



## **FAKULTA STAVEBNÍ**

**EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU POVRCHOVÉ  
ÚPRAVY BETONU NA JEHO TRVANLIVOST**

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFECT OF  
SURFACE TREATMENT ON DURABILITY OF  
CONCRETE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2024**

**Bc. Klára JANSOVÁ**

**Studijní program:** Stavební inženýrství

**Studijní obor:** Konstrukce pozemních staveb

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jansová** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **459083**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Experimentální ověření vlivu povrchové úpravy betonu na jeho trvanlivost**

Název diplomové práce anglicky:

**Experimental Verification of the Effect of Surface Treatment on Durability of Concrete**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši k tématu zvýšení trvanlivosti betonu pomocí povrchové úpravy se zaměřením na následující body:

- Obecně popište princip funkce povrchových úprav na prodloužení trvanlivosti betonu.
- Vyhledejte možnosti testování a kontroly přínosů povrchové úpravy k trvanlivost betonu.
- Dohleďte příklady použití z praxe.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:

- Vyroberte zkušební tělesa a jejich povrch ošetřete alespoň dvěma druhy nátěrů.
- Na zhotovených tělesech proveďte ověření zvýšení trvanlivosti betonu pomocí zkoušky: nasákavosti, karbonatace, odolnosti CHRL, pórovitosti, hloubky průsaku a velikosti úhlu smáčení.
- Vyhodnoťte experimentálně získané výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000  
Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005  
Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006  
časopis Beton  
www.scopus.com

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **01.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Josefa Fládra, Ph.D. Veškeré podklady, ze kterých bylo v této práci čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědoma toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

V Praze dne 8.1.2024

.....

Bc. Klára Jansová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za odborné vedení práce a za asistenci při výrobě zkušebních vzorků a provádění zkoušek.

Dále bych ráda poděkovala mému manželovi Ing. Vojtěchu Jansovi za podporu a pochopení během tohoto náročného období.

Závěrem děkuji rodině a přátelům za pomoc s korekturou této práce a za jejich podporu po celou dobu mého studia.

## ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Bc. Klára Jansová
Název práce:	Experimentální ověření vlivu povrchové úpravy betonu na jeho trvanlivost
Anglický název:	Experimental Verification of the Effect of Surface Treatment on Durability of Concrete
Akademický rok:	2023/2024
Studijní program:	Stavební inženýrství
Obor studia:	Konstrukce pozemních staveb
Katedra:	Katedra betonových a zděných konstrukcí
Vedoucí BP:	doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.
Klíčová slova:	Beton, impregnace, hydrofobní impregnace, trvanlivost
Keywords:	Concrete, impregnation, hydrophobic impregnation, durability
Anotace:	Práce se zabývá ověřením vlivu impregnace z lithného vodního skla a hydrofobní impregnace Repesil BKH na prodloužení trvanlivosti betonu při působení degradačních procesů. V teoretické části je popsána funkce jednotlivých druhů prostředků povrchové ochrany a možnosti zkoušení jejich vlivu během působení různých degradačních procesů včetně příkladů provedených výzkumů. Experimentální část obsahuje popis použitých prostředků povrchové ochrany, postup výroby zkušebních vzorků, postup provádění jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocení.
Abstract:	This thesis is focused on evaluation of lithium water glass impregnation and hydrophobic impregnation Repesil BKH effect on the prolongation of concrete durability under the influence of degradation processes. The theoretical part describes the function of different types of surface treatment and the possibilities of testing their influence during the exposure to various degradation processes, including examples of the research carried out. The experimental part includes a description of the used surface treatment products, the process of producing test specimens, the execution and evaluation of each test method.

## OBSAH

1	Úvod .....	1
2	Teoretická část .....	2
2.1	Prostředky povrchové ochrany .....	2
2.1.1	Nátěry .....	4
2.1.2	Impregnace .....	5
2.1.3	Hydrofobní impregnace .....	7
2.1.4	Multifunkční prostředky .....	10
2.2	Účinnost prostředků povrchové ochrany .....	11
2.2.1	Vliv receptury betonu .....	12
2.2.2	Hloubka penetrace .....	14
2.2.3	Nasákavost .....	15
2.2.4	Paropropustnost .....	19
2.3	Vliv prostředků povrchové ochrany na průběh degračních procesů .....	20
2.3.1	Mrazuvzdornost .....	20
2.3.2	Působení rozmrazovacích solí, vliv chloridů .....	22
2.3.3	Chloridová koroze .....	25
2.3.4	Síranová koroze .....	26
2.3.5	Karbonatace .....	28
2.3.6	Mechanická odolnost .....	31
3	Experimentální část .....	32
3.1	Výroba vzorků .....	32
3.1.1	Ověření pevnosti .....	35
3.2	Prostředky povrchové ochrany .....	37
3.2.1	Repesil BKH .....	37
3.2.2	Lithné vodní sklo .....	38
3.3	Provedené zkoušky .....	39
3.3.1	Velikost smáčecího úhlu .....	40
3.3.2	Hloubka penetrace .....	42
3.3.3	Nasákavost .....	44

3.3.4	Paropropustnost.....	50
3.3.5	CH.R.L. ....	58
3.3.6	Karbonatace .....	68
4	Závěr.....	74
5	Použité zdroje.....	77
6	Seznam obrázků .....	80
7	Seznam tabulek .....	82
8	Seznam grafů.....	83

## 1 Úvod

Stárnutím existujících betonových konstrukcí se náchylnost betonu k degradaci vlivem okolního prostředí a jeho trvanlivost stávají velkým problémem. Důsledkem přehlížení rizika krátké trvanlivosti betonu došlo k mnoha ekonomickým ztrátám a zvýšenému počtu nehod. S nynějšími nároky na dlouhou trvanlivost staveb a prodlužováním životnosti již existujících staveb je třeba se touto problematikou hlouběji zabývat. Vliv stárnutí materiálu se projevuje především u konstrukcí s pohledovým betonem. K degradaci materiálu dochází působením fyzikální a chemické koroze. Procesy jako karbonatace nebo chloridová koroze mohou vést postupem času až k celkovému kolapsu konstrukce. [20]

Na stárnutí betonu mají vliv i jiné faktory. U historických konstrukcí hraje zásadní roli tehdejší znalost mechanických a chemických vlastností jednotlivých složek betonu a jejich vzájemné interakce. [1] V současnosti se projevuje zvyšující se míra znečištění ovzduší, ke které dochází kvůli výskytu kyselých dešťů a zvyšující se koncentrací  $\text{CO}_2$ . Betonové konstrukce jsou tak stále více namáhány vnějšími vlivy. [22]

U nových konstrukcí jejich délku životnosti ovlivňujeme především složením receptury betonu. Tato volba má ale několik úskalí. Prodloužení trvanlivosti betonu zlepšením jeho kvality je nákladné a vede ke zvýšení množství přísad kvůli snadné zpracovatelnosti. [4] U betonů namáhaných vlivy okolního prostředí je proto vhodné kromě úpravy složení betonové receptury na jeho povrch aplikovat některý z prostředků povrchové ochrany.

V případě již existujících konstrukcí, u kterých došlo ke vzniku a rozvoji degradačních procesů, se také hojně používají prostředky povrchové ochrany za účelem prodloužení jejich životnosti a zmírnění účinků degradačních procesů. [1] Často používané pro ochranu historických budov jsou impregnační prostředky na bázi alkoxyilanů a jejich derivátů. Při kontaktu s cementovými materiály dochází ke vzniku C-S-H gelu, který částečně zaplňuje póry. To vede ke zlepšení mechanických vlastností povrchu a ke snížení jeho nasákavosti. Výhodou v porovnání s dostupnými nátěry je, že po jejich aplikaci nedochází ke změně barevnosti povrchu. [22, 5]

Vliv hydrofobních impregnací na prodloužení trvanlivosti betonu je znám již od 80. let 20. století. [8] Od roku 1986 je ve Spojeném království používána hydrofobní impregnace tvořená 100 % isobutyltrimetoxysilanem na ochranu mostů proti penetraci chloridů. [2]



## 2 Teoretická část

### 2.1 Prostředky povrchové ochrany

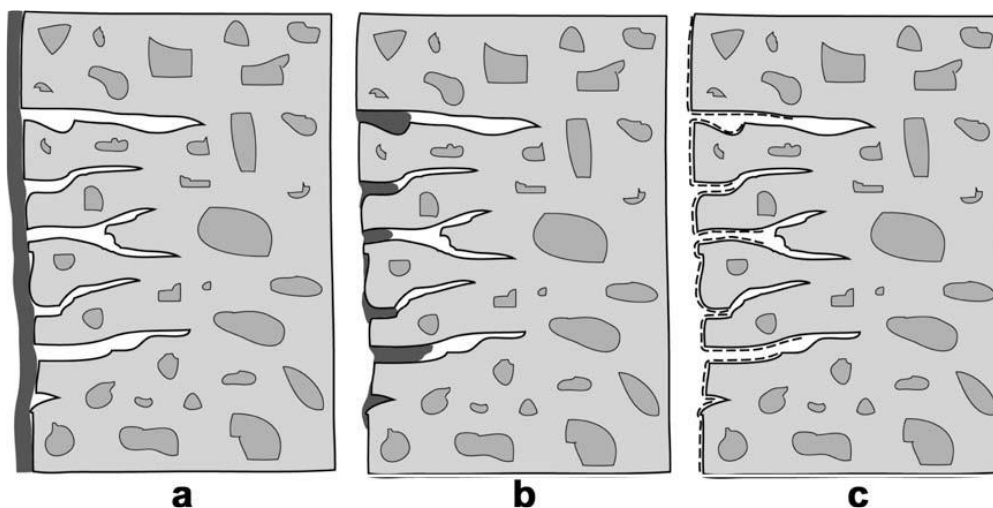
Dlouhodobá trvanlivost betonu je ovlivněna třemi faktory:

- **Spojité pórovitost** – vlivem vzniku a rozšiřování trhlin dochází k jejich vzájemnému propojení spolu s kapilární pórovitostí.
- **Působení agresivních činidel** – do struktury betonu proniknou agresivní látky, jejichž působením dochází ke korozi betonu a výztuže. Největší vliv na trvanlivost betonu má působení oxidu uhličitého, chloridových iontů, síranových iontů a rozvoj alkalicko-křemičité reakce.
- **Přítomnost vody** – voda může obsahovat rozpuštěná agresivní činidla, která se jejím vsakováním do pórů dostávají do struktury betonu. Při cyklickém působení mrazu způsobuje degradaci betonu samotná voda obsažená v betonových pórech. Demineralizovaná tzv. hladová voda vede k rozpouštění hydroxidu vápenatého obsaženého v betonu a tím k narušování betonové struktury. [28]

Jednotlivé faktory nejsou samy o sobě pro betonové konstrukce hrozbou. Působí-li však současně, dochází k rozvoji a urychlování degradačních procesů. [28] Pokud víme, že bude betonová konstrukce umístěna do agresivního prostředí, nabízí se možnost omezit množství a objem pórů změnami ve složení betonové receptury. Nižší vodní součinitel a lepší podmínky zrání však nedokáží v agresivním prostředí zajistit dostatečnou ochranu. V takovém případě je nezbytné pro zajištění trvanlivosti a bezpečnosti konstrukce použití některého z prostředků povrchové ochrany. [14]

Dle ČSN EN 1504-2 se prostředky povrchové ochrany dělí do tří kategorií: nátěry, impregnace a hydrofobní impregnace. Viz *Obr. 1*. [1, 34]

- **Nátěr** – na povrchu vzniká souvislá ochranná vrstva. Může být vyztužena.
- **Impregnace** – dochází k částečnému nebo úplnému zaplnění pórů a ke zpevnění povrchu betonu.
- **Hydrofobní impregnace** – ovlivňuje velikost povrchového napětí a s tím související velikost smáčecího úhlu. Nedochozí ke zmenšení průměru pórů, materiál zůstává paropropustný. Nezpůsobuje změnu barevnosti povrchu. [33, 34]



Obr. 1 - Zleva nátěr, impregnace, hydrofobní impregnace [39]

Pan a spol. [2, 3] popisují **multifunkční prostředky** povrchové ochrany jako čtvrtou, nově vyvinutou skupinu. Kombinují vlastnosti všech tří zmíněných skupin. Blokují póry a zároveň zajišťují hydrofobní vlastnosti povrchu betonu.

Z hlediska chemického složení mohou být prostředky povrchové ochrany rozděleny do dvou skupin:

- **Organické materiály** jsou nejpoužívanějšími prostředky povrchové ochrany. Řadí se mezi ně především silany, siloxany, epoxidové pryskyřice, akrylické pryskyřice atd. Vyznačují se dobrou hydrofobicitou. Jejich hlavní nevýhodou je nízká požární odolnost a špatná odstranitelnost po ztrátě jejich ochranných vlastností. [2, 3, 20]
- **Anorganické materiály** vykazují delší trvanlivost, stabilitu a odolnost. Při jejich kontaktu s cementovou pastou dochází k chemické reakci a ke vzniku nových materiálů zaplňujících betonové póry. Nejrozšířenější je křemičitan sodný známý také jako vodní sklo. Dále se do této skupiny řadí křemičitan draselný, křemičitan lithný a fluorosilikáty. [2, 10, 20]. Pro jednoznačné stanovení jejich účinku však nebyl proveden dostatek výzkumů, zejména v oblasti hloubky penetrace a reakce s cementovou pastou. [2, 3]

### 2.1.1 Nátěry

Nátěry vytváří na povrchu souvislou ochrannou vrstvu, která brání v průniku látek do struktury betonu. Jejich funkčnost závisí na míře homogenity vrstvy nátěru. Mají omezenou životnost v porovnání s ostatními prostředky povrchové ochrany a jejich aplikací dochází k vizuální změně povrchu betonového prvku. [1] Nejčastěji jsou nátěry užívané na ochranu základových konstrukcí a betonových nábrežích. [3]

Tradiční polymerové nátěry tvoří na povrchu film o tloušťce 0,1 – 1 mm. Řadí se mezi ně epoxidové pryskyřice, akrylické a polyuretanové směsi. Jsou považovány za téměř vodonepropustné. Jejich paropropustnost závisí na okolní teplotě a mnoha dalších faktorech. Vyznačují se dobrou odolností proti alkalickému prostředí a oxidaci. Nevýhodou je jejich křehkost a slabá vazba mezi nátěrem a povrchem betonu. Ke ztrátě jejich funkce může dojít odlupováním, vznikem trhlin, děr a obrušováním. [2]

Polymerové kompozitní nátěry prokazují větší pevnost a odolnost proti oděru a vysokým teplotám. Díky přítomnosti nanočástic dochází ke značnému snížení paropropustnosti v porovnání s tradičními polymerovými nátěry. To vede k prodloužení životnosti nátěrů. O jejich vlastnostech a chování však zatím nebylo provedeno mnoho výzkumů. [2]

Cementové nátěry tvoří téměř nepropustnou vrstvu o tloušťce 2 – 10 mm. Nejčastěji bývají polymericky modifikovány. Přidáním polymerů dochází ke zvýšení pevnosti, zlepšení adheze a chemické odolnosti a ke snížení propustnosti cementové pasty. Jsou často doporučovány na sanaci betonových trhlin, jelikož trhliny uzavírají a zajišťují potřebnou dlouhotrvající ochranu. [2]

Nátěry dle ČSN EN 1504-2 slouží jako ochrana proti vnikání, umožňují regulaci vlhkosti, zvyšují elektrický odpor a zlepšují fyzikální a chemickou odolnost. [34]

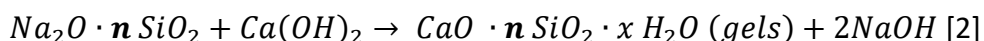
Použití nátěrů obvykle vede ke změně vzhledu a barevnosti povrchu, nemají dlouhou trvanlivost z důvodu malé hloubky penetrace a slabé adheze k betonovému substrátu. [6]

### 2.1.2 Impregnace

Řadí se mezi ně především skupina křemičitanů. Po jejich aplikaci na betonový povrch penetrují do pórů betonové struktury, kde probíhá chemická reakce mezi impregnačním prostředkem a ztvrdlou cementovou pastou. Výsledkem jsou částečně nebo úplně zaplněné povrchové póry. Díky tomu dochází ke snížení nasákavosti a průniku agresivních látek. Impregnace vykazují vyšší odolnost. Jejich efektivita velmi úzce závisí na hloubce penetrace a na průběhu chemické reakce se ztvrdlou cementovou pastou. [1]

Nejrozšířenější je **křemičitan sodný**, též známý jako „vodní sklo“. Méně známé, ale také používané jsou křemičitan draselný, lithný, vápenatý a fluosilikát. [10, 2] Výzkum použití křemičitanů jako prostředků povrchové ochrany betonu započal již v 90. letech 20. století. [20] Sodné a draselné křemičitany jsou známé jako velmi efektivní urychlovače hydratace cementu. O vlivu křemičitanu lithného však nebylo provedeno mnoho výzkumů, přestože je považován, na rozdíl od křemičitanu sodného, za inhibitor alkalicko-křemičité reakce. [36]

Křemičitanové ionty obsažené v impregnačním prostředku z křemičitanu sodného reagují s rozpustnými vápenatými, hořečnatými a hlinitými ionty obsaženými v cementové pastě za vzniku vápenato-křemičitého hydrátu, známého jako C-S-H gel a hydroxidu sodného. C-S-H gel pokrývající stěny pórů zajišťuje snížení propustnosti, zvýšení pevnosti a prodloužení trvanlivosti betonových konstrukcí. Hydroxid sodný, který je vedlejším produktem této reakce, však může zapříčinit rozvoj alkalicko-křemičité reakce. [2, 10]



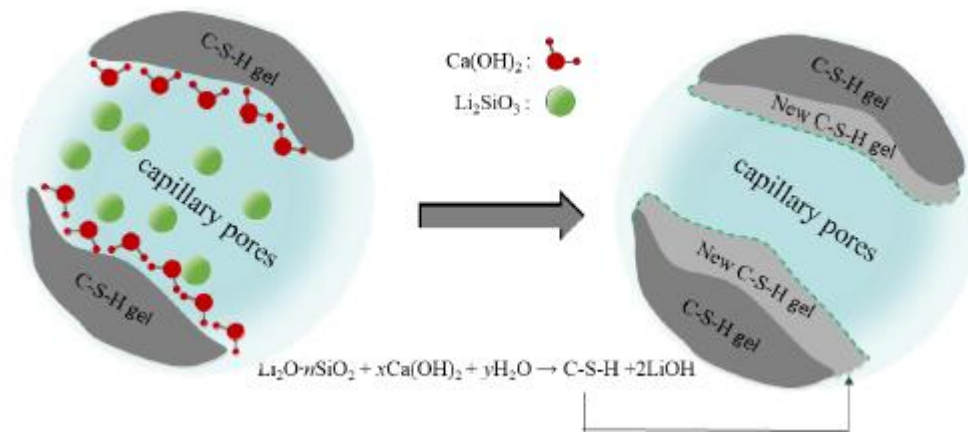
**Křemičitan lithný**  $Li_2O \cdot nSiO_2$ , známý též jako lithné vodní sklo, vede v porovnání s křemičitanem sodným k vyšší odolnosti proti působení mrazu. Jeho reakce po aplikaci na betonový povrch probíhá podobně. Vedlejší produkt, kterým je v tomto případě hydroxid lithný, však na rozdíl od hydroxidu sodného nemá vliv na rozvoj alkalicko-křemičité reakce. [20]

Lithné vodní sklo lze přidat i přímo do betonové směsi. Přidání 2-10 % lithného vodního skla do betonové směsi způsobuje zvýšení vzniku C-S-H a znatelné urychlení hydratace cementu. Přidání 1 % lithného vodního skla do betonové směsi mírně urychluje hydrataci a zvyšuje počáteční pevnost. [21]

Křemičitan lithný je rozpustný ve vodě a v alkalických rozpouštědlech. Naopak není možné jej rozpustit v alkoholu a organických rozpouštědlech. [20]

Obecný vzorec rozpustných křemičitanů je  $Me_2O \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ , kde  $Me$  představuje alkalický kov,  $n$  vyjadřuje počet molů vody a  $m$  je molární poměr, nebo také modul křemičitanu. Jedná se o poměr počtu molů  $SiO_2$  ku počtu molů  $Me_2O$ .

U běžně dostupných materiálů se hodnota molárního poměru obvykle pohybuje v rozmezí 0,5-4,0 pro křemičitan sodný a 0,5-6,5 pro křemičitan lithný a křemičitan draselný. [63, 64]



Obr. 2 - Reakce křemičitanu lithného s cementem [20]

Dle ČSN EN 1504-2 jsou impregnace využívány jako ochrana proti vnikání vody a agresivních látek a ke zlepšení fyzikální odolnosti betonového povrchu. [34]

### 2.1.3 Hydrofobní impregnace

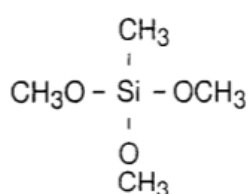
Působením kapilárních sil absorbují porézní materiály tekutiny na jejich povrchu. Velikost působících kapilárních sil ovlivňuje viskozita tekutiny na povrchu porézního materiálu, smáčecí úhel mezi tekutinou a povrchem a množství a velikost pórů v materiálu. [9]

V případě, že struktura pórů a viskozita tekutiny jsou neměnné, nasákavost lze ovlivnit zvýšením smáčecího úhlu povrchu. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 2.2.3 *Nasákavost*.

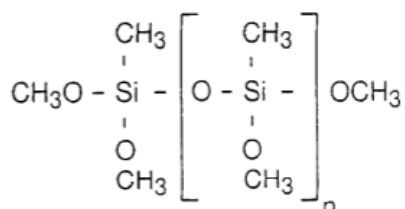
Mezi hydrofobní impregnace se řadí prostředky na bázi silanu a siloxanu. Po jejich aplikaci penetrují do pórovité struktury betonu, kde pokryjí stěny pórů, aniž by došlo k jejich zaplnění, a snížením povrchové energie zabraňují kapilární absorpci vody. Povrch se stává hydrofobní. Na rozdíl od voděodolných nátěrů mají minimální vliv na paropropustnost. [1]

Hydrofobní povrch omezuje množství vody, které pronikne do betonu. Současné zachování paropropustnosti umožňuje vysychání betonové konstrukce. To by mělo zajistit průběžné snižování obsahu vlhkosti u povrchu konstrukce. [14]

**Silany** jsou malé molekuly obsahující atom křemíku, na který jsou navázány alkyl a alkoxy skupiny. **Siloxany** jsou krátké řetězce s několika atomy křemíku. Struktura jejich molekul je zobrazena na *Obr. 3*.



Molecular structure of silane.



Molecular structure of siloxane.

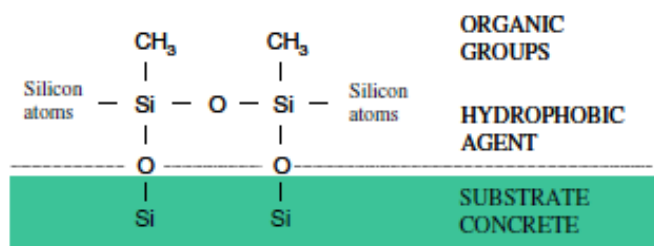
*Obr. 3 - Molekulární struktura silanu a siloxanu, zleva [8]*

Velmi malá velikost obou molekul umožňuje velkou hloubku průniku do struktury betonu. Na atomy křemíku jsou navázány alkylové a alkoxylové skupiny. Alkylová skupina slouží ke snížení povrchového napětí betonu, zatímco alkoxylová skupina vytváří vazbu silanu / siloxanu k betonovému povrchu. [2, 9]

Alkylové skupiny s vyšší molekulární vahou (např. iso-butyl a n-octyl) zajišťují vyšší míru hydrofobicity než skupiny s nižší molekulární hmotností (např. methyl, ethyl). Struktura a velikost alkylové skupiny hraje důležitou roli v odolnosti silanů a siloxanů proti alkalickému prostředí. [2]

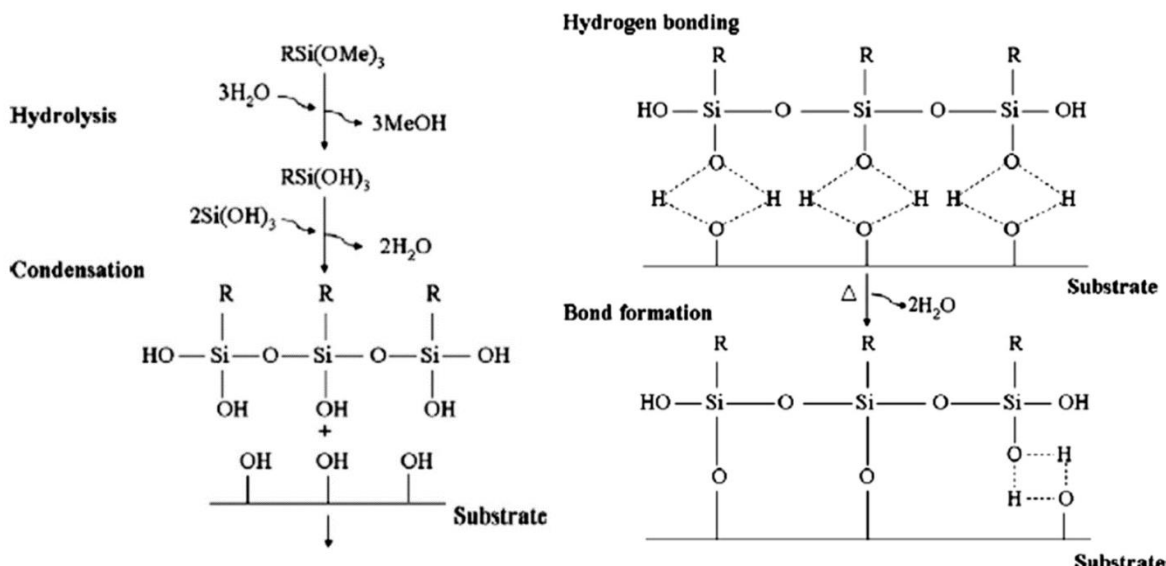
Charakteristika alkoxylových skupin (jako např. ethoxy, methoxy) má vliv na hloubku penetrace impregnačního prostředku. [2]

Po proniknutí do betonových pórů za přítomnosti vlhkosti reagují hydrofobní impregnační prostředky se ztvrdlou cementovou pastou. Dochází ke vzniku chemické vazby mezi povrchem pórů a impregnačním prostředkem. Viz Obr. 4. Na povrchu vzniká tenká hydrofobní vrstva. [8]



Obr. 4 - Chemická vazba hydrofobní impregnace s cementem na betonovém povrchu [9]

Chemická reakce probíhá ve dvou krocích – hydrolyza a kondenzace. Viz Obr. 5. Během první fáze dochází za přítomnosti vzdušné vlhkosti k hydrolyze alkoxylových skupin a ke vzniku nestabilních silanolových molekul. Následně tyto nestabilní silanolové molekuly ztrácí vodu a kondenzují do silikonové pryskyřice. Ta reaguje s přítomnými hydroxylovými skupinami na povrchu křemičité skruktury betonu a dochází ke vzniku vodíkové vazby. Při následném vysoušení vzniká pevná chemická vazba mezi silikonovou pryskyřicí a cementovou pastou. Při vysychání se na povrchu betonu vytváří tenká hydrofobní vrstva. Zásadité prostředí betonu během tohoto procesu působí jako katalyzátor reakce. [2, 14]



Obr. 5 - Chemická reakce hydrofobního impregnačního prostředku se ztvrdlým cementem [2]

Původně se hydrofobní impregnace používaly na jiné materiály, jako cihla a kámen. [8] Nyní jsou silany a siloxany ve Spojeném království nejpoužívanějšími prostředky povrchové ochrany betonu u silničních staveb. [14]

Hydrofobní povrchová úprava funguje po dobu 10 let, pokud je aplikována na 6 měsíců starý beton. Tento dlouhotrvající efekt však nemůže být dosažen v případě, že je prostředek aplikován na mladší beton, jelikož kvůli stále probíhající hydrataci cementu vzniká nová povrchová vrstva, která je hydrofilní. [2]

