



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING
MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ NOVÝCH DRUHŮ PLYNOTĚSNÝCH A VODOTĚSNÝCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV

RESEARCH OF NEW TYPES GAS AND WATER-TIGHTNESS SURFACE TREATMENTS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR OF THESIS

Ing. ŠTĚPÁN BOHUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR OF THESIS

Prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA

BRNO 2013

Abstrakt

Práce se zabývá vývojem nových druhů plynotěsných a vodotěsných povrchových úprav na bázi sekundární krystalizace cementu, s využitím průmyslových odpadů jako druhotných surovin při formulaci receptur.

V úvodu jsou prezentovány současné poznatky a experimentální výsledky z oblasti krystalizujících hydroizolací. Dále se práce zaměřuje na formulaci nových nátěrových a stěrkových krystalizujících hydroizolací, s využitím druhotných surovin, jako částečné náhrady cementové matrice. V rámci práce byla zvolena komerčně dostupná krystalizující přísada Xypex Admix a druhotné suroviny, popílek z elektrárny Chvaletice a struska dodávaná firmou Kotouč Štramberk. Navržené receptury byly podrobeny testování fyzikálně mechanických vlastností pod vlivem dlouhodobého působení vybraných agresivních činitelů. Nejvhodnější vybrané receptury stěrky a nátěru, pro následnou komerční produkci, byly dále podrobeny rozšířeným mikrostrukturálním a chemickým analýzám.

Hlavním výsledkem práce byl úspěšný návrh a otestování nových receptur krystalizujícího hydroizolačního nátěru a stěrky s využitím odpadních surovin při jejich formulaci. Došlo rovněž k celkovému rozšíření současného poznání v oblasti vlivu krystalizujících hydroizolací na mikrostrukturu betonových konstrukcí.

Abstract

The work deals with the development of new types of gas and waterproof tight coatings based on secondary crystallization of cement, using industrial waste as secondary raw material in the formulation of new recipes. In the introduction is presented the current knowledge and experimental results from the crystalline waterproofing. The work main focuses on the formulation of new screeds and coatings on crystalline base, using secondary raw materials, such as partial replacement of cement matrix. In the work were selected commercially available crystallizing Xypex Admix and secondary raw materials, fly ash from power plants Chvaletice, and slag supplied by company Kotouč Štramberk. The new developed formulations were subjected to testing of physical and mechanical properties under the influence of long-term effects of selected corrosive agents. The best selected recipe of screeds and coatings, for possible commercial production, was subjected to widespread microstructural and chemical analysis.

The main result of the work has been successful design and test new crystalline waterproofing coatings and screeds recipes, using waste materials in their formulation. There has been done also an overall extension of the current knowledge about the effects of crystallizing waterproofing on the microstructure of concrete structures.

Klíčová slova / Keywords

beton, hydroizolace, sekundární krystalizace cementu, nátěr, stěrka, pór
concrete, hydroinsulation, secondary crystallization of cement, coating, screed, pore

Bibliografická citace

BOHUŠ, Š. *Vývoj nových druhů plynotěsných a vodotěsných povrchových úprav: disertační práce*, Brno, 2013, 170 s, 10 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc. MBA.

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně za odborného vedení školitele a dále prohlašuji, že veškeré literární podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.“

V Brně dne 8. 11. 2013

Ing. Štěpán Bohuš

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 8. 11. 2013

Ing. Štěpán Bohuš

Poděkování

Děkuji mému školiteli prof. Ing. Rostislavu Drochytzkovi za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při řešení a tvorbě této disertační práce. Dále bych rád poděkoval kolegům z Ústavu technologie stavebních hmot a dílců a Ústavu chemie, Fakulty stavební, kteří přispěli cennými radami při zpracování této práce.

Téma disertační práce bylo řešeno v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu České Republiky FT-TA4/013 s názvem „Výzkum a vývoj speciálních plynotěsných hydroizolačních nátěrů a stěrek proti průniku ekologicky nebezpečných látek.“

OBSAH

A.	ÚVOD	8
B.	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
1	ŽIVOTNOST A ZPŮSOBY OCHRAN BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	10
1.1	PRIMÁRNÍ OCHRANA (VNITŘNÍ)	10
1.2	SEKUNDÁRNÍ OCHRANA (VNĚJŠÍ)	13
2	POLYMERCEMENTOVÉ HMOTY	15
3	HYDROIZOLAČNÍ HMOTY SE SCHOPNOSTÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE CEMENTU	18
3.1	PRINCIP PŮSOBNÍ	18
3.2	VZNIK KRYSTALOVÉ STRUKTURY V BETONU	22
3.3	FUNKČNOST A TVORBA KRYSTALŮ VE STRUKTUŘE BETONU	24
3.4	VLIVY PŮSOBÍCÍ NA KRYSTALIZUJÍCÍ HYDROIZOLACI	25
3.5	APLIKACE KRYSTALIZUJÍCÍCH HYDROIZOLACÍ	32
4	DEGRADACE CEMENTOVÉHO TMELU V BETONU	36
4.1	KAPALNÁ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ	36
4.2	PLYNNÁ AGRESIVNÍ PROSTŘEDÍ	38
5	VYBRANÉ MECHANISMY DEGRADACE CEMENTOVÉHO TMELU A VÝZTUŽE BETONU	39
5.1	SÍRANY	39
5.2	CHLORIDY	41
5.3	OXID UHLÍČITÝ - KARBONATACE	41
5.4	KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE	43
C.	CÍL PRÁCE	46
D.	METODIKA PRÁCE	47
6	ETAPA I. OPTIMALIZACE A VÝVOJ MODIFIKOVANÝCH HMOT SE SCHOPNOSTÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE CEMENTU	48
7	ETAPA II. FUNKČNOST MODIFIKOVANÝCH KRYSTALIZUJÍCÍCH HMOT	50
8	ETAPA III. ROZŠÍŘENÉ ANALÝZY VLIVU NAVRŽENÝCH HMOT NA MIKROSTRUKTURU BETONU	53
8.1	POUŽITÉ METODY	55
8.2	CHARAKTERISTIKA VSTUPNÍCH SUROVIN	61
E.	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	67
9	ETAPA I OPTIMALIZACE A VÝVOJ MODIFIKOVANÝCH HMOT SE SCHOPNOSTÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE CEMENTU	67
9.1	NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	67
9.2	NÁVRH RECEPTUR HYDROIZOLAČNÍCH NÁTĚRŮ A STĚREK	67
9.3	ZÁKLADNÍ TESTOVÁNÍ NAVRŽENÝCH NÁTĚRŮ A STĚREK	69
10	ETAPA II. FUNKČNOST MODIFIKOVANÝCH KRYSTALIZUJÍCÍCH HMOT	74
10.1	CHARAKTERISTIKA PROSTŘEDÍ PRO ULOŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	74
10.2	OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NAVRŽENÝCH RECEPTUR - BARIÉROVÉ VLASTNOSTI VŮČI KAPALINÁM	78
10.3	OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NAVRŽENÝCH RECEPTUR - FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI	97
10.4	OPTIMALIZACE VÝBĚRU FINÁLNÍ RECEPTURY NÁTĚRU A STĚRKY	112

11	ETAPA III. ROZŠÍŘENÉ ANALÝZY VLIVU NAVRŽENÝCH HMOT NA BETON	116
11.1	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TĚSNĚNÍ PÓRŮ.....	116
11.2	TĚSNĚNÍ BETONU ZA POMOCÍ KRYSTALIZUJÍCÍCH HMOT	125
11.3	VLIV ČASU A PROSTŘEDÍ NA MIKROSTRUKTURU BETONU	129
11.4	EKOTOXICITA, OBSAH RADIONUKLIDŮ A HYGIENICKÁ NEZÁVADNOST	137
F.	CELKOVÁ DISKUSE A ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	139
G.	PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRO PRAXI	150
H.	ZÁVĚR	152
I.	ZDROJE.....	154
	POUŽITÁ LITERATURA.....	154
	POUŽITÉ ZKRATKY	161
	POUŽITÉ INTERNETOVÉ ZDROJE.....	163
	POUŽITÉ NORMY A PŘEDPISY	164
	SEZNAM TABULEK	167
	SEZNAM OBRÁZKŮ	169
	SEZNAM PŘÍLOH	172

A. ÚVOD

Již od počátku lidstva chránily stavební konstrukce člověka před negativními účinky klimatických vlivů. Jejich účel užívání vyžadoval specifický návrh objektu, v němž se musela více než jen funkčnost promítnout i schopnost konstrukce odolávat působení různorodých degradačních faktorů v čase.

Pro vývoj ve stavebnictví bylo důležité období průmyslové revoluce, kdy byly velké nároky na objem a kvalitu stavebních poživ. To v konečném důsledku vedlo k podání několika patentů týkajících se hydraulických poživ, z nichž byl nejdůležitější patent J. Parkera na výrobu románského cementu a zejména pak britský patent BP 5022 s názvem An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone, který byl udělen J. Aspdinovi v roce 1824. Následoval patent J. Moniera na použití železných prutů v betonu-železobetonu [1, 2, 3].

S vývojem znalostí o hydraulických vlastnostech cementu nastalo i masové využití betonu, který se vzhledem ke svým technologickým a ekonomickým výhodám stal velice rychle nejpoužívanějším konstrukčním materiálem. Lze říci, že beton je sám o sobě velmi stabilní kompozitní materiál s dlouhou životností, nicméně během svého životního cyklu je vystaven působení vlivů (jako například působení agresivních činitelů, vlivu prostředí, expanzním reakcím kameniva atd.) které atakují beton nebo ocelové vyztužení [4, 5].

Ve spojitosti s těmito soubory destruktivních činitelů proto vyvstala potřeba stavební betonové a železobetonové konstrukce dodatečně chránit. Vzhledem k tomu, že korozní procesy probíhající na konstrukcích jsou vždy spojeny s přítomností vody, která látky rozpouští a je pro ně i transportním médiem, přesouvá se otázka ochrany betonu na jeho vodonepropustnost a plynutěsnost. Omezení otevřených kapilárních pórů je základním předpokladem zvýšení ochrany betonu proti působení korozních látek z prostředí. Agresivní plyny a kapaliny nemohou pronikat a následně reagovat se složkami cementového tmelu i ocelovou výztuží, jejíž koroze by mohla vést až ke ztrátě statického spolupůsobení. Pokud tedy není betonová konstrukce vhodným způsobem chráněna, výsledkem jsou vážné poruchy staveb, jejichž rehabilitace je vždy velmi nákladná [5, 6, 7].

Jednou z progresivních technologií sloužících k zamezení přístupu agresivních látek nejen do povrchových vrstev betonové konstrukce, a tím i k omezení koroze betonu i výztuže, je technologie na bázi tzv. sekundární krystalizace cementu (ve světě známé pod označením „crystalline technology“). Ta si díky své jednoduché aplikaci a unikátní schopnosti pronikat a těsnit nerozpustnými krystaly veškeré volné póry a kapiláry v betonu našla své široké použití. Její hlavní složkou je cement, při jehož výrobě jsou produkovány velké emise odpadních plynů vstupujících do atmosféry. V jejich popředí stojí oxid uhličitý, který je hlavním činitelem podílejícím se na skleníkovém efektu. Dříve připadala na produkci jedné tuny cementu asi jedna tuna oxidu uhličitého, aktuálně je to přibližně 660 kg oxidu uhličitého. Snížení spotřeby celosvětově využívaného portlandského cementu by proto napomohlo omezení emisí oxidu uhličitého [9, 10, 11].

Právě z tohoto důvodu a vzhledem k velmi perspektivním vlastnostem krystalizujících materiálů i jejich rozšiřujícímu se praktickému použití v ČR i ve světě je přínosné a smysluplné se snažit vlastnosti i použití těchto materiálů optimalizovat a v konečném důsledku i zlevnit, například využitím vhodných odpadních surovin [12].

Ve spojitosti s využitím vhodných příměsí je však spojena stále aktuální otázka vlivu těchto alternativních surovin na zachování těsnících a reologických vlastností krystalizujících receptur, spolu s dostatečnou trvanlivostí ošetřených betonů

Analýza dlouhodobých korozně ochranných vlastností receptur navržených pro dlouhodobé vystavení vlivu širokého spektra v praxi reálně působících agresivních činitelů a ověření vlivu těchto činitelů na mikrostrukturu betonu se proto jeví nutností.

B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1 Životnost a způsoby ochrany betonových konstrukcí

Stavební hmoty jsou většinou látkami složenými, a proto podmínkou jejich odolnosti vůči vnějšímu prostředí je odolnost všech jejich součástí. Protože obecně je odolnost každé součásti jiná, může dojít k znehodnocení celé stavební hmoty už od napadení některé její součásti. Správný odhad trvanlivosti je důležitý při volbě materiálu, pro stanovení životnosti jednotlivých částí konstrukce, a tím i konstrukce jako celku.

Zmiňovanou životností staveb se rozumí doba, jež uplyne od vzniku stavby do konce jejího životního cyklu (stane se nepoužitelnou) za předpokladu, že byl prováděn stanovený systém předepsané údržby a oprav. Životnost konstrukce je ale nutné chápat jako proměnnou veličinu závislou na proměnných podmínkách v časové závislosti (změna užívání oproti návrhu, vlivy prostředí atd.) Hlavní činitele rozhodující o životnosti stavby jsou zejména konstrukční hmoty, konstrukční koncepce staveb, statické návrhy, vliv prostředí a údržba objektu [13, 14, 15].

Mezi činitele snižující životnost konstrukce můžeme zahrnout smršťování, dotvarování a únavu betonu, účinky teplotních vlivů, deformace základu a základových půd, vliv agresivních látek, přetěžování konstrukce, výrobní závady apod.

Pokud se ale zaměříme na podstatu trvanlivosti, lze říci, že primární úlohu v trvanlivosti materiálů, a tím i v konečném důsledku životnosti celé stavební konstrukce, hrají materiálové vlastnosti. Za zmiňovanou trvanlivost je označována schopnost stavebních materiálů odolávat prostředí, ve kterém jsou uloženy, bez porušení nebo bez podstatného zhoršení mechanických vlastností po celou dobu jejich předpokládané funkce.

Čím je tato doba delší a čím více je hmota v dané konstrukci schopná odolávat nepříznivým vlivům, tím je materiál trvanlivější.

V souvislosti s trvanlivostí jednotlivých materiálů, popřípadě celých konstrukcí je ovšem třeba podotknout, že k poškození a degradaci stavebních materiálů dochází zejména na špatně provedených, nebo špatně udržovaných stavbách.

V současnosti pro zachování, popřípadě i dodatečné zvýšení požadované životnosti betonových a železobetonových konstrukcí rozlišujeme dva základní typy ochrany. Je jím ochrana takzvaná primární (vnitřní) a ochrana sekundární (vnější) [16, 17].

1.1 Primární ochrana (vnitřní)

Touto ochranou je označováno zvýšení odolnosti betonu proti působení agresivního prostředí. Primární ochrana konstrukcí se navrhuje volbou odolných hmot (složky betonové směsi včetně přísad a příměsí, složení betonu, druh betonu a jeho třída, technologie výroby betonu, druh výztuže), dále volbou geometrického tvaru konstrukcí a na základě výpočtu odolnosti konstrukčních dílů proti vzniku trhlin, tloušťky krycí vrstvy a šířky trhlin podle platných norem.

Pokud se budeme soustředit na materiálové vlastnosti, je tedy primární ochrana založena na vlastním složení betonu a kvalitě jeho provedení. Složení směsi pro výrobu

betonu se navrhuje v souladu s normativními dokumenty, které určují jaká opatření je nutno učinit pro zvažované prostředí. Zohledňuje se druh a obsah cementu, druh a obsah kameniva a vodní součinitel. Dle platné normy ČSN EN 206-1 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, složky betonu nesmí obsahovat škodlivé látky v takovém množství, které by ohrozilo trvanlivost betonu nebo bylo příčinou koroze výztuže a musí být vhodné pro zamýšlené použití betonu. Rovněž platí, že i když je vhodnost složek pro beton obecně prokázána, neznamena to, že jsou vhodné pro jakýkoliv případ a pro každé složení betonu.

Primární ochrana je tedy ovlivněna již výše zmíněnými faktory. V první řadě to je dáno vhodnou volbou cementu jako pojiva, dále kvalitou záměsové vody, kvalitou kameniva, typem a vlastnostmi přísad a příměsí. Dalším faktorem je i samotné provedení stavby, zpracování (např. kvalita zhutnění), obsah chloridů, teplota betonu (v době ukládání nesmí být menší než +5 °C), atd. [18, 19].

1.1.1 Složení směsi pro výrobu betonu

Pro návrh kvalitního betonu jak v čerstvém, tak i ztvrdlém stavu je nutno postupovat v souladu s normativními dokumenty. Stěžejní je volba dávek jednotlivých složek, jejich vlastnosti a podíly v betonu, které rozhodují o jeho vlastnostech. V rámci návrhu je nutno přijmout opatření pro uvažované prostředí, ve kterém se zohledňuje druh a obsah cementu, druh a obsah kameniva, záměsová voda přísady, příměsí a další. (EN 197-1, prEN12620:2000, prEN13055-1:1997, prEN 1008_1997, EN 934-2, prEN12620:2000, EN 12878, EN 450, prEN 13263: 1998, aj.). Příkladem by mohl být návrh betonu určeného do korozních prostředí se zvýšeným korozním působením.

V tomto případě je nutno navrhnout směs s co možná nejnižším obsahem póru, které by následně umožnily průnik agresivních látek do jeho struktury, a také s komponenty, jež by následně nemohly reagovat s agresivním prostředím. Při návrhu a realizaci je proto třeba primárně dodržet stanovený vodní součinitel a zabránit nadměrně rychlému odpařování reologické vody.

K výraznému snížení obsahu pórů napomůže využití příměsí jemných podílů se zrnem pod 0,25 mm, což v konečném důsledku zlepší kvalitu betonu, zejména hutnost, vodonepropustnost, mrazuvzdornost a další vlastnosti. Pro beton do prostředí se zvýšeným korozním působením se používají dále cementy s upraveným mineralogickým složením nebo s pucolánovými či hydraulickými příměsmi. Velmi jemné podíly příměsí způsobí, že cementový tmel je hutnější. Příměsí jsou buď ve formě inertních, velmi jemných nereaktivních prášků, nebo reaktivních pucolánů a latentně hydraulických materiálů, které reagují s Ca(OH)_2 a vytvoří méně rozpustné hydratované křemičitany, hlinitany a železitany vápenaté. Vhodnost jednotlivých typů příměsí (druhy I a II) musí být ve shodě s příslušnými normami (ČSN EN 12620, ČSN EN 12878, ČSN EN 450, EN 13263) [19].

Dále se používají přísady, které upravují vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Jsou přidávány během míchání betonu v malém množství v poměru ke hmotnosti cementu (s dávkováním cca 0,5 – 1,5 % [tak jak je dodávána] z hmotnosti cementu). I přes tento fakt

výrazně a cíleně ovlivňují vlastnosti čerstvé betonové směsi i ztvrdlého betonu v široké škále, a to podle potřeby a účelu použití betonu [18][20].

Na trhu je několik druhů přísad. Jsou to například urychlovače a zpomalovače tuhnutí cementu, provzdušňovací přísady, plastifikační přísady, těsnící a hydrofobizační přísady, aj. Jejich užití a dávkování je vždy úzce spojeno s výrobou konkrétní betonové směsi. S použitím jednotlivých přísad nebo jejich kombinací lze například kromě betonování v nepříznivých povětrnostních podmínkách také vyrobit vysokopevnostní, samozhutnitelný, stříkaný beton a další.

Použití přísad například umožní snížit vodní součinitel, což vede ke zmenšení objemu kapilárních pórů. Ty zaručí zvýšenou nepropustnost betonu pro plynné i kapalně látky, a tím znemožní průnik agresivních látek do betonu. Dalším příkladem mohou být provzdušňovací přísady. Jejich použití vede ke vzniku kulových pórů, které představují prostor umožňující expanzi při vzniku ledu, jenž pak svým vznikem beton neporuší.

Při správném použití přísad se nejen zlepšují vlastnosti betonu, ale někdy i snižují náklady na výrobu, dopravu a zhutňování betonu, případně i na zkrácení času potřebného na betonářské práce [21, 22].

1.1.2 Provedení, technologie výroby a ošetřování betonu

Stejně tak, jako je důležitý samotný návrh betonové směsi, je pro výslednou kvalitu stavby důležitá i technologie zpracování betonu a kvalita provedení. Zahrnuje zejména způsob výroby, ukládání a hutnění čerstvého betonu. K technologii betonu patří také způsob ošetřování betonu v počátečních stádiích při vytváření jeho pevné struktury. U této fáze je nutno pamatovat na skutečnost, že se jedná o proces hydratace. Je nutno zajistit dostatečné množství vody k reakci i v povrchové vrstvě, např. kropením betonu, protože zvláště v teplém počasí dochází k jejímu značnému odpařování. Existuje proto několik metod ochrany povrchu betonu:

- ponechání betonu delší dobu v bednění, zvláště v horkém počasí,
- pravidelné kropení (mlžení) vodou v krátkých intervalech,
- překrytí povrchu betonu vlhkými tkaninami nebo fóliemi,
- aplikace nástřiku parotěsnou látkou – ta vytvoří na povrchu betonu film, který zamezí odpařování vody - vhodné pro velké betonové plochy.

Tyto metody ochrany jsou nutné během prvního dne betonáže a v následujícím dni. V dalších dnech, kdy je povrch dostatečně pevný stačí beton vlhčit [23, 24, 25].

1.2 Sekundární ochrana (vnější)

Tento typ ochrany se aplikuje po dokončení stavby za účelem zastavení vlivu působení agresivního prostředí. Používá se jednak u nových, nedegradovaných konstrukcí, pro zvýšení korozní odolnosti stavby, tak u starších, mnohdy již narušených konstrukcí.

Základním činitelem pro korozní procesy narušující konstrukce je voda. Ta může být v tekuté formě, i ve formě vodních par nebo plynů a v ní rozpuštěné látky mohou být agresivní pro složky betonu. Proto je cílem sekundární ochrany stavebních konstrukcí zabránit přístupu vody do materiálu konstrukce, a tak ji chránit před škodlivými účinky agresivních látek [26].

Pro samotný návrh sekundární ochrany je nutno brát v úvahu stupeň agresivity prostředí, typ podkladu a pro něj správnou volbu hmoty pro provedení ochrany, i hmot pro jeho případnou impregnaci. Dále je nutno posoudit způsob provedení na základě vlastností samotných ochranných prostředků (např. jejich chemické odolnosti, přídržnosti k povrchu, aj.)

Protože se však izolační materiály použité pro sekundární ochranu stávají součástí konstrukce a interagují s ní, musí splňovat i řadu dalších předpokladů, aby mohly být bez obtíží aplikovány a splnily svoji funkci. Velmi často jsou hmoty a materiály vystaveny mechanickému namáhání, jež může vznikat například od přetváření, nebo i od měnících se teplotních a vlhkostních poměrů konstrukce a dalších různých působení vnějšího prostředí. Vhodnost izolačního materiálu vymezují tedy i další vlastnosti, jakým jsou odolnost proti vysoké i nízké teplotě, objemové změny, pevnost, tažnost, odolnosti proti povětrnostním změnám, vodě a agresivním látkám. Izolace se také velice často navrhuje tak, aby bránila nejen prostupu kapalně vody, ale i průchodu plynů do konstrukce [27].

Ochranu sanovaného objektu můžeme rozdělit do několika skupin, z nichž každá vyžaduje jiný postup sanace a použití jiných materiálů. Výběr strategie pro sanaci betonu se neřídí jen čistě technickými hledisky. Je rovněž nutno vzít v úvahu hlediska ekonomická, která budou rozhodování ovlivňovat. Obecně lze říci, že opravy povrchu musí splňovat tyto základní požadavky:

- přenášení zatížení – nahodilá, dynamická, rázová, stálá,
- ochrana a vzhled – odolnost proti opotřebení, estetické hledisko, ochrana vůči, působení okolního agresivního prostředí.

Mezi nejčastější metody ochrany betonu lze zařadit ochranu proti vnikání škodlivých činitelů (např. vody, jiných kapalin, páry, plynů, chemikálií a biologických látek), udržování obsahu vlhkosti v betonu v daných mezích, obnova betonu do původně stanoveného tvaru a funkce, obnovení betonové konstrukce náhradou její části anebo zesílení konstrukce.

Materiály (systémy) pro provádění sanací železobetonových konstrukcí jsou:

- antikorozní ochrana výztuže,
- adhezní můstek,
- správkové hmoty,
- povrchové ochranné systémy,
- speciální materiály pro zajištění vodotěsnosti,
 - nanášení elastomerových membrán – fólie,
 - krystalizující nátěrové hmoty,
- injektážní a výplňové hmoty [28].

Velmi rozšířené systémy doplňující bariérové schopnosti konstrukcí proti vnikání celého spektra agresivních látek, jsou v současnosti speciální materiály (fólie, krystalizující hmoty). Ty samozřejmě doplňuje celá škála zavedených technologií povrchových ochran a úprav, technologií místního bandážování trhlin, výplní trhlin, impregnací, stínění a opláštění, aj.

Zmiňované povrchové ochrany se aplikují ve formě penetrace nebo nátěru na povrch betonu a mohou být na různé bázi podle toho, jaké vlastnosti jsou požadovány. Používají se jak systémy anorganické, tak organické, na bázi polymerních látek, včetně přípravků, které jsou kombinací obou [29, 30].

Měly by být především odolné proti opotřebení a odolné proti pronikání vody a agresivních látek do konstrukce (např. CO₂, SO₂, HCl, atd.).

Materiálů pro izolace proti chemickým vlivům je mnoho druhů, za zmínku stojí např. polymercementové kompozity, silikonové a akrylátové hmoty, materiály na bázi vodního skla a další. Je zřejmé, že možností ochrany betonu je velká řada. Každý ze systémů má své specifické použití, výhody a nevýhody při aplikaci [31].

Pro dosažení cílů disertační práce je nutno doložit především ochrany betonu pomocí povrchových systémů. Ty vytvářejí na povrchu sanované betonové konstrukce doplňující bariéru proti průniku nežádoucích médií, jako například oxidu uhličitého a vody, do pórového systému betonu a k ocelové výztuži. Současně povrchové ochranné systémy většinou barevně sjednocují povrch opravované betonové konstrukce a zlepšují její celkový vzhled. Ve většině případů mají ale omezenou časovou účinnost a nelze je považovat za plnohodnotnou náhradu dostatečně tlusté krycí vrstvy betonu nebo správkové hmoty nad výztuží. Ve správně navržené kombinaci s primární ochranou dokáží velmi výrazně zlepšit korozně ochranné vlastnosti betonu [32].

Povrchové ochranné systémy lze aplikovat natíráním, válečkováním nebo nástřiky. Všechny důležité informace lze získat z technologického předpisu výrobce, který musí uvádět, lze-li nátěr případně doředit, a to jakými rozpouštědly, specifikuje způsob nanášení nátěrů, atd.

Mezi povrchové ochrany lze zařadit zpevňování povrchu, impregnace, nátěrové systémy, povrchové úpravy, fólie, těsnění spár, injektáž. Pro disertační práci jsou stěžejní technologie povrchových ochran pomocí nátěrů a stěrek. V oblasti sanačních technologií a ochrany proti vlivům agresivního prostředí jsou jednou z velmi oblíbených a využívaných

alternativ. Jde o nanášení vrstvy organického či anorganické povlaku, který omezí absorpci vody, difuzi vodních par i difuzi agresivních kapalin a plynů povrchem betonu (např. CO_2 , SO_2 , SO_3). Nátěr může být barevný i bezbarvý a jeho povrch může být jak hladký (snadná čistitelnost), tak drsný (protismykové vlastnosti). I tenkovrstvý nátěr se provádí v několika vrstvách, nejčastěji 2-3x včetně penetrace, a spotřeba materiálů se pohybuje od 200 až 400 g/m^2 výše. Vždy je z hlediska funkčnosti celého systému vhodné aplikovat několik velice slabých vrstev než jednu silnou při zachování stejné celkové tloušťky. Nátěry dělíme dle tloušťky vrstvy na:

- tenkovrstvý nátěr - 0,1 až 0,3 mm,
- vícevrstvý nátěr - 0,2 až 1 mm,
- stěrka - tloušťka větší než 1mm.

Druhů nátěrových hydroizolačních hmot je v současné době nepřeborné množství. Za zmínku stojí například silikonové, silikátové, epoxidové, polyuretanové nátěrové hmoty a další. Jednou skupinou z nich jsou i cementové a polymercementové nátěry a stěrky, jež představují cílovou skupinu zájmu pro praktickou část disertační práce [33, 34].

2 Polymercementové hmoty

Tyto hmoty se v praxi začaly používat koncem osmdesátých let dvacátého století. V dnešní době jsou tyto hmoty většinou směsí portlandských či speciálních cementů s různými polymerními přísadami a minerálními příměsmi. Velice často se u nich používá velmi jemně mletý slínek a jako přísada se do cementových nátěrových hmot často využívají křemičité úlety neboli mikrosilika. Reakcí oxidu křemičitého s hydroxidem vápenatým vzniklým hydratací křemičitanů vápenatých vznikají další silikáty zvyšující těsnost celé struktury. Takto vytvořené nátěrové hmoty slouží jako izolační hmoty určené na povrchové úpravy plošně prosakujících betonových konstrukcí.

Velmi výraznou skupinou používanou pro zvýšení vodotěsnosti a odolnosti proti některým agresivním látkám jsou krystalizující nátěry a stěrky, používané jak u nových, tak k opravám starých konstrukcí.

Tyto silikátové těsnící hmoty se aplikují při teplotách $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ na vlhký savý podklad s kapilárami, který je nutný pro průběh krystalizace a průnik účinné složky do hloubky. Za přítomnosti vlhkosti pak v pórech probíhá krystalizace, při které se póry vyplní vzniklými krystaly, čímž se zvýší vodotěsnost. Vlastnosti a využití těchto těsnících hmot jsou detailně popsány v kapitole 3.5.

Svůj význam si zachovávají i hydroizolační polymercementové směsi bez výraznějšího krystalizujícího efektu, které obsahují jako součást záměsové vody přísadu akrylátové disperze. Tyto povrchové úpravy jsou kromě vodotěsnícího účinku schopné plnit i funkci protikarbonační ochrany [33, 27, 35].

Polymercementové hmoty dělíme na:

- polymercementové hydroizolační nátěry,
- polymercementové hydroizolační stěrky.

Polymercementové hydroizolační nátěry patří dle ČSN P 73 0606 *Hydroizolace staveb - Povlakové hydroizolace - Základní ustanovení* mezi povlakové izolace využitelné pro svislé i vodorovné konstrukce. Řadí se do kategorie povlakových izolací, které musí vytvářet kapilárně nepropustný povlak s koeficientem nasákavosti $w < 0,01 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ a s odolností vůči tlakové vodě vyšší než 1,5 baru. Pro dnešní používané polymercementové povrchové úpravy jsou vyžadovány především tyto vlastnosti:

- dobrá zpracovatelnost,
- minimální lepivost na nářadí,
- trvalá odolnost vůči vodě,
- paropropustnost,
- flexibilita - dostačující pro přemostění vlasových trhlin,
- flexibilita za chladu - dynamické přemostění trhlin při -20°C ,
- trvalá odolnost vůči povětrnosti,
- dobrá přídržnost k minerálním podkladům.

Tato skupina hydroizolací v současnosti představuje osvědčenou a přijatelnou alternativu k tradičním hydroizolacím jako jsou například hydroizolace fóliové, nebo hydroizolace na asfaltové bázi. Jejich výhody lze shrnout do následujících bodů:

- relativně malá pracnost (lze utěsnit i velmi tvarově komplikované detaily),
- neobsahují spoje (ty často bývají zdrojem poruch u pásových izolací),
- kopírují reliéf povrchu (odpadá pracné vyrovňávání povrchu před aplikací pásových izolací, což je podstatné zejména u oprav starších konstrukcí),
- ověřená ochrana vůči radonu a řadě agresivních chemických látek (dle typu polymerní disperze),
- bezproblémová certifikace pro styk s pitnou vodou a potravinami.

Těchto typů hydroizolací je velmi mnoho a je možno je aplikovat buď jako stěrku, nátěr nebo je na konstrukci stříkat. Většina výrobců uvádí, že pro plnou funkčnost je třeba na konstrukci nanést dvě vrstvy nátěru v celkové tloušťce 1-4 mm. Výhodou při použití těchto hmot je, že dvousložkové flexibilní polymercementové nátěry mají schopnost překlenovat vlasové trhliny šířky 0,5 až 1 mm. Pro místa s většími trhlinami je nutno využít materiálů pružnějších, např. použitím elastických kaučukových pásek nebo nátěrů na bázi MS-polymerů, na které je možné navázat s polymercementovým nátěrem ve zbývající ploše [33, 35].

Polymercementové hydroizolační stěrky se používají na konstrukcích především k vyhlazení jeho povrchu, zaplnění prohlubní nebo případných dutin v povrchu a jeho vyrovnění do požadované úrovně. Cílem jejich použití je vytvoření dostatečně hladkého a rovného povrchu s hydroizolační funkcí, sloužícího jako finální úprava či jako vhodný podklad pod nátěrový systém. Tyto materiály je možné aplikovat ve vrstvě přibližně od 1 mm do 5 mm. Nanesená stěrková hmota se musí vhodným způsobem chránit před mrazem, rychlým odpařením záměsové vody, přímým osvitem sluncem, působením větru a odsátí

záměsové vody do nasákavého nenavlhčeného podkladu, a to po dobu alespoň prvních třech dnů. Stěrkové hmoty lze rozdělit dle dvou hlavních kritérií, a to typu povrchu, na který se používají a dle doporučené tloušťky vrstvy. Podle určení pro typ povrchu se stěrky používají na:

- svislé povrchy - požadavek na nestékavost naneseného materiálu,
- vodorovné povrchy - požadavek na samonivelační funkci materiálu.

Stěrkové hmoty na svislé povrchy se na konstrukci nanášejí pomocí hladítka. Druhým typem jsou stěrky tzv. „samonivelační“ nebo alespoň ztekucené, které se po nanesení na vodorovnou plochu samy rozlijí do vodorovné, jedolité a celistvé plochy. Tyto stěrky jsou klasifikovány dle ČSN EN 13813-2003 Potěrové materiály a podlahové potěry [36].

Vzhledem k charakteru použití těchto stěrek je tloušťka vrstvy základním parametrem pro jejich klasifikaci. Běžně se tedy uvádí tloušťka vrstvy jako rozsah hodnot. Nižší hodnota je obvykle stanovena maximální velikostí zrna obsaženého plniva (křemičitý písek) a množstvím pojiva, vyšší hodnota je obvykle dána rizikem popraskání vlivem smršťování. K hlavním výhodám samonivelačních stěrek ve srovnání s běžnými cementovými tenkovrstvými potěry patří dle materiálového složení stěrek:

- vysoká rovinatost, bezpečně splňující obvyklý požadavek max. 2 mm/2 m,
- vysoká aplikační produktivita, která při strojní aplikaci v obvyklé tloušťce stěrkové vrstvy 5 mm může být až 2500 m² za směnu,
- objemová stabilita bez nutností provádění řízených smršťovacích dilatací, resp. řezání smršťovacích spár,
- brzká zatížitelnost: pochůznost po 2–6 hodinách od aplikace, některé sádrové po 24 hodinách,
- deklarované hodnoty přídržností na většině běžných podkladů (beton, keramika) dle typu a pevnostní třídy stěrky od min. 0,5 MPa do min. 2 MPa,
- deklarované hodnoty otěruvzdornosti, umožňující jejich použitelnost jako finálních vrstev podlahových konstrukcí.

Jako každá technologie má i jejich použití své limity. K nevýhodám samonivelačních polymercementových stěrek dle materiálového složení patří:

- nevhodnost většiny k použití v exteriéru a trvale vlhkém prostředí,
- nevhodnost pro spády nad 1 %,
- nevhodnost do horkých prostředí (pro cementové a polymercementové maximálně 180 °C).

Vlastnosti polymercementových stěrek lze velice často vylepšit přidáním krystalizujících přísad, díky kterým poté získávají zvýšené hydroizolační vlastnosti a při jejich aplikaci mohou být nanášeny v menší minimální vrstvě, a to přibližně 2 - 3 mm oproti 3 - 5 mm pro běžnou cementovou maltu. Celkově lze říci, že čím menší má být výsledná vrstva vyrovnávací stěrky, tím větší musí být objem polymerní složky a přísad [37, 38].

3 Hydroizolační hmoty se schopností sekundární krystalizace cementu

Historie sanací betonových konstrukcí pomocí hmot se schopností sekundární krystalizace cementu se začínala psát v sedmdesátých letech ve Vancouveru v Kanadě. Tehdy vznikaly první návrhy materiálů, které ve formě nátěru penetrují do betonové konstrukce se zatěsňujícím účinkem. Tato nová technologie se začíná rychle rozšiřovat, a to nejen po americkém kontinentu. V roce 1979, vzniká v laboratořích první funkční krystalizující přísada pro čerstvý beton. Díky změně v politickém rozložení tehdejšího světa a otevření se ČR západu, tyto materiály vstupují na tuzemský trh po roce 1989. I když byly tyto materiály později dostupné, zejména díky jisté nedůvěře projektantů a široké veřejnosti, se na rozdíl od např. asijského světa ve větším měřítku začaly používat přibližně až na přelomu století. V současné době se tato situace velmi výrazně zlepšila, ale i přes poměrně široké rozšíření, není stále jejich potenciál v oblasti pozemních staveb zcela doceněn [39][40].

Dominantní složkou těchto jednosložkových materiálů, vyráběných ve formě prášku, je jemně mletý portlandský cement, kterému se také vizuálně podobají. Dále obsahují menší množství jemného křemenného písku, jehož podíl se u jednotlivých typů výrobků mění, a speciální přísady. Po nanesení na povrch betonu pronikají do jeho povrchu a reagují s volným Ca(OH)_2 obsaženým v cementovém tmelu betonu za vzniku krystalických produktů. Tyto nové krystalické struktury látky vyplňují volné póry betonu, a tím přispívají ke zvýšení jeho odolnosti vůči obrusu a snížení nasákavosti. Hlavní výhodou těchto látek je především stabilní těsnící efekt.

Ten je především dosažen při aplikaci hydroizolačních hmot do směsi pro výrobu betonu. Ta je přimíchána například do autodomíchávače před dojetím na stavbu, a proto se během domíchání rovnoměrně rozptýlí, čímž se zajistí následný těsnící efekt v celé struktuře betonu [40, 41, 31].

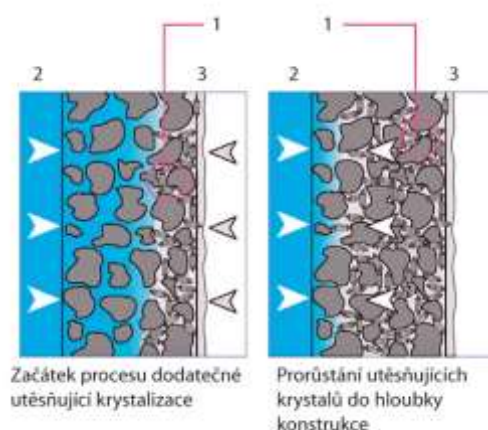
3.1 Princip působení

Mnohaleté zkušenosti v praxi nejen v Čechách, ale i ve světě prokázaly, že krystalizující technologie izolace proti vodě zlepšuje na takto ošetřených konstrukcích nepropustnost pro vodu a vodní páru a díky tomu pozitivně ovlivňuje trvanlivost betonu. Zlepšení nastane primárně díky tomu, že karbonatace jako iontová reakce nemůže bez spolupůsobení vody vůbec probíhat, protože úplně vysušený beton s CO_2 a podobně ani s jinými plyny vůbec nereaguje [42][43].

Utěsnění pórů, kapilár a trhlin také následně zamezí fyzikálně mechanickému rozrušování struktury (např. působení ledu v pórech a trhlinách, apod.). Tento efekt nastane díky schopnosti vyplnit a těsnit póry, kapiláry, mikrotrhliny a jiné dutiny nerozpustnými, vysoce odolnými krystalickými novotvary. Účinek izolace proti pronikání vody do konstrukce je založen na dvou jednoduchých procesech, chemickém, a také fyzikálním. Když částice cementu hydratují, reakce mezi vodou a cementem způsobí, že takto přejde do pevné struktury. Reakce ale také generuje hydroxid vápenatý. Přídavek krystalizujících látek v zásadě přidává další soubor chemických látek do struktury betonu. Jsou-li tyto dvě

chemické skupiny, hydroxid vápenatý a přidané chemické látky smíseny dohromady za přítomnosti vlhkosti, nastane chemická reakce, která vede následně k tvorbě krystalů. Konečným produktem této reakce jsou nerozpustné krystalické látky vyplňující veškeré volné póry a kapiláry v betonu.

Princip působení je vyobrazen na schématu obrázku 1. Při této chemické reakci vznikají rozvětvené krystalky nerozpustných sloučenin, které prorůstají do značné hloubky betonových konstrukcí. Rychlost a hloubka prorůstání betonem betonových a železobetonových konstrukcí produkty krystalizace závisí ve značné míře na způsobu ošetřování betonu, a to především na přítomnosti potřebné vody a na teplotě [44, 45].



Obrázek 1: Schéma funkčního principu krystalizujícího nátěru na betonové konstrukci
1 – utěšující krystaly, 2 – povrch zatížený vodním tlakem, 3 – povrch s krystalizujícím nátěrem [46]

Vzhledem k faktu, že hmoty se schopností sekundární krystalizace distribuované na světových trzích mají ryze komerční charakter, je pochopitelné, že jejich složení je jednotlivými výrobci úzkostlivě chráněno. Vzhledem k celkovému zaměření této práce, nebylo zjišťování konkrétní chemické podstaty těchto přísad předmětem studia. Práce se zaměřuje pouze na praktické využití těchto přísad v rámci formulace nových druhů plynotěsných a vodotěsných povrchových úprav.

Díky výše uvedenému lze tedy tyto materiály popsat jen velmi obecně. Prakticky všechny materiály na bázi sekundární krystalizace jsou anorganické suché práškové hmoty, které obsahují určitý druh aktivní látky. Jedná se tedy o směs portlandského cementu, křemenného plniva a dále blíže neurčené aktivní chemické přísady.

Jedním z předních producentů těchto materiálů je i firma Xypex Corporation, která vyrábí materiál pro povrchovou aplikaci pod názvem Xypex Concentrate (dále XC). Jeho složení analyzoval ve své práci Furuya et al. [44]. Popsal v ní, že při finálním použití při sanacích tyto krystalizující hmoty obsahují kromě základních složek i tzv. hlavní pomocné materiály. To jsou v podstatě anorganické materiály na cementové bázi, které nebrání cementu spolu s krystalizující hmotou (XC) ve tvorbě nových struktur v betonu.

Složení krystalizující hmoty a charakter hlavních pomocných materiálů je uveden v tabulkách 1 a 2.

Tabulka 1: Obecné chemické složení funkční krystalizující hmoty [44]

<i>Složení</i>	<i>Obsah (%)</i>
SiO_2	39-46
CaO	25-34
Al_2O_3	4.5
MgO	3.5
Na_2O	4.7
Fe_2O_3	1,5-3

Tabulka 2: Pomocné materiály pro krystalizující izolační hmoty, (původní terminologie byla zachována pro dodržení specifikace)[44]

<i>Název materiálu</i>	<i>Charakter materiálu</i>
<i>Modify</i>	<i>Sub-Cement Crystal Increasing Material</i>
<i>Pach'n plug</i>	<i>Fast Setting Hydraulic Mortar</i>
<i>Extra plug '</i>	<i>Quick Setting Hydraulic Fine Mortar</i>
<i>Mild Pach'n plug</i>	<i>Non-shrink Fine Mortar</i>
<i>Gamma Cure</i>	<i>Curing Agent of Crystallizing Accelerator</i>

V souvislosti s použitím krystalizujících hmot a jejich mechanismem tvorby krystalů a krystalové struktury v betonu nebo materiálu s cementovou matricí, je třeba uvést důležitý faktor nezbytný pro celkový průběh reakcí, a tím je voda. Tedy v tomto případě se jedná o průběh, kdy je beton před použitím krystalizující hydroizolace nasycený vodou, bez které by reakce a následná tvorba krystalů nemohly nastat.

Vlhkost v pórovitých stavebních materiálech je velmi obsáhlou problematikou, kterou se zabývali například autoři Brunauer, Emmet a Teller (teorie BET, 1938), Knudson, Langmuir a další. Pro cíle disertační práce a použití krystalizujících hydroizolačních nátěrů je ale nutné popsat především děj difuze, jakožto hlavní mechanismus napomáhající vzniku krystalů [47, 48].

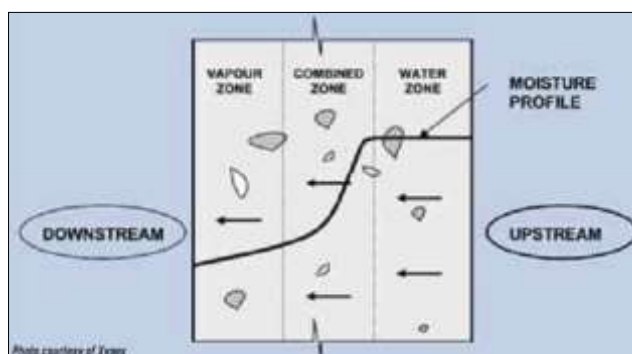
3.1.1 Difuze

Difuze jako látkový transport probíhá na principu molekulárního procesu vyrovnávání koncentračního spádu plynů nebo kapalin, založeném na vlastní pohyblivosti částic nebo molekul v důsledku obsahu vnitřní energie (Brownův pohyb).

Obecně tedy pro funkční princip difuze platí, že při difuzi se zmenšují (vyrovnávají) koncentrační rozdíly. Hmota je tedy přenášena z místa o vyšší koncentraci na místo s koncentrací nižší, takže roztok o vysoké koncentraci bude přecházet do roztoku s nízkou (nižší) koncentrací, dokud se jejich koncentrace nevyrovnají. V případě krystalizujících izolačních hmot tedy platí, že jakmile je hydroizolace aplikována na povrch, a to buď ve formě nátěru, nebo vsypem na čerstvý beton, vytvoří roztok s vysokou (vyšší) koncentrací.

V kapilárách betonu se nachází roztok hydroxidu vápenatého, který v nasyceném stavu obsahuje 160 mg $Ca(OH)_2$ ve 100 g vody při 20 °C, tedy roztok o nízké koncentraci. Chemikálie krystalizující hydroizolace (roztok o vysoké koncentraci) jsou tedy transportovány procesem difuze vodou (roztok o nízké koncentraci), dokud se koncentrace obou roztoků nevyrovnají. Chemikálie krystalizující hydroizolace se tedy rozšíří kapilární strukturou betonu a jsou k dispozici pro vedlejší produkty hydratace cementu, což umožňuje průběh chemické reakce [49].

Princip transportu chemikálie krystalizující hydroizolace stěnou v betonu je uveden na obrázku 2, převzatého přímo z materiálů výrobce krystalizujících izolačních hmot Xypex Corporation.



Obrázek 2: Transport vlhkosti stěnou (zdroj: Xypex Corporation)[40]

Výše byl popsán obecný princip difuze částic za přítomnosti vody v kapilárním systému betonu po aplikaci hmot se schopností sekundární krystalizace cementu. Jedná se tedy o difuzi v tekutých roztocích. Ta je hlavním mechanismem prostupu chemikálií obsažených v krystalizujících hmotách do pórové struktury betonu. Difuze samozřejmě není definována takto obecně, ale je v širším pojetí řešena buď z hlediska fenomenologického (základem jsou Fickovy zákony), nebo fyzikálního (atomového).

Základní typy difuze rozdělujeme na:

- stacionární difuze - koncentrace difundující látky zůstává v každém bodě uvažovaného prostředí stejná (Fickův I zákon),
- Nestacionární difuze - v uvažovaném bodě se mění koncentrace difundující látky v závislosti na čase (Fickův II. zákon).

I. Fickův zákon

Hnací silou difuze ve smyslu tohoto zákona je její koncentrační spád. Zákon říká, že rychlost difuze je dána látkovým množstvím látky, která projde za časovou jednotku určitou plochou. Podstatou názorů na difuze je, že difundující částice vibruje a neustále se přesunuje do rovnovážného stavu. Tato rovnice popisuje difuzi rozpuštěné látky v ustáleném stavu, izotropních podmínkách a stálých okrajových podmínkách [50, 11].

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad [1]$$

,kde J [mol·m⁻²·s⁻¹] je difuzní tok
 D [m²·s⁻¹] je celkový koeficient difuze
 $\frac{dc}{dx}$ [mol·m⁻³·m⁻¹] je gradient koncentrace

Záporné znaménko je ve vztahu proto, že se předpokládá přenos látky z místa o vyšší koncentraci na místo s koncentrací nižší a děj vede k vyrovnání koncentračních rozdílů.

Z uvedeného vztahu vyplývá přenos látky z místa o její vyšší koncentraci do místa o její nižší koncentraci a difuze tedy vede k vyrovnání koncentračních rozdílů. Toto ale platí ve skutečnosti pouze pro difuzi látky v tekutých roztocích a v ideálních tuhých roztocích.

V situaci, kdy se v betonu gradient koncentrace bude rovnat 0, platí i pro difuzní tok $J=0$ a nedochází k přenosu látky mezi místy, v nichž je koncentrace stejná. Hnací silou difuze nebývá tedy ale vždy gradient koncentrace (Fickovo pojetí). Uplatňují se i gradienty jiných termodynamických veličin (gradient parciální molární volné entalpie, který je vyvolán gradientem koeficientu termodynamické aktivity difundující látky) [47, 48].

II. Fickův zákon

Druhý Fickův zákon popisuje nestacionární difuzi, při níž se koncentrační gradient s časem mění a difuzní tok se mění s polohou.

Koeficient difuze D je funkcí koncentrace, případně i směru a polohy při difuzi v anizotropním prostředí. Za určitých podmínek (např. při malých změnách koncentrace a při difuzi v izotropním prostředí) můžeme předpokládat konstantní hodnotu koeficientu difuze $D = \text{konst.}$ Potom nabývá rovnice II. Fickova zákona tvaru:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \left(D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad [2]$$

Difuze roztoků je základním transportním dějem pro funkčnost krystalizující hydroizolační hmoty. Ovšem po aplikaci těchto hmot na betonové konstrukce se dle Xypex Corporation dále předpokládá, že dodatečným působením kapalně vody a vodních par může tvorba krystalové struktury být obnovena. Do dodatečného procesu transportu krystalizujících hmot by se tedy mohly zapojit i další děje, jako například difuze vodní páry, kapilární vztlakovost a další [49, 51, 52].

3.2 Vznik krystalové struktury v betonu

V předcházející kapitole 3.1 byl popsán princip působení hmot se schopností sekundární krystalizace, především mechanismus transportu chemických látek kapilárním systémem betonu. Tento proces objasňuje samotný transport „aktivní chemické látky“ do nitra betonu, u kterého je ale nutné také objasnit i samotný proces vzniku krystalů. V souvislosti se samotnou tvorbou krystalové struktury je nicméně třeba znovu upozornit, že přesné chemické složení „aktivní chemické látky“ je všemi výrobci pečlivě tajeno a pravděpodobně se mezi jednotlivými výrobci méně či více liší. I přes tuto skutečnost většina krystalizujících hydroizolací používá podobný funkční princip, kterým bychom mohli dle dostupných podkladů samotný proces vzniku krystalů popsat pravděpodobně následovně.

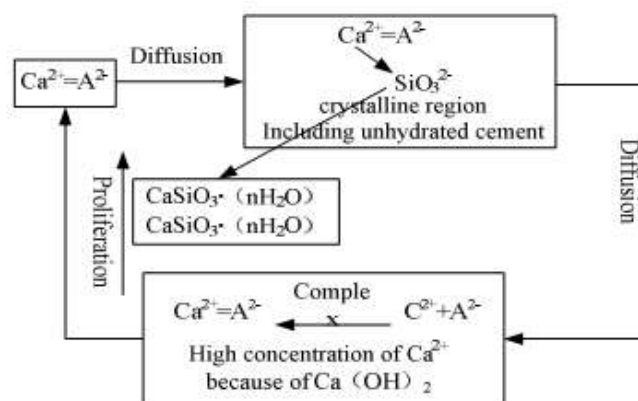
Po aplikaci krystalizující hmoty na povrch betonové konstrukce proniknou díky koncentračnímu spádu aplikované chemické přísady do struktury betonu, kde zahájí proces krystalizace a prorůstání vznikajících krystalků nerozpustných sloučenin přímo do struktury ošetřovaného betonu. Chemické komponenty obsažené v krystalizujících hmotách spolu

s produktem hydratace cementu, Ca(OH)_2 , reagují za tvorby disilikátových a polysilikátových aniontů. Podle současných poznatků uvedených například v práci [32], kolektivu firmy Sun Stop, nebo v práci Brunauera [54], jde o proces doprovázený tvorbou tobermoritového gelu, kdy společně s ním za přítomnosti Ca(OH)_2 vznikají hexagonální kalciumhydroalumináty [55, 20, 56].

Tomuto procesu se věnuje i Furuya T. et al., který také na základě své práce [44] tvrdí, že chemická difuze je schopna přenést chemické látky krystalizujících hydroizolací až do třiceticentimetrové hloubky v betonu. Rovněž potvrzuje, jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, že hmoty se schopností sekundární krystalizace jsou ve svém základu složeny z portlandského cementu, křemenné složky a speciální přísady (chemické látky).

Dle práce Furuya T. et al. [44], krystalizující hmoty obsahují Ca^{2+} ionty a chemické látky (označované obecně A^{2-}), kterým je přisuzována schopnost podporovat vznik krystalů, dále je značen jako $\text{Ca}^{2+}\text{A}^{2-}$. O samotném betonu, na který jsou dané hmoty se schopností sekundární krystalizace cementu aplikovány, lze říci, že jsou v něm přítomny různé křemičité ionty (např. SiO_3^{2-} , SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$). Ty jsou přítomny nejen v betonech či maltách relativně mladých, ale i v těch, jejichž stáří přesahuje 20 a více let a při přítomnosti vody v pórech betonu vzniká v kombinaci s nimi roztok o určité koncentraci. Proto při aplikaci krystalizujících hmot na beton, $\text{Ca}^{2+}\text{A}^{2-}$ díky koncentračnímu spádu difunduje roztokem s obsahem křemičitých iontů v pórech a kapilárách betonu. Během tohoto procesu se v oblasti s vysokou koncentrací iontů Ca^{2+} z $\text{Ca}^{2+}\text{A}^{2-}$ vápník mísí s křemičitými ionty roztoku v pórech betonu, a poté tyto přecházejí, díky rozdílu v rozpustnosti jejich produktů, v nerozpustné kalcium silikáty CaSiO_3 (většinou v krystalické formě). Díky tomuto procesu se tedy odštěpí Ca^{2+} ionty z $\text{Ca}^{2+}\text{A}^{2-}$ a volné A^{2-} ionty se znovu začnou šířit pórovou strukturou, kdy difundují do oblasti s vyšší koncentrací Ca^{2+} obsažených v Ca(OH)_2 a dalších látkách. Následně A^{2-} ionty v této oblasti reagují s volnými Ca^{2+} ionty za vzniku $\text{Ca}^{2+}\text{A}^{2-}$. Tyto reakce probíhají opakovaně a v jejich důsledku dochází s postupujícím časem k nárůstu krystalů. Předpokládá se, že tento proces bude pokračovat do té doby, dokud krystalizující chemikálie nevyčerpají veškerou vodu [57, 44, 58, 59].

Tuto teorii vzniku krystalové struktury potvrdil ve své práci Zhang et al. [60]. Ten ovšem u této teorie předpokládá, že vznik krystalové struktury během reakcí nespotřebovává aktivní chemickou látku obsaženou v krystalizujících hmotách, ale ta naopak tvoří pouze roli katalyzátoru. Schématické znázornění tohoto procesu je doloženo níže na obrázku 3.



Obrázek 3: Proces vzniku krystalů dle Zhang et al.[60]

Takto by bylo možno popsat základní mechanismus vzniku krystalů, v jejichž důsledku dojde u betonu ke zvýšení jeho nepropustnosti pro vodu a vodní páry. V souvislosti s tvorbou těchto krystalů je také důležité uvést, že vzniklé krystalické novotvary jsou velmi odolné vůči chemikáliím, a to pro pH mezi 3 a 11 v neustálém kontaktu a 2 až 12 v rámci periodického kontaktu. Krystalizující hydroizolace mohou být konstantně vystaveny teplotám mezi -32°C až 130°C . Vlhkost, ultrafialové světlo a hladiny kyslíku nemají žádný vliv na schopnost produktů odolávat těmto teplotám [40].

3.3 Funkčnost a tvorba krystalů ve struktuře betonu

Funkčnost krystalizujících hydroizolačních materiálů při použití na beton je poměrně široce doložena mnoha nezávislými zdroji ve světové i domácí literatuře (např. Furuya, T. et al. [44], Zhang, T.[60] Toutanji, H. et al. [41], Mitsuki et al. [61], a další). Rovněž samotná společnost Xypex Corporation dokládá schopnost svých produktů zvyšovat voděodolnost betonových konstrukcí mnoha zkouškami, jako například U. S. Army Corps of Engineers (USACE) CRD C48-73 “Permeability of Concrete”, DIN 1048 “Water Impermeability of concrete”, ÖNORM B 3303 “Water Impermeability of Concrete”, CSN 1209/1321 “Nepriepustnosť a odolnosť tlaku vody”, a dalšími [62, 40].

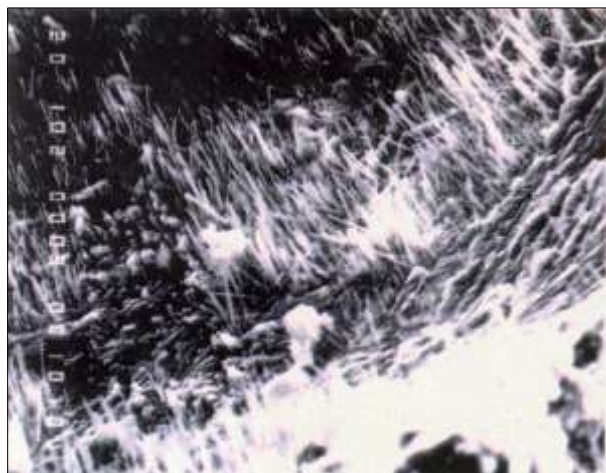
Jak již bylo zmíněno v úvodních sekcích práce, výrobci a distributory této technologie je udávána schopnost těsnit póry betonu nově vzniklými krystaly. Například dle výrobce XYPEX Corporation, je „*technologie XYPEX založena na přísně utajené kombinaci aktivních netoxických chemických látek, které spolu s vedlejšími produkty hydratace v betonu vytvářejí unikátní druh krystalu. Tyto nerozpustné krystaly utěsní póry a kapiláry betonu proti vodě a mnoha chemickým roztokům. Efektivnost XYPEXu je jedinečná a zcela nenapodobitelná*“.¹²

V dostupné domácí i světové odborné literatuře je ale pozornost ve většině případů upřena na konečné hydroizolační vlastnosti takto ošetřených betonových konstrukcí, zatímco doložení vlastností a prokázání tvorby těchto unikátních krystalů není přikládán význam.

¹ http://www.nekap.com/xypex/detail_concentrate.php

² <http://www.xypex.com/products/crystalline-technology>

Z dostupné literatury tyto krystaly, jejich tvorbu a výskyt potvrdil, na základě pozorování pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), ve své práci např. Mitsuki, et al., [61] a později v práci Peek, et al. [62]. Oba autoři došli ve svých pracích k závěru, že jehličkovité krystaly prorůstají do hloubky přes 30 cm během jednoho roku (viz. obrázek 4 a 5) a předpokládají, že pozorované krystaly, jsou krystaly C-S-H přispívající k těsnění betonu.



Obrázek 4: Xypex, 10 cm pod povrchem, zvětšeno 1000x[61]



Obrázek 5: Xypex, 30 cm pod povrchem, zvětšeno 1000x[61]

3.4 Vlivy působící na krystalizující hydroizolaci

Výrobci krystalizujících hydroizolačních hmot u svých produktů uvádějí, že materiály nelze aplikovat při dešti a teplotě pod +5 °C. Pokud jsou dodrženy tyto parametry, je materiálová struktura stavebních látek hlavním aspektem ovlivňujícím funkčnost těchto hydroizolací. Vytváří transportní prostor pro pohyb molekul vody, jež jsou nutné pro aplikaci a fungování krystalizujících hydroizolačních materiálů. Hlavními faktory ovlivňujícími funkčnost krystalizujících hydroizolací jsou:

- pórová struktura cementového tmelu,
- voda.

Pro vzájemné působení vody s porézní látkou mají dominantní význam velikosti pórů od viditelné oblasti (10^{-3} m) po molekulární oblast (10^{-9} m). Horní hranice velikosti pórů pro fyzikální kapilární jevy leží asi na 1 mm a vytváří horní hranici kapilarity a počátek oblasti volného proudění vody. Oblast spodní hranice účinku zakřivení menisku není známá. Pro představu molekula vody zaujímá přibližně velikost 0,28 nm. Fyzikální kapilární jevy u stavebního díla mohou být eliminovány v důsledku dokonalého nasycení vodou všech pórů, ale tato skutečnost v praxi nikdy nenastane.

Proudění plynů (např. vodní páry) nepodléhá vlivu povrchového napětí, avšak spodní hranice velikosti pórů je teoreticky totožná s hodnotou střední volné dráhy difundujících molekul plynu. Za atmosférického tlaku se nachází tato hranice okolo hodnoty 50 nm. Dále je možné jen šíření efúzí [47, 63].

3.4.1 Pórová struktura cementového tmelu

Pokud dojde ke správnému návrhu a provedení betonové konstrukce nebo její části, čímž je zajištěna kompaktnost a hutnost betonu spolu s tím, že jsou pevná zrna kameniva nepropustná, přesouvá se otázka propustnosti na cementový tmel. Beton je svojí povahou materiál obsahující póry různé velikosti, charakteru a původu. Cementový kámen i při plné hydrataci obsahuje mnoho pórů o velikosti od 1 nm až po několik mm.

Na jejich celkovém objemu a distribuci podle velikosti závisí rychlost pohybu vody i její množství. Obecně lze říci, že póry jsou nepravidelné dutinky nejrůznějších velikostí, tvarů i charakteru povrchu. Klopfer [63] ve své práci rozdělil vnitřní dutiny v pevných stavebních látkách podle jejich velikosti na:

- makropóry - ($d > 10^{-3}$ m),
- kapilární - ($10^{-3} > d > 10^{-7}$ m),
- mikropóry - (10^{-7} m $> d > 0,3 \cdot 10^{-9}$ m).

Toto rozdělení zastává i Lykov [64] na základě faktu, že transportní mechanismus kapalně fáze v pórech tohoto rozhraní probíhá odlišně.

Pro aplikaci krystalizujících hydroizolačních hmot je ale především podstatné, zda struktura ošetřovaného povrchu může nasáknout dodatečným postřikem vodou před aplikací, a proto rozhoduje, zda jsou póry otevřené či uzavřené.

Z hlediska pohybu kapalin a plynů jsou podstatné pouze ty, které jsou navzájem propojené. Touto pórovou strukturou se pohybují všechny látky, které se účastní korozních procesů. A právě tyto průchodné póry, které tvoří transportní cesty pro vodu a další kapaliny a plyny betonem, má krystalizující materiál schopnost zarůstat svými jehličkovitými krystaly, které v přítomnosti vody zvolna prorůstají kapilárním systémem betonu od ošetřeného povrchu do jeho hlubších partií [65][66].

Objem pórů v typické cementové pastě ve ztvrdlém betonu ve většině přírodních materiálů je obvykle pod 3 % a zřídka přesáhne 10 %. Existují tři typy vody v cementové pastě. Je jí kapilární voda v malých kapilárách (10 až 50 nm), adsorbovaná voda v gelových pórech a mezivrstevní voda v C-S-H struktuře.

K nejmenším pórům ve struktuře cementového kamene patří tzv. gelové póry. Nacházejí se mezi jednotlivými vrstvami C-S-H gelu, zabírají přibližně 20 - 30 % z jeho celkového objemu a vznikají v důsledku postupné hydratace silikátových slínekových minerálů za vzniku C-S-H fázi (hydratované kalciumsilikáty). Jejich velikost, je řádově několik nm (Mehta a Monteiro [25], uvádí přibližně 0,5 - 2,5 nm). Jsou tedy příliš malé na to, aby mohly způsobit snížení pevnosti cementového kamene. Pokud v nich ale dojde k vysušení vody, mají velký vliv zejména na smršťování a dotvarování.

Dalším typem pórů, a zároveň nejdůležitějším z hlediska krystalizujících hmot a odolnosti betonu proti působení vody, jsou otevřené částečně spojitě kapiláry větší než 10^{-7} m, kterými prochází voda působením tlakového gradientu. Jejich počet a velikosti jsou silně závislé na vodním součiniteli a částečně na zrnitosti cementové směsi. Vznikají jako důsledek

odpařování, či obecně odvodu nadbytečné záměsové vody. V cementovém kameni se nacházejí v prostoru, který v průběhu hydratace zůstane nevyplněn produkty hydratace.

Teoreticky je pro hydrataci cementu potřeba vodní součinitel 0,18 - 0,25. Vyšší vodní součinitel se používá z technologického hlediska, jelikož s nízkým vodním součinitelem by byla cementová nebo betonová směs v praxi nezpracovatelná.

Na základě publikovaných informací ale také vyplývá, že objem kapilárních pórů výrazně narůstá při vodním součiniteli větším než 0,42. V praxi lze ovšem množství vody obejít použitím ztekucovacích přísad, které umožňují praktické ukládání směsí s velmi nízkým vodním součinitelem [67, 2].

U dobře zhydratovaného cementu s nízkým vodním součinitelem se kapilární póry vyskytují zhruba v rozmezí 10 až 50 nm, kdežto u betonů s vysokým vodním součinitelem v počátečních fázích hydratace mohou kapilární póry dosahovat 3 až 5 μm . Kapilární póry větší než 50 nm označujeme jako makropóry, jelikož svou přítomností ovlivňují spíše mechanické vlastnosti cementu, především jeho pevnost. Vodu v nich obsaženou lze označit jako volnou vodu, protože její odstranění nevyvolá žádné změny objemu. Naopak póry menší než 50 nm (dle práce Mehty a Monteiro [25] 5 až 50 nm) označujeme jako mikropóry a mají spojitost s vlivem na smršťování cementového kamene a dotvarování betonu. Klasifikaci pórů definují ve světové literatuře různí autoři s odlišnostmi. Níže je v tabulce 3 uvedeno rozdělení pórů v hydratované cementové pastě na základě práce [25] stejných autorů.

Tabulka 3: Klasifikace velikosti pórů v hydratované cementové pastě dle [25]

Klasifikace velikosti pórů v hydratované cementové pastě		
<i>Zařazení</i>	<i>Velikost</i>	<i>Popis</i>
<i>Kapilární póry</i>	<i>10000 – 50 nm</i>	<i>velké kapiláry (makropóry)</i>
	<i>50 – 10 nm</i>	<i>střední kapiláry (velké mesopóry)</i>
<i>Gelové póry</i>	<i>10 - 2,5 nm</i>	<i>malé izolované kapiláry (malé mesopóry)</i>
	<i>2,5 - 0,5 nm</i>	<i>mikropóry</i>
	<i>≤ 0,5 nm</i>	<i>mezivrstevní prostory</i>

Celkově lze tedy konstatovat, že vlastnosti cementového kamene ovlivňují kapilární póry spíše rozložením své velikosti, než absolutním počtem a z hlediska vodonepropustnosti cementového tmelu není důležitý jen objem přítomných kapilárních pórů, ale zejména poloměr těchto pórů, který výrazně ovlivňuje rychlost pronikání kapaliny pórovým systémem.

Průtok kapaliny kapilárou přímo dokumentuje vztah [3] odvozený Poiseullem, kde právě poloměr kapiláry je uveden ve čtvrté mocnině, a je tedy rozhodujícím faktorem pro výsledný objemový průtok kapilárou [68, 69].

