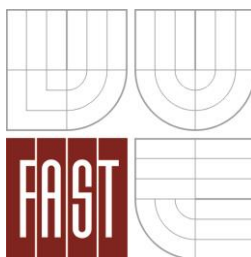


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

ZKRÁCENÁ VERZE DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Ing. ŠTĚPÁN BOHUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE: Prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA

DATUM OBHAJOBY: 17. 12. 2013

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	4
3	CÍL PRÁCE	7
4	METODIKA PRÁCE	8
4.1	ETAPA I. OPTIMALIZACE A VÝVOJ MODIFIKOVANÝCH HMOT SE SCHOPNOSTÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE CEMENTU.....	9
4.2	ETAPA II. FUNKČNOST MODIFIKOVANÝCH KRYSTALIZUJÍCÍCH HMOT	11
4.3	ETAPA III. ROZŠÍŘENÉ ANALÝZY VLIVU NAVRŽENÝCH HMOT NA MIKROSTRUKTURU BETONU	13
5	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH POZNATKŮ	15
5.1	ETAPA I. OPTIMALIZACE A VÝVOJ MODIFIKOVANÝCH HMOT SE SCHOPNOSTÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE CEMENTU.....	15
5.2	ETAPA II. FUNKČNOST MODIFIKOVANÝCH KRYSTALIZUJÍCÍCH HMOT	16
5.2.1	Účinnost navržených receptur na těsnění povrchových vrstev betonu	16
5.2.2	Bariérové vlastnosti vůči působení agresivních kapalin a plynů	18
5.2.3	Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s krystalizující hydroizolací	20
5.3	ETAPA III. ROZŠÍŘENÉ ANALÝZY VLIVU NAVRŽENÝCH HMOT NA MIKROSTRUKTURU BETONU	21
5.3.1	Ověření funkčnosti těsnění pórů	21
5.3.2	Vliv času a prostředí na mikrostrukturu betonu.....	23
5.3.3	Výsledné receptury, ekotoxicita, obsah radionuklidů a hygienická nezávadnost	25
6	PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI	26
7	ZÁVĚR	28
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY (VÝBĚR)	30
9	CURRICULUM VITAE	31
10	PUBLIKAČNÍ ČINNOST A PROJEKTY.....	32
11	ABSTRAKT	34

1 ÚVOD

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.

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 plynotěsnost. 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.

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. Snížení spotřeby celosvětově využívaného portlandského cementu by proto napomohlo omezení emisí oxidu uhličitého.

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.

Ve spojitosti s využitím vhodných příměsí je však 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.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

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).

Vnitřní 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.

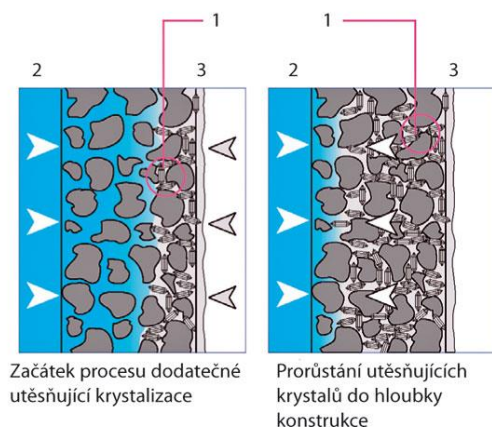
Sekundární (vnější) typ ochrany se aplikuje po dokončení stavby převážně za účelem zastavení přístupu vody do materiálu konstrukce, a tak ji chrání před škodlivými účinky agresivních látek. Používá se jednak u nových nedegradovaných konstrukcí pro zvýšení korozní odolnosti stavby tak u starších, mnohdy již narušených konstrukcí. Velmi rozšířené systémy jsou v současnosti speciální krystalizující materiály.

Historie sanací betonových konstrukcí pomocí hmot se schopností sekundární krystalizace cementu začala na přelomu 80. a 90. let v Kanadě. Dnes je široce rozšířena především v asijských zemích, kdežto u nás stále převládá jistá nedůvěra projektantů a veřejnosti v její použití. 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. Tyto silikátové těsnící hmoty se aplikují při teplotách +5 °C až +25 °C na vlhký savý podklad s kapilárami, který je nutný pro průběh krystalizace a průnik účinné složky do hloubky. Pokud je v době aplikace konstrukce suchá, nedojde ke krystalizující reakci. Ta začne probíhat až v momentě přítomnosti vody v pórovém systému.

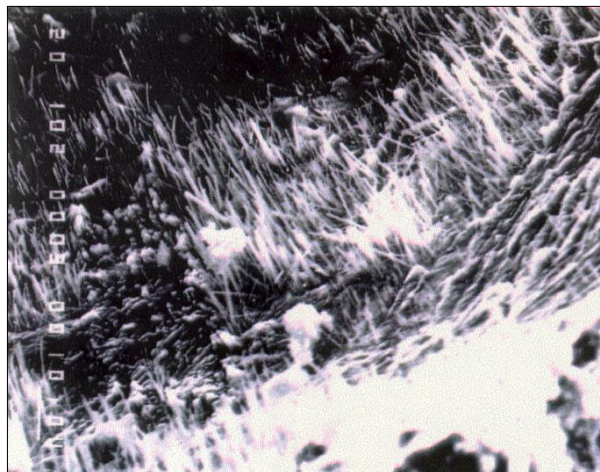
Po aplikaci krystalizující hmoty na povrch betonové konstrukce za přítomnosti vlhkosti proniknou díky koncentračnímu spádu aplikované chemické přísady do struktury betonu, kde zahájí proces krystalizace a prorůstání vznikajících krystalků nerozpustných sloučenin přímo do struktury ošetřovaného betonu (viz obr. 1). 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 např. v práci Brunauera[3] a Furuy et al.[5], jde o proces doprovázený tvorbou tobermoritového gelu, kdy společně s ním za přítomnosti Ca(OH)_2 vznikají hexagonální kalciumhydroalumináty. Zhang et al. [22] ovšem u této teorie dále předpokládá, že vznik krystalové struktury během reakcí nespotebovává aktivní chemickou látku obsaženou v krystalizujících hmotách, ale ta naopak tvoří pouze roli katalyzátoru, takže reakce a tvorba krystalů se může při opětovém dotování konstrukce vodou obnovit (spodní stavby, prosakující konstrukce, čerstvý beton).

Tyto nové krystalické struktury látky vyplňují volné póry betonu, a tím přispívají ke zvýšení jeho odolnosti vůči obrušování a snížení nasákavosti. Hlavní výhodou těchto hmot je především stabilní těsnící efekt. 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. Vzhledem k faktu, že hmoty se schopností sekundární krystalizace distribuované na světových trzích mají ryze komerční charakter, je jejich složení a samotný funkční princip jednotlivými výrobci úzkostlivě chráněno.