Dle výzkumů mohou silany a siloxany sloužit nejen jako hydrofobní úprava, ale také dokáží částečně betonový povrch zpevnit. Mohou vyplňovat a uzdravovat trhliny do velikosti až 0,2 mm. [2]

Dle ČSN EN 1504-2 jsou předpokládány funkce hydrofobní impregnace ochrana proti vnikání vody a agresivních látek, regulace vlhkosti a zvýšení odporu. [34]

Při aplikaci hydrofobní impregnace pomocí štětce má na účinnost prostředku vliv počet nátěrů, přičemž nejdůležitější je první nátěr. U dalších nátěrů hydrofobní efekt neroste lineárně. [9]

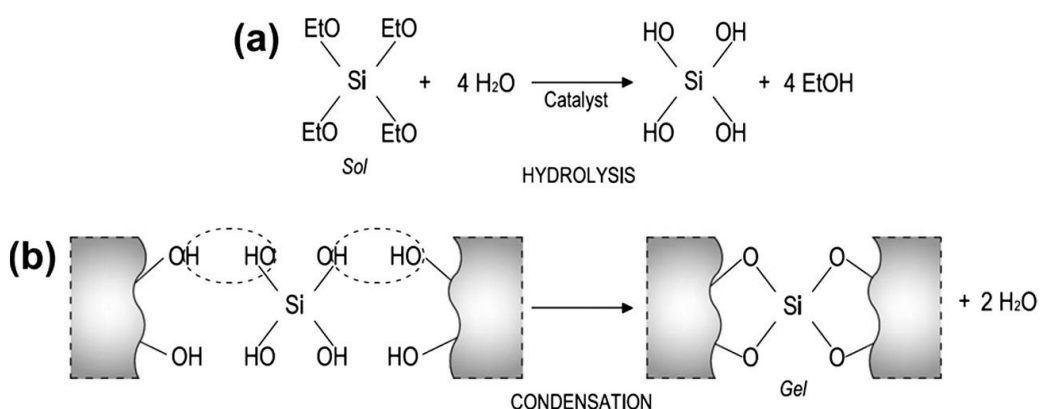


## 2.1.4 Multifunkční prostředky

Multifunkční prostředky slučují dohromady více vlastností tří předchozích skupin. Řadí se mezi ně silanové a jílovité nanokompozity a ethylsilikát. [2] Nově se používají také přípravky obsahující nano-SiO<sub>2</sub>. [3]

Nejrozšířenější ethylsilikát, též známý jako **TEOS** (tetra ethyl ortho silicate), se dříve používal k impregnaci kamenů při restaurování. Obvykle je tento alkokoxysilan rozpuštěn v organických rozpouštědlech a následně nanášen na povrch betonových konstrukcí. Při jeho penetraci do betonových pórů dochází ke dvoufázovému procesu. Viz *Obr. 6*. V první fázi probíhá hydrolyza, během které vzniká silanol a ethanol. V další fázi silanol dehydratuje a kondenzuje a dochází k tvorbě C-S-H gelu uvnitř pórů, zatímco ethanol se rychle vypaří. Díky malé velikosti molekul a nízké viskozitě může TEOS penetrovat dostatečně hluboko do struktury betonu. [2, 10]

Na rozdíl od silanů a siloxanů TEOS nemá schopnost se chemicky vázat na cementovou strukturu. Jeho hydrofobní chování a další charakteristické vlastnosti zajišťuje vzniklý C-S-H gel, který částečně zaplňuje betonové póry. [4] Díky tvorbě C-S-H gelu dochází k snížení paropropustnosti, snížení kapilární absorpce vody a zlepšení mechanických vlastností betonu. Je možné takto opravit malé trhliny. TEOS tak může být využit k omezení difuze chloridových iontů a ke zpomalení procesu karbonatce. S oblibou je využíván při restaurování historických betonových objektů. [2, 5, 7] Jeho hydrofobní vlastnosti přetrvávají déle než 6 měsíců. [2] Přičemž v případě ponoření betonu do roztoku TEOS je prokázána delší trvanlivost účinků prostředku než při aplikaci TEOS na povrch betonu pomocí štětce. [17]



*Obr. 6 - Chemická reakce TEOS se ztvrdlým cementem [2]*

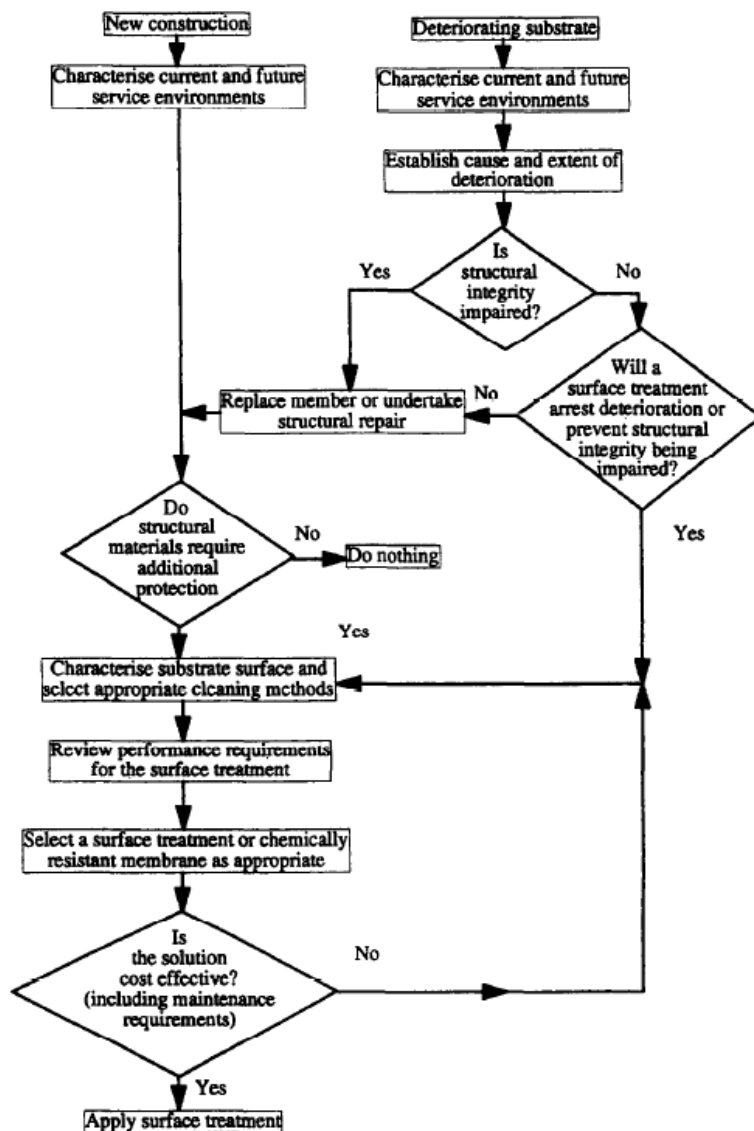
Dalším z multifunkčních přípravků běžně dostupných jsou přípravky obsahující **nano-SiO<sub>2</sub>**. Po jejich aplikaci prokazatelně dochází k redukci pórů větších než 50 nm. To vede ke snížení nasákavosti. [2]

Nově vyvinutým impregnačním prostředkem je **nano-MgO**, ale nebylo zatím provedeno dostatečné množství výzkumů, které by prokazovaly jeho účinnost. [2]

## 2.2 Účinnost prostředků povrchové ochrany

Prostředků povrchové ochrany je na trhu celá řada. Jejich vliv na trvanlivost betonu se liší na základě fyzikálních a chemických vlastností jednotlivých prostředků. [3] Funkčnost je závislá také na složení betonové receptury. Zvolení správného prostředku je třeba zvážit především na základě podmínek expozice budoucí konstrukce. Postup výběru vhodného prostředku je popsán na *Obr. 7*.

*Surface treatments for concrete: P. A. M. Basheer et al.*



*Obr. 7 - Návod pro výběr vhodného prostředku povrchové ochrany [12]*

### 2.2.1 Vliv receptury betonu

Jedním z faktorů, které mají vliv na efektivitu impregnačních prostředků, jsou fyzikální a chemické vlastnosti ošetřovaného materiálu. Ty lze ovlivnit zvolenou recepturou betonu a způsobem ošetřování čerstvého betonu. Nejvýznamnější vliv na trvanlivost betonu má množství a velikost kapilárních pórů a jejich vzájemná propojenost, které velmi úzce souvisí s hloubkou penetrace impregnačního prostředku. [22]

Rozlišujeme pět druhů pórů:

- technologické póry,
- póry v zrnech kameniva,
- provzdušňovací póry,
- kapilární póry,
- gelové póry.

Pórovitost lze redukovat snížením vodního součinitele  $v/c$ , vyjadřujícího poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu a stupně hydratace  $\alpha$  popisujícího množství uvolněného hydratačního tepla v poměru k celkovému hydratačnímu teplu. [28, 29]

Snížení porozity úpravou vodního součinitele a přidání příměsí zajišťujících ochranu povrchu konstrukce však vede k celkovému předimenzování potřebné ochrany a k vyšším nákladům. [2]

Dále účinnost impregnačních prostředků ovlivňuje vlhkost prostředí a impregnovaného materiálu a doba, po kterou probíhá reakce mezi impregnačním prostředkem a ztvrdlou cementovou pastou. Nezanedbatelný je také vliv fyzikálních vlastností použitého prostředku, jako například povrchové napětí, hustota, viskozita a velikost smáčecího úhlu. [22]

Při použití prostředků povrchové ochrany na opravu již existujících konstrukcí jsou složení a stav betonu velmi důležitými parametry. [1]

Vliv receptury betonu na hloubku penetrace zkoušeli Perko a spol. [22]. Vytvořili 5 typů vzorků, které se lišily velikostí vodního součinitele, poměru písku a cementu a přidáním nebo vynecháním jemného písku. Se zvyšujícím se vodním součinitelem dochází ke zvýšení objemu a velikosti pórů. Stejně tak i vyšší poměr písku a cementu způsobuje zvýšení objemu a velikost pórů. Přidání jemného písku naopak vede ke snížení objemu a velikosti pórů. Následně byly vzorky natřeny impregnačním roztokem ethoxyxilanu. Po uplynutí 24 h byly impregnované vzorky rozlomeny na poloviny a byla změřena hloubka penetrace impregnačního roztoku. Se zvyšujícím se objemem a velikostí pórů se hloubka penetrace zvětšuje. Při porozitě 13,7 % a velikosti pórů 0,05  $\mu\text{m}$  byla naměřena hloubka penetrace 2 mm. Při porozitě 16,5 % a velikosti pórů 0,12  $\mu\text{m}$  byla hloubka penetrace 21 mm. Výsledky provedeného výzkumu jsou zobrazeny na *Obr. 8*.

Experimentally determined values of sol uptake and the penetration depth.

Sample	Porosity [%]	Average pore size [ $\mu\text{m}$ ]	Uptake [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	Penetration depth [mm]
s/c 3/1 w/c 0.5 FS	13.7	0.05	369	2
s/c 3/1 w/c 0.7	13.2	0.04	544	3
s/c 5/1 w/c 0.7	14.9	0.06	813	7
s/c 5/1 w/c 0.7 FS	16.7	0.08	1106	12
s/c 5/1 w/c 0.5 FS	16.5	0.12	1581	21

*Obr. 8 - Výsledky měření pórovitosti a hloubky penetrace prostředku [22]*

Dle Franzoniho a spol. [10] má na míru nasákavosti vody kromě prostředků povrchové ochrany vliv také typ použitého cementu. Neošetřené zkušební vzorky vyrobené z cementu CEM III/A 42.5R měly při stejném vodním součiniteli a stejném postupu výroby o 48 % nižší nasákavost než neošetřené zkušební vzorky z cementu CEM II/B-LL 32.5R.

Další výzkum o vlivu receptury betonu provedli Baltazar a spol. [32]. Zkoušené vzorky se lišily velikostí vodního součinitele (0,4; 0,7), provedenou povrchovou úpravou (bez úpravy, 160 barová vodní tryska a jehlový oklepávač) a obsahem vlhkosti (3,0 %; 4,5 %; 6,0 %). Byla zkoušena nasákavost, odolnost proti oděru, odolnost proti nárazu a síla chemické vazby impregnačního prostředku s povrchem betonu. Vzorky ošetřené impregnací na bázi křemičitanu s příměsí akrylické pryskyřice byly porovnány s referenčními vzorky. Výzkum prokázal, že zvýšení drsnosti povrchu betonu před aplikací impregnačního prostředku nevede ke zlepšení jeho funkčnosti. Naopak zvýšení vlhkosti vede k lepší funkčnosti impregnačního prostředku zejména u pórovitějšího betonu nejspíše z důvodu prodloužení doby chemické reakce mezi impregnačním prostředkem a betonovým povrchem. [32]

To platí ovšem pouze pro impregnační prostředky na bázi křemičitanů, díky jejich rozpustnosti ve vodě. U hydrofobních impregnačních prostředků na bázi silanu a siloxanu, které nejsou obvykle dobře rozpustné ve vodě, účinnost při zvýšení vlhkosti betonu klesá. [3]

### 2.2.2 Hloubka penetrace

Trvanlivost prostředků povrchové ochrany a jejich účinnost proti degradačním procesům úzce souvisí s hloubkou penetrace. Se zvyšující se hloubkou penetrace impregnačních prostředků dochází ke zvýšení odolnosti betonu proti degradačním procesům, zejména pak ke snížení míry nasákavosti. [2, 8] Shen a spol. [5] prokázali spojitost mezi hloubkou penetrace a nárůstem pevnosti betonu v tlaku.

Dostatečná hloubka penetrace je nezbytná pro zajištění odolnosti impregnačního prostředku proti UV záření, jehož vlivům je vystavena povrchová vrstva betonu. Do struktury betonu však pronikat nemůže, takže impregnační prostředek hluboko v betonových pórech je před UV zářením chráněn. [9]

Hloubka penetrace je obvykle měřena postupem popsáním v ČSN EN 1504-2. Vzorky ošetřené impregnačním prostředkem jsou rozlomeny na poloviny a rozlomený povrch je namočen. Díky hydrofobnímu chování impregnované vrstvy zůstane impregnovaná část suchá a je tak možné změřit její hloubku. [12]

Jelikož impregnace na bázi křemičitanů nemají hydrofobní vlastnosti, nelze hloubku jejich penetrace měřit postupem popsáním v ČSN EN 1504-2. Hodnota se zjišťuje přidáním barviva do impregnačního prostředku. Po rozlomení naimpregnovaného vzorku je možné změřit hloubku pobarvené vrstvy, která odpovídá hloubce penetrace. [32]

Hloubku penetrace ovlivňuje více faktorů, především velikost molekul impregnačního prostředku, kvalita povrchu betonu, míra pórovitosti betonu, doba působení impregnačního prostředku a míra vlhkosti betonu. [12] Dále je rozhodující, v jaké formě je impregnační prostředek na betonový povrch nanášen. Gelové a krémové hydrofobní impregnační prostředky díky vyššímu podílu silanu obvykle dosahují větší hloubky penetrace než tekuté prostředky. Díky delšímu času jejich vypařování dochází k prodloužení reakční doby mezi impregnačním prostředkem a ztvrdlou cementovou pastou. Tím se také zvyšuje jejich účinnost. [2]

Zarzuela a spol. [1] ověřovali vliv karbonátů a chloridů působících na beton před aplikací prostředků povrchové ochrany na jejich účinnost. Zjistili, že v první fázi působení obou degradačních procesů, kdy dochází ke vzniku částic zaplňujících betonové póry, se hloubka penetrace prostředků snižuje.

### 2.2.3 Nasákavost

Jelikož jedním ze tří hlavních činitelů, které způsobují rozvoj degračních procesů, je voda, pro zvýšení trvanlivosti betonových konstrukcí je zásadní redukovat její obsah v betonových pórech. [3]

Snížení nasákavosti je možné dosáhnout dvěma způsoby. Při použití nátěrů a impregnací dochází k částečnému nebo úplnému zaplnění betonových pórů na povrchu, což zabraňuje průniku vody. Hydrofobní impregnační prostředky pór nezaplňují, ale po jejich reakci se ztvrdlou cementovou pastou dochází ke snížení molekulární přitažlivosti mezi vodou a betonem a ke zvýšení smáčecího úhlu. Povrch se stává hydrofobní a voda je přirozeně odpuzována. Viz Obr. 13. [4]

Smáčecí úhel je materiálová vlastnost, která je dána velikostí povrchového napětí mezi substrátem, tekutinou a párou. [18] Malý smáčecí úhel znamená vysokou molekulární přitažlivost mezi betonem a tekutinou, a tak se kapka vsákne do struktury betonu. Naopak v případě velkého smáčecího úhlu kapka zůstává na povrchu ve tvaru koule. Viz Obr. 10 a Obr. 9. [8]

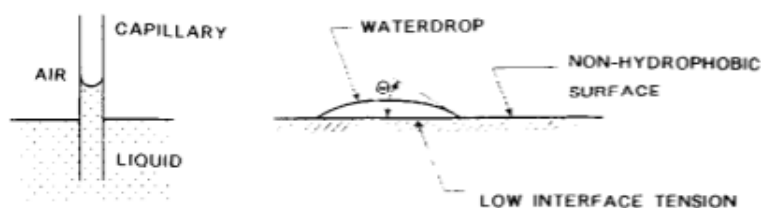
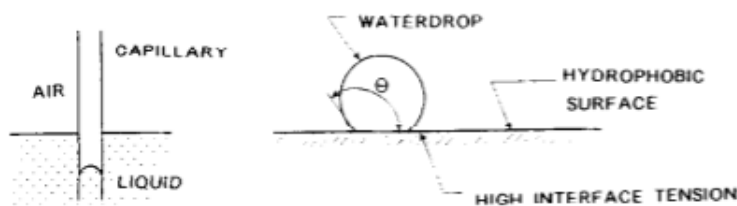
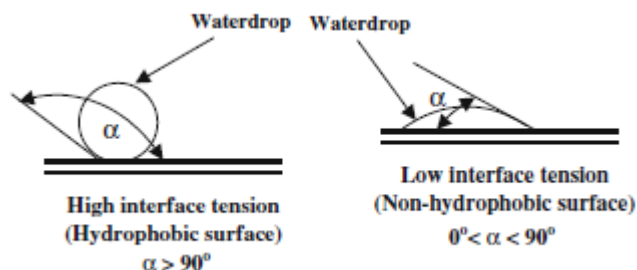


Fig. 1. Interaction between water and non-hydrophobic concrete surface.



Obr. 9 - Rozdíl ve velikosti smáčecího úhlu [8]



Obr. 10 - Rozdíl ve velikosti smáčecího úhlu [9]

Za hydrofobní je považován takový povrch, jehož smáčecí úhel je větší než 90°. [1, 2]

Omezením nasákavosti je také možné sanovat již zvlhlé konstrukce. Po aplikaci impregnačního prostředku umožňujícího vysychání se množství vlhkosti v betonu vyrovná rychleji než bez povrchové ochrany. [8]

### 2.2.3.1 Vliv povrchové drsnosti na nasákavost

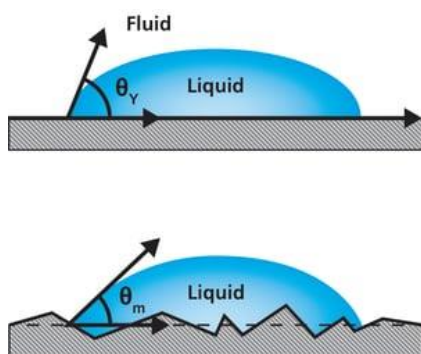
Ke snížení nasákavosti může přispět i drsnost povrchu. Existuje několik teorií, které popisují, jak se kapka na betonovém povrchu chová. Konvenční teorie předpokládá dokonale hladký povrch. Funguje ale pouze tehdy, pokud je kapka vody alespoň 40 x větší než velikost periodicity nerovnosti smáčeného povrchu. [18] Vliv povrchových nerovností popisuje Wenzelův smáčecí režim a později Cassie-Baxterův smáčecí režim. Rozdíl mezi nimi je zobrazen na Obr. 12. [1, 18]

Konvenční teorii čili kontakt kapaliny s pevnou látkou v plynném prostředí lze popsat pomocí **Youngovy rovnice** (1). Ta udává vztah mezi kontaktním úhlem  $\theta$ , povrchovým napětím kapaliny  $\sigma_{lg}$ , napětím mezi kapalinou a pevnou látkou  $\sigma_{sl}$  a povrchovou energií pevné látky  $\sigma_{sg}$ . Je základem všech modelů pro stanovení povrchové energie pevných látek za pomoci kontaktního úhlu. [23]

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (1)$$

Youngova rovnice platí pouze v případě dokonale hladkých, chemicky homogenních povrchů. Smáčení povrchů s nerovnostmi popsal v roce 1936 **Robert N. Wenzel** (2). Stanovuje vztah mezi drsností povrchu a smáčivostí, kde  $\theta_m$  je měřený smáčecí úhel,  $\theta_y$  je kontaktní úhel podle Youngovy rovnice a  $R$  je koeficient drsnosti povrchu. Říká, že zvýšením drsnosti povrchu dojde ke zvýšení stávající smáčecí vlastnosti způsobené chemickými vlastnostmi povrchu. Tedy pokud je povrch chemicky hydrofobní, při započtení drsnosti povrchu se stane ještě hydrofobnějším a naopak. Viz Obr. 11. Wenzelův stav předpokládá, že všechny povrchové nerovnosti jsou zaplněny vodou. [24, 25]

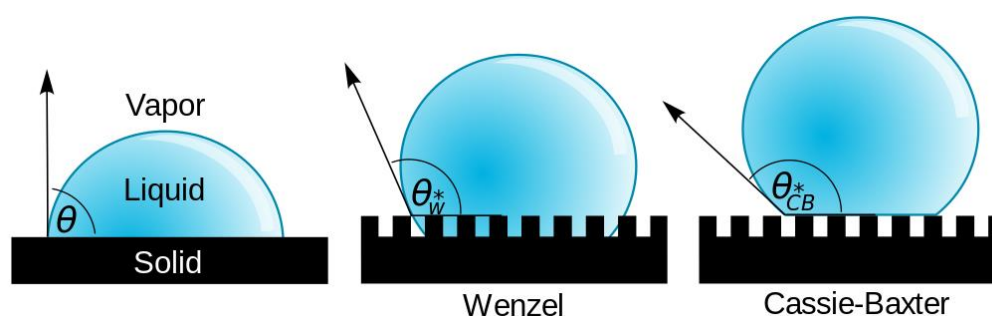
$$\cos\theta_m = R \cdot \cos\theta_y \quad (2)$$



Obr. 11 - Vliv povrchové drsnosti dle Wenzelova smáčecího režimu [24]

V roce 1944 **Cassie a Baxter** popsali stav, kdy povrchové nerovnosti při smáčení tekutinou zůstávají vyplněny vzduchem. Rovnice (3) popisující kontaktní úhel  $\theta_{CB}$ , závisí na kontaktním úhlu dokonale hladkého povrchu  $\theta_1$ , kontaktním úhlu  $\theta_2 = 180^\circ$ , říkájícího, že kapka tekutiny ve vzduchu je dokonale kulatá a na veličinách  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  popisujících plošný podíl pevné látky a páry na povrchu, kdy  $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$ . Z rovnice vyplývá, že pokud je kontaktní úhel  $\theta_1$  větší než  $90^\circ$ , při započtení drsnosti povrchu se hydrofobicita materiálu zvýší a naopak. [25, 26, 27]

$$\cos \theta_{CB} = \sigma_1 \cdot \cos \theta_1 + \sigma_2 \cdot \cos \theta_2 = \sigma_1 (\cos \theta_1 + 1) - 1 \quad (3)$$



Obr. 12 - Rozdíl mezi Wenzelovým a Cassie-Baxterovým smáčecím režimem [25]

### 2.2.3.2 Zkoušení nasákavosti

Nasákavost je obvykle testována ponořením zkušebních vzorků do vody a měřením přírůstku jejich hmotnosti v daných časových intervalech. Následně jsou porovnány přírůstky hmotnosti impregnovaných vzorků s přírůstky referenčních vzorků. [8, 10]

Dle The German Committee for Reinforced Concrete prostředek je považován za účinný, pokud dojde ke snížení nasákavosti alespoň o 50 % v porovnání s referenčními vzorky. [3]

Dle Medeirosa a spol. [9] prostředky na bázi silanů a siloxanů rozpuštěné ve vodě snižují kapilární nasákavost 2,12-krát. Při ponoření vzorku do vody se jejich vliv na snížení nasákavosti neprojevil. Při použití organických rozpouštědel se kapilární nasákavost snížila 7-krát. Při ponoření vzorku do vody je snížení nasákavosti vlivem impregnačního prostředku nejvíce patrné prvních 24 h. Po 96 h je vliv impregnačního prostředku zanedbatelný. Dále prokázali, že při snížení tlaku vody efektivita impregnačního prostředku roste. Naopak při vysokém vodním tlaku je jeho efektivita zanedbatelná.

Je tedy důležité znát podmínky a míru budoucí expozice vody. Hydrofobní impregnační prostředky jsou nevhodné pro použití v prostředí s trvalým působením vodního tlaku. [3, 12]

Frazoni a spol. [10] provedli studii porovnávající účinnost více prostředků povrchové ochrany na snížení nasákavosti. Z výsledků studie vyplývá, že účinnost TEOS je o více než 20 % vyšší než účinnost roztoku vodního skla. Nejnižší účinnost měl prostředek na bázi



nanosiliky. Tomu odpovídá velikost smáčecího úhlu po aplikaci jednotlivých prostředků povrchové ochrany. K jeho zvětšení došlo pouze u vzorků natřených přípravkem na bázi TEOS. V případě roztoku vodního skla nedošlo ke změně velikosti smáčecího úhlu. U vzorků impregnovaných roztokem nanosiliky bylo naměřeno dokonce jeho zmenšení.

Zarzuela a spol. [1] provedli tzv. houbičkový test, kdy byla houbička naplněná 5 ml vody položena na betonový povrch. Po 5 minutách byl stanoven úbytek váhy houbičky odpovídající množství vsáknuté vody. V případě prvního použitého impregnačního prostředku určeného ke zpevnění povrchů nedošlo k dostatečnému snížení nasákavosti (méně než 50 %). U druhých dvou prostředků obsahujících alkylsiloxany a alkylalkoxysiloxany způsobujících hydrofobní chování povrchu došlo ke snížení nasákavosti o 75 – 95 %.

Gonzáles-Coneo a spol. [4] porovnávali vliv tří různých hydrofobních impregnací. Použili je jednak jako přísadu do betonové směsi a jednak jako dodatečnou povrchovou ochranu aplikovanou štětcem na betonový povrch po jeho ztvrdnutí. Přestože v případě použití hydrofobní impregnace na bázi TEOS ve formě přísady došlo ke zvýšení pórovitosti, při porovnání s referenčními vzorky po dobu 24 h došlo u obou způsobů použití ke snížení nasákavosti o 76 %. Hydrofobní impregnační prostředek z nanosiliky aplikovaný na betonový povrch způsobil snížení nasákavosti po 24 h o 9,2 %. U hydrofobního prostředku na bázi stearátu vápenatého při použití ve formě přísady byla nasákavost snížena o 36 %. Dle The German Committee for Reinforced Concrete lze za účinný ve snížení nasákavosti považovat pouze první použitý prostředek.



Obr. 13 - Rozdíl mezi povrchem ošetřeným impregnačním prostředkem a neošetřeným povrchem

## 2.2.4 Paropropustnost

Pokud by beton nebyl dostatečně paropropustný, bude docházet k akumulaci vlhkosti u betonového povrchu a při působení mrazu bude docházet k poškození povrchové vrstvy vlivem tlaku zmrzlé vody. [8] Zachování paropropustnosti je také nezbytné v případě aplikace prostředku povrchové ochrany na konstrukci v průběhu jejího vysoušení. [1]

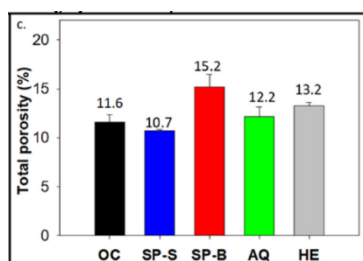
Se zvyšující se mírou paropropustnosti však dochází k urychlení procesu karbonatce. [2] Je tedy důležité zvolit vhodný prostředek povrchové ochrany reflektující potřeby konkrétní konstrukce.

