápenatý (CaCl_2), tedy vysoce rozpustná sůl, která má za následek rozrušování struktury matrice. Tomu odpovídá snižování dynamického modulu pružnosti z důvodu nižší rychlosti průchodu ultrazvukového impulzu zkoušenými vzorky.

Nejvyššího dynamického modulu dosahuje po 150 dnech vzorek 1B, a to 44,2 GPa. Receptury 1C a 2B měly hodnoty modulu pružnosti zhruba o 6 % nižší.

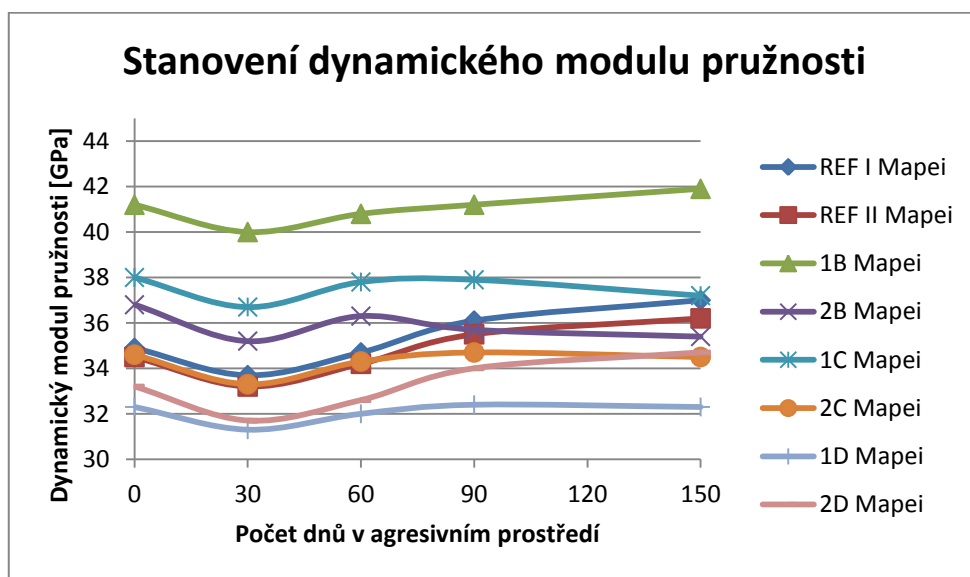
Receptury REF I, REFII, 2C, 1D a 2D vykazovaly po 150 dnech podobné hodnoty dynamického modulu pružnosti, který se pohyboval od 37,3 do 39,0 GPa. Nejnižší hodnota byla zaznamenána u receptury 2C, a to výše zmíněných 37,3 GPa. To je o 16 % nižší hodnota oproti vzorku 1B.

Stejně jako ve výsledcích z prostředí silážních šťáv dosahovaly vyšších modulů pružnosti vzorky s cementem CEM I 42,5 R, vzhledem k vzorkům s cementem CEM III/A 42,5 N.

Z dosažených výsledků je patrné, že kyselina chlorovodíková působí na vzorky agresivněji než silážní šťávy.

Tabulka 25 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s hydrofobizačním nátěrem Mapei z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_0 [GPa]$	$\emptyset V_{L,30} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{30} [GPa]$	$\emptyset V_{L,60} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{60} [GPa]$	$\emptyset V_{L,90} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{90} [GPa]$	$\emptyset V_{L,150} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{150} [GPa]$
REF I Mapei	3998	34,9	3918	33,7	3978	34,7	4058	36,1	4111	37,0
REF II Mapei	3980	34,5	3901	33,2	3960	34,2	4034	35,5	4073	36,2
1B Mapei	4316	41,2	4252	40,0	4295	40,8	4317	41,2	4356	41,9
2B Mapei	4081	36,8	4000	35,2	4061	36,3	4028	35,7	4010	35,4
1C Mapei	4145	38,1	4062	36,6	4125	37,8	4130	37,9	4094	37,2
2C Mapei	3957	34,6	3878	33,3	3937	34,3	3965	34,7	3952	34,5
1D Mapei	3851	32,3	3775	31,3	3832	32,0	3857	32,4	3849	32,3
2D Mapei	3880	33,2	3803	31,7	3861	32,6	3943	34,0	3980	34,7



Graf 19 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (HCl) na vzorky malt opatřené hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei v různých časech

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

U vzorků, které byly opatřeny hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei jsou výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti zhruba o 5 % nižší vůči výsledkům u vzorků bez nátěru. Tato skutečnost může být zapříčiněná nezaplněnou strukturou vzorků vlivem nátěru, jak popisují u předchozích zkoušek.

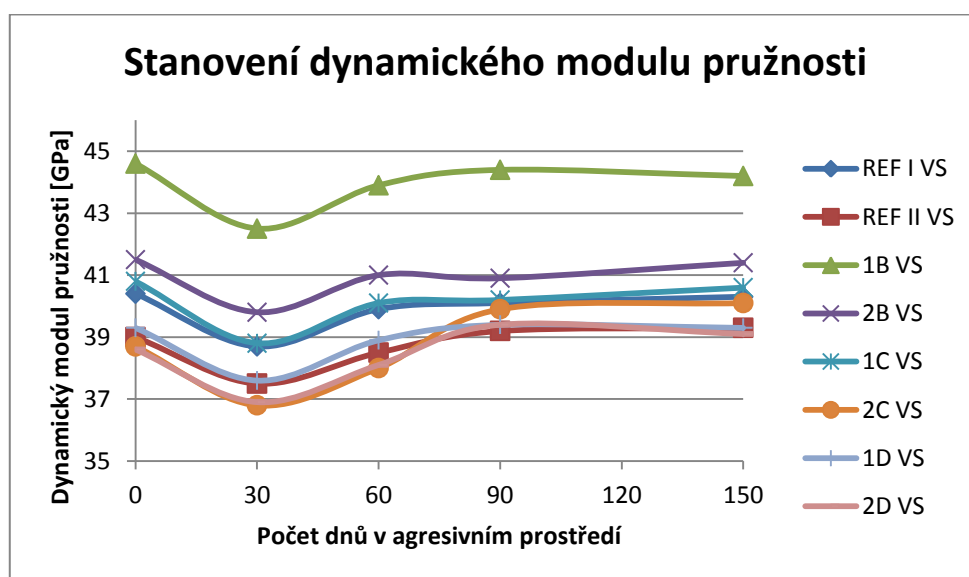
V roztoku kyseliny chlorovodíkové došlo na rozdíl od působení silážních šťáv mezi 90 a 150 dnem k mírnému poklesu dynamického modulu pružnosti, zhruba o 1,5 %. Konkrétně u receptur 2B Mapei, 1C Mapei a 2C Mapei.

K růstu dynamického modulu docházelo v období mezí 90 a 150 dnem u receptur REF I Mapei, REFII Mapei, 1B Mapei a 2D Mapei. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u receptur REF I Mapei a REF II Mapei, a to o 2,5 a 2,2 %.

Nejvyšších hodnot dynamického modulu pružnosti v tomto prostředí dosahoval opět vzorek 1B Mapei (10 % mikrosiliky), u kterého byla výsledná hodnota po 150 dnech vyšší o 11 až 23 % vůči ostatním recepturám, u kterých se výsledná hodnota dynamického modulu pružnosti pohybovala od 32,3 do 37,2 GPa.

Tabulka 26 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s nátěrem lithným vodním sklem z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledovaných vlastností									
	Počátek		28 dní		60 dní		90 dní		150 dní	
	$\emptyset V_{L,0} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_0 [GPa]$	$\emptyset V_{L,30} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{30} [GPa]$	$\emptyset V_{L,60} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{60} [GPa]$	$\emptyset V_{L,90} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{90} [GPa]$	$\emptyset V_{L,150} [m \cdot s^{-1}]$	$\emptyset E_{150} [GPa]$
REF I VS	4296	40,4	4202	38,7	4270	39,9	4281	40,1	4290	40,3
REF II VS	4230	39,0	4138	37,5	4205	38,5	4241	39,2	4248	39,3
1B VS	4482	44,6	4384	42,5	4455	43,9	4480	44,4	4473	44,2
2B V2	4343	41,5	4248	39,8	4317	41,0	4313	40,9	4340	41,4
1C VS	4276	40,8	4182	38,8	4250	40,1	4258	40,2	4274	40,6
2C VS	4174	38,7	4083	36,8	4149	38,0	4250	39,9	4261	40,1
1D VS	4248	39,3	4155	37,6	4223	38,9	4252	39,4	4246	39,3
2D VS	4196	38,6	4104	36,9	4171	38,1	4243	39,4	4223	39,1



Graf 20 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (kyseliny chlorovodíkové) na vzorky malt opatřených nátěrem vodním sklem v různých časech

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Vzorky opatřené nátěrem lithného vodního skla vykazují podobné hodnoty výsledků dynamických modulů pružnosti jako referenční vzorky. Jak již zmiňuji výše, nátěr lithným vodním sklem v našem případě neovlivňuje zřetelným způsobem výsledky dynamických modulů pružnosti.