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot p_t \cdot t}{8\eta l} \quad [3]$$

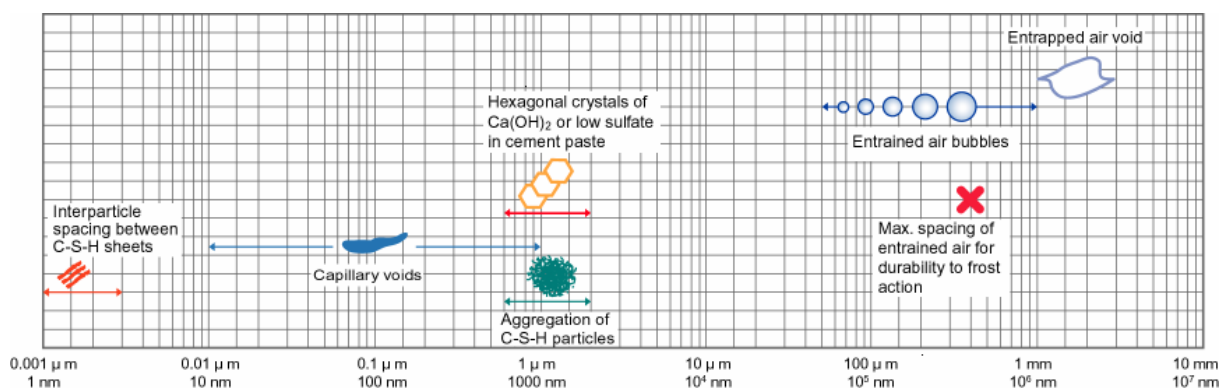
Kde	Q	je objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
	π	Ludolfovo číslo (3,141592...)
	p_t	tlak vzduchu v kapiláře [Pa]
	t	čas [s]
	η	dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
	r	poloměr kapiláry [m]
	l	délka kapiláry [m]

Z tohoto vztahu jasně vyplývá zásadní význam poloměru kapilárních pórů na průtok pórovým systémem. Při návrhu betonové směsi je tedy nutné věnovat pozornost faktorům, které ovlivňují hutnost cementového tmelu. Ta může být vylepšena například vyššími podíly dikalciumsilikátu nebo hydraulické příměsi, což vede k tvorbě většího podílu amorfní C-S-H fáze [70].

Posledním typem pórů, nacházejícím se ve struktuře cementového kamene, jsou vzduchové póry. Vznikají uzavřením vzduchu do hydratačních produktů, nebo záměrně vytvořené přidavkem provzdušňující přísady.

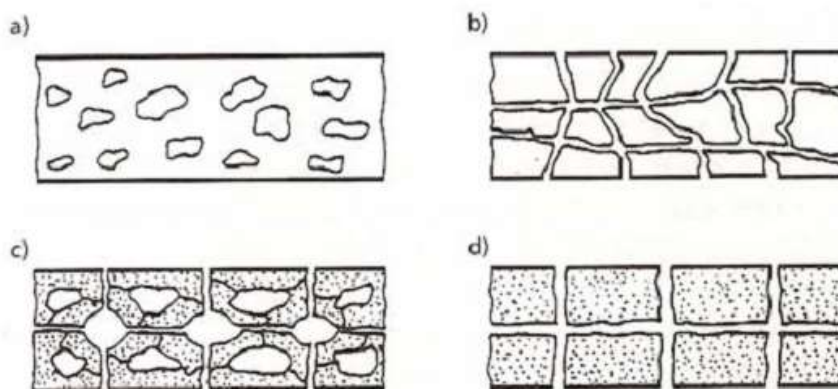
Jsou řádově větší než kapilární póry a jejich velikost se obvykle pohybuje mezi 50 až 200 nm, ale může být i větší. Svým tvarem jsou vždy kulové a vzhledem ke své velikosti mají výrazný vliv na pevnost cementového kamene. V rámci betonové směsi vzniká často ještě jeden druh pórů. Jsou nazývány technologické a sedimentační. V principu se opět jedná o vzduchové póry, nicméně velikost těchto pórů může být v některém směru až 1 cm a spíše než o póry v cementovém kameni se jedná o mezery mezi cementovým kamenem a kamenivem. Vznikají zejména v důsledku technologické nekázně v průběhu betonáže, např. špatným zhutněním nebo sedimentací jemných částic a samozřejmě velmi negativně ovlivňují pevnost betonu jako celku i jeho ostatní vlastnosti [71, 72].

Na obrázku 6 je dle práce Mehty a Monteiro [25] graficky sumarizováno rozdělení dutin a pórů v hydratované cementové pastě betonu.



Obrázek 6: Rozdělení dutin a pórů v hydratované cementové pastě betonu [25]

S porozitou úzce souvisí permeabilita. Souhrnně lze říci, že permeabilita je vlastnost materiálu, která ovlivňuje rychlost pronikání určitého média do jeho pórového systému. Je většinou definována pomocí několika vlastností, které charakterizují pronikání media nebo toku energie pórovitou strukturou cementového kamene. V této souvislosti není permeabilita jen jednoduchou funkcí pórovitosti, ale závisí na velikosti, tvaru, rozmístění a spojitosti pórů. Tento vztah permeability a pórovitosti popsal Bakker [71] ve schématu na obrázku 7.



Obrázek 7: Vztah permeability a pórovitosti podle Bakker

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

3.4.2 Trhliny v betonu

Tvorba krystalů ve struktuře betonu již byla popsána v předchozích kapitolách (např. kapitola 3.2). Jak již bylo uvedeno, tyto vzniklé krystalické novotvary jsou ve své podstatě velmi křehké, což znemožňuje v konečném důsledku utěsnění aktivních trhlin. Toto omezení se ale netýká trhlin stabilních. Dle dostupné literatury [40] krystalizující materiály totiž výrazně napomáhají dodatečnému autogennímu zhojení až do šíře trhlin 0,4 mm, což je značnou výhodou oproti normálnímu betonu. U toho různí autoři uvádějí mírně odlišné hodnoty, ale například autoři Edvardsen [73] a Tazawa [74] se shodují na autogenním hojení pouze do šířky trhliny 0,15 mm.

Proto při použití této technologie musí být tedy zvláštní důraz kladen na následující aspekty:

- trhliny konstrukce musí být neaktivní (bez trhlin měnících svoji šířku),
- trhliny konstrukce musí být odolné vůči pohybu díky teplotním změnám,
- u konstrukce nesmí také docházet k větším deformacím.

Trhliny v betonové konstrukci nepříznivě ovlivňují její vodotěsnost. Prosakování vody trhlinou je závislé na šířce trhliny a hydraulickém spádu vody. V trhlínách malé šířky je transport vody v kapalném skupenství minimální. Nejčastějšími činiteli způsobujícími vznik trhlinek je smršťování a dotvarování betonu, ale také plastické sedání, sklon povrchu, vyhlazování betonu a v neposlední řadě teplota.

V řadě případů se průběžné trhliny malé šířky, kde je transport vody v kapalně formě, samootěsní. V trhlíně probíhá další hydratace cementu a trhлина se zanáší drobnými částicemi obsaženými v pronikající vodě i cementovým tmelem. Předpokladem samootěsnění však je, že šířka trhliny se v průběhu doby působením vnějších vlivů prakticky nemění. Velikost trhlín je ovlivňována stupněm a systémem vyztužení konstrukce, způsobem provádění a způsobem ošetřování betonové konstrukce po uložení betonu [76].

Pro vyjádření množství kapaliny Q_w [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] proudící trhlinou jednotkové délky se často používá empirického vztahu ve tvaru:

$$Q = 10^5 \cdot W \quad [4]$$

Kde Q_w množství kapaliny v [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] proudící trhlinou
 w je šířka trhliny [m]

Existuje ale další mnohem sofistikovanější vztah [5] který vypočítává úbytek tlaku kapalin nebo plynů při jejich průchodu trhlinou.

$$\Delta P = \xi_1 \frac{h \cdot \rho \cdot \gamma \cdot w}{8 \cdot w^3 \cdot l} + \xi_1 \frac{\rho}{2 \cdot w^3} \left(\frac{q}{l} \right)^2 \quad [5]$$

kde γ povrchová energie [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]
 ξ hustota kapaliny nebo plynu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 h přetlak kapaliny nebo plynu [m]
 l délka trhliny [m]
 q objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

První část rovnice vyjadřuje ztráty v důsledku viskózního odporu kapaliny, druhá část pak ztráty vlivem setrvačnosti. Po zjednodušení lze získat následující vztah:

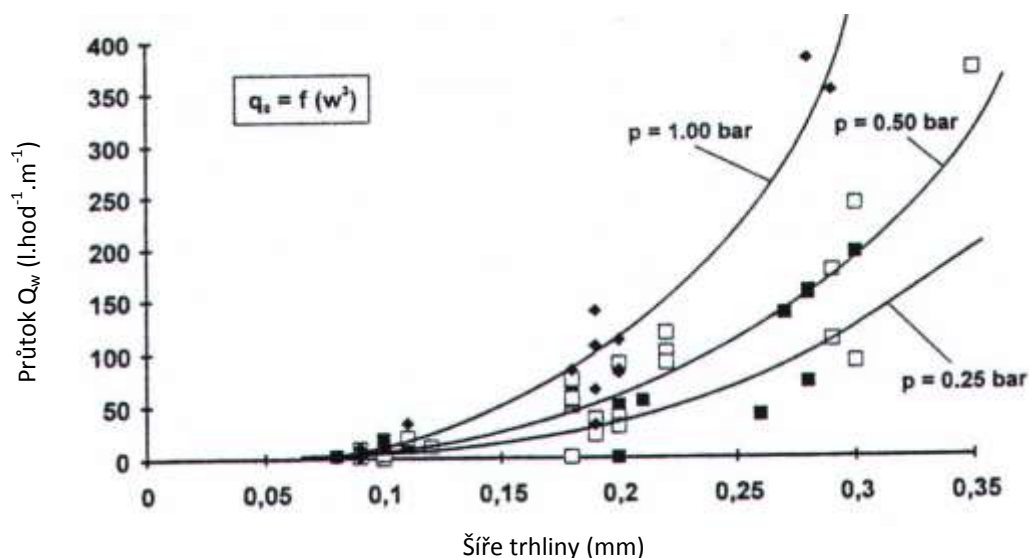
$$Q = \frac{8 \cdot l \cdot q \cdot i}{720 \cdot \eta} \cdot w^3 \quad [6]$$

Kde η dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

Při dosazení tíhového zrychlení, dynamické viskozity vody a uvažování s jednotkovou délkou spáry a jednotkovým hydraulickým spádem dostaneme rovnici:

$$Q_w = \frac{8 \cdot 9,81}{720 \cdot 1,01} \cdot 10^6 \cdot w^3 = 1,11 \cdot 10^6 \cdot w^3 \quad [7]$$

Při porovnání rovnice [7] s výše uvedenou rovnicí [5], lze konstatovat, že jsou obě rovnice velmi podobné a výsledek je zcela závislý na šířce trhliny. Závislost množství vody protékající trhlinou na šířce trhliny je doložena grafem na obrázku 8. Tento vztah pro šířku trhlín je obdobně závislý na šířce trhlín, jako je transport kapilárními póry betonu závislý na poloměru těchto pórů [77, 78].



Obrázek 8: Průtok vody Q_w trhlinou v závislosti na její šířce a hydraulickém spádu [78]

Z uvedeného grafu je podstatná zejména oblast mezi 0,05 mm a zhruba 0,07 mm, kde je průtok vody trhlinou tak malý, že je již téměř neměřitelný i při vyšším použitém zkušebním tlaku vody. Proto je v zájmu udržení vodonepropustnosti betonu nebo cementového tmele nutné zajistit prevenci tvorby trhlín nebo alespoň udržet šířku vytvořených trhlín pod 0,07 mm, jak vyplývá z výše uvedeného grafu. V praxi se ale běžně používá empiricky stanovená hodnota 0,15 mm. Při této šířce může zároveň docházet k takzvanému autogennímu hojení trhlín. Maximální šířka trhlín, které mohou být takto zaceleny, se dle práce Lamonda a Pielerta [79] pohybuje mezi 0,1 až 0,2 mm, při nutnosti pravidelného vlhčení a trvalého ponoření do vody. Hojení nastává pomocí uhličitánů vyplavovaných při další hydrataci cementu a v neposlední radě zanášením částicemi obsaženými v pronikající vodě i cementovým tmelem. Ty jsou ukládány v trhlíně, která je tímto způsobem postupně vodotěsně uzavřena [79, 69].

3.4.3 Voda

Reakce, díky které nastane v pórovém systému betonu dodatečný krystalizující proces, probíhá vždy ve hmotě (nikoli pouze na povrchu), a to i v případě aplikace formou povrchové úpravy nebo vyspu. Nezbytnou podmínkou procesu krystalizace je však přítomnost vody v kapilárních pórech betonu po určitou minimální dobu, která je potřebná, aby krystalizace proběhla v dostatečném rozsahu.

Buď je tento fakt zajištěn návrhem betonové směsi, a to vyšším vodním součinitelem (dle práce Pazderky [46] je $V/C+X=0,7$), nebo je výhodné systém použít v takových návrhových podmínkách, kde je konstrukce neustále dotována vodou (spodní stavby, již

prosakující konstrukce, čerstvý beton). Pokud je v době aplikace konstrukce suchá, nedojde ke krystalizující reakci. Ta začne probíhat až v momentě přítomnosti vody v pórovém systému.

V této souvislosti je nutno podotknout, že krystalizující efekt nastane i na suché konstrukci ve chvíli, kdy se v ní objeví voda. Čím více voda konstrukci prosakuje, tím více se póry betonu zaplňují krystaly. S výhodou se proto krystalizující hydroizolace používají pro sanaci starších betonových konstrukcí (ve formě nátěru), které vykazují neustálé známky plošného průsaku. Po iniciaci krystalizující reakce (a následného dodržení technologické postupu) je možno u některých výrobků zatížit ošetřený beton tlakem vody už po min. dvanácti dnech po aplikaci (v případě agresivních médií až po osmnácti dnech). Plný utěšňující účinek se ale dostaví, dle informací většiny výrobců, až po přibližně čtyřech až pěti týdnech. S tímto časovým intervalem je proto nutné počítat ve vztahu k harmonogramu výstavby celého díla [40, 67].

3.5 Aplikace krystalizujících hydroizolací

Konkrétní typ aplikace hydroizolačních materiálů s krystalizujícími účinky se volí v závislosti na typu konstrukce (starší či nová). Dále je to tloušťka konstrukce, zatížení vodou a druh agresivního prostředí. Neposledním kritériem volby je samozřejmě rovněž finanční hledisko, neboť zejména u nových konstrukcí lze výběrem vhodné formy aplikace výrazně ušetřit [45, 61].

Způsoby aplikace jsou u všech výrobků prakticky shodné (rozdíly jsou jen ve lhůtách, množství složek atd.). Všichni výrobci nabízejí v zásadě pět způsobů aplikace:

Krystalizující hmoty aplikované na povrch betonu:

- aplikace formou nátěru či nástřiku,
- aplikace formou vsypu do hlazených podlahových konstrukcí,
- krystalizující rychle tvrdnoucí tmely pro utěsnění akutních průsaků,
- prefabrikované malty s obsahem krystalizující přísady.

Krystalizující hmoty přidávané do čerstvého betonu:

- aplikace formou přísady.

3.5.1 Aplikace formou nátěru či nástřiku

V současnosti nejrozšířenějším způsobem použití krystalizujících hmot je aplikace formou nátěru či nástřiku na povrch konstrukce. Krystalizující hydroizolace v této formě může být použita k sanaci prakticky jakkoli staré betonové konstrukce, včetně nových konstrukcí jako dodatečná hydroizolace.

Postup při aplikaci krystalizujících materiálů na povrch starších betonových konstrukcí je poměrně jednoduchý. Nejprve je krystalizující materiál (ve formě prášku) rozmíchán ve stanoveném poměru s vodou. Čím je na povrch nanášeno vyšší množství nátěrů, tím je nutno směs více naředit. Je-li požadován nižší stupeň ochrany (nepředpokládá se zatížení tlakovou vodou), obvykle postačí aplikovat pouze jeden nátěr. Jestliže se předpokládá zatížení tlakovou vodou (většina případů), aplikují se nátěry dva, u lokálních sanací i více. Před

nanesením směsi na konstrukci je však nutné její povrch zbavit nečistot a zajistit otevřenost pórů v povrchové vrstvě tak, aby do nich mohly po aplikaci krystalizující hmoty prorůstat nově vzniklé krystaly.

Otevřená pórová struktura betonu je velmi důležitá pro spolehlivé pronikání krystalizace pod povrch betonu, kde dochází k samotnému procesu utěšňování pórů. Toho se dosahuje obvykle zdrsněním povrchu ocelovým kartáčem či jiným abrazivním typem úpravy povrchu. Dále je důležité důkladné provlhčení celého povrchu, neboť utěšňující krystaly mohou vznikat pouze za přítomnosti vody v pórech betonu. Díky této podmínce pro vznik krystalů musí být nové konstrukce po aplikaci krystalizujících hmot vlhčeny vodou. Naopak ale, například při sanaci úplně zavlhlých betonových konstrukcí, je tato podmínka výhodou, protože není potřeba povrch konstrukce vysušovat. Poté se aplikuje krystalizující materiál (v jedné nebo dvou vrstvách) formou nátěru speciálním štětcem nebo nástřikem. Tloušťka nanesené vrstvy bývá obvykle v rozmezí 1 až 1,5 mm a závisí na konkrétním výrobku [81, 82].

Aby mohla proběhnout utěšňující krystalizace v dostatečné míře, je nezbytné povrch s nátěrem důkladně ošetřovat po určitou dobu. Toto je kritická fáze celého procesu aplikace a většina výrobců uvádí, že pro zdárný průběh utěšňující krystalizace postačuje ošetřování povrchu podle zásad ošetřování čerstvého betonu uvedených v ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Povrch konstrukce by tedy měl být minimálně 3krát denně vlhčen po dobu 2 dnů tak, aby byl povrch betonu stále vlhký.

Tato fáze zraní je z technologického hlediska nejnáročnější a vyžaduje dokonalou kázeň na pracovišti. Pokud by totiž vlhčení (ošetřování) bylo zanedbáno, nebo dokonce opomenuto, mělo by to katastrofální vliv na vodotěsné vlastnosti sanované konstrukce.

Pro vodorovné betonové konstrukce, jako jsou spádové betony aj., je výhodné aplikovat krystalizující hydroizolaci formou vsypu suchého prášku na ještě nezatvrdlý povrch čerstvého betonu. Jedná se v podstatě o mírně upravenou verzi materiálu určeného pro nátěrovou formu aplikace. Základní podmínkou použití je rovinnost konstrukce. To je dáno technologií aplikace, kdy nejprve pracovník posype povrch ještě čerstvého nezatvrdlého betonu krystalizujícím materiálem ve formě prášku, a poté je tento prášek zapracován zařízením (většinou rotační hladičkou s kotoučem) do povrchové vrstvy betonu. Následuje již popsaná fáze ošetřování betonu.

Krystalizující hydroizolační materiál může být použit také jako jednosložkový rychlotuhnoucí tmel, kterým se snadno a rychle zabráni lokálním průsakům trhlinami v betonové konstrukci (nové i staré). Tento tmel vznikne buď pouze smícháním krystalizující hydroizolace určené pro nátěrovou aplikaci ve formě prášku s vodou s nižším vodním součinitelem než při přípravě směsi pro nátěr či nástřik, nebo se připravuje ze speciálního prášku. Tmel je nutno aplikovat maximálně několik minut po vytvoření. Vždy se používá v kombinaci s nátěrovou krystalizující hydroizolací a to tak, že se nejprve vyseká v místě trhliny žlábek, jehož povrch se natře krystalizujícím nátěrem. Následně je aplikován rychlotuhnoucí tmel, kterým se žlábek vyplní. Když tmel zatuhne, celé místo se s dostatečnými přesahy natře opět krystalizujícím nátěrem [80, 37, 83].

3.5.2 Aplikace formou přísady

U této aplikace jde o využití krystalizující technologie nikoliv k opravě průsaků existující hydroizolace, ale k vytvoření primární hydroizolace nové konstrukce. Tato technologie je nazývána „technologie bílých van modifikovaná krystalizující přísadou“ a samotný krystalizující materiál je přidáván ve formě přísady do směsi pro výrobu betonu. Výhodou této aplikace při výstavbě je úspora materiálu a při vyztužení konstrukce také značná úspora povrchové betonářské výztuže, která je určena nejen k prevenci tvorby trhlin, ale především ke zlepšení výsledných hydroizolačních vlastností betonové konstrukce [37]. Shrnutí výhod použití technologie bílých van s krystalizující přísadou:

- značná časová úspora při výstavbě,
- finanční úspory při provádění hydroizolací a protiradonových opatření,
- v případě lokálních defektů, například průsaků v trhlinách a hnízdech nebo pracovních spárách, lze tyto defekty spolehlivě sanovat z vnitřní strany konstrukce,
- přísada je trvalou součástí betonu a nelze ji proto mechanicky poškodit,
- betonovou konstrukci s krystalizující přísadou není nutno chránit před poškozením další ochrannou vrstvou před prováděním zásypů,
- přísada nepodléhá žádnému typu degradace, naopak s časem se její vlastnosti zlepšují,
- přísada mírně zlepšuje mechanické vlastnosti betonu,
- krystalizující technologie snižuje riziko chybného provedení, neboť se jedná o bezešvou izolaci,
- omezuje vliv lidského faktoru,
- lze docílit i úspor při zemních pracích.

Toto ovšem není jediný způsob použití krystalizujících hmot ve formě přísady. Za určitých podmínek lze použít krystalizující přísadu i pro sanaci starších konstrukcí (nejen betonových) v případech, kdy sanaci provádíme torkretováním vrstvy betonu s krystalizující příměsí na povrch konstrukce [61][67].

Způsoby aplikace krystalizujících přísad do čerstvé směsi pro výrobu betonu jsou v zásadě dva. Aplikuje se:

- v práškovém stavu,
 - není nutnost rozmíchat s vodou - menší pracnost,
- v tekutém stavu,
 - nutnost rozmíchávat s vodou - zvýšená pracnost.

Práškové přísady jsou výrobci dodávány ve vodou rozpustných pytlících, které jsou na betonárně vhozeny v příslušném počtu do autodomíchávače před jeho naplněním betonem. V případě přísady aplikované v tekutém stavu se krystalizující příměs rozmíchá v záměsové vodě a poté se spolu s vodou smíchá s cementem a kamenivem [32].

Dodržení tohoto technologického postupu je velice důležité, neboť je nutné, aby byla krystalizující příměs v betonu rovnoměrně rozptýlena. Po uložení směsi do bednění (nebo torkretováním/stříkáním betonu) nastává, stejně jako u aplikace nátěrem, fáze ošetřování čerstvého betonu.

Oproti nátěru jsou krystalizující příměsi do betonu vytvořeny tak, aby proces dodatečné krystalizace, který ve struktuře betonu vyvolávají, nastal se zpožděním až ve chvíli, kdy je již vytvořena základní struktura cementového tmelu.

Proto je opět důležitá kritická fáze ošetřování betonu předepsaným způsobem, která pokud by byla opomenuta nebo zanedbána, cement by spotřeboval během úvodní fáze hydratace téměř veškerou vodu obsaženou v betonu a ta by pak chyběla pro uskutečnění samotné krystalizující reakce v pórové struktuře betonu.

Díky tomuto způsobu aplikace dochází ke krystalizaci v celé hmotě betonu, a proto jsou výsledné vodonepropustné vlastnosti ještě lepší než u povrchové aplikace formou nátěru či nástřiku [67, 84, 85].

3.5.3 Omezení využitelnosti

Tato problematika souvisí s problematikou popsanou v kapitole 3.4, „Vlivy působící na krystalizující hydroizolaci“. Hlavním omezením této technologie je, že vzniklé krystalické novotvary ve struktuře betonu jsou ve své podstatě velmi křehké. To v konečném důsledku znemožňuje utěsnění aktivních trhlin. Při použití krystalizujících technologií, a to zejména technologie „bílých van s použitím krystalizujících přísad“, musí být proto zvláštní důraz kladen na tyto aspekty:

- konstrukce musí být staticky stabilní,
- konstrukce musí být odolná proti teplotním změnám,
- u konstrukce také nesmí docházet k větším deformacím,
- v případě pohybu konstrukce je nutné příslušné části konstrukce lokálně izolovat pomocí injektáží.

Je tedy zřejmé, že hlavním omezením této technologie je větší pohyb konstrukce, a tudíž pohyb ve vzniklých trhlínách. V takto namáhaných konstrukcích jsou tyto krystalické novotvary tříštěny a jejich hydroizolační funkce je tedy narušena.

Pro tento typ konstrukcí, u kterých nastává pohyb, je nutno příslušné části či trhliny lokálně izolovat například pomocí mnohem pružnějších polyuretanových injektáží [56, 87].

4 Degradace cementového tmelu v betonu

Pod pojmem koroze se rozumí nezáměrné poškození ztvrdlých stavebních hmot (betonu, malty, omítky) reakcemi s látkami, které jsou obsaženy v okolním prostředí a jsou tedy ve styku s materiálem. Degradaci dělíme do tří skupin.

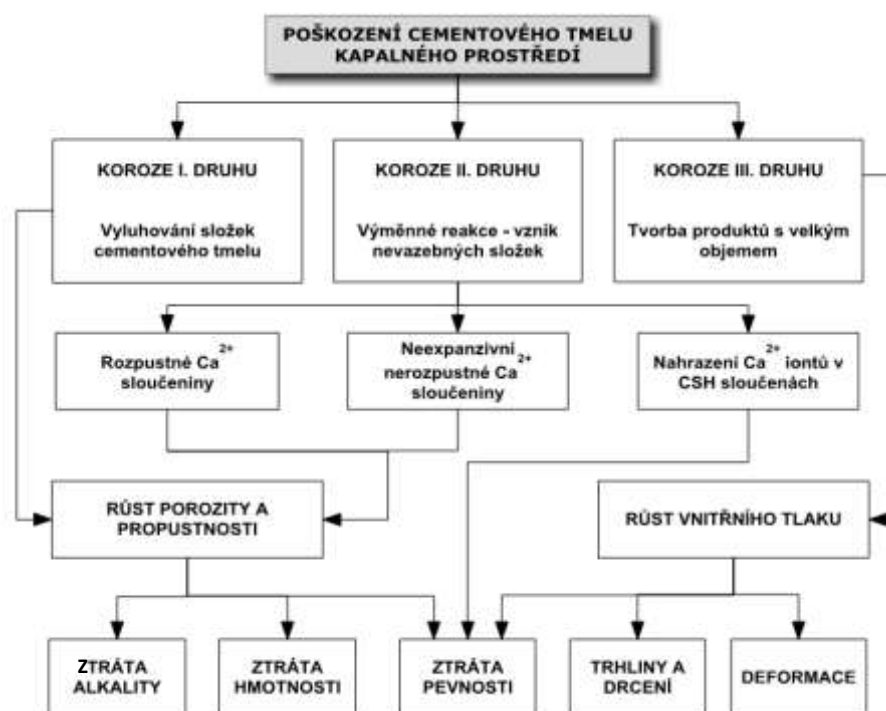
- Fyzikální degradace:
 - zjednodušeně lze říci, že do této degradace jsou zahrnuty mechanické, teplotní a vlhkostní vlivy.
- Chemická degradace:
 - zahrnuje děje, při nichž se mění chemické složení materiálu nebo některé jeho složky reakcí s okolím.
- Biologická degradace:
 - Zahrnuje degradační procesy vyvolané či podmíněné působením živých organismů a projevuje se jako fyzikální degradace (např. vrůstání kořenů), nebo jako chemická koroze, způsobená produkty životních pochodů živočichů nebo působením mikroorganismů.

Tyto skupiny vlivů nepůsobí na beton odděleně, ale v reálné praxi probíhají současně a navzájem se podporují a často výsledky jednoho typu degradačního působení může podporovat průběh jiného. Například pokud dojde u betonové konstrukce k fyzikálnímu poškození a ke vzniku prasklin, je beton a jeho výztuž náchylnější i k chemickému ataku, např. kyselým deštěm [11, 26].

4.1 Kapalná agresivní prostředí

Voda se vyskytuje jak v kapalném, tak i v plynném skupenství. V pórovitém stavebním materiálu se voda navíc nikdy nevyskytuje čistá, ale ve formě více či méně koncentrovaných vodných roztoků plynů nebo pevných látek. V betonu tedy působí jako rozpouštědlo a transportní medium některých látek, včetně složek stavebního materiálu (např. hydroxidu vápenatého v betonu nebo dosud nezkarbonatované maltě). Tyto látky mohou být dále srážkovou nebo vzlínající vodou vyplavovány. Důsledkem může být rozpouštění dalších podílů rozpustných složek (např. cementu) a často vznik výkvětů.

Agresivní vody mohou způsobit tři typy koroze, které se od sebe navzájem liší a vyznačují se jinou mírou poškození betonu. Korozi podle povahy vzniklých produktů při styku s kapalným prostředím rozdělil ve své práci na tři základní druhy Moskvin [8], které dále, dle schématu na obrázku 9, rozšířila Rovnaníková a kol. [15]. Všechny procesy koroze v betonu souvisejí se snížením obsahu hydroxidu vápenatého v cementovém tmelu a mají vliv na korozi ocelové výztuže [71, 88].



Obrázek 9: Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [15]

Koroze I. typu způsobující vody s nízkou přechodnou i trvalou tvrdostí, tzv. vody hladové, dále kyseliny, některé sloučeniny kyselé povahy a chemické sloučeniny vytvářející snadno rozpustné vápenaté soli.

Během této fáze koroze v betonu dochází k vyluhování a rozpouštění podílů hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 , vzniklého hydratací cementu vodami s nízkou přechodnou tvrdostí (Ca^{2+}). Ionty (Ca^{2+} , OH^-) jeho rozpustnost snižují, kdežto ostatní soli rozpustnost zvyšují (Na^+ , K^+ , Cl^- apod.). Díky tomu se snižuje koncentrace hydroxylových iontů OH^- , a tím i hodnota pH pórového roztoku, což nepříznivě působí na korozi výztuže, ale i na stabilitu některých zhydratovaných slínkových minerálů.

Rychlost vyluhování je úměrná rychlosti filtrace, jež závisí na množství a velikosti kapilárních pórů v cementovém tmelu (velké póry → hloubková koroze).

Rychlost průběhu koroze je ale dále ovlivněna tím, zda jde o vodu stojatou či proudící, zda působí pod tlakem a zda jde o vodu teplou či studenou. Následkem působení těchto pochodů nastává postupný rozklad zatvrdělého cementového kamene s následnou ztrátou mechanických vlastností [10, 89].

Koroze II. typu je způsobena výměnnými reakcemi mezi kyselinami nebo solemi okolního prostředí se složkami cementového tmelu, především Ca(OH)_2 , které s ním vytvářejí snadno rozpustné nebo i nerozpustné sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti. Rozpustné produkty jsou z betonu odplavovány a jsou napadány další podíly cementového tmelu. Nerozpustné sloučeniny ale částečně brání styku s agresivním prostředím a dokonce dochází i k částečnému zpevnění povrchu betonu.

Čím intenzivněji probíhá vzájemná reakce a čím rozpustnější jsou produkty této reakce, tím rychleji a intenzivněji se beton porušuje. Tato koroze zahrnuje reakce agresivního CO_2 , hydroxidů a kyselin, hořečnatých a amonných solí (mimo sírany). Jedná se zejména o roztoky obsahující ionty SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{NH}_4)^+$. V přírodních vodách je to např. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 a $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Ve vodách průmyslových jsou to často sírany: amonný, měďnatý, hlinitý, železitý apod. Příslušné kyseliny reagují s hydroxidem vápenatým, hydratovanými křemičitany a hlinitany vápenatými z cementového tmelu za vzniku příslušných vápenatých solí. Organické kyseliny, zejména kyselina octová a máselná, neutralizují hydroxid vápenatý za tvorby vápenatých solí. Rozpustné produkty se odplavují a jsou napadány další podíly cementového tmelu. Nerozpustné sloučeniny ale naopak částečně brání styku s agresivním prostředím a dochází i k částečnému zpevnění povrchu betonu.

Velmi dobrým příkladem může být působení agresivního CO_2 . Ten se vyskytuje v prostředí, kde je rovnováha mezi formami CO_2 v závislosti na pH a koncentraci přítomných kationtů porušena jeho nadbytkem. V něm reaguje s hydroxidem vápenatým z cementového tmelu za vzniku CaCO_3 , který se následně rozpustí s dalšími podíly CO_2 na rozpustný hydrogenuhličitan ($\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$).

Zředěné roztoky alkalických hydroxidů (KOH , NaOH) jsou pro cementový tmel neškodné. Naopak koncentrované roztoky rozpouštějí silikátové a aluminátové složky cementového tmelu za vzniku rozpustných sloučenin a může dojít až k úplnému rozpadu pojivové složky betonu. Hořečnaté soli ve vodném roztoku hydrolyzují, dochází ke vzniku brucitu $\text{Mg}(\text{OH})_2$, který je nevazebný a nerozpustný, a volné H^+ ionty neutralizují $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku příslušné vápenaté soli. Amonné soli ve styku s OH^- ionty uvolňují plynný amoniak NH_3 , čímž se posunuje rovnováha na stranu reakčních produktů reakce a současně vzniká rozpustný dusičnan vápenatý [15, 80].

Ke **korozi III. typu** dochází porušováním betonu vlivem objemných sloučenin. Hlavním představitelem je koroze síranová, která je způsobována zejména sírany reagujícími s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, jež vytvářejí málo rozpustný síran a způsobují sádrovcovou korozi. Během této koroze vzniká dihydrát síranu vápenatého s nárůstem objemu až 17 %, což se zpočátku projevuje zvýšením pevnosti a hutnosti, a tím i nepropustnosti betonu, ale následně vede ke vzniku trhlinek a až k úplnému rozrušení betonu.

Dalším typem koroze je takzvaná koroze „sulfoaluminátová“, způsobená tvorbou kalciumsulfoaluminátu vápenatého - sekundárního ettringitu. Ten vzniká v zatvrdlém cementovém kameni ve formě charakteristických hexagonálních jehlic a nárůst objemu jednotlivých složek zatvrdlého cementového kamene při působení síranů se pohybuje od 94 do 377 % [90, 91].

4.2 Plynná agresivní prostředí

Cementový tmel je také napadán plynnými agresivními látkami. Ty vznikají v důsledku průmyslových procesů, činnosti spalovacích motorů, živých organismů apod.

K nejvýznamnějším exhalátům patří oxidů síry a dusíku. K nim je ale nutno přiřadit také oxid uhličitý, který je produkován ve značných objemech. Plynné agresivní látky působící na beton lze rozdělit na:

- plyny kyselého charakteru (CO_2 , SO_2 , NO_2 , HCl , H_2S , HF),
- ostatní plyny (NH_3 , Cl_2).

Rozpouštěním kyselých složek plyných exhalátů vznikají velmi zředěné roztoky anorganických kyselin, které reagují se složkami cementového tmelu, zejména $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a co je podstatnější, také s hydroxidem vápenatým v betonu [92].

K hlavním faktorům majícím největší vliv na hodnocení agresivity plyného prostředí patří:

- koncentrace plynu v ovzduší,
- relativní vlhkost (R. H) vzduchu,
- teplota,
- působení více agresivních činitelů.

5 Vybrané mechanismy degradace cementového tmelu a výztuže betonu

5.1 Sírany

Pevné soli na beton nepůsobí ale, pokud jsou přítomny ve formě roztoku, reagují s cementovou maticí. Nejvíce přichází do úvahy sírany sodný, draselný vápenatý, hořečnatý a sírany amonné, které způsobují ztrátu jeho pevnosti. Hloubka a rychlost síranové koroze je silně závislá na permeabilitě, porositě a pevnosti betonu, typu konstrukce, koncentraci a druhu síranu, hladině a mobilitě podzemní vody.

Síranová koroze je komplexní jev, kde by měly být uvažovány fyzikální a chemické aspekty a účastní se jej prakticky všechny složky hydratovaného cementu. Je spojena s expanzí betonu, tvorbou trhlin rozpadem cementového kamene apod.

Sírany se běžně vyskytují v podzemních vodách a jsou také obsaženy v některých druzích průmyslových odpadních vod. Nejagresivnějšími jsou rozpustné sírany, neboť nerozpustné sírany neuvolňují síranové ionty, a proto korozi nezpůsobují [93].

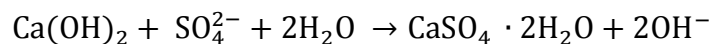
Působení síranů, může být rozděleno na formy ettringitu, sádrovce, krystalizace a rekrystalizace solí. Tyto produkty zaujímají větší objem, než původní sloučeniny. Roztoky CaSO_4 , MgSO_4 , Na_2SO_4 , při koncentraci pod 0,5 % nekorodují betony vyrobené s použitím pucolánových cementů. Sílu agresivity síranového prostředí lze rozdělit podle Neville [90] na čtyři hlavní skupiny uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4: Klasifikace agresivity síranového prostředí dle ACI 201.2R-92[90]

Klasifikace agresivity síranového prostředí dle ACI 201.2R-92		
Projevy	Koncentrace ve vodě rozpustných síranů vyjádřených jako SO ₄	
	V půdě [per cent]	Ve vodě [ppm]
slabé	<0,1	< 150
mírné	0,1 do 0,2	150 do 1500
silné	0,2 do 2,0	1500 do 10000
velmi silné	>2,0	> 10000

Jinak lze zkráceně napsat, že při vyšších koncentracích CaSO₄ reaguje na hydrát hlinitanu vápenatého a dojde k tvoření rozpínavého ettringitu (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·32H₂O). Dále např. roztok o MgSO₄ o koncentraci více než 0,5 % při použití pucolánových cementů, reaguje se všemi složkami cementu včetně C-S-H a vytváří Mg(OH)₂ (brucit) a sádro, která v pozdější fázi může rovněž formovat ettringit [71][94].

Při vysokém obsahu alkalických síranů Na₂SO₄ a K₂SO₄ (Mindess et al. [11] uvádí koncentraci síranových iontů potřebnou pro průběh sádrovcové koroze 4000 mg/ dm³), zreaguje na hydroxid vápníku a vytvoří rozpínavou sádro (CaSO₄·2H₂O). Při nižších koncentracích se vzniklý síran vápenatý CaSO₄ podílí na vzniku ettringitu. Tyto sírany reagující s Ca(OH)₂ za vzniku málo rozpustných síranů a způsobují tzv. sádrovcovou korozi, dle obecné rovnice:



Vznik sádrovce je spojen s nárůstem objemu o 17 %. Dojde k zaplnění pórů cementového tmele a za vhodných vlhkostních podmínek může dojít k rekrystalizaci a vzniku objemnějších krystalů působících na stěny pórů řádově v desítkách N·mm⁻². Sádrovec reaguje s hydratovanými i nehydratovanými alumináty a způsobuje tzv. sulfoaluminátovou korozi. Komplexní reakcí vzniká málo rozpustný sekundární ettringit (Candlotova sůl) [2].

Vnitřní síranová koroze (ISA - Internal Sulphate Attack) nastává z důvodu přítomnosti síranů obsažených v kamenivu betonu (ve formě dihydrátu síranu vápenatého (CaSO₄·2H₂O) nebo anhydritu (CaSO₄)). Převyšuje-li jejich obsah (vyjádřený jako SO₃) hodnotu 0,2 %, hrozí nebezpečí popraskání betonu z důvodu tvorby sekundárního ettringitu ve ztvrdlém betonu. ISA rovněž nastává v betonu, který je ošetřován při teplotě vyšší než 70 °C, např. při propařování dílců nebo u masivních konstrukcí, takže primární ettringit je tepelně rozložen a následně vznikne až sekundární ettringit [2].

Vnější síranová koroze (ESA - External Sulphate Attack) vzniká v první fázi působení síranových iontů SO₄²⁻ z vnějšku, čímž dochází k přeměně portlanditu Ca(OH)₂ na sádrovec CaSO₄·2H₂O. Tento proces je provázen růstem objemu, protože sádrovec má větší molární objem než portlandit. Kromě toho nastává ještě další a výraznější objemová změna, a tou je vznik sekundárního ettringitu z CAH.

V praxi se ovšem setkáváme i se síranuhličitánovou korozí, která souvisí se vznikem thaumasitu ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Tato koroze je spojená s reakcí kalciumsilikáthydrátů s přítomnými sírany a uhličitany a může vyvrcholit úplným rozpadem betonu. Thaumasit má krystalovou strukturu velmi podobnou ettringitu a vzniká v chladném prostředí o teplotě pod 15 °C. Jeho tvorba přestane při teplotě 20 °C a narůstá s množstvím C_3A . Proto bylo zjištěno, že výrazné potlačení tvorby thaumasitu nastane s použitím cementu na bázi portlandského slínku s vysokým obsahem vysokopecní strusky [2, 15, 91].

5.2 Chloridy

Chloridy se vyskytují ve vodách přírodních i průmyslových. Jejich největší obsah se v přírodě vyskytuje v mořské vodě, čímž jsou ohroženy železobetonové konstrukce přímořských států, kde je této problematice věnována velká pozornost, V ČR je ovšem obsah chloridů sledován především v průmyslových vodách a samotném betonu. V něm je z důvodu ochrany výztuže proti korozi obsah chloridů omezen normou, která stanoví obsah chloridů v kamenivu na maximálně 0,05 %.

K intenzivnímu působení chloridů na betonové konstrukce dochází dále zejména u dopravních staveb v souvislosti s používáním chemických rozmrazovacích látek. Při jejich kontaktu s betonem dochází v mikrostruktuře betonu či malty ke vzniku objemných krystalických novotvarů, které expanzními tlaky rozrušují strukturu materiálu. Ten může být způsoben dvěma mechanismy.

Při prvním z nich dojde k reakci mezi chloridy a cementovou maticí (C_3A), přičemž produktem těchto reakcí může být především Friedlova sůl ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Při navazující reakci dochází k reakci C_4AF a tvorbě produktů velmi podobných Friedlově soli.

Druhým mechanismem je fyzikální jev, v jehož důsledku může dojít ke vzniku tahových napětí ve struktuře materiálu. K němu dochází při kapilárním nasáváním roztoků solí do pórů cementového kamene za následného vypařování vody. Jejich koncentrace vzrůstá až do vzniku nasycených roztoků a počátku krystalizace. Ta vede ke vzniku krystalů v omezeném prostoru pórů struktury betonu či malty, které navodí škodlivé tlaky vedoucí k rozrušení betonu [95, 96, 97].

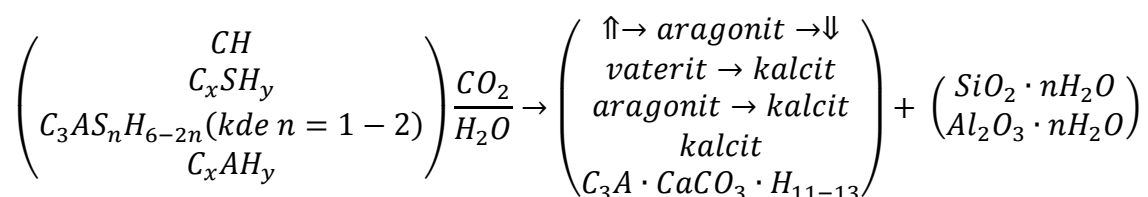
5.3 Oxid uhličitý - karbonatace

Koroze působením atmosférického oxidu uhličitého se nazývá karbonatace, protože produktem rozkladu cementového tmelu je uhličitán vápenatý, tj. karbonát. Koncentrace CO_2 v atmosféře kolísá v závislosti na místních podmínkách, ale obvykle činí 0,038 % objemových, což odpovídá cca 60 mg CO_2 na 1 m³ vzduchu. Dle ESRL - Earth System Research Laboratory³ byla v květnu 2010 průměrná koncentrace na světě 390 PPM. V důsledku emisí ale jeho průměrná koncentrace roste přibližně o 2 PPM za rok.

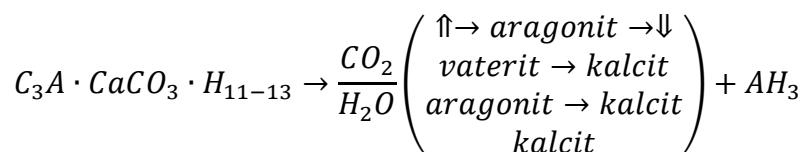
³ <http://www.esrl.noaa.gov/>

Do betonu, zvláště při jeho použití na obvodové nebo venkovní konstrukce, se oxid uhličitý i vodní pára dostávají v plynné fázi. Jejich pronikání do betonu, a tedy i účinky mohou být podstatně ovlivňovány druhem hydratačních produktů pojiv, párovitě kapilární strukturou cementového tmelu, jakož i povrchovými úpravami na vnitřních i venkovních plochách betonových konstrukcí. Šíří se difuzí, jejíž rychlost pak ovlivňuje hloubku, do které může po určité době oxid uhličitý do betonu proniknout [98].

Vyplnění pórů vodou brání difuzi plynů do vnitřních částí betonu, i když se ve vodě rozpouštějí, jak je tomu právě u CO_2 . Přítomnost určité vlhkosti v betonu je ovšem podmínkou, aby karbonatace jakožto iontová reakce mohla probíhat. Úplně vysušený beton s CO_2 a podobně i s jinými plyny vůbec nereaguje. Samotné chemické reakce, které při karbonataci cementového tmelu probíhají, je možné vyjádřit následujícím schématem:



Případně meziprodukty karbonatují dále, např.:



Tato karbonatace probíhá v navazujících etapách v různé intenzitě a dopadem na beton. Lze ji rozdělit do pomyslných čtyř etap.

Zpočátku se přeměňuje v hydroxid vápenatý rozpuštěný v pórovém roztoku na uhličitán vápenatý a dochází k dílčímu zaplnění pórů, které má za následek mírné zlepšení vlastností. Poté díky přeměně dalších hydratačních produktů cementu vznikají modifikace CaCO_3 společně s amorfním gelem kyseliny křemičité a zůstávají přitom v pseudomorfózách po hydratačních zplodinách maltovin, resp. jako velmi jemnozrné krystalické novotvary CaCO_3 . Vlastnosti betonu se příliš nemění, pouze klesá pH na 9,5. Třetí etapa se vyznačuje postupnou rekrytalizací mikritu. Přitom vznikají velmi početné a poměrně velmi rozměrné krystaly kalcitu a aragonitu ($>10\times$). Současně přitom mohou méně stálé modifikace CaCO_3 vlivem vlhkosti a déle trvající karbonatace nebo i vyšší teploty přecházet na modifikace stálější. Stále výrazně klesá pH a mechanické vlastnosti betonu se zhoršují [108].

Poslední čtvrtá etapa se vyznačuje vznikem krystalů aragonitu a zejména kalcitu v takovém rozsahu, že prostupují celou strukturu cementového tmelu. To vede k dalšímu snížení soudržnosti a pevnosti. Hodnota pH je tak nízká, že dochází k výrazné korozi výztuže [80].

5.4 Koroze ocelové výztuže

Pod pojmem koroze se dle DIN EN ISO 8044⁴ rozumí destrukce materiálů chemickými nebo elektrochemickými reakcemi s komponentami prostředí, u koroze kovů jsou to tedy analogicky nežádoucí poruchy především na povrchu kovů. Podle rozsahu poškození rozeznáváme tzv. korozi celkovou (plošnou) a korozi nerovnoměrnou - místní (lokalizovanou). Z hlediska koroze výztuže v železobetonu patří mezi nejdůležitější především koroze chemická (přímá oxidace železa chemikáliemi), elektrochemická a mezikrystalová (koroze po hranicích krystalických zrn napjaté oceli) [80].

Ochranu výztuže zabezpečuje vysoká koncentrace hydroxidových iontů v pórovém roztoku betonu (pH od 12 do 13,5) která v kvalitním dobře ztuhnutém betonu, pokud nepůsobí jiné agresivní ionty, např. Cl^- , chrání výztuž pomocí nepropustného filmu oxidů železa (pasivace výztuže). Koroze ocele v betonu dle práce Pytlíka [80] nastává:

- snížením koncentrace iontů OH^- (pH pod 11,5),
- zvýšením koncentrace iontů OH^- (pH nad 13,8 působení agr. louhy - koroze železnany),
- působením chloridových iontů.

Podmínkou koroze jsou rozdíly potenciálů na povrchu kovu dané heterogenitou. Obecně tedy probíhá koroze na povrchu kovu za účasti kapalné nebo plynné fáze jako heterogenní reakce. Rychlost koroze je při tom ovlivněna velikostí povrchu kovu a koncentrací neboli hodnotou pH napadajícího média a další průběh koroze se určuje druhem, strukturou a rozpustností produktů. Rychlost koroze jednotlivých kovů závisí na podmínkách prostředí, u oceli uvádějí Knoblauch a Schneider [10] hodnoty od 6-60 $\mu\text{m}/\text{rok}$ u venkovského vzduchu a až po 64-230 $\mu\text{m}/\text{rok}$ pro mořský vzduch.

Průběh koroze ocelové výztuže je ale podmíněný porušením pasivační vrstvy a přítomností vody a kyslíku. Jakmile některý z uvedených činitelů není přítomný, koroze výztuže neprobíhá.

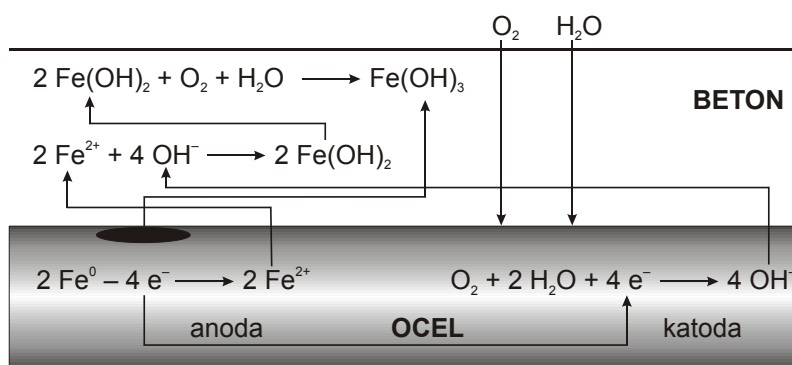
Pasivační film se poruší například, když jsou alkalické hydroxidy i značná část hydroxidu vápenatého zkarbonatované působením vzdušným oxidem uhličitým, nebo vyloužené působením měkké vody, popř. chloridy, jako součásti posypových solí apod. Pokud jsou v působícím roztoku přítomny chloridy v Cl^-/OH^- poměru vyšším než 0,6, je doloženo, že ochranný film může být narušen i při pH vyšším než 9,6 [80].

Kritická koncentrace chloridů v betonu je uváděna přibližně 0,4 hmotn. % na cement, s čímž korespondují i hodnoty ČSN EN 206 pro železobeton (0,2-0,4 %) a předpjatý beton (0,1-0,2 %). V běžném betonu se toto kritické množství pro začátek koroze výztuže pohybuje mezi 0,6 až 0,9 kg Cl^- na 1 m^3 . Je také dokázáno, že výraznější koroze výztuže nenastává, jakmile je elektrický odpor betonu vyšší než 50 až 70 $\times 10^3 \Omega\text{cm}$ [25][110].

⁴ DIN EN ISO 8044. Korrosion von Metallen und Legierungen; Grundbegriffe und Definitionen, November 1999. (dřívější: DIN 50900-1,- 3)

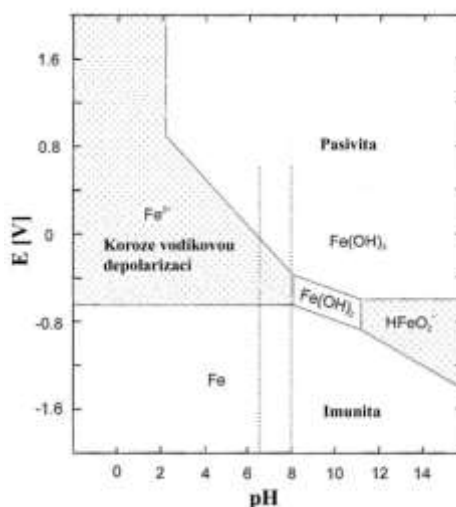
Korozí ocelové výztuže se označuje elektrochemický proces degradace oceli vlivem okolního prostředí, který probíhá za podmínky existence míst s rozdílným elektrickým potenciálem na povrchu oceli. Rozdíly potenciálů vznikají díky např. nerozpuštěným komponentám struktury, znečištění, lokáním rozdílům ve zpracování, rozdílnému pokrytí oblastí povrchu, např. produkty koroze, nebo příslušně rozdílné aeraci, např. ve šterbinách nebo otvorech, a rozdílům koncentrace v elektrolytu.

Uvedenými procesy se vytvářejí místní galvanické články, resp. mnohoelektrodový galvanický článek, které jsou za nutné přítomnosti vody a kyslíku, respektive též rozpustných solí jako elektrolytu, zdrojem elektrochemických reakcí. Při nich se železo, které vytváří anody, oxiduje na oxidy, respektive hydroxidy. V alkalickém prostředí bývají tyto oxidy železa stálé, čili ocel se pasivuje (pH je větší než 9,6). Výsledkem elektrochemických reakcí je vznik řady produktů koroze. Vykazují výrazně větší molární objem (až o 600 %) než má původní železo, v důsledku čeho narůstá tlak přes 25 MPa a dochází ke vzniku trhlin, zmenšování, nebo úplnému porušení soudržnosti mezi cementovou matricí a výztuží a odpadání krycí vrstvy výztuže. Korozní procesy jsou doloženy na obrázku 10 [2].



Obrázek 10: Korozní reakce oceli [15]

Vztah mezi korozí, vlastním potenciálem elektrody a hodnotou pH na povrchu je vyjádřen v Pourbaixově diagramu pro Fe, na obrázku 11. Ukazuje, že železo může korodovat v širokém spektru pH.



Obrázek 11: Zjednodušený elektrochemický rovnovážný diagram pro systém železo - voda dle Pourbaix [94]

Z uvedeného diagramu, vytvořeného z termodynamických hodnot, lze zjistit, že při záporném napětí $< -0,6\text{V}$ ocel nekoroduje. Při vyšším napětí je koroze závislá na pH. V rozmezí pH 9,6 až 13 ocel ve vodě nekoroduje, protože pasivační vrstva tvořená Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , resp. $\text{Fe}(\text{OH})_2$ je stabilní. Výrazná koroze nastane při snížení pH pod hodnotu 9,6. Na základě výše uvedených poznatků je možné konstatovat, že nebezpečí koroze ocelové výztuže v betonu je možné snížit:

- použitím vysokohodnotného, nepropustného betonu s nízkým vodním součinitelem a odpovídající krycí vrstvou,
- zamezením vzniku trhlinek (zejména $> 0,1\text{ mm}$),
- aplikováním ochranného nátěru na výztuž nebo použitím nekorodující oceli,
- použitím inhibitoru koroze do betonu,
- použitím sekundární ochrany betonu (např. kryst. hydroizolačních hmot).

C. CÍL PRÁCE

Krystalizující izolační hmoty (tzv. "crystalline technology") slouží k ochraně betonu, zejména vůči působení agresivních plynů a kapalin a úspěšně se využívají při dodatečném zvyšování vodotěsnosti nově dokončených betonových konstrukcí, nebo konstrukcí starších.

Vzhledem masovému použití ovšem v současnosti vyvstává i otázka dopadu jejich produkce na životní prostředí. Dominantní složkou těchto receptur je portlandský cement, při jehož výrobě vzniká velké množství oxidu uhličitého. Právě z důvodu zvyšujícího se tlaku na jeho snížení je použití příměsí jako náhrady jednou z cest minimalizace environmentálního dopadu. Ta je ale mnohdy výhodná i z ekonomického pohledu, protože příměsí jsou často vedlejší produkty různých technologií.

Součástí výzkumných prací provedených v rámci této disertační práce tedy bylo prozkoumat možnosti využití druhotných surovin při formulaci nových receptur krystalizujících hydroizolací.

Byl proveden návrh silikátových hydroizolačních a plynotěsnících povrchových úprav se schopností dodatečné sekundární krystalizace cementu a primárně prověřena kompatibilita příměsí s krystalizující matricí. Použití příměsí druhotných surovin, jako částečné náhrady portlandského cementu, bylo prověřeno na požadované reologické a dlouhodobé těsnící (krystalizující) vlastnosti finálních receptur.

Vzhledem k praktickému využití těchto hydroizolačních polymercementových nátěrů a stěrek, byly receptury podrobeny dlouhodobému vlivu agresivních činitelů, kterým mohou být konstrukce běžně vystaveny. Koncepce návrhu byla směřována k dosažení dlouhodobých bariérových vlastností, proti vlivu chemických rozmrazovacích látek, korozní odolnosti v roztocích agresivních solí, působení agresivních plynů a klimatu.

Hlavním cílem práce je na základě provedených zkoušek nalezení výsledné nejvhodnější receptury hydroizolačního a plynotěsnícího nátěru a stěrky na bázi krystalizace s příměsí druhotné suroviny jako částečné náhrady cementu.

Z důvodu velmi limitovaných dostupných informací o funkčním principu krystalizujících hydroizolací, byla důležitou součástí výzkumných prací analýza samotného primárního funkčního principu růstu krystalů v pórové struktuře betonu se zaměřením na utěsnění pórové struktury v kritickém období po aplikaci na beton.

Pomocí série mikrostrukturálních zkoušek došlo rovněž k prověření těsnících vlastností navržených receptur pod vlivem agresivních prostředí a byla prozkoumána schopnost těsnění povrchových trhlin při aplikaci na různé typy podkladů.

D. METODIKA PRÁCE

Podstatnou částí disertační práce je samotný výzkum, který je rozfázován do tří hlavních navazujících etap řešení:

- ETAPA I. Optimalizace a vývoj modifikovaných hmot se schopností sekundární krystalizace cementu,
- ETAPA II. Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot,
- ETAPA III. Rozšířené analýzy vlivu navržených hmot na beton.

V počáteční fázi výzkumu jsou analyzovány vstupní suroviny pro vytvoření receptur hydroizolačních nátěrů a stěrek s krystalujícím efektem. Následně dojde k modifikaci vhodné komerční krystalizující hmoty zvolenou druhotnou surovinou, která bude mít ekonomický přínos na výslednou cenu nově vytvořené krystalizující hmoty. Na tuto část navazuje návrh receptur zkušebních vzorků, u kterých budou sledovány zejména vlhkostní, strukturální a fyzikálně-mechanické charakteristiky.

Vzhledem k nutnosti analyzovat dlouhodobé vlastnosti navržených receptur, bude proveden návrh a optimalizace korozních prostředí pro dlouhodobé testování jejich fyzikálně-mechanických charakteristik. Po návrhu a vytvoření korozních prostředí dojde k vytvoření samotných zkušebních vzorků a následnému ověření jejich dlouhodobých bariérových schopností ve vybraných korozních prostředích.

Po analýze a vyhodnocení získaných výsledků fyzikálně-mechanických charakteristik navržených stěrek a nátěrů dojde k výběru nejperspektivnějších receptur pro případnou finální produkci. U těchto vybraných receptur bude následně provedeno rozšířené testování vlivu těchto hydroizolačních materiálů na mikrostrukturu betonu, s primárním cílem analyzovat jejich bariérové schopnosti vůči pronikání vlhkosti do betonové konstrukce. S ohledem na primární princip krystalizujících hydroizolací, tedy vývin krystalů v pórech betonu a jejich následné utěsnění, dojde v práci také k analýze samotného vývinu krystalů ve struktuře betonu a jejich schopnosti těsnit póry a překlenovat trhliny. Celkovým závěrem práce bude výběr finálních receptur pro případnou produkci, u nichž budou testovány vlastnosti nutné pro uvedení produktu do výroby, jako je ekotoxicita, obsah radionuklidů a hygienická nezávadnost.

V rámci řešení projektu MPO a společného výzkumu budou výsledky využity pro úspěšné zavedení nových variant nátěrů a stěrek na bázi krystalizace do výrobního portfolia firmy Betosan s.r.o.

6 ETAPA I. Optimalizace a vývoj modifikovaných hmot se schopností sekundární krystalizace cementu

Tato část je rozdělena do výzkumných kroků, ve kterých se zaměřuje na:

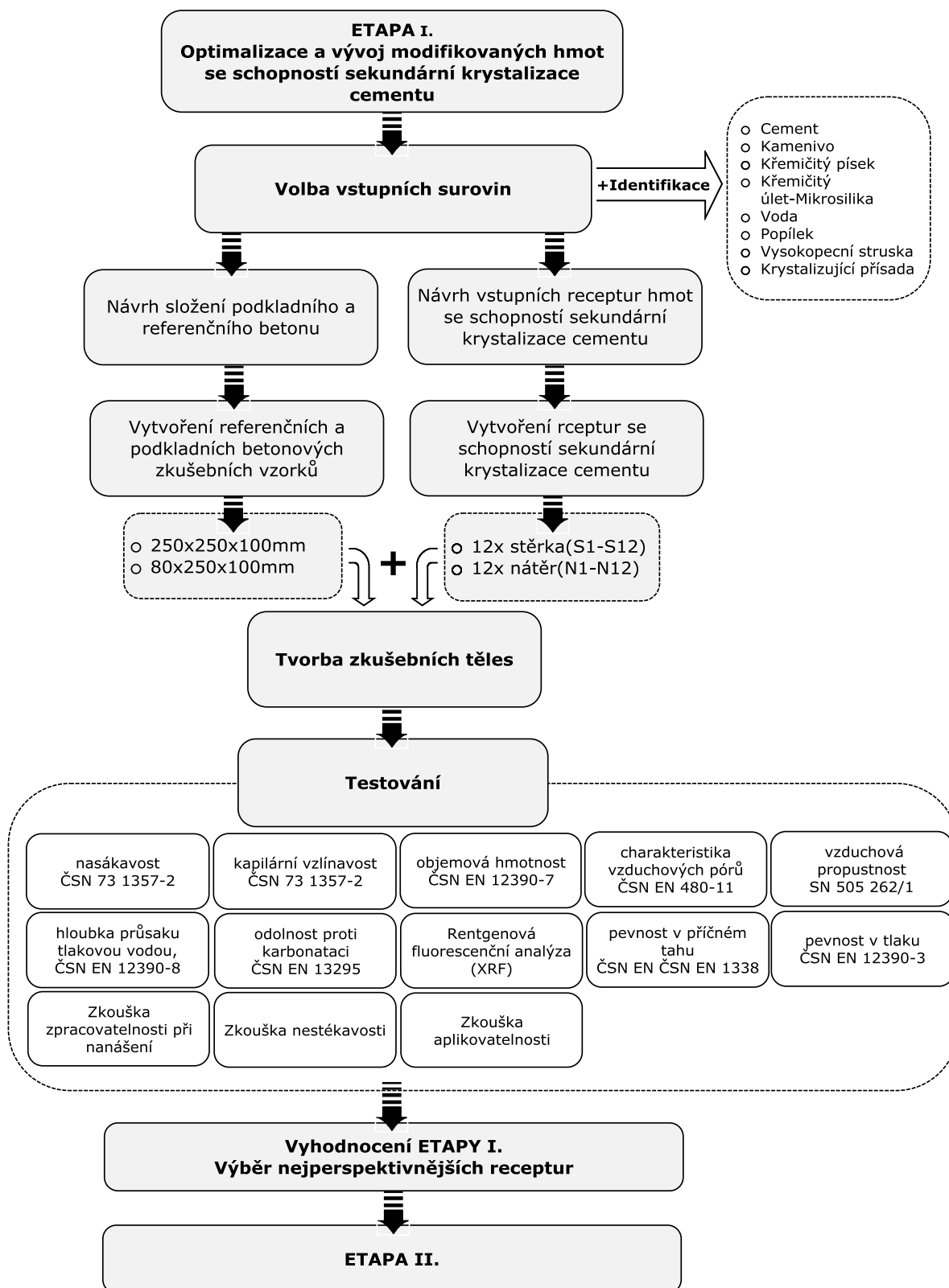
- volbu vstupních surovin a jejich identifikaci,
- návrh a tvorbu referenčních a podkladních betonových zkušebních vzorků,
- návrh receptur hydroizolačních nátěrů a stěrek,
- tvorbu zkušebních vzorků,
- testování navržených nátěrů a stěrek,
- výběr nejperspektivnějších receptur se schopností sekundární krystalizace cementu k navazujícímu testování a optimalizaci.

V této části byly vybrány a charakterizovány vstupní suroviny pro návrh nových druhů hydroizolačních materiálů a pro návrh složení podkladního betonu, který poslouží pro aplikaci navržených materiálů a zároveň jako referenční vzorek po pozdější srovnání. Bylo zhotoveno několik návrhů prvotních zkušebních receptur se schopností sekundární krystalizace cementu a s jejich použitím došlo ke zhotovení zkušebních těles pro testování jejich fyzikálně mechanických vlastností. Po analýze vlastností a srovnání s referenčními recepturami bude toto složení dále modifikováno vybranými příměsemi sloužícími jako částečná náhrada cementu.

Vzhledem k hlavnímu účelu krystalizujících hmot odolávat vlhkosti ve směru do konstrukce a zároveň zachovat co možná nejvyšší možnou propustnosti vlhkosti ve směru z konstrukce ven, bude v této etapě maximální pozornost věnována právě odzkoušením těchto charakteristik. Referenční beton (tj. beton neošetřený krystalizující recepturou) i betony s naaplikovanými recepturami, budou podrobeny sérii vstupních zkoušek:

- zkouška zpracovatelnosti při nanášení na betonový podklad,
- zkouška nestékavosti,
- zkouška aplikovatelnosti v co nejširším teplotním rozmezí,
- charakteristika vzduchových pórů (722325) ČSN EN 480-11,
- počáteční povrchová nasákavost betonu (ISAT) - BS 1881-208: 1996,
- nasákavost (731357) ČSN 73 1357-2,
- kapilární vztlínatost (731357) ČSN 73 1357-2,
- objemová hmotnost (731302) ČSN EN 12390-7,
- vzduchová propustnost metodou TORRENT SN 505 262/1,
- odolnost proti karbonataci (73 2142) ČSN EN 13295,
- hloubka průsaku tlakovou vodou (73 1302) ČSN EN 12390-8,
- stanovení pH betonu ve výluhu,
- pevnost v tlaku (731302) ČSN EN 12390-3,
- pevnost v příčném tahu (723038) ČSN EN 1338,
- skenovací elektronová mikroskopie (SEM),
- rentgenová fluorescenční analýza (XRF).

Na základě dosažených výsledků a zhodnocení výstupů této etapy budou navrženy nejperspektivnější receptury pro navazující výzkum, pro použití v Etapě II. Schématický postup prací je doložen v grafu na obrázku 12.



Obrázek 12: Grafické znázornění průběhu ETAPY I.

7 ETAPA II. Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot

Tato etapa bude navazovat na etapu I „Optimalizace a vývoj modifikovaných hmot se schopností sekundární krystalizace cementu“. V této etapě dojde k:

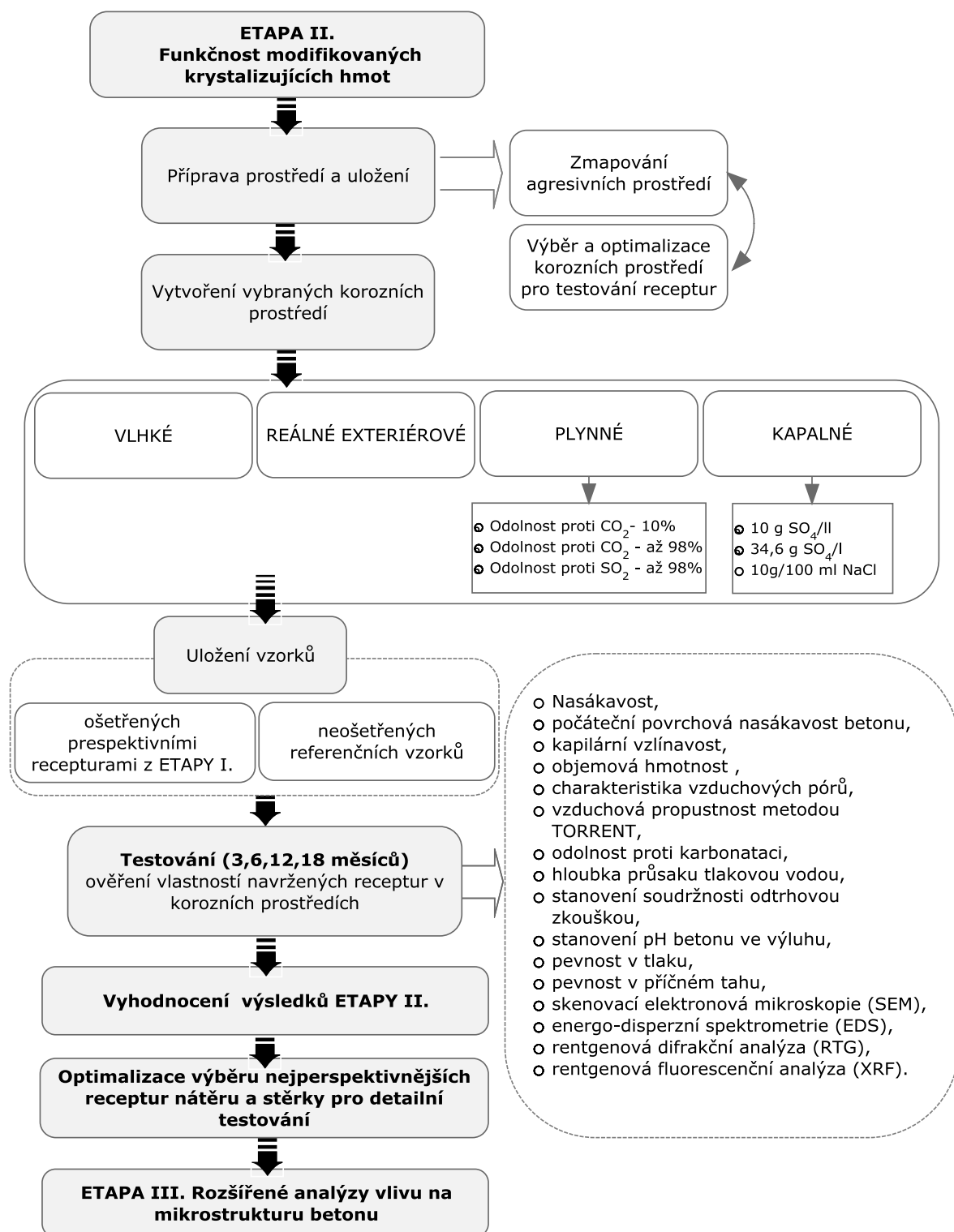
- zmapování agresivních prostředí působících na betonové konstrukce,
- vyhodnocení výsledků, výběr a optimalizace korozních prostředí pro testování receptur,
- zhotovení speciálních korozních prostředí,
- uložení referenčních betonů a betonů ošetřených jednotlivými nejperspektivnějšími recepturami krystalizujících hmot do jednotlivých prostředí po definované časové období (3, 6, 12 a 18 měsíců),
- po vyjmutí receptur z prostředí experimentální ověření vlhkostních, strukturálních, fyzikálně-mechanických charakteristik referenčních betonů a betonů ošetřených jednotlivými krystalizujícími hmotami,
- analýze a vyhodnocení výsledků testování,
- závěrečnému celkovému zhodnocení krystalizujících hmot a nově navržených receptur krystalizujících hmot s přídavkem druhotných surovin,
- výběru a přípravě nejperspektivnějších receptur pro detailní testování vlivu na mikrostrukturu betonu.