Výsledky různých laboratorních zkoušek nejsou jednotné. Některé prokazují, že prostředky povrchové ochrany na bázi silanů a siloxanů, dosahují srovnatelné paropropustnosti jako neošetřený beton. [2, 9, 12] U jiných bylo naopak při použití prostředků na bázi silanů a siloxanů pozorováno snížení paropropustnosti v řádu desítek procent. [5]

Dle Gonzáles-Conea a spol. [4] hydrofobní impregnace na bázi TEOS aplikovaná na betonový povrch (SP-S) vede ke snížení porozity o 7,8 % a způsobuje snížení paropropustnosti o 28 %. Naopak přidáním stejného přípravku do betonové směsi ve formě přísady do betonové směsi (SP-B) vede k mírnému zvýšení porozity a ke zvýšení paropropustnosti o 7 %. Hydrofobní impregnace z nanosiliky komerčně dostupná pod názvem AquaShield (AQ-S) aplikovaná na betonový povrch způsobuje mírné zvýšení porozity a zároveň snížení paropropustnosti o 9 %. Hydrofobní impregnace na bázi stearátu vápenatého po přidání do betonové směsi (HE-B) vede k mírnému zvýšení porozity a k nárůstu paropropustnosti o 22 %. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 14.

Table 5  
Water vapor permeability of the concrete specimens and %variation respect to the reference (OC) concrete.

Type of concrete	Diffusivity coefficient ( $(10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ )	% variation
OC	-1.20E-06	-
SP-S	-8.66E-07	(-)-28
SP-B	-1.29E-06	(+)-7
AQ-S	-1.09E-06	(-)-9
HE-B	-1.46E-06	(+)-22



Obr. 14 - Výsledky měření paropropustnosti a porozity [4]

Shen a spol. [5] měřili pokles pórovitosti po aplikaci prostředků povrchové ochrany. V případě použití prostředku Creme C složeného z di/iso Octyl-trimethoxysilanu došlo ke snížení pórovitosti o 28 %. Aplikace prostředku z TEOS vedla ke snížení pórovitosti o 26 % a prostředek složený ze směsi silanů a siloxanů způsobil snížení pórovitosti o 16 %.

## 2.3 Vliv prostředků povrchové ochrany na průběh degradačních procesů

### 2.3.1 Mrazuvzdornost

Při poklesu teploty pod bod mrazu dojde k zamrznutí vody obsažené v betonových pórech. Během této změny skupenství zvětší voda svůj objem o 9 %. Dochází tak k nárůstu napětí působícího na stěny pórů, které může způsobovat vznik trhlin. Při opakovaném působení mrazu a rozmrazování dochází k dalšímu rozvoji trhlin a postupné degradaci betonové konstrukce. Viz *Obr. 15*. [31]

Přestože impregnace a hydrofobní impregnace nemohou být použity jako náhrada provzdušňovací přísady, ani nemohou nahradit vliv receptury betonu na jeho odolnost, mohou poskytnout vhodnou dodatečnou ochranu, především v extrémně chladném prostředí. [3]

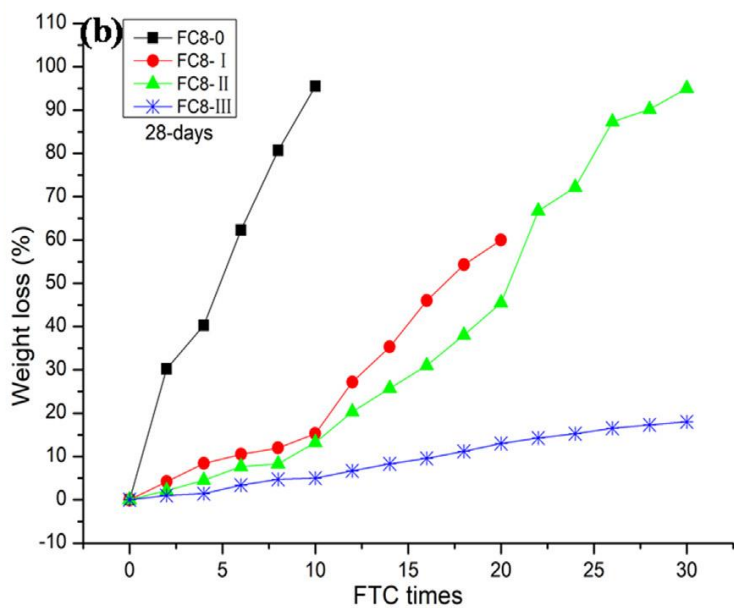
K degradaci betonu vlivem cyklického působení mrazu dochází z několika příčin:

- hydraulický tlak, který vyvine voda obsažená v betonových pórech zvětšením jejího objemu při zmrznutí,
- osmotický tlak způsobený přesunem vody z menších do větších pórů při tvorbě ledu,
- tlak vzniklý krystalizací solí rozpuštěných ve vodě, která nasákla do betonové struktury. [14]

Míra poškození závisí na množství a velikosti pórů, obsahu vody v betonu, počtu cyklů mrazu, době trvání jednoho cyklu a teplotě. Aplikací prostředků povrchové ochrany dochází ke snížení obsahu vody vsáknuté do pórů betonové struktury a tím i k menší míře poškození vlivem cyklů mrazu. [14]

Dle výsledků studie, kterou provedli L. Basheer a spol., [14] použité prostředky povrchové ochrany na bázi silanů a siloxanů vedou ke zdvojnásobení trvanlivosti betonu při cyklickém působení mrazu a rozmrazování. Vzorky, u kterých byla hloubka penetrace impregnačního roztoku větší, odolaly většímu počtu cyklů mrazu a rozmrazování.

Song a spol. [21] prověřovali vliv impregnace z lithného vodního skla na zvýšení odolnosti lehčeného betonu proti cyklickému působení mrazu. Při výrobě vzorků z lehčeného betonu o objemové hustotě 800 kg/m<sup>3</sup> byl do betonové směsi přidán impregnační roztok lithného vodního skla o koncentraci 4,5 % (FC8-I), 9 % (FC8-II) a 18 % (FC8-III). Následně proběhlo 30 cyklů působení mrazu a rozmrazování. U referenčních vzorků (FC8-0) došlo k jejich úplnému rozpadu po 10 cyklech. Po 2 cyklech byl jejich úbytek hmotnosti 30,2 %. U vzorků s impregnací o koncentraci 4,5 %, 9 % a 18 % byl úbytek hmotnosti po 2 cyklech 4,2 %, 2,1 % a 1 %. Se zvyšující se koncentrací impregnačního roztoku se zvýšila i jeho účinnost. Výsledky zkoušky jsou zobrazeny na *Obr. 16*.



Obr. 16 - Úbytek hmotnosti zkušebních vzorků během jednotlivých cyklů [21]



Obr. 15 - Popraskání povrchu betonové desky působením mraza za přítomnosti vody

### 2.3.2 Působení rozmrazovacích solí, vliv chloridů

V chladnějších oblastech, kde dochází k opakovanému poklesu teploty pod bod mrazu, mají vliv na degradaci betonu kromě vody obsažené v betonových pórech soli používané jako posyp vozovky na ochranu proti námraze. Nejčastěji používaným posypem je chlorid sodný. Ten, rozpuštěný ve vodě, nasakuje do struktury betonu, kde následně při poklesu teploty pod bod mrazu krystalizuje. Během procesu krystalizace dochází k několikanásobnému zvětšení objemu soli. Prostředky povrchové ochrany v tomto případě omezují množství nasáknuté vody obsahující rozpuštěné soli. [13]

Na zkoušení vlivu krystalizace solí existuje mnoho metod. V České republice se zkouška odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám (CH.R.L.) provádí podle ČSN 73 1326, která popisuje metody A, B a C, přičemž používané jsou především metody A a C. Při metodě A jsou vzorky spodní stranou ponořeny do misky s roztokem NaCl a spolu s miskou umístěny do mrazícího boxu. U metody C jsou naopak před umístěním do mrazícího boxu vzorky opatřeny vodotěsnou objímkou a roztok NaCl je nanesen na jejich horní povrch. V obou případech probíhá určitý počet cyklů, při kterém je měřeno množství vzniklého odpadu. [40, 52, 53]

V zahraničí zkoušky odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám probíhají odlišně. Existuje spousta metod. Obvyklé je ponoření betonových vzorků do roztoku NaCl po určitý čas a následné umístění vzorků do schránek s vodou, ve kterých jsou přesunuty do mrazícího boxu a namáhány cykly mrazu a rozmrazování. Po daném počtu cyklů je měřena hmotnost odpadu jednotlivých vzorků. [13, 14]

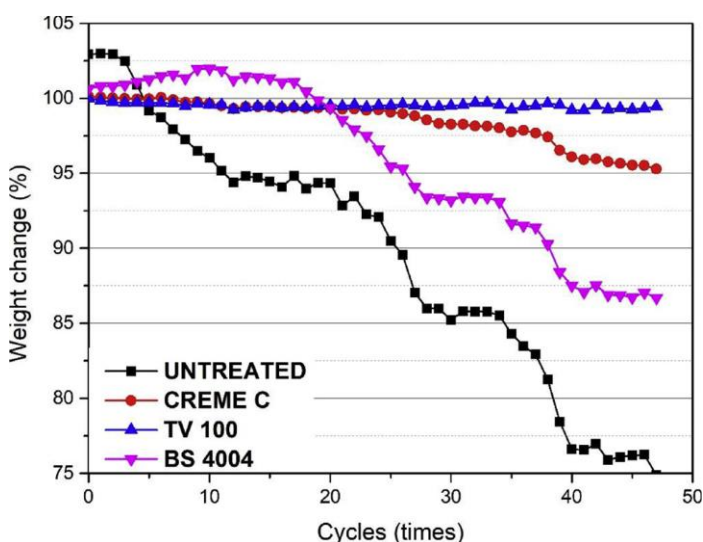
Misák a spol. [38] poukazují na problém různorodosti výsledků zkoušky CH.R.L. Porovnávali výsledky zkoušky CH.R.L. provedené dle ČSN 73 1326, metody A v 17 různých akreditovaných pracovištích v České a Slovenské republice. Všem laboratořím byly dodány vzorky vyrobené z jedné výrobní dávky, které byly uloženy a ošetřovány stejným způsobem. Po vyhodnocení výsledků všech zúčastněných laboratoří byla stanovena opakovatelnost, která říká, že rozdíl hmotnosti odpadu dvou zkoušek stejného vzorku provedených stejnou osobou na tomtéž zařízení v nejkratším možném časovém intervalu nebude větší než 1 235 g/m<sup>2</sup>, ne více než jednou ve dvaceti případech. Pokud budou zkoušky prováděny se stejným vzorkem, ale jinou osobou na jiném zařízení, nebude rozdíl hmotnosti odpadu větší než 4 230 g/m<sup>2</sup>. Přičemž jakékoliv odchylky při výrobě zkušebních vzorků a provádění zkoušky mohou vést ještě k většímu rozdílu.

Studie napříč světem se na účinnosti jednotlivých prostředků neshodnou. Je to ovlivněno především odlišným prováděním zkoušek. Jak je popsáno výše, na průběh zkoušky má vliv spousta faktorů, a i při provádění zkoušky stejnou osobou na stejném přístroji mohou být výsledky různorodé. Při provádění zkoušek odlišným postupem tedy nelze výsledky jednotlivých výzkumů relevantně porovnat. [3]

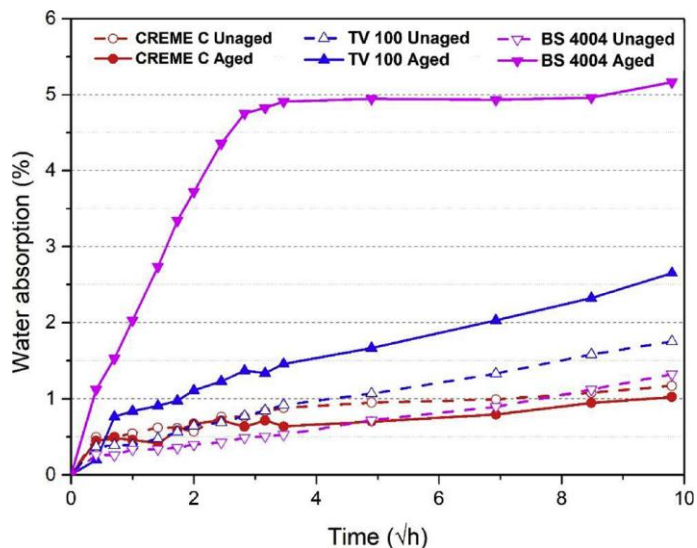
Dang a spol. [13] provedli zkoušku, při které byla zkušební tělesa ošetřena různými prostředky povrchové ochrany. Byly použity nátěry na bázi pryskyřice a na bázi epoxidu a hydrofobní impregnační obsahující alkytrialkoxysilan. Tělesa byla ponořena do nádob s 3 % roztokem NaCl po dobu 24 h. Následně proběhlo 15 cyklů, při kterých byla tělesa vždy v nádobách s roztokem soli zmrazena a rozmrazena, vyjmuta z nádob a vysušena. Na konci každého cyklu byla měřena hmotnost jednotlivých vzorků a byl stanoven její úbytek. Dle výsledků měření byla účinnost všech zkoušených prostředků povrchové ochrany 90 % a vyšší.

Kolísko a spol. [35] provedli zkoušku CH.R.L. dle ČSN 73 1326, metody C, při které porovnávali účinnost hydrofobního impregnačního prostředku na bázi oligomerních siloxanů a na bázi silanů. Prostředek na bázi silanů měl účinnost o více než 90 % vyšší ve srovnání s prostředkem na bázi oligomerních siloxanů. Tomu odpovídají výsledky měření hloubky průniku, kdy v případě oligomerních siloxanů bylo naměřeno 1 mm a 0 mm, zatímco po aplikaci prostředku na bázi silanů byla průměrná hloubka průniku 5,25 mm a 8,5 mm.

Shen a spol. [5] zkoumali vliv tří odlišných prostředků povrchové ochrany před a po namáhání cyklickým působením mrazu a solí. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo při použití prostředků Creme C složeného z di/iso Octyl-trimethoxysilanu a TV 100 obsahujícího TEOS. Po 48 cyklech byl pokles jejich hmotnosti menší než 5 %. Naopak u prostředku BS 4004 obsahujícího směs silanů a siloxanů byl vliv hydrofobní impregnace patrný pouze během prvních 20 cyklů. Ve chvíli, kdy míra porušení přesáhla hloubku penetrace prostředku, došlo k rychlé degradaci, *Obr. 17* a *Obr. 18*. Tomu odpovídají i výsledky zkoušky nasákavosti provedené před a po ukončení cyklů mrazu. Oba prostředky Creme C i TV 100 byly účinné i po ukončení mrazících cyklů, zatímco u prostředku BS 4004 došlo k velmi výraznému zhoršení nasákavosti, *Obr. 19*.



*Obr. 17 - Úbytek hmotnosti při působení cyklů mrazu a rozmrazování [5]*



Obr. 19 - Nasákovost vody před a po působení mrazem [5]



Obr. 18 - Poškození povrchu vzorků v průběhu cyklů mrazu a rozmrazování [5]

### 2.3.3 Chloridová koroze

Chloridové ionty obsažené v mořské vodě nebo v solích používaných jako posyp vozovky rozpuštěných ve vodě při jejich průniku do pórovité struktury betonu způsobují, stejně jako při procesu karbonatce, depasivaci povrchové vrstvy výztuže. Tím je umožněno pronikání vody a kyslíku k oceli, což způsobuje její korozi. Dochází ke zvětšení objemu ocelové výztuže a následnému odprýskávání krycí vrstvy betonu. [28]

Medeiros a spol. [9] měřili vliv hydrofobní impregnace na bázi silanů a siloxanů na difuzi chloridových iontů. Dle výsledků má hydrofobní impregnace vliv na snížení difuze chloridových iontů. Nicméně tento vliv není příliš velký. V případě prostředku rozpuštěného ve vodě došlo ke snížení o 11 % a u prostředku rozpuštěného v rozpouštědle byla redukce 17 %.

J. de Vries a spol. [8] prokázali zvýšení odolnosti proti chloridům při aplikaci impregnačního prostředku na bázi silanů a siloxanů. Provedená zkouška spočívala v ponoření impregnovaných a referenčních vzorků do 10 % roztoku NaCl po dobu 24 h a následného vysoušení po dobu 6 dní v laboratorním prostředí. Po 6 a po 12 měsících byl měřen obsah chloridů v krycí vrstvě v tloušťce do 20 mm. Po dvanácti měsících byl obsah chloridů ve vzorcích opatřených impregnačním roztokem o 80 % nižší než v referenčních vzorcích.

Odolnost impregnace obsahující lithné vodní sklo proti působení chloridů zkoušeli Zang a spol. [20]. Zkušební vzorky ponořili do 3,5 % roztoku chloridu sodného. V čase 3 dny, 7 dní, 14 dní, 21 dní a 28 dní byly vzorky z roztoku vytaženy a byla změřena hloubka průniku chloridů. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití impregnačního roztoku tvořeného kombinací křemičitanu lithného, křemičitanu sodného a silanu. Po 28 dnech došlo ke snížení hloubky penetrace chloridů o 73,03 % v porovnání s referenčními vzorky. Při použití roztoku tvořeného křemičitanem lithným a sodným spolu s nanosilikou se hloubka penetrace chloridových iontů snížila o 43,44 %, a o 63,07 % v případě přidání methylkřemičitanu sodného do impregnačního roztoku. Nejnižší účinnosti bylo dosaženo s impregnací z 23 % roztoku křemičitanu lithného bez příměsí. Na *Obr. 20* je popsáno složení použitých prostředků povrchové ochrany.

Number	Lithium Silicate	Sodium Silicate	Silica Sol	Sodium Methylsilicate	Silane Coupling Agent	Methyl Silicone Oil	Helper Component
PC1	40%	—	—	—	—	—	Surfactants,
PC2	40%	10%	—	—	—	—	pH regulators,
NC1	40%	10%	30% × PC2	—	—	—	dispersants,
NC2	40%	10%	30% × PC2	5% × PC2	—	—	defoamers,
OL1	40%	10%	—	—	100% × PC2	2% × PC2	film-forming AIDS, etc.

*Obr. 20 - Složení impregnačních prostředků [20]*

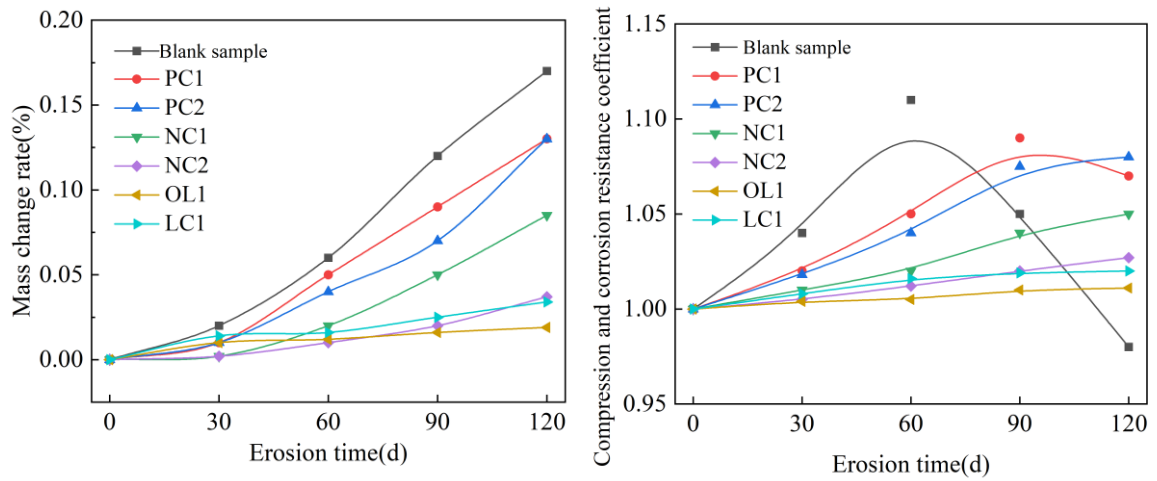


### 2.3.4 Síranová koroze

Sírany obsažené v betonu nebo proniklé do struktury betonu z okolního prostředí reagují se ztvrdlou cementovou pastou. V průběhu tohoto procesu dochází k přeměně hydroxidu vápenatého na sádrovec. Ten následně za přítomnosti vody reaguje se zhydratovanými hlinítky obsaženými v cementovém tmelu za vzniku expanzivních novotvarů zvaných ettringit. Pokud tato reakce probíhá ještě v čerstvém betonu nebo během jeho tvrdnutí, nedochází ke zhoršení vlastností ztvrdlého betonu. Vznik ettringitu ve ztvrdlém betonu však způsobuje lokální zvýšení napětí vedoucí k porušování struktury betonu, *Obr. 21*. Tento proces je označován jako síranová koroze. [28]

Zang a spol. [20] zkoušeli vliv impregnačních prostředků na bázi lithného vodního skla na prodloužení trvanlivosti betonu při působení síranů. Na jednu stranu zkušebních vzorků byl aplikován impregnační prostředek. Zbylé strany byly ošetřeny epoxidovou pryskyřicí. Vzorky byly ponořeny do 5% roztoku síranu sodného. Následně proběhlo 28 cyklů, kdy byly vzorky vždy po 15 h vytaženy z roztoku a po dobu 1 h byly vysoušeny. Poté byly umístěny do pece s teplotou 80 °C po dobu 6 h, a 2 h byly ochlazovány na pokojovou teplotu. Po dokončení posledního cyklu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a byla změřena míra ztráty hmotnosti u jednotlivých vzorků v době 0, 30, 60, 90 a 120 dní po dokončení cyklů. Složení jednotlivých impregnačních prostředků je zobrazeno na *Obr. 20*.

Jako nejúčinnější se ukázal prostředek slučující kombinaci křemičitanu lithného a sodného spolu se silanem (OL1). Prokázal jak v případě pevnosti v tlaku, tak u měření ztráty hmotnosti vyšší účinnost než běžně prodáváný impregnační prostředek na bázi lithného vodního skla (LC1). Impregnační prostředek skládající se z křemičitanu lithného a sodného a roztoku oxidu křemičitého s příměsí methylokřemičitanu sodného (NC2) dosáhl v obou případech srovnatelných výsledků jako komerčně prodáváný impregnační prostředek (LC1). Při použití impregnace z lithného vodního skla bez příměsí (PC1) bylo dosaženo zlepšení v porovnání s referenčními vzorky, nicméně účinnost této impregnace je v porovnání s dalšími zkoušenými impregnacemi zanedbatelný. Viz *Obr. 22*.



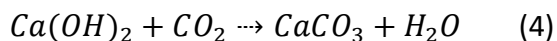
Obr. 22 - Změna hmotnosti zkušebních vzorků a koeficient pevnosti v tlaku a odolnosti proti korozi v průběhu namáhání sírany [20]



Obr. 21 - Degradace betonu při působení síranové koroze [61]

### 2.3.5 Karbonatace

Pronikáním oxidu uhličitého a vlhkosti do betonové struktury dochází k chemické reakci mezi hydroxidem vápenatým a oxidem uhličitým, při které dochází ke vzniku vody a uhličitanu vápenatého (4). [3, 28, 30]



Celý proces je možné rozdělit do čtyř fází.

V první fázi vznik jemnozrnného uhličitanu a jeho částečné zaplnění pórů způsobuje krátkodobé zlepšení mechanických vlastností betonu a zvýšení jeho odolnosti vůči agresivním látkám.

V druhé fázi probíhá reakce oxidu uhličitého s hydratovanými slínkovými materiály a vznikají modifikace uhličitanu vápenatého. Tato reakce probíhá bez vlivu na mechanické vlastnosti betonu.

Během třetí fáze za působení oxidu uhličitého a vlhkosti dochází k rekrystalizaci uhličitanu vápenatého. Nárůst objemu při vzniku krystalů kalcitu a aragonitu způsobuje porušování struktury betonu a vznik trhlin.

Při čtvrté fázi krystaly kalcitu a aragonitu postupně prorůstají cementovým tmelem a zhoršují mechanické vlastnosti betonu až do jeho úplného rozpadu. [31]

Uhličitan vápenatý, vznikající při procesu karbonatace, způsobuje snížení pH betonu. Když hodnota pH klesne pod 8,4, dojde k depasivaci ochranné vrstvy výztuže. Ta chrání výztuž před kontaktem s vodou a kyslíkem. Umožněním kontaktu vody a kyslíku s výztuží dochází k její korozi. Při tomto procesu ocelová výztuž zvětší svůj objem 6-7-krát. Vlivem objemových změn obvykle dochází k odlupování betonové krycí vrstvy. Důsledkem celého procesu je snížení průřezu výztuže a umožnění pronikání agresivních látek hlouběji do struktury betonu. Viz *Obr. 24*. [3, 28, 30]

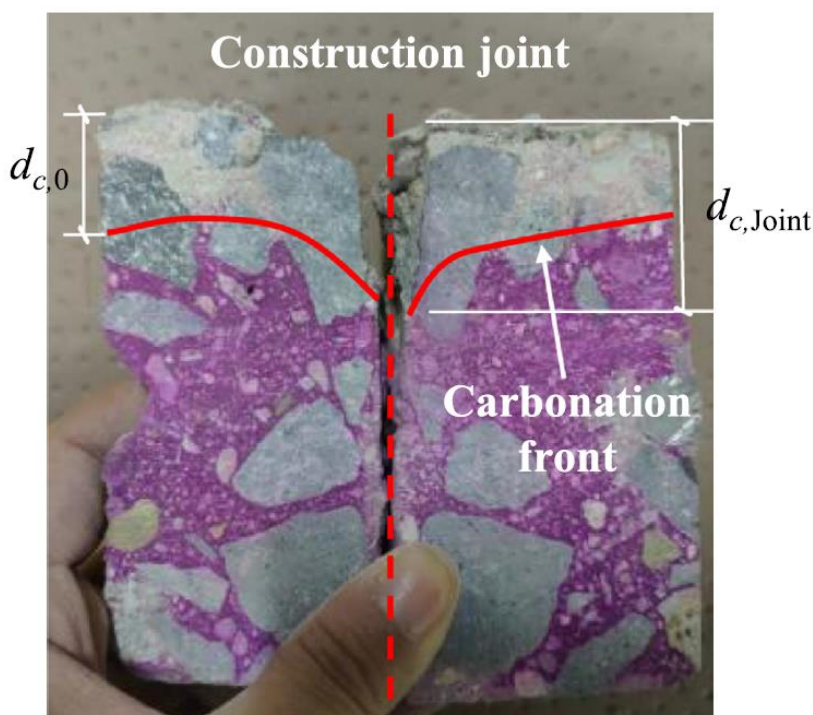
Na rychlost karbonatačního procesu má vliv především míra propustnosti oxidu uhličitého obsaženého ve vzduchu a míra reaktivity oxidu uhličitého se ztvrdlou cementovou pastou. Problematika paropropustnosti byla podrobněji popsána v kapitole 2.2.4 *Paropropustnost*. Dále má na průběh karbonatace vliv okolní prostředí, jeho vlhkost, teplota a koncentrace CO<sub>2</sub> a trhliny vzniklé od mechanického namáhání betonu. [3, 19]

Obvykle se odolnost betonu proti karbonataci zkouší umístěním vzorků do karbonatační komory se zvýšenou koncentrací oxidu uhličitého po určitý čas. Následně jsou vzorky rozpůleny a na jejich povrch je nanesen roztok fenolftaleinu sloužící jako indikátor hloubky zkarbonatované vrstvy. [12]

Frazoni a spol. [10] umístili impregnované a referenční zkušební vzorky do karbonatační komory s koncentrací  $\text{CO}_2$   $20 \pm 2$  %. Hloubka zkarbonatované vrstvy byla měřena po 5, 12, 25 a 60 dnech. Zkouška byla provedena na vzorcích dvou různých betonových receptur.