8.11 VIZUÁLNÍ ZHODNOCENÍ VZORKŮ

Po uplynutí 150 dní uložení vzorků v chemicky agresivních prostředích, se na vzorcích provedlo vizuální zhodnocení působení jednotlivých chemikálií.

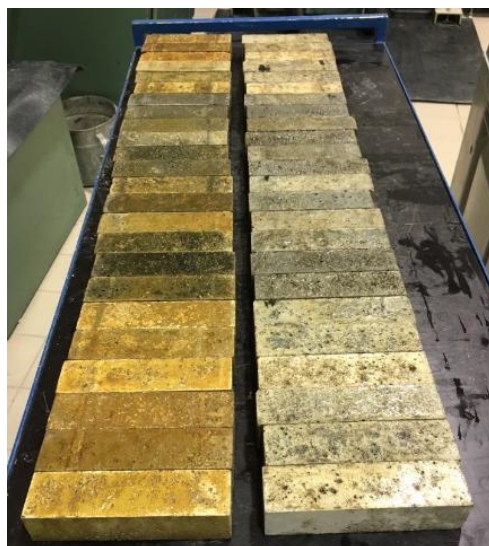
Z přiložených fotografií je zřejmé, že agresivita působení kyseliny chlorovodíkové (HCl) se vůči všem druhům receptur značně projevuje již při jejich vizuálním zhodnocení. U zkušebních vzorků uložených v tomto prostředí ke změně barvy na hnědou (obrázek 43) a k narušování jejich povrchů a hran (obrázek 47). U receptur s mikrosilikou bylo rezavé zbarvení a narušování hran mírnější vzhledem k ostatním recepturám. Z odborné literatury vyplývá, že vzniklé hydratační produkty reagují s kyselinami za vzniku vápenatých solí a amorfní hmoty $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ a $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Z chemického hlediska lze usoudit, že u vzorků uložených v kyselině chlorovodíkové vzniká reakcí s portlanditem korozní produkt $\text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ a louh železa, který má za následek změnu barvy zkušebních vzorků.

V prostředí silážních šťáv, kde na vzorky působí zejména kyselina octová a kyselina mléčná vzorky ztmavly a na jejich povrchu se vytvořily puchýře, nedocházelo však k narušování hran těles po dobu pozorování.

U vzorků opatřených nátěrem od společnosti Mapei, bylo rezavé zbarvení mírnější a nedocházelo zde k tak velkému narušování hran. Vzorky s nátěrem vodního skla odpovídaly svým vzhledem recepturám bez nátěru, a i tato skutečnost dokázala výsledky předchozích zkoušek, že nátěr vodního skla nemá v našem případě pozitivní vliv na ochranu povrchu.



Obrázek 43 - Vzorky vyjmuté z prostředí HCl (vlevo), z prostředí silážních šťáv (uprostřed) a vzorky vyjmuté z vody (vpravo)



Obrázek 44 - Vzorky vyjmuté z prostředí HCl (vlevo) a vzorky vyjmuté z prostředí silážních šťáv (vpravo)



Obrázek 45 - Vzorky receptury REF I vyjmuté z jednotlivých prostředí - HCl (dole), silážní šťávy (uprostřed) a z vody (nahore)



Obrázek 46 - Vzorek 1D vyjmutý z prostředí HCl (levá polovina vzorku otřená hadrem, pro lepší názornost)

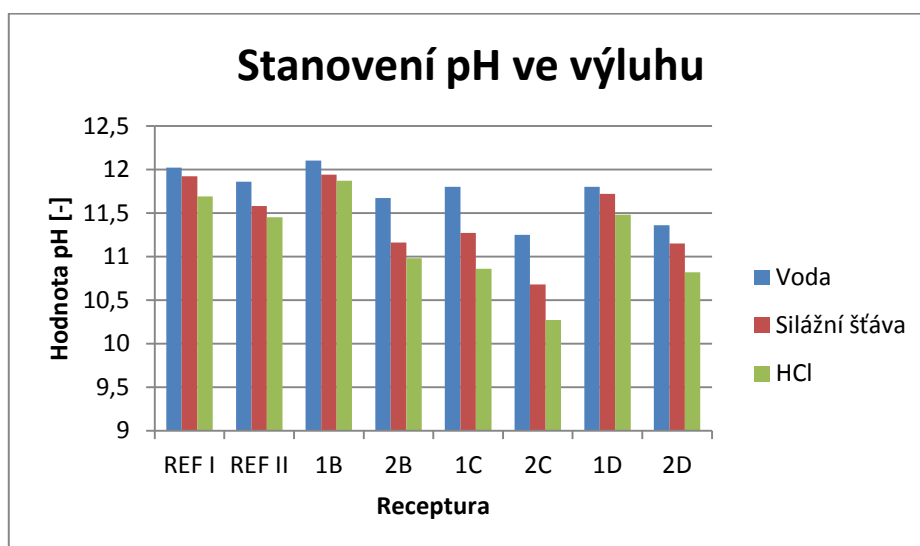


Obrázek 47 - Zkorodované hrany na vzorku REF I vyjmutého z prostředí HCl

8.12 STANOVENÍ pH VE VÝLUHU

Tabulka 27 - Naměřené hodnoty pH ve výluhu

Označení vzorku	Naměřené výsledné hodnoty sledované vlastnosti		
	Voda	Silážní šťáva	HCl
	pH	pH	pH
REF I	12,02	11,92	11,69
REF II	11,86	11,58	11,45
1B	12,10	11,94	11,87
2B	11,67	11,16	10,98
1C	11,80	11,27	10,86
2C	11,25	10,68	10,27
1D	11,80	11,72	11,48
2D	11,36	11,15	10,82



Graf 21 - Graf závislosti hodnoty pH ve výluhu na působení chemicky agresivního prostředí na vzorky

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Na všech recepturách, které nebyly opatřeny nátěrem bylo provedeno stanovení pH ve výluhu. Měření bylo prováděno na vzorcích uložených v silážní šťávě a v roztoku kyseliny chlorovodíkové a hodnoty byly srovnány s výsledky vzorků uložených ve vodě. Změny v pH vodních výluhů lze z přiloženého grafu charakterizovat poklesem u všech sledovaných receptur při působení agresivního prostředí.

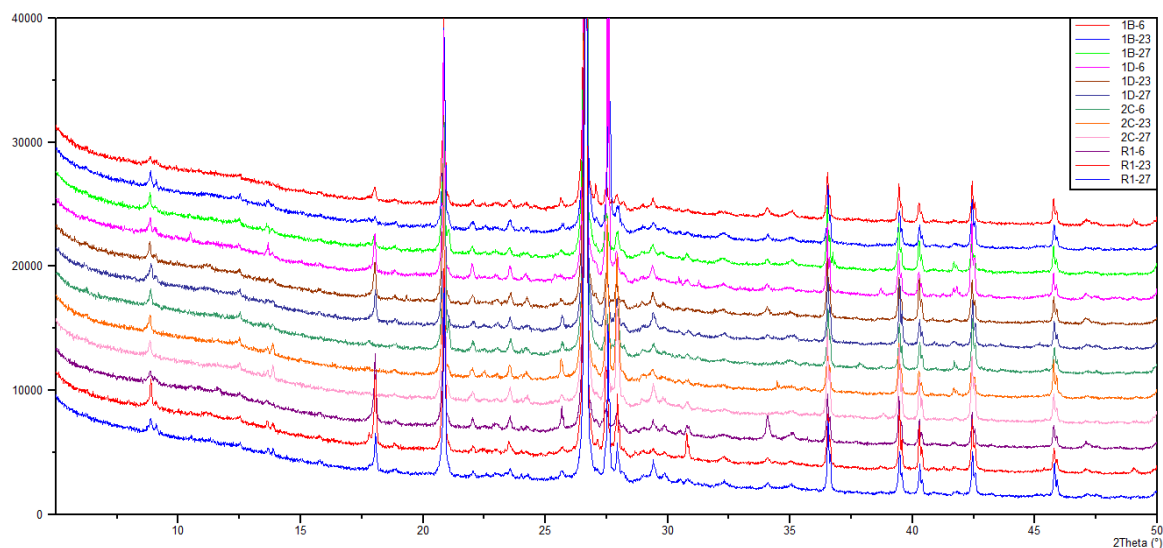
V prostředí kyseliny chlorovodíkové se hodnoty pH snížily o 0,2 - 1,0. Nejvyšší pokles vykazoval vzorek 2C. Nejnižší hodnota poklesu byla naopak zaznamenána u vzorku 1B. Tyto výsledky odpovídají dřívějším poznatkům, kdy vzorek 1C nedosahoval dobrých vlastností a naopak vzorek 2B vykazoval velice dobré výsledky.