Výskyt a tvorbu těchto jehličkovitých krystalů potvrdil na základě pozorování pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), ve své práci např. Mitsuki, et al.[15] a později v práci Peek, et al.[17]. Oba autoři došli ve svých pracích k závěru, že jehličkovité krystaly prorůstají do hloubky přes 30 cm během jednoho roku (viz obr. 2).



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



Obrázek 2: Hydroizolace Xypex, 10 cm pod povrchem, zvětšeno 1000x [15]

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 k vytvoření primární hydroizolace nové konstrukce. Tato technologie je nazývána „technologie bílých van modifikovaná krystalizující přísadou“.

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 faktory:

- 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.

3 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 je tedy 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, bude prověřeno na požadované reologické a dlouhodobé těsnící (krystalizující) vlastnosti finálních receptur.

Vzhledem k praktickému využití těchto hydroizolačních polymercementových nátěrů a stěrek, jsou receptury podrobeny dlouhodobému vlivu agresivních činitelů, kterým mohou být konstrukce běžně vystaveny. Koncepce návrhu bude 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 bude 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, je 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 dojde rovněž k prověření těsnících vlastností navržených receptur pod vlivem agresivních prostředí a bude prozkoumána schopnost těsnění povrchových trhlin při aplikaci na různé typy podkladů.

4 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 a environmentální přínos na výslednou cenu nově vytvořené krystalizující hmoty. Na tuto část navazuje návrh receptur zkušebních vzorků, u kterých je pozornost zaměřena na sledování zejména vlhkostních, strukturálních a fyzikálně-mechanických charakteristik.

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 je výběr finálních receptur pro případnou produkci, u nichž jsou testovány vlastnosti nutné pro uvedení produktu do výroby, ekotoxicita, obsah radionuklidů a hygienická nezávadnost.

Disertace byla řešena s podporou projektu MPO. V souladu s jeho řešením budou výsledky společného výzkumu využity pro úspěšné zavedení nových variant nátěrů a stěrek na bázi krystalizace do výrobního portfolia firmy Betosan s.r.o.

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

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

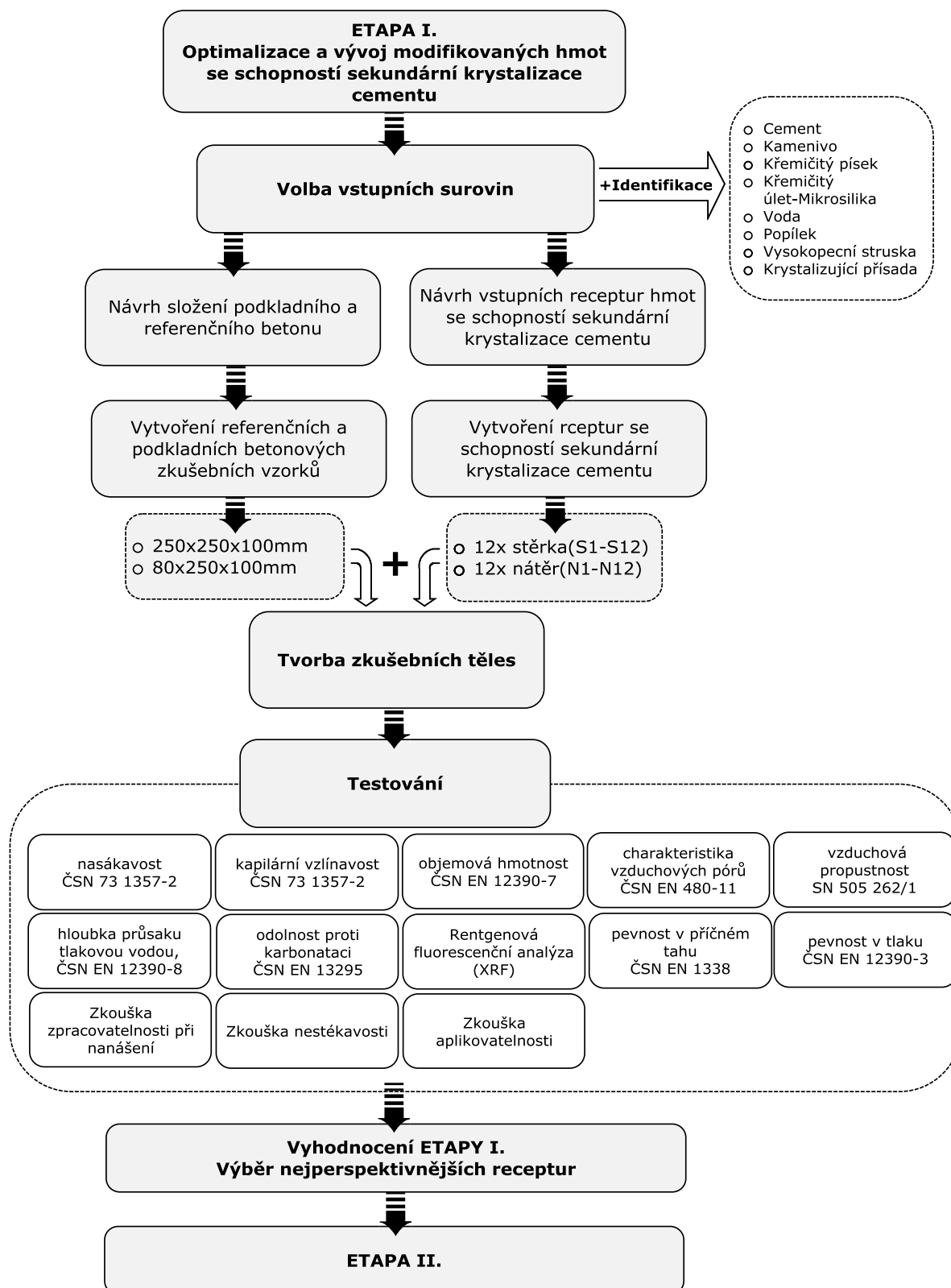
- volbu vstupních surovin a jejich identifikaci,
- návrh a tvorbu referenčních a podkladních betonových zkušebních vzorků,
- návrh receptur hydroizolačních nátěrů a stěrek,
- tvorbu zkušebních vzorků,
- testování navržených nátěrů a stěrek,
- výběr nejperspektivnějších receptur se schopností sekundární 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 vztlínavost (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 3.



Obrázek 3: Grafické znázornění průběhu ETAPY I.