U referenčních vzorků byla po 60 dnech naměřena tloušťka zkarbonatované vrstvy 5,7 mm a 11,1 mm. Největší účinnosti dosáhnul roztok TEOS. Při jeho použití byla po 60 dnech tloušťka zkarbonatované vrstvy o 67 % a 65 % menší v porovnání s referenčními vzorky. U vzorků opatřených roztokem vodního skla byla tloušťka zkarbonatované vrstvy po 60 dnech o 25 % a 57 % menší než u referenčních vzorků. V případě nanosiliky se vliv na snížení karbonatace neprokázal.

Shen a spol. [19] měřili hloubku karbonatace na 30 let staré mostní konstrukci. Následně provedli porovnání naměřených hodnot ze skutečné konstrukce s výsledky uměle urychlené karbonatace, přičemž u části vzorků byla aplikována silanová hydrofobní impregnace. Z mostní konstrukce bylo vyvrtáno 6 vzorků tvaru válce o průměru 100 mm, v jejichž středu probíhala pracovní spára. Vzorky byly rozlomeny na dvě poloviny podél spáry. Na rozlomený povrch byl nanesen fenolftalein a byla změřena hloubka zkarbonatované vrstvy. Takto změřené poloviny vzorků byly opět rozlomeny na dvě části, tentokrát kolmo k pracovní spáře a opět bylo provedeno měření hloubky zkarbonatované vrstvy. V místě pracovní spáry byla hloubka zkarbonatované vrstvy největší. Směrem od spáry se hloubka zmenšovala, Obr. 23. Ve vzdálenosti 20 mm od spáry již byla hloubka zkarbonatované vrstvy konstantní.



Obr. 23 - Hloubka zkarbonatované vrstvy v místě spáry [19]

Pro laboratorní zkoušky bylo zhotoveno 12 vzorků, v každém 2 pracovní spáry. Byly vytvořeny různé druhy vzorků – vodní součinitel 0,5 a 0,43, některé vzorky byly namáhány tlakem, část byla ošetřena silanovou impregnací. Zrychlená karbonatace probíhala v komoře s koncentrací CO<sub>2</sub> 20 %. Hloubka zkarbonatované vrstvy byla měřena v době 7, 14 a 28 dní. Vzorky byly rozlomeny kolmo na pracovní spáry a za pomoci roztoku fenolftaleinu byla změřena hloubka karbonatace. U vzorků, které byly ošetřeny hydrofobní impregnací na bázi silanu, se vliv pracovní spáry neprojevil a hloubka zkarbonatované vrstvy byla konstantní. V prostoru mimo pracovní spáru došlo k redukci hloubky zkarbonatované vrstvy o 10–45 % v porovnání s referenčními vzorky. U betonu s vyšším vodním součinitelem byl vliv silanové impregnace větší.



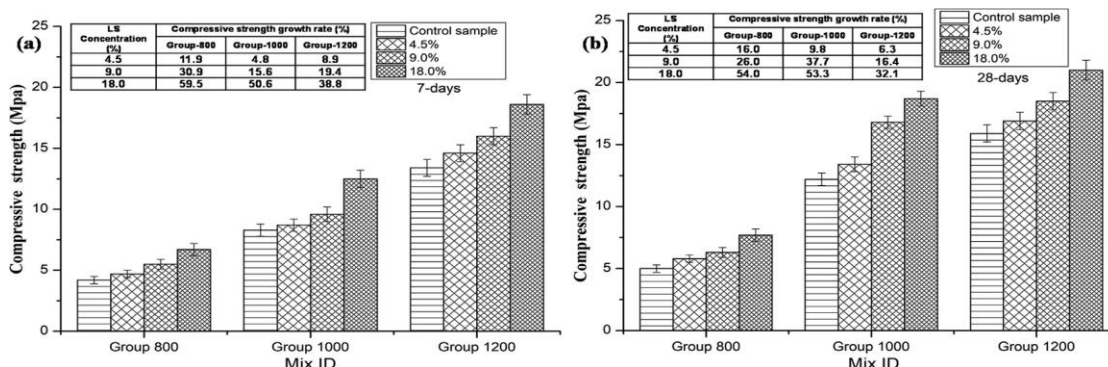
Obr. 24 - Konstrukce zasažená karbonatací. Hloubka zkarbonatované vrstvy zvýrazněna pomocí roztoku fenolftaleinu. [61]

### 2.3.6 Mechanická odolnost

Prostředky pro povrchovou ochranu betonu nemohou přímo zvýšit pevnost betonu, jelikož nemají vliv na kvalitu ani porozitu celého betonového prvku. [3] Po jejich aplikaci reagují se ztvrdlým cementem a reakční produkty mohou částečně zaplňovat póry a zlepšovat tak mechanické vlastnosti betonového povrchu. Některé výzkumy prokazují, že prostředky na bázi silanu mohou sloužit k uzdravení trhlin až do šířky 0,5 mm. [2]

Dle Zarzuela a spol. [1] po aplikaci hydrofobního impregnačního prostředku na bázi alkylsiloxanů a alkylalkoxysilanů došlo při zkoušce Schmidtovým kladívkem ke zvýšení indexu odrazu o 5 – 35 %. Tento efekt byl nejvíce patrný u vzorků uměle zestárnutých pomocí zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, u nichž při procesu stárnutí došlo k tvorbě mikrotrhlin. Impregnační prostředek po reakci s cementovou pastou způsobuje zvýšení povrchové pevnosti. V případě vzorků s trhlinami o velikosti 0,3 – 0,5 mm již k navrácení původních vlastností nedošlo.

Song a spol. [21] zkoušeli vliv přidání lithného vodního skla jako přísady do lehčeného betonu na zvýšení pevnosti v tlaku. Zkouška probíhala na vzorcích z lehčeného betonu s hustotou 800 kg / m<sup>3</sup>, 1000 kg / m<sup>3</sup> a 1200 kg / m<sup>3</sup>. Jako impregnace byl použit roztok lithného vodního skla v koncentracích 4,5 %, 9 % a 18 %. Pevnost v tlaku byla měřena v době stáří betonu 7 a 28 dní. Se zvyšující se koncentrací roztoku lithného vodního skla došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku. Největší nárůst pevnosti v tlaku se projevil u betonu s nejnižší hustotou. U 28 dní starých vzorků byl nárůst pevnosti v tlaku 54 % v porovnání s referenčními vzorky. Naopak nejnižší nárůst pevnosti v tlaku 6,3 % nastal u kombinace betonu s nejvyšší hustotou a nejnižší koncentrace roztoku lithného vodního skla. Viz Obr. 25.



Obr. 25 - Vliv přidání křemičitanu lithného na pevnost betonu po 7 a po 28 dnech [21]

Během výzkumu Shen a spol. [5] porovnávali vliv tří na trhu dostupných prostředků povrchové ochrany. Všechny tři prostředky vedly ke zvýšení pevnosti v tlaku. Přičemž po aplikaci prostředku Creme C složeného z Di/iso Octyl-trimethoxysilanu se pevnost betonu v tlaku zvýšila o 52 % ve srovnání s referenčními vzorky. U prostředku TV 100 na bázi TEOS byla pevnost betonu v tlaku větší o 30,5 % a použití prostředku BS 4004 obsahujícího silany a siloxany byl nárůst pevnosti v tlaku 16 %.

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části je ověřit vliv prostředků povrchové ochrany na prodloužení trvanlivosti betonu. Za tímto účelem byly použity dva prostředky povrchové ochrany: hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od společnosti Stachema, v tabulkách a grafech označen jako R\_BKH a impregnační roztok lithného vodního skla, v tabulkách a grafech označen jako LiVs. Pro možnost porovnání byly vyrobeny referenční vzorky, označeny jako REF. Následně proběhlo vyhodnocení vlivu těchto prostředků na průběh několika degradačních procesů. Důležitými parametry pro vyhodnocení účinnosti použitých prostředků jsou změna velikosti smáčecího úhlu a hloubka jejich průniku do struktury betonu. Dále byla provedena zkouška nasákavosti, měření paropropustnosti zkušebních vzorků, zkouška odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a zkouška odolnosti proti procesu karbonatace.

#### 3.1 Výroba vzorků

Z důvodu odlišného provádění a nároků jednotlivých zkoušek a za účelem možnosti porovnání více parametrů byly vyrobeny vzorky třech různých rozměrů z betonů odlišných receptur a pevnostních tříd. Na výrobu všech vzorků byl použit cement CEM I 42,5 R (Heidelberg Cement Group, závod Mokrý). Parametry zkušebních vzorků použitých pro jednotlivé zkoušky jsou popsány v *Tab. 1*.

*Tab. 1 - Výroba vzorků*

Zkouška	Rozměr	Počet	Pozn.	v/c
Velikost smáčecího úhlu	K 100	6	x	0,41
Hloubka průniku	K 100	6	x	0,41
Nasákavost – LiVs	T 40x40x160	12	Cem. pasta	0,5
Nasákavost – Repesil BKH	K 100	8	C 20/25	-
Paropropustnost	K 150	10	C 30/37	0,5
	K 150	10	C 50/60	0,37
CH.R.L.	K 150	12	C 30/37	0,5
	K 150	12	C 50/60	0,37
Karbonatace	K 100	18	C 20/25	-

Všechny vzorky byly vyráběny stejným postupem. Bylo naváženo recepturami stanovené množství vody, cementu a daných frakcí kameniva, *Obr. 27*. Do míchačky bylo nasypáno jemnozrnné kamenivo frakce 0-4, cement, kamenivo frakce 4-8 a kamenivo frakce 8-16. Tyto složky byly promíchány. Následně byla v průběhu míchání do směsi přidána voda a plastifikátor. Po promíchání bylo víko míchačky zvednuto, byl promíchán cement, který zůstal na okraji a míchačka byla opět spuštěna. Postup výroby je znázorněn na *Obr. 26*.



Obr. 27 - Jednotlivé pevné složky betonu

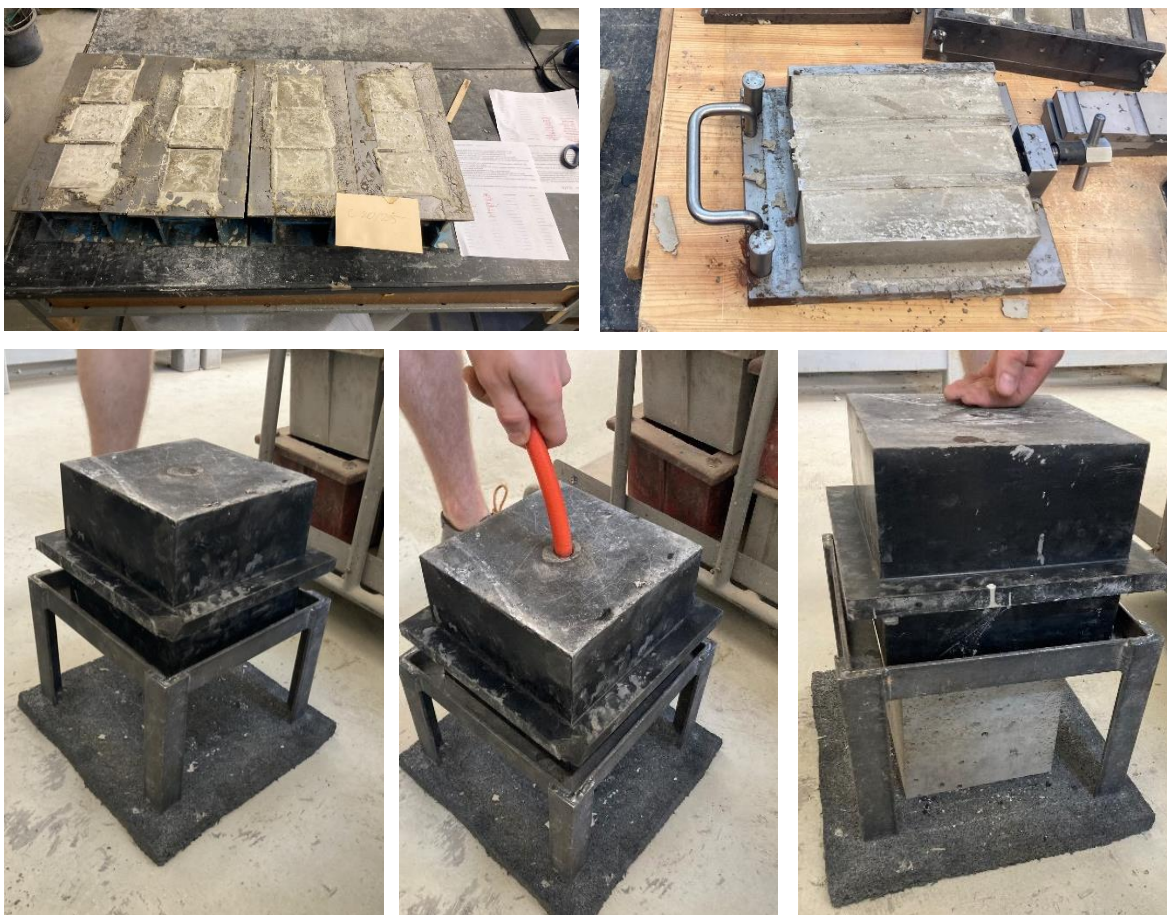
Takto připravená betonová směs byla po částech přesunuta do forem potřených odformovacím prostředkem. Formy byly umístěny na vibrační stůl a vždy po naplnění třetiny formy byla směs ve formě zavibrována. Pro výrobu byly použity dvě různé míchačky v závislosti na objemu vyráběné betonové směsi.



Obr. 26 - Výroba betonové směsi v míchačce

Formy s čerstvým betonem byly umístěny do laboratorního prostředí, kde probíhalo jejich zrání po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byly vzorky odbedněny. V případě trámků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm a krychlí o hraně 100 mm byly opatrně odstraněny kovové stěny formy. Ty byly očištěny a opět sestaveny pro budoucí použití. Krychle o hraně 150 mm byly z plastových forem uvolněny pomocí tlaku vzduchu. Forma byla umístěna na podnož z kovového rámu betonovaným povrchem směrem dolů. K malému otvoru na horní straně formy byla přiložena hadice s proudem vzduchu. Tlak vytvořený proudem vzduchu způsobí uvolnění betonové krychle z formy a její vypadnutí na podložku. Viz Obr. 29.





Obr. 29 - Odformování zkušebních vzorků

Vzorky určené ke zkoušení odolnosti proti CH.R.L. a ke zkoušení odolnosti proti karbonataci byly po odbednění umístěny do vodní nádrže, kde probíhalo jejich zrání do 28. dne ode dne výroby. Po uplynutí této doby byly vzorky z vodní nádrže vyjmuty a vysušeny v laboratorním prostředí. Vzorky určené pro zkoušky pórovitosti, nasákavosti, měření změny velikosti smáčecího úhlu a hloubky průniku zrály v laboratorním prostředí. Před zahájením jednotlivých zkoušek proběhla na povrch určených zkušebních vzorků aplikace prostředku povrchové ochrany dle doporučení výrobců.



Obr. 28 - Vzorky umístěné ve vodní nádrži

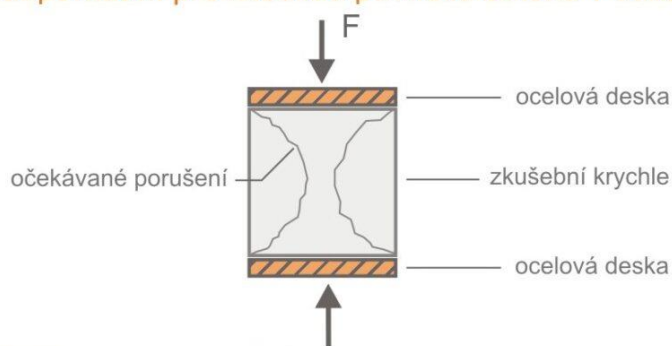
### 3.1.1 Ověření pevnosti

#### 3.1.1.1 Pevnost v tlaku

Při výrobě zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 a C 50/60 byla z každé směsi zhotovena navíc jedna krychle o hraně 150 mm za účelem ověření pevnosti v tlaku zkoušených vzorků. Zkoušené krychle byly namáhány tlakem až do porušení pomocí hydraulického lisu. Viz *Obr. 30*. Na základě síly, kterou bylo potřeba vyvinout pro porušení vzorku byla za využití vzorce (5) vypočtena pevnost v tlaku zkoušeného vzorku. Výsledky měření jsou zobrazeny v *Tab. 2*.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

#### Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku



*Obr. 30 - Schéma uspořádání při zkoušce pevnosti v tlaku [58]*

*Tab. 2 - Výsledky měření pevnosti v tlaku*

Předpokládaná pevnostní třída	Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Pevnostní třída
C 30/37	149,4	152,7	149,3	7955,0	2336	1298,98	<b>57,0</b>	C 45/55
C 50/60	151,3	149,4	151,3	8050,0	2353	1293,42	<b>57,2</b>	C 45/55

Oba zkoušené vzorky mohou být na základě výsledků měření zařazeny do třídy pevnosti v tlaku C 40/45. U vzorku s předpokládanou třídou pevnosti v tlaku C 30/37 se pravděpodobně jednalo o výjimku a ostatní vyrobené vzorky mohou dosahovat nižších pevností. Proto budou vzorky z této receptury nadále zařazeny do původně předpokládané třídy pevnosti C 30/37. Jelikož druhý měřený vzorek nedosáhl předpokládané charakteristické pevnosti v tlaku 60 MPa, je třeba všechny vzorky z této receptury zařadit do pevnostní třídy C 45/55.

Vzorky z betonu dvou různých pevnostních tříd byly vyrobeny především za účelem možnosti porovnání vlivu kvality betonu na odolnost proti působení degradačních procesů a na účinnost použitých prostředků povrchové ochrany. Pevnostní třída tedy nehraje v tomto případě důležitou roli a změna zařídění vzorků z C 50/60 na C 45/55 nebude mít zásadní vliv na výsledky zkoušek. Je tedy možné tyto vzorky na plánované zkoušky použít.

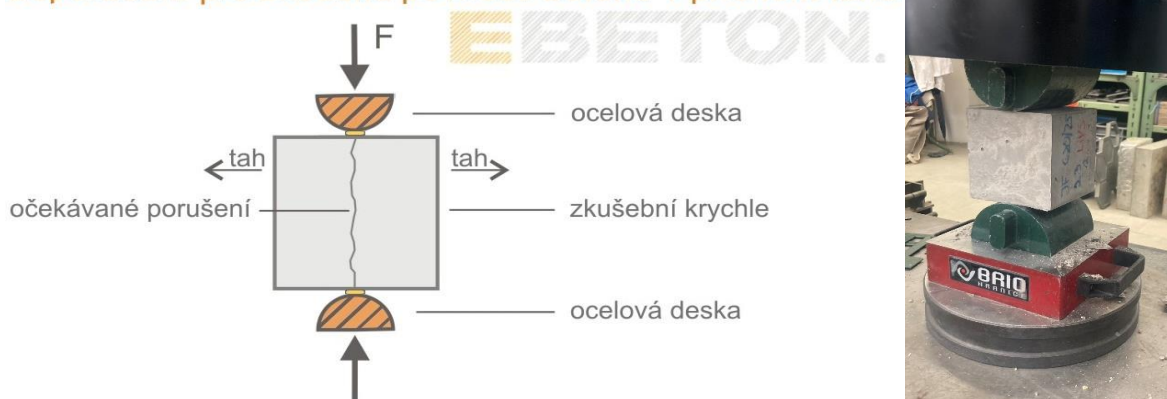
### 3.1.1.2 Pevnost v příčném tahu

Krychle použité pro zkoušku odolnosti proti karbonataci byly po sedmi dnech v klimatické komoře rozlomeny na poloviny působením příčného tlaku za pomoci hydraulického lisu. Během této zkoušky je těleso třeba umístit do středu lisu a pomocí vyrovnávací destičky srovnat tak, aby byly horní a dolní půlkruhové ocelové podložky umístěny rovnoběžně, ve středu krychle. Viz *Obr. 31*. Následně je krychle zatěžována až do jejího porušení. Pevnost v příčném tahu se vypočte ze vztahu (6).

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (6)$$

kde  $F$  je síla potřebná k porušení vzorku,  $l$  je délka povrchu ve směru dotyku s ocelovými podložkami a  $d$  je šířka povrchu ve směru kolmém na ocelové podložky. Výsledky jsou zobrazeny v *Tab. 3*.

#### Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v příčném tahu



*Obr. 31 - Schéma uspořádání při zkoušce pevnosti v příčném tahu [59]*

*Tab. 3 - Výsledky měření pevnosti v příčném tahu*

Vzorek	Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]	
LiVs	98,8	100,3	99,8	2365,0	2391	44,77	<b>2,88</b>	<b>3,44</b>
LiVs	100,0	99,4	99,5	2398,9	2426	62,61	<b>4,01</b>	
R_BKH	100,1	100,1	99,7	2359,9	2364	71,34	<b>4,53</b>	<b>4,29</b>
R_BKH	100,3	100,2	99,8	2361,3	2352	63,99	<b>4,05</b>	
REF	100,1	100,0	100,0	2393,3	2393	54,80	<b>3,49</b>	<b>3,88</b>
REF	99,5	99,1	100,2	2369,8	2400	66,15	<b>4,27</b>	
Průměr	99,8	99,9	99,8	2374,7	2387,6	60,6	<b>3,9</b>	

Průměrná pevnost zkušebních vzorků v příčném tahu je 3,9 MPa. Toto měření je pouze informativní. Bylo provedeno z důvodu potřeby rozlomit zkušební vzorky na poloviny při měření vlivu karbonatace. Pro potencionální stanovení vlivu použitých prostředků povrchové ochrany na zvýšení pevnosti betonu v příčném tahu by bylo potřeba provést zkoušku obsahující více zkušebních vzorků.

## 3.2 Prostředky povrchové ochrany

### 3.2.1 Repesil BKH

Jedná se o siloxanový polymer rozpuštěný v lakovém benzínu, který se řadí do skupiny hydrofobních impregnací. Tento přípravek je na trhu běžně dostupný. Výrobce je společnost Stachema. Předpokládá se, že po jeho aplikaci na betonový povrch dojde k chemické reakci popsané v kapitole 2.1.3 *Hydrofobní impregnace*, která má za následek zvětšení smáčecího úhlu betonového povrchu. Betonový povrch se po aplikaci tohoto prostředku stává hydrofobní. Viz *Obr. 32*.



*Obr. 32 - Kapka na betonovém povrchu ošetřeném přípravkem Repesil BKH*

Dle výrobce je doporučeno používat přípravek na vertikální plochy, nebo plochy s velkým sklonem. Například protihlukové stěny, betonové fasádní obklady, mostní konstrukce atd. Nepředpokládá se, že by ošetřovaná konstrukce měla být trvale namáhána vodou. Tento prostředek umožňuje rychlý odvod vody z betonového povrchu, namísto jejího vsakování do betonové struktury. Výrazně tak prodlužuje životnost betonových konstrukcí, brání zašpinění povrchu a jeho zvětvávání. Dokáže zabránit přístupu vody i do trhlin o šíři až 0,2 mm.

Doporučeno je aplikovat přípravek na ošetřovaný povrch válečkem, štětkou nebo stříkáním. Povrch musí být před aplikací čistý, nemastný a suchý. Obvykle je dostačující jedna vrstva prostředku. V případě velmi porézních materiálů je možné nanést vrstvy dvě. [41]

Při aplikaci přípravku byla dodržena všechna doporučení výrobce. Přípravek byl aplikován na vzorky vysušené přirozeně v laboratorním prostředí, staré minimálně 28 dní. Povrch vzorků byl před aplikací přípravku očištěn pomocí vysokotlaké vzduchové pistole. Přípravek Repesil BKH byl nanášen na betonový povrch štětkem v jedné vrstvě. Takto ošetřené vzorky byly umístěny na dřevěné podložky tak, aby jim bylo umožněno vysychání ze všech jejich stran. Vysychání probíhalo v laboratorním prostředí po dobu alespoň 24 hodin. Po ukončení popsaného postupu mohly být provedeny plánované zkoušky.

### 3.2.2 Lithné vodní sklo

Roztok lithného vodního skla byl dodán chemickou fakultou Vysokého učení technického v Brně. Jedná se o roztok křemičitanu lithného s molárním poměrem 3,0 rozpuštěného ve vodě. Tento prostředek se řadí do skupiny impregnací. Po jeho aplikaci na betonový povrch dochází ke vzniku C-S-H gelu, který částečně zaplňuje betonové póry a zabraňuje tak průniku vody do struktury betonu. Podrobněji je tento proces popsán v kapitole 2.1.2 *Impregnace*. Na rozdíl od dalších impregnačních prostředků na bázi křemičitanu, především křemičitanu sodného, nezpůsobuje rozvoj alkalicko křemičité reakce. [20]

Kromě snížení nasákavosti díky vzniku C-S-H gelu vyplňujícímu betonové póry impregnace zpevňují betonový povrch a umožňují sanaci mikrotrhlin. [21] Jelikož póry nejsou zaplněny úplně, paropropustnost je částečně zachována a betonové konstrukce mohou i po aplikaci impregnačního přípravku vysychat.

Při aplikaci impregnačního přípravku z lithného vodního skla byl dodržen postup doporučený dodavatelem. Povrch ztvrdlých betonových vzorků vysušených přirozeně v laboratorním prostředí byl zbroušen a následně očištěn od prachu a nečistot pomocí vysokotlaké vzduchové pistole. Takto připravené zkušební vzorky byly ponořeny do nádoby s roztokem lithného vodního skla po dobu 24 hodin na vhodné podložky tak, aby byl povrch betonového vzorku v kontaktu s impregnačním přípravkem ze všech jeho stran. Následně byly vzorky z impregnačního roztoku vyjmuty a umístěny na vhodné podložky do laboratorního prostředí, kde probíhalo vysychání po dobu 24 hodin. Viz *Obr. 33*. Takto připravené vzorky bylo možné podrobit plánovaným zkouškám.



*Obr. 33 - Ošetření povrchu zkušebních vzorků impregnačním roztokem z lithného vodního skla*

### 3.3 Provedené zkoušky

Cílem provedených zkoušek bylo porovnat účinek obou prostředků povrchové ochrany na průběh různých degradačních procesů s referenčními vzorky, jejichž povrch nebyl nijak ošetřen. Seznam provedených zkoušek a použitých zkušebních vzorků je zobrazen v *Tab. 1*.

Změna velikosti smáčecího úhlu a hloubka průniku přípravků do pórové struktury betonu jsou důležitými parametry, na nichž závisí účinnost zkoušených přípravků. Jelikož je voda a její obsah v pórovité struktuře betonu jedním ze tří spouštěčů degradačních procesů [28], byla provedena zkouška nasákavosti zkoumající vliv prostředků povrchové ochrany na snížení nasákavosti vody. Dále byl měřen vliv zkoušených přípravků na snížení pórovitosti, což zvyšuje odolnost proti karbonataci.

Na závěr byly referenční a ošetřené zkušební vzorky vystaveny působení dvou degradačních procesů: účinkům vody a chemických rozmrazovacích látek při střídavém působení mrazu a rozmrazování a procesu karbonatace. Působením chemických rozmrazovacích látek jsou vystaveny především dopravní stavby, u nichž se tyto látky používají v zimě jako posyp proti námraze. Procesu karbonatace jsou vystaveny všechny konstrukce, které jsou v přímém kontaktu se vzduchem.

### 3.3.1 Velikost smáčecího úhlu

Za hydrofobní je považován takový povrch, jehož smáčecí úhel je větší než  $90^\circ$ . [1, 2] Jelikož je beton porézni materiál, nepředpokládá se, že by smáčecí úhel jeho povrchu přesáhnul  $90^\circ$ . Naopak bývá obtížné smáčecí úhel vůbec změřit, protože se kapka na jeho povrchu vsakuje téměř okamžitě.