Snížení pH u vzorků uložených v prostředí silážních šťáv nebylo tak markantní, hodnoty poklesu se pohybovaly od 0,1 do 0,6.

Tyto skutečnosti poukazují na výsledky předchozích zkoušek, kdy bylo vyzorováno, že roztok kyseliny chlorovodíkové působí na vzorky agresivněji na rozdíl od silážních šťáv. Zároveň je nutné konstatovat, že u žádného vzorku hodnota pH neklesla pod 9,6, takže nebyl zaznamenán vliv na případnou depasivaci výztuže.

8.13 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA

Na vybraných vzorcích, které byly uloženy v různých prostředích byla provedena rentgenová difrakční analýza. Porovnávány byly vzorky z uložení ve vodě (označené číslem 6), z prostředí nízkého pH (označené číslem 23) a ze silážní šťávy (označeny číslem 27).



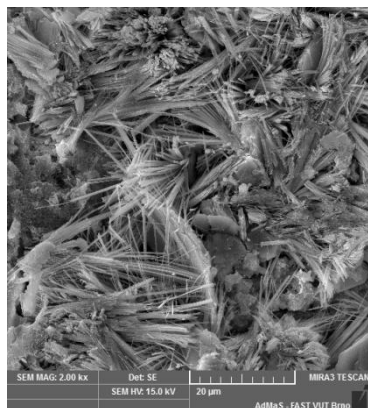
Obrázek 48 - Výsledky rentgenové analýzy

DÍLČÍ VYHODNOCENÍ

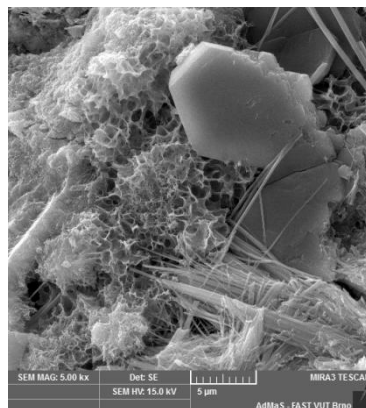
Z obrázku 46 je patrné, že průběh rentgenogramů všech zkoušených receptur je podobný. Rentgenogram žádného vzorku se výrazně neliší od ostatních. Ve výstupech jsou vidět píky křemene, který reprezentuje kamenivo a dosahuje nejvyšší intenzity. Dále jsou ve vzorcích zastoupeny píky portlanditu, CSH gelu a minoritně kalcitu. Bylo by potřeba podrobnějšího a rozsáhlejšího souboru zkoušek pro stanovení přesnějšího složení. Vzhledem k rozsahu a náročnosti práce by mohla být tato problematika úkolem pro další zkoumání. Tělesa od každé receptury jsou nadále ponechána v agresivních prostředích a mineralogický a chemický rozbor tak může a měl by být předmětem dalšího výzkumu.

8.14 SNÍMKY Z ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU

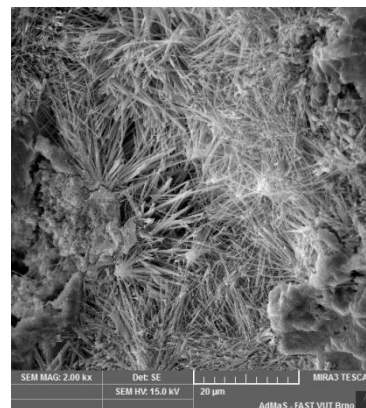
Na vybraných vzorcích byly provedeny snímky jejich mikrostruktury pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.



Obrázek 49 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D s krystalizační přísadou, který byl uložen ve vodním prostředí

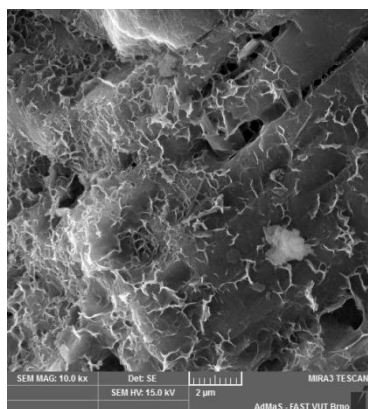


Obrázek 50 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D, který byl uložen v prostředí HCl (na snímku je patrný krystal portlanditu a CSH gely)

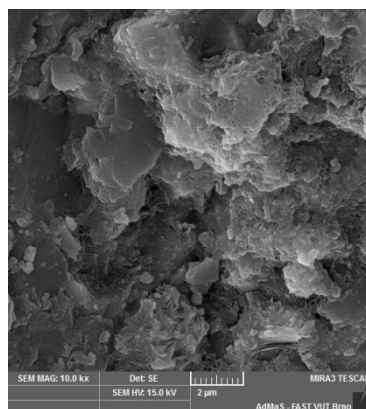


Obrázek 51 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D, který byl uložen v prostředí silážní šťávy

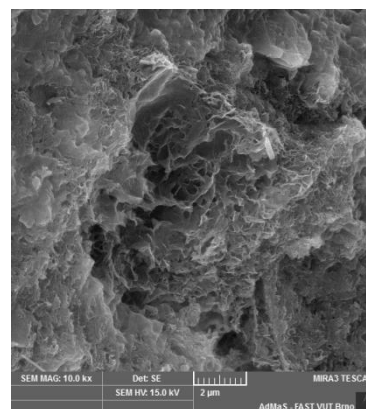
Na obrázku 49 z elektronového mikroskopu jsou ve struktuře jasně zřetelné krystaly vytvořené krystalizační přísadou. Z obrázku 50 je patrné, že v prostředí HCl je krystalů méně vůči referenčnímu vzorku. Na obrázku 51 vzorku z prostředí silážních šťáv jsou krystaly jemnější oproti referenčnímu vzorku.



Obrázek 52 - Snímek mikrostruktury vzorku 1B (10 % mikrosiliky), který byl uložen ve vodním prostředí



Obrázek 53 - Snímek mikrostruktury vzorku 1B (10 % mikrosiliky), který byl uložen v prostředí silážní šťávy



Obrázek 54 - Snímek mikrostruktury vzorku 2C (20 % mikrosiliky), který byl uložen ve vodním prostředí

Na obrázku 54 je patrná velice pórovitá struktura vzorku 2C (20 % mikrosiliky). Na obrázcích 52 a 53 je vidět zahuštěnější struktura vzorku 1B (10 % mikrosiliky).

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při výstavbě budov, na které působí agresivní prostředí jako jsou silážní žlaby, bioplynové stanice a stavby pro ustájení a chov dobytka se uvažuje s dobou využití těchto objektů minimálně na 20 let.

Běžné betony, bez využití přísad a příměsí upravujících vlastností betonu a případně uzavíracích nátěrů by jen těžko odolávaly působení tohoto prostředí. Tyto betony mohou plnit svou funkci maximálně 10 let. V některých případech dochází k povrchovým degradacím již po 2 až 3 letech užívání. V těchto prostředích nepůsobí na konstrukce jen chemicky agresivní prostředí, ale dochází zde i k působení mrazu, zejména u silážních žlabů.

Použitím vhodných přísad, příměsí a uzavíracích nátěrů se dá zvýšit odolnost těchto konstrukcí na 20 až 30 let.