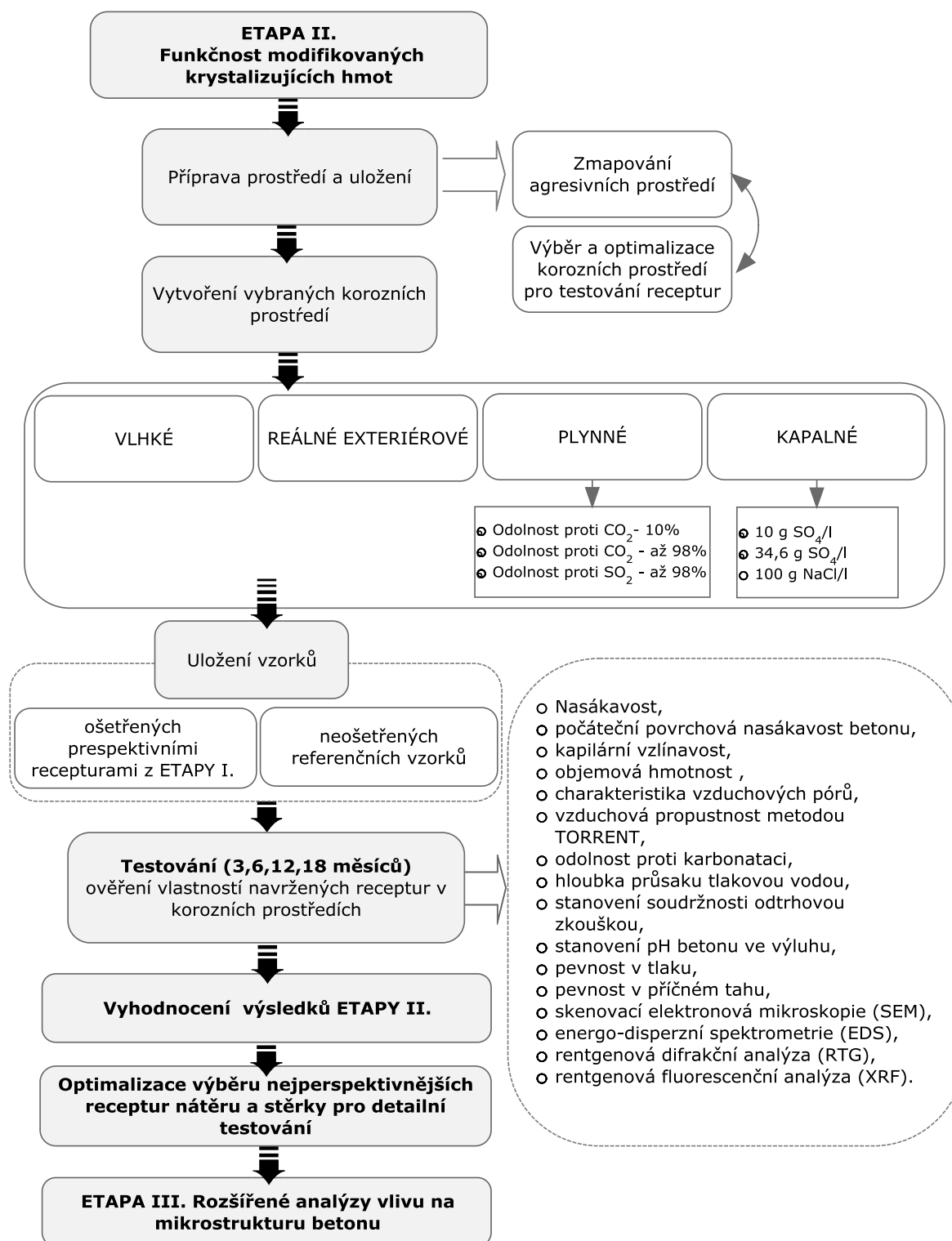
4.2 ETAPA II. Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot

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 (3-18 měsíců) dojde pomocí zvolených zkoušek dle grafu na obrázku 4 k experimentálnímu ověření vlhkostních, strukturálních a fyzikálně-mechanických charakteristik.

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 4.



Obrázek 4: Grafické znázornění průběhu ETAPY II.

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

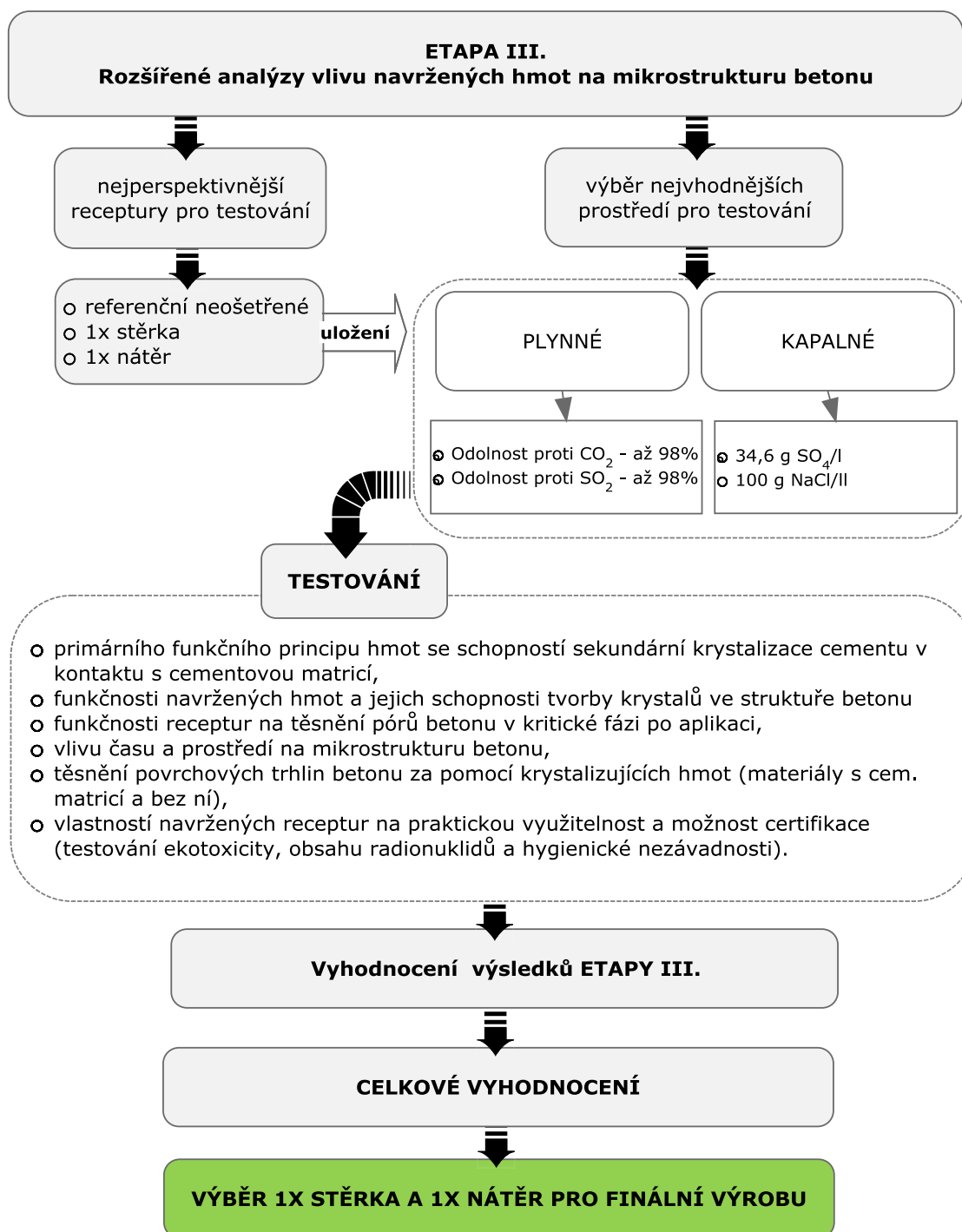
Tato etapa logicky navazuje na etapu II. „Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot“ a na základě jejich výsledků v ní dojde k:

- 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 5.



Obrázek 5: Grafické znázornění průběhu ETAPY III.

5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH POZNATKŮ

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.

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

- Bylo navrženo dvacet čtyři vstupních receptur polymercementových nátěrů a stěrů s použitím odpadních surovin. Ve složení receptur jsou zakomponovány Xypex Admix jako zvolená chemická (krystalizující) přísada a příměs (struska a popílek), jako částečná náhrada portlandského cementu.
- Odpadní surovinou bylo v těchto recepturách následně nahrazováno 10 a 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.

Z provedených analýz schopností sekundární krystalizace receptur vyplynulo, že 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 pracovníkům při aplikaci problémy a případně reklamace u výrobce. 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.*

Jako 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), které obsahovaly odpadní surovinu popílek z elektrárny Chvaletice (10 %).

5.2 ETAPA II. Funkčnost modifikovaných krystalizujících hmot

Pro analýzu schopností receptur odolávat působení běžných agresivních činitelů působících na konstrukce, byla na základě multikriteriálního výběru zvolena plynná prostředí dle tabulky 1. Vlastnosti receptur, byly poté komparovány po šesti, dvanácti a osmnácti měsících v těchto prostředích s vlastnostmi, po třech měsících ve vlhkém prostředí (s relativní vlhkostí nad 65 % a teplotou 21 ± 2 °C).

Tabulka 1: Vybraná agresivní prostředí a jejich charakteristika

PROSTŘEDÍ		KONCENTRACE
Odolnost proti CO ₂	plynné	nízká koncentrace % (do 10 %)
Odolnost proti CO ₂		vysoká koncentrace % (až 98 %)
Odolnost proti SO ₂		vysoká koncentrace % (až 98 %)
Odolnost proti působení síranů - SO ₄ ²⁻	kapalné	10 g Na ₂ SO ₄ /l
Odolnost proti působení síranů - SO ₄ ²⁻		34,6 g Na ₂ SO ₄ /l
Odolnost proti působení chloridů - Cl-		100 g NaCl/l
Reálné exteriérové prostředí		

Beton sloužící jako podkladní materiál pro nanesení a testování receptur byl navržen s vysokou mírou otevřených pórů, vhodných pro snadné pronikání vody a tvorby krystalů s vysokým celkovým obsahem vzduchu (9,58 objemových %) a výskytem vyvinuté pórové struktury. Nasákavost po 28 dnech vyžráti směsi dle ČSN 73 1357-2 dosahovala 2,87 %.

5.2.1 Účinnost navržených receptur na těsnění povrchových vrstev betonu

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 povrchové vrstvy betonu a navržených receptur. Všechny receptury (N1-N3, S1-S3), uložené v celém spektru agresivních prostředí prokázaly velmi dobré těsnící vlastnosti:

- Během celého procesu vystavení receptur korozním působení, ani v jednom případě nedošlo k viditelnému poškození vrstvy navržených nátěrů a stěrek. Poškození vrstvy a její případné odlupování, nebo odpadání by totiž vedlo ke snížení hydroizolačních vlastností spolu s estetickými vadami konstrukce.
- Všechny receptury vykazovaly prakticky nulovou povrchovou nasákavost pomocí tzv. metody ISAT, simulující např. krátkodobé působení deště. Tedy méně než 0,07 ml/m²/s během 120 min, což odpovídalo nejlepší možné klasifikaci povrchové nasákavosti betou, „nízká“.
- Testováním metodou TORRENT potvrdilo snížení kvality povrchových vrstev většiny receptur maximálně o jednu třídu a nejvýraznější pokles byl zaznamenán během expozice v reálném exteriérovém prostředí. V něm 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 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 přístupu vody k cementové matici, popř. tvorbě ledu a jeho expanzního působení v zimním období.

- V porovnání přídržnosti k betonu komerčně vyráběných receptur na bázi sekundární krystalizace (2 MPa)¹ lze 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 34,6 g SO_4/l , které během celého průběhu testování receptur působilo na receptury silně destruktivně.

Tyto výsledky testování funkčnosti vrstvy nátěrů a stěrce korespondovaly se zkouškou hloubky karbonatace proti působení CO_2 dle normy ČSN EN 13295, kdy navržené receptury odolaly po dobu relativně krátké expozice 56 dnů a následně i po osmnácti měsících působení korozních prostředí. K prokazatelnému vlivu korozních činitelů došlo pouze u ojedinělých vzorků nátěrů N1-N3 do hloubky 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, 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 [20], 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 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, tedy shodně s rozdělením uvedeným v práci Matouška a Drochytky [12] bylo možno všechny testované vzorky zařadit do první fáze karbonatace. Referenční vzorky bez ošetření krystalizujícími recepturami, vždy vykazovaly větší úbytek pH během osmnácti měsíců v uložení, než vzorky ošetřené N2 a S2 (od -0,24 do -0,67 pH).

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.

¹ Drizoro CZ, s.r.o., Betosan s.r.o., Xypex Corporation.

5.2.2 Bariérové vlastnosti vůči působení agresivních kapalin a plynů

Na základě výsledků testování bariérových vlastností navržených krystalizujících receptur proti pronikání vody lze 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.