Lithné vodní sklo zajišťuje snížení nasákavosti vody díky částečnému vyplnění betonových pórů C-S-H gelem vzniklým při reakci impregnačního prostředku se ztvrdlým betonem. [20] Po jeho aplikaci se nepředpokládá, že by došlo k nárůstu smáčecího úhlu. Vsáknutí kapky do struktury betonu by však díky částečnému zaplnění pórů mělo trvat delší dobu než v případě referenčních vzorků.

Hydrofobní impregnační prostředky vedou ke snížení molekulární přitažlivosti mezi povrchem a tekutinou. To má za následek zvětšení smáčecího úhlu povrchu a snížení nasákavosti. U vzorků ošetřených přípravkem Repesil BKH se předpokládá nárůst velikosti smáčecího úhlu. Obvykle se velikost smáčecího úhlu po aplikaci hydrofobního impregnačního prostředku pohybuje okolo  $100\text{--}130^\circ$ . Kapka by z betonového povrchu po jeho naklonění měla stéct a neměla by se téměř vůbec vsáknout. [4, 5]

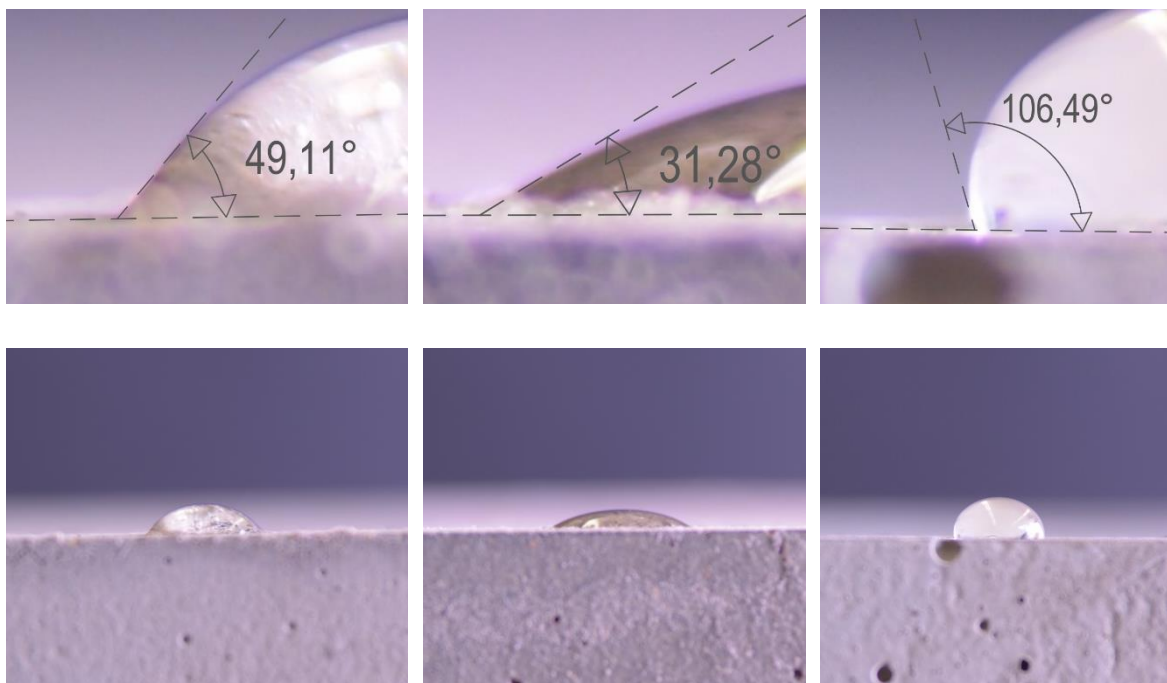


Obr. 34 - Měření velikosti smáčecího úhlu

Velikost smáčecího úhlu byla měřena pomocí fotoaparátu upevněného na stativu, Obr. 34. Na povrch vzorků byla pomocí pipety nanášena kapka vody. Ta byla vyfocena z bočního pohledu v detailu tak, aby bylo možné změřit úhel mezi povrchem kapky a povrchem betonu. Úhel byl změřen přibližně z fotografie za využití grafického programu. Pro měření byly použity tři zkušební krychle. Jedna byla určena jako referenční, jedna byla ošetřená impregnačním prostředkem z lithného vodního skla a jedna hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH. Kapka byla nanášena na různé strany krychle. Celkem byla provedena čtyři měření pro každou zkoušenou krychli. Výsledná hodnota velikosti smáčecího úhlu je jejich průměrem. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 - Výsledky měření velikosti smáčecího úhlu

	REF	LiVs	R_BKH
Průměrný smáčecí úhel	50,22°	29,95°	104,01°
Rozdíl		-40 %	107 %



Obr. 35 - Kapky na betonovém povrchu, zleva neošetřený povrch, povrch ošetřený impregnací z lithného vodního skla, povrch ošetřený hydrofobní impregnací Repesil BKH

Po aplikaci hydrofobního impregnačního prostředku Repesil BKH došlo k nárůstu velikosti smáčecího úhlu o 107 %. Jeho průměrná velikost byla 104,01°. Jelikož se jedná o úhel větší než 90°, je možné povrch ošetřený tímto přípravkem považovat za hydrofobní.

U vzorku ošetřeného impregnačním prostředkem z lithného vodního skla nebyla změna velikosti smáčecího úhlu předpokládána. Po aplikaci tohoto prostředku došlo oproti předpokladům ke snížení velikosti smáčecího úhlu o 40 %. Jeho průměrná velikost byla 29,95°. Takový povrch lze považovat za hydrofilní.

Rozdíl ve velikostech smáčecího úhlu povrchu jednotlivých vzorků lze pozorovat lidským okem. Kapky na povrchu vzorků jsou zobrazeny na Obr. 35. Zatímco kapka na povrchu ošetřeném přípravkem Repesil BKH je viditelně zakulacená a je povrchem odpuzována, na povrchu ošetřeném impregnací z lithného vodního skla je kapka rozteklá do stran a je do struktury betonu vsakována.



### 3.3.2 Hloubka penetrace

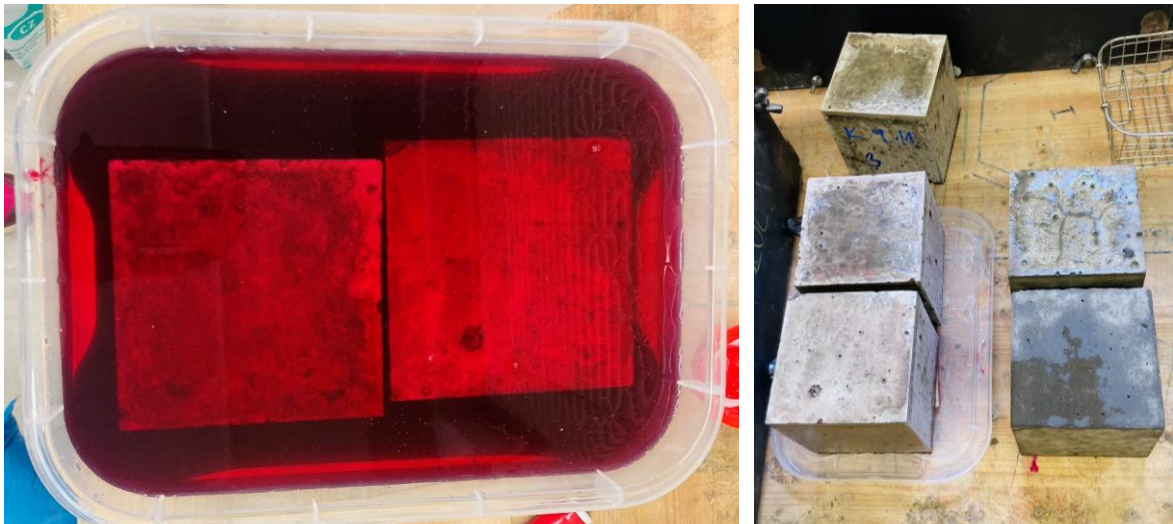
Hloubka, do které impregnační prostředek pronikne, je úzce spojená s mírou odolnosti betonu proti vlivu degradačních procesů. Čím hlouběji prostředek povrchové ochrany penetruje, tím déle a účinněji dokáže odolávat vlivům okolního prostředí. Nejefektivnější jsou v tomto ohledu prostředky nanášené ve formě krému a gelu, jelikož jejich pomalé vypařování zajišťuje delší reakční dobu se ztvrdlou cementovou pastou a prostředek tak může pronikat hlouběji do betonové struktury. [2]

V ČSN EN 1504-2 je popsán postup stanovení hloubky penetrace prostředků povrchové ochrany. Zkušební vzorky ošetřené hydrofobním impregnačním prostředkem jsou rozříznuty na dvě poloviny. Pro měření hloubky penetrace je využita obdoba fenolftaleinové metody. Jelikož se účinek hydrofobního impregnačního prostředku projevuje odpuzováním vody z povrchu, vrstva, do které prostředek penetroval, by po namočení rozříznutého povrchu měla zůstat suchá. Rozříznutý povrch zkušebních vzorků byl tady namočen vodou a byla změřena vrstva, která zůstala po namočení suchá. [12, 34]

V případě lithného vodního skla není možné po rozlomení změřit suchou vrstvu, jelikož prostředek nevede k hydrofobnímu chování betonového povrchu. To bylo ověřeno i při měření změny velikosti smáčecího úhlu. Pro stanovení hloubky penetrace je třeba do impregnačního prostředku přidat barvivo, *Obr. 37*. Po rozlomení zkušebního vzorku na poloviny lze za hloubku penetrace považovat tloušťku probarvené vrstvy. [32]

Pro účely měření byl použit odlišný typ betonu, než který je popsán v postupu stanoveném ČSN EN 1504-2. Norma předpokládá použití betonu s vodním součinitelem 0,7. Beton s tímto vodním součinitelem se však pro nosné konstrukce, ani pro pohledově uplatněné konstrukce nepoužívá z důvodu vysoké poréznosti a nízké pevnosti. V běžně používaných betonových recepturách se vodní součinitel pohybuje v rozmezí 0,3 – 0,5. [42] Aby výsledky měření odpovídaly reálným konstrukcím, byl pro výrobu vzorků zvolen beton s vodním součinitelem 0,41. Dle ČSN EN 1504-2 se přípravky dělí do dvou skupin podle hloubky průniku na  $\leq 10$  mm a  $> 10$  mm.

Vzhledem k povaze zkoušky nebylo třeba využití referenčních vzorků. Celkem byly pro tuto zkoušku vyrobeny 4 krychle o hraně 100 mm. Z toho dvě byly ošetřeny impregnačním prostředkem z lithného vodního skla a dvě byly ošetřeny hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH. Po výrobě zkušebních vzorků a ošetření jejich povrchu postupem popsaným v kapitole 3.2 *Prostředky povrchové ochrany*, byly zkušební vzorky rozlomeny na dvě poloviny.



Obr. 37 - Ošetření zkušebních vzorků impregnací z lithného vodního skla s přidáním barviva

Aby nedošlo při řezání vzorků k vymytí použitého barviva ze struktury betonu, byly vzorky impregnované lithným vodním sklem rozlomeny na poloviny příčným tahem za pomoci hydraulického lisu. Probarvená vrstva po rozlomení nebyla viditelná. To lze vysvětlit dvěma způsoby. Buď zabarvení impregnačního roztoku potravinářským barvivem nefungovalo dle předpokladu a proniknutá vrstva nebyla probarvena viditelně, nebo impregnační roztok reagoval pouze s betonem na povrchu a do pórové struktury betonu skutečně neproniknul.



Obr. 36 - Hloubka penetrace přípravků. Zleva roztok lithného vodního skla, přípravek Repesil BKH.

U zkušebních vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH byla po namočení rozříznutého povrchu na okraji pozorovatelná tenká hydrofobní vrstva, Obr. 36. Její tloušťka byla změřena na několika místech s přesností 0,5 mm. Průměrná hloubka penetrace byla 1,2 mm. Dle informací dostupných na obalu se tento přípravek řadí do kategorie hydrofobních impregnačních prostředků s hloubkou průniku  $\leq 10$  mm. Tomu odpovídá i výsledek měření.

### 3.3.3 Nasákavost

Účinnost prostředku povrchové ochrany na snížení nasákavosti je možné posoudit dle několika norem za využití různých postupů. Mezinárodně uznávaný požadavek, který vydala The German Committee for Reinforced Concrete, říká, že prostředek je považován za účinný, pokud dojde ke snížení nasákavosti alespoň o 50 % v porovnání s referenčními vzorky. [3]

V České republice je platná norma ČSN EN 1504-2, ve které jsou uvedeny normy stanovující postupy zkoušení nasákavosti a vyhodnocení odlišně pro hydrofobní impregnační prostředky a pro impregnační prostředky. [34]

V případě hydrofobních impregnačních prostředků má zkouška probíhat dle postupu popsaného v ČSN EN 13580 – Absorpce vody a odolnost proti alkáliím. Alespoň tři impregnované a tři neimpregnované vysušené krychle jsou po zvážení jejich počáteční hmotnosti umístěny do nádob s vodou na vhodné podložky tak, aby je voda obklopovala ze všech stran a bylo umožněno její vsakování. Neimpregnované krychle jsou vyjmuty po  $1 \pm 0,02$  h, impregnované po  $24 \pm 0,1$  h. Po vyjmutí je jejich povrch osušen savou utěrkou a je zvážena jejich hmotnost. Následně je vypočtena rychlost přírůstku hmotnosti pro impregnované (7) a neimpregnované (8) krychle a jejich absorpční poměr (9).

Rychlost přírůstku hmotnosti impregnovaných krychlí [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]:

$$I_t = \frac{i_2 - i_1}{\sqrt{24} \times 0,06} \quad (7)$$

Rychlost přírůstku hmotnosti neimpregnovaných krychlí [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]:

$$I_u = \frac{i_2 - i_1}{\sqrt{1} \times 0,06} \quad (8)$$

Absorpční poměr AR [%]:

$$AR = \frac{I_{tm}}{I_{um}} \cdot 100 \quad (9)$$

Kde  $i_1$  je hmotnost vzorků před ponořením do vody,  $i_2$  je hmotnost vzorků po vytažení z vody,  $I_{tm}$  je střední hodnota rychlosti přírůstku hmotnosti impregnovaných zkušebních vzorků a  $I_{um}$  je střední hodnota rychlosti přírůstku hmotnosti neimpregnovaných zkušebních vzorků. Aby byl hydrofobní prostředek dle ČSN EN 1504-2 účinný, musí být absorpční poměr  $AR < 7,5$  %. [34, 43]

Pro zkoušení nasákavosti betonových vzorků ošetřených impregnačním prostředkem je určená norma ČSN EN 1062-3 – Stanovení permeability vody v kapalně fázi. Postup je obdobný, jako v předchozím případě. Je třeba vyrobit alespoň tři vzorky s plochou minimálně  $200 \text{ cm}^2$ . Zkouší se pouze impregnované vzorky. Po naimpregnování a vysušení

je zvážena jejich počáteční hmotnost a ošetřené zkušební vzorky jsou umístěny do nádob s vodou na vhodné podložky tak, aby mohla voda vsakovat ze všech stran vzorků. Po 24 h jsou vzorky vyjmuty, jejich povrch je osušen savou utěrkou a je zvážena jejich hmotnost. Rychlost pronikání vody  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ] je vypočtena jako podíl přírůstku hmotnosti  $\Delta i$ , plochy vzorku  $A$  a odmocniny doby ponoření vzorků (10).

$$w = \frac{\Delta i}{A \cdot \sqrt{24}} \quad (10)$$

Pro získání podrobnějších informací o chování použité impregnace je doporučeno provést měření přírůstku hmotnosti v časech 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h a 24 h od okamžiku ponoření. Dle normy ČSN EN 1504-2 je impregnace považována za účinnou, pokud je po její aplikaci rychlost pronikání vody  $w < 0,1 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ . [34, 44]

### 3.3.3.1 Postup

Z důvodu potřeby relevantního porovnání výsledků, byl zvolen u vzorků impregnovaných oběma použitými prostředky povrchové ochrany stejný postup zkoušení míry nasákavosti. Bylo vyrobeno 12 trámků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, z nichž polovina byla použita jako referenční vzorky a polovina byla ošetřena impregnačním roztokem z lithného vodního skla. Dále bylo vyrobeno 8 krychlí o hraně 100 mm, z nichž opět polovina byla použita jako referenční a polovina byla ošetřena hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH od společnosti Stachema. Všechny k tomu určené zkušební vzorky byly ošetřeny dle postupu popsaného v kapitole 3.2 *Prostředky povrchové ochrany*.

Po vysušení impregnovaných vzorků byla u všech vzorků zvážena počáteční hmotnost. Následně byly vzorky umístěny do nádob naplněných vodou na vhodné podložky tak, aby je voda obklopovala ze všech stran, *Obr. 38*. V čase 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 5 h a 24 h od okamžiku ponoření byly zkušební vzorky z vody vždy vyjmuty, jejich povrch byl osušen savou utěrkou, byla zvážena jejich aktuální hmotnost a vzorky byly umístěny zpět do nádoby s vodou. Vždy byly zkoušeny současně referenční a ošetřené zkušební vzorky každé série. Pro obě série zkušebních vzorků byla provedena dvě měření, mezi kterými byly vzorky vysušeny v laboratorním prostředí na původní počáteční hmotnost.

V každém čase, kdy proběhlo měření, byl vypočten absorpční poměr  $AR$  hmotnostních přírůstků impregnovaných vzorků  $\Delta m_i$  a referenčních vzorků  $\Delta m_r$  za použití vzorce (11).

$$AR = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_r} \cdot 100 \quad (11)$$



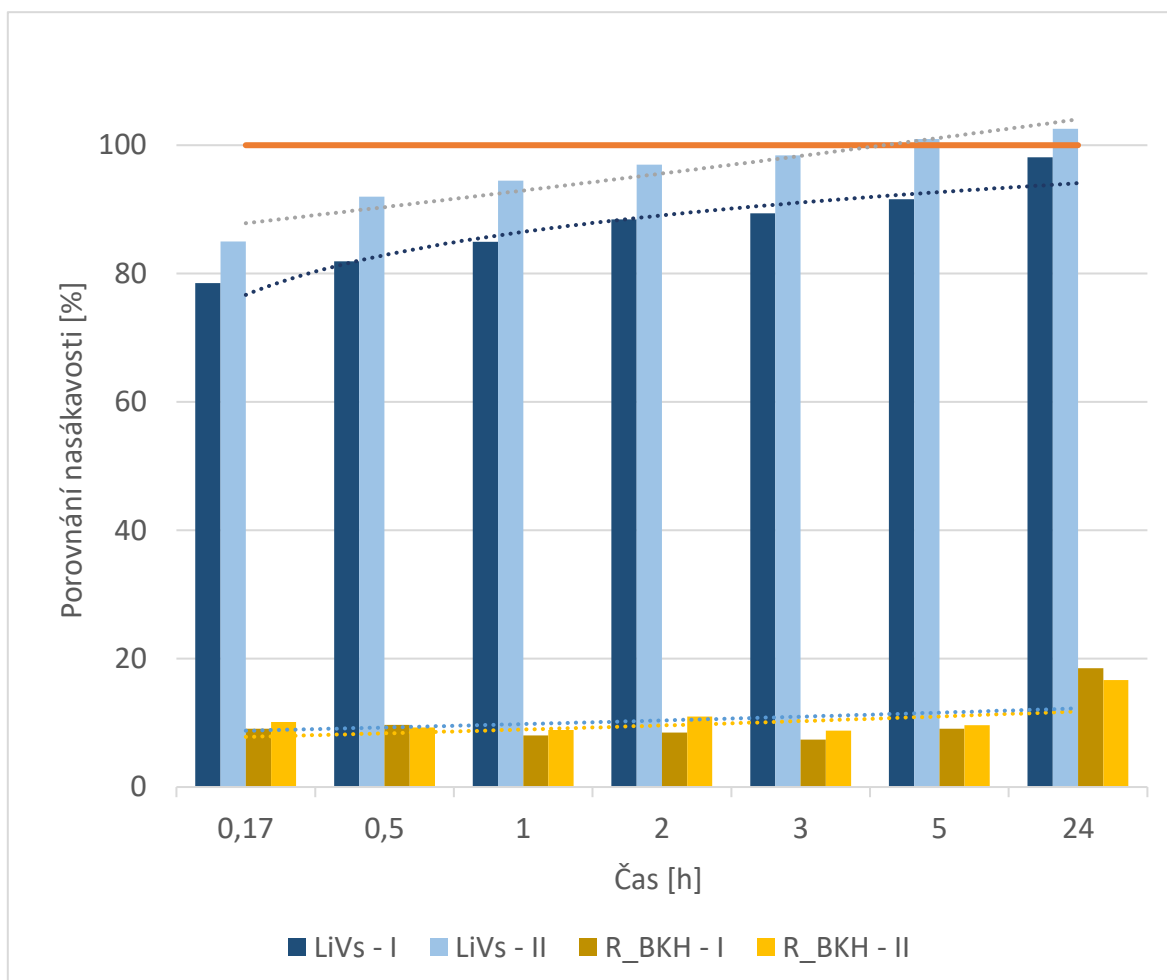
Obr. 38 - Měření nasákavosti ošetřených a referenčních zkušebních vzorků

Hydrofobní impregnační prostředky vodu z betonového povrchu odpuzují, ale nezpůsobují zaplnění betonových pórů, které by vedlo k omezení množství nasáknuté vody. Dle výsledků několika studií [1, 9] mohou být účinné ve snížení nasákavosti vody především během prvních 24 h. Dle technického listu je přípravek Repesil BKH určen pro svislé betonové plochy, u kterých se předpokládá, že voda z jejich povrchu steče. Přípravek není určen pro konstrukce trvale namáhané vodou. Předpokládá se tedy jeho účinnost především v počáteční fázi zkoušky. Při dlouhodobém ponoření do vody je pravděpodobné, že účinnost bude v čase klesat.

Při ošetření betonových zkušebních vzorků impregnačním roztokem z lithného vodního skla se předpokládá částečné zaplnění betonových pórů vzniklým C-S-H gelem. To vede ke snížení nasákavosti. Vzhledem k omezení průniku vody vlivem částečného zaplnění pórů se předpokládá vysoká účinnost, která se nebude v průběhu trvání zkoušky příliš lišit.

### 3.3.3.2 Vyhodnocení

Porovnání výsledků obou měření po aplikaci impregnačního prostředku z lithného vodního skla a hydrofobního impregnačního prostředku Repesil BKH od firmy Stachema s referenčními vzorky je znázorněno v *Graf 1* a v *Tab. 5*.



*Graf 1 - Poměr množství vody nasáknuté ošetřenými a referenčními zkušebními vzorky v měřených časech*

*Tab. 5 - Výsledky měření nasákavosti – poměr množství vody nasáknuté ošetřenými a referenčními zkušebními vzorky*

čas [h]		0,17	0,5	1	2	3	5	24
LiVs	I	78,52 %	81,90 %	84,96 %	88,46 %	89,40 %	91,57 %	98,13 %
	II	85,02 %	91,96 %	94,47 %	96,96 %	98,40 %	100,94 %	102,53 %
R_BKH	I	9,11 %	9,69 %	8,03 %	8,48 %	7,41 %	9,07 %	18,51 %
	II	10,12 %	9,29 %	8,89 %	10,96 %	8,77 %	9,64 %	16,67 %

Z výsledků obou měření vyplývá, že prostředek Repesil BKH je velmi účinný ve snížení nasákavosti betonu. Zkušební vzorky ošetřené tímto přípravkem během prvního měření nasáklý po 24 h pouze 18,5 % vody, během druhého měření 16,7 % vody v porovnání s referenčními vzorky. Tento přípravek tedy splňuje požadavek vydaný The German

Committee for Reinforced Concrete i při opakovaném vysušení a ponoření do vody. Rozdíl v účinnosti mezi prvním a druhým měřením je v průměru 0,6 %.

Naopak u vzorků impregnovaných lithným vodním sklem byl pozorován vliv na snížení nasákavosti pouze v prvních minutách zkoušky. Během prvního měření impregnované vzorky nasákly po pěti hodinách více než 90 % hmotnosti vody ve srovnání s referenčními vzorky. Při druhém měření byla hranice 90 % překročena již po 30 minutách a po pěti hodinách bylo dokonce množství vody nasáknuté impregnovanými vzorky vyšší než v případě referenčních vzorků. Tento přípravek tedy nelze považovat za účinný ve snižování nasákavosti. Při vysušení a opětovnému namáhání vodou dochází ke zhoršení účinnosti v průměru o 8 %.

Přestože jsou v normě ČSN EN 1504-2 uvedeny odlišné požadavky pro zkoušení nasákavosti hydrofobních impregnačních prostředků a impregnačních prostředků, za účelem relevantního porovnání byla provedená zkouška vyhodnocena oběma uvedenými způsoby pro oba použité prostředky povrchové ochrany.

#### Vyhodnocení dle ČSN EN 13580 – Absorpce vody a odolnost proti alkáliím

Postup popsany v ČSN EN 13580 je určen pro zkoušení vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním prostředkem.

Pro zkoušení impregnace z lithného vodního skla byly použity trámky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Při výpočtu je tedy potřeba hodnotu 0,06 ve jmenovateli rychlosti přírůstku hmotnosti, odpovídající ploše povrchu krychle o hraně 100 mm, upravit podle reálné plochy vzorků na hodnotu 0,0272 m<sup>2</sup>. Průměrná rychlost přírůstku hmotnosti impregnovaných vzorků je pro první měření 201,2 g/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup> a pro druhé měření 208,9 g/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>. Absorpční poměry AR jsou 26,8 % pro první a 29,5 % pro druhé měření. Ani v jednom případě tak tento přípravek nesplňuje požadavek normy ČSN EN 1504-2 na velikost absorpčního poměru <7,5 %.

U vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH nebylo potřeba upravovat hodnotu plochy vzorku, jelikož byly použity krychle o straně 100 mm, jejichž plocha odpovídá hodnotě 0,06 m<sup>2</sup>. Po provedení zkoušky nasákavosti byla vypočtena rychlost přírůstku hmotnosti impregnovaných vzorků 19,9 g/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup> pro první měření a 18,9 g/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup> pro druhé měření. Absorpční poměr AR je v prvním případě 5,4 % a v druhém 5,6 %. Obě hodnoty splňují požadavek ČSN EN 1504-2 na velikost absorpčního poměru <7,5 %.

### Vyhodnocení dle ČSN EN 1062-3 – Stanovení permeability vody v kapalně fázi

Tento postup je určen pro zkoušení vzorků ošetřených impregnačními prostředky.

Výpočet rychlosti pronikání vody je totožný s výpočtem rychlosti přírůstku hmotnosti dle předchozí normy. Liší se pouze v jednotkách dosazených hodnot hmotnosti. V předchozím případě byl přírůstek hmotnosti dosazován v gramech. Při tomto výpočtu je třeba tuto hodnotu dosazovat v kilogramech. Výsledná rychlost pronikání vody prvního a druhého měření je v případě vzorků impregnovaných lithným vodním sklem  $0,20 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$  a  $0,21 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ . U prvního a druhého měření nasákavosti vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH je rychlost pronikání vody v obou případech  $0,02 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ .

Požadavek normy ČSN EN 1504-2 na rychlost pronikání vody  $w < 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$  splňuje pouze hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH. U vzorků ošetřených impregnačním prostředkem z lithného vodního skla byl tento požadavek překročen dvojnásobně.

Impregnační prostředek z roztoku lithného vodního skla nesplnil ani jeden ze tří posuzovaných požadavků. Nelze jej považovat za účinný ve snížení nasákavosti.

Hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od společnosti Stachema splnil všechny tři posuzované požadavky. Lze jej považovat za velmi účinný ve snížení nasákavosti vody po dobu 24 h.