V následující části budou srovnávány receptury REF I, 1B kde je použito 10 % mikrosiliky a receptura 1D, u které je použita krystalizační přísada XYPEX. Výpočet ceny bude proveden na jeden m² betonové desky v silážní jámě o tloušťce 0,3 m. V porovnávání cen není zahrnuto armování, výroba betonu, doprava, uložení čerstvého betonu, případná demolice a odvoz sutě. Je počítáno s cenou pouze za materiál. Životnost stavby bude počítána na 30 let. Zároveň v posuzovaných recepturách není použito hrubé kamenivo, i tak pro účely ekonomického srovnání budou porovnávané receptury označovány jako beton.

Tabulka 28 - Ceny vybraných receptur za 1m³

Surovina	REF I	REF I	1B	1B	1D	1D
	Složení kg·m ⁻³	Cena za 1 m ³	Složení kg·m ⁻³	Cena za 1 m ³	Složení kg·m ⁻³	Cena za 1 m ³
CEM I 42,5 R Hranice	259	543,9	233	489,3	259	543,9
DTK 0-4 mm Tovačov	1750	463,3	1750	463,3	1750	463,3
Voda	196	15,7	196	15,7	196	15,7
Struska Dětmárovice	56	70,0	56	70,0	56	70,0
Popílek Dětmárovice	56	22,3	56	22,3	56	22,3
Plast. př Stachement 2489	5,6	464,8	5,6	464,8	5,6	464,8
Mikrosilika STACHESIL S	-	-	25,9	466,2	-	-
XYPEX C - 1000 NF	-	-	-	-	3,9	780
Cena za 1 m ³ [Kč]	-	1580	-	1992	-	2360

Základní údaje:

- referenční beton - cena za 1m^2 betonové desky = 478 Kč/m²
- beton 1B (10 % mikrosiliky) - cena za 1m^2 betonové desky = 598 Kč/m²
- beton 1D (krystalizační přísada XYPEX) - cena za 1m^2 desky = 708 Kč/m²

Při pohledu na ceny za materiál na 1m^2 pro zhotovení betonové desky bude z dalšího porovnávání vyřazena receptura 1D s krystalizační přísadou, jelikož při zkoušení dosahovala podobných výsledků jako referenční receptura. Z tohoto důvodu se její použití jeví jako neekonomické.

Varianta 1 : Životnost referenčního betonu REF I 10 let, životnost betonu 1B s mikrosilikou 15 let. Celková životnost stavby je uvažována na 30 let.

Pokud by byla životnost referenčního betonu 10 let, muselo by po uplynutí této doby dojít 2 krát ke zhotovení nové betonové desky. U betonu 1B s mikrosilikou s životností 15 let by muselo dojít ke zhotovení nové betonové desky 1 krát.

- cena desky z referenčního betonu: 1434 Kč/m²
- cena desky z betonu 1B: 1196 Kč/m²  **VÝHODNĚJŠÍ**

Bylo zjištěno, že beton 1B se jeví jako ekonomicky přínosnější, nyní bude do výpočtu zařazen hydrobizační nátěr Planiseal WR 80 Cream od společnosti Mapei, který při provádění zkoušek prokazoval velice dobré vlastnosti. V cenách tohoto nátěru bude počítáno, že každých 5 let by muselo docházet k jeho obnovení.

- cena nátěru při spotřebě 0,2 kg/m² je 43 Kč/m²

Varianta 2: Životnost betonu 1B bez nátěru 15 let, životnost betonu 1B opatřeného nátěrem 30 let. Celková životnost stavby je uvažována na 30 let.

Pokud by byla životnost betonu 1B bez nátěru 15 let, muselo by po uplynutí této doby dojít k novému zhotovení betonové desky. U betonu s nátěrem by každých 5 let by docházelo k jeho obnovení.

- cena desky z betonu 1B bez nátěru: 1196 Kč/m²
- cena desky z betonu 1B s nátěrem: 856 Kč/m²  **VÝHODNĚJŠÍ**

Z výsledků je patrné, že použití betonu 1B s 10 % mikrosiliky je ekonomicky výhodnější oproti referenčnímu betonu REF I a to o 238 Kč/m².

Při porovnání betonu 1B bez povrchové úpravy a s povrchovou úpravou se jako výhodnější jeví použití betonu 1B s hydrofobizačním nátěrem Planiseal WR 80 Cream od společnosti Mapei. V tomto případě by bylo použití betonu s nátěrem levnější o 340 Kč/m². Pro uvažovanou životnost stavby 30 let, je tedy nejvýhodnější použít beton 1B s hydrofobizačním nátěrem.

10 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ

V rámci experimentální část se nejprve se prováděly zkoušky v čerstvém stavu. Zkouška sednutí kužele byla u všech receptur stupně konzistence S2. Naměřené objemové hmotnosti se pohybovaly u všech receptur v rozmezí od 2210 do 2250 kg·m⁻³. Objemová hmotnost se zvyšovala u malt s přidavkem mikrosiliky, u kterých docházelo k zahuštění struktury materiálu.

Objemové hmotnosti ve ztuhlém stavu po 60 dnech byly v rozmezí od 2180 do 2220 kg·m⁻³. Nejvyšší hodnoty dosahoval vzorek 1C, u kterého bylo použito 20 % mikrosiliky. U výsledků pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku se dle očekávání potvrdil vyšší nárůst pevností v prvních dnech zrání malt u receptur s cementem CEM I 42,5 R vůči vzorkům, kde byl použit cement CEM III/A 42,5 N. V pozdějších dobách zrání se pevnosti vyrovnávaly. U receptury REF I, REF II, 1D a 2D se pevnosti v tahu za ohybu po 60 dnech pohybovaly v rozmezí od 6,5 MPa do 7,1 MPa. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosahoval po 60 dnech vzorek 1B, zde byl zaznamenán vliv mikrosiliky (10 %) na zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. U receptur 2B, 1C a 2C byly hodnoty pevností v tahu za ohybu od 8,7 do 9,0 MPa. Výsledky pevností v tlaku odpovídaly průběhu výsledků pevností v tahu za ohybu. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosáhl vzorek 1B (10 % mikrosiliky), konkrétně 55,1 MPa. Vzorky REF I, REF II, 1D a 2D měly pevnosti v tlaku po 60 dnech nižší vůči vzorkům 2B, 1C a 2C o 17 až 24 %. Z výsledků je zřejmé, že vzorky, u kterých byla použita mikrosilika dosahují vyšších pevností. Dále z výsledků vyplývá, že krystalizační přísada XYPEX C -1000 NF, která je použita u vzorků 1D a 2D v našem případě neovlivnila výsledky pevností v tlaku a tahu za ohybu vzhledem k referenčním maltám.

Dalšími prováděnými zkouškami, kde se již zkoumal i vliv nátěrů, byly zkoušky kapilární nasákavosti (nasákavost pouze lícové vrstvy) a nasákavosti celkové. U obou provedených zkoušek byly průběhy výsledků podobné. U kapilární nasákavosti se hodnoty u vzorků, které nebyly opatřené nátěrem pohybovaly od 0,99 % do 2,55 % a u nasákavosti celkové od 2,38 % do 5,31 %. V obou případech dosahoval nejvyšší hodnoty vzorek 2C (20 % mikrosiliky). Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorku 1B (10 % mikrosiliky). Z výsledků bylo patrné, že oba použité nátěry snížily hodnoty nasákavostí všech vzorků. U vzorků opatřených hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei, byly výsledky nasákavostí zhruba 2x nižší vůči vzorkům opatřených nátěrem lithného vodního skla.

Následující provedenou zkouškou bylo stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. U vzorků opatřených nátěrem lithného vodního skla došlo během zkoušky k rozpadu vzorků všech receptur. Při zkoušce mohlo dojít k porušení nátěru a voda společně s chemickými rozmrazovacími látkami pronikala do struktury malt, díky nátěru na povrchu nemohla voda ze vzorku unikát a při zmrazování tak docházelo k vytváření vysokých krystalizačních tlaků, to vedlo k celkovému rozpadu vzorků. U vzorků, které nebyly opatřeny nátěrem vykázal nejvyšší odolnost vzorek 1B (10 % mikrosiliky) s hodnotou odpadu $1035,6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, což je s ohledem na jemnozrný charakter zkoušených malt velmi dobrý výsledek. Hodnoty odpadů u ostatních receptur se pohybovaly od $3175,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ do $9380,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. U vzorků opatřených hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei došlo k výraznému snížení velikostí odpadů. Hodnoty odpadů byly v rozmezí od $60,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ do $136,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, což je v porovnání s výsledky vzorků bez nátěru o 94 až 98 % méně. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku 1B Mapei (10 % mikrosiliky).