Největší rozdíl vlastností mezi referenční recepturou bez ošetření a vzorky s aplikovanými krystalizujícími hydroizolacemi způsobila agresivní prostředí po osmnácti měsících působení, kdy dlouhý interval působení přinesl pozitivní odpověď na bariérové vlastnosti navržených receptur. Neošetřený beton vykazoval vždy ve všech prostředích celkově vyšší přírůstek hmotnosti než navržené nátěry a stěrky a dále vyplynulo:

- 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 % hmotnosti, z nátěrových receptur N3 (1,5 hm. %) a ze stěrkových receptur stěrka S3, 2,48 hm. %.
- Nátěry N1-N3 prokázaly snížení přírůstku hmotnosti v porovnání s neošetřeným betonem od 0,09 hm. % (N2 v prostředí o nízké koncentraci CO_2) do snížení o 2,12 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 hm. % (S2 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 hm. %) a ze stěrkových receptur S2 (o 0,43 hm. %) nejvyššího zvýšení bariérových odolností ošetřeného betonu proti pronikání vody.

Většina stavebních konstrukcí je ohrožována vodou, která je transportována působením kapilární vztlakovosti a i zde práce u všech navržených receptur nátěrů a stěrek jednoznačně potvrdila zvýšení voděodolnosti proti jejímu pronikání. Relativně krátký interval zkoušení 48 hodin ale nepřinesl natolik průkaznou diverzifikaci působení jednotlivých prostředí, aby bylo možno jednoznačně potvrdit vliv jednotlivých korozních činitelů a určit prostředí, ve kterém jsou receptury narušovány nejvíce. Z výsledků vyplývá:

- Referenční vzorky dosahovaly ve vlhkém prostředí hmotnostních přírůstků 0,19 hm. % po maximum 0,47 hm. % v prostředí s koncentrací $34,6 \text{ g SO}_4/\text{l}$.
- Pro nátěrové receptury N1-N3 se přírůstek hmotnosti po osmnácti měsících pohyboval v závislosti na korozním prostředí od 0,08 do 0,29 hm. %, kdežto stěrkové receptury dosahovaly celkově vyšších hmotnostních přírůstků (0,17 – 0,39 hm. %).

- Z celkové sumarizace výsledků testování vyplývá, že nátěry mají od 0,06 hm. % až 0,31 hm. %, nižší hmotnostní přírůstky než referenční beton v daném prostředí a stěrky vykazují toto snížení o 0,04 hm. % až 0,15 hm. % v závislosti na korozním prostředí.
- Při celkové analýze spektra korozních prostředí 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.

- 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.
- 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.
- napříč spektrem korozních prostředí dosáhly i celkově nejvyššího průměrného snížení průsaku ve srovnání s referenčním betonem 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.

5.2.3 Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s krystalizující hydroizolací

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.

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 zlepšení pevnosti v tlaku pevnosti v příčném tahu betonu. Při analýze všech korozních prostředí bylo ale zřejmé, že velká část vzorků vykazovala ve srovnání s betonem bez ošetření jen minimální zlepšení pevnosti či tahu, anebo dokonce vlastnosti horší. Pevnosti v tlaku a příčném tahu vykazovaly velké výkyvy v závislosti na prostředí a době expozice a i po osmnácti měsících pevnosti oscillovaly okolo hodnoty podkladního betonu bez ošetření uloženém ve stejném prostředí. Ovšem 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. Výsledky řešení lze shrnout do bodů:

- 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.
- Hodnoty v intervalech měření 6, 12, 18 měsíců oscillovaly okolo hodnoty své pevnosti bez vlivu prostředí.
- Při působení prostředí 6 a 12 měsíců ale část receptur vykazovala zvýšení pevností, které mohlo být způsobeno dodatečným vyplňováním pórové struktury krystaly (novotvary), z pokračujícího působení krystalizující receptury a také při reakci cementové matrice s korozními činiteli. Po 18 měsících následoval pokles hodnot.
- 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/mm²). Hodnoty rovněž oscillovaly například u N1 v prostředí reálné degradace (6 měsíců - 40,1, 12 měsíců - 49,4, 18 měsíců - 33,5 N/mm²) a dalších.
- V konečném porovnání vlivu prostředí po 18 měsících, beton s aplikovanými nátěry dosahoval až o 73,5 % vyšších pevností v tlaku (N3 při působení nízkých koncentrací SO_4^{2-} iontů) než beton bez ošetření ve stejném prostředí.
- Stěrky zlepšily pevnost v tlaku ve srovnání s betonem bez ošetření ve stejném prostředí až o 59,3 % (S2 při působení nízkých koncentrací SO_4^{2-} iontů).
- Beton bez ošetření hydroizolačními recepturami a bez vlivu korozních prostředí dosahoval pevnosti v příčném tahu 3,7 N/mm² a i během osmnáctiměsíční expozice v prostředích jeho i pevnosti navržených receptur oscillovaly 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 ale 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.

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

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).

5.3.1 Ověření funkčnosti těsnění pórů

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 aplikace² nutných 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.

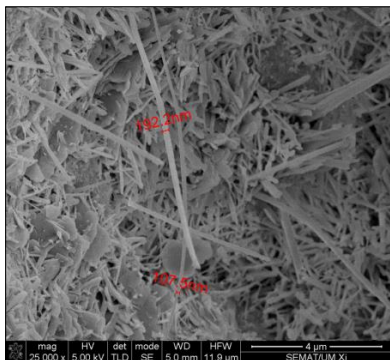
Během celé analýzy zkušebních vzorků skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) bylo jasně zřetelné, že se krystaly a krystalové struktury tvořili v celé struktuře betonu, kam měla přístup voda. Především však v povrchové vrstvě do hloubky jednoho centimetru, kde bylo u všech receptur jasně patrné, že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

- Byl prokázán nárůst tvorby krystalových struktur v celé struktuře beton, velikosti jednotlivých krystalů (délky, průměru), ale také jejich vzájemné spletnosti v rostoucím čase a hloubce od povrchu (6 cm), jež byla přístupna vodě. V místech, kde nebyla technologická voda přítomna, tvorba krystalů nezačala.
- Krystaly ve všech recepturách měly charakteristický jehlicovitý tvar.
- Krystaly vyplňovaly nejvíce pórovou strukturu o velikostech cca 20-200 μm a během dvanácti dnů 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 (viz obr. 9).
- I při detailní komparaci (zvětšení 25000 $\times$) krystalů a tvořených krystalových struktur nebylo možno rozdíly mezi jednotlivými recepturami, komerčně vyráběné hydroizolaci XYPEXu a nově navržených receptur N2 i S2, prokázat (vývoj krystalů viz obr. 6-8).

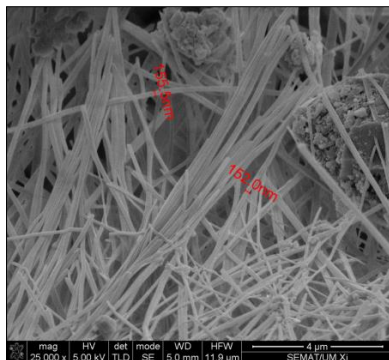
² http://www.nekap.com/xypex/detail_concentrate.php

- Těsnění těmito krystaly bylo potvrzeno i zkouškou průsaku tlakové vody (ČSN EN 12390-8), snížením hloubky průsaku vody jednotlivých receptur v čase.