### 3.3.4 Paropropustnost

Při zkoušce míry paropropustnosti je v první fázi stanoven měrný elektrický odpor zkušebních vzorků pomocí Wennerovy metody. Následně je měřen pokles tlaku ve vnitřní komoře zkušební buňky pomocí přístroje Torrent. Na základě těchto údajů je stanovena hloubka průniku vakua do pórové struktury zkušebních těles  $L$  a koeficient kvality krycí vrstvy zkoušeného betonu  $k_T$ . Jedná se o jednu z nedestruktivních zkušebních metod, kterou lze měřit míru paropropustnosti. [47]

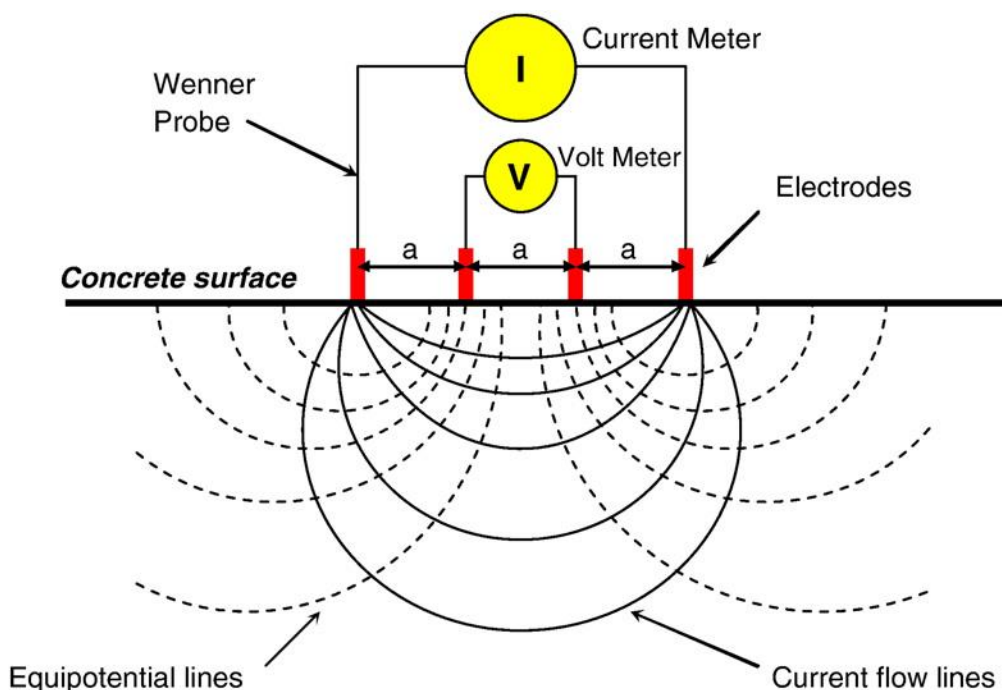
#### 3.3.4.1 Zkušební přístroje

##### Resipod - přístroj na měření elektrického odporu

Přístroj pracuje na principu Wennerovy metody. Jedná se o zařízení se čtyřmi elektrodami, které mají mezi sebou stejnou vzdálenost  $a$ . Do vnějších elektrod je pouštěn elektrický proud  $I$  a poté je měřen elektrický potenciál mezi vnitřními elektrodami, Obr. 39. Odpor je vypočten ze vztahu (12),

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (12)$$

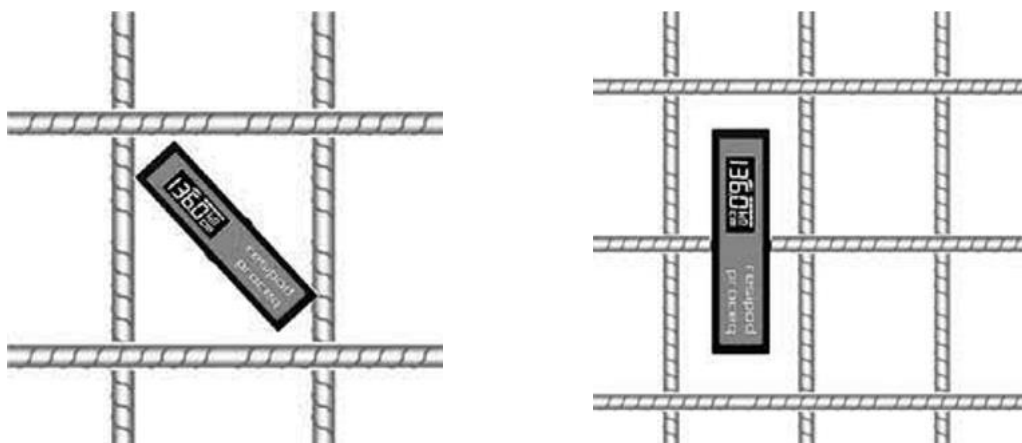
kde  $\rho$  je odpor v  $\text{k}\Omega\text{m}$ ,  $a$  je vzdálenost mezi elektrodami,  $V$  je velikost napětí, a  $I$  je velikost proudu. [46]



Obr. 39 - Funkční schéma přístroje na měření měrného elektrického odporu [49]

Vzdálenost elektrod  $a$  použitého přístroje je 38 mm. Přístroj automaticky přepíná mezi rozpětím proudu 200  $\mu$ A a 50  $\mu$ A. Výsledky měření jsou ovlivněny řadou faktorů. Mezi nejdůležitější se řadí míra vlhkosti, velikost kameniva, vliv teploty, vliv karbonatace a v případě vyztuženého betonu i poloha výztuže. Přičemž platí následující:

- maximální velikost zrn kameniva musí být menší než vzdálenost mezi elektrodami  $a$  z důvodu nevodivosti kameniva.
- Se zvyšující se teplotou dochází ke snížení měrného elektrického odporu. Referenční hodnoty jsou udávány pro teplotu 20 °C.
- V počátečních fázích karbonatace betonu dochází k vyplnění pórů, což může způsobit nárůst měrného elektrického odporu. Pokud je hloubka zkarbonatované vrstvy výrazně menší než odstup mezi sondami, její vliv je zanedbatelný.
- Výztuž z důvodu její vysoké vodivosti může zásadně ovlivnit výsledky měření. Je tedy důležité umístit přístroj tak, aby se prutům výztuže vyhnul. Pokud to není možné, je třeba umístit přístroj tak, aby se prut výztuže nacházel mezi středními elektrodami. Viz *Obr. 40*.



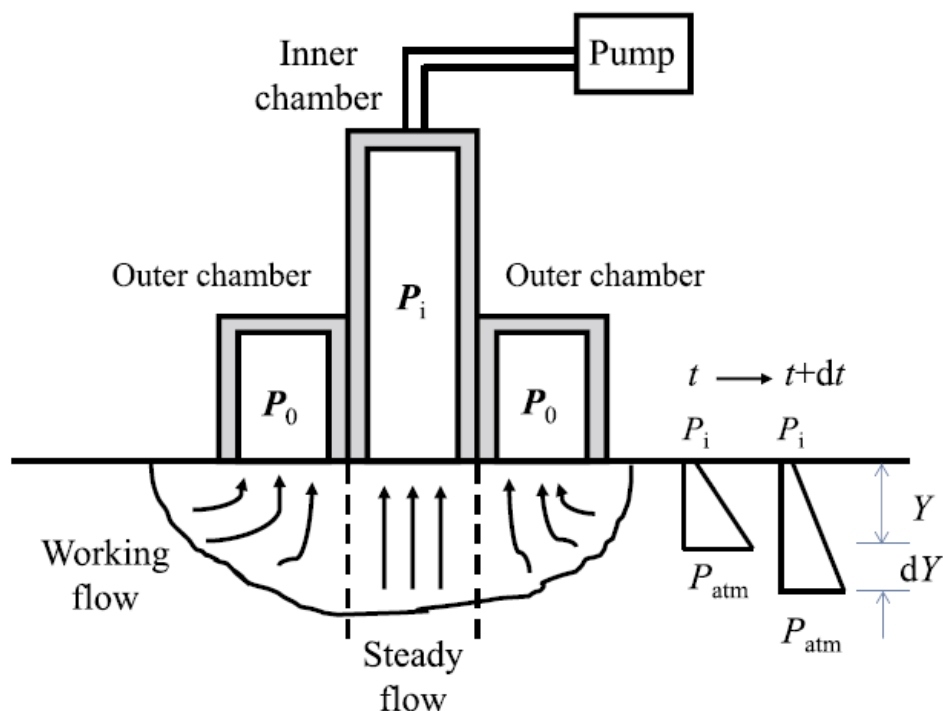
*Obr. 40 - Schéma umístění přístroje Resipod ve vztahu k poloze betonové výztuže [50]*

- Voda nacházející se v betonových pórech je velmi dobrým vodičem. Se snižující se mírou vlhkosti hodnota měrného elektrického odporu stoupá. Při nízkých hodnotách saturace betonu vodou je hodnota měrného elektrického odporu neměřitelná. Je tedy vhodné, aby saturace betonu vodou byla alespoň 40 %. Při poklesu saturace pod 60 % začne velikost odporu strmě stoupat. [46, 50]

Díky vodivosti vody obsažené v betonových pórech je možné pomocí přístroje Resipod stanovit relativní vlhkost různých oblastí konstrukce. Výrazně odlišné hodnoty měrného elektrického odporu ve stejném místě mohou značit lokální kolísání poměru vody a cementu. [50]

## Torrent – přístroj na měření míry paropropustnosti

Přístroj Torrent se skládá z několika částí. Na povrch betonu se přikládá buňka s dvěma komorami, které jsou napojeny na vakuovou pumpu a na regulátor vyvažující tlak ve vnitřní komoře, *Obr. 41*. [48] K regulační jednotce a k indikačnímu přístroji je připojen snímač tlaku. [51] Princip měření hloubky paropropustnosti přístrojem Torrent spočívá ve vytvoření vakua uvnitř vnitřní komory buňky za pomoci vakuové pumpy a následné měření přírůstku tlaku po jejím odpojení. [46]



*Obr. 41 - Funkční schéma přístroje Torrent [47]*

Na počátku zkoušky během prvních 60 s je za pomoci vakuové pumpy vytvořeno ve vnitřní komoře buňky vakuum. Díky vytvořenému vakuu dochází v betonu pod vnitřní komorou buňky ke stálému toku vzduchu. Po odpojení vakuové pumpy je měřen rozdíl tlaku ve vnitřní komoře buňky. Zkouška je ukončena buď po uplynutí 660 s od doby zahájení měření, nebo po dosažení rozdílu tlaku 20 mbar. Celková doba zkoušky je tedy maximálně 720 s. [45, 47] Následně je stanovena kvalita krycí vrstvy  $k_T$  [m<sup>2</sup>] (13) a hloubka stálého toku vzduchu  $L$  (14) odpovídající tloušťce betonové vrstvy vyplněné vakuem, na *Obr. 41* označené  $Y$ . Hodnoty jsou vypočteny podle následujících rovnic: [45, 47]

$$k_T = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2\varepsilon P_{atm}} \left[ \frac{\ln\left(\frac{P_{atm} + \Delta P_i}{P_{atm} - \Delta P_i}\right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (13)$$

$$L = \left[ 2k_T \cdot P_{atm} \left(\frac{t}{\mu\varepsilon}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

kde  $\mu$  je dynamická viskozita vzduchu při 20 °C,  $V_c$  je objem vnitřní komory a připojovací trubice, kterou proudí vzduch v první fázi,  $\varepsilon$  je porozita betonu,  $A$  je plocha povrchu betonu pod měřícím zvonem,  $\Delta P_i$  je rozdíl tlaku ve vnitřní komoře,  $P_{atm}$  je atmosferický tlak,  $t_0$  čas zahájení zkoušky (60 s) a  $t$  čas ukončení zkoušky ( $\leq 720$  s). [46]

Tyto dvě hodnoty reflektují míru porozity zkoušeného betonu. Čím větší je hloubka stálého toku vzduchu  $L$  a čím vyšších hodnot dosahuje koeficient kvality krycí vrstvy  $k_T$ , tím je porozita zkoušeného betonu vyšší.

Před zahájením měření je třeba do indikačního přístroje zadat hodnotu měrného elektrického odporu zkoušeného vzorku. Indikační přístroj po ukončení zkoušky podle rovnic (13) a (14) vypočte požadované hodnoty. Těsnění dvoukomorové buňky musí být přiloženo do místa, kde se nenachází kaverny, trhliny, ani jiné větší povrchové nerovnosti. Vzdálenost buňky od vnější hrany měřeného povrchu musí být minimálně 20 mm. [45, 51]

Stejně jako v případě hodnot měrného elektrického odporu míru paropropustnosti ovlivňuje množství vody obsažené v betonových pórech. Se zvětšujícím se množstvím vody v betonových pórech hloubka paropropustnosti klesá. Jak již bylo zmíněno, odpor nelze měřit při příliš nízké saturaci betonu vodou. Zároveň však hloubku paropropustnosti nelze měřit, pokud je saturace betonu vodou příliš vysoká. Množství vody v betonových pórech tedy musí být mezi 40–83 %, aby bylo možné obě měření provést. [46]

#### 3.3.4.2 Postup

Za účelem provedení zkoušky paropropustnosti byly vytvořeny čtyři sady krychlí o hraně 150 mm, které obsahovaly vždy alespoň čtyři zkušební vzorky. Dvě sady byly vytvořeny z betonu třídy C 30/37 a dvě sady z betonu třídy C 45/55.

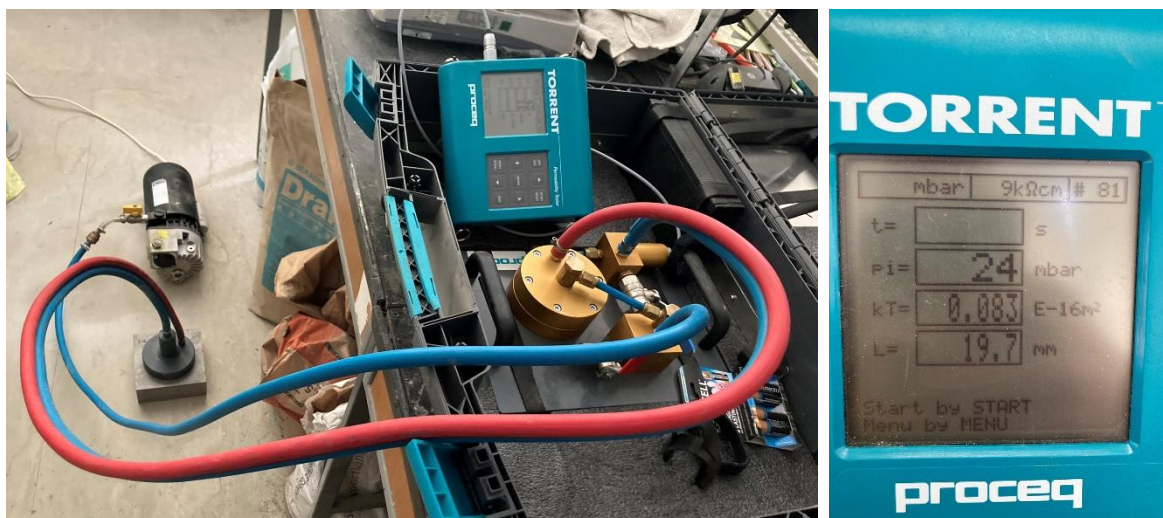
Měření probíhalo u všech čtyř zkušebních sad stejně. Nejprve byl stanoven měrný elektrický odpor jednotlivých zkušebních těles. Před zahájením měření bylo třeba přiložit elektrody přístroje Resipod do nádoby s vodou na jejím dně a opakovaným stlačením elektrody naplnit vodou. Tento krok je nezbytný pro zajištění vodivosti v elektrodách. Poté byla ověřena funkčnost přístroje Resipod pomocí zkušební destičky. S takto připraveným přístrojem je možné provést samotné měření. Po přiložení elektrod na betonový povrch a jejich přitlačení až na úroveň pryžových víček krajních elektrod přístroj na jeho displeji zobrazí naměřenou hodnotu, *Obr. 42*. Je třeba vyčkat do jejího ustálení. Po každém provedeném měření je třeba opět naplnit elektrody vodou jejich položením a přitlačení na dno nádoby s vodou. Takto byly na povrchu každého zkušebního vzorku změřeny tři hodnoty měrného elektrického odporu. Jejich aritmetický průměr byl zadán do indikačního zařízení přístroje Torrent. [50]



Obr. 42 - Měření pomocí přístroje Resipod

Následovalo měření paropropustnosti betonových vzorků přístrojem Torrent. Před zahájením měření musí být spuštěna a správně připojena vakuová pumpa a otevřeny oba regulační kohouty přístroje. Na měřený betonový povrch byla položena vakuová buňka do místa bez větších povrchových nerovností tak, aby byla alespoň 20 mm od okraje zkoušeného vzorku. Stisknutím tlačítka start na indikačním zařízení a následnému uzavření červeného kohoutu je zahájeno měření. V průběhu měření jsou na displeji indikačního zařízení v daných časech zobrazeny pokyny pro správné provedení zkoušky.

Po zahájení měření dochází ke snižování tlaku  $P_i$  uvnitř střední komory vakuové buňky. Po 30 s vyzve přístroj k uzavření modrého kohoutu a po dalších 5 s k jeho opětovnému otevření. Provedením tohoto kroku je aktivován regulátor tlaku. V čase 60 s od začátku měření je třeba opět uzavřít modrý kohout. Tímto okamžikem je započato měření nárůstu tlaku  $P_i$  ve vnitřní komoře vakuové buňky. Při překročení celkového času 720 s nebo při nárůstu tlaku 20 mbar přístroj měření ukončí a na základě výše zmíněných vzorců vypočte a zobrazí na displeji indikačního zařízení koeficient kvality krycí vrstvy  $k_T$  a hloubku průniku vakua do betonové vrstvy  $L$ , Obr. 43. [51]



Obr. 43 - Měření paropropustnosti pomocí přístroje Torrent

Polovina zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 a C 45/55, u nichž bylo měření dokončeno, byla ošetřena impregnačním prostředkem z lithného vodního skla. Druhá polovina zkušebních vzorků byla ošetřena hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH podle postupu popsáno v kapitole 3.2 *Prostředky povrchové ochrany*. Po vyschnutí přípravků bylo měření měrného elektrického odporu a paropropustnosti na ošetřených vzorcích zopakováno za dodržení výše popsáno postupu.

Přípravek Repesil BKH od firmy Stachema se řadí mezi hydrofobní impregnační prostředky. Dle ČSN EN 1504-2 aplikace hydrofobního impregnačního prostředku způsobuje zvýšení odporu. [34] Naopak na snížení porozity a s tím související snížení paropropustnosti mají hydrofobní impregnační prostředky zanedbatelný vliv. U vzorků ošetřených přípravkem Repesil BKH se tedy předpokládá, že dojde ke zvýšení měrného elektrického odporu. Hloubka průniku vakua do betonové vrstvy  $L$  závisí na vlastnostech použitého přípravku. Byly provedeny výzkumy, při kterých byl vliv hydrofobních impregnací na snížení paropropustnosti potvrzen [5]. Naopak v případě jiných výzkumů se tento efekt neprojevil [2, 9].

Impregnační prostředek z lithného vodního skla částečně zaplňuje betonové póry. Tím snižuje nasákavost betonu a jeho paropropustnost. [1] Nepředpokládá se, že by po aplikaci tohoto přípravku na betonový povrch došlo ke změně velikosti měrného elektrického odporu. Díky částečnému zaplnění pórů by však mělo dojít ke zmenšení hloubky průniku vakua  $L$ .

### 3.3.4.3 Vyhodnocení

Výsledky měření všech skupin zkušebních vzorků před a po ošetření jejich povrchu jsou zobrazeny v *Tab. 6* a *Tab. 7*.

*Tab. 6 - Výsledky měření paropropustnosti, beton pevnostní třídy C 30/37*

<b>C 30/37</b>	<b>LiVs</b>		<b>R_BKH</b>	
	odpor [kΩcm]	L [mm]	odpor [kΩcm]	L [mm]
Referenční	33,189	48,100	32,750	35,450
Ošetřené	45,144	51,117	999,000	20,850
Rozdíl		<b>6 %</b>		<b>-41 %</b>

*Tab. 7 - Výsledky měření paropropustnosti, beton pevnostní třídy C 45/55*

<b>C 45/55</b>	<b>LiVs</b>		<b>R_BKH</b>	
	odpor [kΩcm]	L [mm]	odpor [kΩcm]	L [mm]
Referenční	40,500	49,567	61,800	10,675
Ošetřené	56,789	53,450	999,000	2,725
Rozdíl		<b>8 %</b>		<b>-74 %</b>

U betonových vzorků ošetřených impregnačním prostředkem z lithného vodního skla došlo k mírnému nárůstu měrného elektrického odporu. U vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 byl odpor po ošetření povrchu vyšší o 12 kΩcm a v případě vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 došlo k nárůstu odporu o 16,3 kΩcm. To může být způsobeno buď mírným snížením obsahu vlhkosti v betonových vzorcích, nebo působením impregnačního prostředku na betonovém povrchu. Jelikož ošetření povrchu a měření probíhalo v nejkratším možném časovém sledu, kdy během ošetřování povrchu jsou vzorky ponořeny po dobu 24 h do impregnačního prostředku a následně 24 h vysoušeny, je nepravděpodobné, že by došlo k takovému snížení obsahu vlhkosti, které by způsobilo zvýšení odporu. Zvýšení měrného elektrického odporu tedy lze přisuzovat vlivu impregnačního prostředku.

U zkušebních vzorků ošetřených impregnačním prostředkem z lithného vodního skla došlo u obou pevnostních tříd betonu ke zvýšení hloubky průniku vakua. U vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 hloubka průniku vakua vzrostla o 6 % a v případě betonu pevnostní třídy C 45/55 došlo k nárůstu o 8 %. Dle předpokladu by měla impregnace lithným vodním sklem vést k částečnému zaplnění betonových pórů. Tento předpoklad se neprokázal. Naopak ošetření impregnačním prostředkem z lithného vodního skla vede k mírnému zvýšení paropropustnosti.

Hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od firmy Stachema po jeho aplikaci na betonový povrch vedl k takovému nárůstu odporu, který nebylo možné přístrojem Resipod změřit, *Obr. 44*. Je to způsobeno hydrofobním chováním betonového povrchu, kdy voda v elektrodách přístroje po jejich přitisknutí k povrchu nepronikne do betonové struktury. Povrchová vrstva svým hydrofobním chováním zabraňuje vedení elektrického proudu a tím dochází ke zvýšení měrného elektrického odporu. Do přístroje Torrent byla zadána nejvyšší možná hodnota odporu 999 k $\Omega$ cm.



*Obr. 44 - Měření elektrického odporu u zkušebních vzorků ošetřených přípravkem Repesil BKH*

Podle výsledků měření přístroje Torrent u vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 došlo k redukci hloubky průniku vakua o 41 % a v případě vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl pokles hloubky průniku vakua 74 %. Hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH má značný vliv na redukci pórovitosti a paropropustnosti betonu. Redukce je pouze částečná, takže beton může v případě potřeby vysychat.



### 3.3.5 CH.R.L.

Zkouška obvykle probíhá podle postupu popsaného v ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek a ve změně Z1 této normy. Odolnost betonového povrchu se zkouší střídavým působením teplot pod bodem mrazu a nad bodem mrazu po určitý čas za přítomnosti vody a chemických rozmrazovacích látek. Chemická rozmrazovací látka je taková látka, jejíž vodný roztok snižuje bod tuhnutí vody. Tyto látky jsou používány jako posyp vozovek za účelem odstranění nebo zamezení vzniku náledí.

V normě jsou definovány tři zkušební metody, podle kterých lze zkoušku provádět a vyhodnocovat, z nichž nejpoužívanější je metoda A. Pro provedení zkoušky je zapotřebí vyrobit alespoň tři zkušební vzorky tvaru krychle o hraně 150 mm nebo válce o průměru 150 mm. V případě jemnozrnných betonů je možné použít vzorek tvaru hranolu o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Zkušební vzorky po vyjmutí z formy zrají ve vodě po dobu 28 dní. Následně je možné zahájit zkoušku. [52, 53]

#### A – Metoda automatického cyklování I

Vzorky jsou umístěny do misek z korozivzdorného materiálu s výstupky na jejich dně umožňujícími kontakt spodního betonového povrchu s roztokem. Do misek se zkušebními vzorky je nalit 3 % roztok chloridu sodného (NaCl) do výšky  $5 \pm 1$  mm od spodní hrany vzorku. Takto připravené vzorky jsou spolu s miskami rozloženy rovnoměrně na dno mrazicího boxu a do misek s roztokem jsou umístěny teplotní sondy. Na dně mrazicího boxu je za účelem lepšího vedení tepla nalita voda sahající do úrovně hladiny roztoku v miskách. Ta je měněna vždy po 25 cyklech.

Po uzavření mrazicího boxu a zahájení zkoušky dochází k cyklickým změnám teploty vnitřního prostředí boxu. Prvním krokem jednotlivých cyklů je ochlazení vnitřního prostředí mrazicího boxu tak, aby teplota vody na dně zkušebního prostoru dosáhla  $-15$  °C. Tato teplota je udržována po dobu 15 minut. Následuje ohřev na teplotu  $20$  °C a opět udržování této teploty po dobu 15 minut. Takto proběhne 25 cyklů.

Po ukončení 25 cyklu jsou misky se zkušebními vzorky z mrazicího boxu vyjmuty. Vzorky se opatrně vytáhnou z misky a za pomoci stříčky jsou splaveny uvolněné částice z betonového povrchu do misky. Přebytečná kapalina v miskách se sleje a opět za pomoci stříčky s vodou se všechny odpadlé částice přemístí do vysoušecí misky. V peci při konstantní teplotě  $105$  °C je obsah misek vysušen, *Obr. 47*, a hmotnost odpadu je zvážena s přesností na  $0,1$  g. Zkušební vzorky jsou opět umístěny do korozivzdorných misek a jsou opět zality 3 % roztokem chloridu sodného do výšky  $5 \pm 1$  mm od spodní hrany vzorku a následuje dalších 25 cyklů dle stejného postupu. Zkouška je ukončena buď dosažením požadovaného počtu cyklů nebo dosažením maximálního možného stupně porušení.

Odolnost betonového povrchu je dána množstvím odpadu na jednotku plochy  $\rho_A$  a vypočte se dosazením do vzorce (15),

$$\rho_A = \frac{\sum m}{A} \quad (15)$$

kde  $\sum m$  je součet hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu v gramech a  $A$  je velikost zkušební plochy v  $m^2$ . V případě krychle o hraně 150 mm je velikost zkušební plochy  $0,0255 m^2$ . Jako výsledek se bere aritmetický průměr odpadů na jednotku plochy všech zkoušených vzorků. Pokud se jeden výsledek liší o více jak 50 % od průměru, tato hodnota se vyloučí. V případě, že se od aritmetického průměru liší dva a více vzorků o více než 50 %, je třeba zkoušku opakovat.

Stupeň porušení je stanoven na základě průměrné hmotnosti odpadu na jednotku plochy podle *Tab. 8*.

*Tab. 8 - Stupeň porušení*

<b>Stupeň porušení</b>	<b><math>\rho_A</math> [g.m<sup>-2</sup>]</b>	<b>Charakter odpadu</b>
1 – nenarušený	do 50	Velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 – slabě narušený	do 500	Jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50 % hmotnosti odpadu
3 – narušený	do 1 000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g.m <sup>-2</sup>
4 – silně narušený	do 3 000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g.m <sup>-2</sup>
5 – rozpadlý	přes 3 000	Jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

[52]

#### B – Metoda ruční manipulace se vzorky

Zkušební vzorky jsou opatřeny objímkou, která je v místě spojení se vzorkem vodotěsná a je umístěná tak, aby nad zkušební plochou vznikl prostor vysoký alespoň 5 mm. Zkušební vzorky v objímce se umístí do mrazicího prostoru a na povrch se zvýšeným okrajem objímky se nalije voda do výšky 2 mm. Postup pro zkoušení odolnosti proti působení vody se odlišuje od zkoušení odolnosti proti působení chemických rozmrazovacích látek. Při prvním cyklu se v obou případech tělesa zmrazují po dobu 16 h při teplotě  $-8 \pm 1$  °C. Odlišný je způsob rozmrazování. V případě zkoušení odolnosti proti působení vody se vytvořený led rozmrazuje po dobu 1,5 h pod tekoucí vodou o teplotě  $20 \pm 2$  °C. Následují další cykly, během kterých je doba zmrazování alespoň 5 h a doba rozmrazování stále 1,5 h.