Dalšími prováděnými zkouškami byly zkoušky stanovení odolnosti proti působení mrazu a silážních šťáv a stanovení odolnosti proti působení mrazu a roztoku kyseliny chlorovodíkové, který má velmi nízké pH (3,5 - 4,5). U vzorků opatřených nátěrem lithným vodním sklem došlo v obou prostředích stejně jako v předchozí zkoušce k rozpadu vzorků. K rozpadu došlo při těchto zkouškách i u vzorků REF I, REF II, 1D a 2D. Průběh výsledků zkoušky byl v obou prostředí podobný. Nejlepších výsledků u vzorků bez nátěru i s nátěrem od společnosti Mapei dosahoval vzorek 1B respektive 1B Mapei (10 % mikrosiliky) a naopak

nejhorší hodnoty byly naměřeny u vzorku 2C respektive 2C Mapei (20 % mikrosiliky).

Jako další byla provedena zkouška stanovení vzduchové propustnosti pomocí přístroje Torrent Permeability Tester. Zkouška byla prováděna po 28 a 60 dnech zrání malt. Dosažené výsledky dokazují snížení hodnot vzduchové propustnosti po 60 dnech vůči výsledkům měření po 28 dnech u všech vzorků. Byl zde zaznamenán vliv použití přísad a příměsí II. typu na zvýšení hutnosti cementové matrice. U receptury 1D, došlo ke snížení vzduchové propustnosti z hodnoty 0,093 na hodnotu 0,018 a poukazuje to tak na působení krystalizační přísady XYPEX. Nejhorších výsledků bylo v obou případech naměřeno u receptury REF II, kde byla hodnota součinitele vzduchové propustnosti 0,175 a vzorek tak byl zařazen společně se vzorkem 2C do indexu kvality 3. Jediný vzorek, který spadl do indexu kvality 1 (nejlepší) byl vzorek 1B (10 % mikrosiliky), u kterého se potvrdily výborné výsledky z předchozích zkoušek.

Následně byly provedeny zkoušky pevnostních charakteristik na vzorcích uložených v agresivních prostředích po dobu 150 dní. Zde bylo zjištěno, že vyšší vliv na snižování pevností má prostředí vytvořené roztokem kyseliny chlorovodíkové (nízké pH), kde docházelo k poklesu pevností v tahu za ohybu a v tlaku průměrně o 10 až 20 %. Největší poklesy pevností v tahu za ohybu vykazovala receptura 2C, kde bylo použito 20 % mikrosiliky a to o 20 - 30 % vůči výsledkům referenčních vzorků. Výsledky pevností v prostředí silážních šťáv byly srovnatelné s referenčními vzorky. K nejmenším poklesům pevností v tlaku docházelo u vzorku 1B, kde bylo použito 10 % mikrosiliky, kde se pevnosti v tlaku pohybovaly okolo 55 MPa. Výsledky referenčních vzorků REF I a REF II byly srovnatelné s výsledky vzorků 1D a 2D, u kterých byla použita krystalizační přísada, u těchto vzorků byly pevnosti v tlaku nižší o 40 - 45 % oproti vzorku 1B.

Další prováděnou zkouškou bylo měření pomocí ultrazvuku, ze kterého bylo možné výpočtem rychlosti průchodu ultrazvukového impulzu (V_L) zkušební vzorkem a dynamického modulu pružnosti betonu (E) určit hutnost struktury ztvrdlých malt. V prvních 30 dnech působení agresivních prostředí docházelo ke snižování hodnot vůči počátečnímu měření. Tyto výsledky poukazovaly na snižování hutnosti malt, které mohlo být zapříčiněno vymýváním cementové matrice agresivními ionty. Mezi 60 a 90 dnem měření docházelo k růstu hodnot dynamického modulu pružnosti, to naznačuje zvyšování hutnosti cementové

matrice zkušebních těles vlivem zaplňování pórů a kapilár, což zpomaluje průchod ultrazvukového impulzu. Mezi 90 a 150 dnem, již nedocházelo k výrazným změnám dynamických modulů pružnosti, výsledky měření byly téměř konstantní. Nejvyšších modulů pružnosti dosahoval vzorek 1B (10 % mikrosiliky), u kterého byly výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti okolo 44 GPa, to je o 5 – 20 % více vůči ostatním vzorkům. Vzorky 1B a 1C měli výsledné hodnoty zhruba o 5 - 10 % nižší. Ostatní receptury dosahovaly podobných výsledků, které byly nižší o 14 - 20 % nižší vzhledem vzorku 1B. Nejhorších výsledků dosahoval vzorek 2C (20 % mikrosiliky), tudíž má nejnižší hutnost cementové matrice. U vzorků opatřených nátěrem od společnosti Mapei byly výsledky dynamického modulu pružnosti o zhruba 10 % nižší oproti vzorkům bez nátěru, vlivem nezahuštěné struktury. Zároveň zde byl zaznamenán nižší pokles modulů pružnosti po prvních 30 dnech měření. Vzorky s nátěrem lithným vodním sklem vykazovaly podobné výsledky jako referenční vzorky. Výsledky dynamických modulů pružnosti měly podobné průběhy a rozdíl v dosažených výsledcích při působení agresivních prostředí nebyl zásadní.

Dále na vzorcích vyjmutých z prostředí silážních šťáv a nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) bylo provedeno vizuální zhodnocení. Agresivita působení kyseliny chlorovodíkové se projevila již při vizuálním hodnocení. U všech vzorků uložených v tomto prostředí došlo ke změně barvy na hnědou a docházelo k narušování hran zkušebních těles. U vzorků s mikrosilikou bylo rezavé zbarvení mírnější vůči ostatním recepturám a nedocházelo k tak velkému narušování hran. Dle poznatků získaných z teoretické části docházelo k reakci hydratačních produktů s kyselinami za vzniku vápenatých solí a amorfni hmoty $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ a $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Z chemického hlediska vznikl reakcí s portlanditem ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) korozní produkt $\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ a louh železa, který má za následek změnu barvy zkušebních vzorků. V prostředí silážních šťáv nedocházelo u vzorků k narušování hran, vzorky měly tmavší zbarvení vůči vzorkům ve vodě a vytvořily se na jejich povrchu puchýře. U vzorků, které byly opatřeny nátěrem od společnosti Mapei, bylo rezavé zbarvení i narušování hran těles mírnější.

Další prováděnou zkouškou bylo stanovení pH ve výluhu. Zkoušení bylo provedeno na vzorcích, které nebyly opatřeny nátěrem. V prostředí silážních šťáv docházelo k poklesu hodnot pH vůči referenčním vzorkům o 0,1 až 0,6. Na vzorcích uložených v prostředí nízkého pH (roztok HCl) byl naměřený vyšší

pokles, konkrétně o 0,2 až 1,0 vzhledem k referenčním vzorkům. Nejnižší hodnota pH ve výluhu byla naměřena u vzorku 2C z prostředí nízkého pH (roztok HCl), konkrétně 10,27. Z dosažených hodnot vyplývá, že agresivněji na vzorky působí prostředí nízkého pH (roztok HCl). U žádného z měřených vzorků neklesla hodnota pH pod 9,6, takže nebyl zaznamenán vliv na případnou depasivaci výztuže.

Z výsledků rentgenových analýz, které byly okrajově provedeny na vybraných vzorcích, nebyly zaznamenány výrazné rozdíly v jejich mineralogickém složení při působení agresivních látek. Na snímcích z rastrovacího elektronového mikroskopu byl patrný rozdíl mezi vzorky 1B a 2C. U vzorku 2C byla vidět velice pórovitá mikrostruktura oproti vzorku 1B. Na snímcích vzorků receptury 1D s krystalizační přísadou XYPEX byly zřetelně viditelné vytvořené krystaly v jejich struktuře, vytvořené působením této přísady. Na vzorcích 1D z uložení chemicky agresivních látek byly patrné jemnější krystaly vůči referenčnímu vzorku, který byl uložen ve vodě.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala studiem možnosti zvýšení trvanlivosti betonů ve vysoce chemicky agresivním prostředí v zemědělství.

V úvodu teoretické části byly popsány vstupní suroviny pro výrobu betonu s ohledem na jeho trvanlivost. Důraz byl kladen zejména na získání informací o jednotlivých druzích přísad a příměsí, které díky svým vlastnostem napomáhají ke zvýšení odolnosti betonů proti působení škodlivých látek. Dalším důležitým tématem teoretické části byl popis a shrnutí znalostí o působení agresivních látek na beton, jako je karbonatace, sulfatace a zejména působení kapalin, které způsobují tři druhy koroze.