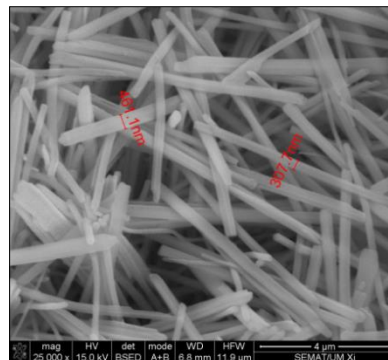
Výsledky jsou tedy v souladu se závěry práce Mitsuki, Y., et al.[15] a Peek, et al.[17]. Oba tito autoři došli k závěru, že jehličkovité krystaly narůstají ve své velikosti i množství s časem a mohou prorůstat do hloubky přes 30 cm během jednoho roku.



Obrázek 6: První den od počátku krystalizace (zvětšení 25000×)



Obrázek 7: Šestý den od počátku krystalizace (zvětšení 25000×)

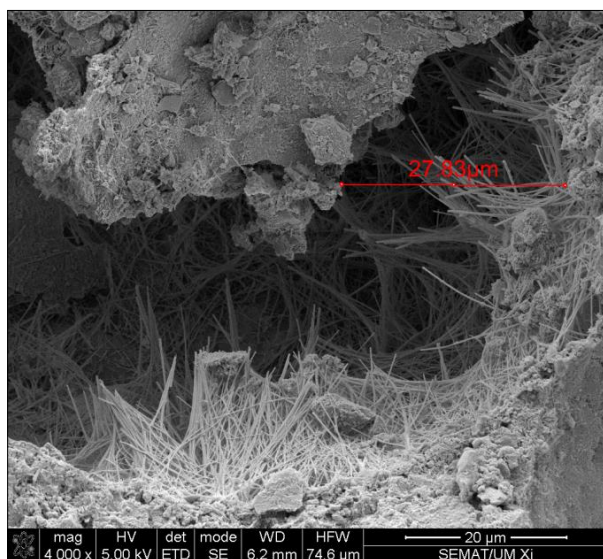


Obrázek 8: Dvanáctý den od počátku krystalizace (zvětšení 25000×)

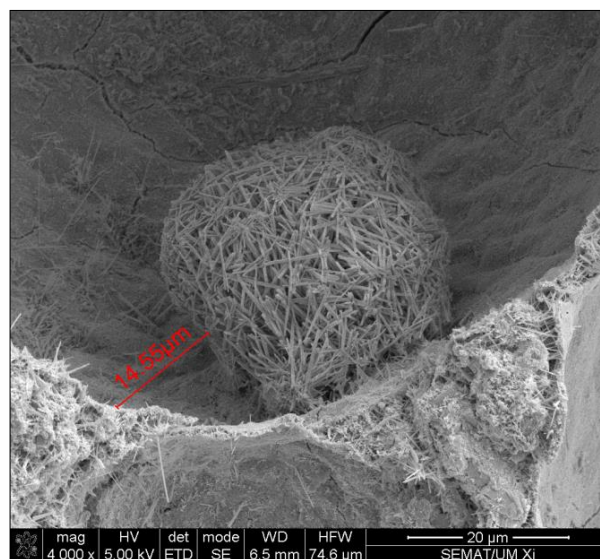
Analýza rovněž prokázala velmi častý výskyt kulových struktur krystalů vyrůstajících lokálně z povrchu pórů. Byly složeny z mnoha jednotlivých krystalů vzájemně složitě propojených, téměř identické velikosti a průměru přibližně 30 μm (viz obr. 10). Tyto struktury nebyly pouze náhodné a vyskytovaly se 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. Kamile [8] obdobné krystalové struktury označuje za shluk vlásečnicových krystalů ettringitu, vytvářejících kulovitá uskupení. *Ettringit tvořící tyto struktury ale nebyl jednoznačně prokázán.* Během testování schopnosti hojení povrchových trhlin betonu, bylo dále potvrzeno:

- Na základě konkrétního pozorování v této práci, lze konstatovat, že všechny analyzované krystalizující hydroizolační hmoty mají shodnou schopnost těsnit, překlenovat povrchové 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 převážně 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.
- Analýzy rovněž prokázaly, 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 uhličitanu vápenatého), nebo těsněním vodou unášených nerozpustných mikroskopických částic z vnějšího prostředí.



Obrázek 9: Krystaly v póru betonu - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu



Obrázek 10: Kulovité krystalové struktury v póru - 4000× zvětšení, hloubka 0,5 – 1 cm od povrchu

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. 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.

5.3.2 Vliv času a prostředí na mikrostrukturu betonu

Cílem testování, bylo analyzovat a vzájemně komparovat krystaly v pórové struktuře betonu s aplikovanými recepturami N2, S2 a referenční receptury bez ošetření po osmnácti měsících uložení v korozních prostředích. Byla vybrána prostředí:

- plynné prostředí - působení vysokých koncentrací CO_2 ,
- plynné prostředí - působení vysokých koncentrací SO_2 ,
- kapalně prostředí - působení chloridů,
- kapalně prostředí - působení síranů.

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. Výsledky mikrostrukturálních analýz lze shrnout do bodů:

- Pomocí energo-disperzní spektrometrie (EDS) byla identifikována hlavní prvková složení jehlicovitých krystalů těsnících porovou strukturu C, O, Al, Si, S, K, Ca, s dominantním zastoupením kyslíku a vápníku, které zůstalo shodné pro všechna analyzovaná prostředí.
- V prostředí s vysokou koncentrací CO_2 (až 98%), RTG analýza ve vzorcích receptur N2 a S2 potvrdila výskyt živce, kalcitu, portlanditu, β -křemene a stopově ettringit.
- V pórech a trhlinách betonu ve vzorcích receptur N2 a S2 byly nalezeny amorfnní útvary CSH gelů a jehlicovité krystaly, vizuálně připomínající ettringit.
- 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 Tyto nejspíše pseudomorfozy portlanditu tvořily kulovitá až květinová uskupení a v analyzovaných vzorcích se vyskytovaly více na lomových plochách než přímo v samotných pórech nebo trhlinách.

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.*

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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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 .

- Analyzované vzorky vykazaly citelně vyšší počet krystalů a těsnění než v prostředí CO_2 , kdy jednotlivé krystaly tvořily velmi kompaktní struktury vyplňující póry, které se ale u referenční receptury prakticky nevyskytovaly.
- Krystaly v kapalném prostředí chloridů měly v porovnání s prostředími CO_2 a SO_2 rozdílné tvary i velikosti.
- Ve struktuře betonu byly analyzovány 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.