Rozmrazování při zkoušce odolnosti proti působení chemických rozmrazovacích látek spočívá v nasypání  $270 \text{ g.m}^{-2}$  chloridu sodného na vytvořený led. Sůl se nechá působit po dobu jedné hodiny. Poté jsou vzorky vyjmuty z mrazicího prostoru a zkoušený povrch je omýván vodou o teplotě  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 0,5 h. Během následujících cyklů je doba zmrazování minimálně 5 h. Rozmrazování probíhá beze změny.

Povrch zkušebních těles je v průběhu zkoušky sledován. Míra jeho poškození je rozdělena na čtyři kategorie:

- nenarušený,
- malé povrchové odlupování,
- vylupování zrn drobného kameniva
- poškozený povrch.

Zkouška je ukončena buď zařazením poškození povrchu do kategorie poškozený povrch nebo po dosažení požadovaného počtu cyklů. [52]

#### C – Metoda automatického cyklování II

Zkušebními vzorky jsou 50 mm tlusté ořezy horního povrchu válce o průměru 150 mm, nebo vývrtu o průměru 150 mm odebraného z konstrukce. Ty jsou opatřeny gumovou objímkou. Na jejich bok se nanese alespoň dva nátěry kaučukového lepidla a na vnitřní povrch gumové objímky se nanese jeden nátěr. Následně je gumová objímka nasazena na zkušební vzorek tak, aby převyšovala jeho horní povrch alespoň o 10 mm a je z boku co nejbližší hornímu povrchu přitažena montážní páskou. Do vzniklého prostoru nad zkoušenou plochou se nalije voda a minimálně dva dny se na jeho povrchu ponechá, aby byla ověřena vodotěsnost provedeného spoje objímky a zkušební vzorku.

Po slití vody a odstranění jejích zbytků z betonového povrchu pomocí stlačeného vzduchu jsou vzorky umístěny do klimatizační komory a na jejich povrch je nalit 3 % roztok chloridu sodného do výšky přibližně 5 mm. Následují cykly, při kterých je vždy 3 hodiny udržována teplota  $-18 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  a 3 hodiny teplota  $+5 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Změna teploty prostředí na požadovanou hodnotu může trvat maximálně 0,5 h.

Po zjištění hmatem, že dochází k porušování povrchu zkušební vzorku, nejdéle však po 28 cyklech jsou tělesa z klimatizační komory vyjmuta. Uvolněné částice jsou pomocí stříčky s vodou a kartáče z povrchu očištěny a přelity do odpařovací misky. Po slití přebytečné vody je miska vložena do pece s teplotou vzduchu  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  a po vysušení je hmotnost vzniklého odpadu zvážena. Zkušební vzorky jsou umístěny po dobu 24 h do laboratorního prostředí a na jejich povrch je nalita voda až po okraj objímky. Poté je možné celý popsany postup opakovat.

Hmotnost vzniklého odpadu a je přepočtena na plochu povrchu 1 m<sup>2</sup> pomocí vzorce popsaného v metodě A. Změřené hodnoty jsou zaznamenány do grafu závislosti množství odpadu přepočteného na jednotku plochy na počtu cyklů. Výsledná odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek se hodnotí pomocí součinitelů odolnosti D1 – D5, kdy

- D1 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1 000 g/m<sup>2</sup>,
- D2 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu 2 000 g/m<sup>2</sup>,
- D3 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu 3 000 g/m<sup>2</sup>,
- D4 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu 4 000 g/m<sup>2</sup>,
- D5 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu 5 000 g/m<sup>2</sup>.

Hodnoty součinitelů jsou odečteny z vytvořeného grafu jako průsečík čáry odpadů betonu s příslušným množstvím odpadu. [53]

Dle požadavku ČSN EN 1504-2 lze prostředek povrchové ochrany považovat za účinný, pokud ke ztrátě hmotnosti impregnovaného tělesa dojde alespoň o 20 cyklů později v porovnání s referenčním zkušebním tělesem. [34]

### 3.3.5.1 Postup

Zkouška byla provedena podle metody A – metody automatického cyklování I. Za účelem provedení zkoušky odolnosti betonového povrchu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám bylo vyrobeno celkem 24 zkušebních vzorků ve tvaru krychle o hraně 150 mm rozdělených na 3 série po 8 vzorcích. V každé sérii byly 4 vzorky z betonu pevnostní třídy C 30/37 a 4 vzorky z betonu pevnostní třídy C 45/55, *Obr. 45*. Jedna série sloužila jako referenční. Zkušební vzorky zbývajících dvou sérií byly ošetřeny zkoušenými prostředky povrchové ochrany – impregnačním prostředkem z lithného vodního skla a hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH od společnosti Stachema.



*Obr. 45 - Výroba zkušebních vzorků a impregnace roztokem lithného vodního skla*

Všechny vzorky zrály 28 dní pod vodou. Série určené k aplikaci prostředků povrchové ochrany byly po 28 dnech z vodní lázně vyjmuty a po dobu 7 dní jim bylo umožněno vysoušení v laboratorním prostředí. Povrch suchých zkušebních vzorků byl ošetřen podle postupu dodavatele přípravků popsaného v kapitole 3.2 *Prostředky povrchové ochrany*. S ohledem na kapacitu mrazicího boxu byly zkoušky jednotlivých sérií provedeny zvlášť.



Obr. 46 - Zkušební vzorky umístěné v mrazicím boxu

Zkušební vzorky byly zkoušenou stranou umístěny do korozivzdorné misky s výstupky na dně, aby byl umožněn kontakt spodního povrchu s roztokem soli, *Obr. 46*. Následoval postup popsáný v ČSN 73 1326 – metoda A. Odpad byl vážen po ukončení každého 25. cyklu. Celkem proběhlo 100 cyklů střídavého působení mrazu a rozmrazování pro každou sérii zkušebních vzorků, během kterých bylo do misek s 3 % roztokem chloridu sodného umístěno 5 teplotních čidel sloužících ke sledování a zaznamenávání teploty v průběhu zkoušky. Jednotlivé cykly se skládaly ze čtyř fází. Po dobu 45 minut probíhalo ochlazování na teplotu  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Následně byla tato teplota po dobu 15 min udržována. Poté bylo zahájeno oteplování na teplotu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , které trvalo opět 45 minut. V poslední fázi byla tato teplota po dobu 15 minut udržována.



Obr. 47 - Nerezové misky s odpadem umístěné ve vysoušecí peci

Množství odpadu na jednotku plochy bylo stanoveno po každém 25. cyklu podle vzorce (15), kde plocha  $A$  je v případě krychlí o hraně 150 mm je  $0,0255 \text{ m}^2$ . Na základě množství vzniklého odpadu byl stanoven stupeň porušení povrchu betonových vzorků.

### 3.3.5.2 Vyhodnocení

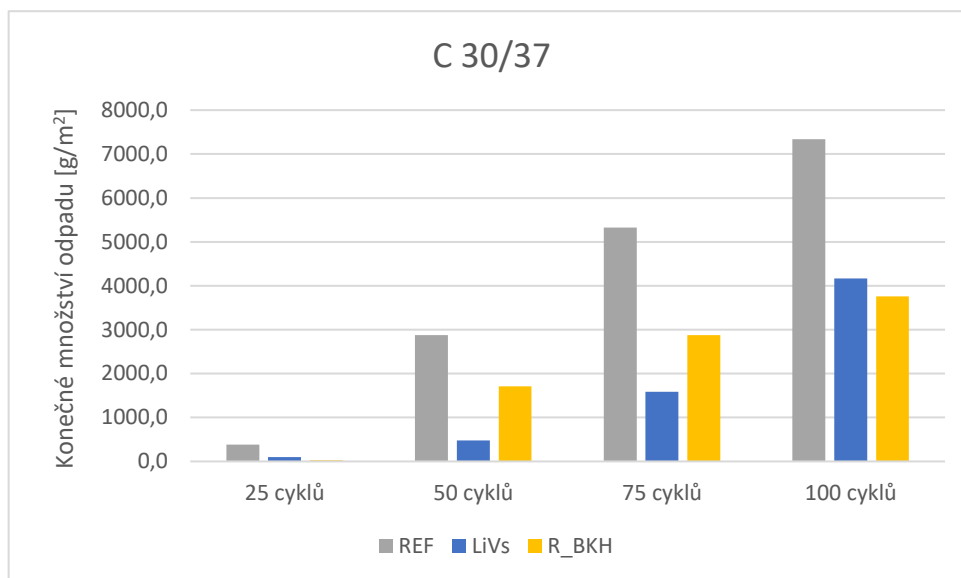
V Tab. 9, Graf 2 a Graf 3 jsou zobrazeny konečné hodnoty hmotností odpadu přepočteného na jednotku plochy a příslušné stupně porušení.

Tab. 9 - Výsledné množství vzniklého odpadu

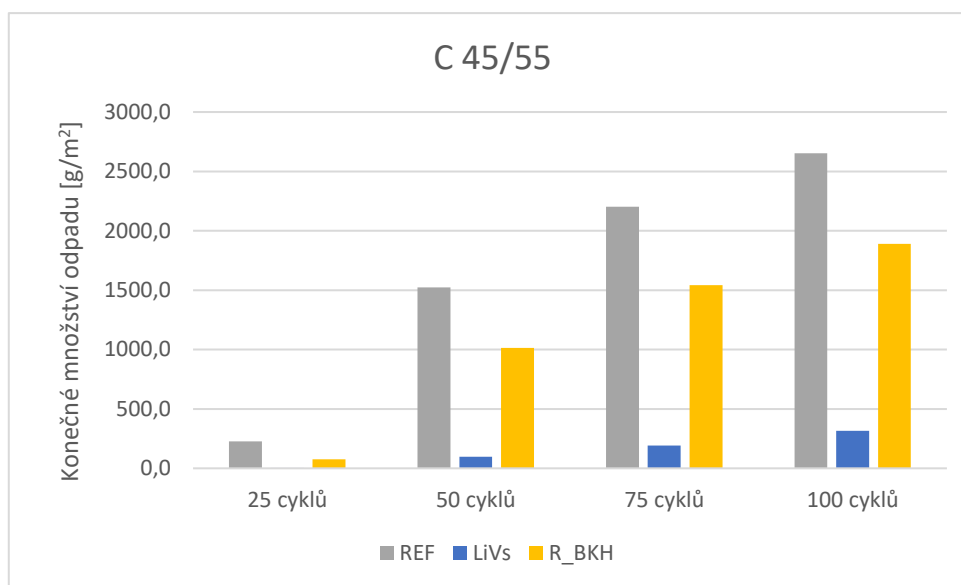
		Konečné odpady po cyklickém zatížení, průměr [g/m <sup>2</sup> ]							
Počet cyklů		25 cyklů		50 cyklů		75 cyklů		100 cyklů	
C 30/37	REF	383,5	slabě narušený	2878,3	silně narušený	5328,3	rozpadlý	7339,6	rozpadlý
	LiVs	95,5	slabě narušený	481,5	slabě narušený	1589,4	silně narušený	4166,1	rozpadlý
	R_BKH	26,5	nenarušený	1707,2	silně narušený	2874,2	silně narušený	3760,8	rozpadlý
C 45/55	REF	225,6	slabě narušený	1523,4	silně narušený	2201,9	silně narušený	2652,8	silně narušený
	LiVs	4,2	nenarušený	96,6	slabě narušený	191,7	slabě narušený	315,1	slabě narušený
	R_BKH	75,3	slabě narušený	1012,8	silně narušený	1543,1	silně narušený	1891,2	silně narušený

U vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 byl účinek obou prostředků povrchové ochrany na zvýšení odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek podobný. V počáteční fázi zkoušky po prvních 25 cyklech byla hmotnost odpadu série vzorků ošetřených impregnačním prostředkem z lithného vodního skla o 75 % menší než hmotnost odpadu referenčních vzorků a u série vzorků ošetřené hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH byl pokles hmotnosti odpadu po 25 cyklech 93 %

ve srovnání s referenčními vzorky. Oba prostředky povrchové ochrany tedy prokazatelně oddalují počátek ztráty hmotnosti.



Graf 2 - Konečné množství odpadu, beton pevnostní třídy C 30/37



Graf 3 - Konečné množství odpadu, beton pevnostní třídy C 45/55

U série referenčních vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 byla po 75 cyklech překročena kritická hodnota hmotnosti odpadu  $3\,000\text{ g/m}^2$ , po jejímž přesažení lze vzorky považovat za rozpadlé. Série vzorků ošetřené oběma prostředky povrchové ochrany tuto kritickou hodnotu překročily shodně po 100 cyklech. U série vzorků ošetřených impregnačním prostředkem z lithného vodního skla byla po 100 cyklech hmotnost odpadu ve srovnání s referenčními vzorky nižší o 43 %. U série vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH byl pokles hmotnosti odpadu po 100 cyklech ve srovnání s referenčními vzorky 49 %.

Všechny série zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 dosahovaly nižších hmotností odpadu než zkušební vzorky z betonu pevnostní třídy C 30/37. Samotné zlepšení kvality betonu vedlo u série referenčních vzorků ke snížení hmotnosti odpadu po 25 cyklech o 41 % a po 100 cyklech o 64 % v porovnání se sérií referenčních vzorků z betonu třídy C 30/37. Kritické hodnoty hmotnosti odpadu 3 000 g/m<sup>2</sup>, po jejímž přesažení lze vzorky považovat za rozpadlé, nedosáhly ani referenční, ani ošetřené zkušební vzorky.

Ošetření betonového povrchu impregnačním prostředkem z lithného vodního skla vedlo ke snížení hmotnosti odpadu po 25 cyklech o 98 % ve srovnání s referenčními vzorky a po 100 cyklech byla hmotnost odpadu nižší o 88 %. Aplikace hydrofobního impregnačního prostředku Repesil BKH vedla ke snížení hmotnosti odpadu ve srovnání se sérií referenčních vzorků po 25 cyklech o 67 % a po 100 cyklech o 29 %. V obou případech tedy došlo k prokazatelnému oddálení počátku ztráty hmotnosti vlivem prostředku povrchové ochrany.

Rozdíl v účinnosti lithného vodního skla a přípravku Repesil BKH při zkoušení vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 může být způsoben mnoha faktory. S ohledem na výsledky zkoušky nasákavosti, kdy impregnační prostředek z lithného vodního skla neprokázal po 24 h ponoření ve vodě žádnou účinnost, měření hloubky penetrace prostředku, kdy impregnační prostředek z lithného vodního skla zůstal pouze na povrchu a nevsákl se do betonové struktury a především na výsledky této zkoušky u série vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37, kdy byl vliv obou prostředků povrchové ochrany podobný, se lze domnívat, že rozdíl v účinnosti prostředků povrchové ochrany u vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl způsoben drobnými odlišnostmi při provádění zkoušky. Jak ve své studii popsali Kocáb a spol. [40] i samotná normou povolená odchylka ve výšce hladiny roztoku soli v misce  $5 \pm 1$  mm může způsobit rozptyl výsledků hmotnosti odpadu přepočítané na plochu 1 m<sup>2</sup> až 40 g/m<sup>2</sup>.

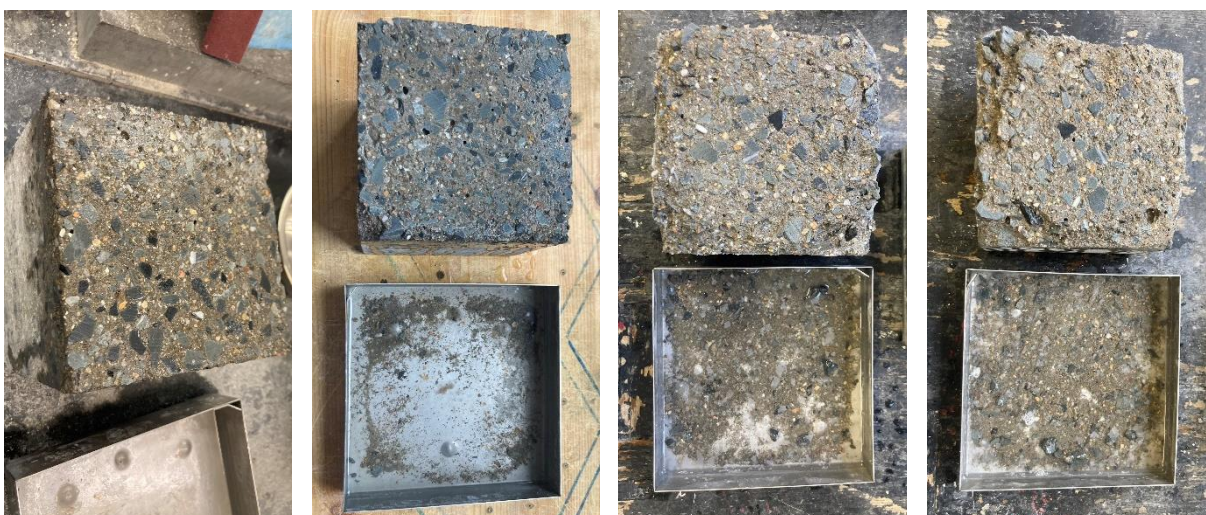
Oba zkoušené prostředky povrchové ochrany lze dle požadavku stanoveného ČSN EN 1504-2 na základě výsledků provedené zkoušky považovat za účinné ve zvýšení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, jelikož oba oddalují počátek úbytku hmotnosti zkoušených vzorků. Po narušení ochranné vrstvy na povrchu betonu degradace probíhá podobnou rychlostí jako v případě referenčních vzorků. Zvýšení účinnosti prostředků povrchové ochrany by bylo možné dosažením větší hloubky penetrace, která v případě přípravku Repesil BKH dosáhla 1,2 mm a po aplikaci impregnačního prostředku z lithného vodního skla nebyla měřitelná.

Na *Obr. 48 - Obr. 53* je zobrazena degradace povrchu a množství odpadu v misce po 25, 50, 75 a 100 cyklech.

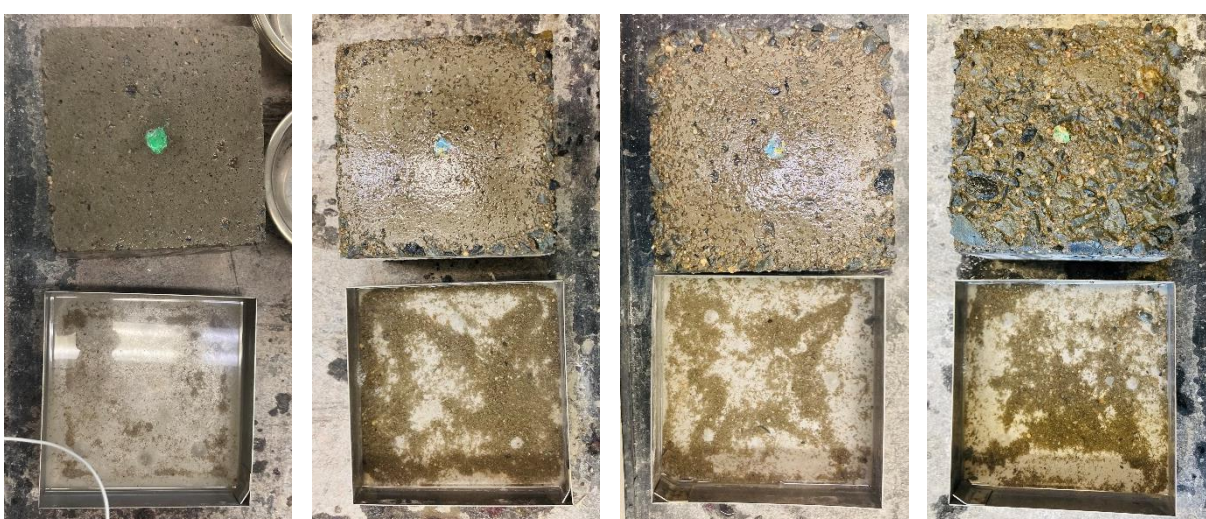




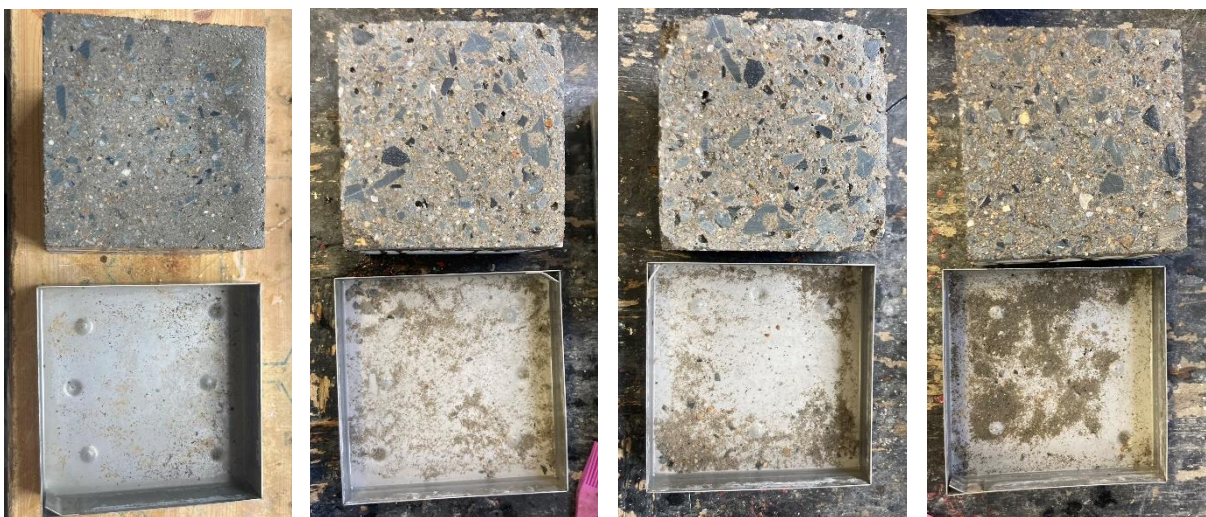
Obr. 50 - Beton pevnostní třídy C 30/37, referenční zkušební vzorky



Obr. 48 - Beton pevnostní třídy C 30/37, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla



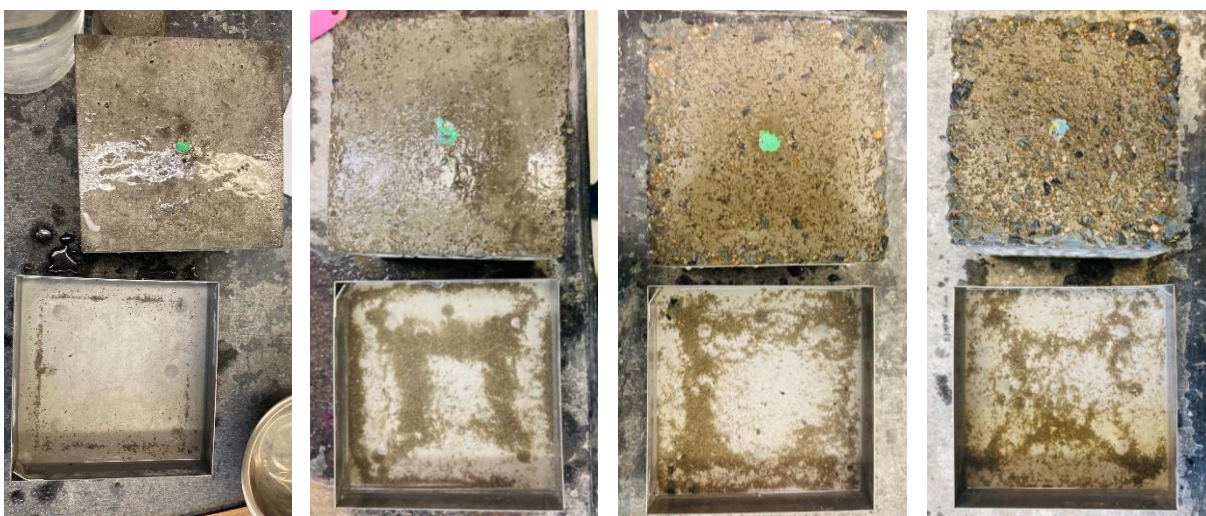
Obr. 49 - Beton pevnostní třídy C 30/37, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repasil BKH



Obr. 53 - Beton pevnostní třídy C 45/55, referenční vzorky



Obr. 51 - Beton pevnostní třídy C 45/55, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla



Obr. 52 - Beton pevnostní třídy C 45/55, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repesil BKH

### 3.3.6 Karbonatace

Existuje několik postupů, jak stanovit odolnost betonu proti karbonataci. Čtyři postupy jsou popsány v normách. Hloubka zkarbonatované vrstvy je měřena vždy pomocí fenolftaleinové metody. Zkušební vzorky jsou rozlomeny na dvě poloviny a na rozlomený povrch je nanesen roztok fenolftaleinu. Ten se v prostředí s  $\text{pH} > 8,4$  zbarví do fialova. Při karbonataci dochází ke snižování  $\text{pH}$ . Za zkarbonatovaný je považovaný takový beton, jehož  $\text{pH}$  je menší než 8,4. Po nanesení roztoku fenolftaleinu díky rozdílnému  $\text{pH}$  se beton nezasažený karbonatací zbarví do fialova a zkarbonatovaná vrstva zůstane nezabarvená, takže je možné ji změřit. [28, 30]

Důležitou normou je ČSN EN 14630 Stanovení hloubky zasažení karbonatací v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody. Popisuje minimální rozměry zkušebního vývrtu na existující konstrukci, a především postup stanovení výsledné hloubky karbonatace s ohledem na nepravidelnost čela zkarbonatované vrstvy, výskyt ojedinělých kapes a vliv kameniva. [55] Popsaný postup využívají všechny následující normy, které stanovují různé zkušební metody lišící se koncentrací oxidu uhličitého v klimatické komoře a době, po kterou jsou zkušební vzorky vlivu karbonatace vystaveny.

ČSN EN 12390-10 Stanovení odolnosti betonu proti karbonataci při atmosferické koncentraci oxidu uhličitého popisuje zkoušku, při které jsou zkušební vzorky umístěny do klimatické komory s koncentrací oxidu uhličitého 0,04 % objemu komory, což odpovídá běžné koncentraci oxidu uhličitého v atmosféře, nebo do přirozeného prostředí. Hloubka zkarbonatované vrstvy je měřena po 3 měsících, 6 měsících a po 1 roce. [54] Jedná se o zkoušku, jejíž výsledky odpovídají chování betonu v reálném prostředí. Nevýhodou je délka jejího trvání.

ČSN EN 13295 Stanovení odolnosti proti karbonataci stanovuje postup, při kterém jsou vyrobeny dva referenční a dva zkušební vzorky. Hloubka zkarbonatované vrstvy je měřena na začátku zkoušky a po 56 dnech umístění v klimatické komoře s 1 % oxidu uhličitého. Je porovnávána hloubka karbonatace referenčních zkušebních vzorků a vzorků umístěných v klimatické komoře. Měření probíhá odlomením plátku z povrchu o minimální tloušťce 15 mm a nanesením roztoku fenolftaleinu na povrch tohoto úlomku. [56] Co se týče doby trvání této zkoušky, je nejkratší ze všech uvedených. Měření hloubky zkarbonatované vrstvy však probíhá pouze na začátku a na konci zkoušky. Chybí data z průběhu zkoušky.

ČSN EN 12390-12 Metoda zrychlené karbonatace trvá minimálně 112 dní. Během této doby vzorky zrají 28 dní pod vodou, následně jsou alespoň 14 dní vysoušeny, a poté jsou po dobu 70 dní umístěny do klimatické komory s koncentrací oxidu uhličitého 3 %. Hloubka zkarbonatované vrstvy je měřena vždy na dvou rozlomených zkušebních vzorcích, a to po 7, 28 a 70 dnech umístění v klimatické komoře. [57] Provedením této zkoušky je možné

získat relevantní informace o odolnosti zkoušeného betonového vzorku proti vlivu procesu karbonatace a délka jejího trvání se od předchozí popsané zkoušky příliš neliší.