Vzhledem k nutnosti detailně zmapovat vlastnosti nově vytvořených krystalizujících materiálů v běžném prostředí a v prostředích s dlouhodobým působením agresivních činitelů, dojde v této etapě k vytvoření speciálních korozních prostředí a podrobení jednotlivých receptur jejím působení. Po vyjmutí zkoušených krystalizujících hmot z jednotlivých prostředí ve stanoveném intervalu uložení dojde k experimentálnímu ověření vlhkostních, strukturálních a fyzikálně-mechanických charakteristik. Referenční beton (tj. beton neošetřený krystalizující recepturou) i betony s naaplikovanými recepturami budou podrobeny sérii zkoušek:

- nasákavosti (731357) ČSN 73 1357-2,
- počáteční povrchová nasákavost betonu (ISAT) - BS 1881-208: 1996,
- kapilární vztlínivost (731357) ČSN 73 1357-2,
- objemová hmotnost (731302) ČSN EN 12390-7,
- charakteristika vzduchových pórů (722325) ČSN EN 480-11,
- vzduchová propustnost metodou TORRENT SN 505 262/1,
- hloubka průsaku tlakovou vodou (73 1302) ČSN EN 12390-8,
- stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou ČSN EN 1542,
- stanovení pH betonu ve výluhu,
- odolnost proti karbonataci (73 2142) ČSN EN 13295,
- pevnost v tlaku (731302) ČSN EN 12390-3,
- pevnost v příčném tahu (723038) ČSN EN 1338,
- skenovací elektronová mikroskopie (SEM),

- energo-disperzní spektrometrie (EDS),
- rentgenová difrakční analýza (RTG),
- rentgenová fluorescenční analýza (XRF).

Na základě těchto měření budou vlastnosti navržených krystalizujících hmot porovnány s výsledky referenčních vzorků neošetřených dodatečnou krystalizující hydroizolací. V závěru této etapy dojde ke konečnému celkovému zhodnocení výsledků etapy a z pohledu zvolených fyzikálně mechanických vlastností k výběru nejvhodnějších navržených modifikací pro případnou komerční produkci. Schématický postup prací v této etapě je znázorněn v grafu na obrázku 13.



Obrázek 13: Grafické znázornění průběhu ETAPY II.

8 ETAPA III. Rozšířené analýzy vlivu navržených hmot na mikrostrukturu betonu

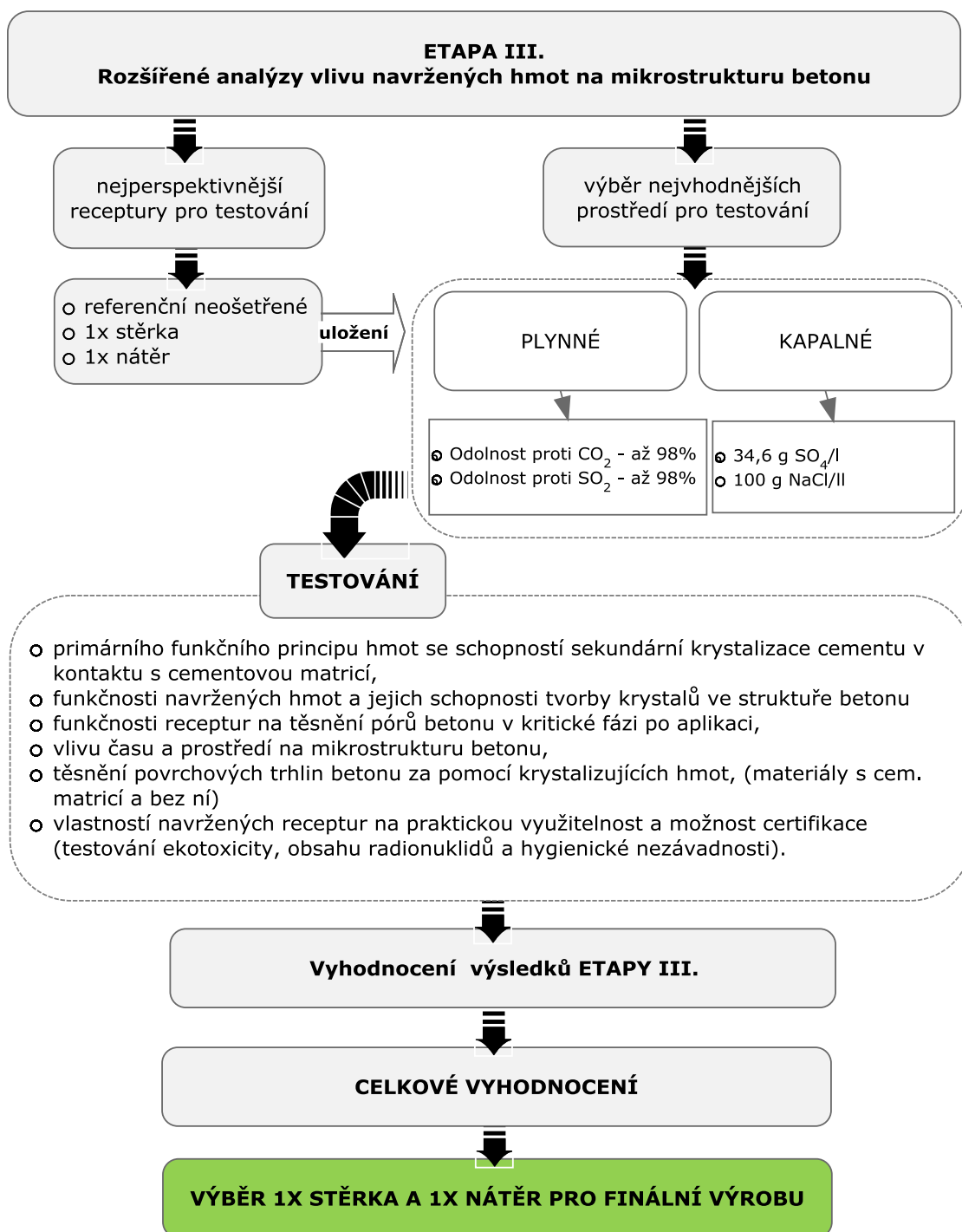
Tato etapa logicky navazuje na etapu II „Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot“ a na základě jejich výsledků v ní dojde k:

- přípravě nejperspektivnějších receptur pro detailní testování,
- ověření a analýze primárního funkčního principu hmot se schopností sekundární krystalizace cementu v kontaktu s cementovou matricí,
- analýze funkčnosti navržených hmot a jejich schopnosti tvorby krystalů ve struktuře betonu,
- ověření funkčnosti receptur na těsnění pórů betonu v kritické fázi po aplikaci,
- analýze vlivu času a prostředí na mikrostrukturu betonu,
- těsnění povrchových trhlin betonu za pomoci krystalizujících hmot (materiály s cementovou matricí a bez ní),
- ověření vlastností navržených receptur pro praktickou využitelnost a možnost certifikace (testování ekotoxicity, obsahu radionuklidů a hygienické nezávadnosti).

Tato etapa se zabývá detailní hloubkovou analýzou navržených receptur krystalizujících hydroizolací. Vzhledem k velmi omezenému počtu vědeckých prací zabývajících se působením těchto typů hydroizolací na samotnou mikrostrukturu betonu, bude tato etapa směřována na potvrzení vlhkostních charakteristik navržených receptur dosažených v etapách I. a II.

V této etapě je pozornost věnována mikrostrukturálním analýzám vlivu navržených hmot se schopností sekundární krystalizace cementu na mikrostrukturu betonu. Bude kladen důraz na hloubku a kvalitu prokrystalizování, tvaru a orientace novotvarů a jejich případného vlivu na výsledné těsnicí schopnosti jednotlivých navržených receptur. Na vybraných zástupcích krystalizujících hmot byla provedena analýza analytickým rastrovacím elektronovým mikroskopem s ultra-vysokým rozlišením. Dále byly pro znalost těsnicího procesu krystalizace a tvorby krystalů ve struktuře provedeny experimentální zkoušky, u kterých byla pozorována rychlost, míra a schopnost tvorby krystalů ve struktuře betonu.

Vzhledem k praktickému zaměření této práce, s cílem výzkumu a vývoje v praxi využitelných silikátových hydroizolačních a plynotěsnících povrchových úprav se schopností dodatečné sekundární krystalizace, byly na závěr práce provedeny zkoušky ekotoxicity, obsahu radionuklidů a zkoušky hygienické nezávadnosti navržených receptur. Schématický postup prací v této etapě je znázorněn v grafu na obrázku 14.



Obrázek 14: Grafické znázornění průběhu ETAPY III.

8.1 Použité metody

8.1.1 Charakteristika vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, ČSN EN 480-11

Spacing factor $\bar{L}$ (součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů) vyjadřuje vzdálenost, kterou voda urazí v cementové pastě až ke vzduchovému póru a je tedy ukazatelem mrazuvzdornosti betonu. Zkouška byla provedena na vzorcích velikosti 100 × 100 × 20 mm a struktura vzduchových pórů byla poté zjišťována mikroskopem se zvětšením 100 ± 10×. Pomocí programového vybavení LUCIA byl popsán systém vzduchových pórů z hlediska požadovaných parametrů.

8.1.2 Stanovení granulometrie síťovým rozbořem

Granulometrie vzorků byla stanovena síťovým rozbořem. Za použití sít o příslušných velikostech ok. Vzhledem k předpokládané granulometrii jednotlivých vzorků bylo předpokládáno použití následujících sít s velikostí ok: 1mm, 0,71 mm, 0,5 mm, 0,355 mm, 0,25 mm, 0,18 mm, 0,125 mm a 0,063 mm a 0,045 mm.

8.1.3 Stanovení velikosti částic

Stanovení velikosti částic jemnozrnných příměsí a cementů bylo provedeno za pomoci laserového analyzátoru Mastersizer 2000E System EPA5011 od firmy Malvern. Ten pracuje na principu stínění a odrazu laserového paprsku procházejícího kyvetou s rozptýleným vzorkem materiálu je schopen měřit materiály od 0,02 μm do 2000 μm. Vlivem přítomných částic dochází k ohybu (difrakci) laserového paprsku pod úhlem, jež je nepřímo úměrný jejich velikosti. S klesající velikostí částice, vzrůstá difrakční ohybový úhel logaritmicky, zatímco intenzita záření klesá v závislosti na objemu částice. Pro výpočet je používána teorie MIE, založena na znalosti indexu lomu měřeného materiálu a média.

8.1.4 Rentgenová fluorescenční analýza (XRF)

XRF (X-ray fluorescence), rentgenová fluorescence, je spektroskopická metoda určená především k semikvantitativní chemické analýze práškových vzorků. Metoda je založena na měření intenzity a následného vyhodnocování sekundárního (fluorescenčního) rentgenového záření emitovaného vzorkem, bombardovaným vysokoenergetickým primárním rentgenovým zářením. Chemické složení bylo zjištěno rentgeno fluorescenčním spektrometrem Axios od firmy PANalytical.

8.1.5 Stanovení pH betonu ve výluhu

Vzorky betonu byly připraveny mletím a prosety sítem o velikosti otvorů o velikosti ok 0,063 mm. Všechny podíly prošlé sítem se dokonale zhomogenizovaly, a ponechaly sušit při 60 °C po dobu 24 hod. Z podsítného zbytku byla odebrána navážka 10 g, a rozplavena ve 100 ml destilované vody. Po míchání v elektromagnetické míchačce po dobu 30 minut a zfiltrování se ve filtrátu pomocí pH-metru byla stanovena hodnota pH. Před každým měřením bylo nutné provést kalibraci pH metru, jako etalon sloužil roztok o přesně známém pH.

8.1.6 Odolnost vůči karbonataci, ČSN EN 13295

Norma popisuje zrychlenou laboratorní metodu pro stanovení odolnosti proti pronikání oxidu uhličitého a je založena na měření hloubky karbonatace zkušební tělesa v atmosféře koncentrovaného oxidu uhličitého po stanoveném časovém intervalu 56 dní. Zkouška byla prováděna vždy na dvou zkušebních tělesech o rozměrech $40 \times 100 \times 160$ mm, ošetřených stejným typem krystalizujícího nátěru, který byl aplikován a uložen po dobu třiceti dnů ve vodním uložení tak, aby mohlo dojít k růstu krystalických novotvarů.

Všechny plochy s výjimkou svrchní (lícní), byly natřeny epoxidovým nátěrem, za účelem limitovat pronikání vzduchu a vzdušného CO_2 do betonového vzorku pouze svrchním lícem ošetřeným krystalizujícím nátěrem.

8.1.7 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, ČSN EN 12390-7

Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky materiálu včetně dutin a pórů. U tělesa ztvrdlého betonu je změřen rozměr zkušební tělesa a stanoven objem, poté je těleso zváženo. Ke zkoušce byla použita tělesa o rozměrech $250 \times 100 \times 100$ mm.

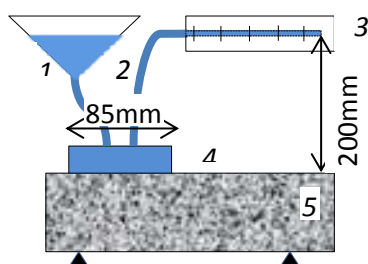
8.1.8 Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou ČSN EN 1542

Soudržnost povrchových úprav (nátěrů) se stanovuje jako namáhání v tahu, které působí přímým zatížením kolmým k povrchu odtrhované plochy. Soudržnost se vypočítá jako podíl zatížení vedoucího k porušení zkoušené plochy. Ke zkoušce byla použita zkušební tělesa o rozměrech $250 \times 250 \times 100$ mm.

8.1.9 Počáteční povrchová nasákavost betonu (ISAT)

Pro měření povrchové nasákavosti neexistuje vhodná česká ani evropská norma. Pro teoretický podklad měření bylo využito dvou norem britských. A to konkrétně BS 1881-208: 1996 Testing concrete - Recommendation for the determination of the initial surface absorption of concrete a BS 1881-122: 1983 Method for determination of water absorption.

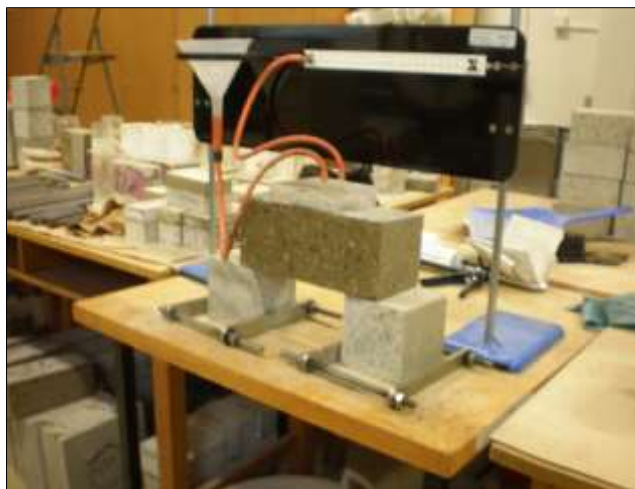
Získaná data z měření pojednávají o propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu na plochém vzorku. Zkouška určí, za jakou dobu je určité množství vody proudící v kalibrované skleněné trubičce pohlceno povrchovou vrstvou betonu o známé ploše. Schéma měřicího zařízení je doloženo na obrázku 15. Pro měření byla použita tělesa o rozměrech $80 \times 100 \times 250$ mm.



- 1 nádržka s uzavíracím kohoutem
- 2 spojení s nádržkou a měřicí trubičkou
- 3 skleněná trubička se stupnicí o průměru 1,81 mm a délce 327 mm
- 4 přísavná hlavice o průměru 85 mm
- 5 zkušební těleso

* 1 dílek = pohlcení $0,01[\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}]$ vody

Obrázek 15: Schéma měřicího zařízení ISAT



Obrázek 16: Zkušební referenční těleso při testování počáteční povrchové nasákavosti betonu

Zkušební tělesa byla před měřením uložena po dobu čtrnácti dnů v laboratorních podmínkách dle ČSN EN 12190. Jednotlivé dílky stupnice při měření uvádějí rychlost proudění vody v betonu v závislosti na měřicím čase. Rozdělení stupnice je vyznačeno tak, aby ukazovalo poměr vtoku vody do betonu k poměru $\text{ml/m}^2/\text{s}$ založeném na době testu 1 minuty. Propustnost se určí dle vzorce:

$$f = \frac{60}{t} D \cdot 0,01 \quad [8]$$

kde **t** je doba měření v jednotlivých časových úsecích [s]
D je počet dílků rozdělení stupnice během času t
f je vtok (propustnost) v $\text{ml/m}^2/\text{s}$

Absorpce povrchové vrstvy betonu se určí dle tabulky 5. Pokud, ale rychlost proudění překročí hodnotu 30 dílků během 5 sekund, výsledná propustnost se stanoví jako: $> 3,6 \text{ ml/m}^2/\text{s}$.

Tabulka 5: Klasifikace absorpce povrchové vrstvy betonu založená na hodnotách ISAT[99]

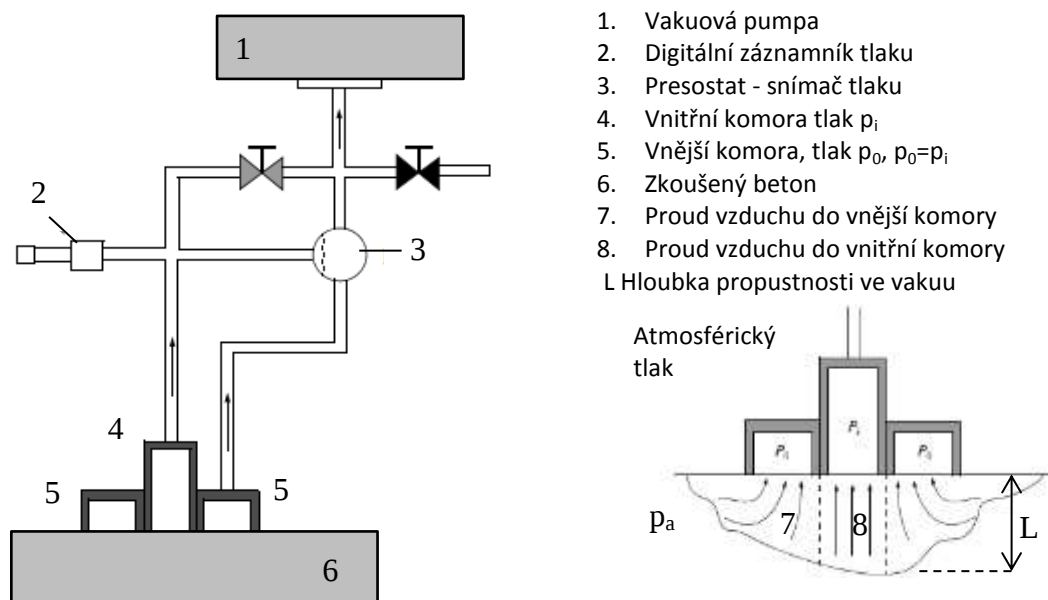
absorpce betonu	výsledky metody ISAT [$\text{ml/m}^2/\text{s}$]			
	doba trvání zkoušky			
	10 min	30 min	60 min	120min
<i>vysoká</i>	$> 0,5$	$> 0,35$	$> 0,2$	$> 0,15$
<i>střední</i>	$0,25 - 0,5$	$0,17 - 0,35$	$0,10 - 0,20$	$0,07 - 0,15$
<i>nízká</i>	$< 0,25$	$< 0,17$	$< 0,10$	$< 0,07$

8.1.10 Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent

Přístroj pro měření permeability Torrent vy vyráběný švýcarskou firmou Proceq je vhodný pro nedestruktivní stanovení vzduchové nepropustnosti krycí vrstvy betonu.

Samotná metoda měření je pak normalizována švýcarskou normou SN 505 262/1 Construction en béton – Spécifications complémentaires.

Základními prvky měřicího systému, na kterých je založena metoda měření, jsou dvoukomorová vakuová buňka vnitřní komorou o průměru 32 mm a vnější o průměru 86 mm a regulátor tlaku. Tyto součásti obstarávají proudění vzduchu do vnitřní komory směrované kolmo k povrchu [100, 101].



Obrázek 17: Schéma přístroje Torrent pro měření propustnosti betonu pro vzduch [99]

Princip stanovení vzduchové propustnosti betonu spočívá ve vytvoření vakua při povrchu betonu a měření průtoku vzduchu masou betonu do měřicího zařízení během stanoveného časového úseku. Metoda spočívá ve výpočtu koeficientu permeability kT na základě teoretického modelu fungování přístroje dle rovnice [9]:

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left[\frac{\ln\left(\frac{p_a + p_i}{p_a - p_i} \cdot \frac{p_a - p_0}{p_a + p_0}\right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad [9]$$

kde	kT	vzduchová propustnost [m^2]
	V_c	objem vnitřní komory [m^3]
	A	plocha vnitřní komory
	μ	viskozita vzduchu [Ns/m^2]
	ε	objem pórů vyplňující dutiny betonu
	p_a	atmosférický tlak [N/m^2]
	p_i	tlak vzduchu v čase t (konec měření) ve vnitřní komoře [N/m^2]
	p_0	tlak vzduchu v čase t_0 (začátek měření) ve vnitřní komoře [N/m^2]

Na základě vypočteného kT , se beton řadí do tříd dle tabulky 6.

Tabulka 6: Třídy kvality krycích vrstev betonu[99]

Kvalita krycí vrstvy betonu	zkratka	Index	kT (10^{-16}m^2)
<i>velmi špatná</i>	VS	5	>10
<i>špatná</i>	SP	4	1,0-10
<i>střední</i>	S	3	0,1-1,0
<i>dobrá</i>	D	2	0,01-0,1
<i>velmi dobrá</i>	VD	1	<0,01

8.1.11 Nasákavost, ČSN 73 1357-2

Nasákavost vyjadřujeme v procentech hmotnosti, jako poměr přijatého hmotnostního množství kapaliny k hmotnosti vysušeného vzorku v procentech objemu jako objem přijaté kapaliny vyjádřený v procentech objemu vzorku. Účelem zkoušky je zjištění celkového množství vody, kterou dokáže betonové těleso absorbovat za definovaný čas.

8.1.12 Kapilární vztlínavost betonu

Pro tuto zkoušku byly využity jako podklady pro upravenou metodiku normy ČSN 73 1357-2 a ČSN 731316. Cílem této zkoušky bylo měřit vztlínání v % hmotnosti. Měření probíhalo v laboratorních podmínkách ČSN EN 12190. Zkušební vzorky o rozměrech $250 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ a $80 \times 100 \times 100 \text{ mm}$, se před zkoušením vysušily do ustálené vlhkosti při teplotě $110 \pm 5^\circ \text{C}$ a zváženy. Poté všechny plochy s výjimkou měřeného svrchního líce, byly ošetřeny epoxidovým nátěrem, tak aby nedocházelo k nežádoucímu pronikání kapaliny i vzdušné vlhkosti do vzorku. Dno ploché nádoby s vodou bylo vyskládáno dvěma dřevěnými hranolky sloužící jako podpory pro každý vzorek. Na ně byly vzorky uloženy tak, aby strana svrchního měřeného líce byla ponořena na výšku $5 \pm 1 \text{ mm}$. Hladina vody byla udržována ve stejné výšce, a po uplynutí 48 hodin byly vzorky vyňaty z vodní lázně, povrchově otřeny tkaninou, zváženy. Přírůstek hmotnosti v %, byl vypočten dle rovnice:

$$w_a = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad [10]$$

kde m_a je hmotnost zkušební vzorku nasáknutého vodou v g

m_d je hmotnost zkušební vzorku vysušeného v g

8.1.1 Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou, ČSN EN 12390-8

Podstatou zkoušky je působení vodního tlaku na povrch ztvrdlého betonu. Vyvozaný tlak vody je $500 \pm 50 \text{ kPa}$ po dobu 72 ± 2 hodiny. Zkušební těleso se poté rozlomí a v jádru vzorku se změří maximální hloubka průsaku vody. Pro zkoušku bylo využito zkušebních vzorků o rozměrech $80 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ a $250 \times 250 \times 100 \text{ mm}$.

8.1.1 Pevnost ztvrdlého betonu v tlaku, ČSN EN 12390-3

Zkušební tělesa jsou plynule zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa se zaznamená a vypočte se pevnost v tlaku. Hodnota pevnosti

v tlaku se vypočítá jako aritmetický průměr hodnot stanovených na šesti zlomcích zkušebních těles.

8.1.2 Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu, ČSN EN 1338

Zkouška se provádí na betonových blocích vhodné velikosti ve směru nejdelšího lomového řezu bloku, rovnoběžně a symetricky k okrajům tělesa. Výsledná kolmá tahová síla způsobí porušení tělesa tahem. Ke zkoušce byla použita zkušební tělesa o rozměru $250 \times 250 \times 100$ mm.

8.1.3 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie, je metoda vytváření obrazu předmětu elektronovým mikroskopem z odražených elektronů a slouží ke studiu struktury vzorků stavebních hmot pomocí lomových ploch, někdy též nábrusů nebo práškových preparátů. Stavební hmoty a další silikátové látky se opatřují ve vakuu tenkou el. vodivou vrstvou vhodného kovu nebo slitiny (např. hliníkem nebo zlatem) pro zvýraznění elektronogramu. [105]

8.1.4 Rentgenová difrakční analýza

Každá krystalická látka má charakteristickou mezimřížkovou vzdálenost, díky kterým lze pomocí RTG analýzy betonu, degradovaného působením agresivních látek z vnějšího prostředí, prokázat v jeho struktuře přítomnost produktů korozních reakcí, probíhajících mezi cementovou maticí a agresivní látkou. [79]

8.1.5 Energo-disperzní spektrometrie (EDS)

Slouží pro a přesnou prvkovou analýzu a prvkové mapování. Funguje na principu měření energie rentgenového záření, které je vyvolané dopadem primárního elektronu na valenční elektron prvku, kde je tento elektron vyražen a poté nahrazen elektronem z nižší slupky. Každý prvek má jinou energii rentgenového záření a podle typu a kvanta rentgenového záření je určen typ a množství prvku ve vzorku.

8.1.6 Stanovení obsahu přírodních radionuklidů

Systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech podrobněji upravuje vyhláška č. 307/2002 Sb. ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. §96, příloha č. 10, tabulky č. 1, 2, 3. Měření obsahu přírodních radionuklidů v testovaných popílcích bylo provedeno v nezávislé laboratoři vybavené na toto stanovení.

8.2 Charakteristika vstupních surovin

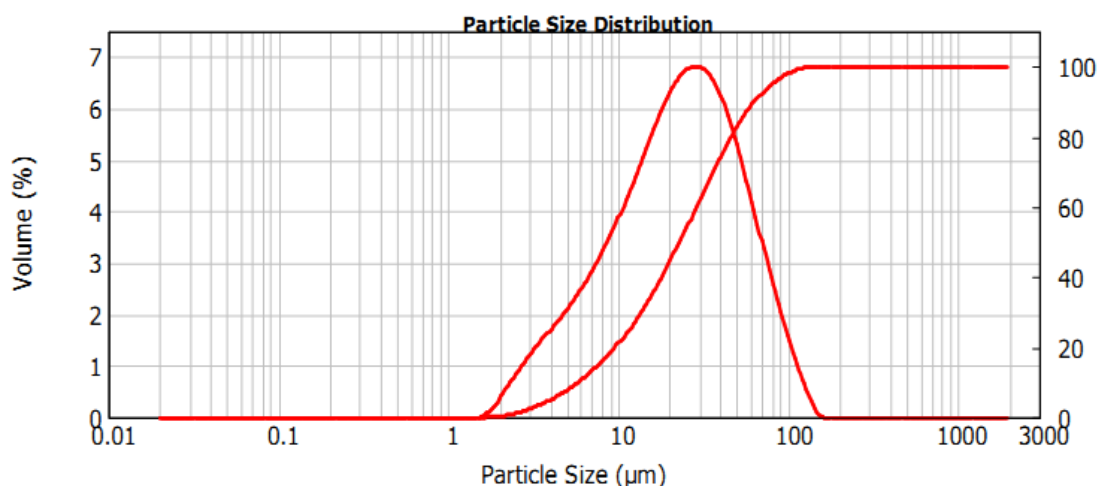
Suroviny, které byly použity pro výrobu jednotlivých stěrek a nátěrů se schopností sekundární krystalizace cementu, byly podrobeny charakteristice vlastností. Tyto parametry jsou uvedeny v následující části této práce.

8.2.1 Cement

Pro formulaci nových typů hmot se schopností sekundární krystalizace byl použit portlandský struskový cement CEM II/A-S 42,5 R z cementárny Prachovice od společnosti Holcim a.s., který obsahuje 80-94 % slínku, 6-20 % vysokopecní strusky a 0-5 % doplňujících složek. Výsledky chemické analýzy jsou uvedeny v tabulce 7 a síťový rozbor cementu je v grafu na obrázku 18.

Tabulka 7: Chemická XRF analýza složení CEM II/A-S 42,5 R

Složka	Popis	Obsah [% hm.]
SiO_2	Oxid křemičitý	18,28
Al_2O_3	Oxid hlinitý	4,96
Fe_2O_3	Oxid železitý	3,67
CaO	Oxid vápenatý	64,9
MgO	Oxid hořečnatý	2,00
K_2O	Oxid draselný	1,02
Na_2O	Oxid sodný	0,20
SO_3	Oxid sírový	3,71



Obrázek 18: Rozložení velikosti částic CEM II/A-S 42,5 R, Prachovice

8.2.2 Křemičitý písek

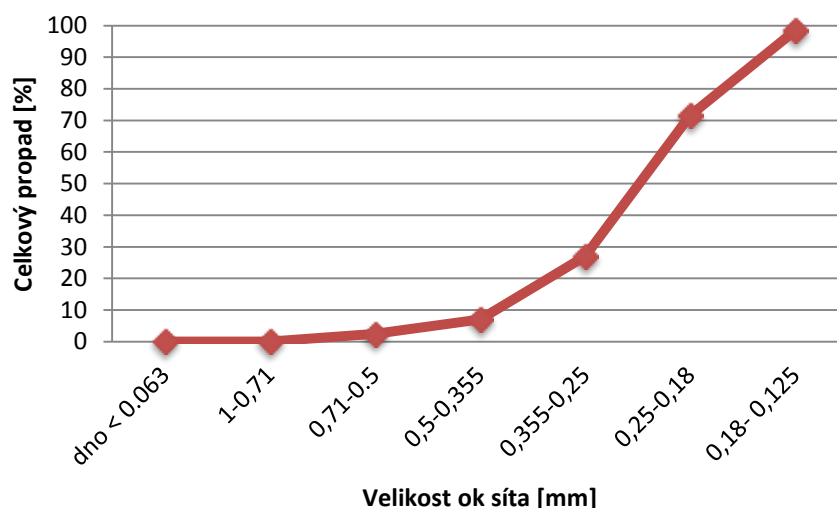
Jako plnivo byl použit jemný křemičitý písek určený pro výrobu materiálů stavební chemie PR 33 dodávaný společností Provoďínské písky a.s. Tento typ písku je sušený, tříděný a vysoce chemicky čistý s obsahem SiO_2 přes 98 %. Chemické a fyzikální vlastnosti jsou patrné z tabulky 8, síťový rozbor dále v tabulce 9 a grafu 19.

Tabulka 8: Chemické a fyzikální vlastnosti
písku PR 33⁵

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
SiO ₂	[%]	99
Fe ₂ O ₃	[%]	0,03
Al ₂ O ₃	[%]	0,3
TiO ₂	[%]	0,05
Vyplavitelné látky	[%]	0,15
Ztráta žiháním (při 1100 °C)	[%]	0,3
Vlhkost	[%]	0,1

Tabulka 9: Sítový rozbor písku PR 33

Síto [mm]	Obsah frakcí [%]	Celkový propad [%]
1 - 0,71	0,1	99,9
0,71 - 0,5	1,4	98,5
0,5 - 0,355	27	71,5
0,355 - 0,25	44,5	27
0,25 - 0,18	20	7
0,18 - 0,125	4,5	2,5
0,125 - 0,063	2,5	0
dno < 0,063	0,1	0



Obrázek 19: Sítový rozbor písku PR 33

8.2.3 Křemičitý úlet (mikrosilika)

Mikrosilika pod komerčním označením SILICA VP4 byla dodána firmou AV EKO-COLOR s.r.o., která tento produkt dováží z Německa. Jedná se o velmi jemný bílý prášek bez chuti a zápachu, srážený ze syntetického, amorfního křemičitanu s vlastnostmi dle tabulky 10. Chemická analýza je uvedena v tabulce 11.

⁵ <http://www.pisky.cz/>

Tabulka 10: Fyzikální a chemické vlastnosti SILICA VP4⁶

Ukazatel	jednotka	hodnoty
Měrný povrch	m ² /g	150–250
Úbytek vlhkosti (105 °C, 2h)	%	3,0 – 7,5
Ph (5% vodní suspenze)		5,0 – 7,5
Absorpce DBP (Brabender)	ml/100 g	160 min.
Zbytek na sítu 40 µm	%	0,4 max
Obsah SiO ₂	%	typ. 96

Tabulka 11: Chemická XRF analýza složení SILICA VP4

Složka	Popis	Obsah [% hm.]
SiO ₂	Oxid křemičitý	91,97
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	0,1
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý	0,67
CaO	Oxid vápenatý	0,19
MgO	Oxid hořečnatý	1,24
TiO ₂	Oxid titaničitý	0,02
K ₂ O	Oxid draselný	3,32
Na ₂ O	Oxid sodný	0,5
SO ₃	Oxid sírový	0,67

8.2.4 Záměsová voda

Jako záměsová voda při výrobě vzorků byla vždy použita pitná voda z vodovodního řadu, která splňuje požadavky na záměsovou vodu dle ČSN EN 1008 „Záměsová voda do betonu.“ Voda o stejných vlastnostech byla použita i pro ošetřování betonu.

8.2.5 Popílek

Jako částečná náhrada portlandského cementu byl využit popílek z elektrárny Chvaletice⁷. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti tohoto popílku jsou uvedeny v tabulce 12. Výsledky chemického rozboru tohoto popílku jsou uvedeny v tabulce 13. Sítový rozbor popílku elektrárny Chvaletice je dále zobrazen v grafu na obrázku 20.

Tabulka 12: Fyzikální a mechanické vlastnosti popílku z elektrárny Chvaletice⁷

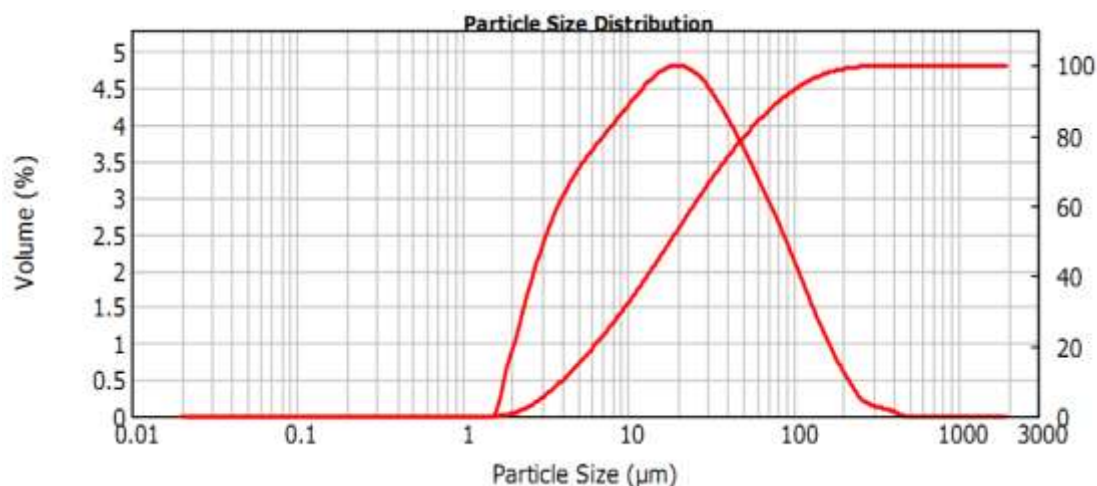
Vlastnost	Jednotka	Hodnota
<i>Mineralogické složení</i>		<i>mullit, β křemen, hematit</i>
<i>Měrná hmotnost</i>	[kg/m ³]	2036
<i>Měrný povrch</i>	[m ² /kg]	242,6
<i>Index účinnosti po 28 dnech (dle ČSN EN 450)</i>	[%]	84
<i>Index účinnosti po 90 dnech (dle ČSN EN 450)</i>	[%]	93

⁶ <http://www.avekocolor.cz>

⁷ <http://www.cezep.cz/>

Tabulka 13: Chemická XRF analýza složení popílku z elektrárny Chvaletice

Složka	Popis	Obsah [% hm.]
SiO_2	Oxid křemičitý	54,30
Al_2O_3	Oxid hlinitý	24,80
Fe_2O_3	Oxid železitý	11,07
CaO	Oxid vápenatý	3,10
MgO	Oxid hořečnatý	1,52
TiO_2	Oxid titaničitý	1,53
K_2O	Oxid draselný	1,33
Na_2O	Oxid sodný	0,81
SO_3	Oxid sírový	0,36
Ztráta žíháním		1,30



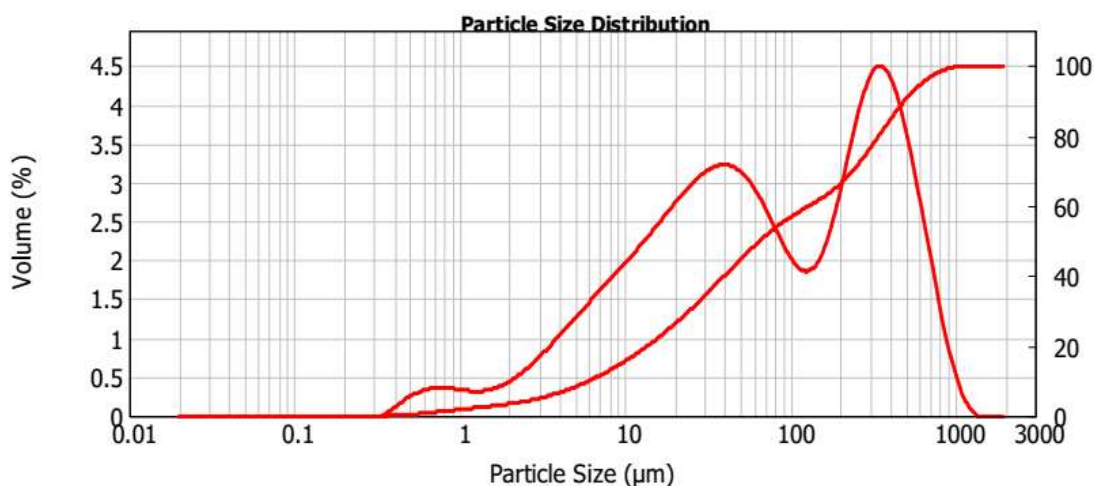
Obrázek 20: Rozložení velikosti částic popílku Chvaletice

8.2.6 Vysokopecní struska

V rámci práce byla pro formulaci nových receptur použita vysokopecní struska z Třineckých železáren, dodávaná firmou Kotouč Štamberk. Tato struska má měrnou hmotnost 2810 kg/m^3 a měrný povrch $380 \text{ m}^2/\text{kg}$, její sítový rozbor je prezentován v grafu na obrázku 21.

Tabulka 14: Chemická XRF analýza složení vysokopecní strusky Štramberk

Složka	Popis	Obsah [% hm.]
SiO_2	Oxid křemičitý	32,32
Al_2O_3	Oxid hlinitý	8,07
Fe_2O_3	Oxid železitý	1,16
CaO	Oxid vápenatý	48,02
MgO	Oxid hořečnatý	6,71
TiO_2	Oxid titaničitý	0,65
K_2O	Oxid draselný	0,79
Na_2O	Oxid sodný	0,37
SO_3	Oxid sírový	0,00
Ztráta žíháním		32,32



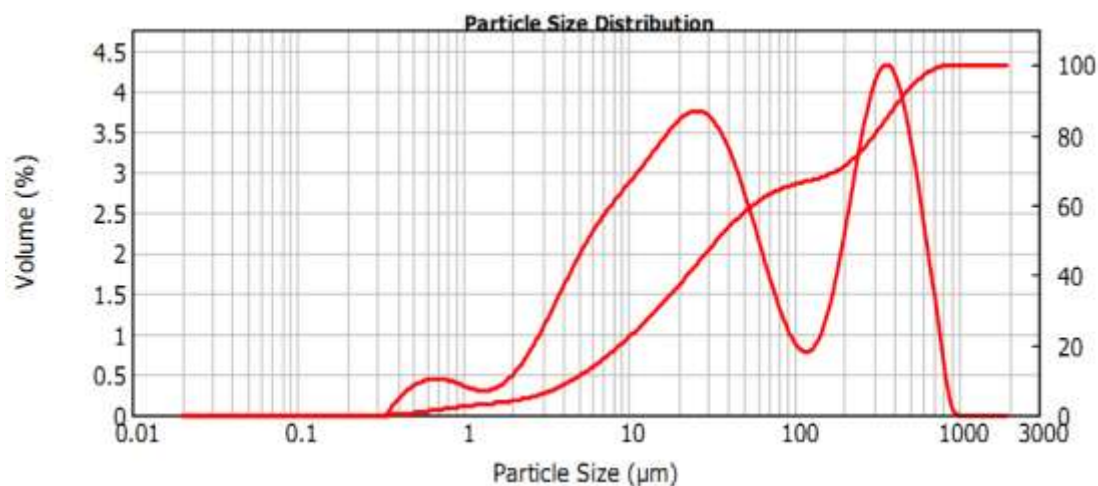
Obrázek 21: Rozložení velikosti částic vysokopecní strusky Kotouč Štramberk

8.2.7 Krystalizující přísada

Pro formulaci stěrek a nátěrů byla použita krystalizující přísada Xypex Admix od společnosti Xypex Corporation. Popis základních vlastností, přínosů a výhod utěšňujících přísad na bázi sekundární krystalizace cementu je uveden v teoretické části práce v sekci 3. Zjištěné složení částic Xypexu Admix a rozložení velikosti částic je uvedeno v tabulce 15 a grafu na obrázku 22.

Tabulka 15: Analýza složení krystalizující přísady Xypex Admix

Částice	Zdánlivá koncentrace	Wt%	Atom. %
C	6,11	14,41	24,03
O	30,91	41,09	51,44
Na	4,91	2,93	2,56
Mg	0,45	0,31	0,25
Al	1,50	0,91	0,68
Si	8,56	4,85	3,46
Ca	63,19	34,43	17,20
Fe	1,61	1,08	0,39



Obrázek 22: Rozložení velikosti částic Xypex Admix

8.2.8 Karboxymethylcelulóza

Methylcelulóza je chemicky methylether celulózy, kdy jsou atomy vodíku některých hydroxylových skupin (-OH) celulózy substituovány methylovými skupinami CH_3 a tvoří skupiny $-\text{OCH}_3$. V maltových výrobcích jako jsou polymercementové stěrky, prodlužuje dobu zpracovatelnosti, zvyšuje zádrž záměsové vody, zvyšuje viskozitu a tím pomáhá zpracovatelnosti na svislých površích a podhledech a zároveň zvyšuje adhezi k podkladu. Typické dávkování se pohybuje od 0.2 % ~ 0.5 % z hmotnosti suché směsi.

Karboxymethylcelulóza (CMC) je derivát celulózy s karboxymethylovými skupinami ($-\text{CH}_2\text{-COOH}$) navázanými na některé z hydroxylových skupiny glukopyranózových monomerů, které tvoří kostru polymeru. Ve výrobcích stavební chemie se používá jako Záhustek a emulgátor. U nátěrových hmot se karboxymethylcelulóza používá k vytvoření vyšší viskozity a předejití stékání či odkapávání nátěru ze svislých povrchů, nebo z podhledu, a zároveň jako emulgátor pomáhá při smísení a předejití rozmísení styren-akrylátové disperze a přidané vody [102, 103, 104].

E. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

9 ETAPA I Optimalizace a vývoj modifikovaných hmot se schopností sekundární krystalizace cementu

Tato část je rozdělena do výzkumných kroků podle metodiky uvedené v grafu na obrázku 12, v sekci 6.

9.1 Návrh a výroba zkušebních těles

Vzhledem k použití krystalizujících hydroizolačních hmot především na betonové konstrukce, byly jako podkladní materiál pro nanesení krystalizujících hydroizolací, navrženy, a společností PREFA Brno a.s., vytvořeny, zkušební vzorky s následujícím složení směsi pro výrobu betonu:

- Třída betonu C 30/37
- $w = 0,33$
- Třída agresivity prostředí XF4
- Kamenivo frakcí 0 - 4 (Zaječí) a 4 - 8 (Zaječí a Olbramovice)
- CEM I 42,5 R
- Voda
- MMS

Tato záměs posloužila po celou dobu výzkumu a vývoje nových hydroizolačních hmot pro experimentální ověření vlhkostních, strukturálních a fyzikálně - mechanických charakteristik krystalizujících hydroizolačních hmot. Betonové zkušební vzorky po celou dobu práce představovaly srovnávací referenční recepturu a hlavně posloužily jako podkladní plocha pro aplikaci krystalizujícími hmotami. Byly vytvořeny sady zkušebních těles o následujících základních rozměrech:

- $250 \times 250 \times 100$ mm
- $80 \times 100 \times 250$ mm

Tyto rozměry těles byly dále pro jednotlivé zkoušky v průběhu výzkumu upravovány za použití diamantové vodní pily v laboratořích Ústavu THD Fakulty stavební. Modifikace základních rozměrů jsou uvedeny u jednotlivých zkoušek.

9.2 Návrh receptur hydroizolačních nátěrů a stěrek

V rámci této části práce bylo v souladu s řešením grantového projektu navrženo 24 vstupních receptur nátěrů a stěrek s použitím odpadních surovin a krystalizující přísady Xypex Admix. Odpadní (druhotná) surovina byla zastoupena popílkem Chvaletice a vysokopecní struskou dodávanou firmou Kotouč Štramberk spol. s.r.o., (dále označené jako struska Štramberk).

Bylo následně vytvořeno 12 variant stěrek polymery modifikované cementové stěrky, a 12 variant nátěrů s polymercementovým pojivem, obě s krystalizující přísadou Xypex Admix, kde v suché složce byla část cementu zastoupena právě příměsí odpadní suroviny. Byly vytvořeny nátěry o pracovním označení N1-N12 a stěrky S1-S12. Nátěry N1-N12 jsou dvousložkové receptury na cemente-polymerní bázi (tzn. Suchá cementová složka - tekutá polymerní složka) v suché složce je část cementu zastoupena příměsí popílku Chvaletice. Stěrky S1-S12 jsou jemné cementové receptury s příměsí polymerní disperze a částí cementu zastoupenou popílkem. Odpadní surovinou bylo v těchto recepturách následně nahrazováno 10, nebo 20 % portlandského cementu:

- A – 10 % Popílku Chvaletice,
- B – 10 % strusky Štramberské,
- C – 10 % popílku Chvaletice + 10 % strusky Štramberské,
- D – 5 % popílku Chvaletice + 5 % strusky Štramberské.

V těchto recepturách byl nejen nahrazován portlandský cement, ale rovněž byl měněn procentuální obsah krystalizující přísady. Účelem bylo navržení receptur s optimálními vlastnosti navržených materiálů v poměru k finančním nákladům na obsah krystalizující přísady. Krystalizující přísada byla dávkována s přihlédnutím k doporučení výrobce přísady ve výši 1 %, 2 % a 3 %. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v tabulkách 16 a 17. Podle návrhu těchto receptur, bylo v závodě firmy Betosan s.r.o., vyrobeno všech 24 navržených materiálů pro prvotní vyřazovací zkoušky.

Tabulka 16: Přehled složení navržených polymercementových stěrek

Suroviny [kg]	Receptury stěrek											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Cement CEM II 42,5R	248	248	248	248	248	248	220	220	220	248	248	248
Křemičitý písek	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Vápenec	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Křemičitý filer	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Polymerní disperzní prášek na bázi vinylacetátu a etylénu	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Polypropylénová vlákna	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Superplastifikátor na bázi polykarboxylátů	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
karboxymethylcelulóza	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Popílek Chvaletice	27,5	27,5	27,5				27,5	27,5	27,5	13,8	13,8	13,8
Struska Štramberská				27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	13,8	13,8	13,8
Xypex Admix	2,75	5,5	8,25	2,75	5,5	8,25	2,75	5,5	8,25	2,75	5,5	8,25

Tabulka 17: Přehled složení navržených polymercementových nátěrů

Receptury nátěrů												
Suroviny [kg]	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
<i>Suchá složka</i>												
Cement CEM II 42,5R	270	270	270	270	270	270	240	240	240	270	270	270
Křemičitý písek	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Křemičitý úlet	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Křemičitý filer	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Popílek Chvaletice	30	30	30				30	30	30	15	15	15
Struska Štramberk				30	30	30	30	30	30	15	15	15
Xypex Admix	3	6	9	3	6	9	3	6	9	3	6	9
<i>Tekutá složka</i>												
Voda	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
karboxymethylcelulóza	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Styren-akrylátová disperze	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Odpěňovač na bázi synt. kopolymerů	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Nové hmoty byly navrženy v souladu s pozdějším použitím. U nátěrů typu N se jedná o hydroizolační polymercementový nátěr, který je schopen překlenovat menší trhliny a odolávat prostupu radonu, což je v současnosti nutný požadavek na hydroizolace spodních staveb v občanské výstavbě. Použití krystalizující přísady umožní nátěru překlenovat a zatěšňovat i větší trhliny s předpokladem do šířky 0,4 mm. Tuto schopnost samotný polymercementový nátěr postrádá, jelikož není schopen překonávat a utěšňovat větší trhliny, které jej mohou snadno přetrhnout (průtažnost cca 30 %).

Hydroizolační polymercementové stěrky typu S, s krystalizující přísadou, byly navrženy pro aplikaci v tenké vrstvě (2 - 4 mm), a zároveň jako vysprávka rovinnosti a vyhlazení povrchu opravovaného, nebo hydroizolovaného podkladu pod případný další estetický barevný nátěr. Její výhodou oproti nátěrové kompozici je zejména výrazně nižší předpokládaná cena, která je na druhé straně vyvážena křehkostí materiálu, který není nijak pružný.

9.3 Základní testování navržených nátěrů a stěrek

Po navržení základních 24 testovacích receptur krystalizujících hmot byly primárně zvoleny tři typy zkoušek, tak aby výsledné receptury splňovaly základní požadavky na fyzikálně mechanické vlastnosti. Pro prvotní výběr nejvhodnějších receptur pro navazující testování, byly navrženy receptury podrobeny zkouškám:

- zpracovatelnosti při nanášení na betonový podklad,
- nestékavosti o aplikaci na betonový podklad,
- závislosti aplikovatelnosti na teplotě.

Tyto zkoušky posloužily pro eliminaci receptur, které měly nevyhovující základní požadované vlastnosti z hlediska využití in-situ. Díky výběru vhodných receptur bylo následně možno v navazujícím výzkumu pokračovat s perspektivními recepturami.

9.3.1 Zkouška zpracovatelnosti při nanášení na betonový podklad

Smyslem zkoušky bylo nalézt receptury, které mají nejlepší zpracovatelnost při nanášení na betonový podklad a na opačné straně hledat receptury, které jsou díky nelze snadno na betonový povrch nanést, a z toho důvodu jsou nevhodné pro pozdější použití in-situ.

Zkouška zpracovatelnosti při nanášení byla prováděna nanášením navržených receptur nátěrů a stěrky v laboratorním prostředí na vodorovně položené prefabrikované dlaždice o rozměrech 300 × 150 × 50 mm. Nově navržené receptury byly míseny s vodou dle poměru v poměru 5 : 2 (objemově). Zpracovatelnost při nanášení byla hodnocena subjektivně s hodnocením, kdy 1 znamená ideální nanášení a 5 naprosto nevyhovující nanášení. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tabulce 18.

Vyhodnocení výsledků této zkoušky bylo při pozdějším vyhodnocení výsledků hodnoceno společně s výsledky dalších zpracovatelnostních (reologických) zkoušek pro výběr nejvhodnějších receptur pro další testování.

Tabulka 18: Výsledky zkoušky zpracovatelnosti při nanášení

	Označení receptury/hodnocení											
<i>Nátěr</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>	<i>N10</i>	<i>N11</i>	<i>N12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
<i>Stěrka</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

Na základě této zkoušky byly všechny receptury hodnoceny 1 nebo 2, a proto bylo konstatováno, že všechny tyto startovní receptury zkoušce vyhověly. Všechny 24 receptur z tohoto důvodu postoupilo do dalších zkoušek.

K výsledkům této zkoušky bylo později přihlíženo pouze okrajově vzhledem k velmi malým rozdílům ve zpracovatelnosti jednotlivých receptur.

9.3.2 Zkouška nestékavosti

Zkouška nestékavosti byla prováděna za účelem zjištění nestékavosti jednotlivých receptur z betonového podkladu. Pro praktickou aplikaci in-situ, měla tato zkouška posoudit míru možného stékání nebo odpadávání, a tím poškození nátěru či stěrky při aplikaci na stěnu, nebo například podhledu konstrukce.

Jakýkoliv náznak stékání, nebo dokonce odkapávání v případě nátěrového materiálu a odpadávání, odloupávání v případě stěrky materiálu, by měl velmi negativní dopad na přídržnost naneseného materiálu k podkladu a v důsledku toho i na jeho výsledné bariérové vlastnosti a trvanlivost. Proto by taková receptura, byla vyřazena z dalšího testování.

Smyslem zkoušky tedy bylo vyřadit receptury, které z povrchu stékají nebo se odlupují a naopak vytipovat ty receptury, které jsou v tomto směru nejlepší.

Všech 24 startovacích receptur bylo testováno na prefabrikované betonové dlaždice rozměru 300 × 150 × 50 mm uchycených v úhlu přibližně 80°, tak aby byla simulována vertikální poloha natírané plochy. Nátěrové hmoty byly nanášeny štětcem šířky 50 mm ze syntetických vláken a stěrkové hmoty byly nanášeny pomocí nerezového zednického hladítka.

Chování receptur nátěrů a stěrek bylo hodnoceno dle stejného klíče jako předchozí zkouška, subjektivně s hodnocením 1 pro z ideální nestékavost a 5 pro naprosto nevyhovující nestékavost. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19: Výsledky zkoušky nestékavosti

	Označení receptury/hodnocení											
<i>Nátěr</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>	<i>N10</i>	<i>N11</i>	<i>N12</i>
<i>Hodnocení</i>	1,5	1	1	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3
<i>Stěrka</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>
<i>Hodnocení</i>	1,5	1	1	2,5	2,5	2,5	3	3	3	2,5	2,5	2,5

Z výsledků uvedených v tabulce 19 vyplývá, že většina receptur měla nestékavost na přiměřené úrovni, pouze receptury s přidavkem strusky Štramberk vykazovaly zhoršené výsledky na úrovni hodnocení 3. Toto hodnocení bylo později důvodem k vyřazení těchto receptur z dalších zkoušek.

9.3.3 Zkouška závislosti aplikovatelnosti na teplotě

Krystalizující polymercementové receptury byly navrženy pro aplikaci na betonových konstrukcích, které jsou ve stavební praxi vystaveny velmi rozdílným teplotním vlivům. Z fyzikálně-chemického hlediska je nejnížší možná teplota pro aplikaci hmot na bázi cementu a vodné disperze teplota +5 °C, která je limitem pro úspěšnou hydrataci cementu, ale především limitem pro to, aby nebyla podkročena minimální filmotvorná teplota vodné disperze. Pod tuto teplotní hranici nelze tyto receptury úspěšně aplikovat, protože dochází k nevratnému znehodnocení vodné disperze. Tímto byla hodnota 5 °C stanovena jako hraniční pro testování při nízkých teplotách.

Firmy mnohdy nehledí na doporučení výrobců materiálů neaplikovat cementem pojené materiály při teplotách vyšších než 30 °C. Pro zvolení horní hraniční teploty byla použita teplota 40 °C. Ta byla zvolena z důvodu simulace případného nerespektování těchto firem pokyny výrobce, a např. aplikování těchto hmot v letní poledne na osluněné části konstrukce.

Pro testování při +5 °C, byly v laboratorních podmínkách podkladní dlaždice rozměru 300 × 150 × 50 mm a nátěrové a stěrkové materiály schlazeny v chladicích boxech na teplotu 5±1 °C po dobu 24 hodin. Vzhledem k tomu, že teplota laboratorního prostředí byla 20±2 °C, receptury i jednotlivé dlaždice byly z chladicího boxu vyjmuty jednotlivě, materiály nejprve

zamíseny, a poté aplikovány na stejně zchlazené podkladní dlaždice. Tímto nedocházelo k zbytečnému ohřívání zchlazených materiálů a podkladních dlaždic.

Pro teplotu 40 °C, byly v laboratorních podmínkách opět temperovány podkladní dlaždice rozměru 300 × 150 × 50 mm a nátěrové a stěrkové materiály v laboratorní horkovzdušné sušárně nastavené na teplotu 40±1 °C po dobu 24 hodin. Analogicky s nízkou teplotou byly nátěrové hmoty ze sušárny rychle vyjmuty, zamíseny a aplikovány na stejně zahřáté podkladní dlaždice vzhledem k nutnosti limitovat vliv laboratorního prostředí 20±2 °C.

Chování receptur nátěrů a stěrek bylo hodnoceno opět subjektivně se stejnou stupnicí jako u předchozích zkoušek, kdy 1 znamená ideální chování při nízké/vysoké teplotě a 5 naprosto nevyhovující chování. Cílem bylo vyřadit receptury, které při nízké nebo vysoké teplotě vykazují problematickou zpracovatelnost a v praxi by způsobovaly aplikačním pracovníkům problémy a případně reklamace výrobci.

Tabulka 20: Hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při nízké teplotě (+5 °C)

	Označení receptury											
<i>Nátěr</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>	<i>N10</i>	<i>N11</i>	<i>N12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Stěrka</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tabulka 21: Hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při vysoké teplotě (+40 °C)

	Označení receptury											
<i>Nátěr</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>	<i>N10</i>	<i>N11</i>	<i>N12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
<i>Stěrka</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1

Tabulka 22: Souhrnné hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při nízkých a vysokých teplotách

	Označení receptury											
<i>Nátěr</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>	<i>N10</i>	<i>N11</i>	<i>N12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2,5	2,5	2,5
<i>Stěrka</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>
<i>Hodnocení</i>	1	1	1	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2	2	2

Z výsledků uvedených v tabulkách 20, 21 a 22 vyplývá, že většina receptur měla dobrou zpracovatelnost při nízké i vysoké teplotě. Subjektivní hodnocení se pohybovalo u většiny vzorků na vyhovující úrovni hodnocení 1 nebo 2, která byla naprosto dostatečná pro postup receptur do dalších testů.

Tabulka 23: Sumarizace výsledků testování zpracovatelnosti pro nátěry

	Označení receptury											
Nátěr	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Nanášení	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
Nestékavost	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Teploty	1	1	1	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2,5	2,5	2,5
Průměr	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5

Tabulka 24: Sumarizace výsledků testování zpracovatelnosti pro stěrky

	Označení receptury											
Stěrka	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Nanášení	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
Nestékavost	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Teploty	1	1	1	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2,5	2,5	2,5
Průměr	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5

Vyhodnocení zkoušek

Výsledky jednotlivých výše popsaných zkoušek jsou sumarizovány ve výše uvedených tabulkách 23 a 24. Závěrem lze konstatovat, že ve zkouškách zpracovatelnosti a závislosti na teplotě, nebyly zaznamenány významnější rozdíly mezi jednotlivými recepturami. Naopak ve zkoušce nestékavosti se projevil negativní vliv příměsi strusky Štramberské, která v recepturách, kde byla obsažena, způsobovala částečné stékání nátěrů a oddělování stěrkových materiálů od podkladu.

Na základě těchto dosažených výsledků, byly jako nejvhodnější receptury vyhodnoceny receptury N1-N3 a S1-S3 o složení popsaném v tabulce 25, které obsahují jako odpadní surovinu pouze popílek z elektrárny Chvaletice (10 %). Tyto receptury v žádné ze zkoušek nevykázaly negativní vlastnosti, a proto byly vybrány v souladu s řešením grantu MPO a výsledky práce Dohnálka [38], jako hlavní receptury pro další testování v rámci navazujících etap.

Tabulka 25: Zvolené nejperspektivnější receptury

Název receptury	Typ receptury
N 1 N 2 N 3	<i>dvousložkové receptury na polymercementové bázi</i>
S 1 S 2 S 3	<i>cementové receptury s příměsí polymerní disperze</i>

10 ETAPA II. Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot

Tato etapa kontinuálně navazuje na etapu I „Optimalizace a vývoj modifikovaných hmot se schopností sekundární krystalizace cementu“. Postup etapy byl proveden shodně s metodikou v grafu na obrázku 13, v sekci 7, s hlavním cílem vybrání nejperspektivnějších receptur vhodných pro finální produkci.

10.1 Charakteristika prostředí pro uložení zkušebních těles

Pro dosažení relevantního výsledku byla zvolena pro výběr agresivních prostředí metoda multikriteriální optimalizace, která je provedena metodou párového srovnání, volbou srovnávacích kritérií, dle důležitosti a váhy kritérií.

Pro optimalizační analýzy byla vybrána kapalná a plynná agresivní prostředí, protože koroze pevným agresivním prostředím a biologická koroze jsou procesy degradace betonu probíhající na základě pochodů popsaných v chemické korozi kapalným a plynným prostředím.

Na základě poznatků, bylo vybráno pět kapalných a pět plynných prostředí pro posouzení podle tabulky 26.

Tabulka 26: Vstupní prostředí pro multikriteriální výběr

Druh agresivní kapaliny	Druh agresivního plynu
<i>s obsahem síranů</i>	CO_2
<i>s obsahem chloridů</i>	SO_2
<i>s obsahem CO_2 a jeho iontových forem</i>	NO_2
<i>s obsahem sloučenin dusíku</i>	HCl
<i>s obsahem iontů Mg^{2+}</i>	NH_3

Na základě výsledků multikriteriální optimalizační analýzy uvedených v příloze práce, byly dle zvolených kritérií, byla pro testování navržených receptur vybrána dvě kapalná prostředí:

- s obsahem síranů,
- s obsahem chloridů,

a dvě plynná agresivní prostředí s:

- oxidem uhličitým (CO_2),
- oxidem siřičitým (SO_2).

Výsledné skupiny kapalných a plynných prostředí, byly dále modifikovány, pro potřeby urychlené degradace zkušebních těles, dle tabulky 27.

Tabulka 27: Vybraná agresivní prostředí a jejich charakteristika

PROSTŘEDÍ		KONCENTRACE
<i>Odolnost proti CO₂</i>	<i>plynné</i>	<i>nízká koncentrace% (do 10 %)</i>
<i>Odolnost proti CO₂</i>		<i>vysoká koncentrace % (až 98 %)</i>
<i>Odolnost proti SO₂</i>		<i>vysoká koncentrace % (až 98 %)</i>
<i>1. Odolnost proti působení síranů - SO₄²⁻</i>	<i>kapalné</i>	<i>10 g Na₂SO₄/l</i>
<i>2. Odolnost proti působení síranů - SO₄²⁻</i>		<i>34,6 g Na₂SO₄/l</i>
<i>Odolnost proti působení chloridů - Cl⁻</i>		<i>100 g NaCl/l</i>
<i>Reálné exteriérové prostředí</i>		

10.1.1 Reálné exteriérové prostředí

Pro reálnou simulaci použití navržených hmot v praxi, i pro účely srovnání, bylo dále vytvořeno srovnávací prostředí k jednotlivým kapalinám a plynů, tzv. venkovní (exteriérové) uložení vystavující zkušební tělesa působení běžných klimatických podmínek. Na rozdíl od simulovaných podmínek působení atmosféry v laboratorních podmínkách, jsou vnější klimatické podmínky velmi specifickou oblastí. U laboratorní simulace podmínek jsme schopni stanovit okrajové podmínky a kontrolovat je, čímž jsme schopni daný experiment později zopakovat. U vnějších atmosférických vlivů, jejich průběh schopni předvídat nejsme.

Pro analýzu atmosférických vlivů posloužil v tomto případě záznam z meteorologické stanice Vantage Pro, umístěném v areálu přerovské Prechezy a.s., ve výšce 210 m.n.m. Vzhledem k faktu, že interval pro záznam hodnot byl 10 minut, celý záznam je díky dlouhému monitorovacímu období osmnácti měsíců velmi rozsáhlý a není tak možné jej publikovat kompletní. V tabulce 28 je proveden souhrn zaznamenaných hodnot vztažený na jednotlivé měsíce. Pozornost byla zaměřena na maxima a minima teplot a úhrn srážek.

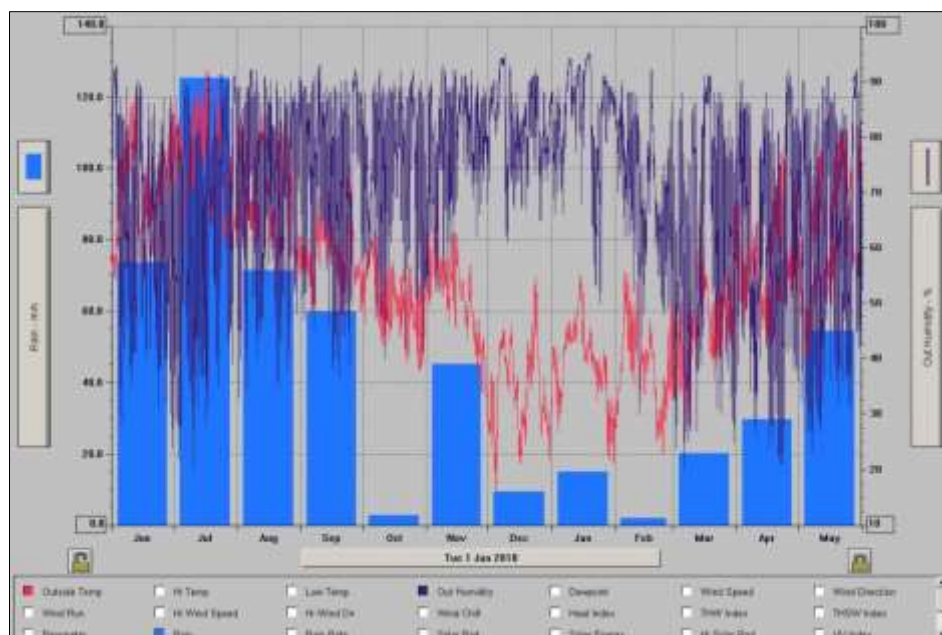
Tabulka 28: Sumarizační tabulka klimatických podmínek reálného exteriérového prostředí během expozice vzorků betonu

Sumarizační tabulka klimatických podmínek										
Měsíc /rok	Průměrné měsíční teploty			Průměrné denní teploty		Srážková úhrny				
	Max	Min	Prům.	Max	Min	Celkem	Denní max	>0.2 mm	>2 mm	>20 mm
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[mm]	[dny]	[dny]	[dny]
6/2010	31,8	9,5	18,8	26	11,7	73,8	27,8	8	6	2
7/2010	34,8	10,7	22	28,3	15,8	125,4	36,8	8	5	3
8/2010	29,4	9,3	19,4	13,8	11,4	71,4	19,4	14	10	0
9/2010	23,3	4,9	13,7	17,5	7,9	59,8	20,4	11	5	1
10/2010	26,4	-1,2	9,8	17,7	3,8	23,8	8	12	4	0
11/2010	18,4	-8,2	7,4	14,8	-5,4	45,2	14,4	9	6	0
12/2010	9,9	-15,9	-3,7	6,3	-12,3	9,6	2,2	7	2	0
1/2011	10,2	-12,4	-0,5	8,3	-9	15	4	9	3	0
2/2011	10,5	-11,3	-0,9	7,7	-8,2	2	1,6	3	0	0
3/2011	19,1	-7,8	5,5	12,7	1,1	20,2	8	6	4	0
4/2011	25,3	1,4	12,2	18	5,9	29,8	15,2	11	3	0
5/2011	28,2	14,6	15,2	21,9	5,4	54,6	14,2	10	2	0
6/2011	30	9,9	19,2	23,8	14,6	65,6	19,6	13	8	0
7/2011	30,6	10,7	18,6	24,8	12,8	106,8	29,8	19	7	1
8/2011	33,9	8	20,4	27,4	13,8	96,8	40,8	13	9	1
9/2011	30,2	7,3	17,1	24,1	13,4	15,8	7,2	7	4	0
10/2011	26,4	-1,2	9,8	17,1	3,8	23,8	8	12	4	0
11/2011	18	-5,4	2,9	11,8	-2,2	1,4	0,6	5	0	0

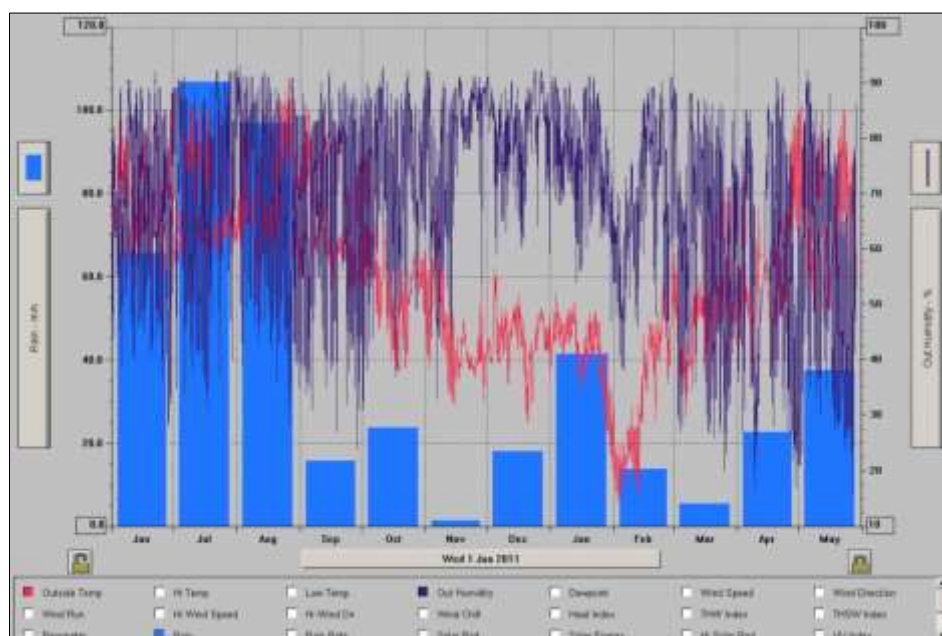
Výstupem z meteorologické stanice je grafické znázornění klimatických podmínek za určité období. V grafech na obrázcích 23 a 24 je znázorněno období roku 2010 a 2011, ve kterém byly vzorky uloženy.