Analýza vzorků v kapalném prostředí chloridů opět pozitivně prokázala těsnění pórového systému betonu.

- V porovnání s prostředími CO_2 a SO_2 bylo jasně patrné, že nalezené krystaly jsou rozdílných tvarů i velikostí.
- U stěrky S2 byly 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 byly zdokumentovány tyčinkovité krystaly vizuálně podobné vzorkům ošetřeným směsí N2.

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 prostředí chloridů i síranů analýza prokázala, že krystaly v prostředí síranů jsou mnohem vyvinutější jak co do množství, tak i komplexnosti.
- 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.

5.3.3 Výsledné receptury, ekotoxicita, obsah radionuklidů a hygienická nezávadnost

Na základě výsledků komplexního testování receptur nátěrů (N1-N3) a stěrek (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.

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.

6 PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A 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 CO₂. V práci šlo především o ověření kombinovatelnosti sekundární krystalizace cementu se zvolenou odpadní surovinou, a to konkrétně s elektrářenským popílkem. Ten se ukázal jako vhodnější náhrada než vysokopepčí 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 přídavkem elektrářenského 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 přídavkem elektrářenského popílku, oproti betonu bez ošetření, zachovaly i pod vlivem zvýšených korozních prostředí (CO₂, SO₂, SO₄²⁻, 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 přídavkem 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 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, 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.

7 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 stěrek, 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 stěrek modifikované elektrérenským popílkem 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. popílku) a snížení obsahu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nutného pro průběh krystalizace a tvorby krystalů v navržených recepturách, neovlivnilo u sledovaných receptur nátěrů i stěrek 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 popílku 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, bylo na základě dosažených výsledků vybrání, z celkových dvaceti čtyř vstupních receptur, finální varianty nátěru N2 a receptury stěrky S2 (složení viz tabulky 2 a 3), vhodných pro stavební praxi. 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.

Tabulka 2: Výsledná receptura polymercementového nátěru

<i>Suroviny</i>	<i>N2 [kg/m³]</i>
Suchá složka	
Cement CEM II/A-S 42,5R	270
Křemičitý písek	700
Křemičitý úlet	8,0
Křemičitý filer	200
Popílek Chvaletice	30
Xypex Admix	6,0
Tekutá složka	
Voda	300
Karboxymethylcelulóza	10
Styren-akrylátová disperze	700
Odpěňovač na bázi syntetických kopolymerů a neionogenních emulgátorů	5,0

Tabulka 3: Výsledná receptura polymercementové stěrky

<i>Suroviny</i>	<i>S2 [kg/m³]</i>
Cement CEM II/A-S 42,5R	248
Křemičitý písek	450
Vápenec	250
Křemičitý filer	120
Polymerní disperzní prášek na bázi vinylacetátu a etylénu	3,5
Polypropylénová vlákna	0,5
Superplastifikátor na bázi polykarboxylátů	1,0
Karboxymethylcelulóza	1,0
Popílek Chvaletice	27,5
Xypex Admix	5,50

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 stěrky 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.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY (VÝBĚR)

- [1] 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, p. 171–186.
- [2] BASOLO, F., JOHNSON R. C. (translated by Yamada S.) *Coordination Chemistry*, 2nd ed., Tokyo: Kagaku-Dojin Press, 1995. ISBN 0-905927-47-8.
- [3] BRUNAUER, S. Tobermorite gel - The heart of concrete, American Scientist Vol. 50, No. 1, *Frontiers Of Zealous Research*, Sigma Xi, The Scientific Research Society, 1962. p. 210-229.
- [4] 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.
- [5] FURUYA, T., et al. An effective and eternal maintenance method for concrete tunnel structures, *Tunnel Structures*. Labse Reports, Volume 78, p. 439-44, Stockholm, 1998. ISBN 3-85748-096-3.
- [6] 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. p. 1010-1014.
- [7] JENKINS, S. B. *Nanoporous Materials: Types, Properties And Uses*, New York: Nova Science Publishers Inc., 2010. ISBN 978-1-61122-999-8.
- [8] 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.
- [9] KNOBLAUCH, H., SCHNEIDER, U. *Bauchemie*, 2nd ed., Dusseldorf: Werner Verlag, 2001. ISBN 3-8041-4895-6.
- [10] LANDRUM, R. J. *Designing tool for corrosion control*. Delaware: National Association of corrosion engineers, 1992. ISBN 0-915567-34-2.
- [11] 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. 347–352.
- [12] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. *Atmosférická koroze beton*, Praha: IKAS, 1998. ISBN 80-902558-0-9.
- [13] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concrete Microstructure Properties*, New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2005. ISBN 978-0071462891.
- [14] MINDESS, S., et al. *Concrete* 2nd ed., NJ: Prentice Hall, 2003. ISBN 978-0-13064-632-3.
- [15] 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.

- [16] 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.
- [17] PEEK, A. D., KHIONG, F. W., *Xypex Waterproofing - Singapore Arts Centre Project, Technical Report 1303/97/8426*, (Singapore) Taywood Engineering Ltd., 1997.
- [18] 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, 381–400.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] WOODSON, R. D. *Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation*, Oxford: Elsevier Ltd., 2009. ISBN 978-1-85617-549-4.
- [22] ZHANG, X., ZHENG, D. Uniform Design for Preparation of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Coating, *Advanced Materials Research*, Vols. 374-377 (2012), p. 1491-1494.

9 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Štěpán Bohuš
 Datum a místo narození: 11. 5. 1983, Havířov
 Trvalé bydliště: Mírová 9, Havířov, 736 01

Dosažené vzdělání

2008 - doposud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní Program, Obor: Fyzikálně a stavebně materiálové inženýrství, Státní doktorská zkouška absolvována 26. 5. 2010

2002 - 2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor: Materiálové inženýrství, získán titul inženýr

Vědecko-výzkumné pracovní zkušenosti

2007 - 2013 Vysoké učení technické v Brně - Fakulta stavební, Technický pracovník na výzkumných projektech MPO (ADMAS), výuka magisterského studia

2012 Pracovní stáž na Institutu Teknologi Bandung, dep. of Civil and Environmental Engineering, Indonésie. Příprava disertační práce a speaker na konferenci „Environmental Technology and Management Seminar“.

2009 - 2010 University of Minho, Department of Civil engineering, Guimarães, Portugalsko, příprava na rigorózní zkoušku Ph.D., výzkumná práce v oblasti ochrany betonů a krystalizujících hydroizolací, organizace mezinárodní konference ICPIK 2010.