Následujícím bodem diplomové práce byl popis objektů vystavených působení chemicky agresivního prostředí, jako jsou silážní žlaby, bioplynové stanice a zemědělské objekty pro ustájení a chov dobytka. V závěru teoretické části byla popsána propustnost betonu, která je nejdůležitějším faktorem při ochraně proti působení agresivních látek. Dále byly popsány způsoby primární a sekundární ochrany, které snižují důsledky působení škodlivých médií.

Poznatky získané v teoretické části diplomové práce sloužily jako vstupní informace pro vypracování části experimentální.

Hlavní cílem experimentální části bylo posouzení vlivu různých druhů cementů, přísad, příměsí a těsnících nátěrů na vlastnosti betonu při působení agresivního prostředí. Zkoušky byly prováděny na cementových maltách.

Celkově bylo vyrobeno 8 receptur malt, které se lišily druhem použitého cementu, přísad a příměsí. Zároveň od každé receptury byly vybrány sady vzorků opatřeny nátěry lithným vodním sklem a hydrofobizačním nátěrem Planiseal WR 80 Cream a byl posuzován jejich vliv na případné zvýšení trvanlivosti zkoušených malt. Na vzorcích byly prováděny fyzikálně mechanické zkoušky. Zároveň byly vzorky uloženy do prostředí velmi nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) a do prostředí silážních šťáv, kde byla sledována dlouhodobá trvanlivost.

Na základě provedených zkoušek bylo zjištěno, že nejlepších výsledků ve většině prováděných zkoušek dosahovala receptura 1B, u které bylo použito 10 % mikrosiliky. Byl tak zaznamenán její přínosný vliv na zvýšení trvanlivosti zkoušených vzorků. Výsledky referenčních receptur REF I a REF II byly srovnatelné s výsledky receptur 1D a 2D, u kterých byla použita krystalizační přísada XYPEX C - 1000 NF. V našem případě tak nebyl zaznamenán vliv krystalizační přísady na zlepšení vlastností zkoušených malt. Receptury 2B (10 % mikrosiliky) a 1C (20 % mikrosiliky), dosahovaly při prováděných zkouškách podobných výsledků. Nejhorší výsledky vykazoval vzorek receptury 2C (20 % mikrosiliky), u kterého byla zaznamenána vysoká pórovitost a tím snížená odolnost proti působení agresivních látek. Při porovnání použitých cementů CEM I 42,5 R a CEM III/A 42,5, byly lepší výsledky dosaženy u receptur s cementem CEM I 42,5 R.

Posuzován byl také vliv nátěrů na případné zvýšení odolnosti zkoušených malt. Na vzorcích opatřených nátěrem lithným vodním sklem nebylo zaznamenáno zlepšení vlastností vůči referenčním vzorkům. Dokonce u některých zkoušek působil nátěr spíše škodlivě, jako například při zkouškách odolnosti proti mrazu. Naopak u hydrofobizačního nátěru Planiseal WR 80 Cream od společnosti Mapei byl zaznamenán velice přínosný vliv na zvýšení trvanlivosti zkoušených vzorků. Docházelo k výraznému snížení nasákavostí a zejména při zkoušce odolnosti proti CHRL vzorky opatřeny tímto nátěrem vykazovaly výborné vlastnosti.

Z výsledků zkoušek a vizuálního zhodnocení lze konstatovat, že agresivněji na vzorky, které byly vystaveny působení agresivního prostředí, působil roztok kyseliny chlorovodíkové (pH 3,5 - 4,5). Již při vizuálním hodnocení bylo možné pozorovat, že u vzorků uložených v tomto prostředí došlo k narušování hran vzorků a ke změně jejich barvy na hnědou. Zvýšený degradační efekt roztoku kyseliny chlorovodíkové se potvrdil i u výsledků fyzikálně mechanických parametrů, kdy u vzorků v tomto prostředí docházelo k výraznějším poklesům pevností, zejména v tahu za ohybu oproti vzorkům vyjmutých ze silážních šťáv a vody.

V neposlední řadě bylo provedeno zhodnocení případného ekonomického přínosu použitých přísad, příměsí a nátěrů pro stavební praxi. Na názorném příkladu byla porovnávána referenční receptura REF I, receptura 1B (10 % mikrosiliky) a 1D (krystalizační přísada XYPEX). Zároveň byl posouzen případný ekonomický přínos hydrofobizačního nátěru od společnosti Mapei. Z tohoto srovnání bylo možné usoudit, že z dlouhodobého hlediska je výhodnější použití receptury 1B (10 % mikrosiliky). A zároveň bylo při porovnání receptury 1B (10 % mikrosiliky) bez nátěru a s nátěrem prokázáno, že opatření povrchu nátěrem je ekonomicky nejvýhodnější varianta.

Na závěr je potřeba konstatovat, že problematika zvyšování odolnosti betonů pro zemědělské stavby je velmi důležité téma. Pro určení jasně viditelných výsledků o vlivu použitých přísad a příměsí zejména na dlouhodobou trvanlivost při působení agresivních látek, by byl potřeba delší časový úsek zkoušení, kterého pro účely diplomové práce bohužel nebylo možné dosáhnout. Jak již uvádím výše v diplomové práci, vzorky jsou i nadále uloženy v agresivních prostředích a může tak stále probíhat měření pomocí ultrazvuků a zároveň je zde možnost detailního rozboru vzorků pomocí RTG a mikroskopických analýz, při dlouhodobém působení agresivních látek. Pro další výzkum navrhuji se zaměřit právě tímto směrem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ALEXANDER, Mark G. a Sidney. MINDESS. Aggregates in concrete. New York, c2008. ISBN 04-152-5839-1.
- [2] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. Nerostné suroviny a jejich využití: Kamenivo. Ostrava: VŠB, 2008. ISBN 9788024813783.
- [4] ČSN EN 197-1 (72 2101). Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. 2. vyd. 2012.
- [5] BARTA, R. Chemie a technologie cementu. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [6] ČSN EN 1008 (732028) Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. 2003.
- [7] HELA, Rudolf. TECHNOLOGIE BETONU: MODUL M01 BJ04 TECHNOLOGIE BETONU I. Brno, 2005. Studijní opory. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ.
- [8] ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Český normalizační institut, 2017.
- [9] HELA, R., BETON – technologie – konstrukce – sanace 2/2015 – Příměsi do betonu, odborný časopis, Beton TKS, s. r. o. 2015.
- [10] PYTLÍK, P., Technologie betonu, Druhé vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, VUTIUM, 2000, 385 stran, ISBN 80-214-1647-5.
- [11] MELICHAR T., PROCHÁZKA D., BETON – technologie – konstrukce – sanace – Studium vlivu jemnozrných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC, odborný časopis, Beton TKS, s. r. o. 2011.
- [12] KRENÍKOVÁ, V., Odpady a druhotné suroviny II, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí 2014, ISBN 978-80-7414-872-9.

- [13] DAMAN K. PANESAR. Supplementary cementing materials. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete [online]. University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada: Elsevier, 2019, s. 55-85 [cit. 2019-11-06]. ISBN 978-0-08-102616-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026168000034>
- [14] AİTCİN, Pierre-Claude, Vysokohodnotný beton. Praha: ČKAIT, 2005, 320 stran. Betonové stavitelství. ISBN 8086769399.
- [15] HEMALATHA, T a Ananth RAMASWAMY. A review on fly ash characteristics- Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. Chennai, India: Journal of Cleaner Production, 2017.
- [16] ČSN EN 450-1. Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2013.
- [17] Slag Cement Benefits and Use in Concrete [online]. USA: Slag Cement Association [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://www.slagcement.org/aboutslagcement/is-21.aspx>
- [18] ČSN EN 15167-1 (722090) Mletá granulovaná vysokopeční struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2007.
- [19] DRANSFILED, J. ICE manual of construction materials. 1. London: Thomas Telford, 2009, s. 091-100. ISBN 0727740482.
- [20] ČSN EN 934-2 +A1. Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem. 2013.
- [21] BYE, G. EDITED BY PAUL LIVESEY a TECHNICAL EDITING BY LESLIE STRUBLE. Portland cement. 3rd ed. London: Institution of Civil Engineers Publishing, 2011. ISBN 07-277-3611-6.
- [22] HOUST, Y. F., P. BOWEN a. SIEBOLD. SOME BASIC ASPECTS OF THE INTERACTION BETWEEN CEMENT AND SUPERPLASTICIZERS. Challenges of concrete construction: Innovations and Developments In Concrete Materials And Construction. London: Thomas Telford, 2002, s. 225-234. ISBN 0727739107.