Nejteplejším měsícem, který nastal během 18 měsíců, kdy měření probíhalo, byl červenec roku 2010, naopak nejchladnější měsíc byl prosinec 2010.

Na doložených výstupech měření v níže uvedených grafech modré sloupce představují celkové srážkové úhrny za daný den. Naopak červená křivka v grafu zachycuje průběh teplota a modrá křivka relativní vlhkost vzduchu. Úhrn srážek udává množství vody spadlé na vodorovnou plochu v daném místě za určitý časový interval. Vyjadřuje se výškou vodního sloupce v mm (1 mm srážek odpovídá 1 litru vody spadlé na plochu 1 m²).



Obrázek 23: Grafické znázornění klimatických podmínek pro období roku 2010



Obrázek 24: Grafické znázornění klimatických podmínek pro období roku 2011

10.1.2 Vlhké prostředí

Během procesu vývoje receptur krystalizujících hydroizolačních hmot bylo také využito vlhkého prostředí. Všechny zhotovené vzorky (podkladní betonové vzorky pro aplikaci krystalizujících hmot), byly nejdříve uloženy po dobu 28 dnů ve zrací komoře, kde je vysoká relativní vlhkost (nad 65 %) a teplota 21 ± 2 °C.

Toto prostředí zajistilo ideální neměnné podmínky pro zrání betonu, a nedocházelo tak k výskytu negativních vlivů, které by ovlivňovaly zrání vzorků. Toto prostředí bylo rovněž využito pro uložení vzorků a jejich následnému testování po 3 měsících.

10.1.3 Doba uložení v prostředí

Pro dlouhodobá testování fyzikálně mechanických vlastností byla vybrána prostředí dle tabulky 27 uvedené v části 10.2. Pro tato prostředí, s výjimkou reálného exteriérového, byly zkonstruovány speciální korozní komory, které zajistily neměnné podmínky během dlouhodobého uložení. Bylo stanoveno uložení vzorků v těchto prostředích, na termíny zkoušení 6, 12 a 18 měsíců od uložení v prostředí.

10.2 Ověření vlastností navržených receptur - bariérové vlastnosti vůči kapalinám

Pro tuto sérii zkoušek bylo použito pokladního betonu definovaném v sekci 9.1. Pro každou z uvedených zkoušek, byly vytvořeny dvě série vzorků, každá čítající minimálně tři tělesa. Na tento podkladní beton byly nanесeny stěrky a nátěry vybrané na základě vyřazovacích zkoušek ze sekce 9.3, uvedené v tabulce 25. Po vytvoření vzorků byla tělesa uložena po dobu 1 měsíce ve vodním uložení tak, aby mohlo dojít k rozvoji krystalů v pórové struktuře betonu.

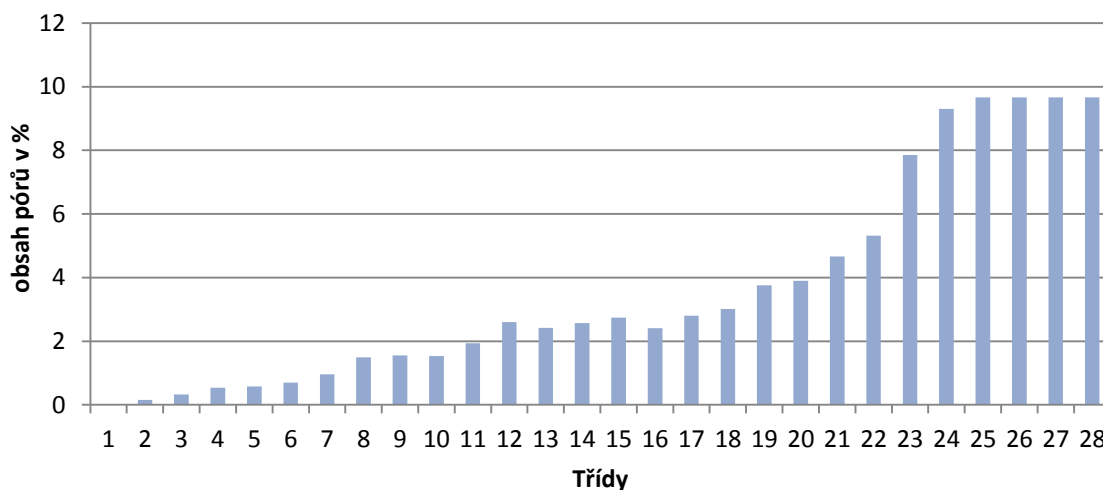
Po měsíci zrání, byla první část vzorků uložena na dobu 3 měsíců do vlhkého prostředí s relativní vlhkostí nad 65 % a teplotou 21 ± 2 °C. Druhá část vzorků byla umístěna do zkonstruovaných korozních komor, ve kterých byla po dobu uložení udržována stabilní koncentrace agresivních činitelů dle tabulky 27 uvedené v části 10.2. Současně byly do těchto prostředí uloženy i betonové vzorky neošetřené krystalizující hmotou, které následně posloužily jako referenční (srovnávací) receptura. Zkušební tělesa byla v intervalu 3, 6, 12 a 18 měsíců od uložení podrobena testování bariérových vlastností vůči kapalinám.

10.2.1 Charakteristika vzduchových pórů podle ČSN EN 480-11

V grafu na obrázku 25 jsou uvedeny výsledné hodnoty rozdělení vzduchových pórů pro referenční podkladní beton, kde je sledován v řezech jednotlivých vzorků provzdušněných betonů procentuální obsah vzduchových pórů, ale současně také zastoupení pórů velikosti do 300 μm . Tyto uzavřené kulovité póry (0,010 – 300 μm) se označují jako účinné a společně s nimi je ještě důležitá jejich vzájemná vzdálenost (L), která by neměla být větší jak 0,2 mm.

Z něj vyplývá, že celkový obsah vzduchu A byl 9,58 objemových % a obsah mikroskopického vzduchu A_{300} , byl 3,01 objemových %. Součinitel prostorového uložení vzduchových pórů L, byl 0,07 mm. Rovněž je z grafu patrné, že v betonu jsou i výrazně zastoupeny póry tříd 23 až 28 o průměru 405 a 4000 μm .

Beton byl tedy navržen s velkým množstvím pórů umožňujících průchod vlhkosti, a tím i následnému prokrystalizování testovaných nátěrů a stěrek.

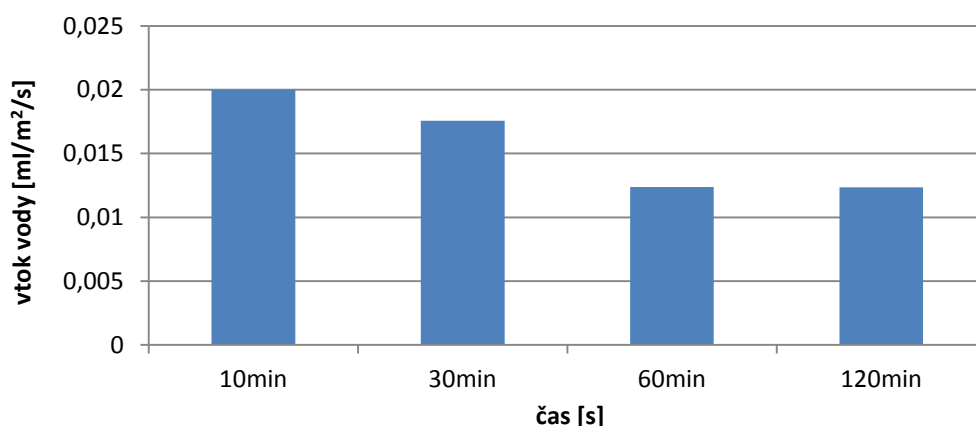


Obrázek 25: Rozdělení vzduchových pórů referenčního (podkladního) betonu

Při výrobě vzorků pro analýzu byl měřený povrch leštěn brusnými kotouči pod kontinuálním omýváním povrchu vodou. Tímto procesem docházelo k znehodnocení a vyplavení produktů krystalizace z pórů betonu a tím i skreslení výsledků fungování navržených hydroizolačních nátěrů a stěrek. Z tohoto důvodu nebylo možno spolehlivě měřit výskyt volných pórů v ošetřeném betonu a následně posoudit vyplnění pórů betonu nově vzniklými krystaly.

10.2.2 Počáteční povrchová nasákavost betonu (ISAT)

Kalkulace a výpočet proběhly dle rovnice [8] v sekci 8.1.9, a výsledné hodnoty byly zařazeny, dle klasifikace uvedené v tabulce 5.



Obrázek 26: Počáteční povrchová nasákavost betonu bez ošetření krystalizujícími hmotami a bez působení agresivního prostředí

Pro všechny vzorky (N1-N3, S1-S3) uložených ve všech agresivních prostředích včetně reálného exteriérového prostředí v intervalech šesti, dvanácti a osmnácti měsíců, byly ve všech časových intervalech, naměřeny hodnoty nižší než hodnoty uváděné v tabulce 5, pro absorpci betonu „nízká“, tedy až $0,07 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ během 120 min. Všechny zkoušené vzorky ošetřené recepturami vykazaly natolik nízkou povrchovou absorpci, až nulovou, takže vzájemné porovnání receptur nebylo možné.

Z tohoto důvodu nebylo možno porovnat vlivy jednotlivých prostředí na počáteční absorpci betonu, ošetřeného navrženými hydroizolačními hmotami. Tyto výsledky korespondovaly i s úvodními hodnotami naměřenými pro neošetřený podkladový beton. Ten, podle vyhodnocení v grafu na obrázku 26, byl zařazen do kategorie nasákavosti „nízká“.

10.2.3 Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent

Teoretický popis metody je uveden v sekci 8.1.10. Pro zkoušku byla použita tělesa o rozměrech $250 \times 250 \times 100 \text{ mm}$. Zkušební vzorky byly z důvodu dosažení stejné, ustálené vlhkosti po vyjmutí z korozních prostředí uloženy v sušárně po dobu 48 hodin a teplotě $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, poté vyjmuty a skladovány po dobu 14 dnů při temperované teplotě místnosti.

Vlhkost vzorků byla měřena pomocí kapacitního vlhkoměru PSMXI, který je určen k nedestruktivnímu měření vlhkosti stavebních materiálů a konstrukcí v povrchových vrstvách. Je jím možné určovat vlhkost v objemu omezeném plochou přibližně $80 \times 100 \text{ mm}$ a hloubkou 15 až 30 mm, a na základě kalibrační křivky vyhodnotit hmotnostní vlhkost vzorku v %. Vlhkost dosahovala u měřených vzorků 0,8 do 1 %. Zkušební vzorky se mechanicky neupravují, pouze se povrchově očistí svrchní plocha, na které je prováděno měření.



Obrázek 27: Zařízení TORRENT s měřeným vzorkem

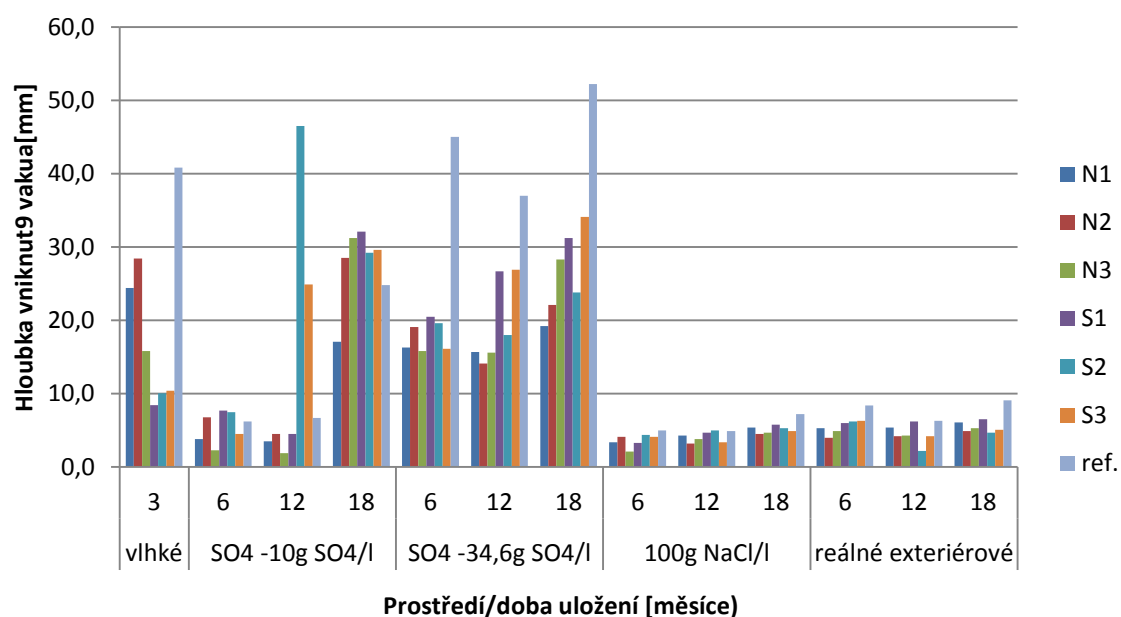


Obrázek 28: Vakuová pumpa systému TORRENT

V následujících tabulkách 29 až 32, a grafech na obrázcích 29 až 32, jsou vyhodnoceny výsledky měření pro jednotlivé materiály a prostředí, v daných termínech zkoušení. Jsou doloženy hloubky vniknutí vakua s koeficienty k_T , pro následné vyhodnocení v tabulce 33, dle kvality povrchové vrstvy.

Tabulka 29: Hloubka vniknutí vakua v kapalných prostředích

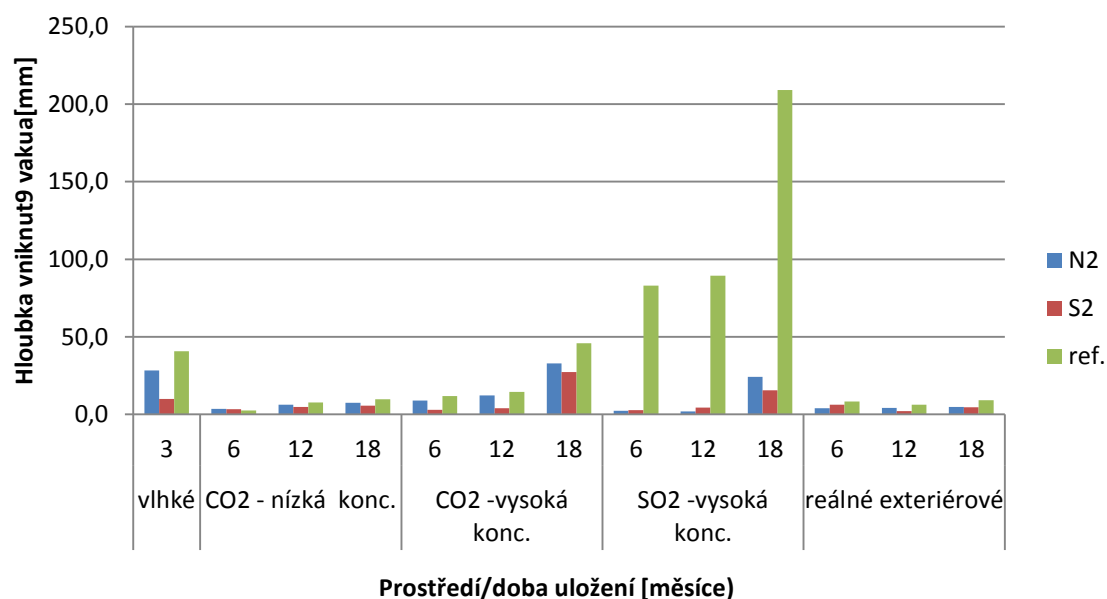
	hloubka vniknutí vakua v prostředí [mm]												
prostředí uložení[m]	vlhké 3	SO ₄ -10g 6	SO ₄ /l 12	18	SO ₄ -34,6g 6	SO ₄ /l 12	18	100g NaCl/l 6	12	18	reálné exteriérové 6 12 18		
N1	24,4	3,8	3,5	17,1	16,3	15,7	19,2	3,4	4,3	5,4	5,3	5,4	6,1
N2	28,4	6,8	4,5	28,5	19,1	14,1	22,1	4,1	3,2	4,5	4,0	4,2	4,9
N3	15,8	2,3	1,9	31,2	15,8	15,6	28,3	2,1	3,8	4,7	4,9	4,3	5,3
S1	8,5	7,7	4,5	32,1	20,5	26,7	31,2	3,3	4,7	5,8	6,0	6,2	6,5
S2	10,1	7,5	46,5	29,2	19,6	18,0	23,8	4,4	5,0	5,3	6,2	2,2	4,7
S3	10,4	4,5	24,9	29,6	16,1	26,9	34,1	4,1	3,4	4,9	6,3	4,2	5,1
ref.	40,8	6,2	6,7	24,8	45,0	37,0	52,2	5,0	4,9	7,2	8,4	6,3	9,1



Obrázek 29: Sumarizace hloubky vniknutí vakua v kapalných prostředích

Tabulka 30: Hloubka vniknutí vakua v plynných prostředích

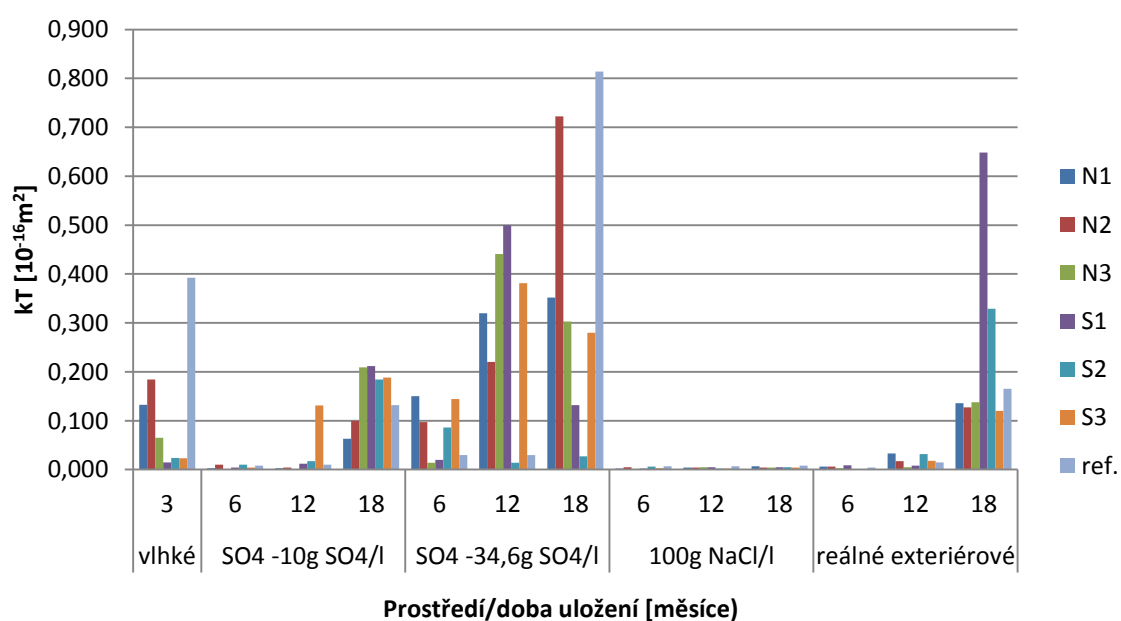
	hloubka vniknutí vakua v prostředí [mm]												
vzorek	vlhké	CO ₂ –nízká konc.			CO ₂ –vysoká konc.			SO ₂ –vysoká konc.			reálné exteriérové		
uložení[m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N2	28,4	3,6	6,2	7,5	9,0	12,3	32,8	2,4	1,9	24,2	4,0	4,2	4,9
S2	10,1	3,5	4,8	5,6	3,0	4,1	27,4	2,8	4,5	15,5	6,2	2,2	4,7
ref.	40,8	2,6	7,7	9,8	11,9	14,6	45,8	83,0	89,5	209,1	8,4	6,3	9,1



Obrázek 30: Sumarizace hloubky vniknutí vakua v plynných prostředích

Tabulka 31: Součinitel kT v kapalných prostředích

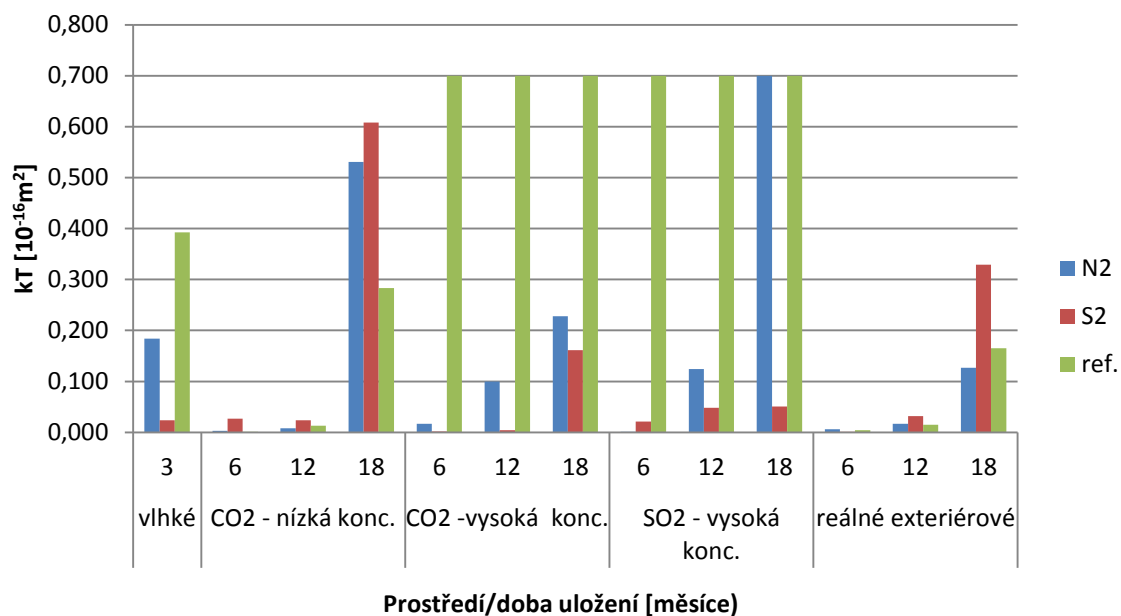
	součinitel kT												
vzorek	vlhké	SO ₄ -10 g SO ₄ /l			SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l			100 g NaCl/l			reálné exteriérové		
Uložení [m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1	0,132	0,003	0,003	0,063	0,150	0,320	0,352	0,002	0,004	0,007	0,006	0,033	0,136
N2	0,184	0,010	0,004	0,100	0,097	0,220	0,722	0,005	0,004	0,004	0,006	0,017	0,127
N3	0,065	0,001	0,001	0,209	0,014	0,441	0,303	0,001	0,005	0,004	0,003	0,005	0,138
S1	0,015	0,004	0,012	0,212	0,020	0,500	0,132	0,002	0,005	0,005	0,009	0,008	0,648
S2	0,024	0,010	0,017	0,184	0,086	0,014	0,027	0,006	0,002	0,005	0,001	0,032	0,329
S3	0,023	0,004	0,131	0,188	0,144	0,381	0,280	0,003	0,002	0,004	0,001	0,018	0,120
ref.	0,393	0,008	0,010	0,132	0,030	0,030	0,814	0,007	0,007	0,008	0,004	0,015	0,165



Obrázek 31: Sumarizace součinitele kT vzorků v kapalných prostředích

Tabulka 32: Součinitel kT v plynných prostředích

	součinitel kT													
vzorek	vlhké	CO ₂ –nízká konc.				CO ₂ –vysoká konc.			SO ₂ –vysoká konc.			reálné exteriérové		
Uložení [m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	
N2	0,184	0,003	0,008	0,531	0,017	0,100	0,228	0,001	0,124	6,772	0,006	0,017	0,127	
S2	0,024	0,027	0,024	0,608	0,002	0,004	0,161	0,021	0,048	0,051	0,001	0,032	0,329	
ref.	0,393	0,001	0,013	0,283	46,51	26,460	35,090	6,966	6,772	73,990	0,004	0,015	0,165	

Obrázek 32: Sumarizace součinitele kT vzorků v plynných prostředích⁸

Na základě analýzy dosažených výsledků, byly testované receptury zařazeny podle vypočteného kT, dle tabulky 6, do tříd kvality povrchové vrstvy. Výsledné zařazení nátěrů a stěrek v porovnání s referenčním betonem, dle kvality krycí vrstvy, je sumarizováno v tabulce 33.

⁸ Hodnoty 0,7 viz tabulka 45, byly upraveny pro názornost grafu (N2 - 6,772, ref. beton >10 (10⁻¹⁶ m²))

Tabulka 33: Vyhodnocení výsledků testování vzduchové propustnosti metodou Torrent

	Prostředí/doba testování																				
	Kapalné prostředí									reálné exteriérové prostředí			Plynné prostředí								
prostředí	100 g NaCl/l			10 g SO ₄ /l			34,6 g SO ₄ /l						CO ₂ nízká			CO ₂ vysoká			SO ₂ vysoká		
působení [měsíce]	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1	VD	VD	VD	VD	VD	D	S	S	S	VD	D	S									
N2	VD	VD	VD	VD	VD	D	D	S	S	VD	D	S	VD	VD	S	D	D	S	VD	S	ŠP
N3	VD	VD	VD	VD	VD	S	D	S	S	VD	VD	S									
S1	VD	VD	VD	VD	D	S	D	S	S	VD	VD	S									
S2	VD	VD	VD	VD	D	S	D	D	D	VD	D	S	D	D	S	VD	VD	S	D	D	D
S3	VD	VD	VD	VD	S	S	S	S	S	VD	D	S									
Ref.	VD	VD	VD	VD	VD	S	D	D	S	VD	D	S	VD	D	S	VŠP	VŠP	VŠP	ŠP	ŠP	VŠP

Nejvýraznější pokles kvality vrstvy, byl zaznamenán v reálném exteriérovém prostředí. U všech testovaných vzorků došlo ke snížení kvality vrstvy z „velmi dobrá“ na „střední“. Tento pokles může být způsoben kombinací destruktivních činitelů působící na povrchové vrstvy betonu. Především se jedná o cyklické výkyvy teplot v kombinaci s kyselým deštěm, popř. působením vody v zimním období a tvorbě ledu. Ty mohly mít za následek porušení povrchové vrstvy trhlinami, jež byly následně zaplaveny vodou, která umožnila přístupu vody k cementové matici, popř. tvorbě ledu a jeho expanzního působení.

Během testování krystalizujících hmot v jednotlivých intervalech působení agresivních prostředí byly, mimo jiné, zaznamenány i hodnoty hloubky propustnosti ve vakuu. Získané hodnoty posloužily pro vzájemné porovnání kvality krycí vrstvy jednotlivých krystalizujících hmot v tabulkách 29, 30 a grafech na obrázcích 29, 30.

Z výsledků je patrné, že i po osmnácti měsících působení agresivních činitelů byl těsnící efekt stále dostačující a nedocházelo k výraznému narušení povrchové vrstvy.

10.2.4 Nasákavost podle ČSN 73 1357-2

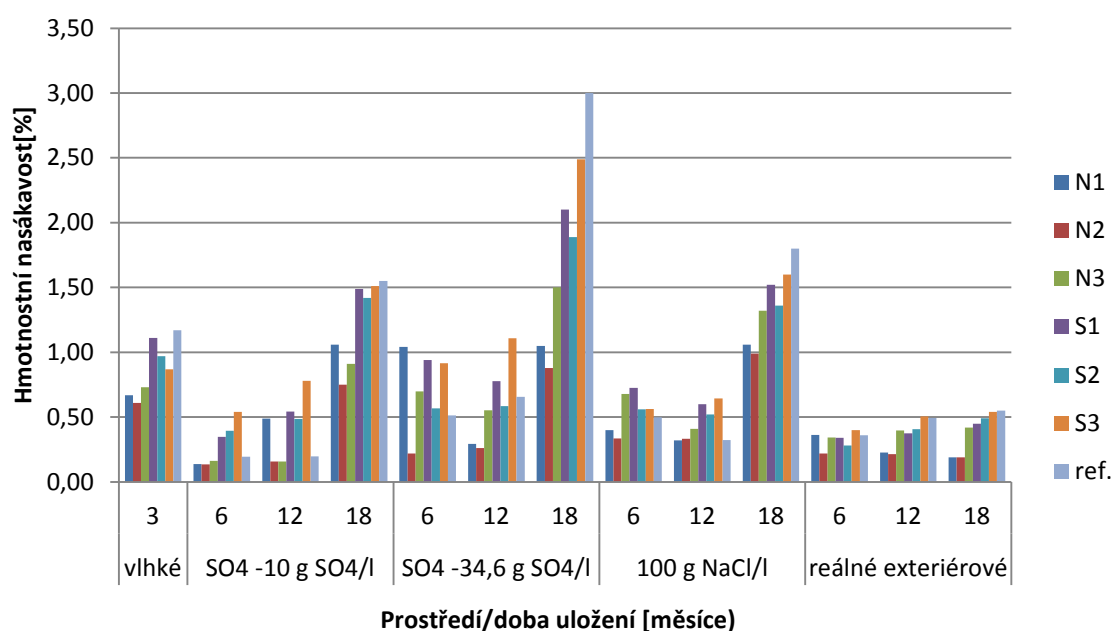
Průměrná nasákavost podkladního neošetřeného betonu po 28 dnech, byla 2,87 %. Vzhledem k aplikaci krystalizujících izolací na betonový povrch a následné prorůstání krystalů do struktury betonu z aplikované strany, nebylo možno spolehlivě analyzovat hloubku prokrystalizování jednotlivých těles. Samotné krystalizující hydroizolace brání pronikání vlhkosti do betonových konstrukcí především na pomezí povrch-několik centimetrů pod povrchem. Z tohoto důvodu byl postup zkoušky modifikován.

Pro zjištění odolnosti proti pronikání vlhkosti právě touto vrstvou, byly všechny strany s výjimkou lícni (testované), opatřené hydroizolačním materiálem, natřeny jednosložkovým epoxidovým nátěrem. Ten byl aplikován ve snaze omezit možné pronikání vlhkosti pouze testovanou vrstvou s krystalizující hydroizolací.

V tabulkách 34, 35 a grafech na obrázcích 33, 34, jsou vyhodnoceny výsledky nasákavosti pro jednotlivé materiály a prostředí, v definovaných intervalech uložení.

Tabulka 34: Hmotnostní přírůstky v kapalných prostředích

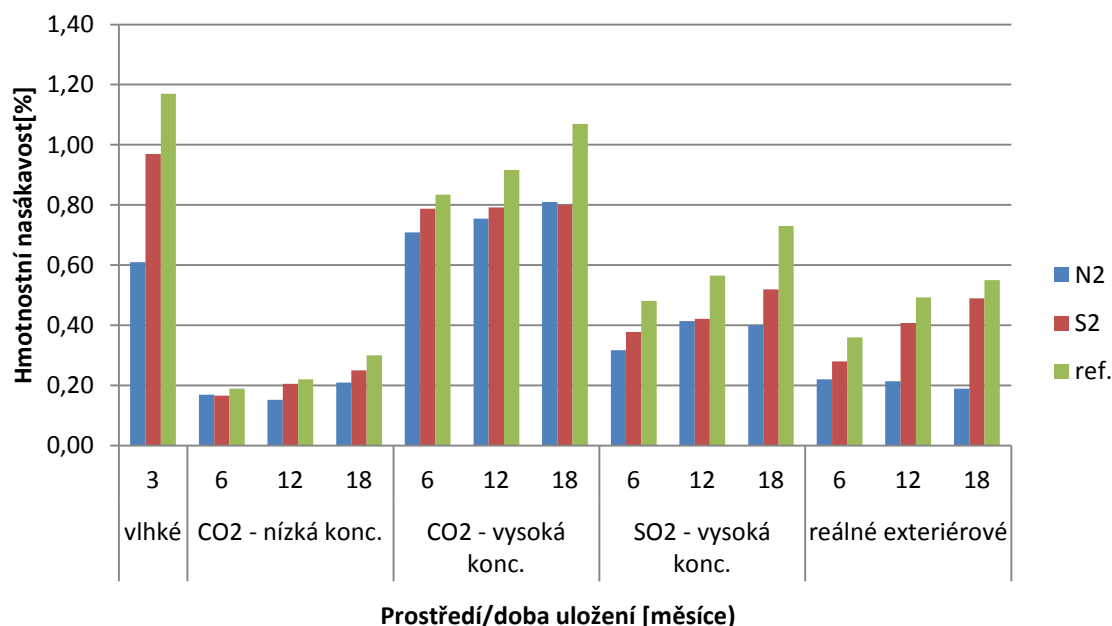
	Hmotnostní přírůstek v prostředí [%]												
vzorek	vlhké	SO_4 -10 g SO_4 /l			SO_4 -34,6 g SO_4 /l			100 g NaCl/l			reálné exteriérové		
uložení[m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1	0,67	0,14	0,49	1,06	1,04	0,29	1,05	0,40	0,32	1,06	0,36	0,23	0,19
N2	0,61	0,14	0,16	0,75	0,22	0,26	0,88	0,34	0,33	0,99	0,22	0,21	0,19
N3	0,73	0,16	0,16	0,91	0,70	0,55	1,50	0,68	0,41	1,32	0,34	0,40	0,42
S1	1,11	0,35	0,54	1,49	0,94	0,78	2,10	0,73	0,60	1,52	0,34	0,38	0,45
S2	0,97	0,39	0,49	1,42	0,57	0,59	1,89	0,56	0,52	1,36	0,28	0,41	0,49
S3	0,87	0,54	0,78	1,51	0,92	1,11	2,48	0,56	0,64	1,60	0,40	0,51	0,54
ref.	1,17	0,19	0,20	1,55	0,51	0,66	3,00	0,50	0,32	1,80	0,36	0,49	0,55



Obrázek 33: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v kapalných prostředích

Tabulka 35: Hmotnostní přírůstky v plynných prostředích

	Hmotnostní přírůstek v prostředí [%]												
<i>prostředí</i>	<i>vlhké</i>	<i>CO₂ –nízká konc.</i>			<i>CO₂ –vysoká konc.</i>			<i>SO₂ –vysoká konc.</i>			<i>reálné exteriérové</i>		
<i>uložení[m]</i>	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N2	0,61	0,17	0,15	0,21	0,71	0,75	0,81	0,32	0,41	0,40	0,22	0,21	0,19
S2	0,97	0,17	0,21	0,25	0,79	0,79	0,80	0,38	0,42	0,52	0,28	0,41	0,49
ref.	1,17	0,19	0,22	0,30	0,83	0,92	1,07	0,48	0,57	0,73	0,36	0,49	0,55



Obrázek 34: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v plynných prostředích

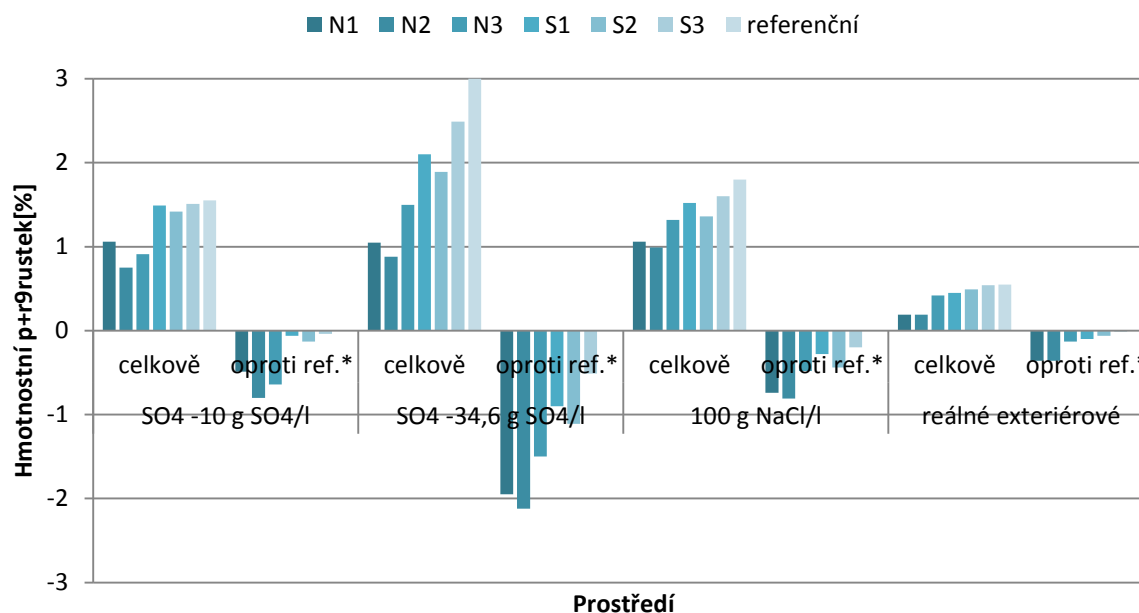
Při analyzování výsledků je opět patrné, že největší rozdíl mezi referenční recepturou bez ošetření a vzorky s aplikovanými krystalizujícími hydroizolacemi, se projevil po osmnácti měsících působení agresivních činitelů. Nejvyšší hmotnostní přírůstek referenčního betonu 3 %, nastal po osmnácti měsících v prostředí SO_4 s obsahem 34,6 g SO_4/l . Celkově nejvyšších hmotnostních přírůstků dosáhla ve stejném prostředí z nátěrových receptur, N3, 1,50 %, a ze stěrkových receptur, stěrka S3, 2,48 %. Naopak nejnižší přírůstky hmotnosti, byly naměřeny mezi nátěrovými recepturami u N1, N2 0,14 %, po šesti měsících v prostředí SO_4 s obsahem 10g SO_4/l . U stěrkových receptur to byla S2, 0,17 % po šesti měsících v prostředí vysokou koncentrací SO_2 iontů.

Stejně, jako pro analýzu kapilární vztlínivosti byla vyhodnocena změna nasákavosti mezi uloženími ve vlhkém prostředí (sekce 10.1.2), a po osmnácti měsících v korozních prostředích. Na základě dosažených výsledků, byly vyhodnoceny jednotlivé receptury celkovou sumarizací hmotnostních přírůstků, včetně rozdílů oproti neošetřenému (referenčnímu) betonu. Výsledky jsou vyhodnoceny v následujících tabulkách 36,37 a grafech na obrázcích 35, 36.

Tabulka 36: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v kapalných prostředích

prostředí	Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v prostředí [%]							
	SO ₄ -10 g SO ₄ /l		SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové	
	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*
N1	1,06	-0,49	1,05	-1,95	1,06	-0,74	0,19	-0,36
N2	0,75	-0,80	0,88	-2,12	0,99	-0,81	0,19	-0,36
N3	0,91	-0,64	1,50	-1,50	1,32	-0,48	0,42	-0,13
S1	1,49	-0,06	2,10	-0,90	1,52	-0,28	0,45	-0,10
S2	1,42	-0,13	1,89	-1,11	1,36	-0,44	0,49	-0,06
S3	1,51	-0,04	2,48	-0,52	1,60	-0,20	0,54	-0,01
referenční	1,55	0,00	3,00	0,00	1,80	0,00	0,55	0,00

*[-] snížení hmotnostního přírůstku o [hm. %] oproti ref. betonu, [+] zvýšení hmotnostního přírůstku o [hm. %] oproti ref. betonu

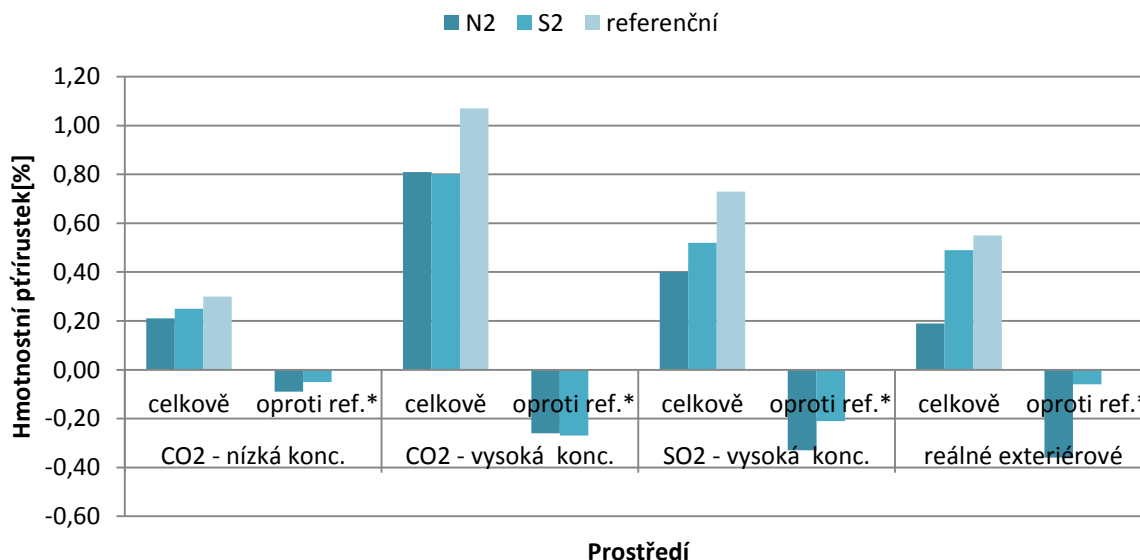


Obrázek 35: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v kapalných prostředích

Tabulka 37: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v plynných prostředích

prostředí	Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v prostředí [%]							
	CO ₂ -nízká konc.		CO ₂ -vysoká konc.		SO ₂ -vysoká konc.		reálné exteriérové	
	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*
N2	0,21	-0,09	0,81	-0,26	0,40	-0,33	0,19	-0,36
S2	0,25	-0,05	0,80	-0,27	0,52	-0,21	0,49	-0,06
referenční	0,30	0,00	1,07	0,00	0,73	0,00	0,55	0,00

*[-] snížení hmotnostního přírůstku o [hm. %] oproti ref. betonu, [+] zvýšení hmotnostního přírůstku o [hm. %] oproti ref. betonu



Obrázek 36: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v plynných prostředích

Na základě vyhodnocení výsledků testování navržených receptur vyplývá, že všechny navržené stěrkové a nátěrové materiály zvyšují odolnost betonových konstrukcí proti nasákavosti.

Pro nátěrové receptury N1-N3, se přírůstek hmotnosti po osmnácti měsících pohyboval od 0,19 % (N1,N2 v reálném exteriérovém prostředí) do 1,50 % (N3 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l). Stěrkové receptury S1-S3, dosahovaly hmotnostních přírůstků od 0,25 % (S2 v prostředí CO₂ 10%) po maximální přírůstek 2,48 % (S3 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l). Neošetřený beton vykazoval vždy ve všech prostředí celkově vyšší přírůstek hmotnosti než nátěry a stěrky. Přírůstky se pohybovaly od 0,3 % (v prostředí CO₂ 10 %) do 3 % (v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l).

Pro vyhodnocení navržených receptur byly v tabulkách 36, 37 grafech na obrázcích 35, 36 porovnány hmotnostní přírůstky jednotlivých receptur s neošetřeným betonem v daném korozním prostředí, po osmnácti měsících působení. Z výsledků vyplývá, že nátěry mají od 0,09 % (N1 v prostředí CO₂ 10 %) do 2,12 % (N2 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l), nižší hmotnostní přírůstky než referenční beton v daném prostředí. Stěrky vykazují od 0,01 % (S3 v reálném exteriérovém prostředí) do 1,11 % (S2 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l) nižší přírůstky hmotnosti než neošetřený beton.

Pokud porovnáme průměrné snížení hmotnostní nasákavosti oproti referenčnímu betonu napříč spektrem korozních prostředí, nejvyššího průměrného snížení přírůstku hmotnosti oproti referenčnímu betonu, dosahoval z nátěrů N2 (1,06 %) a ze stěrkových receptur S2 (0,43 %).

10.2.5 Kapilární vztlínavost

Pro tuto zkoušku byly využity normy ČSN 73 1357-2 a ČSN 731316 s upravenou metodikou uvedenou v sekci 8.1.12. Na obrázku 37, jsou zdokumentována zkušební tělesa pro zkoušku kapilární vztlínavosti.

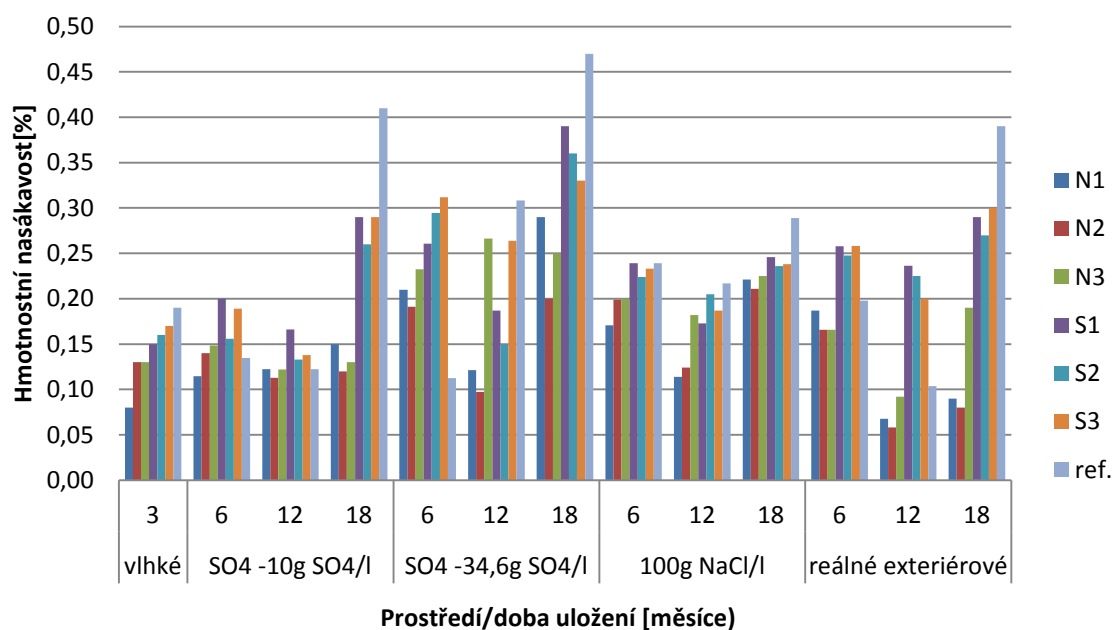


Obrázek 37: Uložení zkušebních těles pro zkoušku kapilární vztlínivosti

V tabulkách 38, 39, a grafech na obrázcích 38, 39, jsou sumarizovány dosažené výsledky hmotnostních přírůstků vlivem kapilární vztlínivosti v jednotlivých intervalech měření. Výsledné hodnoty betonu neošetřeného krystalizující hmotou (referenční), spolu s výsledky uložení navržených receptur v normovém prostředí, dle sekce 10.1.2 po dobu třech měsíců, slouží pro srovnání vlastností navržených receptur.

Tabulka 38: Hmotnostní přírůstky v kapalných prostředích

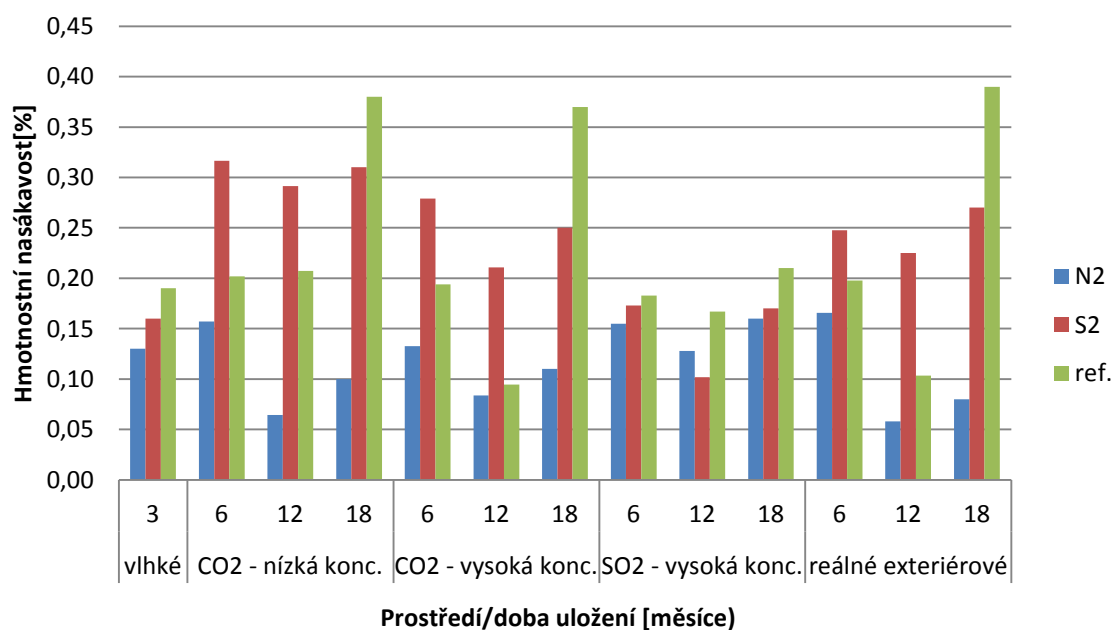
Hmotnostní přírůstek kapilární vzlínavosti v prostředí [%]													
prostředí uložení [m]	vlhké	SO ₄ -10 g SO ₄ /l			SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l			100 g NaCl/l			reálné exteriérové		
	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1	0,08	0,11	0,12	0,15	0,21	0,12	0,29	0,17	0,11	0,22	0,19	0,07	0,09
N2	0,14	0,14	0,11	0,12	0,19	0,10	0,20	0,20	0,12	0,21	0,17	0,06	0,08
N3	0,14	0,15	0,12	0,13	0,23	0,27	0,25	0,20	0,18	0,23	0,17	0,09	0,19
S1	0,16	0,20	0,17	0,29	0,26	0,19	0,39	0,24	0,17	0,25	0,26	0,24	0,29
S2	0,16	0,16	0,13	0,26	0,29	0,15	0,36	0,22	0,21	0,24	0,25	0,23	0,27
S3	0,17	0,19	0,14	0,29	0,31	0,26	0,33	0,23	0,19	0,24	0,26	0,20	0,30
referenční	0,19	0,13	0,12	0,41	0,11	0,31	0,47	0,24	0,22	0,29	0,20	0,10	0,39



Obrázek 38: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v kapalných prostředích

Tabulka 39: Hmotnostní přírůstky v plynných prostředích

	Hmotnostní přírůstek kapilární vztlávanosti v prostředí [%]													
vzorek	vlhké	CO ₂ – nízká konc.				CO ₂ – vysoká konc.			SO ₂ – vysoká konc.			reálné exteriérové		
uložení [m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	
N2	0,14	0,16	0,06	0,10	0,13	0,08	0,11	0,16	0,13	0,16	0,17	0,06	0,08	
S2	0,16	0,32	0,29	0,31	0,28	0,21	0,25	0,17	0,10	0,17	0,25	0,23	0,27	
referenční	0,19	0,20	0,21	0,38	0,19	0,09	0,37	0,18	0,17	0,21	0,20	0,10	0,39	



Obrázek 39: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v plynných prostředích

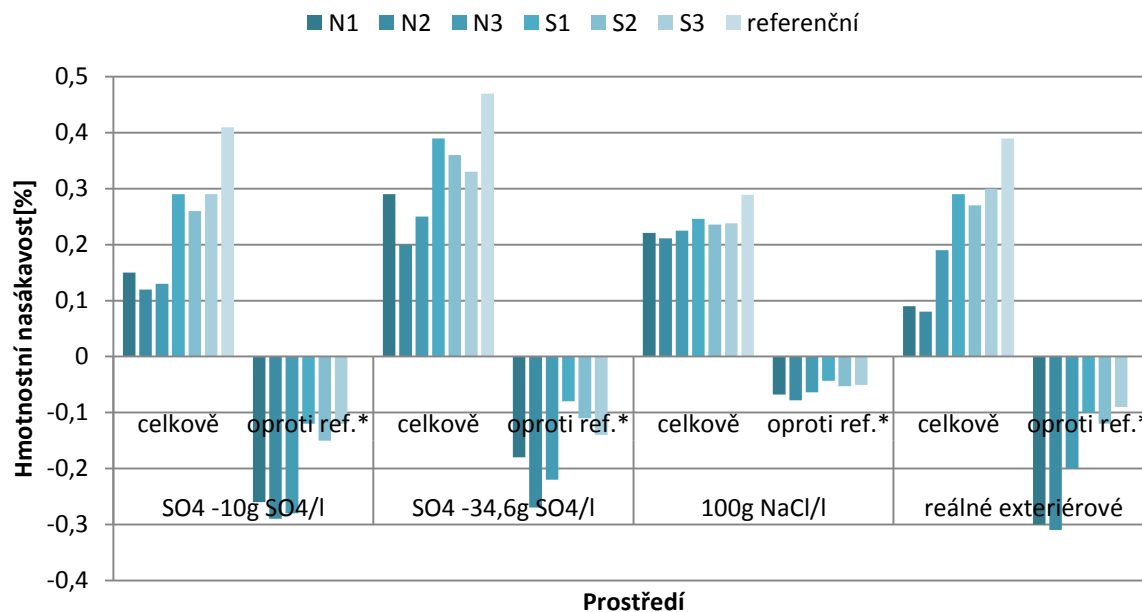
Z dosažených výsledků vyplývá, že největší rozdíl mezi referenční recepturou bez ošetření, a vzorky s aplikovanými krystalizujícími hydroizolacemi se projevil po 18 měsících působení agresivních činitelů. Nejvyšší hmotnostní přírůstek referenčního betonu 0,47 %, nastal po osmnácti měsících v prostředí SO_4 s obsahem 34,6g SO_4 /l. Celkově nejvyšších hmotnostních přírůstků dosáhly ve stejném prostředí i nátěr N1, 0,29 %, a stěrka S1 0,39 %. Nejnižší přírůstky hmotnosti byly naměřeny u nátěrů, N2 0,06 % po dvanácti měsících v reálném exteriérovém prostředí, a stěrky S2, 0,13 %, ve stejném období v prostředí SO_4 s 34,6g SO_4 /l.

Vzhledem k nutnosti ochrany betonových konstrukcí proti vlhkosti v co nejdelším časovém rozmezí, byly na základě dosažených výsledků, vyhodnoceny jednotlivé receptury celkovou sumarizací hmotnostních přírůstků, včetně rozdílu oproti neošetřenému betonu, po 18 měsících působení agresivních médií. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách 40, 41 a grafech na obrázcích 40, 41.

Tabulka 40: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v kapalných prostředích

vzorek	Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v prostředí [%]							
	SO_4 -10 g SO_4 /l		SO_4 -34,6 g SO_4 /l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové	
	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*
N1	0,15	-0,26	0,29	-0,18	0,22	-0,07	0,09	-0,30
N2	0,12	-0,29	0,20	-0,27	0,21	-0,08	0,08	-0,31
N3	0,13	-0,28	0,25	-0,22	0,23	-0,06	0,19	-0,20
S1	0,29	-0,12	0,39	-0,08	0,25	-0,04	0,29	-0,10
S2	0,26	-0,15	0,36	-0,11	0,24	-0,05	0,27	-0,12
S3	0,29	-0,12	0,33	-0,14	0,24	-0,05	0,30	-0,09
referenční	0,41	0,00	0,47	0,00	0,29	0,00	0,39	0,00

*[-] snížení kapilární vzlinavosti o % oproti ref. betonu, [+] zvýšení kapilární vzlinavosti o % oproti ref. betonu

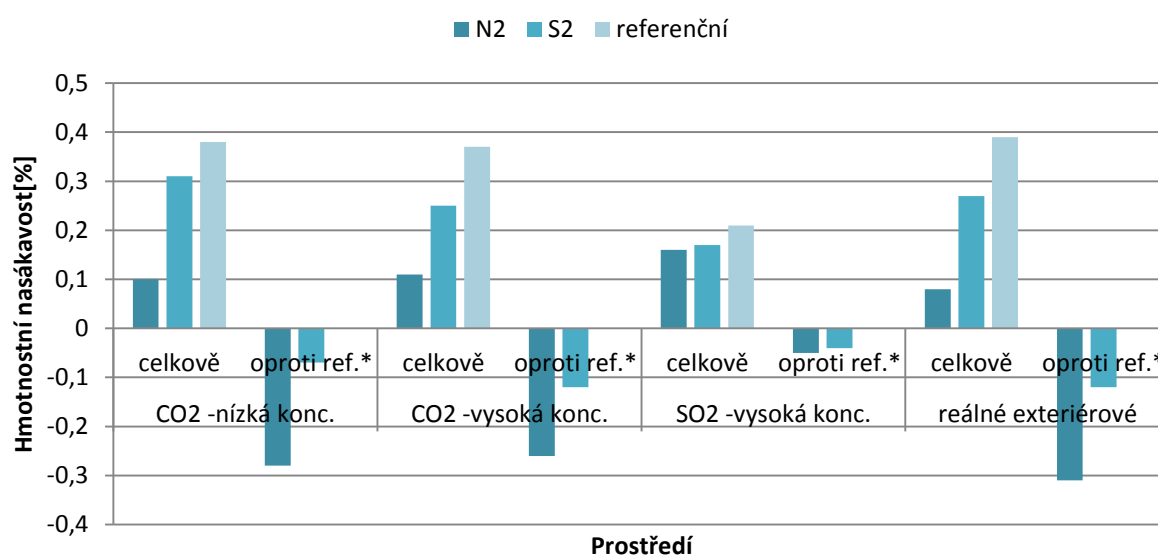


Obrázek 40: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v kapalných prostředích

Tabulka 41: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v plynných prostředích

vzorek	Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v prostředí [%]							
	CO ₂ -10%		CO ₂ -100%		SO ₂ -100%		reálné exteriérové	
	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*	celkově	oproti ref.*
N2	0,10	-0,28	0,11	-0,26	0,16	-0,05	0,08	-0,31
S2	0,31	-0,07	0,25	-0,12	0,17	-0,04	0,27	-0,12
referenční	0,38	0,00	0,37	0,00	0,21	0,00	0,39	0,00

*[-] snížení kapilární vztlakovosti o % oproti ref. betonu, [+] zvýšení kapilární vztlakovosti o % oproti ref. betonu



Obrázek 41: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v plynných prostředích

Na základě vyhodnocení výsledků testování navržených receptur vyplývá, že všechny navržené stěrkové a nátěrové materiály zvyšují odolnost betonových konstrukcí proti kapilární vztlakovosti. Pro nátěrové receptury N1-N3, se přírůstek hmotnosti po 18 měsících pohyboval od 0,08 % (N2 v reálném exteriérovém prostředí) po 0,29 % (N1 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l). Stěrkové receptury dosahovaly hmotnostních přírůstků od 0,17 % (S2 v prostředí s vysokou koncentrací SO₂), po maximální přírůstek 0,39 % (S1 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l). Neošetřený beton vykazoval vždy celkově vyšší přírůstek hmotnosti od 0,21 % (v prostředí s vysokou koncentrací SO₂) do 0,47 % (v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l).

Pro vyhodnocení navržených receptur, byly v tabulkách 40, 41 a grafech 40, 41 porovnány hmotnostní přírůstky jednotlivých receptur s neošetřeným betonem v daném korozním prostředí. Z výsledků vyplývá, že nátěry mají od 0,06 % (N3 v prostředí s koncentrací 100 g NaCl/l) až 0,31 % (N2 v reálném exteriérovém prostředí), nižší hmotnostní přírůstky než referenční beton v příslušném prostředí. Stěrky vykazují 0,04 % (S2 v prostředí s vysokou koncentrací SO₂, a S1 v 100 g NaCl/l) až 0,15 % (S2 v prostředí s 10 g SO₄/l) nižší přírůtky hmotnosti, než neošetřený beton.

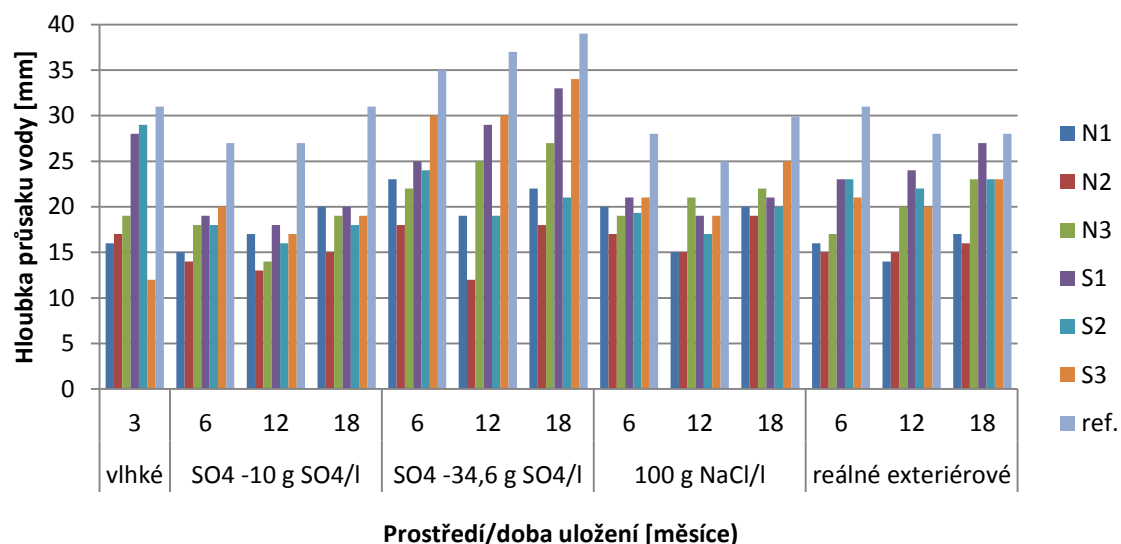
Průměrně nejvyššího snížení hmotnostní nasákavosti oproti referenčnímu betonu dosahoval při sumarizaci všech prostředí nátěr N2 (0,26 %) a ze stěrkových receptur S2 (0,12 %).

10.2.6 Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou podle ČSN EN 12390-8

V následujících tabulkách 42, 43 a grafech na obrázcích 42 43, jsou vyhodnoceny výsledky hloubky průsaku tlakovou vodou pro jednotlivé materiály a prostředí, v daných termínech zkoušení.

Tabulka 42: Hloubka průsaku tlakovou vodou v kapalných prostředích

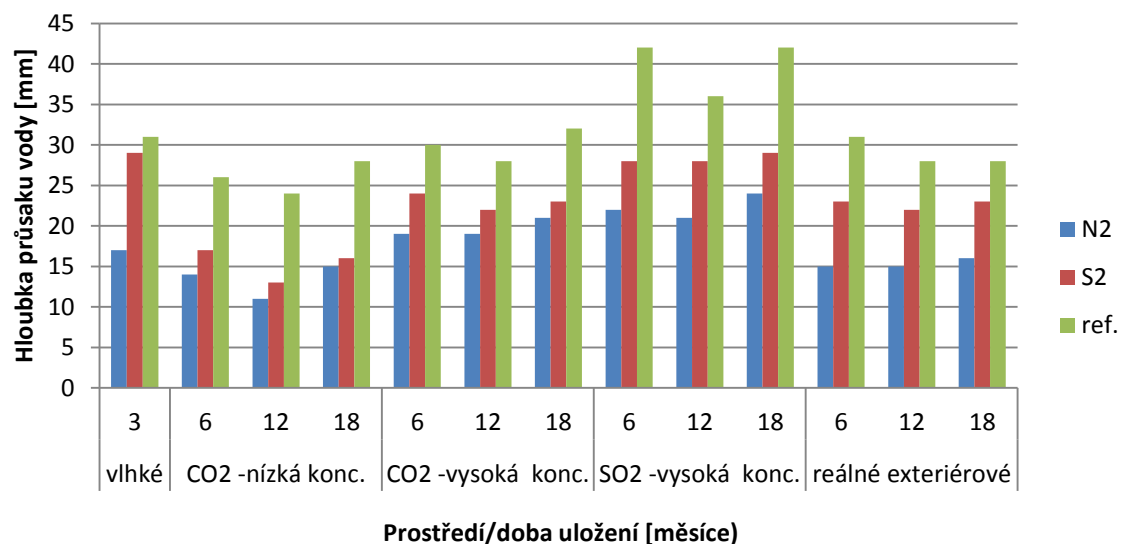
Hloubka průsaku tlakovou vodou v prostředí [mm]													
prostředí	vlhké			SO ₄ -10 g SO ₄ /l			SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové		
uložení [m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1	16	15	17	20	23	19	22	20	15	20	16	14	17
N2	17	14	13	15	18	12	18	17	15	19	15	15	16
N3	19	18	14	19	22	25	27	19	21	22	17	20	23
S1	28	19	18	20	25	29	33	21	19	21	23	24	27
S2	29	18	16	18	24	19	21	19	17	20	23	22	23
S3	12	20	17	19	30	30	34	21	19	25	21	20	23
referenční	31	27	27	31	35	37	39	28	25	30	31	28	28



Obrázek 42: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou v kapalných prostředích

Tabulka 43: Hloubka průsaku tlakovou vodou v plynných prostředích

	Hloubka průsaku tlakovou vodou v prostředí [mm]													
vzorek	vlhké	CO ₂ -nízká konc.				CO ₂ –vysoká konc.			SO ₂ –vysoká konc.			reálné exteriérové		
uložení[m]	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	
N2	17	14	11	15	19	19	21	22	21	24	15	15	16	
S2	29	17	13	16	24	22	23	28	28	29	23	22	23	
referenční	31	26	24	28	30	28	32	42	36	42	31	28	28	



Obrázek 43: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou v plynných prostředích

Nejvyšší hloubka průsaku vody byla naměřena 42 mm, u referenčního betonu po osmnácti měsících uložení v prostředí s vysokou koncentrací SO₂ iontů. V tomto prostředí dosáhla i celkově nejvyššího průsaku tlakové vody z nátěrů receptura N3 (27 mm), a ze stěrkových receptur, S3 (34 mm).