10 PUBLIKAČNÍ ČINNOST A PROJEKTY

- [1] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R.; TARANZA, L. Fly-Ash Usage in New Cement-Based Material for Concrete Waterproofing. *AMR - Advanced Materials Research*. 2012. 535 - 537(1902). p. 1902 - 1906. ISSN 1662-8985.
- [2] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Nové materiály na bázi crystalline technology pod vlivem dlouhodobého působení agresivních médií. *Sanace betonových konstrukcí*. 2012. 2011(1). p. 259 - 263. ISSN 1211-3700.
- [3] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Cement based material with crystal-growth ability under long term aggressive medium impact. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. 166-169(1773). p. 1773 - 1778. ISSN 1662-7482.
- [4] BOHUŠ, Š. a kol. Stavební materiály a technologie sloužící k ochraně architektonického dědictví a péči o památky - 2nd WTA International Ph.D symposium. *Zpravodaj WTA CZ*. 2011. 2011(4). p. 12 - 15. ISSN 1213-7308.
- [5] BOHUŠ, Š. a kol. Effective secondary raw material usage in progressive building materials. In *Environmental Technology and Management Seminar (ETMS)*. Bandung, Indonesia. 2011. p. 65 - 78. ISBN 978-3-540-17532-2.
- [6] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. New cement based rehabilitation materials resistance against aggressive chloride environment impact. In *Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage*. Brno. 2011. p. 110 - 118. ISBN 978-3-937066-21-9.
- [7] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Náhrada cementové složky sanačních hmot a ovlivnění mikrostruktury betonu. In *Construmat*. Košice, Košická Belá. 2011. p. 25 - 28. ISBN 978-80-553-0685-8.
- [8] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Microstructural analysis of crystalline technology by NANOSEM - FEI NOVA 200. In *18th International conference on composite materials*. 2011. p. 92 - 96. ISBN 978-979-98278-3-8.
- [9] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Nové druhy sanačních hmot a jejich vliv na mikrostrukturu betonu. *Sanace betonových konstrukcí*. 2011. 2011(1). p. 128 - 134. ISSN 1211-3700.
- [10] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Analysis of waterproofing effect by crystalline technology. In *ECS 2011*. Pinosolama/Turku, Finland. 2011. p. 221 - 224. ISBN 978-952-12-2574-1.
- [11] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Analýza průběhu sekundární krystalizace s použitím REM mikroskopu NANOSEM - FEI NOVA 200. In *Juniorstav 2011*. Brno, CERM. 2011. p. 305 - 305. ISBN 978-80-214-4232-0.
- [12] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Odolnost nových druhů sanačních hmot proti dlouhodobému působení agresivních činitelů. In *Sanace a rekonstrukce staveb 2010*. Ostrava, Šmíra print s.r.o. 2010. p. 247 - 596. ISBN 978-80-02-02273-2.

- [13] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Výzkum a vývoj progresivních materiálů na bázi sekundární krystalizace s přidavkem druhotných surovin. In *CONSRUMAT 2010 - Conference about structural materials*. Bratislava, STU Stavebná fakulta. 2010. p. 66 - 424. ISBN 978-80-227-3297-0.
- [14] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Progresivní ochrana stavebních konstrukcí pomocí stěrek na bázi sekundární krystalizace. *Sanace betonových konstrukcí*. 2010. (1). p. 393 - 399. ISSN 1211-3700.
- [15] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P. Vodonepropustnost betonu pomocí modifikací krystalizačních hmot. In *JUNIORSTAV 2010*. 1. Brno, MLOK s.r.o. 2010. p. 287 - 288. ISBN 978-80-214-4042-5.
- [16] DROCHYTKA, R.; BOHUŠ, Š.; DOHNÁLEK, P. Povrchové úpravy betonu stěrkami s krystalizačními účinky. In *Sborník přednášek 16. Betonářské dny 2009*. 1. Hradec Králové: ČBS, 2009. s. 335-340. ISBN: 978-3-937066-08- 0.
- [17] BOHUŠ, Š.; DROCHYTKA, R. Testing of modified matters on crystallization base. In *Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage*. 1. Belgium, WTA-Publications. 2009. p. 467 - 485. ISBN 978-92-871-6498-8.
- [18] BOHUŠ, Š. Zvyšování plynatěsnosti betonu použitím krystalizačních hmot. In *Materiálové inženýrství*. 1. Brno, Akademické nakladatelství Cerm s.r.o. 2009. p. 35 - 38. ISBN 978-80-7204-629-4.
- [19] DOHNÁLEK, P.; DROCHYTKA, R.; BOHUŠ, Š.; VÁVRA, Z. Metody testování hydroizolačních nátěrů a stěrek na bázi sekundární krystalizace cementu. *Sborník Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2009. p. 307-315. ISBN 978-80-214-3951-1
- [20] BOHUŠ, Š. Krystalizační nátěry a jejich specifika. In *JUNIORSTAV 2009*. 1. Kohoutova 34, 613 00 Brno, MLOK s.r.o. 2009. p. 313 - 313. ISBN 978-80-214-3810-1.
- [21] DROCHYTKA, R.; MATULOVÁ, P.; BOHUŠ, Š. NÁVRH RECEPTUR HYDROIZOLAČNÍCH HMOT S VYUŽITÍM DRUHOTNÝCH SUROVIN A JEJICH TESTOVÁNÍ. In *Betonářské dny 2008*. 1. Hradec Králové: česká betonářská společnost, 2008. s. 408-414. ISBN: 978-80-87158-11- 1.
- [22] Co-editor sborníku konference WTA - International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monument Preservation 2011, Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage. Brno. 2011. ISBN 978-3-937066-21-9.

Řešené projekty			
Název	Typ projektu	Pozice v projektu	Doba realizace
Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin	MPO	člen řeš. týmu	2012-2013
Vývoj a výzkum progresivních ochranných betonových konstrukcí proti vlivu agresivních činitelů na mikrostrukturu a trvanlivost	Specifický výzkum VUT FAST	hlavní řešitel	2012
Celkové zvýšení povědomí o nových progresivních stavebních systémech pro sanace betonových konstrukcí	FRVŠ	hlavní řešitel	2011
Studium dodatečně aplikovaných hmot pro sekundární ochranu stavebních konstrukcí	Specifický výzkum VUT FAST	hlavní řešitel	2011
Studium vlastností ultra vysokopevnostních betonů s různými druhy příměsí	Standartní výzkum VUT FAST	spoluřešitel	2011
Výzkum a vývoj speciálních plynotěsných hydroizolačních nátěrů a stěrky proti průniku ekologicky nebezpečných látek	MPO	člen řeš. týmu	2007-2010

11 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 rozšířením 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.

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