[23] HELA R., přednáška Technologie betonu 2. Brno: Fakulta stavební FAST. ÚTHD. Letní semestr, 2018

[24] RODRIGUEZ, Juan. Seven Must-Use Concrete Admixtures (Additives) [online]. 2019 [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.thebalancesmb.com/common-used-concrete-admixtures-845036>

[25] STARK, Stanley. Concrete Waterproofing with Crystalline Technology [online]. USA, 2017 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.nbmcw.com/tech-articles/waterproofing-construction-chemicals/258-concrete-waterproofing-with-crystalline-technology.html>

[26] Odborný portál MCT: PŘÍSADY DO BETONŮ A MALT III [online]. Jan Vetchý, 2015 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>

[27] Odborný portál MCT: Hydrofobní impregnace betonu [online]. Jan Vetchý, 2015 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/hydrofobni-impregnace/>

[28] MISHRA, Gopal. SHRINKAGE REDUCING CONCRETE ADMIXTURE. The Constructor - Civil Engineering Home for Civil Engineers [online]. [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/concrete/shrinkage-reducing-concrete-admixture/7242/>

[29] JEDIDI, Malek a Omrane BENJEDDOU. Chemical Causes of Concrete Degradation [online]. 2018 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323072065_Chemical_Causes_of_Concrete_Degradation

[30] ROVNANÍKOVÁ, P., ROVNANÍK, P., KŘÍSTEK, R., Stavební chemie, Modul 3 – Degradace stavebních materiálů a chemie kovů, 2004.

[31] Portland Cement Association. Types and Causes of Concrete Deterioration [online]. Skokie, Illinois, 2002, , 1 - 16 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4

- [32] DROCHYTKA, Rostislav. Trvanlivost stavebních materiálů, CJ07. Brno, 2007. Studijní opory. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ
- [33] MATOUŠEK, Milan, DROCHYTKA Rostislav. Atmosférická koroze betonů. Praha : IKAS - Informační kancelář pro stavebnictví ve spolupráci s ČKAIT, 1998. ISBN 80-902558-0-9.
- [34] ROVNANÍKOVÁ, P. VLIV PROSTŘEDÍ NA KOROZI BETONU Z POHLEDU CHEMICKÝCH REAKCÍ. Beton TKS. 2017, 3-8.
- [35] BRE CONSTRUCTION DIVISION. Concrete in aggressive ground. 3. ed. Garston, Watford: BRE, 2005. ISBN 18-608-1754-8.
- [36] CHALMERS, C.T. a P.W. TRINDER. Resistance Of Concrete To Harsh Environments Ammonium Sulphate. Xypex Australia - Taywood Engineering Ltd (Perth), 1999, (1).
- [37] ŘEHÁČEK, Stanislav a kolektiv. Issues of Concrete in Silage Pits [online]. 2018, (1), 1-6 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1088/1757-899X/324/1/012023. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/324270043_Issues_of_Concrete_in_Silage_Pits
- [38] KOENIGEN, Andreas a Frank DEHN. Biogenic acid attack on concretes in biogas plants. Biosystems Engineering. Elsevier, 2016. ISBN 1537-5110.
- [39] N.DE BELIE, M.Debruyckere, D.Van Nieuwenburg, B.De Blaere: Attack of Concrete Flooers in Pig Houses by Feed Acids: Influences of Aly Ash Addition and Cement-bound Surface Layers, J. Argic. Engng Res. /1997) 68, 101-108
- [40] ROMMER, M. , Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Laboratories for Concrete & Construction Chemistry, Switzerland, 2004
- [41] VYTLAČILOVÁ, V. - DVORSKÝ, T., Permeabilita a vodotěsnost betonu, 4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti stavebních hmot, JUNIORSTAV 2008.

[42] ŠMERDA, Zdeněk a kol. Životnost betonových staveb. První vydání. Praha: Nakladatelství ŠEL, spol. s.r.o., 1999. Řada C - Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902697-8-8.

[43] MASO, J.C. Interfacial Transition Zone in Concrete: State-of-the-Art Report prepared by RILEM Technical Committee 108-ICC, Interfaces in Cementitious Composites. First edition. 2-6 Boundary Row, London, SE1 8HN, UK: E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1996. RILEM REPORT 11. ISBN 0 419 20010X.

[44] BYDŽOVSKÝ, Jiří. Technologie sanace, Brno, 2007. Studijní opory. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

[45] XIAOYING P. and collective. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms: Construction and Building Materials. Science direct [online]. China and Denmark: College of civil Engineering, Hunan University, 2016 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319183>

[46] ČSN EN 1504-2, Výrobky a systému pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Část 2: Systémy pro povrchovou ochranu. Český normalizační institut. 2006.

[47] TŮMA, Petr. Nátěry na beton: typy, požadavky, normové parametry [online]. In: . [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10916-natery-na-beton-typy-pozadavky-normove-parametry>

[48] CHATTOPADHYAY, D.K. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications. Progress in Polymer Science [online]. Elsevier, [1] 2007, s. 352-418 [cit. 2019-12-16]. ISSN 0079-6700. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670006001365>

[49] DIAMANTI, M.V. and collective. Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete. Construction and Building Materials [online]. Elsevier, 2013, s. 720-728 [cit. 2019-12-17]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813007800>

- [50] ČSN EN 12350 - 2. Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Český normalizační institut, 2009.
- [51] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. Český normalizační institut, 2016.
- [52] ČSN EN 772-11, Zkušební metody pro zdící prvky - část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdících prvků z umělého a přírodního kameniva vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti zdících prvků. 2011.
- [53] ČSN 731326 / Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Český normalizační institut, 2003.
- [54] ČSN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Český normalizační institut.
- [55] ADÁMEK, J., Sledování kvality těsnících technologií stanovením součinitele propustnosti povrchu sanovaných betonů pro vodu a vzduch, VUT Brno, Stavební fakulta
- [56] ČSN 73 1371. Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: Centrum technické normalizace, 2011.
- [57] ČSN EN 12504-4. Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Praha: Centrum technické normalizace, 2005.
- [58] ČAPKOVÁ, Pavla. RTG difrakce v materiálovém výzkumu [online]. Ústí nad Labem: Přírodovědecká fakulta Univerzity J.E. Purkyně, 2011 [cit. 2020-1-3]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma vyplnění mezer mikrosilikou mezi zrny cementu [13].....	19
Obrázek 2 - Princip elektrostatického a stérického odpuzování částic [23]	23
Obrázek 3 - Snímek z elektronového mikroskopu u neošetřeného betonu [25] ...	28
Obrázek 4 - Snímek z elektronového mikroskopu u vzorku opatřeného krystalizačním nátěrem [25].....	28
Obrázek 5 - Přehled smáčecích úhlů θ [27].....	29
Obrázek 6 - Objemové změny v důsledku sulfatační přeměny C_3A na $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ [32]	34
Obrázek 7 - Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu dle Matouška [32]	35
Obrázek 8 - Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [34]....	36
Obrázek 9 - Pohled na degradované betonové panely v silážním žlabu [37]	42
Obrázek 10 - Puchýře na povrchu konstrukce žlabu [37]	42
Obrázek 11 - Rozdělení a velikost pórů v cementovém tmelu [42].....	45
Obrázek 12 - Vztah permeability a pórovitosti dle Bakkeru [41]	45
Obrázek 13 - Hydrofobní impregnace [46].....	48
Obrázek 14 - Impregnace [46].....	48
Obrázek 15 - Nátěr (povlak) [46]	48
Obrázek 16 - Sítový rozbor kameniva	51
Obrázek 17 - Sušení kameniva	51
Obrázek 18 - Míchání receptur.....	55
Obrázek 19 - Výroba vzorků pro zkoušku vzduchové propustnosti	55
Obrázek 20 - Výroba zkušebních trámečků 40 x 40 x 160 mm	55
Obrázek 21 - Uložení vyrobených vzorků ve vodě	55
Obrázek 22 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu [46] ..	58
Obrázek 23 - Provádění zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	58
Obrázek 24 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tlaku [46]	59
Obrázek 25 - Provádění zkoušky pevnosti v tlaku	59
Obrázek 26 - Uložení vzorků ve zkušebním zařízení	62
Obrázek 27 - Schéma proudění vzduchu ve vakuových komorách [55]	63
Obrázek 28 - Torrentův přístroj pro měření vzduchové propustnosti.....	63
Obrázek 29 - Zkušební přístroj pro měření ultrazvukového impulsu	65