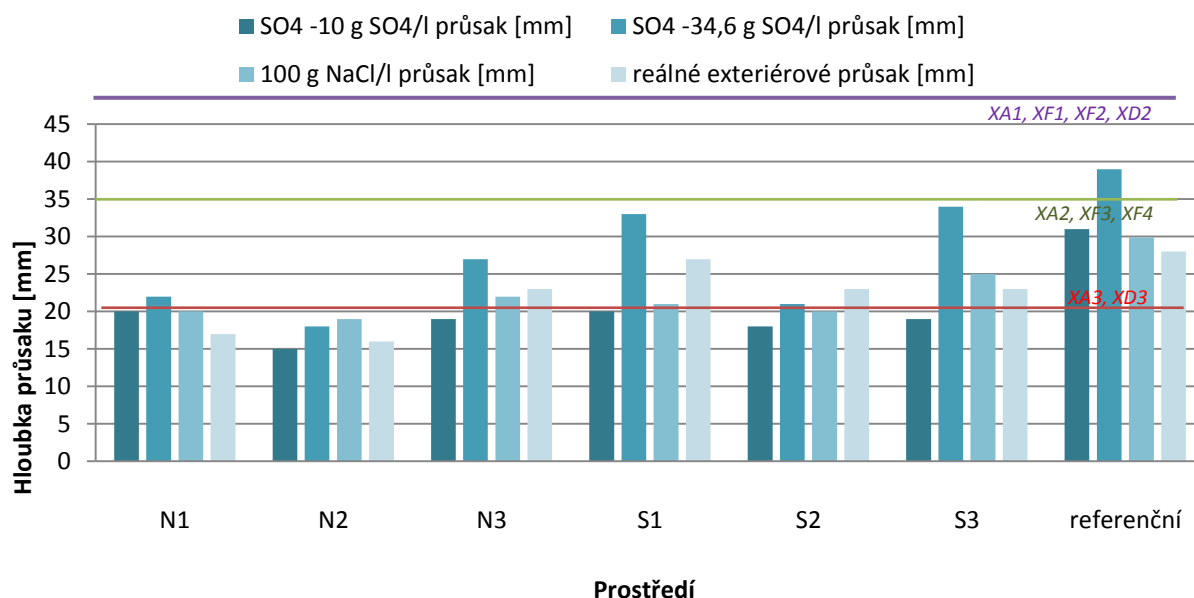
Nejnižší průsaky vody byly naměřeny mezi nátěrovými recepturami u N2 (11 mm) po dvanácti měsících v prostředí s nízkou koncentrací CO₂. Nejvyšší, 13 mm, byl u stěrkových receptur naměřen pro S2 ve stejném prostředí CO₂, po 12 měsících uložení.

V následujících tabulkách 44, 45 a grafech 44, 45, byla vyhodnocena hloubka průsaku tlakovou vodou jednotlivých receptur po osmnácti měsících v korozních uloženích, s procentuálním vyhodnocením snížení průsaku tlakovou vodou oproti neošetřenému referenčnímu betonu. V grafech 44, 45, byly rovněž vyhodnoceny maximální průsaky pro stupně vlivu prostředí dle CSN EN 206-1/Z3.

Tabulka 44: Vyhodnocení hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v kapalných prostředích

prostředí	Průsak tlakovou vodou po 18 měsících v prostředí [mm/%]							
	SO ₄ -10 g SO ₄ /l		SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové	
	průsak [mm]	oproti ref.*[%]	průsak [mm]	oproti ref.*[%]	průsak [mm]	oproti ref.*[%]	průsak [mm]	oproti ref.*[%]
N1	20	-35	22	-44	20	-33	17	-39
N2	15	-52	18	-54	19	-36	16	-43
N3	19	-39	27	-31	22	-26	23	-18
S1	20	-35	33	-15	21	-30	27	-4
S2	18	-42	21	-46	20	-33	23	-18
S3	19	-39	34	-13	25	-16	23	-18
referenční	31	0	39	0	30	0	28	0

*[-] snížený průsak oproti referenčnímu betonu o [%], [+], vyšší průsak oproti referenčnímu betonu o [%]

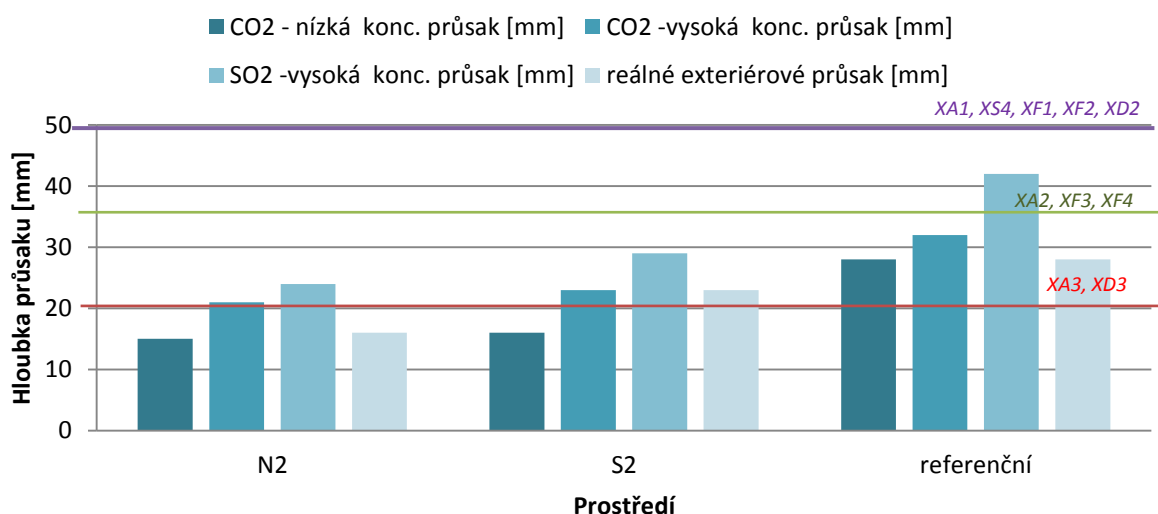


Obrázek 44: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v kapalných prostředích

Tabulka 45: Vyhodnocení hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v plynných prostředích

prostředí	Průsak tlakovou vodou po 18 měsících v prostředí							
	CO ₂ - nízká konc.		CO ₂ – vysoká konc.		SO ₂ – vysoká konc.		reálné exteriérové	
	průsak [mm]	oproti ref. *[%]	průsak [mm]	oproti ref. *[%]	průsak [mm]	oproti ref. *[%]	průsak [mm]	oproti ref. *[%]
N2	15	-46	21	-34	24	-43	16	-43
S2	16	-43	23	-28	29	-31	23	-18
referenční	28	0	32	0	42	0	28	0

*[-] snížený průsak oproti referenčnímu betonu o [%], [+] vyšší průsak oproti referenčnímu betonu o [%]



Obrázek 45: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v plynných prostředích

Zkouška stanovení průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8, díky působení zvýšeného tlaku vody na testované vzorky přináší jasnější a průkaznější možnost porovnání vlastností jednotlivých navržených receptur.

Na základě dosažených výsledků testování navržených receptur vyplývá, že všechny navržené stěrkové a nátěrové materiály zvyšují odolnost betonových konstrukcí proti průsaku tlakové vody. V tabulkách 44, 45 a grafech 44, 45 jsou porovnány hmotnostní přírůstky jednotlivých receptur s neošetřeným betonem v daném korozním prostředí, po osmnácti měsících působení.

Pro nátěrové receptury N1-N3, se průsak vody po osmnácti měsících působení prostředí, pohyboval od 15 mm (N2 v prostředí s koncentrací 10 g SO₄/l a v prostředí s nízkou koncentrací CO₂) do 27 mm (N3 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l). Stěrkové receptury dosahovaly od 16 mm (S2 v prostředí s nízkou koncentrací CO₂), po maximum 34 mm (S3 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l).

Stejně tak, jako u předchozích měření, neošetřený beton vždy ve všech prostředích vykazoval celkově vyšší hloubku průsaku tlakovou vodou, než receptury nátěrů a stěr. Průsaky vzorků se pohybovaly od 28 mm (v prostředí s nízkou koncentrací CO₂) do 42 mm (v prostředí s vysokou koncentrací SO₂).

Nátěry zvyšují odolnost proti pronikání vody v porovnání s referenčním betonem v daném prostředí o 18 % (N3 v reálném exteriérovém prostředí), až 54 % (N2 v prostředí s 34,6 g SO₄/l). Stěrky vykazují zlepšení odolnosti od 4 % (S1 v reálném exteriérovém prostředí) do 46 % (S2 v prostředí s koncentrací 34,6 g SO₄/l), oproti průsaku vody neošetřeného referenčního vzorku.

Nejvyššího průměrného snížení průsaku tlakové vody oproti referenčnímu betonu, napříč spektrem korozních prostředí, dosahoval z nátěrů N2 (49 %) a ze stěrkových receptur S2 (35 %). Vzorky byly také posuzovány dle mezních návrhových hodnot pro složení a vlastnosti betonu dle ČSN EN 206-1/Z3. Všechny betonové vzorky s aplikovanými recepturami po 18 měsících uložení měly hloubku průsaku nižší, než 50 mm, odpovídající prostředí XA1, XS4, XF1, XF2, XD2.

Vzorky N2 konkrétně pro prostředí XD3, koroze způsobené chloridy jinými než z moře, i chemicky agresivnímu prostředí XA3, odolali s výjimkou prostředí o vysoké koncentrací CO₂ a SO₂ iontů, stanovenému průsaku 20 mm.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že z hlediska vodonepropustnosti, jsou betony s krystalizující příměsí vhodným materiálem pro konstrukce zatížené tlakovou vodou. Kvalita těchto konstrukcí ale samozřejmě závisí zejména na provedení pracovních a dilatačních spár a na pečlivém ukládání betonové směsi do bednění s vyloučením vzniku kaveren a jiných diskontinuit.

10.3 Ověření vlastností navržených receptur - fyzikální a mechanické vlastnosti

10.3.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu podle ČSN EN 12390-7

Vzhledem k rozdílné tloušťce aplikovaných nátěrů a stěrek při nanášení na betonový podklad spolu s nestejnou hloubkou prokrystalizování, nepřinesly hodnoty objemových hmotností relevantní výsledky, pro vzájemnou komparaci receptur. Objemové hmotnosti podkladního (referenčního) betonu byly:

- nasáknutého 2230 [kg/m³],
- vysušeného 2180 [kg/m³].

10.3.2 Odolnost proti karbonataci podle ČSN EN 13295

Při vyhodnocení této zkoušky nebylo možné změřit hloubku karbonatace u všech zkušebních těles. Tento fakt byl způsoben odoláním jak referenčního betonu, tak i bloků ošetřených navrženými hydroizolačními hmotami působení CO₂ po dobu relativně krátké expozice (56 dnů). V rámci pokračování výzkumu navržených nátěrů a stěrek bylo v souladu s dosaženými výsledky, a s ohledem na zvolenou metodiku přistoupeno k testování navržených hydroizolačních nátěrů a stěrek po delší expozici ve zvolených agresivních prostředí. Tělesa byla uložena do prostředí dle tabulky 27 uvedené v části 10.2, s intervaly měření po vyjmutí z vlhkého prostředí (3 měsíce), a dále 6, 12 a 18 měsíců tak, aby mohlo být dosaženo měřitelných výsledků.

U těles ošetřených navrženými hydroizolačními nátěry N1-N3, a stěrkami S1-S3 uložených v prostředí dle tabulky 27, a zkoušených po šesti a dvanácti měsících od uložení, nebyla míra karbonatace u žádných vzorků viditelně prokázána.

U analýzy karbonatace po uplynutí osmnácti měsíců v uložení, se situace u vzorků ošetřených navrženými nátěry i stěrkami ve většině případů opakovala.

U ojedinělých vzorků nátěrů N1-N3 v prostředí vysoké koncentrace SO_2 iontů s plynných síranů, bylo možno pozorovat slabou změnu zabarvení fenolftaleinového indikátoru v hloubkách do cca 3 mm. Tato skutečnost mohla nastat z důvodu snížené vrstvy aplikovaného nátěru oproti stěrce, tedy i menší vrstvy chránící beton proti korozi nebo nedostatečnému prokrystalizování nátěru.

U vzorků neošetřených recepturami byl pozorován v prostředích, byla zpozorována nepatrná karbonatace a to pouze do hloubky cca několika milimetrů pod povrchem zkušebních těles ošetřených krystalizujícími hydroizolacemi.

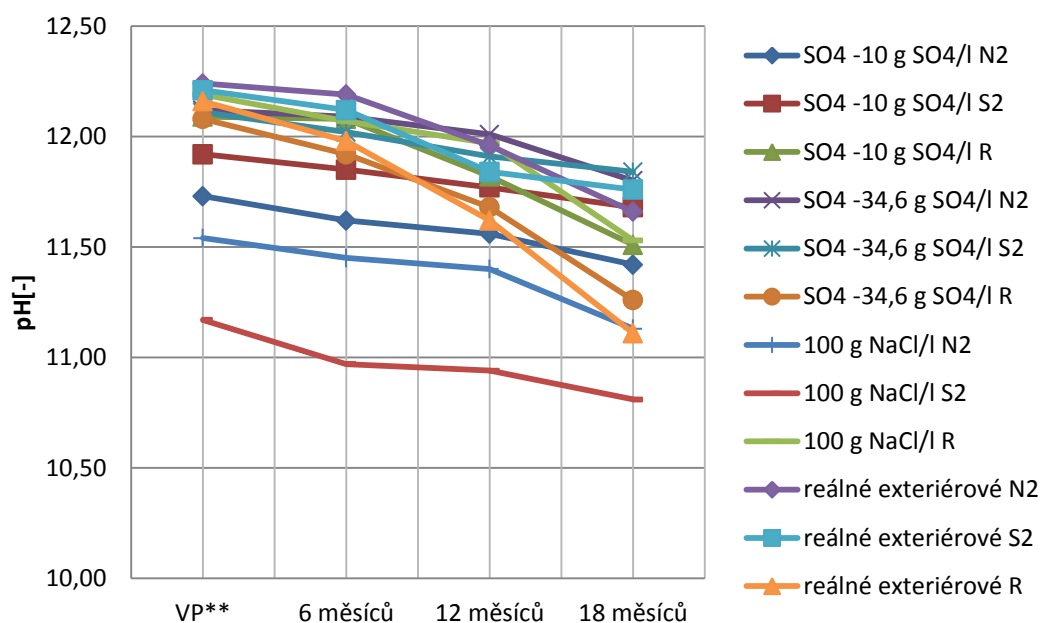
Jednotlivé vzorky, ale nešlo na základě zkoušky odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295) spolehlivě a prokazatelně vzájemně porovnat i z toho důvodu, protože ani jeden s testovaných vzorků krystalizujících hmot neprokázal snížení odolnosti proti karbonataci pro oba zkušební vzorky současně.

Vzhledem k tomu ale, že karbonatace betonu není lineární funkcí a její míra se mění v závislosti na čase a hloubce, o to více pokud je beton dodatečně chráněn krystalizující hydroizolací, je přirozený proces karbonatace u kvalitního betonu velmi pomalý. Dosažené výsledky tedy korespondují například s prací Vaysburda, Sabnise a Emmonse [109], kde se dle autorů, karbonatace zdravého betonu pohybuje v průměru okolo 0,04 in. (1 mm) za rok.

10.3.3 Stanovení pH betonu ve výluhu

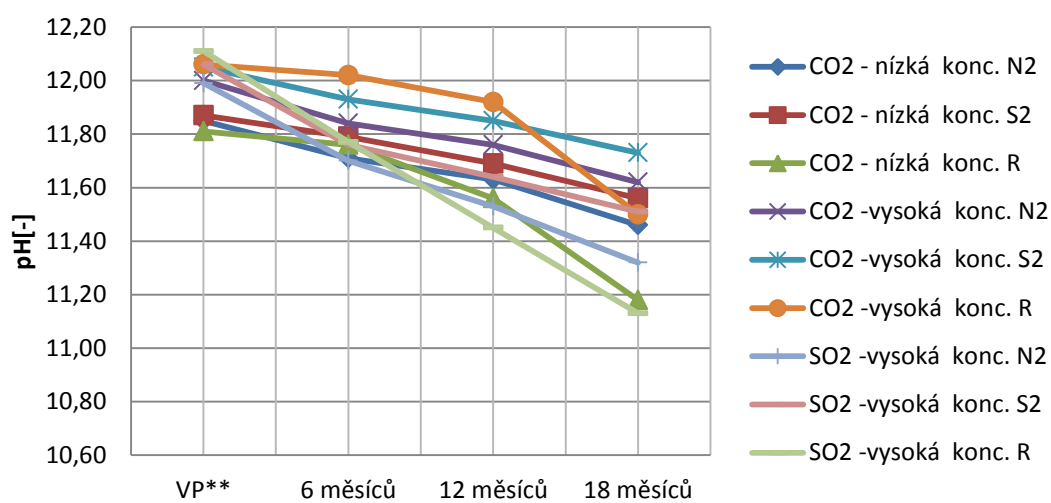
Stanovení pH proběhlo těsně před vložením vzorků do prostředí (NP), a následně ve všech intervalech uložení vzorků v korozních prostředích (6, 12, 18 měsíců). Dle metodiky uvedené v sekci 8.1.5, byla po přípravě vzorků ve filtrátu pomocí pH-metru stanovena hodnota pH, vždy na dvou vzorcích materiálu, v daném prostředí a čase. V rámci práce, jsou uvedeny v tabulce 46 a v grafech na obrázcích 46 a 47, výsledky vývoje pH vybraných receptur v čase.

pH v kapalných prostředích



Obrázek 46: Vývoj pH v kapalných prostředích

pH v plynných prostředích



Obrázek 47: Vývoj pH v čase v plynných prostředích

Tabulka 46: Hodnoty pH vzorků uložených v jednotlivých korozních prostředích

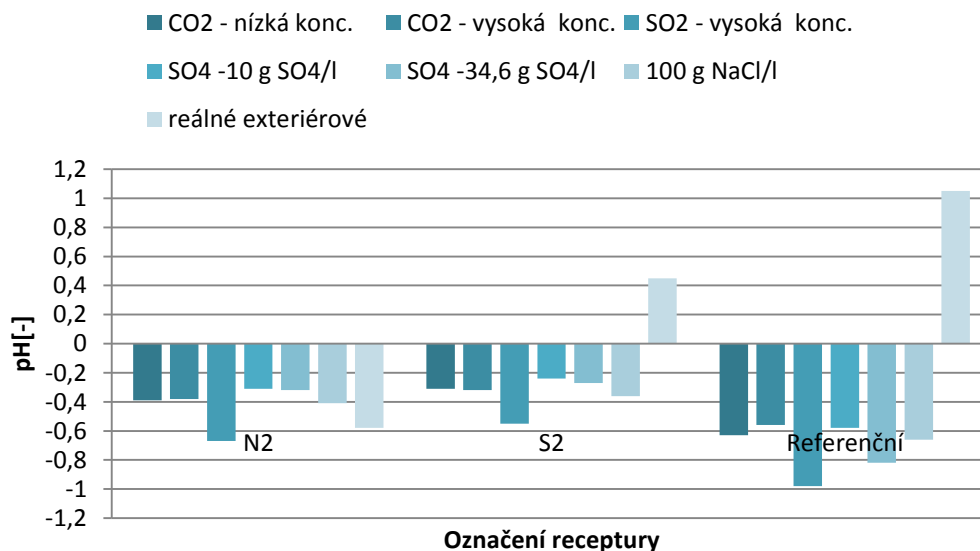
prostředí		vzorek		pH [-]				
			VP**	6 měsíců	12 měsíců	18 měsíců	rozdíl pH* [%]	rozdíl pH* [NP - 18 měsíců]
plynné	CO ₂ – nízká konc.	N2	11,85	11,71	11,63	11,46	-3,29	-0,39
		S2	11,87	11,79	11,69	11,56	-2,61	-0,31
		R	11,81	11,76	11,56	11,18	-5,33	-0,63
	CO ₂ – vysoká konc.	N2	12,00	11,84	11,76	11,62	-3,17	-0,38
		S2	12,05	11,93	11,85	11,73	-2,66	-0,32
		R	12,06	12,02	11,92	11,50	-4,64	-0,56
	SO ₂ – vysoká konc.	N2	11,99	11,70	11,53	11,32	-5,59	-0,67
		S2	12,06	11,76	11,64	11,51	-4,56	-0,55
		R	12,11	11,77	11,45	11,13	-8,09	-0,98
kapalné	SO ₄ -10 g SO ₄ /l	N2	11,73	11,62	11,56	11,42	-2,64	-0,31
		S2	11,92	11,85	11,77	11,68	-2,01	-0,24
		R	12,09	12,08	11,82	11,51	-4,80	-0,58
	SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l	N2	12,12	12,09	12,01	11,80	-2,64	-0,32
		S2	12,11	12,02	11,91	11,84	-2,23	-0,27
		R	12,08	11,92	11,68	11,26	-6,79	-0,82
	100 g NaCl/l	N2	11,54	11,45	11,40	11,13	-3,55	-0,41
		S2	11,17	10,97	10,94	10,81	-3,22	-0,36
		R	12,19	12,07	11,97	11,53	-5,41	-0,66
reálné exteriérové		N2	12,24	12,19	11,96	11,66	-4,74	-0,58
		S2	12,21	12,12	11,84	11,76	-3,69	0,45
		R	12,16	11,98	11,62	11,11	-8,63	-1,05

**[-] snížení pH, [+] zvýšení pH oproti VP, **vlhké prostředí, R – referenční vzorek bez ošetření hydroizolací*

*[-] snížení pH, [+] zvýšení pH oproti VP, **vlhké prostředí, R – referenční vzorek bez ošetření hydroizolací

Z uvedených grafů a souhrnné tabulky vyplývá, že u vzorků došlo během 18 měsíců v uložení k poklesu od 0,24 do 1,05 pH. Ve všech prostředí referenční vzorky bez ošetření krystalizujícími hmotami, vždy vykazovaly větší úbytek pH než vzorky ošetřené N2 a S2. V grafu, na obrázku 48, je znázorněn pokles hodnot pH po osmnácti měsících v uložení, vztažený k počáteční hodnotě pH při uložení vzorků do prostředí. Zde je patrný vliv prostředí na beton v závislosti na typu použité dodatečné hydroizolace.

U žádných z testovaných receptur nedošlo k poklesu pH pod kritickou mez 9,6, kdy přestává být chráněna ocelová výztuž pasivací zásaditým prostředím betonu. U testovaných vzorků neklesla hodnota pH pod 10,81 pH, tedy shodně s rozdělením uvedeným v práci Matouška a Drochytka [98], lze všechny testované vzorky zařadit do první fáze karbonatace.



Obrázek 48: Sumarizace vývoje hodnoty pH betonu po 18 měsících v korozních prostředích

Nejvyšší pokles pH (1,05) v agresivních prostředích, nastal působením běžných klimatických podmínek ve venkovním uložení. Jednalo se ale o referenční recepturu, bez použití dodatečné hydroizolační vrstvy. Pokles je zřejmě způsoben vlivem plynů obsažených v atmosféře, především CO_2 , kdy dochází ke karbonataci betonu, v kombinaci se změnami teplot a vlhkosti během uložení vzorků.

Díky neaplikované dodatečné vrstvě betonu, mohlo tedy dojít ke snadnějšímu rozrušení povrchových vrstev betonu, průniku atmosférických plynů do betonu a následné rapidnější snížení pH. U reálného exteriérového uložení došlo rovněž k druhému nejvyššímu snížení pH (N2 - 0,58). K celkově nejvyššímu poklesu pH došlo u nátěru N2 v prostředí se vysokou koncentrací SO_2 (0,67).

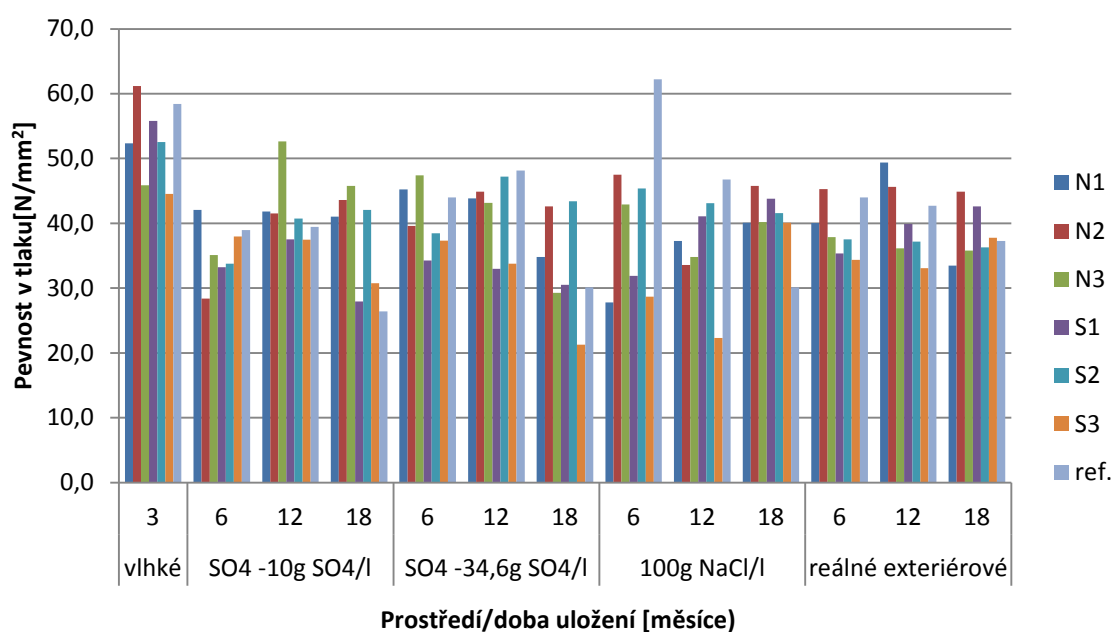
Z dosažených výsledků rovněž vyplývá, že během osmnácti měsíců v jednotlivých agresivních prostředích, se vždy pH vzorků s aplikovanými krystalizujícími hydroizolačními nátěry snížilo více než pro vzorky s aplikovanou stěrkovou hydroizolací. Tento jev může být způsoben samotnou aplikační procedurou materiálů, kdy konečná nanosená tloušťka vrstvy nátěru oproti stěrce je menší, tedy analogicky i vrstva odolávající působení agresivních činitelů.

10.3.4 Pevnost ztvrdlého betonu v tlaku podle ČSN EN 12390-3

Dosažené výsledky pevnosti v tlaku v jednotlivých prostředích a všech intervalech měření jsou sumarizovány tabulkách 47, 48 a grafech na obrázcích 49, 50.

Tabulka 47: Sumarizace pevností v tlaku v kapalných prostředích

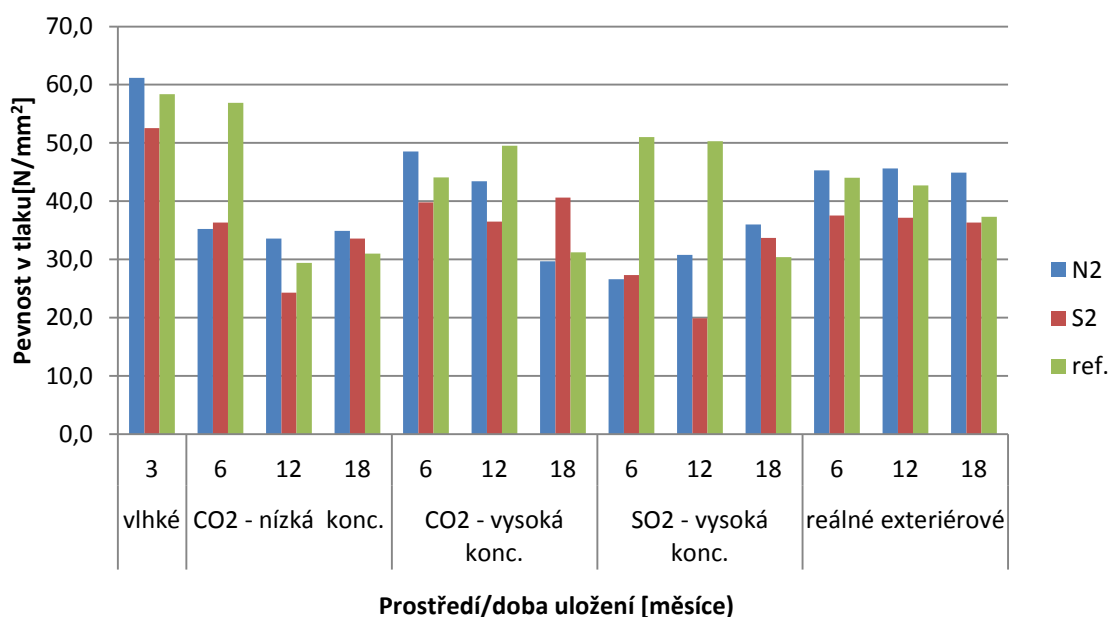
Pevnost v tlaku v prostředí [N/mm ²]														
		vlhké		SO ₄ -10 g SO ₄ /l		SO ₄ -34,6 g SO ₄ /l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové				
		3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18
N1		52,4	42,1	41,8	41,0	45,3	43,8	34,8	27,8	37,3	40,1	40,1	49,4	33,5
N2		61,2	28,4	41,5	43,6	39,6	44,9	42,6	47,5	33,6	45,8	45,3	45,6	44,9
N3		45,9	35,1	52,6	45,8	47,4	43,2	29,3	42,9	34,8	40,2	37,9	36,1	35,8
S1		55,8	33,3	37,5	27,9	34,3	33,0	30,5	31,9	41,1	43,8	35,4	39,9	42,6
S2		52,6	33,8	40,7	42,1	38,5	47,2	43,4	45,4	43,1	41,6	37,6	37,2	36,3
S3		44,6	38,0	37,5	30,8	37,4	33,8	21,3	28,7	22,3	40,1	34,4	33,1	37,8
ref.		58,4	39,0	39,5	26,4	44,0	48,2	30,1	62,2	46,8	30,1	44,0	42,7	37,3



Obrázek 49: Sumarizace pevností v tlaku po 18 měsících v kapalných prostředích

Tabulka 48: Sumarizace pevností v tlaku v plynných prostředích

	Pevnosť v tlaku v prostredí [N/mm ²]													
	vlhké	CO ₂ -nízka konc.				CO ₂ –vysoká konc.			SO ₂ –vysoká konc.			reálne exteriérové		
	3	6	12	18	6	12	18	6	12	18	6	12	18	
N2	61,2	35,2	33,6	34,9	48,6	43,4	29,7	26,6	30,8	36,0	45,3	45,6	44,9	
S2	52,6	36,3	24,3	33,6	39,8	36,5	40,6	27,3	19,9	33,7	37,6	37,2	36,3	
ref.	58,4	56,9	29,4	31,0	44,1	49,5	31,2	51,0	50,3	30,4	44,0	42,7	37,3	



Obrázek 50: Sumarizace pevností v tlaku po 18 měsících v plynných prostředích

Vyhodnocení výsledků pevností v tlaku u jednotlivých intervalů měření neprokázalo jasnou závislost vlivu krystalizujících hydroizolačních materiálů na pevnost betonu v tlaku. Podkladní beton po 28 dnech vyzrání a uložení ve vlhkém prostředí po dobu tří měsíců dosahoval pevnosti v tlaku $58,4 \text{ N/mm}^2$. Ve srovnání s ní, u části vzorků s aplikovanou hydroizolací docházelo k dočasnému zvýšení pevnosti v tlaku po dvanácti měsících v uložení. To mohlo být způsobeno dodatečným vyplňováním pórové struktury krystaly (novotvary), z pokračujícího působení krystalizující hmoty, a také při reakci cementové matrice s korozními činiteli. U mnohých receptur, ale následně došlo po osmnácti měsících, ke snížení pevnosti v tlaku.

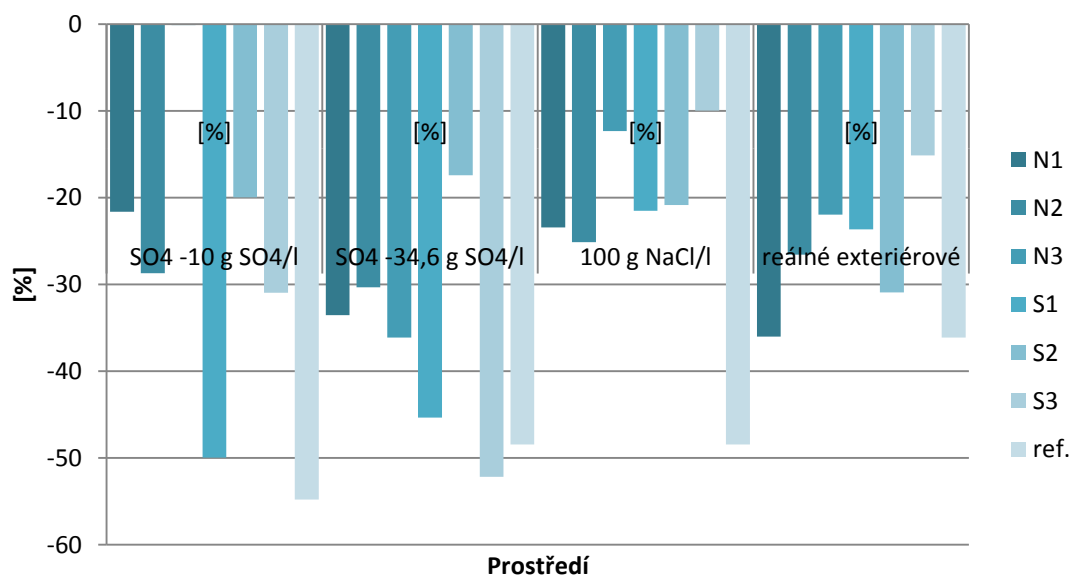
Například u stěrky S2 v prostředí s vysokým obsahem SO_4 iontů (6 měsíců - $38,5$, 12 měsíců - $47,2$ a 18 měsíců - $43,4 \text{ N/mm}^2$). Hodnoty rovněž oscilovaly například u N1 v prostředí reálné degradace (6 měsíců - $40,1$, 12 měsíců - $49,4$, 18 měsíců - $33,5 \text{ N/mm}^2$).

Celkové zhodnocení vývoje pevností v tlaku po osmnácti měsících, bylo provedeno v tabulkách 49, 50 a grafech na obrázcích 51 a 52.

Tabulka 49: Vyhodnocení pevnosti v tlaku receptur v kapalných prostředích

Vyhodnocení pevnosti v tlaku receptur v prostředí												
	SO_4 -10 g SO_4 /l			SO_4 -34,6 g SO_4 /l			100 g NaCl/l			reálné exteriérové		
	vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné pevnosti /ref. betonu	vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné pevnosti /ref. betonu	vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné pevnosti /ref. betonu	vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné pevnosti /ref. betonu
	N/mm ²	%	%	N/mm ²	%	%	N/mm ²	%	%	N/mm ²	%	%
N1	-11,3	-21,6	+55,5	-17,6	-33,5	+15,6	-12,3	-23,4	+33,2	-18,9	-36,0	-10,2
N2	-17,6	-28,7	+65,2	-18,6	-30,4	+41,5	-15,4	-25,1	+52,2	-16,3	-26,6	+20,4
N3	-0,1	-0,1	+73,5	-16,6	-36,1	-2,7	-5,7	-12,4	+33,6	-10,1	-21,9	-4,0
S1	-27,9	-49,9	+5,8	-25,3	-45,3	+1,3	-12,0	-21,5	+45,5	-13,2	-23,7	+14,2
S2	-10,5	-20,0	+59,3	-9,2	-17,4	+44,2	-11,0	-20,9	+38,2	-16,3	-30,9	-2,7
S3	-13,8	-31,0	+16,5	-23,3	-52,2	-29,2	-4,5	-10,0	+33,2	-6,8	-15,2	+1,3
ref.	-32,0	-54,8	0,0	-28,3	-48,5	0,0	-28,3	-48,5	0,0	-21,1	-36,1	0,0

*[-] snížení pevnosti v tlaku, [+] zvýšení pevnosti v tlaku

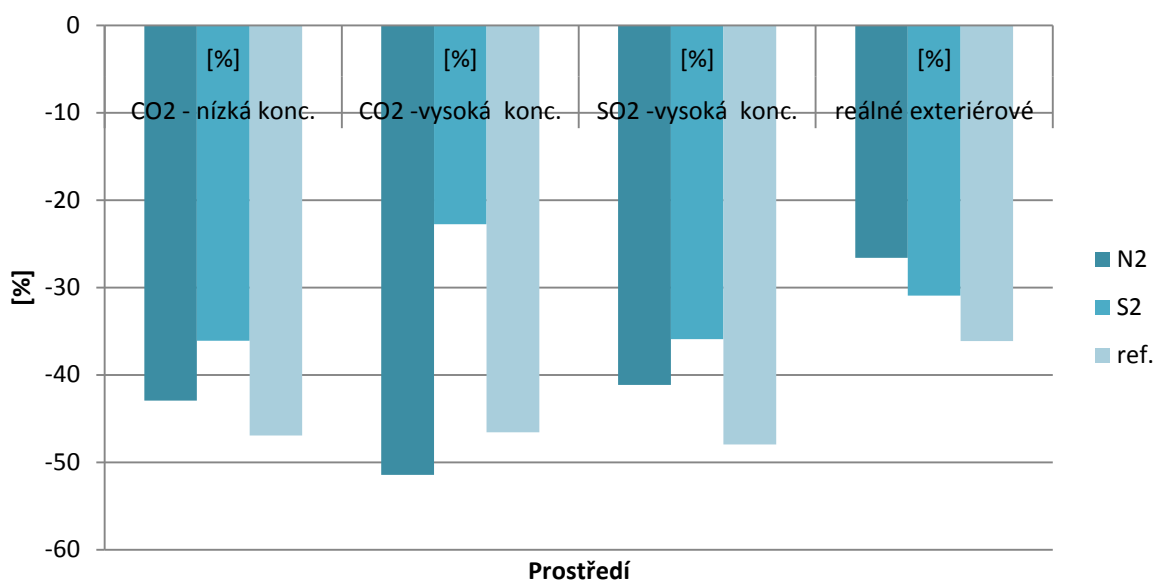


Obrázek 51: Pokles pevností v tlaku po 18 měsících v kapalných prostředích

Tabulka 50: Vyhodnocení pevnosti v tlaku receptur v plynných prostředích

	Pevnost v tlaku receptur 3 - 18 měsíců v prostředí											
	CO ₂ - nízká konc.				CO ₂ - vysoká konc.				SO ₂ - vysoká konc.			
	vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné		vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné		vývoj v období 3 - 18 měsíců		konečné	
	/ref. betonu		/ref. betonu		/ref. betonu		/ref. betonu		/ref. betonu		/ref. betonu	
	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[%]
N2	-26,3	-42,9	+12,6	-31,5	-51,4	-4,8	-25,2	-41,1	+18,4	-16,3	-26,6	+20,4
S2	-19,0	-36,1	+8,4	-12,0	-22,8	+30,1	-18,9	-35,9	+10,9	-16,3	-30,9	-2,7
ref.	-27,4	-46,9	0,0	-27,2	-46,6	0,0	-28,0	-47,9	0,0	-21,1	-36,1	0,0

*[-] snížení pevnosti v tlaku, [+] zvýšení pevnosti v tlaku



Obrázek 52: Pokles pevností v tlaku po 18 měsících v plynných prostředích

Krystalizující hydroizolační hmoty primárně slouží ke zvodotěšňování konstrukcí. Díky svému pronikání pórovou strukturou betonu a utěšňování jí pomocí nově tvořených krystalů lze předpokládat, že zvyšují hutnost a kompaktnost betonu. Tedy mohou také ovlivnit i pevnostní charakteristiky takto ošetřených konstrukcí.

Na základě vyhodnocení dosažených výsledků, lze u všech testovaných vzorků pozorovat pokles pevností v tlaku mezi počátečním uložením v normovém prostředí, a osmnáctiměsíčním vlivem agresivních činitelů. Nelze ale jednoznačně prokázat závislost mezi pevností v tlaku a ošetřením jednotlivými krystalizujícími hmotami ve zkoušených časových intervalech.

V tabulkách a tabulkách 49, 50 jsou vyhodnocena celková snížení pevností jednotlivých vzorků za období osmnácti měsíců. S výjimkou prostředí SO₄ - 34,6 g SO₄/l referenční vzorky vždy vykazaly nejvyšší snížení pevnosti v tlaku. V závislosti na prostředí se snížení pevnosti v tlaku pohybovalo pro nátěry v rozmezí 0,1 % (snížení N3 v SO₄ - 10 g SO₄/l) až 51,4 %

(N2 v prostředí s vysokou koncentrací CO_2). Pro stěrky se snížení pevnosti v tlaku ve srovnání s počátečními pevnostmi pohybovalo od 10 % (S3 v prostředí NaCl), až 52,2 % (S3 v SO_4 - 34,6 g SO_4/l).

Pro referenční srovnávací recepturu, tedy bez ošetření dodatečnou hydroizolací, se snížení pevnosti v tlaku pohybovalo od 36,1 % (reálné exteriérové) do 54,8 % (SO_4 - 10 g SO_4/l).

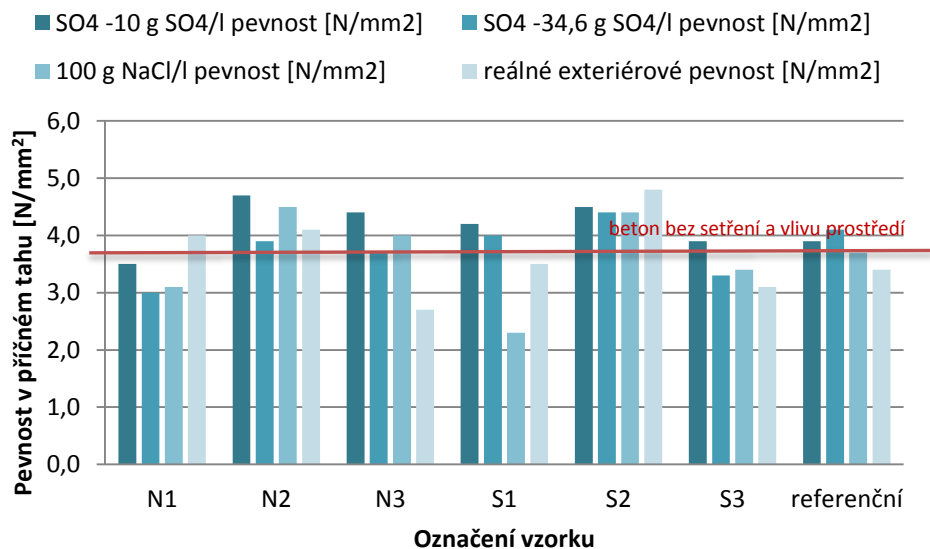
10.3.5 Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu podle ČSN EN 1338

Dosažené výsledky jsou uvedeny v tabulkách 51 a 52, se sumarizovaným vyhodnocením v grafech na obrázcích 53 a 54. Vzhledem k primárnímu účelu krystalizujících hydroizolací zvyšovat především vodonepropustnost konstrukcí, nebyla zkouškám pevností, v rámci celkového výzkumu a vývoje nových hmot přikládána prioritní váha. Přesto, díky schopnosti krystalizujících hydroizolací utěšňovat póry betonu, byl předpokládán vliv na konečné pevnosti betonové konstrukce. Beton bez ošetření hydroizolačními hmotami a bez vlivu korozních prostředí, dosahoval pevnosti v příčném tahu $3,7 \text{ N/mm}^2$.

Tabulka 51: Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v kapalných prostředích

vzorek	Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu v prostředí							
	SO_4 -10 g SO_4/l		SO_4 -34,6 g SO_4/l		100 g NaCl/l		reálné exteriérové	
	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]
N1	3,5	-10,3	3,0	-26,8	3,1	-16,2	4,0	17,6
N2	4,7	20,5	3,9	-4,9	4,5	21,6	4,1	20,6
N3	4,4	12,8	3,7	-9,8	4,0	8,1	2,7	-20,6
S1	4,2	7,7	4,0	-2,4	2,3	-37,8	3,5	2,9
S2	4,5	15,4	4,4	7,3	4,4	18,9	4,8	41,2
S3	3,9	0,0	3,3	-19,5	3,4	-8,1	3,1	-8,8
referenční	3,9	0,0	4,1	0,0	3,7	0,0	3,4	0,0

*[-] snížení pevnosti v příčném tahu, [+] zvýšení pevnosti v příčném tahu



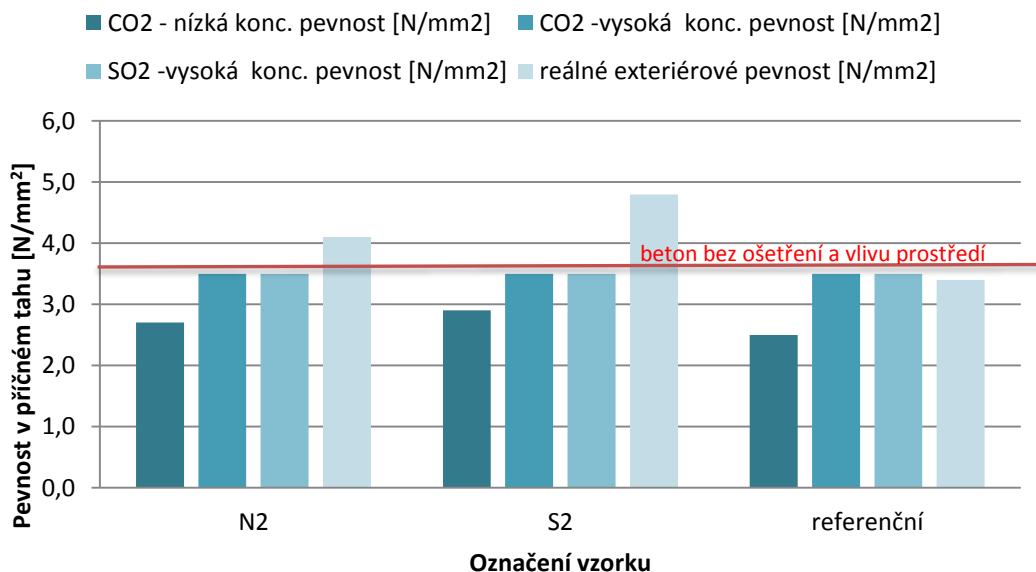
Obrázek 53: Sumarizace pevností ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v kapalných prostředích

Z výsledků testování betonu v korozních prostředích, dosáhl nejnižších hodnot vzorek s aplikovanou stěrkou S1 ($2,3 \text{ N/mm}^2$), uložený v prostředí s obsahem 100 g NaCl/l . Nejvyšších hodnot dosáhly vzorky ošetřené stěrkou S2 ($4,8 \text{ N/mm}^2$) v reálném exteriérovém prostředí. Z dosažených výsledků ale nelze jasně vyvodit závěr, zda krystalizující hmoty mají vliv na pevnost v příčném tahu betonové konstrukce. Výsledky v grafu 53 ukazují u většiny testovaných vzorků zvýšení pevnosti v příčném tahu. V porovnání s referenčním batonem bez ošetření, uloženém ve stejném prostředí, ale vyvstává otázka, zda mírné zvýšení pevnosti v tahu lze přisuzovat pouze vlivu krystalizujících hmot. Vzhledem k faktu, že korozní prostředí mohla rovněž mít vliv na vytvoření novotvarů v pórech betonu, a tím i možné zvýšení pevnosti [2, 9].

Tabulka 52: Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu v plynných prostředích

vzorek	Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu v prostředí							
	CO_2 - nízká konc.		CO_2 -vysoká konc.		SO_2 -vysoká konc.		reálné exteriérové	
	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]	pevnost [N/mm ²]	oproti ref.* [%]
N2	2,7	8,0	3,5	0,0	3,5	0,0	4,1	20,6
S2	2,9	16,0	3,5	0,0	3,5	0,0	4,8	41,2
referenční	2,5	0,0	3,5	0,0	3,5	0,0	3,4	0,0

*[-] snížení pevnosti v příčném tahu, [+] zvýšení pevnosti v příčném tahu



Obrázek 54: Sumarizace pevností ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v plynných prostředích

Pro plynná prostředí byly na pevnost v příčném tlaku otestovány vzorky N2 a S2, včetně srovnávacího referenčního vzorku. Po osmnácti měsících došlo u obou vzorků ke snížení pevnosti v příčném tlaku, v porovnání s betonem bez aplikovaných hmot, a bez vlivu prostředí. Vzorky ošetřené recepturami N2, S2 i referenční vzorky dosahovaly shodných hodnot v prostředí CO₂ a SO₂ o vysoké koncentraci. I z těchto dosažených výsledků, nevyplyváá přímá závislost vlivu krystalizující hydroizolace, na pevnost v příčném tahu betonu.

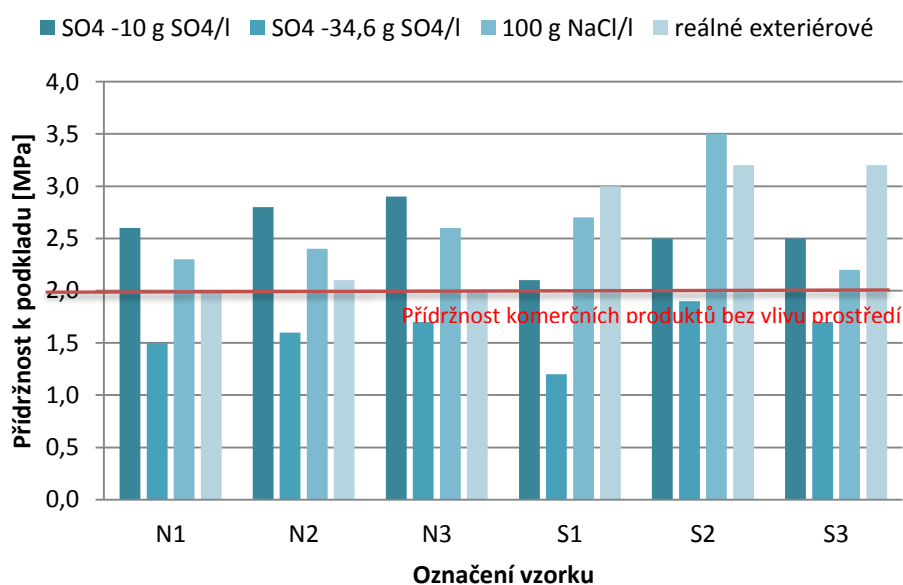
10.3.6 Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou podle ČSN EN 1542

Dosažené výsledky po osmnácti měsících v korozních prostředích, jsou uvedeny v tabulce 53 a 54 s vyhodnocením v grafech na obrázcích 55 a 56. V kapalných prostředích dosáhla nejnížší přídržnosti k podkladu stěrka S1(1,2 MPa) v prostředí s působením SO₄, o koncentraci 34,6 g SO₄/l. Naproti tomu, nejvyšší přídržnost 3,5 MPa, byla naměřena u stěrky S2 uložené v prostředí chloridů o koncentraci 100 g NaCl/l. Z dostupné technické dokumentace výrobců hmot⁹ na bázi sekundární krystalizace, lze pro komerčně vyráběné hmoty nalézt běžně deklarovanou hodnotu přídržnosti k betonu 2 MPa po aplikaci na beton a vyzrání. S přihlédnutím k tomuto faktu, lze tedy konstatovat, že receptury S1-S3 a N1-N3, odolaly po osmnácti měsících působení všech vybraných korozních prostředí, s výjimkou prostředí s působením SO₄, o koncentraci 34,6 g SO₄/l. U něj došlo u vzorků k poklesu přídržnosti pod 2 MPa.

⁹ Drizoro CZ, s.r.o, Betosan s.r.o., Xypex Corporation,

Tabulka 53: Přídržnost k betonu po 18 měsících v kapalných prostředích

prostředí	Přídržnost k betonu [MPa]			
	SO_4 -10 g SO_4 /l	SO_4 -34,6 g SO_4 /l	100 g NaCl/l	reálné exteriérové
N1	2,6	1,5	2,3	2,0
N2	2,8	1,6	2,4	2,1
N3	2,9	1,7	2,6	2,0
S1	2,1	1,2	2,7	3,0
S2	2,5	1,9	3,5	3,2
S3	2,5	1,7	2,2	3,2

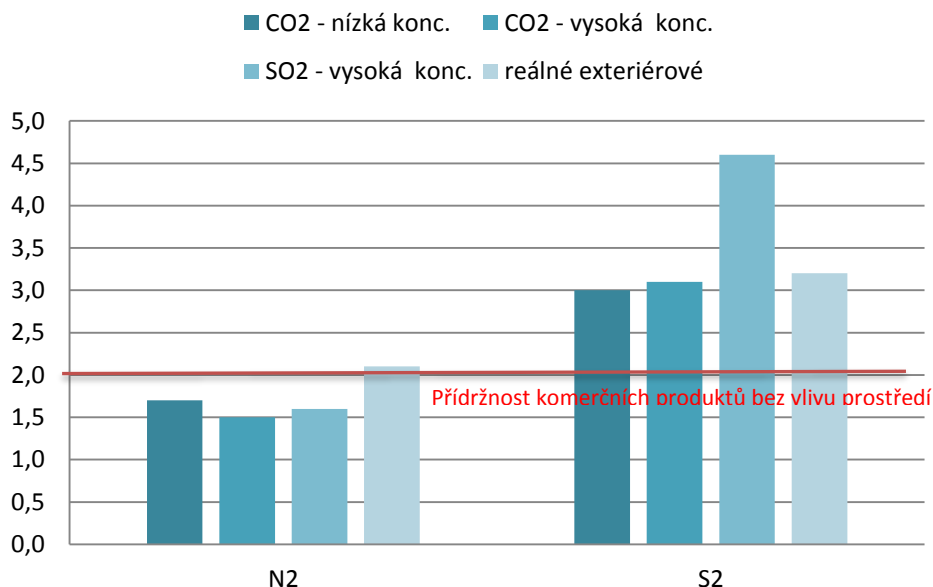


Obrázek 55: Sumarizace přídržností k betonu po 18 měsících v kapalných prostředích

Pro testování přídržnosti k podkladu, byly z plynných prostředí vybrány receptury N2 a S2. Po osmnácti měsících působení, stěrka S2 dosahovala vyšší přídržnosti nežli 2 MPa. V prostředí s vysokou koncentrací SO_2 , dosáhla i celkově nejvyšší naměřené hodnoty 4,6 MPa. Nátěr, ale oproti tomu vykázal sníženou přídržnost pod 2 MPa ve všech testovaných prostředích a v prostředí CO_2 o vysoké koncentraci dosáhl i celkově nejnižší přídržnosti, 1,5 MPa. Tento fakt mohl být částečně způsoben rozrušením tenčí vrstvy nátěru působením agresivních činitelů.

Tabulka 54: Přídržnost k betonu po 18 měsících v plynných prostředích

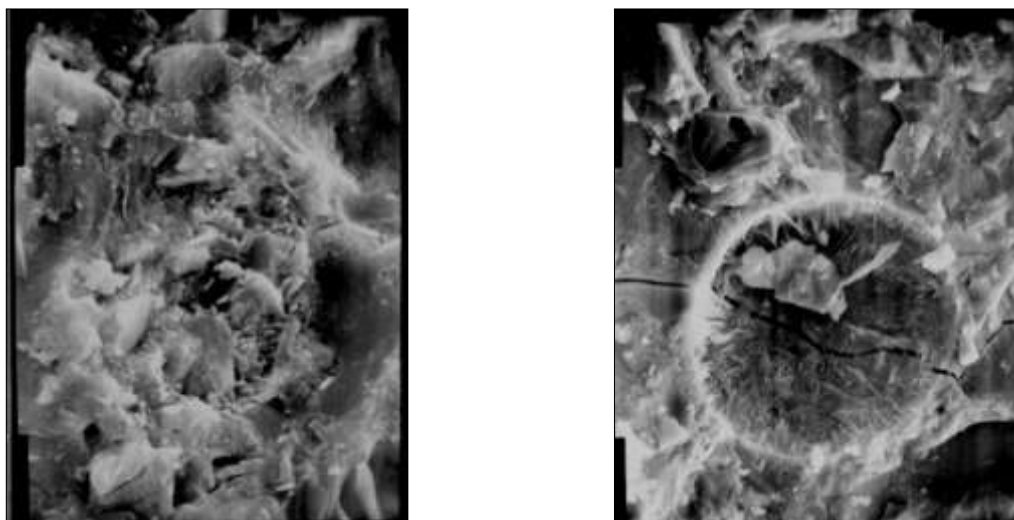
prostředí	Přídržnost k betonu [MPa]			
	CO_2 - nízká konc.	CO_2 – vysoká konc.	SO_2 –vysoká konc.	reálné exteriérové
N2	1,7	1,5	1,6	2,1
S2	3,0	3,1	4,6	3,2



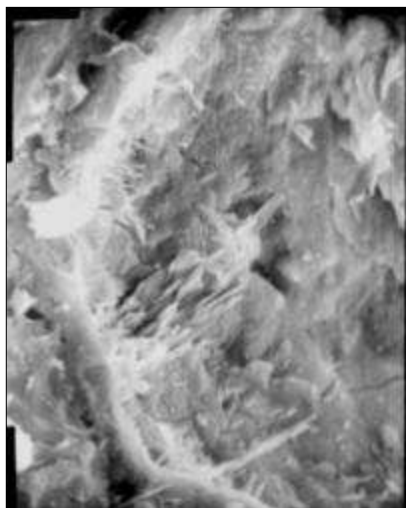
Obrázek 56: Sumarizace přídržností k betonu po 18 měsících v plynných prostředích

10.3.7 Skenovací elektronová mikroskopie

Pomocí zkoušky rastrovací elektronové mikroskopie REM (SEM), byly provedeny vstupní analýzy pro potvrzení tvorby novotvarů v pórové struktuře ošetřeného betonu. Pro analýzu růstu krystalů, byly použity vzorky s aplikovanými hydroizolačními recepturami N2 a S2. Tyto receptury byly vybrány na základě výsledků předchozího testování, a výsledků optimalizace výběru receptur v sekci 10.4, kdy se N2 a S2, jeví jako nejvhodnější receptury pro případnou komerční produkci. Na obrázcích 57 až 61, jsou zdokumentovány krystaly v pórech betonu, v hloubce do dvou cm pod povrchem, ošetřeným hmotami na bázi sekundární krystalizace cementu.



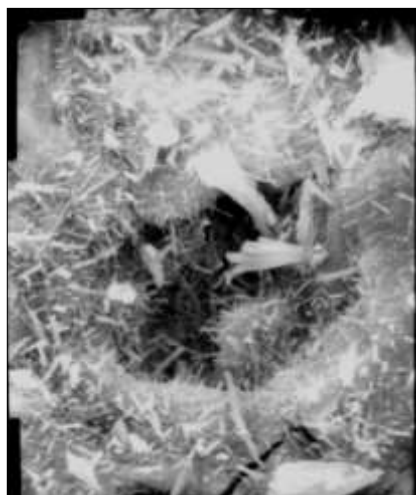
Obrázek 57: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) při zvětšení 2000x a S2 (vpravo) při zvětšení 1000x v reálném exteriérovém prostředí



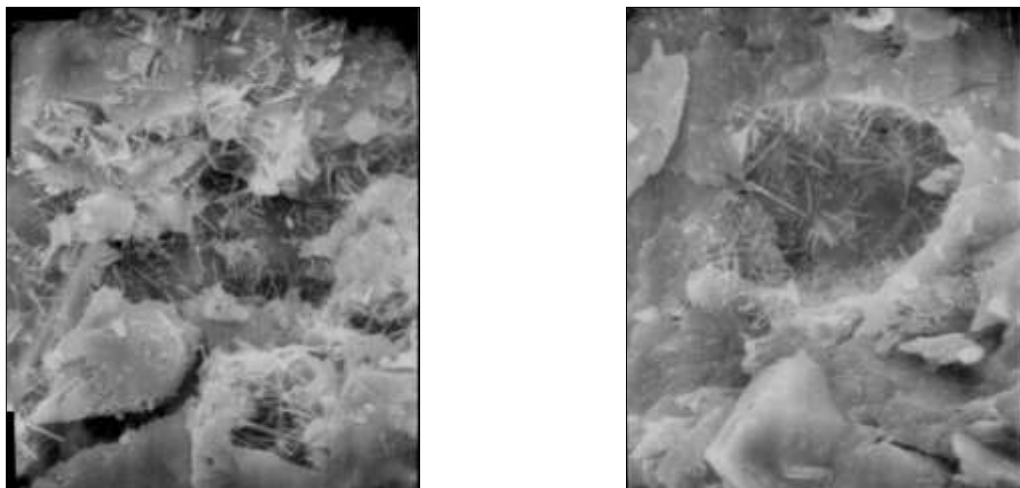
Obrázek 58: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí s CO_2



Obrázek 59: novotvary v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí s SO_2



Obrázek 60: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí obsahující sírany



Obrázek 61: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí obsahující chloridy

Tyto vstupní analýzy mikrostruktury betonu ošetřeného krystalizujícími hydroizolacemi prokázaly, shodně se závěry prací Furuy et al., [44] a Mitsuki et al. [61] vývoj krystalů ve struktuře betonu. Byly objeveny jehlicovité krystaly vyplňující póry a mikrotrhliny do testované hloubky přibližně 2 cm od povrchu ošetřeného recepturami N2, S2.

Z analyzovaných snímků bylo patrné, že u nátěru N2 docházelo k výrazně kompaktnějšímu vykrytalizování, než tomu u stěrky S2. Tento fakt potvrzují i výsledky předchozích testování na voděodolnost v sekci 10.2, kdy nátěry zvyšovaly voděodolnost betonu v korozních prostředí více, než stěrkové receptury. Bylo tedy potvrzeno, že v důsledku většího utěsnění kapilárního systému docházelo ke zlepšování voděodolnosti betonové konstrukce. Na obrázcích 57 až 61, lze vidět novotvary na bázi sekundární krystalizace, které nejvíce ovlivňují strukturu betonu.

Vzhledem k nutnosti analyzovat vývoj těsnících vlastností v čase a konečné ovlivnění pórové struktury betonu vznikajícími krystaly, bylo přistoupeno v etapě 11 k rozšířeným analýzám vlivu navržených hmot na beton.

10.4 Optimalizace výběru finální receptury nátěru a stěrky

Na základě výsledků Etapy II., byly z dosažených výsledků nátěrů N1, N2, N3 a stěrky S1, S2, S3, vybrány následující parametry pro výběr finálních receptur stěrky a nátěru pro finální produkci. V optimalizaci byly zohledněny parametry uvedené v tabulce 55 a 56, se zaměřením na vlastnosti po osmnácti měsících působení reálného exteriérového prostředí na vzorky. Reálné exteriérové prostředí, bude totiž při praktickém využití receptur, nejčastějším souborem agresivních činitelů působícím na betonové konstrukce. V souboru se jednalo o parametry: kapilární vztlakovost, hloubka průsaku tlakovou vodou, vzduchová propustnost betonu metodou Torrent (KT), propustnost betonu metodou Torrent (mm), pevnost ztvrdlého betonu v tlaku, soudržnost odtrhovou zkouškou a relativní cena receptury daná objemem použité krystalizující přísady a také výsledkům měření pevností. Ostatní testované parametry nebyly do multikriteriální analýzy zahrnuty, protože neposkytly požadované rozlišení mezi jednotlivými recepturami.

Následující tabulka 55, dokládá parametry receptur nátěrů vstupujících do optimalizace, a v tabulce 56 jsou uvedeny tyto parametry pro stěrkové receptury.

Tabulka 55: Kritéria volby a přehled parametrů receptur nátěrů

Zkouška		číslo	optimum	N1	N2	N3	MIN	MAX
Kapilární vztlínavost [%]	18 měsíců působení reálného exteriérového prostředí	1	min	0,07	0,06	0,09	0,06	0,09
Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou		2	min	14,00	15,00	20,00	14,00	20,00
Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent (kT)		3	min	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent (mm)		4	min	6,10	4,90	5,30	4,90	6,10
Pevnost ztvrdlého betonu v tlaku		5	max	49,37	45,63	36,13	36,13	49,37
Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou		6	max	1,90	2,10	2,00	1,90	2,10
Cena - relativní - dle dávkování krystalizující přísady [kg]		7	min	5,72	5,96	5,87	5,72	5,96

Tabulka 56: Kritéria volby a přehled parametrů receptur stěrek

Zkouška		číslo	optimum	S1	S2	S3	MIN	MAX
Kapilární vztlínavost [%]	18 měsíců působení reálného exteriérového prostředí	1	min	0,29	0,27	0,30	0,27	0,30
Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou		2	min	24,00	22,00	20,00	20,00	24,00
Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent (kT)		3	min	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Vzduchová propustnost betonu metodou Torrent (mm)		4	min	6,50	4,70	5,10	4,70	6,50
Pevnost ztvrdlého betonu v tlaku		5	max	39,90	37,17	33,07	33,07	39,90
Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou		6	max	3,00	3,20	3,20	3,00	3,20
Cena - relativní - dle dávkování krystalizující přísady [kg]		7	min	2,75	5,50	8,25	2,75	8,25

Následující Fullerův trojúhelník volby váhy kritérií párovým srovnáním je uveden v tabulce 57, s navazující tabulkou 58, která vypočítává dle rovnice [11] na straně 173, váhu jednotlivých kritérií. Tyto vstupní parametry a výpočty, jsou použity ve výpočtové matici pro samotný výpočet a porovnání výsledných hodnot pro jednotlivé varianty. Pro nátěrové receptury tento výpočet a jejich pořadí uvádí tabulka 59, a pro stěrkové receptury tabulka 60.

Tabulka 57: Fullerův trojúhelník

1	1	1	1	1	1
2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	
3	4	5	6	7	
2	2	2	2	2	
3	3	3	3		
4	5	6	7		
3	3	3	3		
4	4	4			
5	6	7			
4	4	4			
5	5				
6	7				
6	7				
6					
7					
6					

Tabulka 58: Výpočet váhy kritérií

číslo	Počet	Pi	Vi	Fi
1	6	1	7	0,2500
2	5	2	6	0,2143
3	4	3	5	0,1786
4	3	4	4	0,1429
5	0	7	1	0,0357
6	2	5	3	0,1071
7	1	6	2	0,0714
n=	7	Suma:	28	1,0000

Tabulka 59: Výpočtová matice pro nátěrové receptury

číslo	Fi	optimum	N1	N2	N3
1	0,2500	0	0,1801	0,2500	0,0000
2	0,2143	0	0,2143	0,1786	0,0000
3	0,1786	0	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,1429	0	0,0000	0,1429	0,0952
5	0,0357	1	0,0357	0,0256	0,0000
6	0,1071	1	0,0000	0,1071	0,0536
7	0,0714	0	0,0714	0,0000	0,0268
Suma			50,1569	70,4210	17,5595
Umístění receptur			2	1	3

Tabulka 60: Výpočtová matice pro stěrkové receptury

číslo	Fi	optimum	S1	S2	S3
1	0,2500	0	0,0833	0,2500	0,0000
2	0,2143	0	0,0000	0,1071	0,2143
3	0,1786	0	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,1429	0	0,0000	0,1429	0,1111
5	0,0357	1	0,0357	0,0214	0,0000
6	0,1071	1	0,0000	0,1071	0,1071
7	0,0714	0	0,0714	0,0357	0,0000
Suma			19,0476	66,4286	43,2540
Umístění receptur			3	1	2

Z výše uvedených výpočtových matic vyplývá, že dle zvolených kritérií, je ze stěrkových receptur nejoptimálnější volbou pro případnou produkci S2 receptura, a z nátěrových receptur pak N2. Obě tyto receptury obsahují střední zvolenou dávku krystalizující přísady, a vykazují při konečném posouzení optimální poměr mezi naměřenými bariérovými a mechanickými vlastnostmi v poměru k ceně přidávaného množství krystalizující přísady. Receptury S2 a N2 o složení uvedeném v tabulkách 61 a 62, jsou proto výsledky této disertační práce. Tyto dosažené výsledky jsou rovněž v souladu s výsledky dosaženými v práci [38].

Tyto výsledné receptury, byly dále v rámci etapy 11 této práce, podrobeny hloubkovým mikrostrukturálním analýzám s cílem analyzovat působení navržených receptur na mikrostrukturu betonu.

Tabulka 61: Výsledná receptura polymercementového nátěru

Suroviny	N2 [kg]
<i>Suchá složka</i>	
<i>Cement CEM II/A-S 42,5R</i>	270
<i>Křemičitý písek</i>	700
<i>Křemičitý úlet</i>	8,0
<i>Křemičitý filer</i>	200
<i>Popílek Chvaletice</i>	30
<i>Xypex Admix</i>	6,0
<i>Tekutá složka</i>	
<i>Voda</i>	300
<i>Karboxymethylcelulóza</i>	10
<i>Styren-akrylátová disperze</i>	700
<i>Odpěňovač na bázi syntetických kopolymerů a neionogenních emulgátorů</i>	5,0

Tabulka 62: Výsledná receptura polymercementové stěrky

Suroviny	S2 [kg]
<i>Cement CEM II/A-S 42,5R</i>	248
<i>Křemičitý písek</i>	450
<i>Vápenec</i>	250
<i>Křemičitý filer</i>	120
<i>Polymerní disperzní prášek na bázi vinylacetátu a etylénu</i>	3,5
<i>Polypropylénová vlákna</i>	0,5
<i>Superplastifikátor na bázi polykarboxylátů</i>	1,0
<i>Karboxymethylcelulóza</i>	1,0
<i>Popílek Chvaletice</i>	27,5
<i>Xypex Admix</i>	5,50

11 ETAPA III. Rozšířené analýzy vlivu navržených hmot na beton

Tato etapa navázala na etapu II „Vliv prostředí na funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot“. Postup etapy byl proveden shodně s metodikou uvedenou v grafu na obrázku 14, v sekci ETAPA III. Rozšířené analýzy vlivu navržených hmot na mikrostrukturu betonu.

Hlavním cílem etapy bylo především hloubkově analyzovat schopnosti vybraných, nově navržených receptur těsnit strukturu betonu, a ověřit vlastnosti navržených receptur pro praktickou využitelnost a možnost certifikace.

11.1 Ověření funkčnosti těsnění pórů

Cílem tohoto mikroskopického pozorování bylo analyzovat schopnost nově navržených perspektivních materiálů těsnit póry betonu v porovnání s výchozí komerční krystalizující hmotou Xypex a nalézt možné rozdíly v nově vytvořené struktuře jednotlivých krystalizujících hmot. Pro testování byly na základě výsledků předchozího výzkumu vybrány modifikace N2 a S2 a Xypex Concentrate. Pro srovnání byly také analyzovány referenční betony bez ošetření krystalizující hmotou.

Pro testování byl zvolen interval první, šestý a dvanáctý den od naaplikování krystalizující hmoty na povrch zkušebních těles. Důvodem k výběru tohoto intervalu, byly údaje uvedené v technickém listu výrobce Xypexu¹⁰: „Zatížení ošetřeného betonu tlakem vody je možné až po minimálně dvanácti dnech po aplikaci“. Tímto tedy v tomto časovém rozmezí výrobce garantuje vnik ochranné hydroizolační vrstvy, a utěsnění betonu vzniklými krystaly.

Pro zkoušku bylo vytvořeno dvanáct zkušebních betonových vzorků o rozměrech 100 x 100 x 100 mm, ze směsi pro výrobu betonu o složení na 1m³: frakce 0-4 - 850 kg, 4-16 - 900, cement 32,5 - 400 kg, voda 240 kg, A/C= 0,6, provzdušňovací přísada 150 g/ 100 kg cementu. Po 28 dnech zrání, byla změřena hmotnostní nasákavost dle ČSN 73 1357-2 za účelem potvrzení vysoké kapilarity materiálu (vhodnost pro nanesení receptur). Ta dosahovala u vzorků průměrné hodnoty 6 %.

Tělesa byla uložena na dobu 48 hodin do vodní lázně za účelem absorpce vody nutné k pozdějšímu dostatečnému vývoji krystalů. Po této periodě byla tělesa vyjmuta a podkladní strana byla zbavena všech nečistot, prachu, cementových šlemů a mírně zdrsňena ocelovým kartáčem za účelem zpřístupnění kapilárního systému betonu.

Po aplikaci Xypexu, S2 a N2, byly vzorky uloženy do vodní lázně, ve které hladina sahala do poloviny výšky tělesa. Zároveň byla tato lázeň umístěná do vlhkostní komory (teplota 21±2 °C, vlhkost 65 %).

Po intervalech jednoho, šesti a dvanácti dní, byla tělesa vyjmuta z lázně (poté vždy vrácena) a na diamantové pile z nich byla vyříznuta tělesa o rozměrech 20 × 100 × 100 mm

¹⁰ http://www.nekap.com/xypex/detail_concentrate.php

(obrázek 62). Ta byla mechanicky rozdrčena a z nich byly vybrány vhodné zkušební vzorky o velikosti cca 8 mm, maximálně však 1,5 cm v průměru vždy z hloubky 0,5-1 cm, 5-6 cm od povrchu ošetřeného krystalizující hmotou (obrázek 63). Tyto vzorky byly dále umístěny po dobu 48 hodin do sušárny s teplotou 85 °C. Vznikl tedy soubor vzorků o minimálně třech vzorcích z každé receptury v každém časovém intervalu měření. Následně byla provedena mikrostrukturální analýza za pomoci elektronového mikroskopu (Ultra-high Resolution Analytical Scanning Electron Microscope): NanoSEM - FEI Nova 200 (FEG/SEM) s přídatným modulem EDAX - Pegasus X4M (EDS/EBSD).



Obrázek 62: Ukázka zkušebních těles, vytvoření výřezu po 1 dni uložení

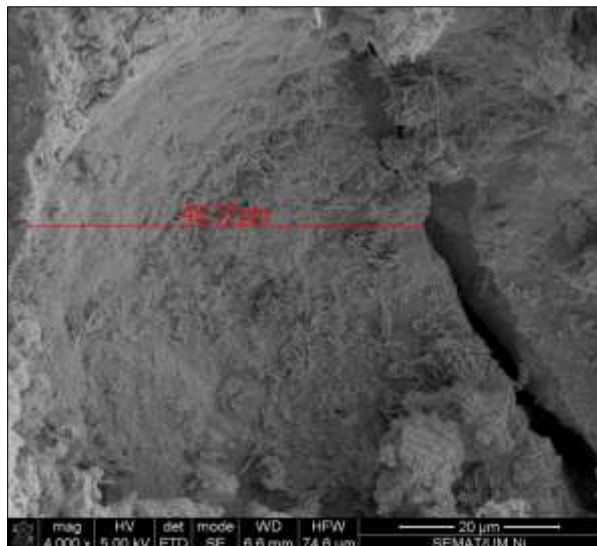


Obrázek 63: Výřez, začátek rozdrčení a vyjmutí vzorků pro testování

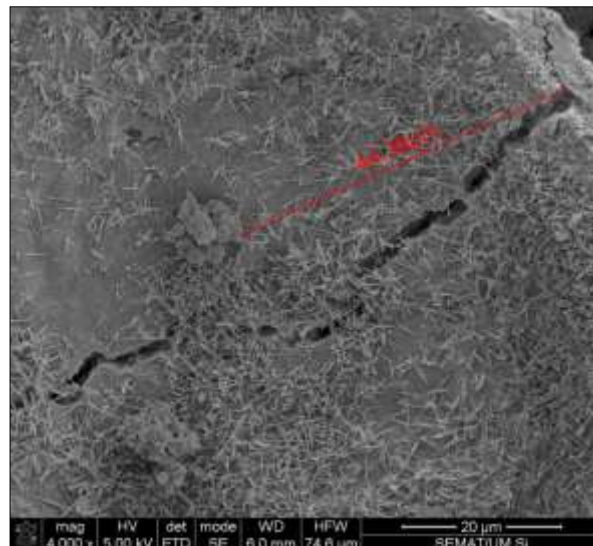
Vzorky byly komparovány pod shodným zvětšením 1000× a 4000×, z důvodu analýzy jednotlivých krystalizujících receptur za neměnných vstupních podmínek. U vybraných snímků bylo pořízeno i zvětšení 25000×, pro detailní analýzu struktury nově vzniklých krystalů.

11.1.1 První den od počátku krystalizace

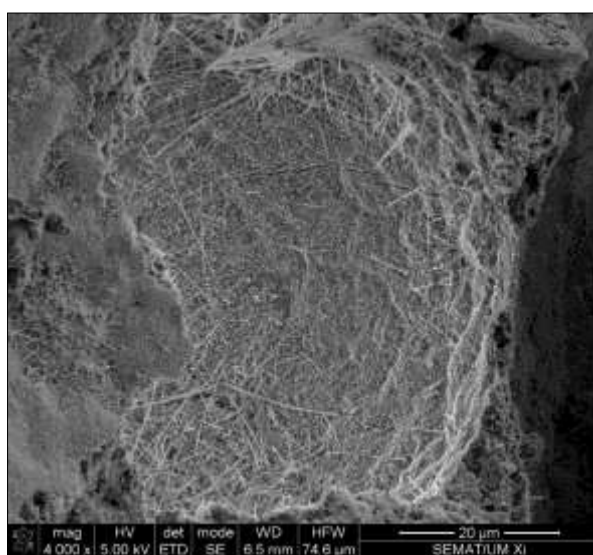
Na následujících obrázcích 64 až 69, jsou doloženy zástupné snímky vyhodnocení analýzy růstu krystalů v pórech betonu po dvaceti čtyřech hodinách od aplikace směsí na betonový povrch.



Obrázek 64: N2 receptura – 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

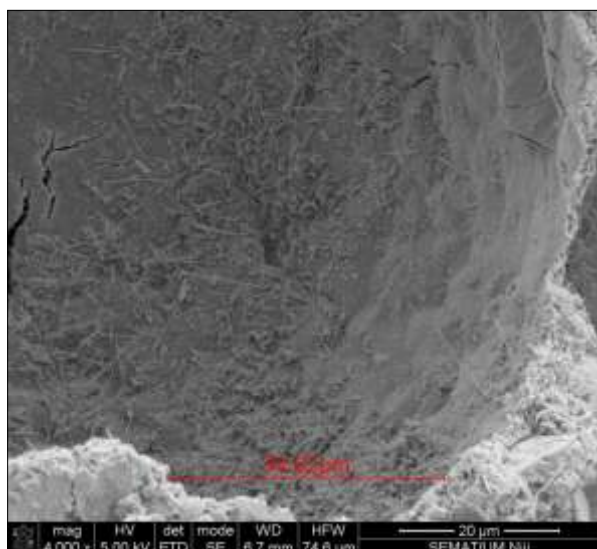


Obrázek 65: S2 receptura – 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

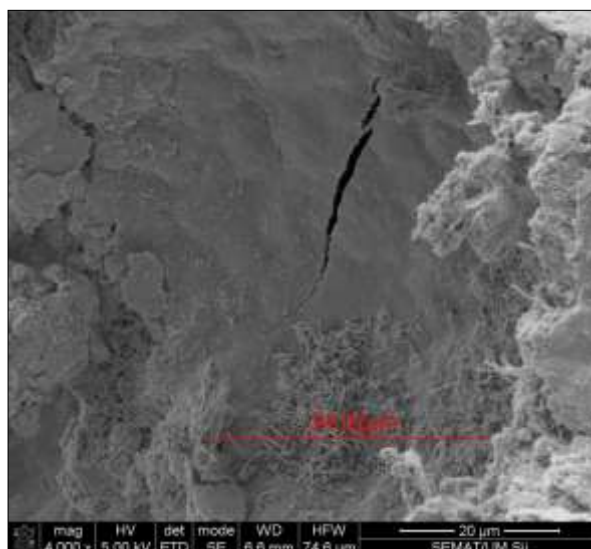


Obrázek 66: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

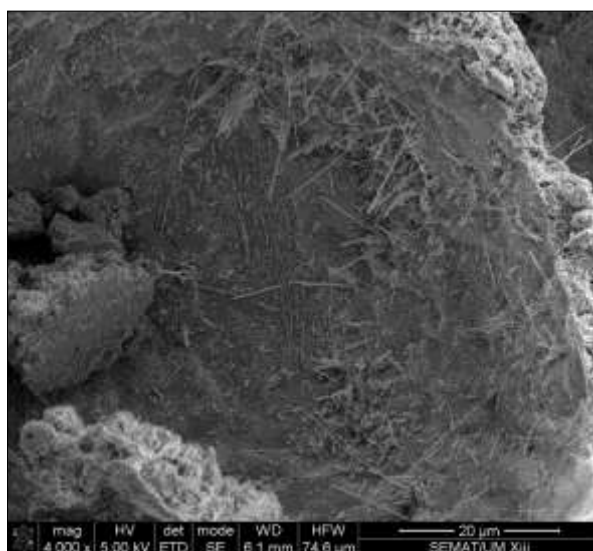
V povrchových vrstvách betonu bylo možno pozorovat drobné jehlicovité krystaly pokrývající dutiny a póry. Osamoceně, nebo ve shlucích vyrůstaly vždy z povrchu pórů a trhlin ve směru do volného prostoru. Tyto jehlicovité krystaly se ale vyskytovaly u analyzovaných vzorků poměrně ojediněle v nepravidelných uskupeních a množství, přičemž nejmarkantnějším rozdílem mezi recepturami, byla délka jednotlivých krystalů. Dosahovaly velikosti jednotlivých krystalů v řádech jednotek nm.



Obrázek 67: N2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



Obrázek 68: S2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



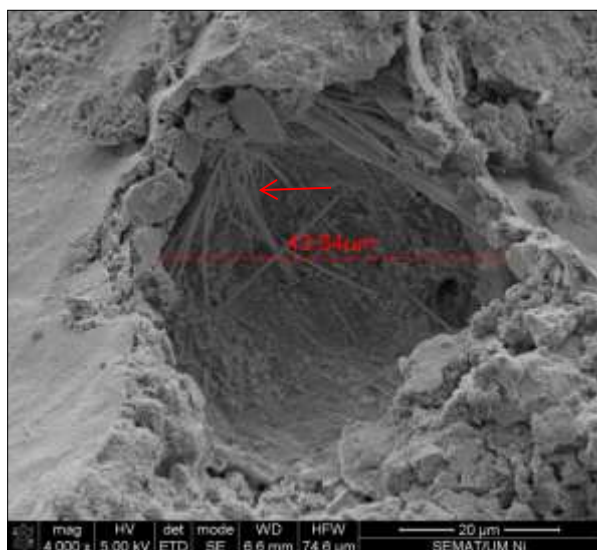
Obrázek 69: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu

V hloubce přibližně pět centimetrů od povrchu (obrázek 67 až 69), byly rovněž nalezeny drobné krystaly stejného charakteru. Bylo ovšem patrné, že s rostoucí hloubkou od povrchu ošetřeného hmotami se tyto krystaly vyskytovaly v menších objemech a složitosti i velikosti jednotlivých krystalů. Tento jev lze deklarovat například u stěrky S2, kde na obrázku 65, v hloubce 0,5-1 cm jsou výrazně rozvinuté krystalové struktury, které i částečně překrývají trhlinu. V hloubce 5-6 cm (obrázek 68), je ale u stejné receptury množství, velikost a hustota krystalů výrazně nižší.

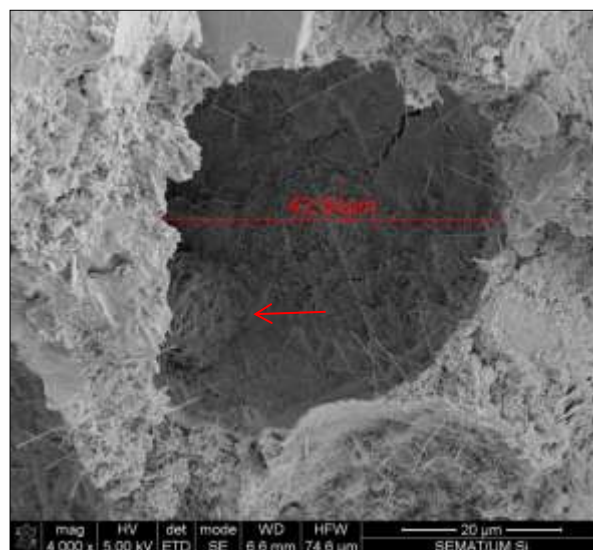
Nejmarkantnějším rozdílem mezi recepturami byla délka jednotlivých krystalů. U vzorků ošetřených XYPEXem až několikanásobně překračovala délky krystalů receptur S2 a N2.

11.1.2 Šestý den od počátku krystalizace

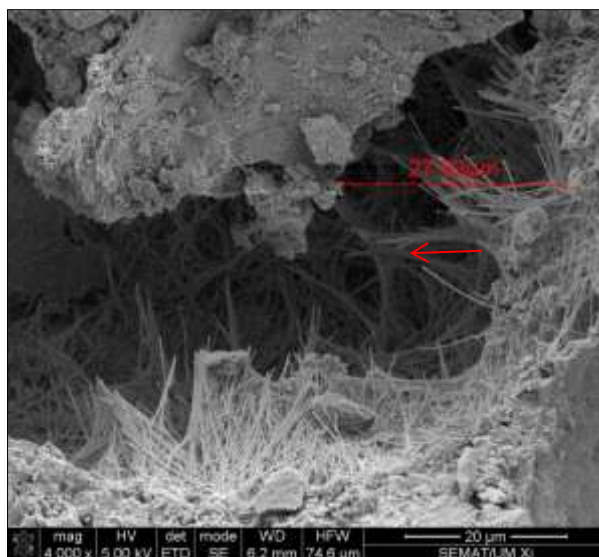
Zástupné snímky 70 až 75 provedené analýzy, reprezentují trend růstu krystalů pozorovaný v pórech betonu po šesti dnech od aplikace receptur na betonový povrch.



Obrázek 70: N2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

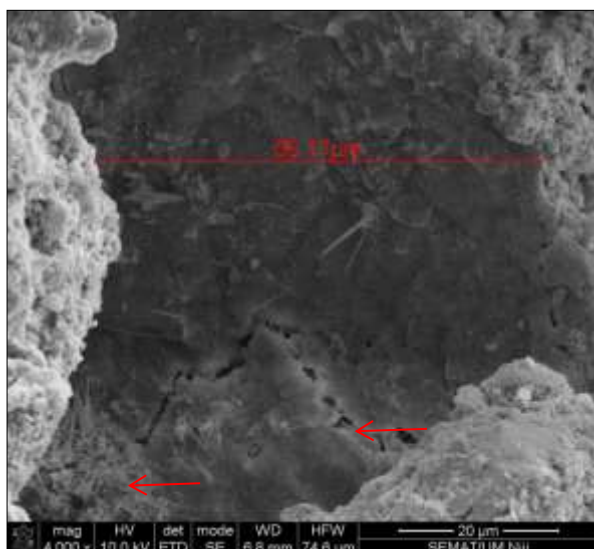


Obrázek 71: S2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

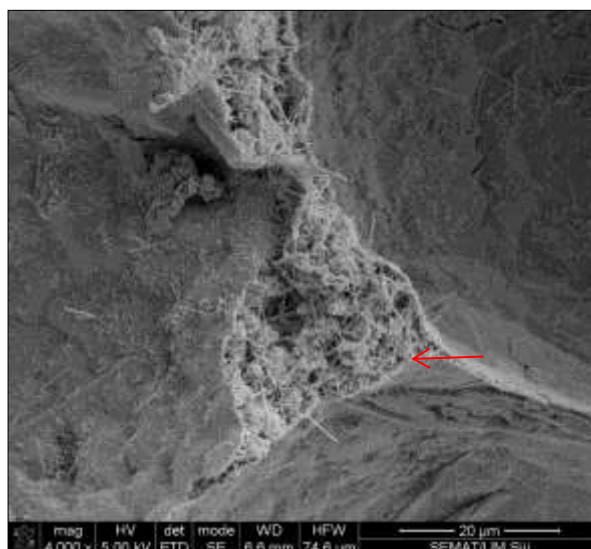


Obrázek 72: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

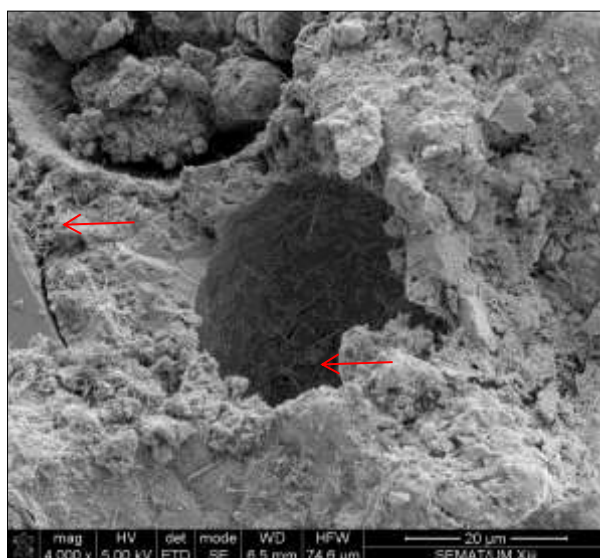
Po šesti dnech od aplikace krystalizujících receptur došlo k viditelnému nárůstu krystalů v pórové struktuře betonu. Ten byl u vzorků pozorovatelný především ve vrstvě 0,5-1 cm od povrchu (obrázky 70 až 72). Především u vzorků ošetřených XYPEXem, bylo možno velmi zřetelně pozorovat nárůst krystalů, co do počtu i velikosti. Například na obrázku 72 je jasně patrný vývin jehlicovitých krystalů délky okolo 10 μm. V tomto konkrétním případě vyplňující prakticky polovinu šíře póru, v němž se tato krystalová struktura tvoří. Tento pór byl pravděpodobně dobře přístupný pronikání vody a z tohoto důvodu také nastala i velice intenzivní tvorba krystalové struktury.



Obrázek 73: N2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



Obrázek 74: S2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



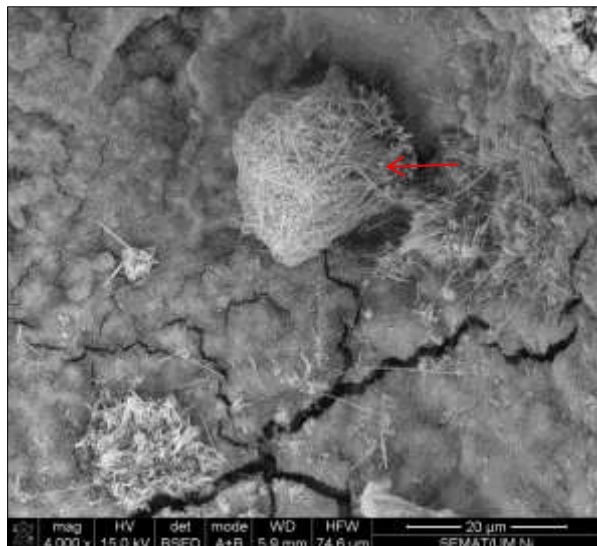
Obrázek 75: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu

V hloubce 5-6 cm od povrchu byl nárůst krystalů méně markantní a pro všechny receptury vizuálně srovnatelný. Nárůst krystalů a jejich lokace byl pozorován spíše lokálně, například v místech trhlin (zaznačeno šipkami). Tento jev lze vysvětlit v souladu s teorií fungování krystalizujících hmot a to ve smyslu, že trhlínami či kapilárními póry byly krystalizující chemicky aktivní látky transportovány strukturou betonu kde následně, lokálně iniciovaly tvorbu krystalů [61, 40, 69].

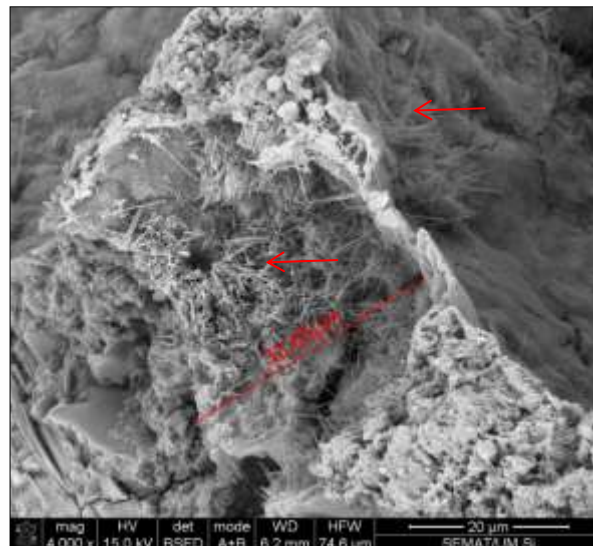
Při vzájemném porovnání stěrky S2 i nátěru N2 s XYPEXem bylo prokázáno, že směsi rovněž vykazovaly nárůst krystalů v porézním systému betonu, ovšem v porovnání s XYPEXem, jakožto výchozí (“čistou”) recepturou bez příměsi popílku byl viditelně nižší. Póry byly ve většině vzorků vyplněny jehlicovitými krystaly méně a to jak do počtu, tak i délky.

11.1.3 Dvanáctý den od počátku krystalizace

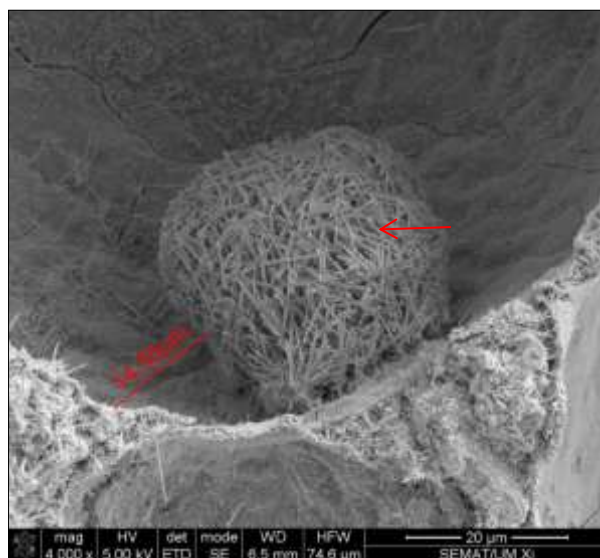
Na následujících obrázcích 76 až 81 jsou doloženy zástupné snímky vyhodnocení analýzy růstu krystalů v pórech betonu po dvanácti dnech od aplikace receptur na betonový povrch.



Obrázek 76: N2 receptura – 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu



Obrázek 77: S2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu



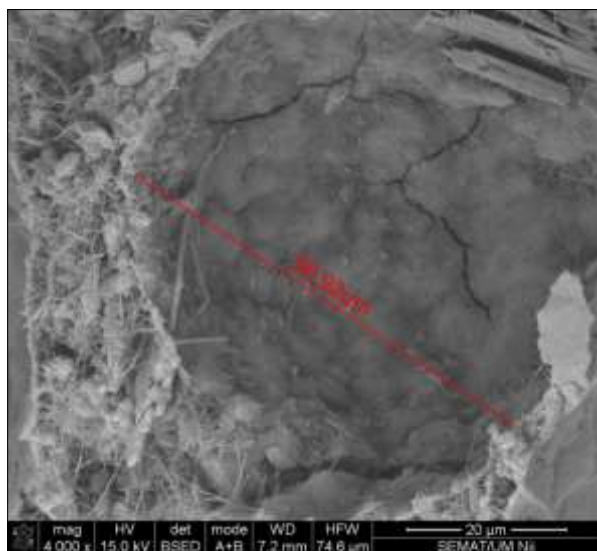
Obrázek 78: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

Po dvanácti dnech působení byl u všech receptur pozorován výrazný nárůst krystalů. Především povrchové vrstvě do hloubky jednoho centimetru, bylo u všech receptur jasně patrné, že se krystaly vyskytovaly prakticky již ve všech pórech a trhlinách. V porovnání s jedno-, a šestidenním působením, byly krystalové struktury v obou pozorovaných hloubkách mnohem složitější a kompaktnější, ovšem velikost jednotlivých krystalů již nenarůstala a dosahovala řádově do délky 10 μm. Mezi výchozí recepturou XYPEX, a S2 i N2

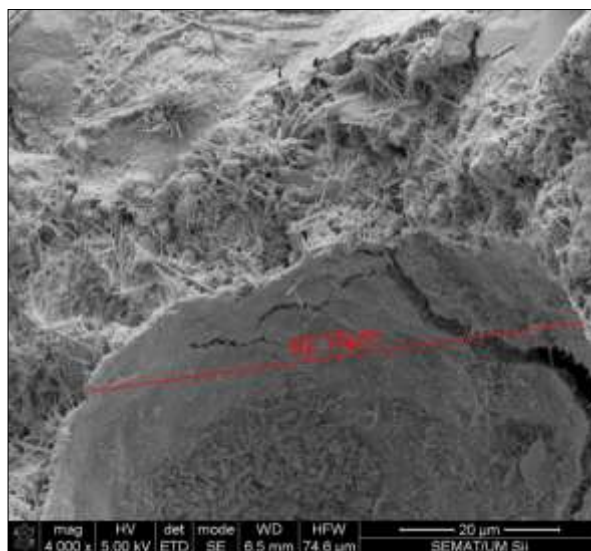
recepturami, nebyl pozorován významnější rozdíl v hustotě krystalové struktury, nebo v samotné velikosti jednotlivých krystalů.

Zajímavým bylo ovšem, nalezení kulových struktur vyrůstajících lokálně z povrchu pórů. Byly složeny z mnoha jednotlivých krystalů vzájemně složitě propojených o prakticky shodné velikosti v průměru, přibližně 30 μm (na obrázku 76 a 78). Tyto struktury nebyly pouze náhodné a vyskytovaly se u prakticky všech testovaných vzorků XYPEX a N2 v hloubce do jednoho centimetru.

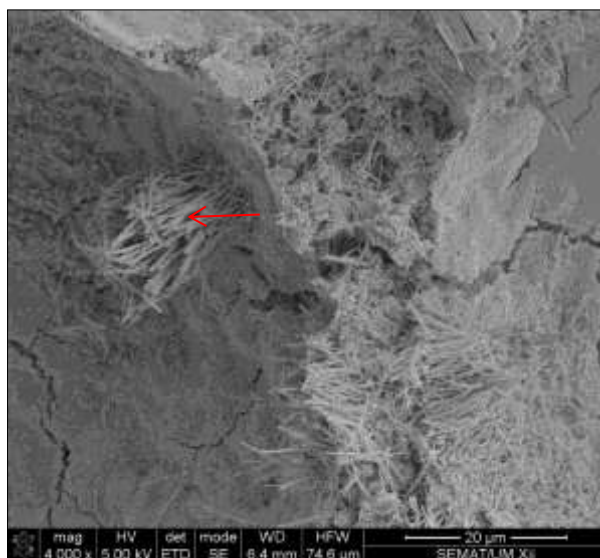
Existence těchto struktur by bylo možno vysvětlit lokálním průsakem vody, díky níž byly transportovány aktivní chemické látky z aplikovaných směsí do daného místa, v němž následně lokálně iniciovaly tvorbu krystalů. Obdobné krystalové struktury popisuje ve své práci rovněž Kamile [106], jež podobné struktury u betonu označuje ve své práci za shluk vlásečnicových krystalů ettringitu vytvářející kulovitá uskupení.



Obrázek 79: N2: receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



Obrázek 80: S2 receptura - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu



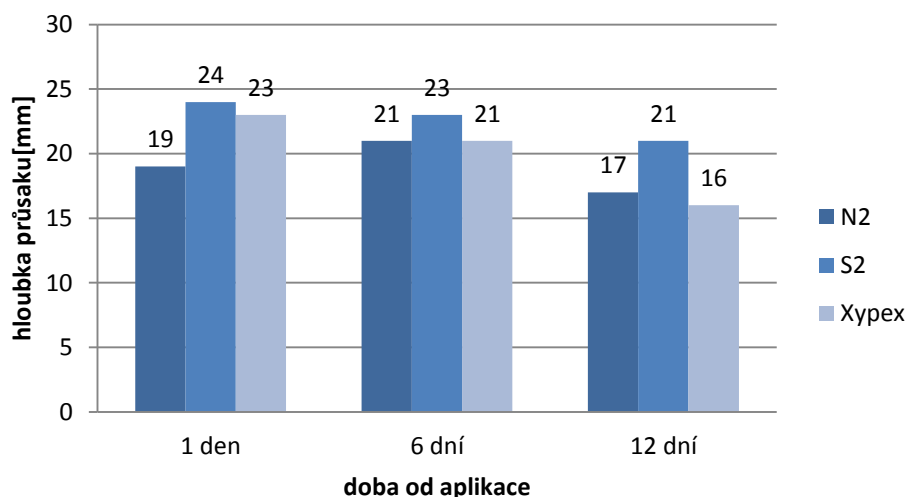
Obrázek 81: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení hloubka 5 – 6 cm od povrchu

Analýza v hloubce do šesti centimetrů od povrchu rovněž potvrdila výskyt krystalových struktur. Opět byly v porovnání s povrchovými vrstvami snadno dostupnými průniku krystalizující hmoty jednodušší a méně komplexní. Při komparaci s prvním dnem od aplikace, ale vykazovaly citelný nárůst krystalů. Na obrázku 81 je patrný lokální vývin krystalové struktury, který by mohl signalizovat lokální průsak a následné vytvoření složitější krystalové bariéry. Dle tvaru i lokace lze usuzovat, že při pokračující krystalizaci, by došlo opět k vytvoření kulovitěho uskupení pozorovaném u povrchových vrstev.

Ve všech krocích analýzy sekundární krystalizace, byla rovněž pro všechny vzorky provedena detailní analýza krystalové struktury za cílem analýzy hustoty a tvaru krystalové struktury pod zvětšením mikroskopu 25000×.

Krystaly na obrázcích 82 až 84 krystalizující hmoty Xypex, reprezentují shodný jev, jež byl pozorován u Xypexu, N2 i S2. S přibývajícím dobou působení krystalizujících hmot docházelo k pozorovatelnému nárůstu objemu a komplexnosti struktury krystalů. Rozdíly mezi jednotlivými recepturami Xypex, N2 a S2 ve velikostech a tvarech jednotlivých krystalů i celkové vytvářené struktuře krystalů, nebylo ale možno přesvědčivě prokázat. Analýza prvkového složení krystalů, za použití energo-disperzní spektrometrie (EDS), neprokázala výrazné rozdíly mezi jednotlivými krystaly receptur. Ty byly složeny z prvků C, O, Al, Si, S, K, Ca a dominantní část složení vždy tvořily kyslík a vápník.





Obrázek 85: Hloubka průsaku tlakovou vodou v období 1-12 dnů od aplikace s aplikovanými krystalizačními hydroizolacemi

V celkovém závěru lze konstatovat, že na základě provedených pozorování vývoje sekundární krystalizace, byl prokázán nárůst krystalů, novotvarů v pórové struktuře betonu. Z dosažených výsledků je zřejmé, že prodlužující se interval od působení od počátku krystalizace má za následek citelný nárůst tvorby krystalové struktury v pórech, jednak co do své velikosti (délky, průměru), ale také do počtu a vzájemné spletnosti.

Během celého pozorování zkušebních vzorků jasně zřetelné, že se krystaly a krystalové struktury tvořili v celé struktuře betonu, jež byla přístupna vodě. V místech, kde nebyla voda přítomna, tvorba novotvarů, krystalů nezačala. Během pozorování bylo taky patrné, že krystaly vyplňovaly nejvíce pórovou strukturu o velikostech přibližně 20-200 μm a po dvanácti dnech působení došlo k tvorbě krystalů, které byly vlásečnicového až jehlicovitého tvaru, o délce jednotlivého krystalu do cca 10 – 15 μm , a tloušťce narůstající s délkou do 500 nm.

V závěru je ale nutno zdůraznit, že tato analýza ukázala samotný vývoj krystalové struktury v prvních dnech po aplikaci krystalizujících hmot, která je pro správný vývoj hydroizolace kritická. Díky omezení velikosti vzorku při analýze SEM, ale není zkouškou prokazující hydroizolační vlastnosti krystalické hydroizolace v betonové konstrukci jako celku. U ní, je vždy použití hmot sekundární krystalizace silně ovlivněno především technologickou kázní při aplikaci, a následném ošetřování.

11.2 Těsnění betonu za pomoci krystalizujících hmot

V úvodu práce bylo již uvedeno, krystalizující materiály, dle výrobce Xypex zvyšují dodatečné autogenní zhojení betonu. U běžného betonu se uvádí zhojení do šíře trhliny 0,15 mm, a např. Lamond a Pielert [79] uvádí zhojení až do šířky 0,2 mm [40, 73, 74].

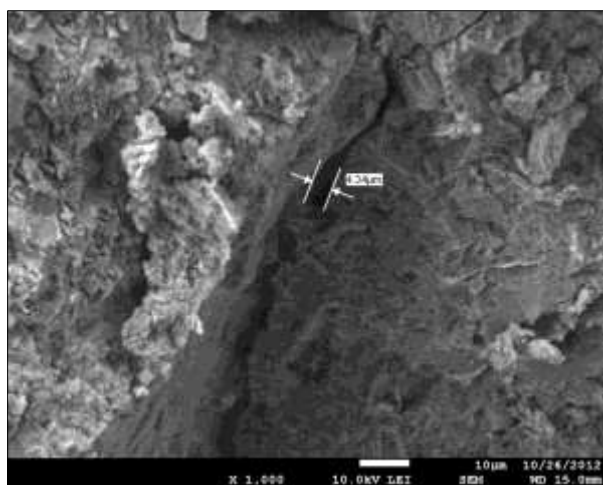
V dostupné literatuře týkající se krystalizujících hmot, ale nebylo toto tvrzení doloženo žádným praktickým testem, nebo SEM analýzou prokazující šíři takto zhojených trhlin. Vzhledem k tomu, že tvorba krystalů při aplikaci dodatečné hydroizolace na povrch betonu nejvíce ovlivňuje těsnost povrchových trhlin a pórů, byla pro potvrzení schopnosti

navržených receptur N2 a S2 napomáhat těsnění především povrchových trhlin, navržena experimentální metoda. U ní, byl současně účinek krystalizující hmoty komparován s výsledky při aplikaci na materiály bez cementové matrice.

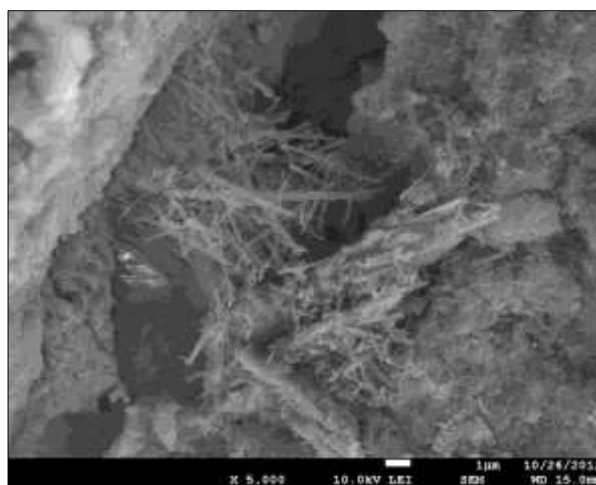
Byly porovnány vzorky ošetřené komerční recepturou Xypex Concentrate, navržených receptur S2, N2 s příměsí popílku, a referenčního betonu bez dodatečné krystalizující hydroizolace. Pro zkoušku bylo vytvořeno dvanáct zkušebních těles, kvádry o rozměru $150 \times 150 \times 150$ mm a složení směsi pro výrobu betonu na 1m^3 : frakce 0–4 - 850 kg, 4–16 – 900 kg, cement 32,5 – 400 kg, voda 240 kg, které byly po devadesáti dnech zrání, rozlomeny dle zkoušky ČSN EN 1338, pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu.

Z každého vzorku tedy následně vznikla dvě tělesa, u nichž byl předpokládán koncentrovaný výskyt mikrotrhlin na lomové ploše. Tělesa byla poté uložena na sedm dní do vodní lázně, a následně, po vyjmutí z vodní lázně, byly na lomové plochy těles aplikovány krystalizující hmoty. Vždy jeden typ (Xypex, S2, N2) na tři tělesa. Zbývající tři tělesa, byla ponechána bez ošetření a posloužila pro referenční srovnání. Pro ověření tvorby krystalů ve struktuře necementových materiálů byla zvolena jako podkladní materiál přírodní pemza, na niž byl aplikován Xypex Concentrate. Tyto vzorky byly po zatuhnutí krystalizující hmoty na povrchu uloženy do vodního prostředí po dobu devadesáti dnů, z důvodu dostatečného vývinu krystalů.

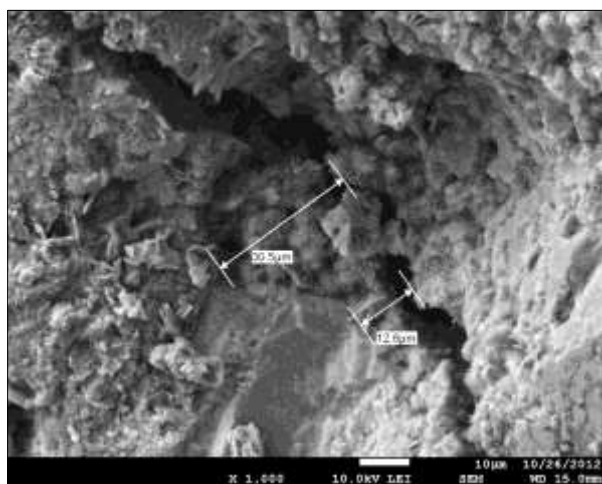
Po vyjmutí, byl z každého tělesa odebrán minimálně jeden vzorek z hloubky do 1 cm od povrchu. A to způsobem, kdy bylo pomocí vodní pily kolmo k povrchu lomové plochy těles vyříznut vzorek nepravidelného tvaru o rozměrech 150×20 mm $\times$ výška rozlomené poloviny krychle 150 mm, a z něj vyštípnut vzorek, u kterého, byla část tvořena povrchem pokrytým krystalizující hmotou. Tyto vzorky byly podrobeny analýze za použití skenovací elektronového mikroskopu JEOL JSM-7600F a prvkové kvantifikační analýze energo-disperzním spektrometrem (EDS), se zaměřením na trhliny u rozhraní povrch - krystalizující hmota, cílené na jednotlivé krystaly vyplňující pórovou strukturu vzorků.



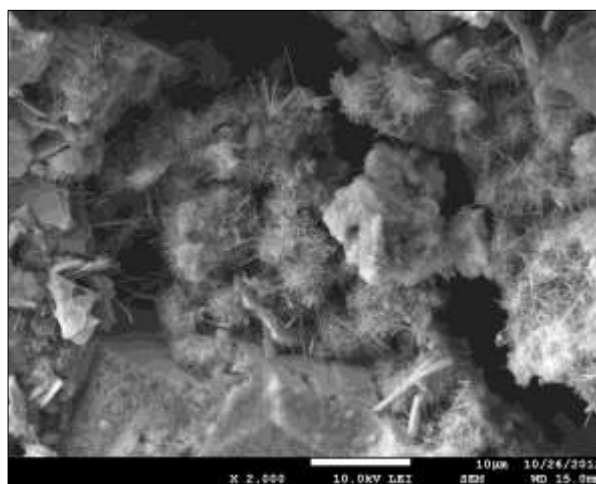
Obrázek 86: Xypex - krystaly překlenující trhlinu (1000x zvětšení)



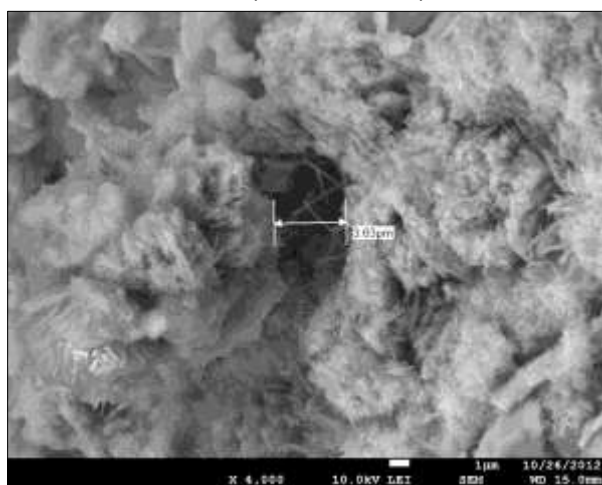
Obrázek 87: Xypex - detail krystalů překlenující trhlinu (5000x zvětšení)



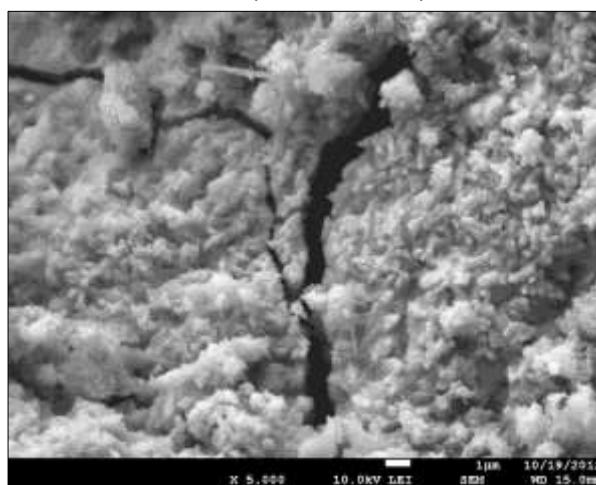
Obrázek 88: N2 receptura - krystaly překlenující trhlinu (1000x zvětšení)



Obrázek 89: N2 receptura - detail krystalů překlenující trhlinu (2000x zvětšení)



Obrázek 90: S2 receptura - krystaly překlenující trhlinu (4000x zvětšení)



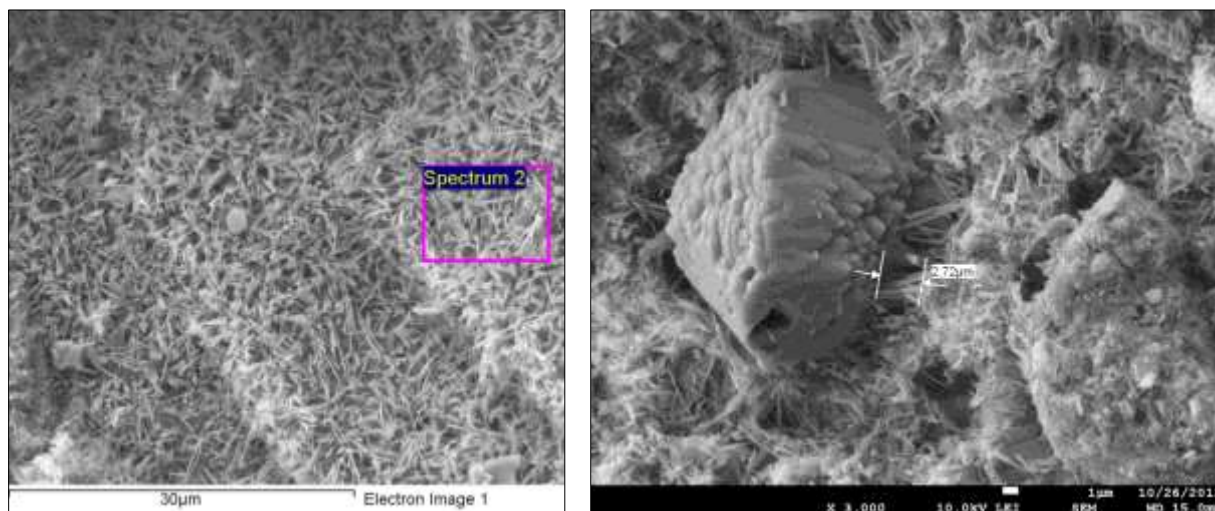
Obrázek 91: Referenční beton bez ošetření krystalizujícími hmotami (5000x zvětšení)

Během testování schopnosti hojení povrchových vrstev betonu bylo potvrzeno, že u vzorků ošetřených krystalizujícími hmotami (Xypex, S2 a N2), byly shodně se závěry uvedenými v sekci 11.1, v celé pozorované struktuře betonu která byla přístupna vodě, nalezeny jehlicovité krystaly vyplňující dutiny, póry a trhliny betonu. V místech, kde nebyla voda přítomna, tvorba novotvarů, krystalů nezačala a trhlinu nezacelila. Mezi jednotlivými recepturami ovšem nebyl pozorován viditelný rozdíl v množství, nebo struktuře tvořených krystalů (viz obrázek 89 a 90).

Jak lze vidět na obrázku 88 a 89, autogenní hojení betonu, i účinnost krystalizujících hmot jsou komplexní děje. Jejich fungování i následná schopnost těsnit pórovou strukturu, může být zesíleno například zanášením trhlín a dutin betonu mikročásticemi z okolí, které následně pomáhají v jejich utěsnění. Při analýze byly nalezeny krystaly vlásenčitého až jehlicovitého tvaru, o délce jednotlivého krystalu do 10 μm , v průměru ovšem okolo 5 μm , které u všech receptur (Xypex, N2, S2), plně nebo z části překlenovaly trhliny. Na obrázku 91, je pro porovnání zdokumentována trhlina referenčního betonu bez dodatečné hydroizolace.

Ten jasně deklaruje, že u referenčního betonu během stejného časového intervalu nedošlo k vývinu jehlicovitých krystalů a ani částečné překlenutí trhliny.

Na vzorcích, u kterých sloužil jako podkladní materiál přírodní pemza, byly nalezeny shodné vlásečnicové až jehlicovité krystaly o délce jednotlivého krystalu do cca 5 μm , vyplňující povrch ošetřený recepturou Xypex Concentrate (obrázek 92).



Obrázek 92: Krystaly na povrchu pórů struktury přírodní pemzy tělesa s aplikovanou recepturou Xypex při zvětšení 3000 $\times$

V tomto konkrétním případě délka krystalů odpovídala přibližně polovině délky krystalů vytvořenými při aplikaci na betonový podklad. Při srovnání s výsledky z části 11.1, kde dosahovaly jehlicovité krystaly Xypexu, N2, S2 délky 10-15 μm už po šesti dnech od aplikace (např. na obrázku 72), byly tedy výrazně menší.

Z těchto výsledků vyplývá, že krystalizující materiály mohou být použity pro zvyšování voděodolnosti materiálů bez cementové matrice, ale převážně délka tvořených krystalů je při takovéto aplikaci omezena. Z tohoto důvodu se lze domnívat, že rovněž konečný efekt překlenutí trhliny nebo póru bude nižší, než při aplikaci na betonový povrch. Rovněž se lze domnívat, že krystalizující efekt bude v dlouhém časovém horizontu oproti betonovému podkladu značně omezen díky množství dostupného cementu (obsaženého pouze v samotné receptuře), a tedy i produktů jeho hydratace, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, které jsou nutné pro reakci krystalizujících hmot a tvorby krystalů ve struktuře [44, 32, 62].

Tato zvolená experimentální analýza byla určena pro prvotní srovnání účinnosti krystalizujících receptur na autogenní hojení betonu. Během tvorby a odlaďování metodiky této experimentální analýzy se největší překážkou ukázalo praktické, kontrolované vytvoření statických trhlin o definovaném rozměru. Rovněž díky nutnému omezení konečné velikosti vzorků pro SEM analýzu na maximálně 1 cm v průměru nebylo dosaženo pozorovatelných statických trhlin větších než cca 0,05 mm. Proto na základě tohoto konkrétního pozorování lze konstatovat, že všechny tyto krystalizující hydroizolační hmoty mají shodnou schopnost těsnit, překlenovat trhliny do cca 0,05 mm již devadesát dní od aplikace. Vyhodnocení této analýzy jsou uvedena v příloze práce a shodně se závěry předchozí části 11.1 potvrdila, že

krystaly jsou složeny z prvků C, O, Al, Si, S, K, Ca s dominantním zastoupením kyslíku a vápníku.

Tato problematika a celková detailní analýza schopnosti navržených receptur těsnit póry a nově vznikající trhliny v konstrukci, by pro vyvození jednoznačných závěrů obsáhla samostatnou podrobnou studii, která by ovšem přesáhla rámec této disertační práce. Do ní by se musela jistě promítnout například schopnost autogenního hojení neošetřeného betonu v dlouhodobém horizontu, reverzibilita aplikovaných hydroizolací, pohyb konstrukce, technologická kázeň při aplikaci a následném ošetřování, atd. [76, 106].

Díky poznatkům dosažným touto experimentální metodou by rovněž měl být navazujícím výzkumu pro analýzu maximální šířky trhliny překlenuté vzniklými krystaly upraven postup analýzy.

11.3 Vliv času a prostředí na mikrostrukturu betonu

Tato část měření probíhala kontinuálně v souladu s řešením etap 10.2 a 10.3. Vždy po vyjmutí těles z korozních prostředí byly v jednotlivých etapách (6, 12 a 18 měsíců uložení), odebrány vhodné zkušební vzorky o velikosti přibližně 8 mm, maximálně však 1,5 cm v průměru, vždy z hloubky do 1,5 cm od povrchu ošetřeného krystalizující hmotou. Následně byla provedena mikrostrukturální analýza za pomoci SEM elektronového mikroskopu NanoSEM - FEI Nova 200 (FEG/SEM) s přídatným modulem EDAX - Pegasus X4M (EDS/EBSD) pro energo-disperzní spektroskopickou analýzu.

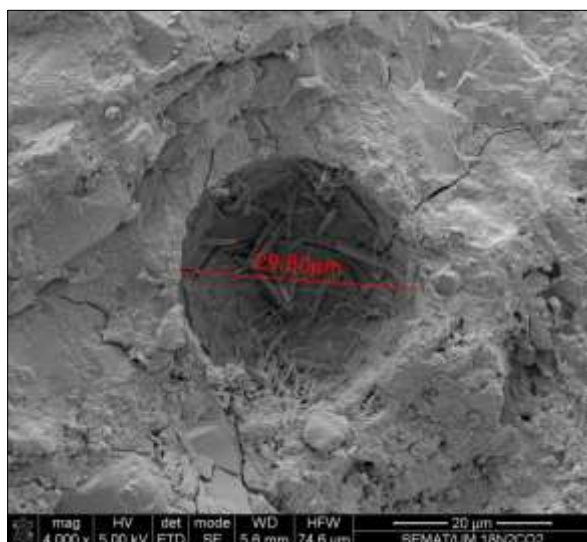
Cílem testování, bylo analyzovat a vzájemně komparovat krystaly v pórové struktuře betonu s aplikovanými recepturami N2, S2 a referenční receptury bez ošetření pod vlivem působení rozdílných korozních činitelů.

Z důvodu velkého množství analyzovaných vzorků byly v této práci doloženy reprezentativní výsledky po osmnácti měsících uložení v korozních prostředích. Ty reprezentující trend pozorovaný u souboru vzorků daného krystalizujícího materiálu v korozním prostředí. Pro každou recepturu byla provedena EDS - prvková kvantifikační analýza cílená na jednotlivé krystaly, vyplňující pórovou strukturu vzorků. Dosažené výsledky jsou součástí přílohy na straně 176 až 179.

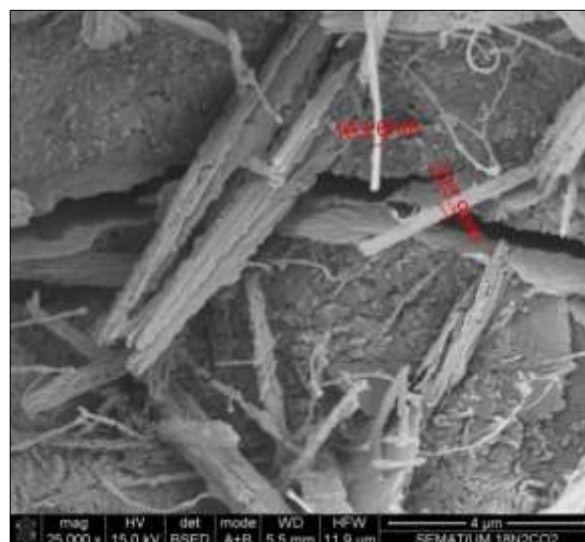
11.3.1 Plynné prostředí – působení vysokých koncentrací CO₂

Na následujících obrázcích 93 až 98 jsou doloženy krystaly vyvinuté v pórové struktuře betonu po osmnácti měsících v prostředí s vysokou koncentrací CO₂ (až 98%). Provedená RTG analýza ve vzorcích potvrdila výskyt živce, kalcitu, portlanditu, β-křemene a stopově ettringitu a pomocí energo-disperzní spektrometrie (EDS) byly při přímé analýze krystalů nalezeny prvky C, O, Al, Si, S, K, Ca u kterých měly dominantní zastoupení kyslík a vápník.

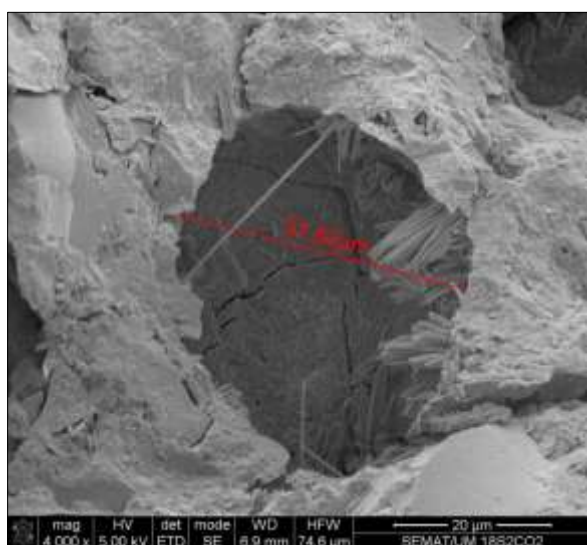
U vzorků bylo rovněž měřeno pH, které bylo dle tabulky 46 pro nátěr N2 - 11,62, pro S2 stěrku 11,73 a 11,5 pro referenční beton bez ošetření.



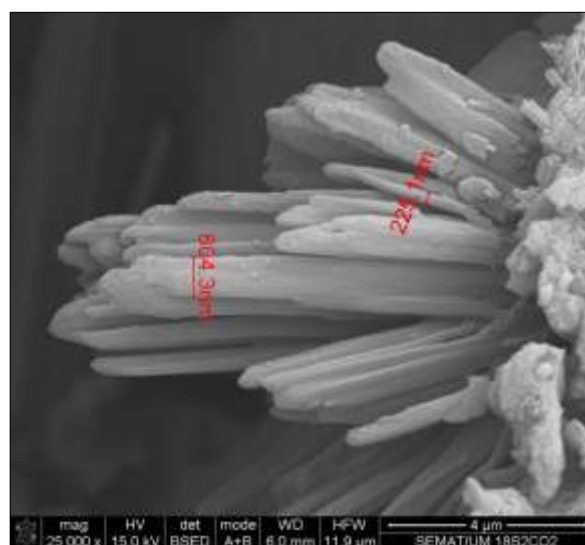
Obrázek 93: N2 receptura v prostředí CO_2 – 4000× zvětšení



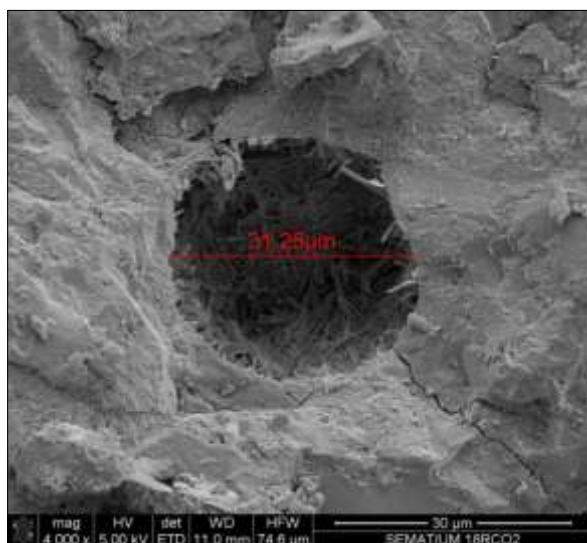
Obrázek 94: N2 receptura v prostředí CO_2 – 25000× zvětšení



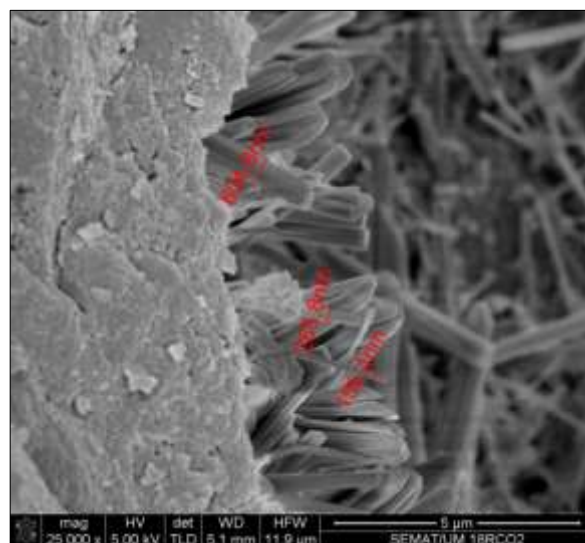
Obrázek 95: S2 receptura v prostředí CO_2 – 4000× zvětšení



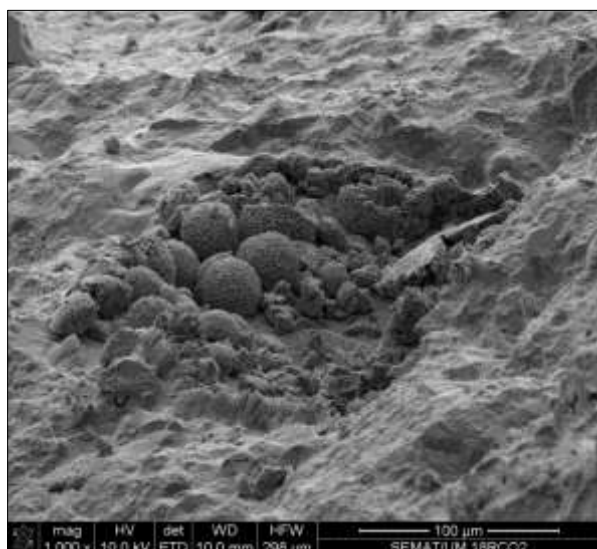
Obrázek 96: S2 receptura v prostředí CO_2 – 25000× zvětšení



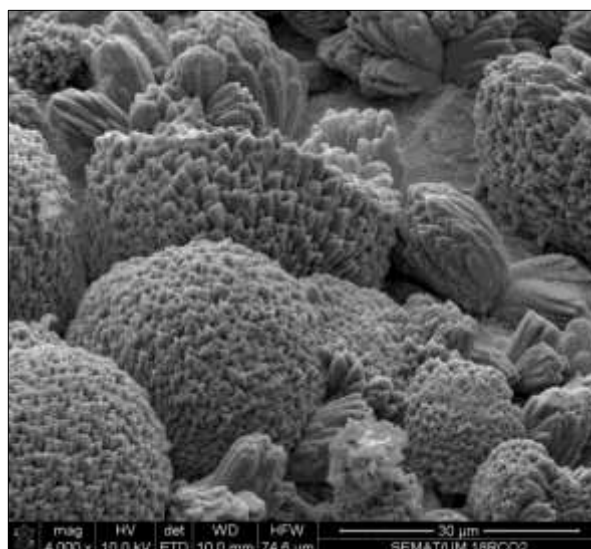
Obrázek 97: Referenční receptura bez ošetření hydroizolací v prostředí CO_2 – 4000× zvětšení



Obrázek 98: Referenční receptura bez ošetření hydroizolací v prostředí CO_2 – 25000× zvětšení



Obrázek 99: Krystaly v lomové ploše vzorků s N2, S2 i referenčního betonu v prostředí CO₂ - 1000× zvětšení



Obrázek 100: Krystaly v lomové ploše vzorků N2, S2 i referenčního betonu v prostředí CO₂ - 4000× zvětšení

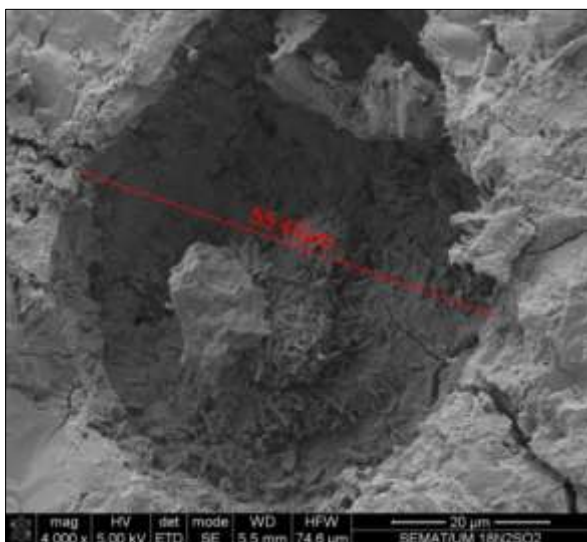
11.3.2 Plynné prostředí – působení vysokých koncentrací SO₂

Na následujících obrázcích 101 až 106, jsou zdokumentovány krystaly vyvinuté v pórové struktuře betonu po osmnácti měsících v prostředí vysokou koncentrací SO₂. V recepturách S2 a N2, byly nalezeny krystaly a útvary vyplňující póry betonu, které byly tvarově i velikostně srovnatelné s krystaly nalezenými v prostředí vysoké koncentrace CO₂.

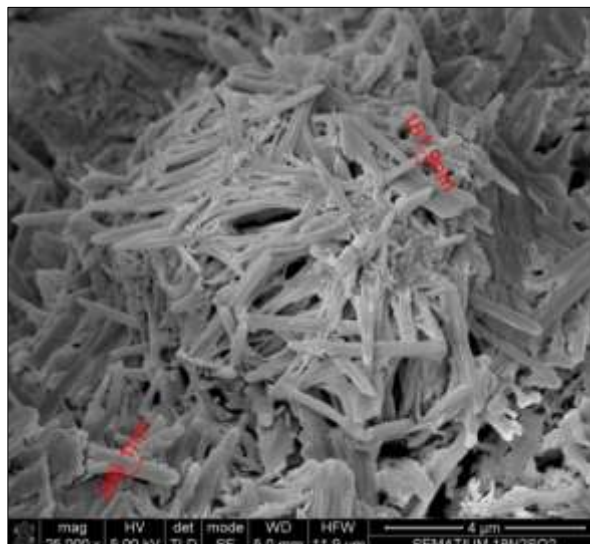
V prostředí síranů ovšem analyzované vzorky vykázaly citelně vyšší počet krystalů a těsnění pórové struktury. Jednotlivé krystaly rovněž tvořily velmi kompaktní struktury vyplňující póry (obrázek 102 a 103).

U referenční receptury se jehlicovité, popřípadě vláknité krystaly prakticky nevykytovaly a pórová struktura pozorovaných vzorků byla těmito charakteristickými krystaly vyplněna jen velmi ojediněle. RTG analýza ve vzorcích potvrdila výskyt živce, kalcitu, portlanditu sádrovce a β-křemene. U krystalů pomocí energo-disperzní spektrometrie (EDS) byly identifikovány hlavní prvky C, O, Al, Si, S, K, Ca u kterých byly opět dominantně zastoupeny kyslík a vápník.

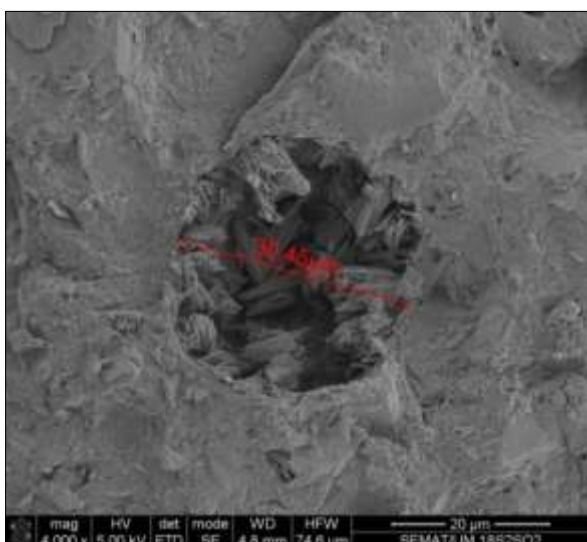
Hodnoty pH vzorků byly podle tabulky 46 pro nátěr N2 - 11,32, pro stěrku S2 - 11,51 a pro referenční beton bez ošetření 11,13.



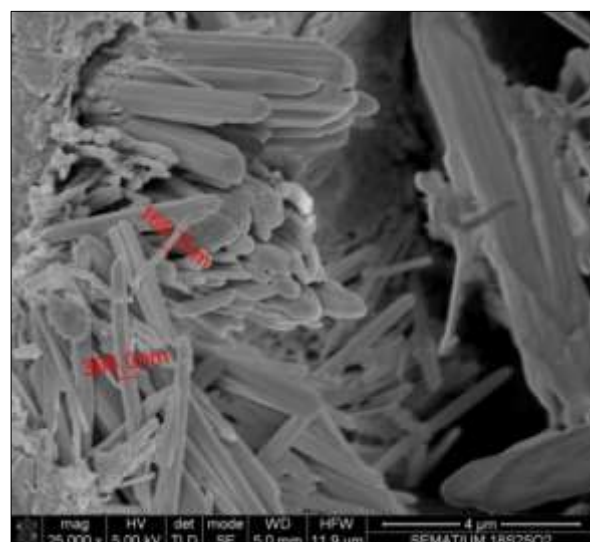
Obrázek 101: N2 receptura v prostředí SO_2 – 4000× zvětšení



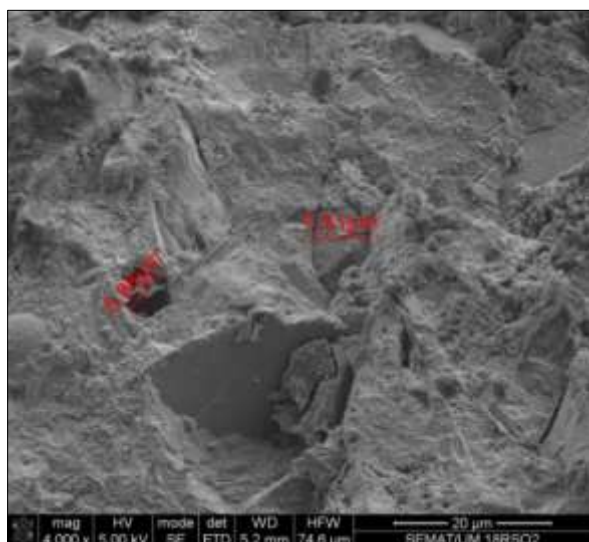
Obrázek 102: N2 receptura v prostředí SO_2 – 25000× zvětšení



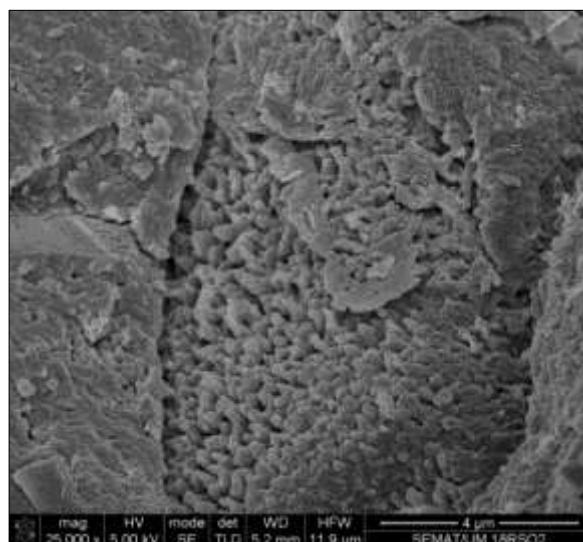
Obrázek 103: S2 receptura v prostředí SO_2 – 4000× zvětšení



Obrázek 104: S2 receptura v prostředí SO_2 – 25000× zvětšení



Obrázek 105: Referenční receptura v prostředí SO_2 – 4000× zvětšení



Obrázek 106: Referenční receptura v prostředí SO_2 – 25000× zvětšení

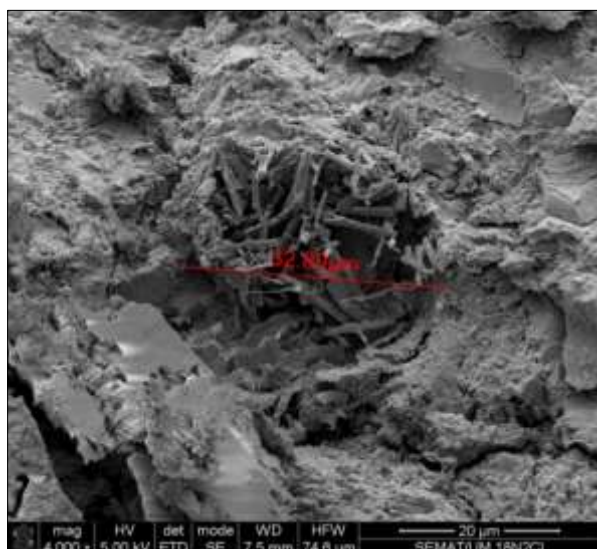
11.3.3 Kapalně prostředí - působení chloridů

Na následujících obrázcích 107 až 112 jsou zdokumentovány krystaly vyvinuté v pórové struktuře betonu po osmnácti měsících v kapalném prostředí 100 g NaCl/l.