Obrázek 30 - Příprava vzorků pro stanovení pH	65
Obrázek 31 - Měřicí přístroj pro stanovení pH.....	65
Obrázek 32 - Difrakce dopadajícího záření [49]	66
Obrázek 33 - Vzorek 1B Mapei po 100 cyklech.....	75
Obrázek 34 - Vzorek REF I Mapei po 100 cyklech.....	75
Obrázek 35 - Vzorek 1B po 100 cyklech	75
Obrázek 36 - Rozpadlé vzorky s nátěrem vodního skla	75
Obrázek 37 - Rozpadlé vzorky receptury REF I a REF II po 75 cyklech	78
Obrázek 38 - Vzorky receptury 1B po 100 cyklech.....	78
Obrázek 39 - Vzorky receptury 1D a 2D, opatřené nátěrem Mapei po 100 cyklech	78
Obrázek 40 - Vzorek receptury REF I opatřený nátěrem Mapei po 100 cyklech ..	78
Obrázek 41 - Vzorky receptury 1B po 100 cyklech.....	81
Obrázek 42 - Vzorky receptury 2C po 100 cyklech (nahore dva vzorky bez nátěru, dole dva vzorky s nátěrem Mapei).....	81
Obrázek 43 - Vzorky vyjmuté z prostředí HCl (vlevo), z prostředí silážních šťáv (uprostřed) a vzorky vyjmuté z vody (vpravo).....	99
Obrázek 44 - Vzorky vyjmuté z prostředí HCl (vlevo) a vzorky vyjmuté z prostředí silážních šťáv (vpravo)	99
Obrázek 45 - Vzorky receptury REF I vyjmuté z jednotlivých prostředí - HCl (dole), silážní šťávy (uprostřed) a z vody (nahore)	99
Obrázek 46 - Vzorek 1D vyjmutý z prostředí HCl (levá polovina vzorku otřená hadrem, pro lepší názornost).....	99
Obrázek 47 - Zkorodované hrany na vzorku REF I vyjmutého z prostředí HCl ..	100
Obrázek 48 - Výsledky rentgenové analýzy	102
Obrázek 49 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D s krystalizační přísadou, který byl uložen ve vodním prostředí	103
Obrázek 50 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D, který byl uložen v prostředí HCl (na snímku je patrný krystal portlanditu a CSH gely).....	103
Obrázek 51 - Snímek mikrostruktury vzorku 1D, který byl uložen v prostředí silážní šťávy.....	103
Obrázek 52 - Snímek mikrostruktury vzorku 1B (10 % mikrosiliky), který byl uložen ve vodním prostředí.....	103

Obrázek 53 - Snímek mikrostruktury vzorku 1B (10 % mikrosiliky), který byl uložen v prostředí silážní šťávy.....	103
Obrázek 54 - Snímek mikrostruktury vzorku 2C (20 % mikrosiliky), který byl uložen ve vodním prostředí.....	103

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Stupně vlivu prostředí.....	31
Tabulka 2 - Sítový rozbor drobného kameniva těženého z vody, frakce 0/4 mm, Tovačov.....	52
Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti používaných cementů.....	53
Tabulka 4 - Složení malt.....	54
Tabulka 5 - Stupně sednutí	56
Tabulka 6 - Třídy kvality krycí vrstvy betonu.....	63
Tabulka 7 - Výsledky vlastností v čerstvém stavu	67
Tabulka 8 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 7 dnech	68
Tabulka 9 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 28 dnech.....	68
Tabulka 10 - Výsledky objemové hmotnosti a pevnostních charakteristik po 60 dnech.....	68
Tabulka 11 - Výsledné hodnoty nasákavosti vlivem kapilarity	71
Tabulka 12 - Výsledné hodnoty celkové nasákavosti	72
Tabulka 13 - Výsledné hodnoty stanovení odolnosti proti působení CHRL	73
Tabulka 14 - Výsledné hodnoty odolnosti proti působení mrazu a silážních šťáv	76
Tabulka 15 - Výsledné hodnoty odolnosti proti působení mrazu a velmi nízkého pH (roztok HCl)	79
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty stanovení vzduchové propustnosti po 28 dnech	81
Tabulka 17 - Naměřené hodnoty stanovení vzduchové propustnosti po 60 dnech	82
Tabulka 18 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků bez nátěru při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní.....	83

<i>Tabulka 19 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků s hydrofobizačním nátěrem Mapei při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 20 - Výsledky pevnostních charakteristik vzorků s nátěrem lithným vodním sklem při působení různých agresivních prostředí po dobu 150 dní</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 21 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles bez nátěru z prostředí silážních šťáv.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka 22 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s hydrofobizačním nátěrem Mapei z prostředí silážních šťáv.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabulka 23 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s nátěrem lithným vodním sklem z prostředí silážních šťáv</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 24 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles bez nátěru z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka 25 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s hydrofobizačním nátěrem Mapei z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 26 - Výsledné hodnoty po měření ultrazvukem zkušebních těles s nátěrem lithným vodním sklem z prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)</i>	<i>97</i>
<i>Tabulka 27 - Naměřené hodnoty pH ve výluhu</i>	<i>100</i>
<i>Tabulka 28 - Ceny vybraných receptur za 1m³</i>	<i>104</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 - Křivka zrnitosti drobného kameniva těženého z vody frakce 0/4 mm, Tovačov.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf 2 - Grafické vyhodnocení stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu</i>	<i>67</i>
<i>Graf 3 - Grafické vyhodnocení pevností v tahu za ohybu po 7, 28 a 60 dnech</i>	<i>69</i>
<i>Graf 4 - Grafické vyhodnocení pevností v tlaku po 7, 28 a 60 dnech</i>	<i>70</i>
<i>Graf 5 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení kapilární nasákavosti</i>	<i>71</i>
<i>Graf 6 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení celkové nasákavosti</i>	<i>72</i>
<i>Graf 7 - Grafické vyhodnocení zkoušky stanovení odolnosti proti působení chemických.....</i>	<i>74</i>
<i>Graf 8 - Grafické vyhodnocení koeficientu mrazuvzdornosti při působení mrazu a silážních šťáv.....</i>	<i>77</i>

Graf 9 - Grafické vyhodnocení koeficientu mrazuvzdornosti při působení mrazu a nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové)	80
Graf 10 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt bez nátěru po dobu 150 dní	83
Graf 11 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt bez nátěru po dobu 150 dní	84
Graf 12 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei po dobu 150 dní	86
Graf 13 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei po dobu 150 dní	87
Graf 14 - Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem po dobu 150 dní	88
Graf 15 - Graf závislosti pevnosti v tlaku na působení agresivních prostředí na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem po dobu 150 dní	89
Graf 16 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí silážních šťáv na vzorky malt opatřených nátěrem od společnosti Mapei v různých časech	92
Graf 17 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí silážních šťáv na vzorky malt opatřených nátěrem lithným vodním sklem v různých časech	93
Graf 18 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (roztok kyseliny chlorovodíkové) na vzorky malt bez nátěru v časech různých časech	94
Graf 19 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (HCl) na vzorky malt opatřených hydrofobizačním nátěrem od společnosti Mapei v různých časech	96
Graf 20 - Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na působení prostředí nízkého pH (kyseliny chlorovodíkové) na vzorky malt opatřených nátěrem vodním sklem v různých časech	97
Graf 21 - Graf závislosti hodnoty pH ve výluhu na působení chemicky agresivního prostředí na vzorky	100

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Technický list cementu CEM I 42,5 R Hranice

Příloha 2 - Technický list cementu CEM III/A 42,5 N Hranice

Příloha 3 - Technický list plastifikační přísady Stachement 2489

Příloha 4 - Technický list strusky Dětmárovice

Příloha 5 - Technický list popílku Dětmárovice

Příloha 6 - Technický list mikrosiliky Stachesil S

Příloha 7 - Technický list krystalizační přísady XYPEX C - 1000 NZ

Příloha 8 - Technický list nátěru Planiseal WR 80 CREAM od společnosti Mapei

Příloha 9 - Technický list nátěru Litosil LP 46 od společnosti Vodní sklo, a.s.