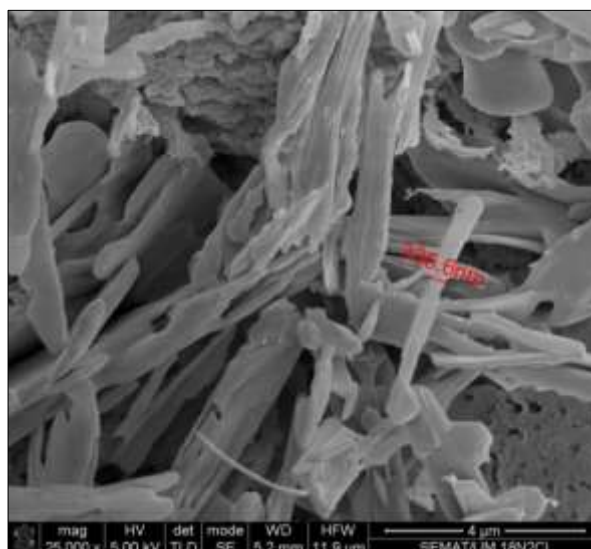
Analýza opět pozitivně prokázala těsnění pórového systému betonu, ovšem v porovnání tohoto kapalného prostředí s prostředími CO_2 a SO_2 je jasně patrné, že nalezené krystaly jsou rozdílných tvarů i velikostí.

Na obrázcích 107 a 108 jsou uvedeny vzniklé krystaly tvořené ve struktuře vzorků s N2 recepturou, která vykazovala pH - 11,13. Na následujících obrázcích 109 a 110 u stěrky S2 dále zachyceny velmi výrazné shluky hexagonálních tyčinkovitých krystalů, vyplňujícími póry různých velikostí a připomínající svým tvarem krystaly síranu (pH vzorků bylo 10,8).

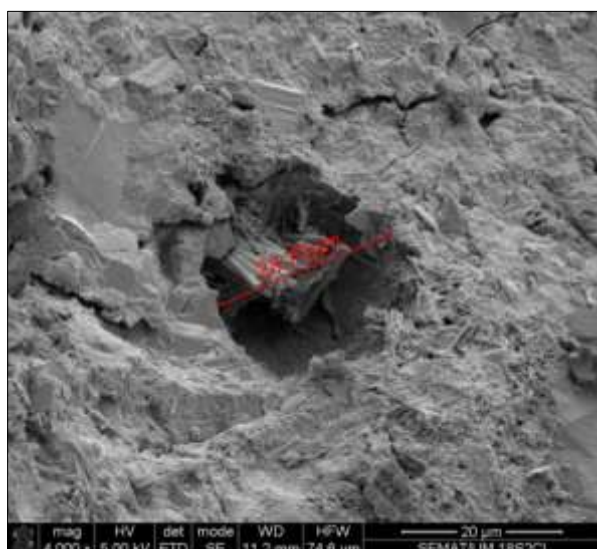
U referenčního betonu s pH 11,53, byly na obrázcích 111 a 112 rovněž zdokumentovány tyčinkovité krystaly vizuálně podobné vzorkům ošetřeným směsí N2. Shodně s předchozími analýzami vzorků uložených v plynných prostředích bylo ale jasně deklarováno, že v referenčním betonu krystaly vyplňovaly pórovou strukturu výrazně méně, nežli u vzorku s krystalizující hydroizolací. EDS analýza potvrdila prvkové složení krystalů shodně s prostředími CO_2 a SO_2 , včetně dominantního postavení kyslíku a vápníku ve složení krystalů.



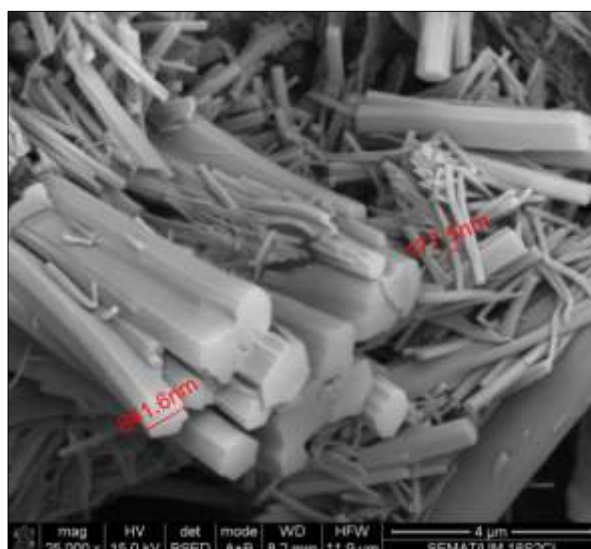
Obrázek 107: N2 receptura v prostředí při působení NaCl/I – 4000× zvětšení



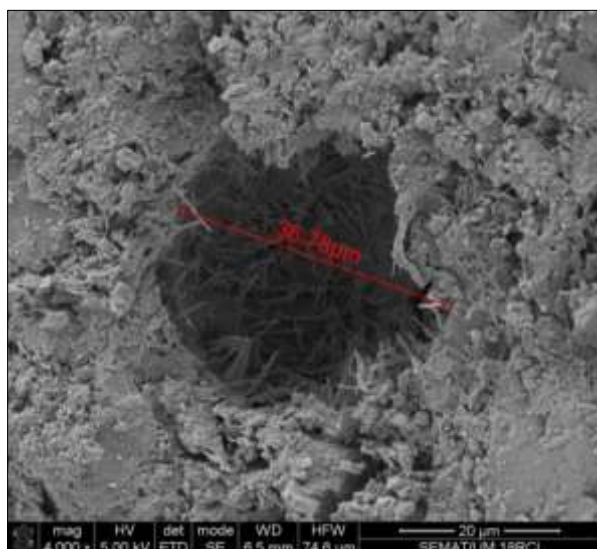
Obrázek 108: N2 receptura v prostředí při působení NaCl/I – 25000× zvětšení



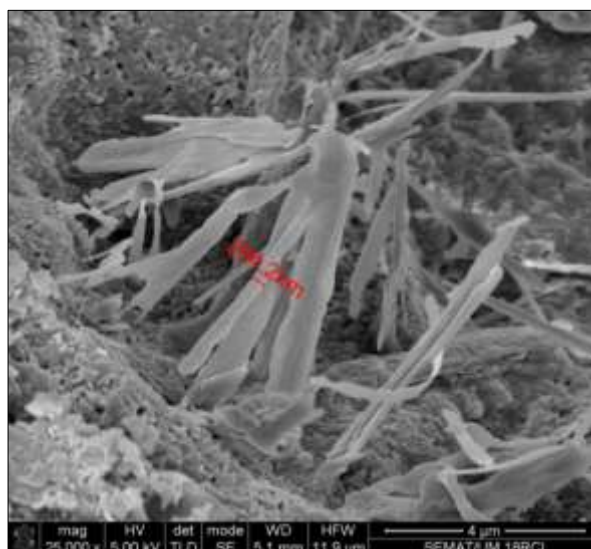
Obrázek 109: S2 receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 4000× zvětšení



Obrázek 110: S2 receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 25000× zvětšení



Obrázek 111: Referenční receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/l – 4000× zvětšení



Obrázek 112: Referenční receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/l – 2500× zvětšení

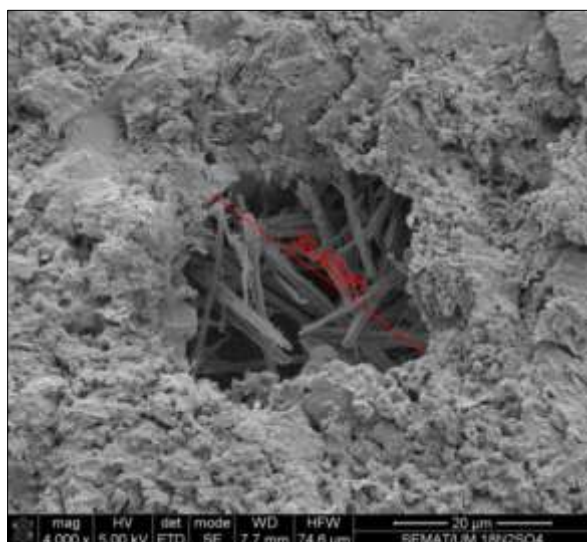
11.3.4 Kapalně prostředí – působení síranů

Na obrázcích 113 až 118 jsou krystaly vyvinuté v pórové struktuře betonu po osmnácti měsících v prostředí o koncentraci 34,6 g $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{l}$.

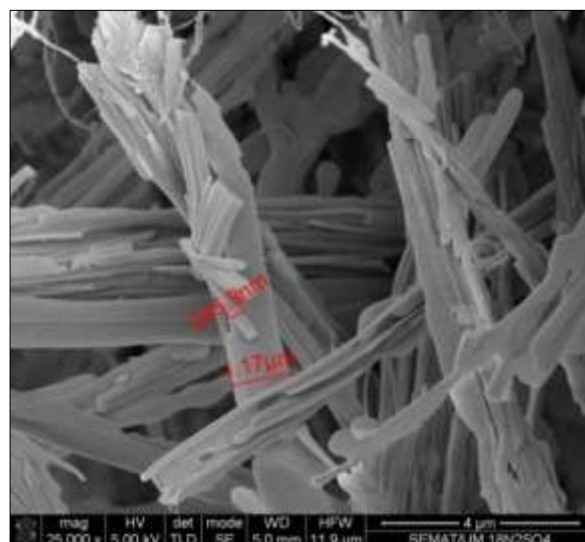
U receptur N2, S2 lze shodně s prostředím chloridů nalézt tvarově a velikostně identické krystaly, jenž se ale opět liší svým tvarem i velikostí oproti krystalům tvořeným v plynných korozních prostředích.

Při porovnání analyzovaných vzorků lze nalézt shody tvaru krystalů mezi jednotlivými recepturami. Například srovnání krystalů receptury N2 na obrázcích 108 a 114 a dále S2 krystalů na obrázcích 116 a 110. Tvar krystalů byl tedy obdobný pro danou recepturu v prostředí chloridů i síranů. Při vzájemném porovnání těsnění pórové struktury mezi těmito prostředními analýza prokázala, že krystaly v prostředí síranů jsou mnohem vyvinutější v množství i komplexnosti. EDS analýza ale opakovaně potvrdila shodné prvkové složení krystalů se všemi předchozími prostředními.

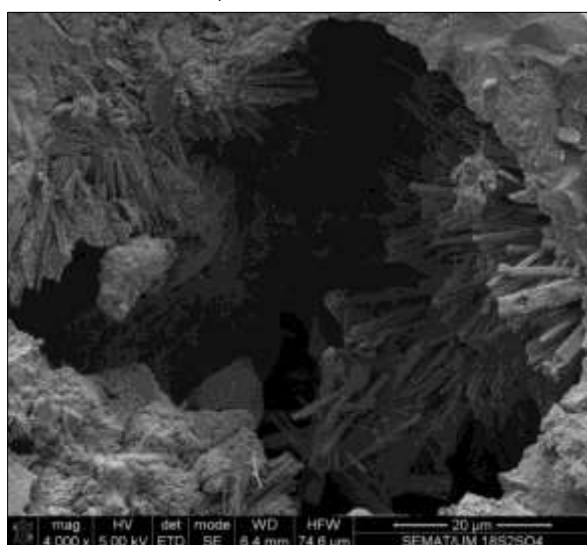
U referenčního vzorku bez ošetření hydroizolací (11,26 pH) nebyly po osmnácti měsících v tomto prostředí jehlicovité nebo tyčinkovité krystaly nalezeny. Byly ale nalezeny pseudomorfózy portlanditu a pravděpodobně aragonit, zdokumentované na obrázcích 117 a 118. Ty byly rovněž potvrzeny RTG analýzou, kterou byly identifikovány živce, kalcit, portlandit, β -křemen, aragonit a ettringit. Nalezený aragonit je modifikací CaCO_3 . Do jaké míry se ale síranové ionty podílejí na tvorbě aragonitu, by vyžadovalo další podrobnou samostatnou studii [107].



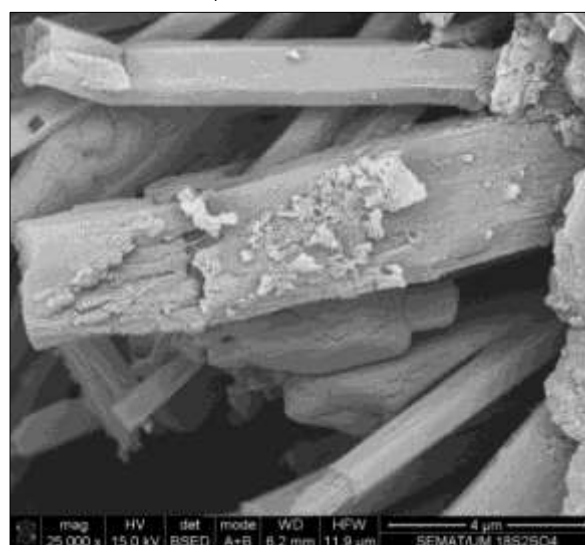
Obrázek 113: N2 receptura v prostředí při působení SO_4 – 4000 × zvětšení



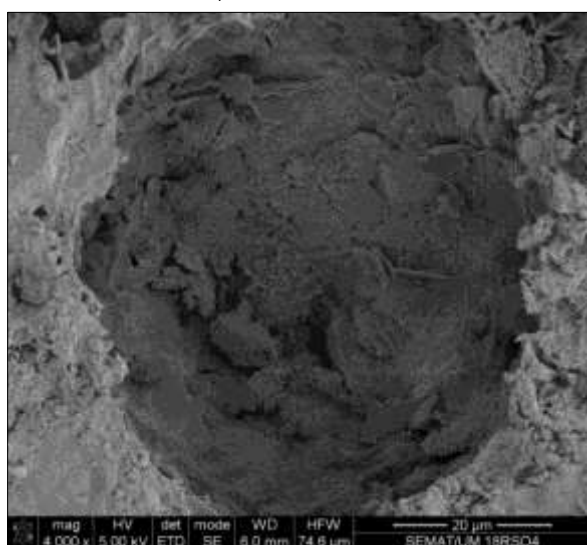
Obrázek 114: N2 receptura v prostředí při působení SO_4 – 25000 × zvětšení



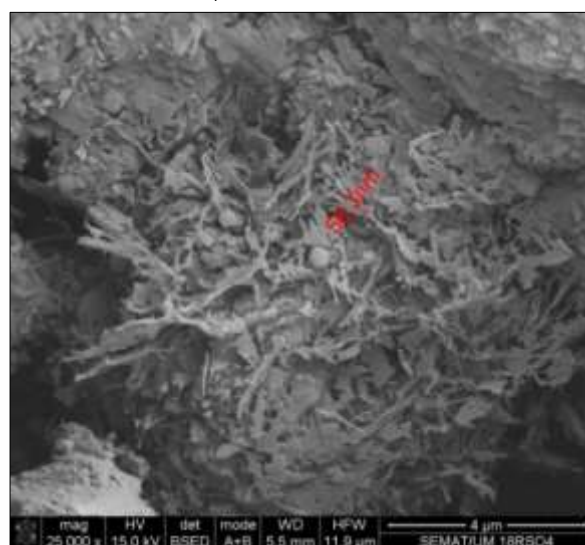
Obrázek 115: S2 receptura v prostředí při působení SO_4 – 4000 × zvětšení



Obrázek 116: S2 receptura v prostředí při působení SO_4 – 25000 × zvětšení

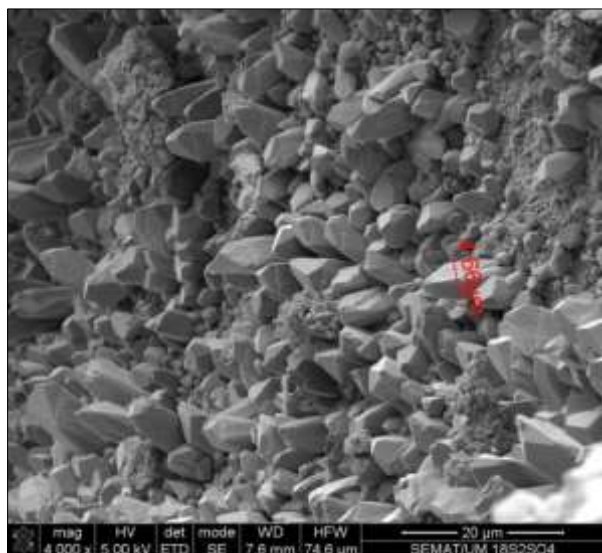


Obrázek 117: Referenční receptura v prostředí při působení SO_4 – 4000 × zvětšení

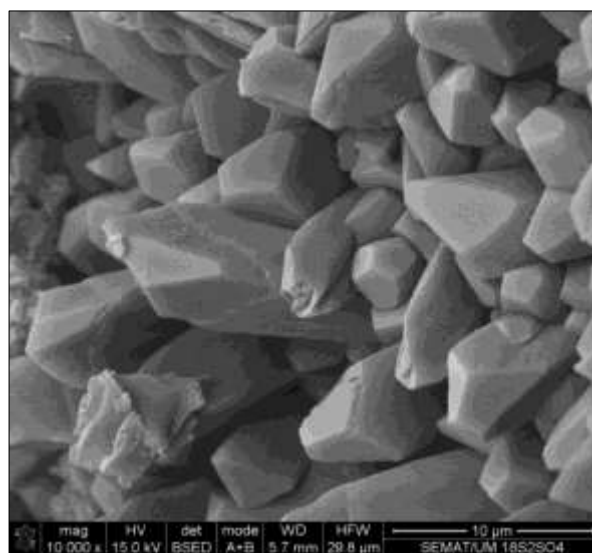


Obrázek 118: Referenční receptura v prostředí při působení SO_4 – 25000 × zvětšení

Na následujících obrázcích 119 a 120, je zdokumentován detail krystalů vyplňujících pórovou strukturu betonu, která pravděpodobně zůstala bez kontaktu s aplikovanou hydroizolací shodně pozorovaný u receptury N2 i S2. Tyto krystaly pravděpodobně kalcitu byly v menší míře nalezeny i u referenční receptury.



Obrázek 119: krystaly v pórové struktuře vzorků s N2, S2 recepturou v prostředí SO4 - 4000× zvětšení



Obrázek 120: krystaly v pórové struktuře vzorků s N2 a S2 recepturou v prostředí SO4 - 10000× zvětšení

Na základě analýzy receptur N2, S2 ve srovnání se vzorky bez ošetření krystalizující hydroizolací lze dedukovat, že pozorované krystaly vyplňující pórovou strukturu betonu u vzorků receptur N2, S2 jsou ve velké míře tvořeny tyčinkovitými až jehlicovitými krystaly spolu s amorfními útvary CSH.

Ve srovnání s referenční recepturou vzorky s aplikovanou krystalizující hydroizolací, vždy vykazovaly viditelně vyšší tvorbu jehlicovitých krystalů a jejich vyplnění pórové struktury betonu, nežli betonu bez aplikované dodatečné hydroizolace. Výsledky tohoto mikroskopického pozorování jsou tedy v souladu s výsledky dosaženými v etapě II. a potvrzují funkčnost navrženého nátěru N2 a stěrky S2 utěsňujících pórovou strukturu betonu. Tyto nátěry vždy díky tvorbě krystalů vykazaly vyšší odolnost proti působení vody, nežli referenční beton v daném korozním prostředí.

11.4 Ekotoxicita, obsah radionuklidů a hygienická nezávadnost

Vzhledem k praktickému zaměření této práce, s cílem výzkumu a vývoje v praxi využitelných silikátových hydroizolačních a plynotěsnících povrchových úprav se schopností dodatečné sekundární krystalizace, byly provedeny zkoušky ekotoxicity, obsahu radionuklidů a zkoušky hygienické nezávadnosti navržených receptur.

Laboratoře Ústavu THD a spolupracující firmy Betosan s.r.o. nedisponují těmito vysoce specializovanými laboratorními metodami, proto byly tyto zkoušky zadány k realizaci externím akreditovaným laboratořím.

Zkouška ekotoxicity byla provedena v laboratořích Ústavu chemie FAST VUT Brno. Testy receptur na obsah radionuklidů, byly zadány laboratoři Výzkumného ústavu stavebních hmot a.s. v Brně. Zkouška hygienické nezávadnosti navržených receptur nátěrů a stěrek byla provedena v laboratořích Státního zdravotního ústavu v Praze.

Na obrázku 122 a 123 v příloze, jsou doloženy protokoly z výsledků laboratorních zkoušek, z nichž vyplývá, že zkoušené vzorky směsí N2 a S2 z pohledu obsahu radionuklidů vyhovují příslušným vyhláškám (zejména vyhlášce číslo 307/2002 Sb. v platném znění) a požadavkům na obsah přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech určených k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi.

Zkoušky ekotoxicity navržených receptur nátěru N2 a stěrky S2, byly v laboratořích Ústavu chemie FAST VUT Brno provedeny podle Metodického doporučení SZÚ pro hodnocení škodlivých a nežádoucích látek uvolňujících se z vybraných skupin výrobků pro stavby do vody a půdy (Acta hygienica, epidemiologica et microbiologica č.3/2001).

Bylo použito zkoušky podle ČSN EN ISO 7346-2 Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby, a ČSN EN ISO 6341 Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus - Zkouška akutní toxicity. Dále také ČSN EN ISO 8692 Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas a test inhibice růstu kořene hořčice *Sinapis Alba*.

Zkoušky ekotoxicity přinesly pozitivní výsledky, kdy za velmi přísných podmínek při těchto zkouškách došlo pouze k mírné reakci některých testovaných organismů. U zkoušek testu na *Thamnocephalus platyurus*, *Sinapis alba*, a *Desmodesmus quadricauda*, došlo za velmi přísných podmínek testování pouze k mírné reakci některých testovaných organismů. Výluhy vzorků N2 i S2 byly netoxické pro korýše, semena i řasy. Jelikož byly výsledky všech testů negativní, je výsledkem hodnocení zdravotní nezávadnosti výrobku „použití bez omezení.“

V laboratořích Státního zdravotního ústavu v Praze, byly na navržených recepturách nátěrů a stěrek N2 a S2 provedeny zkoušky hygienické nezávadnosti. Konkrétně se jednalo o zkoušku bezpečnosti materiálu pro styk s pitnou vodou, která používá výluhový test hodnocený dle § 3 vyhlášky MZ č. 409/2005 Sb.

Výsledný protokol z laboratoře SZÚ Praha je uveden na obrázku 124, a z výsledků těchto testů vyplývá, že navržené nátěry a stěrky splňují hygienické požadavky na cementové výrobky přicházející do styku s pitnou vodou a není námitek proti jejich použití pro trvalý styk s pitnou vodou.

F. CELKOVÁ DISKUSE A ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Výsledné zhodnocení provedeného souboru zkoušek a dosažených výsledků fyzikálně mechanických a fyzikálně chemických vlastností v této práci by mělo vést ke komplexnímu zhodnocení zkoumaných receptur, především z pohledu vodotěsnosti a trvanlivosti ošerého betonu, se zaměřením na chemicky agresivní prostředí.

V první etapě této práce bylo navrženo dvacet čtyři vstupních receptur polymercementových nátěrů a stěrů s použitím odpadních (druhotných) surovin. Ve složení receptur jsou zakomponovány minerální příměsi jako částečná náhrada portlandského cementu. Jedná se o běžně využívané příměsi, kterými jsou struska a popílek. Tyto suroviny mají rozdílný charakter, především měrný povrch, měrnou hmotnost a pucolánovou aktivitu. Odpadní surovinou bylo v těchto recepturách následně nahrazováno 10 nebo 20 % portlandského cementu. Nebyl ovšem nahrazován pouze portlandský cement, ale rovněž byl měněn procentuální obsah krystalizující přísady ve výši 1 %, 2 % a 3 %, za účelem navržení receptur s optimálními vlastnosti navržených materiálů v poměru k finančním nákladům na její obsah.

Rozdílný procentuální obsah odpadní suroviny i krystalizující přísady nebyl překážkou ve výsledné zpracovatelnosti receptur při nanášení na betonový podklad, nebo jejich aplikovatelnosti v závislosti na teplotě (+5 až +40 °C). V praxi by tedy nezpůsobovaly aplikačním pracovníkům problémy a případně reklamace výrobci. U receptur s přídavkem strusky ale docházelo k částečnému stékání nátěrů a oddělování stěrkových materiálů od podkladu. Jakýkoliv náznak stékání, nebo dokonce odkapávání v případě nátěrového materiálu a odpadávání, odloupávání v případě stěrkového materiálu, by ale při praktické aplikaci in-situ měl velmi negativní dopad na přídržnost naneseného materiálu k podkladu, a v důsledku toho i na jeho výsledné bariérové vlastnosti a trvanlivost. Proto na základě těchto dosažených výsledků byly následně receptury s příměsí strusky vyřazeny z navazujícího vývoje.

Jednoznačně bylo prokázáno, že nejvhodnější receptury pro navazující testování pod vlivem korozních prostředí byly vyhodnoceny krystalizující dvousložkové receptury nátěru na polymercementové bázi (N1-N3) a cementové stěrkové receptury s příměsí polymerní disperze (S1-S3), o složení popsaném v tabulkách 16 a 17, které jako odpadní surovinu obsahují pouze popílek z elektrárny Chvaletice (10%).

Vzhledem k samotnému funkčnímu principu krystalizujících hydroizolačních hmot těsnit pórovou strukturu betonového povrchu, byl jako podkladní materiál pro nanesení a testování receptur navržen beton s vysokou mírou otevřených pórů vhodných pro snadné pronikání vody a tvorby krystalů

Pro odolnost betonu proti působení vody jsou rozhodující otevřené a částečně spojitě kapiláry větší než 10^{-7} m, kterými prochází voda působením tlakového gradientu [2][67]. Pro ověření vhodnosti navrženého podkladního betonu pro aplikaci receptur byly proto sledovány charakteristiky vzduchových pórů a prostorové rozložení vzduchových pórů, které potvrdilo vysoký celkový obsah vzduchu (9,58 objemových %) a výskyt vyvinuté pórové

struktury. Analyzovaná nasákavost vzorků rovněž potvrdila výskyt otevřených kapilárních pórů po 28 dnech vyzrání směsi zkouškou nasákavosti dle ČSN 73 1357-2, která dosahovala 2,87 %. Beton byl tedy navržen s velkým množstvím pórů umožňujících průchod vlhkosti, a tím i následné prokrystalizování navržených receptur nátěrů a stěrek.

S cílem vyvinout v praxi využitelné receptury byly v první fázi testovány vlastnosti navržených receptur a stěrek, a to po třech měsících uložení ve vlhkém prostředí s relativní vlhkostí nad 65 % a teplotou 21 ± 2 °C. Pro analýzu schopností receptur odolávat působení běžných agresivních činitelů působících na konstrukce byla zvolena plynná prostředí síranů o vysoké koncentraci a oxidu uhličitého (o nízké i vysoké koncentraci), kapalná prostředí síranů (nízká a vysoká koncentrace), chloridů i reálné exteriérové prostředí. Vlastnosti receptur byly poté komparovány po šesti, dvanácti a osmnácti měsících v těchto prostředích s vlastnostmi receptur po třech měsících ve vlhkém prostředí.

Vzhledem ke schopnostem krystalizujících hydroizolací těsnit pórovou strukturu betonu, a především u nátěrů a stěrek těsnit jeho povrchové vrstvy, bylo pro predikci zjištění povrchové nasákavosti konstrukcí, které mohou být například vystaveny krátkému dešti, využito tzv. metody ISAT. Získaná data z měření pojednávají o počáteční propustnosti povrchové vrstvy betonu během 120 min. Pro všechny receptury (N1-N3, S1-S3) uložené ve všech agresivních prostředích včetně reálného exteriérového prostředí po dobu osmnácti měsíců byla nasákavost povrchové vrstvy nižší než $0,07 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ během 120 min, což odpovídalo nejlepší možné klasifikaci nasákavosti betonu, „nízká“. Díky funkčnosti navržených receptur zejména v povrchových vrstvách betonu a velmi krátké expozici spolu s vlastnostmi neošetřeného podkladového betonu dosahovaly všechny receptury natolik nízkých hodnot povrchové absorpce (až nulových), díky čemuž nebylo vzájemné porovnání receptur možné.

Při navazujícím posuzování kvality účinnosti navržených receptur na těsnění povrchových vrstev betonu byly metodou TORRENT opět potvrzeny velmi dobré těsnící vlastnosti. Nejvýraznější pokles kvality povrchových vrstev byl během expozice zaznamenán v reálném exteriérovém prostředí. U všech testovaných vzorků došlo ke snížení kvality vrstvy z „velmi dobrá“ na „střední“. Tento pokles byl pravděpodobně způsoben kombinací destruktivních činitelů působících na povrchové vrstvy betonu. Především se jednalo o působení CO_2 s dalšími exhaláty, cyklické výkyvy teplot v kombinaci s kyselým deštěm, popř. působením vody. Ty mohly mít za následek porušení povrchové vrstvy trhlinami, jež byly následně zaplaveny vodou, která umožnila přístup vody k cementové matici, popř. tvorbu ledu a jeho expanzní působení v zimním období.

Vhledem k aplikaci navržených receptur ve formě nátěru a stěrky na beton musí receptury prokázat dostatečnou přídržnost k povrchu podkladu, která zajistí i v prostředích s korozním působením nepoškození vrstvy a její případné odlupování nebo odpadání. To by totiž vedlo ke snížení hydroizolačních vlastností spolu s estetickými vadami konstrukce. Během celého procesu vystavení receptur korozním působením, ani v jednom případě

nedošlo k viditelnému poškození vrstvy navržených nátěrů a stěrů. Z dostupné technické dokumentace výrobců hmot¹¹ na bázi sekundární krystalizace lze pro komerčně vyráběné receptury nalézt běžně deklarovanou hodnotu přídržnosti k betonu, 2 MPa, po aplikaci na beton a vyzrání. S přihlédnutím k tomuto faktu lze tedy konstatovat, že receptury S1-S3 a N1-N3 odolaly po osmnácti měsících působení všech vybraných kapalných korozních prostředí, s výjimkou prostředí s působením SO_4 , o koncentraci 34,6g SO_4/l , které během celého průběhu testování receptur působilo na receptury silně destruktivně. U něj došlo u všech vzorků k poklesu přídržnosti pod 2 MPa. Rovněž nátěr N2 dosahoval v plynných prostředích sníženou přídržnost pod 2 MPa.

Tyto výsledky testování funkčnosti vrstvy nátěrů a stěrů korespondovaly se zkouškou hloubky karbonatace. Ta zcela nově prokázala odolnost jak referenčního betonu, tak i navržené receptury působení CO_2 dle normy, po dobu relativně krátké expozice 56 dnů. Po osmnácti měsících působení korozních prostředí byla míra karbonatace viditelně prokázána pouze u ojedinělých vzorků nátěrů N1-N3, kde bylo možno pozorovat slabou změnu zabarvení fenolftaleinového indikátoru do cca 3 mm hloubky. Tato skutečnost mohla nastat z důvodu snížené vrstvy aplikovaného nátěru oproti stěrce, tedy i menší vrstvy chránící beton proti korozi nebo nedostatečnému prokrystalizování nátěru.

U vzorků neošetřených recepturami byla karbonatace prokázána do hloubky několika milimetrů pod povrchem zkušebních těles. Výsledky tedy potvrzují velmi pomalý postup karbonatace betonu dodatečně chráněného krystalizující hydroizolací a korespondují například s prací Vaysburda, Sabnise a Emmonse [109], kteří uvádějí karbonataci zdravého betonu v průměru okolo 0,04 in. (1 mm) za rok. Hloubka karbonatace byla v souladu s pH betonu, kdy u vybraných vzorků N2 a S2 došlo během osmnácti měsíců v uložení k poklesu od 0,24 do -0,67 pH ve všech prostředích a referenční vzorky bez ošetření krystalizujícími recepturami vždy vykazovaly větší úbytek pH než vzorky ošetřené N2 a S2. Nejvyšší poklesy pH byly zaznamenány působením běžných klimatických podmínek ve venkovním uložení (referenční receptura - 1,05, N2 - 0,58) spolu s působením SO_2 (N2 - 0,67). Pokles u exteriérového prostředí byl zřejmě způsoben vlivem plynů obsažených v atmosféře, především CO_2 , kdy dochází ke karbonataci betonu v kombinaci se změnami teplot a vlhkosti během uložení vzorků.

U žádných z testovaných receptur nedošlo k poklesu pH pod kritickou mez 9,6, kdy přestává být chráněna ocelová výztuž pasivací zásaditým prostředím betonu. U testovaných vzorků neklesla hodnota pH pod 10,81 pH, tedy shodně s rozdělením uvedeným v práci Matouška a Drochytka [98], bylo možno všechny testované vzorky zařadit do první fáze karbonatace.

Analýzy testování povrchových vlastností betonu ošetřeného navrženými recepturami jasně prokázaly, že i po osmnácti měsících působení všech vybraných agresivních činitelů byl těsnící efekt povrchových vrstev stále dostačující a nedocházelo k výraznému narušení

¹¹ Drizoro CZ, s.r.o., Betosan s.r.o., Xypex Corporation,

povrchové vrstvy betonu. Tyto výsledky byly po celou dobu sledování celkové hmotnostní nasákavosti vzorků v souladu s analýzami bariérových vlastností betonu.

Práce dále nově prokázala, že největší rozdíl vlastností mezi referenční recepturou bez ošetření a vzorky s aplikovanými krystalizujícími hydroizolacemi vyvolala agresivní prostředí po osmnácti měsících působení, kdy dlouhý interval působení přinesl pozitivní odpověď na bariérové vlastnosti navržených receptur. Z korozních prostředí se na nasákavosti vzorků nejintenzivněji podepsalo působení roztoku síranů ($34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$), kdy přírůstek referenčního betonu dosáhl v prostředí až $3 \text{ hm. \%}$ hmotnosti. A nejvyšších hmotnostních přírůstků dosáhla ve stejném prostředí z nátěrových receptur N3 ($1,5 \text{ hm. \%}$) a ze stěrkových receptur stěrka S3, $2,48 \text{ hm. \%}$. Nátěry N1-N3 prokázaly snížení přírůstku hmotnosti v porovnání s neošetřeným betonem od $0,09 \text{ hm. \%}$ (N2 v prostředí o nízké koncentraci CO_2) do snížení o $2,12 \text{ hm. \%}$ (N2 v prostředí s koncentrací $34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$). Stěrkové receptury S1-S3 snížily hmotnostní přírůstky v rozmezí $0,01$ (S3 v reálném exteriérovém prostředí) až $1,11 \text{ hm. \%}$ (S2 v prostředí s koncentrací $34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$). Neošetřený beton vykazoval vždy ve všech prostředích celkově vyšší přírůstek hmotnosti než nátěry a stěrky. Přírůstky se pohybovaly od $0,3 \text{ hm. \%}$ (v prostředí CO_2 nízké) do $3 \text{ hm. \%}$ (v prostředí s koncentrací $34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$). Při vzájemné komparaci průměrného snížení hmotnostní nasákavosti napříč spektrem korozních prostředí, ve srovnání s referenčním betonem, dosáhla receptura N2 (o $1,06 \text{ hm. \%}$) a ze stěrkových receptur S2 (o $0,43 \text{ hm. \%}$) nejvyššího zvýšení bariérových vlastností ošetřeného betonu.

Většina stavebních konstrukcí je ohrožována vodou, která je transportována působením kapilární vztlínivosti, a i zde práce u všech navržených receptur nátěrů a stěrek jednoznačně potvrdila zvýšení voděodolnosti proti jejímu pronikání.

Referenční vzorky dosahovaly ve vlhkém prostředí hmotnostních přírůstků $0,19 \text{ hm. \%}$ po maximum $0,47 \text{ hm. \%}$ v prostředí s koncentrací $34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$. Při vzájemné komparaci kapilární vztlínivosti jednotlivých korozních prostředí dosahovaly nejvyšších hmotnostních přírůstků rovněž ve stejném prostředí ($34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$) z nátěrů N1 ($0,29 \text{ hm. \%}$) a stěrek S1- $0,39 \text{ hm. \%}$. Celkově se pro nátěrové receptury N1-N3 přírůstek hmotnosti po osmnácti měsících pohyboval v závislosti na korozním prostředí od $0,08$ do $0,29 \text{ hm. \%}$, kdežto stěrkové receptury dosahovaly celkově vyšších hmotnostních přírůstků ($0,17 - 0,39 \text{ hm. \%}$). Celkové zlepšení bariérových vlastností nátěry a stěrkami korespondovalo se zkouškou nasákavosti. Ze sumarizace vyplývá, že nátěry mají od $0,06 \text{ hm. \%}$ až $0,31 \text{ hm. \%}$, nižší hmotnostní přírůstky než referenční beton v daném prostředí a stěrky vykazují toto snížení o $0,04 \text{ hm. \%}$ až $0,15 \text{ hm. \%}$ v závislosti na korozním prostředí.

Tato zkouška ve srovnání s měřením nasákavosti nepřinesla natolik průkaznou diverzifikaci působení jednotlivých prostředí, aby bylo možno jednoznačně potvrdit vliv jednotlivých korozních činitelů a určit prostředí, ve kterém jsou receptury narušovány nejvíce. Na tomto faktu se jistě podepsala metodika samotné zkoušky, u které docházelo k měření kapilární vztlínivosti v relativně krátkém intervalu 48 hodin. Při celkové analýze spektra korozních prostředí ovšem průměrně nejvyššího snížení hmotnostní nasákavosti

v porovnání s referenčním betonem dosahoval nátěr N2 (o 0,26 hm. %) a ze stěrkových receptur S2 (snížení o 0,12 hm. %).

Nejprůkaznější zkouškou pro porovnání bariérových vlastností receptur proti vodě se stala zkouška stanovení průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8. Ta díky působení zvýšeného tlaku vody (500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodin) na testované vzorky přinesla jasnější a průkaznější možnost porovnání vlastností jednotlivých navržených receptur. Zkouška potvrdila závěry hmotnostních nasákavostí a prokázala, že všechny navržené stěrkové a nátěrové materiály zvyšují odolnost betonových konstrukcí proti průsaku tlakové vody. Stejně tak, jako u všech předchozích měření, neošetřený beton vždy ve všech prostředích vykazoval celkově vyšší hloubku průsaku tlakovou vodou než receptury nátěrů a stěrek.

Pokud by byly výsledky práce komparovány pouze mezi počátečním a konečným stavem v korozních prostředích, nejvyšších průsaků dosahoval referenční beton i receptury v kapalném prostředí s vysokou koncentrací SO_2 iontů. Toto prostředí způsobilo i celkově největší průsaky 42 mm u referenční receptury, ze stěrkových receptur také u S3 (34 mm) a 27 mm u N3 z nátěrových receptur.

Celkové zhodnocení kvality vodotěsnících vlastností receptur ukázalo, že právě prostředí s vysokou koncentrací SO_2 iontů má největší dopad na kvalitu bariérové vrstvy navržených hydroizolací a vzorky v něm dosahovaly nevyšších průsaků. V prostředí proto bylo možno analyzovat rozdíl mezi referenčními betony bez ošetření a vzorky s navrženými recepturami. Při celkové komparaci vlastností nátěry prokazatelně zvyšovaly odolnost proti pronikání vody až o 54 % (N2) a stěrky vykazovaly zvýšení odolnosti až o 46 % (S2), ve srovnání s průsakem vody neošetřeného referenčního vzorku. Pozitivní výsledky receptur N2 i S2 se potvrdily i napříč spektrem korozních prostředí, kde bylo potvrzeno, že dosáhly i celkově nejvyššího průměrného snížení průsaku. Ve srovnání s referenčním betonem dosahoval z nátěrů N2 snížení o 49 % a ze stěrkových receptur S2 o 35 %. Navržené receptury těsní pórovou strukturu betonu a stávají se tak jeho součástí, proto bylo možno posoudit jeho celkovou kvalitu podle ČSN EN 206-1/Z3, mezních návrhových hodnot složení a vlastností betonu. Podle normy receptura N2 jako jediná odolala stanovenému průsaku 20 mm pro prostředí XD3 (koroze způsobené chloridy jinými než z moře) i XA3 (chemicky agresivnímu prostředí). Všechny vzorky s aplikovanými recepturami po osmnácti měsících uložení rovněž vykazovaly hloubku průsaku nižší než 50 mm, tedy betony ošetřené recepturami odpovídají návrhovým hodnotám pro prostředí XA1, XS4, XF1, XF2, XD2.

Shodně s literaturou [38] lze na základě výsledků bariérových vlastností navržených krystalizujících receptur proti pronikání vody vyvodit jasný závěr, že z hlediska vodonepropustnosti zatížené zvýšeným tlakem vody jsou krystalizující příměsi vhodným materiálem pro zvyšování vodonepropustnosti betonové konstrukce. Kvalita těchto konstrukcí ale závisí zejména na provedení pracovních a dilatačních spár a na pečlivém ukládání betonové směsi do bednění s vyloučením vzniku kaveren a jiných diskontinuit.

Přestože krystalizující hydroizolační hmoty, primárně slouží k utěsnění konstrukcí proti vodě, díky svému pronikání pórovou strukturou betonu a jejímu utěsňování pomocí nově tvořených krystalů lze předpokládat, že mohou zvyšovat i jeho hutnost kompaktnost a tím

i jeho výslednou pevnost. Z tohoto důvodu je dále pozornost zaměřena na ověření fyzikálních a mechanických vlastností navržených receptur v betonu.

Vzhledem k rozdílné tloušťce aplikovaných nátěrů a stěrky při nanášení na betonový podklad spolu s nestejnou hloubkou prokrystalizování, nepřinesly hodnoty objemových hmotností relevantní výsledky pro vzájemnou komparaci receptur.

Při analýze pevnosti v tlaku podkladní beton po 28 dnech vyzrání a uložení ve vlhkém prostředí po dobu tří měsíců dosahoval $58,4 \text{ N/mm}^2$. Po osmnácti měsících jeho pevnost ovšem klesla prakticky v celém spektru korozních prostředí k hodnotám blízcím se polovině této hodnoty (například S3 v prostředí s vysokou koncentrací SO_4^{2-} iontů -52,2 %). Tento konečný pokles pevnosti byl ale u části receptur po dvanácti měsících působení přerušen dočasným zvýšením jejich pevností. To mohlo být způsobeno dodatečným vyplňováním pórové struktury krystaly (novotvary), z pokračujícího působení krystalizující receptury a také při reakci cementové matrice s korozními činiteli. Následně ale tyto hodnoty nabraly klesající tendenci. Například u stěrky S2 v prostředí s vysokou koncentrací SO_4 iontů (6 měsíců - 38,5, 12 měsíců - 47,2 a 18 měsíců - 43,4 N/mm^2). Hodnoty rovněž oscilovaly například u N1 v prostředí reálné degradace (6 měsíců - 40,1, 12 měsíců - 49,4, 18 měsíců - 33,5 N/mm^2) a dalších.

Při komparaci betonu bez ošetření s krystalizujícími recepturami v jednotlivých korozních prostředích po osmnácti měsících stěrky a nátěry prokázaly svoji přidanou hodnotu při aplikaci na beton. Beton s aplikovanými nátěry dosahoval až o 73,5 % vyšších pevností v tlaku (N3 při působení nízkých koncentrací SO_4^{2-} iontů a N2 +65,2 %) než beton bez ošetření. U stěrky zlepšily pevnost tlaku až o 59,3 % (S2 při působení nízkých koncentrací SO_4^{2-} iontů). S tímto korespondovaly i výsledky hloubky průsaku bariérových (vlhkostních) zkoušek, které u těchto receptur potvrdily ve srovnání s referenčním betonem vysokou odolnost proti pronikání vody, tedy i dobré těsnění struktury betonu.

Předpokládaný princip, kdy aplikovaná krystalizační hydroizolace vyplňuje póry betonu, tím zvyšuje jeho voděvzdornost i celkovou hutnost, a díky tomu i následně jeho pevnosti, se na základě komparace výsledků vlhkostních a pevnostních charakteristik pro všechny receptury jednoznačně nepotvrdila. U části z nich bylo prokázáno již zmiňované zlepšení pevnosti v tlaku betonu. Při analýze všech korozních prostředí bylo ale zřejmé, že velká část vzorků vykazovala ve srovnání s betonem bez ošetření jen minimální zlepšení pevnosti, anebo dokonce vlastnosti horší. Pevnosti v tlaku vykazovaly velké výkyvy v závislosti na prostředí. Příkladem může být S3 receptura, kde oscilovaly hodnoty pro kapalná prostředí ve srovnání s referenční recepturou (+16,5 %, -29,2 %, +33,2 %, +1,3 %).

Pevnosti v příčném tahu, shodně se závěrem analýzy pevnosti v tlaku, neprokázaly závislost použití krystalizujících receptur na pevnost v příčném tahu betonové konstrukce. Beton bez ošetření hydroizolačními recepturami a bez vlivu korozních prostředí dosahoval pevnosti v příčném tahu $3,7 \text{ N/mm}^2$ a i během osmnáctiměsíční expozice v prostředích jeho i pevnosti navržených receptur oscilovaly okolo této hodnoty. Ve srovnání s betonem bez ošetření od -26,8 % do +21,6 % a stěrky -37,8 % do +41,2 %. Po analýze pevnostních charakteristik betonu tedy vyvstává otázka, do jaké míry se může v průměru mírné zvýšení

pevnosti tahu přisuzovat pouze vlivu krystalizujících hmot a do jaké míry má vliv korozní prostředí na vytvoření novotvarů v pórech betonu, a tím i možné zvýšení pevnosti [2, 9].

Proto pro komplexní vyhodnocení vlastností nově navržených hydroizolací byly po osmnácti měsících ve vybraných agresivních prostředích odebrány dílčí vzorky pro vyhodnocení pH betonu, pro rentgenovou difrakční analýzu, skenovací elektronovou mikroskopii a energo-disperzní spektrometrii (EDS).

Vzorky byly odebrány z povrchových vrstev betonu (zkušebních těles) z důvodu vystavení nejintenzivnějšímu působení vnějšího prostředí. Posuzované vlastnosti betonu jsou tedy stanoveny pro povrchové vrstvy betonu do hloubky maximálně 1,5 cm. Žádné ze zkušebních vzorků betonu napříč všemi prostředími při vizuální kontrole nevykazovaly žádné známky narušení a pH nekleslo pod kritickou mez 9,6, kdy přestává být chráněna ocelová výztuž pasivací zásaditým prostředím betonu.[98]

Po osmnácti měsících v prostředí s vysokou koncentrací CO_2 (až 98%), provedená RTG analýza ve vzorcích receptur N2 a S2 potvrdila výskyt živce, kalcitu, portlanditu, β -křemene a stopově ettringit. Ve srovnání se vzorky ve vlhkém prostředí se pH snížilo u N2 o 0,38, S2 - 0,32 a nejvíce u referenční receptury kleslo pH a to o 0,56. V pórech a trhlinách betonu byly nalezeny amorfnní útvary CSH gelů a jehlicovité krystaly, vizuálně připomínající ettringit. Útvary dosahovaly délky jednotlivých krystalů, která byla přibližně od desítek nanometrů do maximálně 10-12 μm , při tloušťce od jednotek nanometrů do maximálně 900 μm . Pomocí energo-disperzní spektrometrie (EDS) byly identifikovány hlavní prvková složení jehlicovitých krystalů C, O, Al, Si, S, K, Ca, s dominantním zastoupením kyslíku a vápníku, které zůstalo shodné pro všechna analyzovaná prostředí.

Vznik ettringitu může souviset s vyšším množstvím cementu a tedy s vyšším obsahem C_3A . Ettringit se začíná tvořit ve fázích bohatých na Al, kde v místech pórů dochází k tvorbě krystalů ettringitu a může je zcela zaplnit. Ettringit je dle odborné literatury [2], [81] stabilní při hodnotě pH nad 10,7 a při snižování na 9,5 dochází k jeho k postupnému rozpadu na sádrovec a Al-hydroxidy. Morfologie ettringitu (jehlicovité krystaly) určuje charakter jeho krystalizačních tlaků, což souvisí s věkem a místem vzniku. Rozhodujícím faktorem je místo vzniku sekundárního ettringitu, který určuje dlouhodobou stabilitu struktury betonu.

Pozorované krystaly ale nebylo možno prokazatelně označit za krystaly ettringitu a jejich přesná identifikace by vyžadovala samostatnou podrobnou studii přesahující rámec této disertační práce.

Tyto jehlicovité krystaly byly shodně nalezeny u receptur N2, S2. Také ale i referenční vzorky bez ošetření krystalizující hydroizolací vykazovaly v tomto prostředí tvorbu krystalů. V porovnání s recepturami N2, S2 byl ale výskyt mnohem nahodilejší a jednotlivé krystaly nedosahovaly v porovnání s nimi stejných velikostí. To se neshodovalo s výsledky analýzy bez vlivu prostředí, u které se v referenčních recepturách jehlicovité krystaly nevyskytovaly.

U obou receptur nátěru i stěrky, včetně referenčního betonu, byly dále analyzovány krystaly vizuálně odlišných tvarů (Obrázek 99 a Obrázek 100). Tyto nejspíše pseudomorfózy portlanditu tvořily kulovitá až květinová uskupení a v analyzovaných vzorcích se vyskytovaly více na lomových plochách než přímo v samotných pórech nebo trhlinách.

V prostředí působení vysokých koncentrací síranů, které je jedním z nejagresivnějších z hlediska trvanlivosti betonu, došlo u receptur k výraznějšímu snížení pH o 0,67 (N2) a 0,55 (S2). Referenční beton bez ošetření vykázal snížení o 0,98 pH. RTG analýza ve vzorcích potvrdila výskyt živce, kalcitu, portlanditu sádrovce a β -křemene. Právě možnou tvorbou ettringitu a sádrovce dochází vlivem expanze k rozrušení struktury betonu. Současně však dochází i k degradaci CSH gelu při poklesu Ca(OH)_2 vlivem reakce se síranovými ionty. Při komparaci receptur S2 a N2 byly identifikovány krystaly vyplňující póry betonu tvarově, velikostně i prvkově srovnatelné s krystaly nalezenými v prostředí vysoké koncentrace CO_2 .

V tomto prostředí síranů ovšem analyzované vzorky vykázaly citelně vyšší počet krystalů a těsnění pórové struktury. Jednotlivé krystaly rovněž tvořily velmi kompaktní struktury vyplňující póry, které se ale u referenční receptury prakticky nevykytovaly.

Krystaly v kapalném prostředí chloridů měly v porovnání s prostředími CO_2 a SO_2 rozdílné tvary i velikosti. Ve struktuře betonu byly zachyceny velmi výrazné shluky hexagonálních tyčinkovitých krystalů různých velikostí tvořené především ve vzorcích s aplikovanou stěrkou S2. U vzorků N2 a S2 v pórové struktuře betonu, která pravděpodobně zůstala bez kontaktu s aplikovanou hydroizolací, byly rovněž nalezeny krystaly pravděpodobně kalcitu. Ty byly v menší míře nalezeny i u referenční receptury.

Při vzájemné komparaci receptur bylo patrné, že shodně s předchozími prostředími referenční beton vykázal nejvyšší pokles pH, o 0,66 spolu a velmi nahodilou a omezenou tvorbu krystalů vyplňujících pórovou strukturu betonu.

Analýza působení kapalného prostředí síranů ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{I}$) pozitivně prokázala tvarově a velikostně identické krystaly receptur N2, S2 s kapalným prostředím chloridů, které ale byly odlišné od krystalů v plynných korozních prostředích. Při vzájemné komparaci těsnění pórové struktury mezi prostředími chloridů i síranů analýza prokázala, že krystaly v prostředí síranů jsou mnohem vyvinutější jak co do množství, tak i komplexnosti. Vzorky receptur vykazovaly snížení pH: N2 receptura o 0,32 a S2 o 0,27 pH. U referenčních vzorků jehlicovité nebo tyčinkovité krystaly nebyly nalezeny. Byly ale identifikovány pseudomorfózy portlanditu, a pravděpodobně aragonit, který je modifikací CaCO_3 . Pro zjištění, do jaké míry se síranové ionty podílejí na tvorbě aragonitu, je však třeba provést další podrobnou samostatnou studii.

Většina dostupných publikací a informací na téma hydroizolací betonu pomocí krystalizujících hmot je částečně propagačního charakteru a není nezávislá na výrobcích či prodejcích těchto materiálů. Proto se práce dále zaměřila na pozitivní prokázání základního funkčního principu těsnění pórové struktury betonu.

Na základě hloubkových analýz byly pozitivně komparovány vybrané nově navržené receptury s příměsí popílku (N2 a S2), se vstupní „čistou“ komerčně distribuovanou krystalizující hydroizolací XYPEX a referenčními vzorky betonů bez ošetření.

Z pohledu kritických dvanácti dnů od aplikace, nutných dle výrobce krystalizační technologie Xypex¹² k utěsnění betonu vzniklými krystaly a vytvoření ochranné hydroizolační vrstvy, práce pozitivně potvrdila u všech vzorků (N2, S2, Xypex) výrazný nárůst krystalů v pórové struktuře.

Během celé analýzy zkušebních vzorků skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) bylo jasně zřetelné, že se krystaly a krystalové struktury tvořili v celé struktuře betonu, kam měla přístup voda. Především však v povrchové vrstvě do hloubky jednoho centimetru, kde bylo u všech receptur jasně patrné, že se krystaly vyskytovaly prakticky ve všech pórech a trhlinách přístupných vlhkosti. Ve struktuře kde nebyla voda přítomna tvorba novotvarů, krystalů nezačala.

Při porovnání jedno- a šestidenního působení byly krystalové struktury po dvanácti dnech v obou pozorovaných hloubkách (do 1cm a do 6 cm) mnohem složitější a kompaktnější. Během analýzy bylo prokázáno, že krystaly vyplňovaly nejúčinněji pórovou strukturu o velikostech přibližně 20-200 μm a po dvanácti dnech působení došlo k tvorbě krystalů, které byly vlásečnicového až jehlicovitého tvaru, o délce jednotlivého krystalu do cca 10 – 15 μm a tloušťce narůstající s délkou do 500 nm. To je v souladu se závěry práce Mitsuki, Y., et al., [61] a Peek, et al. [62]. Oba tito autoři došli k závěru, že jehličkovité krystaly narůstají ve své velikosti i množství s časem a mohou prorůstat do hloubky přes 30 cm během jednoho roku.

I při detailní komparaci (zvětšení 25000 $\times$) krystalů a tvořených krystalových struktur (obrázek 82 až 84), nebylo možno rozdíly mezi jednotlivými recepturami, komerčně vyráběné hydroizolaci XYPEXu a nově navržených receptur N2 i S2, prokázat. Práce potvrdila, že velikosti a tvary jednotlivých krystalů i vytvářená struktura krystalů byla identické. Rovněž prodlužující se interval od počátku působení krystalizace měl za následek prokazatelný nárůst tvorby krystalové struktury v pórech, velikosti jednotlivých krystalů (délky, průměru), ale také jejich vzájemné spletnosti. Těsnění těmito krystaly bylo potvrzeno i zkouškou průsaku tlakové vody (ČSN EN 12390-8), snížením hloubky průsaku vody jednotlivých receptur v čase.

Analýza rovněž prokázala velmi častý výskyt kulových struktur krystalů vyrůstajících lokálně z povrchu pórů. Byly složeny z mnoha jednotlivých krystalů vzájemně složitě propojených, téměř identické velikosti a průměru přibližně 30 μm (na obrázku 76 a 78). Tyto struktury nebyly pouze náhodné a vyskytovaly se u většiny testovaných vzorků XYPEX a N2 v hloubce do jednoho centimetru. Existenci těchto struktur lze vysvětlit lokálním průsakem vody stěnami póru nebo trhliny, díky níž byly transportovány aktivní chemické látky z krystalických receptur do místa, v němž následně lokálně iniciovaly intenzivní tvorbu krystalů.

¹² http://www.nekap.com/xypex/detail_concentrate.php

Kamile [106] obdobné krystalové struktury označuje za shluk vlásečnicových krystalů ettringitu, vytvářejících kulovitá uskupení. Ettringit tvořící tyto struktury ale nebyl jednoznačně prokázán.

V práci byla nově potvrzena schopnost hojení (překlenování) trhlin povrchových vrstev betonu do šířky 0,05 mm už během 90 dní od aplikace, a to bez rozdílu pro komerční recepturu Xypex a nově navržené hydroizolace N2 a S2 s příměsí popílku. V celé pozorované struktuře betonu, která byla přístupna vodě, byly nalezeny shodné jehlicovité krystaly (5-10 μm), které plně nebo z části překlenovaly trhliny, dutiny i póry a napomáhali tak jejich těsnění. V místech, kde nebyla technologická voda přítomna, tvorba krystalů nebyla pozorovatelná. Při analýzách bylo ale patrné, že finální těsnící („krystalizující“) efekt je komplexní děj, který může být v dlouhodobém měřítku podporován například postupným ukládáním nerozpustných produktů chemických reakcí cementového tmelu s prosakující vodou (převážně vysrážením uhličitánu vápenatého), nebo těsněním vodou unášených nerozpustných mikroskopických částic z vnějšího prostředí. Tento závěr je tedy v souladu s domácí i světovou literaturou, která uvádí samohojení (autogenní hojení) trhlin do šíře 0,15 mm (Lamond a Pielert [79] uvádí zhojení až do šířky 0,2 mm), kterému tedy aplikace krystalizujících hydroizolací výrazně napomáhá už v krátkém časovém horizontu. [73][74] Částečně komerční literatura rovněž uvádí, že tento proces je funkční u trhlin až do šíře 0,4 mm a za těchto okolností je trhlina vyplňována primárně C-S-H fází, nikoli karbonáty.[40] Šíře takovéto trhliny ale z důvodu omezení velikosti vzorků pro analýzu skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM), nebyla potvrzena.

Práce rovněž pozitivně komparovala schopnosti krystalizující technologie těsnit strukturu i při aplikaci na materiály bez cementové matrice. Po aplikaci na materiál bez cementové matrice (přírodní pemzy) byly nalezeny shodné vlásečnicové až jehlicovité krystaly s aplikací na betonový podklad. Velikost jednotlivých krystalů byla ale přibližně poloviční ve srovnání s krystaly vytvořenými při aplikaci na betonový podklad. Tento fakt může být způsoben množstvím dostupného cementu (obsaženého pouze v samotné receptuře), a tedy i produktů jeho hydratace, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, které jsou nutné k fungování krystalizujících hmot a tvorbě krystalů ve struktuře [44][60][62].

Na základě těchto poznatků lze vyvodit závěr, že krystalizující receptury mohou být použity pro zvyšování voděodolnosti materiálů bez cementové matrice. Délka tvořených krystalů a rovněž konečný efekt těsnění struktury však bude nižší než při aplikaci na betonový povrch, a to především z hlediska dlouhodobého časového horizontu.

Zvolené experimentální metodiky byly určeny pro prvotní analýzy. Tato problematika a celková detailní analýza schopnosti navržených receptur těsnit póry a nově vznikající trhliny v konstrukci by vyžadovala pro vyvození jednoznačných závěrů samostatnou podrobnou studii, která by ovšem přesáhla rámec této disertační práce. Do ní by se musela jistě promítnout například schopnost autogenního hojení neošetřeného betonu v dlouhodobém horizontu, reverzibilita aplikovaných hydroizolací, pohyb konstrukce, technologická kázeň při aplikaci a následném ošetřování, atd. [74][106]. Z důvodu omezení velikosti vzorků pro analýzu metodou SEM je rovněž doporučeno v navazujícím výzkumu

upravit postup analýzy, popřípadě využít kombinaci s alternativní metodou. Například při posuzování hloubky prokrystalizování a těsnění pórové struktury, nebo detekci krystalů a jejich těsnění pórové struktury, lze použít metodu tzv. kontaktních úhlů, která je založena na hypotéze předpokládající rozdílné vlastnosti povrchu (lomové roviny) betonu a betonu s krystalizačním materiálem [85].

Soubor zkoušek receptur krystalizujících hydroizolačních materiálů potvrdil z pohledu bariérových odolností proti pronikání vody jejich přidanou hodnotu při aplikaci na betonové konstrukce.

Na základě výsledků komplexního testování receptur nátěrů (N1-N3) a stěrů (S1-S3) byly pomocí multikriteriálního posouzení dle zvolených kritérií vybrány jako nejvhodnější receptury pro případnou finální produkci z nátěrových receptur N2 a ze stěrkových receptur byla neoptimálnější volbou pro případnou produkci S2 receptura.

Obě tyto receptury obsahují střední zvolenou dávku krystalizující přísady a vykazují při konečném posouzení optimální poměr mezi naměřenými bariérovými a mechanickými vlastnostmi v poměru k ceně přidávaného množství krystalizující přísady. Receptury S2 a N2, o složení uvedeném v tabulkách 61 a 62, jsou proto výsledky této disertační práce.

Vzhledem k praktickému zaměření práce, s cílem výzkumu a vývoje v praxi využitelných silikátových hydroizolačních a plynotěsnících povrchových úprav se schopností dodatečné sekundární krystalizace, byly na výsledných recepturách práce provedeny zkoušky ekotoxicity, obsahu radionuklidů a zkoušky hygienické nezávadnosti.

Zkoušky ekotoxicity přinesly pozitivní výsledky, kdy za velmi přísných podmínek při těchto zkouškách došlo pouze k mírné reakci některých testovaných organismů a výsledek hodnocení zdravotní nezávadnosti výrobku proto zní „použití bez omezení.“

Receptury N2 a S2 dále z pohledu obsahu radionuklidů vyhovují příslušným vyhláškám (zejména vyhlášce číslo 307/2002 Sb. v platném znění) a požadavkům na obsah přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech určených k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi a zároveň splňují hygienické požadavky na cementové výrobky přicházející do styku s pitnou vodou, kdy není námitek proti jejich použití i v případě trvalého styku s pitnou vodou.

G. PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRO PRAXI

Předložená disertační práce prezentuje výsledky rozsáhlého výzkumu v oblasti použití krystalizujících hydroizolací, které jsou významné pro stavební praxi. Z hlediska rozvoje vědní disciplíny byl studován princip a funkčnost vytváření krystalických fází, které utěsňují pórovou strukturu betonu. Přínosy práce lze shrnout v následujících bodech:

- prvním ze stěžejních přínosů je ověření krystalizujících efektů při použití odpadních (druhotných) surovin jako částečné náhrady cementu. Částečná náhrada cementu odpadní surovinou je přínosem pro cestu snižování spotřeby cementu a s ní souvisejících emisí CO_2 . V práci šlo především o ověření kombinovatelnosti sekundární krystalizace cementu se zvolenou odpadní surovinou, a to konkrétně s elektrárenským popílkem. Ten se ukázal jako vhodnější náhrada než vysokopecní struska, která měla nepříznivý vliv na zpracovatelnost betonu.
- Byla studována kombinovatelnost sekundární krystalizace cementu s polymercementovými pojivovými systémy, která se ukázala být bezproblémová.
- Bylo zcela nově zjištěno, že krystalizující hmoty i při částečné náhradě cementu přidavkem elektrárenského popílku zvyšují oproti betonu bez ošetření bariérové vlastnosti betonu vůči působení kapalin.
- Zvýšenou odolnost proti kapalinám si betony ošetřené krystalizujícími hmotami, i při částečné náhradě cementu přidavkem elektrárenského popílku, oproti betonu bez ošetření, zachovaly i pod vlivem zvýšených korozních prostředí (CO_2 , SO_2 , SO_4^{2-} , Cl , reálné exteriérové podmínky).
- Přes ověřené zvyšování těsnosti betonu touto technologií, a tedy i předpokládaného nárůstu pevnosti (v tlaku i tahu ohybem) vlivem dodatečného utěsnění pórové struktury betonu, se ale jasná závislost vlivu krystalizující hydroizolace na pevnost betonu neprokázala.
- Byla ověřena funkčnost technologie v utěsnění pórů betonu v prvních kritických dnech od aplikace, které ukázalo narůst krystalů a krystalových struktur v celé struktuře betonu s časem a hloubkou od povrchu (6 cm), je-li k dispozici voda. V místech, kde nebyla technologická voda přítomna, tvorba krystalů nezačala. Krystaly vyplňovaly nejvíce póry o velikostech cca 20-200 μm a po dvanácti dnech působení došlo k tvorbě krystalů, které byly vlásečnicového až jehlicovitého tvaru, o délce jednotlivého krystalu maximálně 15 μm a tloušťce narůstající s délkou do 500 nm.
- Během testování schopnosti hojení povrchových trhlin betonu bylo potvrzeno, že u vzorků ošetřených krystalizujícími hmotami i přidavkem elektrárenského popílku, byly v celé pozorované struktuře betonu devadesát dní od aplikace, jež byla přístupna vodě, nalezeny krystaly vlásečnicového až jehlicovitého tvaru, o délce jednotlivého krystalu do délky cca 5 μm , které zcela nebo částečně překlenovaly povrchové trhliny betonu.

- Analýzy prokázaly, že finální těsnicí („krystalizující“) efekt je komplexní děj, který může být v dlouhodobém měřítku podporován například postupným ukládáním nerozpustných produktů chemických reakcí cementového tmelu s prosakující vodou, nebo těsněním vodou unášených nerozpustných mikroskopických částic z vnějšího prostředí.
- Dále lze konstatovat, že všechny analyzované krystalizující hydroizolační hmoty mají shodnou schopnost těsnit a překlenovat trhliny do cca 0,05 mm již 90 dní od aplikace.
- Z provedených analýz rovněž vyplývá, že krystalizující materiály mohou být použity pro zvyšování voděodolnosti materiálů bez cementové matrice, ale délka tvořených krystalů ve struktuře je při takovéto aplikaci omezena (do 5 μm za 90 dní). Z tohoto důvodu se lze domnívat, že rovněž schopnost překlenutí trhliny nebo póru bude při aplikaci na tyto podkladní materiály nižší, než při aplikaci na betonový povrch, pro který je krystalizující hydroizolace primárně určena.
- Posledním zcela samozřejmým přínosem je publikace řady odborných článků o tématu disertační práce, a tím rozšíření získaných informací a dosažených výsledků mezi odbornou veřejnost, které mohou ve výsledku podpořit používání těchto materiálů a jejich další výzkum a vývoj.

H. ZÁVĚR

Cílem této práce byl výzkum a vývoj silikátových hydroizolačních a plynotěsnících povrchových úprav se schopností dodatečné sekundární krystalizace.

Tedy formulace ve stavební praxi využitelných receptur bariérových hydroizolačních polymercementových nátěrů a stěrů, u kterých byla dominantní složka portlandského cementu částečně nahrazena vhodnými jemnými příměsemi.

Ty jsou v současné době využívány nejen pro své užité vlastnosti, ale i z důvodu ekonomické výhodnosti a především ke stále vzrůstajícím požadavkům na snížení emisí CO_2 a energetické náročnosti při výrobě portlandského cementu. Již nyní je proto jasné, že snahou do budoucna bude nahradit cement v co možná nejvyšší možné míře příměsemi druhu II či I.

Na základě výstupů této práce lze jednoznačně konstatovat, že krystalizující materiály je možno úspěšně modifikovat příměsí fluidního popílku za účelem snížení obsahu cementu v recepturách.

Všechny navržené polymercementové krystalizující receptury nátěrů a stěrů modifikované elektrérenským popínkem prokázaly zvýšenou odolnost proti vysoce agresivním prostředím po celou dobu osmnáctiměsíční expozice. Toto období bylo ve srovnání s reálnou životností konstrukce krátké, ale pro dosažení vypovídající hodnoty práce byla koncentrace jednotlivých roztoků (vzhledem k běžným korozním prostředím) mnohonásobně vyšší.

Práce potvrdila, že prostředí mělo zásadní vliv na vlastnosti jednotlivých druhů betonů ošetřených navrženými recepturami hydroizolací a mezi jednotlivými prostředím byl při srovnání viditelný rozdíl. „Zředění“ portlandského slínku v recepturách (přidáním elektr. popínku) a snížení obsahu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nutného pro průběh krystalizace a tvorby krystalů v navržených recepturách, neovlivnilo u sledovaných receptur nátěrů i stěrů pokles pH hodnoty betonu na kritickou hranici, kdy by přestávala být chráněna výztuž jeho zásaditým prostředím.

Z pohledu studované problematiky krystalizujících hmot a následné spojitosti hydroizolačních vlastností a trvanlivosti betonu práce jednoznačně potvrdila, že navržené receptury krystalizujících receptur s příměsí fluidního popínku prokázaly velmi dobré komplexní vlastnosti při zvyšování ochrany betonových konstrukcí i při dlouhodobém působení agresivních činitelů.

Práce rovněž nově prokázala, že krystalizující materiály vytvářejí požadovanou tvorbu krystalů i v pórové struktuře materiálů bez cementové matrice, pro které nejsou primárně určeny. Jejich těsnící schopnosti jsou ale velmi limitovány.

Celkovým výsledkem práce byla na základě dosažených výsledků selekce finální varianty nátěru N2 a receptury stěrky S2 (složení viz tabulky 61 a 62) vhodných pro stavební praxi, a to z celkem dvaceti čtyř vstupních receptur. Obě tyto receptury obsahují střední zvolenou dávku krystalizující přísady a vykazují při konečném posouzení optimální poměr mezi naměřenými bariérovými a mechanickými vlastnostmi v poměru k ceně přidávaného množství krystalizující přísady.

Po ověření ekotoxicity, obsahu radionuklidů a zkoušce hygienické nezávadnosti výsledných receptur byly v rámci společného výzkumu výsledky využity pro úspěšné zavedení nových variant nátěrů a stěrek na bázi krystalizace do výrobního portfolia firmy Betosan s.r.o.

Z pohledu studované problematiky krystalizujících hydroizolací je ale patrné, že není dokončena metodika zkoušení a hodnocení krystalizujících hydroizolací za působení agresivních činitelů v dlouhodobém časovém horizontu. I přes poměrně dlouhodobé používání krystalizujících hydroizolací, zejména v asijských zemích, není stále díky úzkostlivé ochraně „know-how“ principu tvorby krystalů společnostmi vyrábějících tyto hmoty jednoznačně zmapován jejich vývoj v betonu. Vystává tedy otázka, do jaké míry mohou krystaly narůstat a zda pod vlivem určitých agresivních prostředí nemohou například s postupem času rekrystalizovat do velikostí, které by naopak vyvodily tlaky v pórové struktuře betonu, a tím ho mohly poškodit. Otázka využití krystalizujících hydroizolací se tedy dále spíše přesouvá na zmapování trvanlivosti vůči působení agresivních prostředí a optimalizaci krystalizujícího mechanismu.

I. ZDROJE

Použitá literatura

- [1] CADY, P. D., WEYERS R. E. Deterioration rates of concrete bridge decks. *Journal of Transactions in Engineering*, 1984, ASCE 110(1). p. 34–444.
- [2] HEWLETT, P. (edited). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition*, Elsevier Science & Technology Books. 2004. ISBN 0750662565.
- [3] Příručka technologa - *Beton, suroviny, výroba, vlastnosti*, Praha: Artis, Českomoravský cement. 2010.
- [4] KILARESKE, W. P. *Corrosion-induced deterioration of reinforced concrete - An overview*. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1980, TX 19(3). p. 48-50.
- [5] MORI, Y., ELLINGWOOD, B. R. Maintaining reliability of concrete structures. I: Role of inspection/repair. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1994. 120(3). p. 824–845.
- [6] KINDERSLEY, D. *1001 otázka a odpověď. 1. vyd.*, Bratislava: TIMY spol. s.r.o., 1996. ISBN 80-88799-24-4.
- [7] TAKEWAKA, K., MATSUMOTO S. *Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments. In Concrete in marine environment*, Detroit: American Concrete Institute (ACI). 1988. SP-109, p. 381–400.
- [8] MOSKVIN, et al. *Korozija betona i železobetona, metody ich zašity*. Moskva: Strojizdat, 1980.
- [9] BROWN, P. W., CLIFTON, J. R. Mechanisms of deterioration in cement-based materials and in lime mortar. *Durability of building materials*, 1988, 5, p. 409-420.
- [10] KNOBLAUCH, H., SCHNEIDER, U. *Bauchemie*, 2nd ed., Dusseldorf: Werner Verlag, 2001. ISBN 3-8041-4895-6.
- [11] MINDESS, S., et al. *Concret*, 2nd ed., NJ: Prentice Hall, 2003. ISBN 978-0-13064-632-3.
- [12] AL-KADHIMI, T. K. H., BANFIL, P. F. G., MILLARD, S. G., BUNGEY, J. H. An accelerated carbonation procedure for studies on concrete, *Advances in Cement Research*, 8 (30), 1996. p. 47-59.
- [13] ASM Handbook, *Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection. Vol. 13*, ASM International, 2003. ISBN 0-87170-705-5.
- [14] LOFFELMANOVA, I., PETRA, Š. Beton a jeho ochrana. *Stavebnictví a interiér*, 5/2003.
- [15] ROVNANÍKOVÁ, P., ROVNANÍK, P., KŘÍSTEK, R. *Stavební chemie - degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. Brno: VUT v Brně, FAST, 2004. ISBN 8072044109.
- [16] DOBRÝ, O., PALEK, L. *Koroze betonu ve stavební praxi*. Praha: SNTL, 1988.
- [17] *International Workshop of Service Life Design of Concrete Structures*, ACI-CEB-RILEM, Copenhagen, 1994.

- [18] AGUIAR, J. B., CAMOES, A. a MOREIRA, P. Performance of concrete in aggressive environment. *International journal of concrete structures and materials*, 2008. Sv. 2, 11.
- [19] FILGAS, I. Systémy ochrany povrchu betonu. *Povrchové úpravy*, 1/2006, Sv. 6. ISSN 1801-707X.
- [20] BASOLO, F., JOHNSON R. C. (translated by Yamada S.) *Coordination Chemistry*, 2nd ed., Tokyo: Kagaku-Dojin Press, 1995. ISBN 0-905927-47-8.
- [21] CALLISTER, W. D., Jr. *Material Science and Ingining an Introduction*, John Wiley & Son, 2003. ISBN 0-471-13576-3.
- [22] KROPP, J. AND HILSDORF, H. K. (edited), *Performance Criteria for Concrete Durability*, E & FN SPON, Rilem raport 12, 1995. ISBN 0 419 19880 6.
- [23] LIAO, PING-KUN, C., PENG, YAW-NAN, YANG, CHIH-CHANG. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004). p. 977–989.
- [24] SVOBODA, L., TOBOLKA, Z. *Stavební izolace*. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1997. ISBN 80-902397-5-7.
- [25] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concrete Microstructure Properties*, New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2005. ISBN 978-0071462891.
- [26] BROOMFIELD, J. P. *Corrosion of steel in concrete: Understanding investigation and repair*, London: Taylor&Francis, 2003. ISBN 9780419196303.
- [27] BYDŽOVSKÝ, J., *Technologie sanace*. Brno: VUT, 2007.
- [28] ZAJÍČEK, M. *Chemické přísady do betonu a malt*, dostupné na internetu:< <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/cihly-tvarnice/chemicke-prisady-do-betonu-a-malt-691.html>>[19. 9 2008].
- [29] FENYK, M. Zásady práce s betonovou směsí. *ASB*. 2007. Dostupné na internetu: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/betonove-vyrobky/zasady-prace-s-betonovou-smesi-45.html> [1.11.2013]
- [30] WITTMAN, F. H., et. al. Silicon resin, a functional polymer in concrete, *Proceedings 13th International Congress on Polymers in Concrete, ICPIC*, Funchal, Madeira, Portugal, 2010. p. 625-632.
- [31] WOODSON, R. D. *Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation*, Oxford: Elsevier Ltd., 2009. ISBN 978-1-85617-549-4.
- [32] SUN STOP kolektiv firmy. Posilování hydroizolační a chemické odolnosti betonových konstrukcí na bázi krystalizace. *Stavebnictví a interiér*, 9, 2001.
- [33] BASSI, R., ROY, S. K. *Handbook of Coatings for Concrete*, Caithness: Whittles Publishing, 2002. ISBN 1-870325-82-6.
- [34] BILČÍK, J., CESNAK, J. *Poruchy a rekonštrukcie nosných sústav. Životnosť, poruchy a rekonštrukcie betónových a murovaných konštrukcií*, Bratislava: JAGA group, 1998. ISBN 9788022708166.

- [35] ANGEL, M., DENU, H. J. Waterproof membranes for concrete surface protection, *Farbe & Lack*, roč. 103, č. 8, 1997. ISSN 0014-7699.
- [36] ROBERTS, M. The Effect of Utilising High Alumina Cements in the Formulation of Self-Smoothing Cementitious Floor, *Calcium Aluminate Cements*, Edinburgh 16.-19. 7. 2001.
- [37] DOHNÁLEK, P. & kolektiv. Technologie bílých van s využitím krystalizačních přísad, *Realizace staveb*, 3/2010.
- [38] DOHNÁLEK, P. *Vývoj bariérových kapalinotěsných a plynotěsných povrchových úprav s využitím odpadních látek*, Brno, 2010, Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie hmot a dílců.
- [39] PAZDERKA, J. HECHT, C., BURGETOVÁ, E., REINTHALER, P. Analysis of the Crystalline Coat Waterproofing Effect, *WTA-Almanach 2008 - Restoration and Building-Physics*. München. WTA - e. V., 2008, p. 243-255. ISBN 978-3-937066-08-0.
- [40] XYPEX CHEMICAL CORPORATION, *Concrete Waterproofing By Crystallization*, Speciation and Application Manual, Richmond, B. C. Canada, 2010.
- [41] TOUTANJI, H. et al. Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 2, February 2004, p. 311-319.
- [42] CHATTERJI, S. On the applicability of Fick's second law to chloride ion migration through portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 25 (2), 1995, p.299-303.
- [43] MATOUŠEK, M. *Působení vybraných atmosférických činitelů na stavební konstrukce a možnost využití difúzních pochodů pro jejich ochranu a zvětšení trvanlivosti*, Brno, 1977, doktorská disertační práce, VUT Brno.
- [44] FURUYA, T., et al. An effective and eternal maintenance method for concrete tunnel structures, *Tunnel Structures. Labse Reports*: Volume 78, p. 439-447, Stockholm 1998, ISBN 3-85748-096-3.
- [45] PAZDERKA, J. Krystalizační hydroizolace pro sanace staveb, *Stavitel*. 2009, roč. 17, č. 2, s. 28-30. ISSN 1210-4825.
- [46] PAZDERKA, J. Principy použití krystalizačních hydroizolací, *Realizace staveb*. 2007, roč. 2, č. 4, s. 52-53. ISSN 1802-0631.
- [47] CHATTERJI, S. Transportation of ions through cement based materials. Part 2 adoption of the fundamental equations and relevant comments, *Cement and Concrete Research*, 24 (6), 1994, pp 1010-1014.
- [48] CHATTERJI, S. Transportation of ions through cement based materials. Part 3 experimental evidence for the basic equations and some important deductions, *Cement and Concrete Research*, 24 (7), 1994, pp 1229-1236.
- [49] TERZIJSKI, I. *Základy měření propustnosti kompozitních silikátových materiálů*, Brno: OBIS VÚGI, 124 s., 1984.
- [50] MOORE, W. J. *Fyzikální chemie*, Praha: SNTL, 1979.

- [51] MRLÍK, F. *Difúzní konstanty některých stavebních látek a konstrukcí*, Gottwaldov: VÚPS, 1980.
- [52] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I, II.*, Brno: CERN, 1999 a 2000. ISBN 80-7366-008-3.
- [53] TANG, L. *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*, Gothenburg, Chalmers University of Technology, 1996. ISSN 0346-718X.
- [54] BRUNAUER, S. Tobermorite gel - The heart of concrete, *American Scientist* Vol. 50, No. 1, *Frontiers Of Zealous Research*, Sigma Xi, The Scientific Research Society, 1962pp., 210-229.
- [55] KOBAYASHI, K. *Carbonation of Concrete* - Proceedings of Japan Society of Civil Engineers No.433/V-15,1991.
- [56] PAZDERKA, J., BURGETOVÁ, E. Krystalizační hydroizolace, *Stavitel*. 2008, roč. 16, č. 6, s. 12-14. ISSN 1210-4825.
- [57] HSU, T. T. C., MO, Y. L. *Unified theory of concrete structures*, Singapore: John Wiley and Sons Ltd., 2010. ISBN 978-0-470-68874-8.
- [58] KOBAYASHI, K., SUZUKI, K., NOJIRI, Y., MATUOKA Y.,- *Diagnosis of Structural System of Concrete*, Tokyo: Morikita Press, 1993.
- [59] TAYLOR, H. F. W. (translated by Daimon M.) - Hydration Products - *JME Vol. 3, No. 3, Portland Cement (Science of Cement)*, Uchida Rokaku Press, Tokyo, 1995.
- [60] ZHANG, X., ZHENG, D. Uniform Design for Preparation of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Coating, *Advanced Materials Research*, Vols. 374-377 (2012), pp 1491-1494.
- [61] MITSUKI, Y., FUJIMOTO, M., NAKAMURA, Y. An Enhancement in the Nature of Concrete with a Multipliactive Cement Crystal Type Concrete Material, *46th Annual Meeting of the Civil Engineering Society*, Japan, 1992.
- [62] PEEK, A. D., KHIONG, F. W., *Xypex Waterproofing - Singapore Arts Centre Project, Technical Report 1303/97/8426*, (Singapore) Taywood Engineering Ltd., 1997.
- [63] KLOPFER, H. *Lehrbuch der Bauphysik*, Stuttgart: Verlag B.G.Teubner, 1989.
- [64] LYKOV, A. W. *Transporterscheinungen in kapillarporösen Korpem*, Berlin: Akademie Verlag, 1958.
- [65] JENKINS, S. B. *Nanoporous Materials: Types, Properties And Uses*, New York: Nova Science Publishers Inc., 2010. ISBN 978-1-61122-999-8.
- [66] PERRY, C. and GILLOTT, J. E. The feasibility of using silica fume to control concrete expansion due to alkali-aggregate reaction. *Durability of Building Materials.*, 3, p. 133-146, 1985.
- [67] MANDELÍK, J., PUMPR, V. Pokroky v zajišťování vodotěsnosti betonu, *sborník Symposia Sanace 2002, SSBK*, Brno, 2002. ISBN 1211-3700.
- [68] IRIYA, K. Gas transportation in saturated cementitious materials, *Materials research society symposium proceedings*, díl. 353, p. 913-920, Boston, 1995.

- [69] JACOBS, F. *Permeability and porous structure of cementitious materials (in German)*, Building Materials Report No. 7, Aedificatio Publishers, IRB Verlag, 164 p. 1994.
- [70] TOMES, A. M., et. al. Permeability of Concrete: A Study Intended for the "in situ" Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques, *proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, September 16-19, 2003, Berlin. ISBN 3-931381-49-8.
- [71] BAJZA, A., ROUSEKOVÁ, I. *Technológia betónu*, Bratislava: JAGA group, 2007. ISBN 80-8076-032-2.
- [72] JENNINGS, H. M., THOMAS, J. J., ROTHSTEIN, D., CHEN J. J. *Handbook of porous solids, Cements as porous materials*, Weinheim Wiley VCH, 2002. ISBN 9783527302468.
- [73] AHN, T. H., KISHI, T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating variol mineral admixtures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, June 2010, pp. 171–186.
- [74] EDVARDESEN, C. Water Penetrability and Autogenous Healing of Separation Cracks in Concrete, *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, roč. 62, č.11, s.77-85, 1996. ISSN 0373-4331.
- [75] TAZAWA, E. Committee Report. *Proceedings of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) - Autogenous Shrinkage of concrete* (Hiroshima, June 13.-14. 1998) - p. 1-68. London: E&FN Spon, 1999.
- [76] CLEAR, C. A. *The Effect of Autogenous Healing upon the Leakage of Water through cracks in concrete*, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1985.
- [77] EL-REEDY, MOHAMED A. *Steel-reinforced concrete structures: Assessment and Repair of Corrosion*, Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-1-4200–5430-9.
- [78] PUMPR, V., MANDELÍK, J. Vodotěsné izolace spodních staveb a jejich sanace, *Izolace.cz*. ISSN 1213-6395.
- [79] LAMOND, J. F., PIELERT, J. H. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*, Vydání 169, Díl 4, Bridgeport: ASTM International, 2006.
- [80] PYTLÍK, P. *Technologie betonu, 2 vydání*. Brno: Vutium, 2000, ISBN 80-214-1647-5.
- [81] LANDRUM, R. J. *Designing tool for corrosion control*. Delaware: National Association of corrosion engineers, 1992. ISBN: 0-915567-34-2.
- [82] PAZDERKA, J., BURGETOVÁ, E. Betony s krystalizační příměsí a jejich odolnost proti tlakové vodě, *Stavební obzor*. 2008, roč. 17, č. 6, s. 168-171. ISSN 1210-4027.
- [83] BILČÍK, J., DOHNÁLEK, J. *Sanace betonových konstrukcí*, Jaga group, Bratislava, 2003. ISBN 80-88905-24-9.
- [84] PAZDERKA, J. Analysis of the Functional Principles of Crystalline Waterproof Admixtures for Concrete, *International Conference VSU 2007*. Sofia, VSU Luben Karavelov, 2007, vol. 2, p. 24-27. ISBN 978-954-015-9.
- [85] PAZDERKA, J. Účinnost sanačních postupů založených na krystalizačních materiálech, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2009, roč. 9, č. 2, s. 16-19. ISSN 1213-3116.

- [86] NEDBAL, F., MAZUROVÁ, M., TRTÍK K. *Speciální betony*, Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2001. ISBN 80-238-2678-6.
- [87] PUMPR, V., VÁVRA Z. Ekonomický návrh výztuže vodotěsných železobetonových konstrukcí s použitím krystalizační přísady XYPEX, VEGA, *Stavebnictví a interiér*, 2008.
- [88] HENRIKSEN, C. F, STOLZNER, E. *Chloride Corrosion*, The Danish Road Directorate. Investigation of Chloride Load and Corrosion on Bridges Columns, 1991.
- [89] EMMONS, P., H., DROCHYTKA, R., JEŘÁBEK, Z. *Sanace a údržba betonu v ilustracích. 1. vydání*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 087629-286.
- [90] NEVILLE, A. M., *Properties of Concrete, 4th Edition*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1996. ISBN 978-0470235270.
- [91] LINGLIN, X., WANG, P., ZHANG, G. Formation of ettringite in Portland cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures, *Construction and Building Materials*, 31, 2012. p. 347–352.
- [92] ASM Handbook, Materials Selection and Design - Design for Oxidation Resistance. Vol. 20, ASM International, 1997. ISBN 0-87170-386-6.
- [93] KOTLÍK, P., HEIDINGSFELD, V., BLÁHA, J., VANĚČEK, I. *Stavební materiály historických objektů*. Skripta VŠCHT Praha, 1999.
- [94] LEYGRAF, CH., GRAEDEL, T. E. *Atmospheric corrosion*, Ch 8 Corrosion in indoor exposure, Ch 12.2. Metal artifacts indoor. Wiley Interscience, 2000.
- [95] BALONIS, M., LOTHENBACH B., LE SAOUT G., GLASSE F. P. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*, 40 (2010), p. 1009–1022.
- [96] BAMFORTH, P. Spreadsheet Model for Reinforcement Corrosion in Structures Exposed to Chlorides. *London: E & FN Spon*, 1998. - In: *Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Tromsø, Norway, 1998, Vol. I, (Gjorv, O. E.; Sakai, K.; Banthia, N. (Ed.)), p. 64-75.
- [97] PETERSEN, C. G., RTC Profile Grinding Kit for in-situ Evaluation of the Chloride Diffusion Coefficient and the Remaining Service Life of a Reinforced Concrete Structures, *Symposium Chalmers Technical University*, Gothenburg, Sweden, 1993.
- [98] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. *Atmosférická koroze betonů*, IKAS, Praha 1998. ISBN 80-902558-0-9.
- [99] TORRENT, R., FERNANDEZ L., *Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover*, RILEM Report 40., France: RILEM Publications S.A.R.L., 2007. ISBN 978-2-35158-054-7.
- [100] KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P., VYMAZAL, T. Determination and Evaluation of the Air Permeability Coefficient using Torrent Permeability Tester, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Pleiades Publishing, Ltd., 2010, Vol. 46, No. 3, p. 226-233. ISSN 1061 8309.
- [101] POLDER, R. et al. Test methods for on site measurements of resistivity of concrete. RILEM TC 154-EMC, *Materials & Structures*, 33, 2000, p. 603-611.

- [102] KMECOVÁ, V., a kol. Nový superplastifikátor pre vysokohodnotné betóny, *Beton TKS, Materiály a technologie*, 6/2006.
- [103] ROBERT, L. Feller and Myron H. Wilt, *Evaluation of Cellulose Ethers for Conservation*, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, USA. 1990. ISBN 0-89236-099-2.
- [104] SEBÖK, T. *Příklady a přídavky do malt a betonů*. Praha: SNTL, 1985.
- [105] STUTZMAN, PAUL E. Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography, Reprinted from Materials Science of Concrete Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete (Workshop on the Role of Calcium Hydroxide in Concrete). Proceedings. J. Skalny, J. Gebauer and I. Odler, eds., *The American Ceramic Society*. November 1-3, 2000, Anna Maria Island, Florida, p. 59-72 pp, 2001.
- [106] KAMILE, T. Effect of SO₃ content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars, *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, 2006. p. 761–772.
- [107] YANA, P., QIN, X., YANG, W., PENG, J. The semiquantitative determination and morphology of ettringite in pastes containing expansive agent cured in elevated temperature, *Cement and Concrete Research* 31 (2001). p. 1285–1290.
- [108] TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*, 2nd Edit, Thomas Telford, 1998. ISBN 978-0727725929.
- [109] VAYSBURD, A. M., SABNIS, G. M., and EMMONS, P. H. Concrete Carbonation-A Fresh Look, *Indian Concrete Journal*, V. 67, No. 5, May 1997. p. 215-220.
- [110] ZONGJIN, LI. *Advanced Concrete Technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2011. ISBN 978-0-470-43743-8.

Použité zkratky

ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
φ_i	relativní vlhkost [%]
$\frac{dc}{dx}$	gradient koncentrace [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$]
$\bar{L}$	součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů (spacing factor) [mm]
ΔP	úbytek tlaku kapalin nebo plynů při jejich průchodu trhlinou - tlaková diference mezi vstupní a výstupní stranou vzorku [Pa]
Δp_i	změna tlaku [Bar]
μ	viskozita vzduchu [Ns/m^2]
A	celkový obsah vzduchu [%]
A	plocha vnitřní komory
A_c	plocha destiček dle ČSN EN 12390-3 [mm^2]
a_{ij}	hodnota kritéria v rámci metody párového srovnání
b_{ij}	hodnota kritéria závislá na podle požadovaného maxima či minima daného kritéria v rámci metody párového srovnání
BS	britská norma (british standard)
CEM	cement dle ČSN EN 197-1
c_{ij}	výsledná hodnota vypočtená s váhy kritéria a b_{ij} v rámci metody párového srovnání
CMC	Karboxymethylcelulóza
CSH	calcium-silikát-hydrát
CSN	česká technická norma, 1964-1991 rovněž československá státní norma
D	počet dílků rozdělení stupnice během času t u zkoušky ISAT
D	je celkový koeficient difuze u I. Fickova zákona [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
DIN	Německá norma (Deutschen Institut für Normung)
d_k	hloubka karbonatace
DTA	diferenční termická analýza
DTG	diferenční termo-gravimetrie
EDAX	společnost vyrábějící techniku pro analýzy materiálů
EDS	energo-disperzní spektrometrie
ESRL	Earth System Research Laboratory
F	maximální zatížení při porušení dle ČSN EN 12390-3 [N]
f	je vtok (propustnost) v $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$
f_c	pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [N/mm^2]
F_i	váha daného kritéria v rámci optimalizace metodou párového srovnání
h	přetlak kapaliny nebo plynu [m]
ISAT	zkouška počáteční povrchové nasákavosti betonu
J	je difuzní tok u I. Fickova zákona [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
k	opravný součinitel pro tloušťku bloku dle ČSN EN 1338
k_T	vzduchová propustnost [m^2]
$k_{T;3}$	součinitel vzduchové propustnosti při hmotnosti vlhkosti materiálů 3%
$k_{T;w}$	součinitel vzduchové propustnosti při aktuální vlhkosti materiálů w

I	střední hodnota dvou měření délky porušení měřena na povrchu a v patě bloku dle ČSN EN 1338 [mm]
L	Hloubka propustnosti ve vakuu
I	délka trhliny [m]
MAX	maximum
m_d	hmotnost zkušebního vzorku vysušeného [g]
MIN	minimum
MMS	modifikovaná mikrosilika
m_a	hmotnost zkušebního vzorku nasáknutého vodou [g]
MS-polymer	silanem modifikovaný polymer
N	počet kritérií v rámci metody párového srovnání
n	nasákavost [%]
N1 - N12	označení receptury polymercementových nátěrů
NLP	normální laboratorní prostředí dle ČSN EN 12190 [$t = 21 \pm 20^\circ \text{C}$, $\phi_i > 60 \pm 10\%$]
NP	normové (vlhké) prostředí - relativní vlhkost nad 95 % a teplota $21 \pm 2^\circ \text{C}$
ÖNORM	Rakouská norma (Austrian Standards Institute)
P	lomové zatížení dle ČSN EN 1338 [N]
p_0	tlak vzduchu v čase t_0 (začátek měření) ve vnitřní komoře [N/m^2]
p_a	atmosférický tlak
p_a	atmosférický tlak [N/m^2]
pH	je definována jako záporně vzatý dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů a vyjadřuje, zda vodný roztok reaguje kyselé či naopak alkalicky (zásaditě)
P_i	pořadí podle počtu označení kritéria v rámci metody párového srovnání
p_i	tlak vzduchu v čase t (konec měření) ve vnitřní komoře [N/m^2]
p_i	tlak snižující se s rostoucím časem měření pomocí Torrent přístroje [Bar]
p_{ip}	počáteční tlak při $t = 60$ [Bar]
p_n	tlak prostředí [Bar]
Počet	počet bodů ve výpočtové matici v rámci metody párového srovnání
PSMXI	kapacitní vlhkoměr
p_t	tlak vzduchu v kapiláře [Pa]
Q	objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
q	objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Q_w	množství kapaliny v [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] proudící trhlinou jednotkové délky
r	poloměr kapiláry [m]
REM	rastrovací elektronový mikroskop
RTG	rentgenová analýza
S	plocha lomového řezu [mm^2] dle ČSN EN 1338
S	plocha příložných destiček dle ČSN EN 12390-3
S1 - S12	označení receptur polymercementových stěrů
SEM	z angl. skenovací elektronový mikroskop (česky rastrovací, nebo řádkovací)
SN	Švýcarská technická norma (Swiss Standard)
t	tloušťka bloku v lomové rovině, průměr tří měření - ve středu a na okrajích bloku [mm] dle

	ČSN EN 1338
T	pevnost zkoušeného bloku v příčném tahu dle ČSN EN 1338 [MPa]
t	doba měření v jednotlivých časových úsecích [s]
t	čas [s]
t_i	teplota [$^{\circ}$ C]
Torrent	přístroj pro měření permeability vhodný pro nedestruktivní stanovení vzduchové nepropustnosti krycí vrstvy betonu
USACE	Americká norma (U. S. Army Corps of Engineers)
V_c	objem vnitřní komory [m^3]
V_i	důležitost kritéria v rámci metody párového srovnání
w	šířka trhliny [m]
w	koeficient nasákavosti [$kg/m^2 h^{0,5}$]
w_a	nasákavost v % dle ČSN 73 1357-2
WDS	vlnově dispersní spektrometrie
XC	Xypex Concentrate
XF	třída agresivity prostředí
ZTV-SIB	dodatečné technické a kontraktační podmínky a směrnice pro ochranu a opravy betonových stavebních prvků
α	opravný vlhkostní součinitel
γ	povrchová energie [$N \cdot m^{-1}$]
η	dynamická viskozita kapaliny [Pa·s]
ξ	hustota kapaliny nebo plynu [$kg \cdot m^{-3}$]
π	Ludolfovo číslo (3,141592...)
ε	objem pórů vyplňující dutiny betonu
D	objemová hmotnost zatvrdlého betonu [kg/m^3] dle ČSN EN 12390-7

Použité internetové zdroje

www.artesacd.cz
www.avekocolor.cz
www.cezep.cz
www.basf.cz
www.basf-sh.cz
www.betonserver.cz
www.betosan.cz
www.cembrit.cz
www.cez.cz
www.cidemat.cz
www.cmsterk.cz
www.drizoro-cz.cz
www.enviweb.cz
www.esrl.noaa.gov
www.heidelbergcement.cz
www.kamenzbraslav.cz
www.kotouc.cz

www.ladax.cz
www.lafarge.cz
www.lhoist.cz
www.nekap.com
www.omya.com
www.lafarge.cz
www.pisky.cz
www.proceq.com
www.realsan.cz
www.redrock-cz.com
www.schomburg.cz
www.szu.cz
www.tretiruka.cz
www.uxa.cz
www.vustah.cz
www.wikipedia.org
www.xypex.cz
www.xypex.com

Použité normy a předpisy

ČSN EN	206-1	Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
ČSN EN	197-1	Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
SN	505 262/1	Construction en béton – Spécifications complémentaires
ČSN P	730606	Hydroizolace staveb - Povlakové hydroizolace - Základní ustanovení
ČSN EN	480-11	Charakteristika vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu
ČSN EN	12620	Kamenivo do betonu
ČSN EN	13139	Kamenivo pro malty
DIN EN ISO	8044	Korrosion von Metallen und Legierungen; Grundbegriffe und Definitionen, November 1999. (dřívější: DIN 50900-1,- 3)
BS	1881-122	Method for determination of water absorption
ČSN EN	451	Metoda zkoušení popílku
ČSN EN	196	Metody zkoušení cementu
ČSN EN	15167	Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty
ČSN	1209/1321	Nepriepustnosť a odolnosť tlaku vody
ČSN	730601	Ochrana staveb proti radonu z podloží
U. S. Army Corps of Engineers (USACE)	CRD C48-73	Permeability of Concrete
ČSN EN	450	Popílek do betonu
ČSN	722071	Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení
ČSN EN	13813	Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky, ČNI 2003
ČSN EN	480-11	Příklady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

ČSN EN ISO	7346-2	Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby
ČSN	731357-2	Stanovení kapilárních vlastností pórobetonu. Vzlínavost a nasákavost
ČSN	721179	Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi
ČSN	731316	Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínivosti betonu
BS	1881-208	Testing concrete - Recommendation for the determination of the initial surface absorption of concrete
ČSN EN	1542	Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou
ČSN EN	1770	Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení součinitele teplotní roztažnosti
ČSN EN	12190	Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt
ČSN EN	13295	Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení odolnosti proti karbonataci
ČSN EN	14630	Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody
DIN	1048	Water Impermeability of concrete
ÖNORM	B 3303	Water Impermeability of concrete
ČSN	720100	Základní postup rozboru silikátů - Všeobecná ustanovení
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
ČSN EN	933-1	Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor
ČSN EN	12390-3	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
ČSN EN	12390-4	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy
ČSN EN	12390-6	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles
ČSN EN	12390-7	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
ČSN EN	12390-8	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou
ČSN EN ISO	6341	Zkouška inhibice pohyblivosti Daphnia magna Straus – Zkouška akutní toxicity
ČSN EN ISO	8692	Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas a test inhibice růstu kořene hořčice Sinapis Alba
ČSN	732578	Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí
ČSN EN	1015-11	Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku
ČSN EN	1015-12	Zkušební metody malt pro zdivo - Část 12: Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu

Seznam tabulek

Tabulka 1: Obecné chemické složení funkční krystalizující hmoty [44]	20
Tabulka 2: Pomocné materiály pro krystalizující izolační hmoty, (původní terminologie byla zachována pro dodržení specifikace)[44]	20
Tabulka 3: Klasifikace velikosti pórů v hydratované cementové pastě dle[25]	27
Tabulka 4: Klasifikace agresivity síranového prostředí dle ACI 201.2R-92[90]	40
Tabulka 5: Klasifikace absorpce povrchové vrstvy betonu založená na hodnotách ISAT[99]	57
Tabulka 6: Třídy kvality krycích vrstev betonu[99].....	59
Tabulka 7: Chemická XRF analýza složení CEM II/A-S 42,5 R	61
Tabulka 8: Chemické a fyzikální vlastnosti písku PR 33.....	62
Tabulka 9: Sítový rozbor písku PR 33	62
Tabulka 10: Fyzikální a chemické vlastnosti SILICA VP4	63
Tabulka 11: Chemická XRF analýza složení SILICA VP4	63
Tabulka 12: Fyzikální a mechanické vlastnosti popílku z elektrárny Chvaletice ⁷	63
Tabulka 13: Chemická XRF analýza složení popílku z elektrárny Chvaletice	64
Tabulka 14: Chemická XRF analýza složení vysokopecní strusky Štramperk	65
Tabulka 15: Analýza složení krystalizující přísady Xypex Admix.....	66
Tabulka 16: Přehled složení navržených polymercementových stěrtek	68
Tabulka 17: Přehled složení navržených polymercementových nátěrů.....	69
Tabulka 18: Výsledky zkoušky zpracovatelnosti při nanášení	70
Tabulka 19: Výsledky zkoušky nestékavosti	71
Tabulka 20: Hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při nízké teplotě (+5 °C).....	72
Tabulka 21: Hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při vysoké teplotě (+40 °C)	72
Tabulka 22: Souhrnné hodnocení zkoušky aplikovatelnosti při nízkých a vysokých teplotách.....	72
Tabulka 23: Sumarizace výsledků testování zpracovatelnosti pro nátěry	73
Tabulka 24: Sumarizace výsledků testování zpracovatelnosti pro stěrky	73
Tabulka 25: Zvolené nejperspektivnější receptury	73
Tabulka 26: Vstupní prostředí pro multikriteriální výběr	74
Tabulka 27: Vybraná agresivní prostředí a jejich charakteristika.....	75
Tabulka 28: Sumarizační tabulka klimatických podmínek reálného exteriérového prostředí během expozice vzorků betonu	76
Tabulka 29: Hloubka vniknutí vakua v kapalných prostředích	81
Tabulka 30: Hloubka vniknutí vakua v plynných prostředích.....	81
Tabulka 31: Součinitel kT v kapalných prostředích	82
Tabulka 32: Součinitel kT v plynných prostředích	83
Tabulka 33: Vyhodnocení výsledků testování vzduchové propustnosti metodou Torrent.....	84
Tabulka 34: Hmotnostní přírůstky v kapalných prostředích	85
Tabulka 35: Hmotnostní přírůstky v plynných prostředích	85
Tabulka 36: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v kapalných prostředích	87
Tabulka 37: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v plynných prostředích	87
Tabulka 38: Hmotnostní přírůstky v kapalných prostředích.....	89
Tabulka 39: Hmotnostní přírůstky v plynných prostředích	90
Tabulka 40: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v kapalných prostředích	91
Tabulka 41: Hmotnostní přírůstek po 18 měsících v plynných prostředích	92
Tabulka 42: Hloubka průsaku tlakovou vodou v kapalných prostředích.....	93
Tabulka 43: Hloubka průsaku tlakovou vodou v plynných prostředích	94
Tabulka 44: Vyhodnocení hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v kapalných prostředích	95
Tabulka 45: Vyhodnocení hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v plynných prostředích	96
Tabulka 46: Hodnoty pH vzorků uložených v jednotlivých korozních prostředích	100

Tabulka 47: Sumarizace pevností v tlaku v kapalných prostředích	102
Tabulka 48: Sumarizace pevností v tlaku v plynných prostředích	102
Tabulka 49: Vyhodnocení pevnosti v tlaku receptur v kapalných prostředích	104
Tabulka 50: Vyhodnocení pevnosti v tlaku receptur v plynných prostředích	105
Tabulka 51: Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v kapalných prostředích	106
Tabulka 52: Pevnost ztvrdlého betonu v příčném tahu v plynných prostředích	107
Tabulka 53: Přídržnost k betonu po 18 měsících v kapalných prostředích	109
Tabulka 54: Přídržnost k betonu po 18 měsících v plynných prostředích	109
Tabulka 55: Kritéria volby a přehled parametrů receptur nátěrů	113
Tabulka 56: Kritéria volby a přehled parametrů receptur stěrky	113
Tabulka 57: Fullerův trojúhelník	114
Tabulka 58: Výpočet váhy kritérií	114
Tabulka 59: Výpočtová matice pro nátěrové receptury	114
Tabulka 60: Výpočtová matice pro stěrkové receptury	114
Tabulka 61: Výsledná receptura polymercementového nátěru	115
Tabulka 62: Výsledná receptura polymercementové stěrky	115
Tabulka 63: N2 receptura v CO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	176
Tabulka 64: S2 receptura v CO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	176
Tabulka 65: Referenční receptura v CO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	176
Tabulka 66: N2 receptura v SO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	177
Tabulka 67: S2 receptura v SO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	177
Tabulka 68: Referenční receptura v SO ₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	177
Tabulka 69: N2 receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	178
Tabulka 70: S2 receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	178
Tabulka 71: Referenční receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	178
Tabulka 72: N2 receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	178
Tabulka 73: S2 receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	179
Tabulka 74: referenční receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy	179
Tabulka 75: Sumarizace analýzy EDS vzorku přírodní pemzy s aplikovanou recepturou Xypex	179

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma funkčního principu krystalizujícího nátěru na betonové konstrukci	19
Obrázek 2: Transport vlhkosti stěnou (zdroj: Xypex Corporation)[40]	21
Obrázek 3: Proces vzniku krystalů dle Zhang et al.[60]	24
Obrázek 4: Xypex, 10cm pod povrchem, zvětšené 1000x[61]	25
Obrázek 5: Xypex, 30cm pod povrchem, zvětšení 1000x[61]	25
Obrázek 6: Rozdělení dutin a pórů v hydratované cementové pastě betonu [11]	28
Obrázek 7: Vztah permeability a pórovitosti podle Bakkeru	29
Obrázek 8: Průtok vody Q_w trhlinou v závislosti na její šířce a hydraulickém spádu[78]	31
Obrázek 9: Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [15]	37
Obrázek 10: Korozní reakce oceli [15]	44
Obrázek 11: Zjednodušený elektrochemický rovnovážný diagram pro systém železo - voda dle Pourbaix [94] ..	44
Obrázek 12: Grafické znázornění průběhu ETAPY I.	49
Obrázek 13: Grafické znázornění průběhu ETAPY II.	52
Obrázek 14: Grafické znázornění průběhu ETAPY III.	54
Obrázek 15: Schéma měřicího zařízení ISAT	56
Obrázek 16: Zkušební referenční těleso při testování počáteční povrchové nasákavosti betonu	57
Obrázek 17: Schéma přístroje Torrent pro měření propustnosti betonu pro vzduch[99]	58
Obrázek 18: Rozložení velikosti částic CEM II/A-S 42,5 R, Prachovice	61
Obrázek 19: Sítový rozbor písku PR 33	62
Obrázek 20: Rozložení velikosti částic popílku Chvaletice	64
Obrázek 21: Rozložení velikosti částic vysokopecní strusky Kotouč Štramberk	65
Obrázek 22: Rozložení velikosti částic Xypex Admix	66
Obrázek 23: Grafické znázornění klimatických podmínek pro období roku 2010	77
Obrázek 24: Grafické znázornění klimatických podmínek pro období roku 2011	77
Obrázek 25: Rozdělení vzduchových pórů referenčního (podkladního) betonu	79
Obrázek 26: Počáteční povrchová nasákavost betonu bez ošetření krystalizujícími hmotami a bez působení agresivního prostředí	79
Obrázek 27: Zařízení TORRENT s měřeným vzorkem	80
Obrázek 28: Vakuová pumpa systému TORRENT	80
Obrázek 29: Sumarizace hloubky vniknutí vakua v kapalných prostředích	81
Obrázek 30: Sumarizace hloubky vniknutí vakua v plynných prostředích	82
Obrázek 31: Sumarizace součinitele kT vzorků v kapalných prostředích	82
Obrázek 32: Sumarizace součinitele kT vzorků v plynných prostředích	83
Obrázek 33: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v kapalných prostředích	85
Obrázek 34: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v plynných prostředích	86
Obrázek 35: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v kapalných prostředích	87
Obrázek 36: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v plynných prostředích	88
Obrázek 37: Uložení zkušebních těles pro zkoušku kapilární vztlakovosti	89
Obrázek 38: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v kapalných prostředích	90
Obrázek 39: Sumarizace hmotnostní nasákavosti vzorků v plynných prostředích	90
Obrázek 40: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v kapalných prostředích	92
Obrázek 41: Sumarizace hmotnostních přírůstků po 18 měsících v plynných prostředích	92
Obrázek 42: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou v kapalných prostředích	94
Obrázek 43: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou v plynných prostředích	94
Obrázek 44: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v kapalných prostředích	95
Obrázek 45: Sumarizace hloubky průsaku tlakovou vodou po 18 měsících v plynných prostředích	96
Obrázek 46: Vývoj pH v kapalných prostředích	99
Obrázek 47: Vývoj pH v čase, v plynných prostředích	99

Obrázek 48: Sumarizace vývoje hodnoty pH betonu po 18 měsících v korozních prostředích	101
Obrázek 49: Sumarizace pevností v tlaku po 18 měsících v kapalných prostředích	102
Obrázek 50: Sumarizace pevností v tlaku po 18 měsících v plynných prostředích	103
Obrázek 51: Pokles pevností v tlaku po 18 měsících v kapalných prostředích	104
Obrázek 52: Pokles pevností v tlaku po 18 měsících v plynných prostředích	105
Obrázek 53: Sumarizace pevností ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v kapalných prostředích ..	107
Obrázek 54: Sumarizace pevností ztvrdlého betonu v příčném tahu po 18 měsících v plynných prostředích ...	108
Obrázek 55: Sumarizace přídržností k betonu po 18 měsících v kapalných prostředích	109
Obrázek 56: Sumarizace přídržností k betonu po 18 měsících v plynných prostředích	110
Obrázek 57: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) při zvětšení 2000x a S2 (vpravo) při zvětšení 1000x v reálném exteriérovém prostředí	110
Obrázek 58: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí s CO ₂	111
Obrázek 59: novotvary v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí s SO ₂	111
Obrázek 60: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí obsahující síraný	111
Obrázek 61: Krystaly v pórech betonu s aplikovaným nátěrem N2 (vlevo) a S2 (vpravo) na bázi sekundární krystalizace při zvětšení 3000x v prostředí obsahující chloridy	112
Obrázek 62: Ukázka zkušebních těles, vytvoření výřezu po 1 dni uložení	117
Obrázek 63: Výřez, začátek rozdrčení a vyjmutí vzorků pro testování	117
Obrázek 64: N2 receptura – 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 - 1cm od povrchu	118
Obrázek 65: S2 receptura – 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 - 1cm od povrchu	118
Obrázek 66: Xypex Concentrate - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu	118
Obrázek 67: N2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka	119
Obrázek 68: S2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka	119
Obrázek 69: Xypex Concentrate - 4000× zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu	119
Obrázek 70: N2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 - 1cm od povrchu	120
Obrázek 71: S2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 - 1cm od povrchu	120
Obrázek 72: Xypex Concentrate - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 - 1cm od povrchu	120
Obrázek 73: N2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka 5 – 6 cm od povrchu	121
Obrázek 74: S2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka	121
Obrázek 75: Xypex Concentrate - 4000 × zvětšení, hloubka 5 - 6cm od povrchu	121
Obrázek 76: N2 receptura – 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu	122
Obrázek 77: S2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu	122
Obrázek 78: Xypex Concentrate - 4000 × zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu	122
Obrázek 79: N2: receptura - 4000 × zvětšení, hloubka	123
Obrázek 80: S2 receptura - 4000 × zvětšení, hloubka	123
Obrázek 81: Xypex Concentrate - 4000 × zvětšení hloubka 5 – 6 cm od povrchu	123
Obrázek 82: První den od počátku krystalizace	124
Obrázek 83: Šestý den od počátku krystalizace	124
Obrázek 84: Dvanáctý den od počátku krystalizace	124
Obrázek 85: Hloubka průsaku tlakovou vodou v období 1-12 dnů od aplikace s aplikovanými krystalizačními hydroizolacemi	125
Obrázek 86: Xypex - krystaly překlenující trhlinu	126
Obrázek 87: Xypex - detail krystalů překlenující trhlinu (5000x zvětšení)	126
Obrázek 88: N2 receptura - krystaly překlenující trhlinu (1000x zvětšení)	127
Obrázek 89: N2 receptura - detail krystalů překlenující trhlinu (2000x zvětšení)	127
Obrázek 90: S2 receptura - krystaly překlenující trhlinu (4000x zvětšení)	127
Obrázek 91: Referenční beton bez ošetření krystalizujícími hmotami (5000x zvětšení)	127

Obrázek 92: Krystaly na povrchu pórů struktury přírodní pemzy tělesa s aplikovanou recepturou Xypex při zvětšení 3000×	128
Obrázek 93: N2 receptura v prostředí CO ₂ – 4000× zvětšení	130
Obrázek 94: N2 receptura v prostředí CO ₂ – 25000× zvětšení	130
Obrázek 95: S2 receptura v prostředí CO ₂ – 4000× zvětšení	130
Obrázek 96: S2 receptura v prostředí CO ₂ – 25000× zvětšení	130
Obrázek 97: Referenční receptura bez ošetření hydroizolací v prostředí CO ₂ – 4000× zvětšení	130
Obrázek 98: Referenční receptura bez ošetření hydroizolací v prostředí CO ₂ – 25000× zvětšení	130
Obrázek 99: Krystaly v lomové ploše vzorků s N2, S2 i referenčního betonu v prostředí CO ₂ – 1000× zvětšení	131
Obrázek 100: Krystaly v lomové ploše vzorků N2, S2 i referenčního betonu v prostředí CO ₂ – 4000× zvětšení	131
Obrázek 101: N2 receptura v prostředí SO ₂ – 4000× zvětšení	132
Obrázek 102: N2 receptura v prostředí SO ₂ – 25000× zvětšení	132
Obrázek 103: S2 receptura v prostředí SO ₂ – 4000× zvětšení	132
Obrázek 104: S2 receptura v prostředí SO ₂ – 25000× zvětšení	132
Obrázek 105: Referenční receptura v prostředí SO ₂ – 4000 × zvětšení	133
Obrázek 106: Referenční receptura v prostředí SO ₂ – 25000 × zvětšení	133
Obrázek 107: N2 receptura v prostředí při působení NaCl/I – 4000 × zvětšení	134
Obrázek 108: N2 receptura v prostředí při působení NaCl/I – 25000 × zvětšení	134
Obrázek 109: S2 receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 4000 × zvětšení	134
Obrázek 110: S2 receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 25000 × zvětšení	134
Obrázek 111: Referenční receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 4000× zvětšení	135
Obrázek 112: Referenční receptura v prostředí při působení 100 g NaCl/I – 2500 × zvětšení	135
Obrázek 113: N2 receptura v prostředí při působení SO ₄ – 4000 × zvětšení	136
Obrázek 114: N2 receptura v prostředí při působení SO ₄ – 25000 × zvětšení	136
Obrázek 115: S2 receptura v prostředí při působení SO ₄ – 4000 × zvětšení	136
Obrázek 116: S2 receptura v prostředí při působení SO ₄ – 25000 × zvětšení	136
Obrázek 117: Referenční receptura v prostředí při působení SO ₄ – 4000 × zvětšení	136
Obrázek 118: Referenční receptura v prostředí při působení SO ₄ – 25000 × zvětšení	136
Obrázek 119: krystaly v pórové struktuře vzorků s N2, S2 recepturou v prostředí SO ₄ – 4000× zvětšení	137
Obrázek 120: krystaly v pórové struktuře vzorků s N2 a S2 recepturou v prostředí SO ₄ – 10000× zvětšení	137
Obrázek 121: Grafické vyhodnocení analýzy EDS vzorku přírodní pemzy s aplikovanou recepturou Xypex	179
Obrázek 122: Protokol o měření přírodních radionuklidů receptury S2 v laboratoři VUSTAH	180
Obrázek 123: Protokol o měření přírodních radionuklidů receptury N2 v laboratoři VUSTAH	181
Obrázek 124: Protokol zkoušky hygienické nezávadnosti v laboratoři SZÚ	181

Seznam příloh

Optimalizace kapalných prostředí

Výběr variant:	Druh agresivní kapaliny
A	s obsahem síranů
B	s obsahem chloridů
C	s obsahem CO ₂ a jeho iontových forem
D	s obsahem sloučenin dusíku
E	s obsahem iontů Mg ²⁺

Výběr kritérií		
číslo	Kritérium/jednotka	Jednotka
1	průměrná koncentrace v povrchových vodách ČR	mg/l
2	průměrná koncentrace v podzemních (minerálních) vodách v ČR	mg/l
3	průměrné pH	
4	vliv na vyluhování Ca(OH) ₂	ano/ne
5	vznik krystalizačních novotvarů	ano/ne

Rozhodovací matice:								
číslo	optimum	A	B	C	D	E	min	max
1	max	60,0	10,0	30,0	1,1	10,0	1,1	60,0
2	max	1000,0	500,0	300,0	1,4	200,0	1,4	1000,0
3	min	5,0	7,5	8,3	5,0	10,0	5,0	10,0
4	max	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00
5	max	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Fullerův trojúhelník

1	1	1	1
2	3	4	5
1	3	1	1
2	2	2	
3	4	5	
3	4	5	
3	3		
4	5		
3	3		
4			
5			
5			

číslo	Kritérium
1	průměrná koncentrace v povrchových vodách v ČR
2	průměrná koncentrace v podzemních (minerálních) vodách v ČR
3	průměrné pH
4	vliv na vyluhování Ca(OH) ₂
5	vznik krystalizačních novotvarů

Výpočet váhy kritérií				
číslo	Počet	P _i	V _i	F _i
1	3	4	2	0,133
2	0	1	5	0,333
3	4	5	1	0,067
4	1	2	4	0,267
5	2	3	3	0,200
n=	5	Suma:	15	1,000

$$V_i = n + 1 - P_i \quad [11]$$

$$F_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

$$c_{ij} = F_i \cdot b_{ij} = F_i \cdot \begin{cases} MAX \rightarrow b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN_{(a_i)}}{MAX_{(a_i)} - MIN_{(a_i)}} \\ MIN \rightarrow b_{ij} = \frac{MAX_{(a_i)} - a_{ij}}{MAX_{(a_i)} - MIN_{(a_i)}} \end{cases}$$

- kde
- Počet** počet bodů
 - P_i** pořadí podle počtu označení kritéria
 - N** počet kritérií
 - V_i** důležitost kritéria
 - F_i** váha kritérií
 - c_{ij}** výsledná hodnota vypočtená s váhy kritéria a b_{ij}
 - b_{ij}** hodnota kritéria závislá na podle požadovaného maxima či minima daného kritéria
 - a_{ij}** hodnota kritéria

Výpočtová matice							
číslo	F _i	optimum	A	B	C	D	E
1	0,1333	1	0,133	0,020	0,065	0,000	0,020
2	0,3333	1	5,653	2,823	0,020	0,020	1,126
3	0,0667	0	0,062	0,059	0,059	0,062	0,057
4	0,2667	1	0,000	0,000	-0,005	-0,005	0,000
5	0,2000	1	0,000	0,000	-0,004	-0,004	-0,004
SUMA			5,848	2,902	0,135	0,074	1,198

Na základě výsledků multikritériální analýzy byla vybrána prostředí s obsahem síranů a s obsahem chloridů.

Optimalizace plyných prostředí

Výběr variant:	
Druh agresivního plynu	
A	CO ₂
B	SO ₂
C	NO ₂
D	HCl
E	NH ₃

Výběr kritérií		
Číslo	Kritérium/jednotka	Jednotka
1	průměrná koncentrace plynu v znečištěném ovzduší	mg/m ³
2	agresivita plynu při relativní vlhkosti do 60% v závislosti na koncentraci	ano(1)/ne(0)
3	agresivita plynu při relativní vlhkosti 60-75% v závislosti na koncentraci	ano(1)/ne(0)
4	agresivita plynu při relativní vlhkosti nad 75% v závislosti na koncentraci	ano(1)/ne(0)
5	doba setrvání plynu v troposféře	roky
6	vznik krystalizačních novotvarů	ano(1)/ne(0)

Rozhodovací matice:								
číslo	optimum	A	B	C	D	E	MIN	MAX
1	max	746	0,57	0,56	0,07	0,02	0,02	746
2	max	0	0	0	0	0	0	0
3	max	0	1	1	1	0	0	1
4	max	1	1	1	1	1	1	1
5	max	3	0,02	0,008	0,003	0,003	0,003	3
6	max	1	1	0	0	0	0	1

Fullerův trojúhelník

1	1	1	1	1
2	3	4	5	6
1	1	4	1	1
2	2	2	2	
3	4	5	6	
3	4	2	2	
3	3	3		
4	5	6		
4	3	3		
4	4			
5	6			
4	4			
5				
6				
5				

Číslo	Kritérium
1	průměrná koncentrace
2	relativní vlhkost do 60%
3	relativní vlhkost 60-75%
4	relativní vlhkost nad 75%
5	doba zdržení plynu v troposféře
6	vznik krystalizačních novotvarů

Výpočet váhy kritérií

číslo	Počet	Pi	Vi	Fi
1	4	5	2	0,0952
2	2	3	4	0,1905
3	3	4	3	0,1429
4	5	6	1	0,0476
5	1	2	5	0,2381
6	0	1	6	0,2857
n=	6	Suma:	21	1,0000

Výpočtová matice

číslo	Fi	optimum	A	B	C	D	E
1	0,0952	1	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,1905	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,1429	1	0,00	0,14	0,14	0,14	0,00
4	0,0476	1	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
5	0,2381	1	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,2857	1	0,29	0,29	0,00	0,00	0,00
Suma			68,9	50,0	21,3	21,3	7,0

Na základě výsledků multikritériální analýzy byla vybrána prostředí CO₂ a SO₂ iontů.

EDS analýzy vlivu času a prostředí na mikrostrukturu betonu

V tabulkách jsou vyhodnoceny výsledky krystalů receptur v jednotlivých prostředích.

Působení vysokých koncentrací CO₂Tabulka 63: N2 receptura v CO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	2,04	4,46	0,0077	1,0733	0,3510	1,0008
O	29,64	48,61	0,0547	1,0527	0,1753	1,0001
Al	1,07	1,04	0,0080	0,9764	0,7679	1,0055
Si	4,11	3,84	0,0354	1,0044	0,8487	1,0082
S	3,40	2,78	0,0322	0,9915	0,9318	1,0232
K	10,26	6,88	0,1038	0,9502	0,9841	1,0823
Ca	49,48	32,39	0,4663	0,9707	0,9709	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 64: S2 receptura v CO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	5,11	8,18	0,0124	1,0416	0,2328	1,0007
O	61,34	73,61	0,1442	1,0219	0,2300	1,0001
Al	4,41	3,14	0,0269	0,0459	0,6427	1,0026
Si	1,48	1,01	0,0105	0,9692	0,7269	1,0042
S	6,89	4,13	0,0590	0,9593	0,8865	1,0071
Ca	20,76	9,95	0,1916	0,9398	0,9816	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 65: Referenční receptura v CO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	9,75	16,38	0,0276	1,0477	0,2699	1,0007
O	47,39	59,77	0,0968	1,0278	0,1988	1,0001
Al	3,45	2,58	0,0234	0,9518	0,7095	1,0038
Si	3,82	2,75	0,0296	0,9761	0,7896	1,0050
S	4,81	3,03	0,0425	0,9655	0,9041	1,0117
Ca	30,77	15,49	0,2876	0,9458	0,9882	1,0000
Total	100,00	100,00				

Působení vysokých koncentrací SO₂Tabulka 66: N2 receptura v SO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	1,27	3,20	0,0056	1,0826	0,4043	1,0012
O	16,19	30,50	0,0477	1,0617	0,2773	1,0002
Al	2,61	2,92	0,0229	0,9854	0,8836	1,0087
Si	4,08	4,38	0,0387	1,0150	0,9223	1,0137
S	10,33	9,71	0,1029	1,0012	0,9659	1,0305
Ca	65,52	49,29	0,6363	0,0980	0,9912	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 67: S2 receptura v SO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	2,64	4,58	0,0106	1,0496	0,3806	1,0009
O	53,91	70,19	0,2229	1,0296	0,4016	1,0001
Al	4,39	3,39	0,0362	0,9536	0,8596	1,0048
Si	2,39	1,78	0,0212	0,9781	0,8995	1,0074
S	7,87	5,11	0,0741	0,9674	0,9599	1,0138
Ca	28,79	14,96	0,2708	0,9476	0,9924	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 68: Referenční receptura v SO₂ prostředí - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	8,48	14,50	0,0289	1,0487	0,3253	1,0009
O	47,60	61,12	0,0957	1,0288	0,1954	1,0001
Mg	0,38	0,32	0,0021	0,9831	0,5716	1,0022
Al	0,83	0,63	0,0056	0,9528	0,7071	1,0043
Si	6,69	4,89	0,0530	0,9775	0,8077	1,0043
S	0,52	0,33	0,0046	0,9667	0,8992	1,0141
K	0,34	0,18	0,0033	0,9272	0,9841	1,0745
Ca	35,18	18,03	0,3313	0,9469	0,9945	1,0000
Total	100,00	100,00				

Působení roztoku 100g NaCl/l

Tabulka 69: N2 receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	6,05	9,79	0,0175	1,0433	0,2766	1,0008
O	58,37	70,88	0,1325	1,0235	0,2217	1,0001
Na	0,34	0,29	0,0012	0,9550	0,3637	1,0010
Al	3,63	2,61	0,0228	0,9475	0,6616	1,0029
Si	3,82	2,64	0,0279	0,9711	0,7497	1,0034
S	2,61	1,58	0,0224	0,9610	0,8831	1,0090
Cl	0,00	0,00	0,0000	0,9191	0,9154	1,0157
K	0,95	0,47	0,0089	0,9219	0,9755	1,0446
Ca	24,23	11,74	0,2252	0,9415	0,9872	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 70: S2 receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	6,23	9,62	0,0166	1,0381	0,2572	1,0008
O	64,66	75,00	0,1786	1,0184	0,2713	1,0001
Al	3,84	2,64	0,0245	0,9424	0,6750	1,0025
Si	1,92	1,27	0,0141	0,9653	0,7590	1,0066
S	5,61	3,25	0,0486	0,9556	0,9003	1,0066
Ca	17,74	8,21	0,1640	0,9364	0,9876	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 71: Referenční receptura v prostředí chloridů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	2,52	5,53	0,0118	1,0730	0,4354	1,0013
O	27,74	45,72	0,0764	1,0524	0,2615	1,0001
Al	3,19	3,12	0,0268	0,9761	0,8553	1,0067
Si	5,82	5,46	0,0531	1,0041	0,9007	1,0091
Cl	2,51	1,87	0,0242	0,9471	0,9714	1,0493
Ca	58,23	38,31	0,5619	0,9704	0,9945	1,0000
Total	100,00	100,00				

Působení roztoku 34,6g Na₂SO₄/l

Tabulka 72: N2 receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	5,05	8,18	0,0144	1,0430	0,2742	1,0008
O	59,86	72,89	0,1496	1,0232	0,2442	1,0001
Al	3,41	2,46	0,0225	0,9472	0,6948	1,0029
Si	2,19	1,52	0,0167	0,9708	0,7788	1,0044
S	4,99	3,03	0,0439	0,9607	0,9077	1,0095
Ca	24,50	11,91	0,2282	0,9412	0,9895	1,0000
Total	100,00	100,00				

Tabulka 73: S2 receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	8,21	12,69	0,0202	1,0377	0,2371	1,0007
O	61,43	71,31	0,1545	1,0180	0,2470	1,0001
Na	0,46	0,37	0,0016	0,9500	0,3649	1,0008
Al	0,42	0,29	0,0026	0,9421	0,6632	1,0035
Si	4,18	2,76	0,0316	0,9650	0,7796	1,0044
S	7,31	4,24	0,0632	0,9553	0,8993	1,0065
Ca	18,00	8,34	0,1656	0,9361	0,9832	1,0000
Total	100,00	100,00				

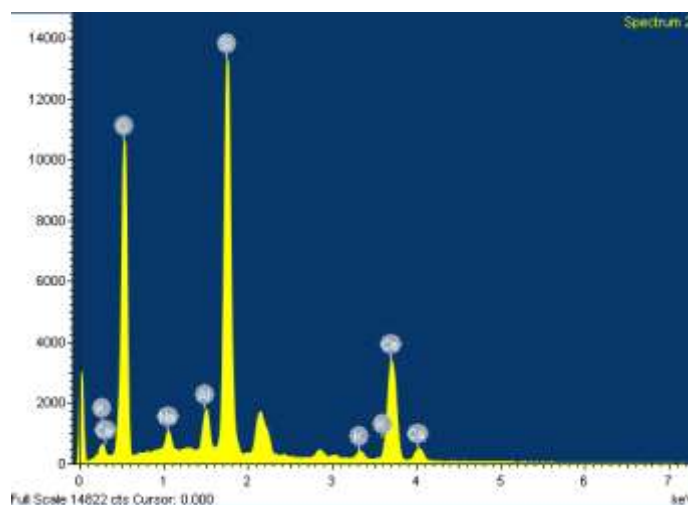
Tabulka 74: referenční receptura v prostředí síranů - sumarizace kvantifikační prvkové analýzy

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C	5,94	10,09	0,0270	1,0477	0,4325	1,0009
O	51,65	65,82	0,1915	1,0278	0,3607	1,0001
Al	2,67	2,02	0,0217	0,9518	0,8461	1,0055
Si	8,55	6,21	0,0752	0,9761	0,8966	1,0046
Ca	31,18	15,86	0,2938	0,9458	0,9963	1,0000
Total	100,00	100,00				

Těsnění betonu za pomoci krystalizujících hmot

Tabulka 75: Sumarizace analýzy EDS vzorku přírodní pemzy s aplikovanou recepturou Xypex

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
	36.84	1.0596	45.50	0.16	62.70
Na	1.22	1.3610	1.18	0.04	1.13
Al	1.91	1.0940	2.28	0.04	1.86
Si	21.73	1.0769	26.43	0.11	20.75
K	1.20	1.0840	1.45	0.06	0.82
Ca	17.55	0.9918	23.17	0.13	12.75
Totals			100.00		



Obrázek 121: Grafické vyhodnocení analýzy EDS vzorku přírodní pemzy s aplikovanou recepturou Xypex

Protokoly ekotoxicity, obsahu radionuklidů a hygienické nezávadnosti

VYSTAH
Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.
Hněvkovského 30/65, 617 00 BRNO
zapsaná v OR u Krajského soudu v Brně, oddíl B, vložka 3470

☎ +420 643 529 200 – ústředna
+420 643 249 419 – sekretariát
FAX: +420 643 216 029
e-mail: vustah@vustah.cz

IČO: 26232511
DIČ: CZ26232511
Bankovní spojení: KB Brno - město
Číslo účtu: 86-0852290247/0100

Radionuklidová laboratoř
Povolení SÚJB ze dne 1.11.2006 na dobu neurčitou, č. j. 53241/2006
Tel.: 543 529 321 e-mail: radionuklidy@vustah.cz

Protokol
o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech
č. 340/2009

Specifikace zkoušky: Systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech na základě zákona 133/1997 Sb. v platném znění §6 odst. 6. Tato činnost podrobněji upravuje vyhláška 307/2002 Sb. v platném znění (dále jen vyhláška) §96, příloha č. 10, tabulky č. 1, 2, 3.

Mířící metodika: spektrometrie záření gama

Míření provedl: Radionuklidová laboratoř, p. Poloučeková

Dne: 7.9.2009

Použitý přístroj: spektrometr InSpector, GC3018 P-Type Ge detektor firmy CANBERRA

Kalibrační přístroje: standardy RM typ C155, ČMI IIZ Praha dne 17.6.2008, platnost ověření do 31.12.2010

Vzorek č.: 8226

Měřený materiál: Hydroizolační cementová stěrka S2

Datum odběru vzorku: 6.8.2009

Závod, lokalita, osoba: Laboratoř VUT v Brně, FAST, doc. Ing. Jiří Bydětovský, CSc.

Objednatel: VUT v Brně, Fakulta stavební, Veveří 95, 602 00 Brno

Výsledky měření

⁴⁰ K	B	²²⁶ Ra	B	²³² Th	B
hmotnostní aktivita v Bq/kg		hmotnostní aktivita v Bq/kg		hmotnostní aktivita v Bq/kg	
349	±51	20	±2	13	±3

M (laboratorní rozdílová nejistota vyjádřená s použitím koeficientu rozšíření 2, který odpovídá intervalu spolehlivosti 95%)

Stanovení indexu hmotnostní aktivity dle vyhlášky §3 písm. h): $I = 0,25 \pm 0,01$

Hodnocení:
Index hmotnostní aktivity **nepřevyšuje** směrnou hodnotu $I = 1$ stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 2 pro ostatní stavební materiály určené k použití ve stavbách s obytnými nebo pohybovými místnostmi. Hmotnostní aktivita ²²⁶Ra **nepřevyšuje** mezní hodnotu 150 Bq/kg stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 1 pro stavební materiál používaný pro stavby s obytnými nebo pohybovými místnostmi.

Zodpovědný pracovník: Mgr. Věra Poloučeková, Ph.D.

Výzkumný ústav
stavebních hmot, a. s.
Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno
IČO: 26232511 DIČ: CZ26232511

Datum vydání protokolu: 8.9.2009
Ing. Jaroslava Ledeterevová, CSc.
ředitelka firmy

Obrázek 122: Protokol o měření přírodních radionuklidů receptury S2 v laboratoři VUSTAH

VUSTAV
Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.
Hněvkovského 30/65, 617 00 BRNO
zápisová v OR a Kapslovské nábřeží v Brně, oddíl B, vložka 3470

TEL: +420 543 329 308 – zástupce
+420 543 329 416 – sekretariát
FAX: +420 543 316 026
e-mail: vustav@vustav.cz

www.vustav.cz

Radionuklidová laborator
Posíláme SÚM ze dne 1.11.2009 na adresu: MUDr. J. Š. 6324/12359
e-mail: radionuklidy@vustav.cz

Protocol

a) měření a hodnotění obsahu přechodných radionuklidů ve stavebních materiálech

L. 466/2008

Specifické akuality:	Hydroizolácia stien v jednom etape pripravených, rovinných a so stavebnými materiálmi so suchou základou (10/1997) v plánu stien (4 odh. a 4,46 t/m² celkovo) podľa objemu spracovania vyčíslenia 397/2002 36 v pláne stien (1466 kg vyčíslenia) 196, príloha č. 16, tabuľka č. 1, 2, 3. Radikálna oprava závlahy kanál. Spoločná stavba laboratória, pri Komári 9.12.2004 správať inšpekciu: GC0318-PZ časť č.10 Henry CANNIBIA standardy RM typ C805, C8-PF Praha (17.6.2008, platnosť opravy) 11.12.2010
Miesto umiestnenia:	Hydroizolácia stien so stien 192
Miesto prevádzky:	11.12.2010
Miesto umiestnenia:	Stavebné práce v rámci FAST, časť 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765,

Violent and Fearful

^{84}K	n	^{226}Ra	n	^{232}Th	n
Ammoniumchlorid, aktiviert in H_2O		Ammoniumchlorid, aktiviert in H_2O		Ammoniumchlorid, aktiviert in H_2O	
415	+62	12	+1	13	+1

* Continuous culture system suitable for both batch and continuous T-cell stimulation assays

Wiederholungsindizes kennzeichnen die erhaltene Übereinstimmung: $\beta = 0.54$

Heterocyclic

Tab. 1. Intenzita aktivity radionuklidů ve zvláštní skupině bioakumulujících radionuklidů ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu vyplývající z kontaminace: hodnota 1 = 0,5 stanovené vyhlášky příloha č. 18, tabulka č. 2. Uvnitřní kontaminace: ^{137}Cs vyplývá z intenzity kontaminace 150 Bq/kg stanovené vyhláškou příloha č. 18, tabulka č. 1.

Military example

SYNOPSIS

[illegible]

Indigobatis parvirostris

Station voltage profile: 0.17 MW

Maj. Vilina Polunakova, PhD

Výkonný zástupce
Miroslav Štěrba, z.s.
Telefon: 022 412 30 00
E-mail: info@zskc.cz

Obrázek 123: Protokol o měření přírodních radionuklidů receptury N2 v laboratoři VUSTAH

[illegible]

Obrázek 124: Protokol zkoušky hygienické nezávadnosti v laboratoři SZÚ