Impregnační roztok z lithného vodního skla by měl po jeho aplikaci na betonový povrch vést k částečnému zaplnění betonových pórů. Díky jejich zaplnění dochází ke snížení paropropustnosti a s tím souvisejícímu zvýšení odolnosti proti karbonataci. Je tedy předpokladem, že u vzorků ošetřených lithným vodním sklem dojde ke snížení vlivu karbonatace v porovnání s referenčními vzorky. [10]

Po aplikaci hydrofobního impregnačního prostředku Repesil BKH dochází k hydrofobnímu chování betonového povrchu, díky kterému je voda při kontaktu s betonem odpuzována z jeho povrchu. Jelikož hydrofobní impregnace nezpůsobují částečné ani úplné zaplnění betonových pórů, nepředpokládá se, že by jejich vlivem docházelo k většímu omezení paropropustnosti a k účinné ochraně proti karbonataci. Existují však výzkumy, které účinnost těchto prostředků ve zvýšení odolnosti proti karbonataci prokázaly. Nelze tedy možný účinek s ohledem na výsledky zkoušky paropropustnosti vyloučit. [19]

### 3.3.6.1 Postup



Obr. 54 - Klimatická komora

Zkouška byla provedena podle postupu výše zmíněné normy ČSN EN 12390-12. Bylo zhotoveno celkem 18 zkušebních vzorků tvaru krychle o hraně 100 mm, které byly rozděleny na tři série po šesti vzorcích. Jedna série byla ponechána jako referenční, jedna byla ošetřena impregnačním roztokem z lithného vodního skla a jedna byla ošetřena hydrofobním impregnačním prostředkem Repesil BKH od společnosti Stachema.

Vyrobené zkušební vzorky byly po odbednění umístěny do vodní lázně, kde zrály po dobu 28 dní. Po vytažení z vodní lázně byly vzorky umístěny do laboratorního prostředí na vhodné podložky tak, aby bylo umožněno vysoušení ze všech jejich stran po dobu alespoň 14 dní, jak je popsáno v normě.

Následně byly série určené pro aplikaci zkoumaných prostředků povrchové ochrany ošetřeny dle postupu popsaného v kapitole 3.2 *Prostředky povrchové ochrany*. Poté byly vzorky opět vysušeny v laboratorním prostředí po dobu 7 dní.

Takto připravené vzorky byly umístěny do klimatické komory se stálým prostředím, s koncentrací oxidu uhličitého  $3,0 \pm 0,5$  % z objemu komory, s atmosférickým tlakem, teplotou  $20 \pm 2$  °C a relativní vlhkostí  $57 \pm 3$  % na rošt umožňující proudění vzduchu okolo všech povrchů zkoušených krychlí. Viz *Obr. 54*, na kterém je zdokumentována použitá klimatická komora.

Po 7, 28 a 70 dnech byly vytaženy vždy dvě krychle z každé série. Ty byly rozlomeny na dvě poloviny a na rozlomený povrch byl nanesen roztok fenolftaleinu, který způsobil zbarvení nezasažené části betonu fialovou barvou, *Obr. 55*. Hloubka zkarbonatované vrstvy byla stanovena v souladu s postupem uvedeným v ČSN EN 14630. Na každém povrchu byla hloubka měřena alespoň na 12 místech s přesností 0,5 mm. Z naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr.



*Obr. 55 - Měření hloubky zkarbonatované vrstvy*

Po 7 dnech byly zkušební vzorky rozlomeny pomocí hydraulického lisu a byla u nich stanovena pevnost v příčném tahu. Zkušební vzorky umístěné v klimatické komoře po dobu 28 a 70 dní byly rozříznuty na poloviny pomocí kotoučové pily, aby zůstal povrch hladký a bylo možné hloubku zkarbonatované vrstvy změřit přesněji. Viz *Obr. 56*.



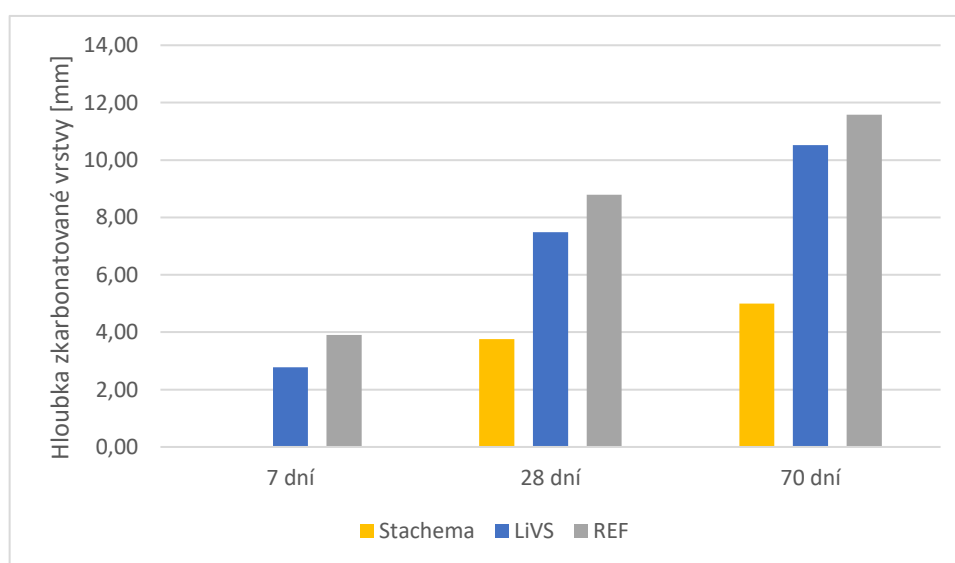
Obr. 56 - Zleva rozlomení vzorku v příčném tahu, rozříznutí vzorku kotoučovou pilou

### 3.3.6.2 Vyhodnocení

Výsledné hodnoty hloubky karbonatce jednotlivých sérií jsou zobrazeny v Tab. 10 a Graf 4.

Tab. 10 - Výsledky měření hloubky zkarbonatované vrstvy

	Hloubka zkarbonatované vrstvy [mm]		
	REF	LiVS	R_BKH
7 dní	3,9	2,8	0,00
28 dní	8,8	7,5	3,8
70 dní	11,6	10,5	5,00



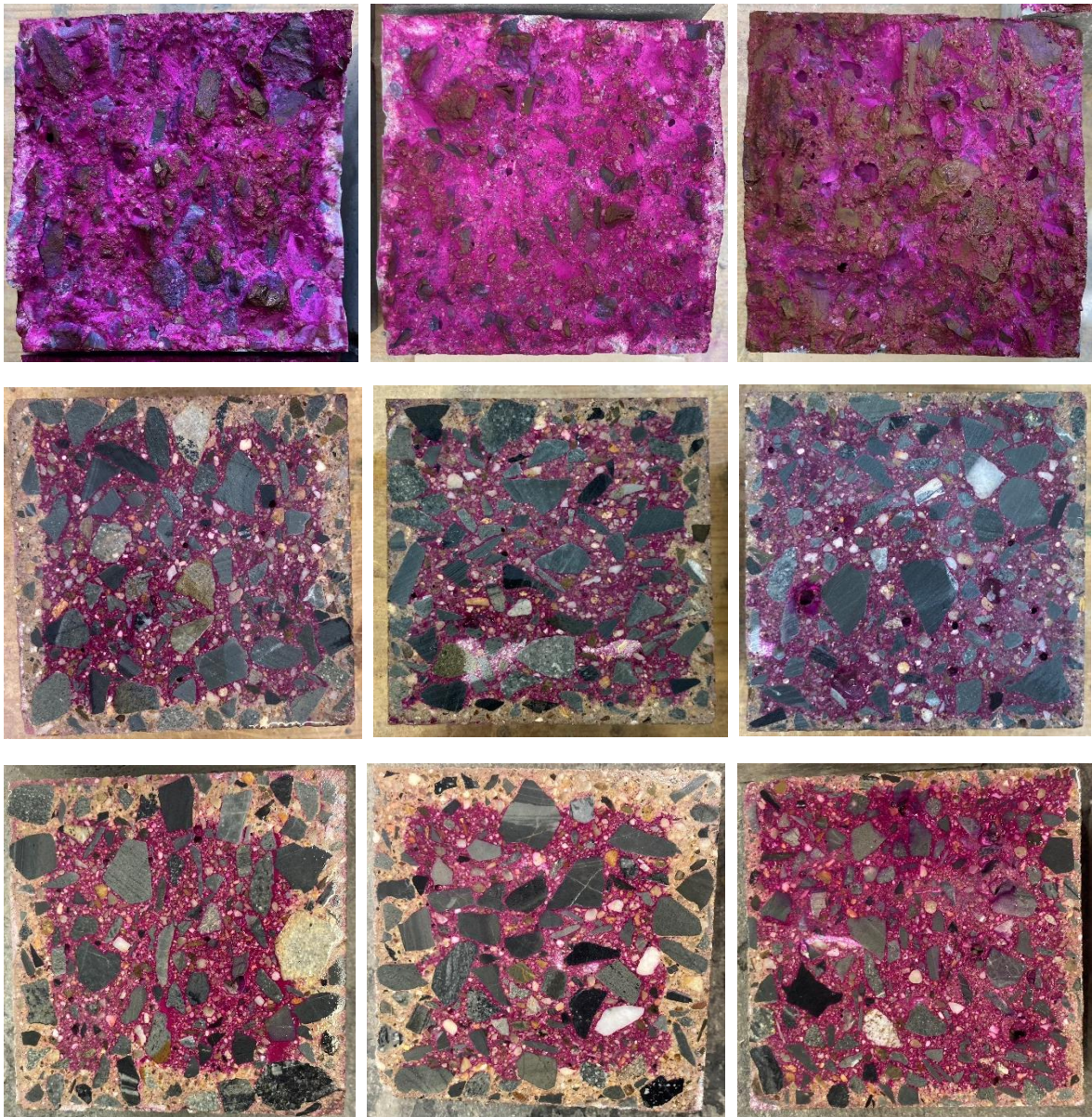
Graf 4 - Výsledky měření hloubky zkarbonatované vrstvy

Jelikož byly vzorky po 7 dnech rozlomeny příčným tahem, není jejich povrch hladký a hloubka zkarbonatované vrstvy je špatně měřitelná. Pro potřeby vyhodnocení zkoušky karbonatace jsou tedy zohledněny především hodnoty naměřené po 28 a po 70 dnech.

Jako účinnější se ukázal hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od společnosti Stachema. Po 7 dnech se vliv karbonatace na vzorcích ošetřených tímto prostředkem neprojevil vůbec. Po 28 i po 70 dnech byla hloubka zkarbonatované vrstvy o 57 % menší ve srovnání s referenčními vzorky. Jako hlavní způsob ochrany proti vlivu karbonatace je považováno omezení paropropustnosti. Při zkoušce paropropustnosti bylo prokázáno, že po aplikaci přípravku Repesil BKH dojde ke snížení paropropustnosti o 41 % v případě betonu pevnostní třídy C 30/37 a o 74 % u vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55. Tento prostředek lze považovat za účinný v ochraně proti vlivu karbonatace.

Vliv impregnačního prostředku z lithného vodního skla byl v porovnání s vlivem přípravku Repesil BKH zanedbatelný. Po 28 dnech došlo k omezení hloubky zkarbonatované vrstvy ve srovnání s referenčními vzorky o 15 % a po 70 dnech byla hloubka zkarbonatované vrstvy menší o 9 %. Takové hodnoty lze předpokládat při zohlednění výsledků provedené zkoušky paropropustnosti, při které vliv tohoto přípravku na omezení paropropustnosti nebyl prokázán. Impregnační prostředek z lithného vodního skla nelze považovat za účinný v ochraně proti karbonataci.

Na *Obr. 57* je zobrazena hloubka zkarbonatované vrstvy zkušebních vzorků zvýrazněná pomocí roztoku fenolftaleinu indikujícího fialovou barvou nezasazenou část konstrukce. Rozdíl v hloubce zkarbonatované vrstvy referenčních vzorků a vzorků ošetřených hydrofobním impregnačním přípravkem Repesil BKH je velmi dobře pozorovatelný již po 28 dnech. Naopak účinnost roztoku lithného vodního skla na zmenšení hloubky zkarbonatované vrstvy je tak nepatrná, že ji nelze bez měření jednoznačně určit.



*Obr. 57 - Měření hloubky karbonatace po 7, 28 a 70 dnech. Zleva vždy referenční vzorky, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repesil BKH*



## 4 Závěr

Cílem práce bylo ověřit vliv dvou různých prostředků povrchové ochrany na trvanlivost betonu. Za tímto účelem byla použita impregnace z roztoku lithného vodního skla a hydrofobní impregnace Repesil BKH. Po jejich aplikaci na betonový povrch byla změřena velikost smáčecího úhlu a hloubka penetrace přípravků do pórové struktury betonu. Následně byla provedena zkouška nasákavosti, měření paropropustnosti, zkouška odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek a zkouška odolnosti proti karbonataci. Na základě výsledků těchto zkoušek byla vyhodnocena účinnost obou přípravků.

Hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od společnosti Stachema prokázal účinnost ve všech provedených zkouškách.

Po jeho aplikaci na betonový povrch došlo ke zvětšení smáčecího úhlu povrchu o 107 % ve srovnání s referenčním vzorkem. Průměrná hloubka penetrace do betonu s vodním součinitelem 0,41 je 1,2 mm.

Při zkoušce nasákavosti zkušební vzorky ošetřené tímto přípravkem nasákly po 24 hodinách 18,51 % vody ve srovnání s referenčními vzorky a po jejich vysušení a zopakování tohoto měření bylo množství nasáknuté vody během 24 hodin ve srovnání s referenčními vzorky pouze 16,67 %.

Ošetření betonového povrchu přípravkem Repesil BKH vede díky hydrofobnímu chování povrchu ke zvýšení měrného elektrického odporu natolik, že jej není možné přístrojem Resipod změřit. Při měření paropropustnosti hloubka průniku vakua do betonové struktury u ošetřených zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 klesla o 41 % a u vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 došlo k poklesu hloubky průniku vakua o 74 %. Pokles paropropustnosti značí možné zvýšení odolnosti proti vlivu karbonatace.

U zkoušky odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek se dle ČSN EN 1504-2 hodnotí počet cyklů, po kterých dojde z počátku úbytku hmotnosti v porovnání s referenčními vzorky. U obou měřených sérií zkušebních vzorků došlo k prokazatelnému oddálení počátku úbytku hmotnosti vlivem přípravku Repesil BKH. V případě série vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 došlo ke snížení hmotnosti vzniklého odpadu po 25 cyklech ve srovnání s referenčními vzorky o 93 %. U série vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl pokles hmotnosti vzniklého odpadu 67 %. Po 100 cyklech byl stupeň porušení ošetřených vzorků z betonu třídy C 30/37 zařazen do kategorie „rozpadlé“. Hmotnost odpadu ošetřených vzorků byla o 49 % nižší ve srovnání s referenčními vzorky. V případě vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl pokles hmotnosti odpadu 29 %.

Přípravek Repesil BKH se ukázal jako velmi účinný ve zvýšení odolnosti proti karbonataci. Po 7 dnech nebyla tloušťka zkarbonatované vrstvy ošetřených vzorků pozorovatelná. Po 28 i po 70 dnech byla tloušťka zkarbonatované vrstvy zkušebních vzorků ošetřených tímto přípravkem v obou případech shodně o 57 % menší ve srovnání s referenčními vzorky.

Impregnační prostředek z roztoku lithného vodního skla je účinný pouze ve zvýšení odolnosti proti působení vody a rozmrazovacích látek při opakovaném namáhání mrazem a rozmrazováním. U ostatních provedených zkoušek byla jeho účinnost velmi nízká nebo žádná.

U vzorků ošetřených tímto přípravkem došlo ke zmenšení velikosti smáčecího úhlu o 40 % ve srovnání s referenčním vzorkem. Povrch se tak po aplikaci tohoto přípravku stává více hydrofilní než před jeho ošetřením. Hloubka penetrace přípravku do struktury betonu nebyla pozorovatelná. Přípravek tedy pravděpodobně zůstal pouze na betonovém povrchu a do jeho struktury se vůbec nevsákl.

U zkoušky nasákavosti byla účinnost impregnačního prostředku z lithného vodního skla po 24 hodinách ponoření vzorků ve vodě zanedbatelná. Při prvním provedeném měření ošetřené vzorky po 24 hodinách nasákly 98,13 % vody ve srovnání s referenčními vzorky. Při opakování tohoto měření bylo množství nasáknuté vody ošetřených vzorků 102,53 % ve srovnání s referenčními vzorky.

Po aplikaci impregnačního roztoku z lithného vodního skla na betonový povrch došlo k nárůstu měrného elektrického odporu. U zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 byl měrný elektrický odpor vyšší o 36 % a v případě zkušebních vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl jeho nárůst 40 %. Impregnační prostředek z lithného vodního skla má tedy vliv na zvýšení elektrického odporu.

Při měření paropropustnosti bylo předpokladem, vzhledem k povaze impregnačních prostředků, které způsobují částečné zaplnění pórů C-S-H gelem, že dojde ke snížení hloubky průniku vakua do pórovité struktury betonu. Oproti předpokladu však došlo k mírnému zvýšení této hodnoty. U vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 došlo po aplikaci impregnačního prostředku z lithného vodního skla ke zvýšení hloubky průniku vakua o 6 % a v případě série vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 byl naměřen nárůst 8 %.

Z výsledků série vzorků z betonu pevnostní třídy C 30/37 u zkoušky odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek vyplývá, že účinnost impregnačního prostředku z lithného vodního skla ve zvýšení odolnosti je srovnatelná s účinností hydrofobního impregnačního prostředku Repesil BKH. Po 25 cyklech došlo u ošetřených vzorků ke snížení hmotnosti vzniklého odpadu o 75 % ve srovnání s referenčními vzorky a po 100 cyklech byl naměřen pokles hmotnosti vzniklého odpadu o 43 %. Po dokončení 100 cyklů byly ošetřené vzorky zařazeny do stupně porušení „rozpadlé“.

Hmotnost vzniklého odpadu po 25 cyklech byla u série ošetřených vzorků z betonu pevnostní třídy C 45/55 o 98 % nižší ve srovnání s referenčními vzorky a po 100 cyklech byla hmotnost vzniklého odpadu nižší o 88 %. Vzhledem k výsledkům série vzorků pevnostní třídy C 30/37, kde byly účinnosti obou použitých prostředků srovnatelné, se lze domnívat, že zvýšení efektivity u série vzorků z pevnostní třídy C4 45/55 ošetřených impregnačním roztokem z lithného vodního skla je způsobeno možnými odchylkami při provádění zkoušky. Tento prostředek u obou zkoušených sérií prokazatelně oddaluje počátek úbytku hmotnosti.

Při zkoušce odolnosti proti karbonataci došlo vlivem roztoku lithného vodního skla u zkušebních vzorků ke snížení hloubky zkarbonatované vrstvy po 28 dnech o 15 % a po 70 dnech o 9 %. Tato účinnost je v porovnání s výsledky po aplikaci přípravku Repesil BKH zanedbatelná. Impregnační roztok z lithného vodního skla nelze považovat za účinný ve zvýšení odolnosti proti karbonataci.

Účinnost roztoku lithného vodního skla ve zvýšení odolnosti proti degradačním procesům prokázali Song a spol. [21]. Ti ve svém výzkumu použili tři druhy roztoků s koncentracemi 4,5 %, 9 % a 18 %. Přičemž se zvyšující se koncentrací stoupala účinnost impregnačního roztoku. Ve výzkumu Zang a spol. [20] porovnávali vliv roztoku lithného vodního skla s molárním poměrem 4,8 a koncentrací 23 % a jeho kombinací s dalšími známými prostředky povrchové ochrany. Jako nejúčinnější ve všech provedených zkouškách se ukázala kombinace roztoku křemičitanu lithného, křemičitanu sodného a silanu. Naopak nejnižší účinnosti dosáhnul roztok křemičitanu lithného bez příměsí.

Zkoumaný impregnační prostředek z lithného vodního skla má molární poměr 3,0. Pro zvýšení jeho účinnosti by bylo vhodné buď použít lithné vodní sklo s vyšším molárním poměrem nebo jej zkombinovat s dalšími účinnými látkami, kdy každá složka plní odlišnou funkci a vzájemně se doplňují.

Hydrofobní impregnační prostředek Repesil BKH od společnosti Stachema lze považovat za účinný pro všechna doporučená použití udávaná v technickém listu výrobce. Jeho účinnost byla prokázána ve všech provedených zkouškách.

## 5 Použité zdroje

- [1] *Rafael Zarzuela, Manuel Luna, Jorge Gonzalez Coneo, Giada Gemelli, Dia Andreouli, Vasilis Kaloidas, María J. Mosquera*: Multifunctional silane-based superhydrophobic/impregnation treatments for concrete producing C-S-H gel: Validation on mockup specimens from European heritage, 01/2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130258>
- [2] *Xiaoying Pan, Zhenguo Shi, Caijun Shi, Tung-Chai Ling, Ning Li*: A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms, 12/2016. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>
- [3] *Xiaoying Pan, Zhenguo Shi, Caijun Shi, Tung-Chai Ling, Ning Li*: A review on concrete surface treatment Part 2: Performance, 12/2016. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>
- [4] *Jorge González-Coneo, Rafael Zarzuela, Farid Elhaddad, Luis M. Carrascosa, M. L. Almoraima Gil, María J. Mosquera*: Alkylsiloxane/alkoxysilane sols as hydrophobic treatments for concrete: A comparative study of bulk vs surface application, 12/2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103729>
- [5] *Ling Shen, Hui Jiang, Tao Wang, Kaihao Chen, Hui Zhang*: Performance of silane-based surface treatments for protecting degraded historic concrete, 01/2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.016>
- [6] *Rafael Zarzuela, Manuel Luna, Luis M. Carrascosa, María P. Yeste, Inés Garcia-Lodeiro, M. Teresa Blanco-Varela, Miguel A. Cauqui, José M. Rodríguez-Izquierdo, María J. Mosquera*: Production C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials, 12/2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106008>
- [7] *A. M. Barberena-Fernández, P. M. Carmona-Quiroga, M. T. Blanco-Varela*: Interaction of TEOS with cementitious materials: Chemical and physical effects, 09/2014. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.010>
- [8] *J. de Vries, R. B. Polder*: Hydrophobic treatment of concrete. Elsevier Science Ltd – Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 4, pp. 259-265, 08/1997.
- [9] *M. Medeiros, P. Helene*: Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. RILEM, Materials and Structures (2008), published online 01/2007.
- [10] *Elisa Franzoni, Barbara Pigino, Carlo Pistolesi*: Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments, 06/2013. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.008>
- [11] *M. Ibrahim, A. S. Al-Gahtani, M. Maslehuddin, A. A. Almusallam*: Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion. Elsevier Science Ltd, Vol. 11, Nos 7-8, pp. 443-451, 06/1997.
- [12] *P. A. M. Basheer, L. Basheer, D. J. Cleland, A. E. Long*: Surface treatments for concrete: assessment methods and reported performance. Elsevier Science Ltd – Construction and Building Materials, Vol. 11, Nos 7-8, pp. 413-429, 06/1997.
- [13] *Y. Dang, N. Xie, A. Kessel, E. McVey, A. Pace, X. Shi*: Accelerated laboratory evaluation of surface treatments for protecting concrete bridge decks from salt scaling, 02/2014. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.014>
- [14] *L. Basheer, D. J. Cleland*: Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners. Elsevier – Construction and Building Materials 20 (2006), 990-998, 08/2005
- [15] Historie betonu, E-beton (online). Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/historie-betonu/>
- [16] Historie cementu a betonu, Cemex (online). Dostupné z: <https://www.cemex.cz/historie-cementu-a-betonu>
- [17] *E. Franzoni, H. Varum, M. E. Natali, M. Ch. Bignozzi, J. Melo, L. Rocha, E. Pereira*: Improvement of historic reinforced concrete/mortars by impregnation and electrochemical methods, 8/2014. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.013>
- [18] *D. Kim, N. M. Pugno, S. Ryu*: Wetting theory for small droplets on textured solid surfaces, 12/2016. Dostupné z <https://www.nature.com/articles/srep37813>
- [19] *Y. Shen, Y. Wang, X. Xu, F. Ruan*: Study on carbonation of construction joints through field tests on a 30-year-old bridge and accelerated carbonation tests, 06/2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02231>
- [20] *J. Zang, Ch. Pan, X. Li, K. Chen, D. Chen*: Research on Salt Corrosion Resistance of Lithium-Based Protective Coating on Mortar Substrate, 04/2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16093463>

- [21] Z. Song, Z. Lu, Z. Lai: The effect of lithium silicate impregnation on the compressive strength and pore structure of foam concrete, 01/2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122316>
- [22] J. Perko, R. Zarzuela, I. Garcia-Lodeiro, M. T. Blanco-Varela, M. J. Mosquera, T. Seemann, L. Yu: The importance of physical parameters for the penetration depth of impregnation products into cementitious materials: Modelling and experimental study, 05/2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119595>
- [23] Young's equation, Krüss (online). Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/youngs-equation>
- [24] Wenzel equation – How roughness is related to wettability? Biolin Scientific (online). Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/wenzel-equation-how-roughness-is-related-to-wettability>
- [25] Cassie's Law, Wikipedia (online). Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cassie%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Cassie%27s_law)
- [26] Cassie – Baxter equation – Extreme wettability on surfaces, Biolin Scientific (online). Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/cassie-baxter-equation-extreme-wettability-on-surfaces>
- [27] Cassie-Baxter Model, Springer Link (online). Dostupné z: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-44324-8\\_1381](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-44324-8_1381)
- [28] *Mario Collepardi, český překlad Vlastimil Bílek*: Moderní beton. Praha, Informační centrum ČKAIT, 2009.
- [29] *P. Pytlík*: Technologie betonu. Brno, VUTIUM, 2000.
- [30] *M. Hubertová*: Trvanlivost lehkého konstrukčního betonu. Časopis Beton, 2013/6 Trvanlivost a životnost betonových konstrukcí.
- [31] *P. Rovnaníková*.: Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. Beton TKS, 2/2017 Technologie.
- [32] *L. Baltazar, J. Santana, B. Lopes, M. P. Rodrigues, J. R. Correia*: Surface skin protection of concrete with silicate-based impregnations: Influence of the substrate roughness and moisture, 04/2014. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.071>
- [33] *P. Tůma*: Nátěry na beton: typy, požadavky, normové parametry. tzb-info (online), 03.03.2014. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10916-natery-na-beton-typy-pozadavky-normove-parametry>
- [34] ČSN EN 1504-2. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Část 2: Systémy pro povrchovou ochranu. Praha, Český normalizační institut, 2006.
- [35] *J. Kolísko, D. Dobiáš, P. Huňka*: Hydrofobní impregnace betonu – prostředek pro zvýšení odolnosti betonu proti účinkům CH.R.L. Beton TKS, 1/2011 Pozemní stavby
- [36] *S. T. Witzleben*: Acceleration of Portland cement with lithium, sodium and potassium silicates and hydroxides, 12/2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122608>
- [37] *J. L. Thompson, M. R. Silsbee, P. M. Gill, B. E. Scheetz*: Characterization of silicate sealers on concrete, Elsevier Science Ltd, Vol. 27, No. 10, pp. 1561-1567, 06/1997.
- [38] *P. Misák, T. Vymazal, O. Žalud, B. Kucharczyková*: Stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL podle ČSN 73 1326 – opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků zkoušek. Beton TKS, 4/2013
- [39] *M. H. F. Medeiros, P. Helene*: Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption, 04/2008. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.013>
- [40] *D. Kocáb, P. Misák, T. Vymazal, T. Komárková, R. Halamová*: Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metody, praxe, problémy. Beton TKS, 2/2017
- [41] Technický list výrobku Repesil BKH. Stachema s.r.o., 2/2019. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-REPESIL-BKH.pdf>
- [42] Vodní součinitel, E-beton (online). Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/vodni-soucinitel/>
- [43] ČSN EN 13580. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Absorpce vody a odolnost hydrofobních impregnací proti alkáliím. Český normalizační institut, 2003.
- [44] ČSN EN 1062-3. Nátěrové hmoty – Povlakové materiály a povlakové systémy pro vnější zdivo a betony – Část 3: Stanovení permeability vody v kapalně fázi. Český normalizační institut, 2008.
- [45] *W. Kubissa, R. Jaskulski, M. Grzelak*: Torrent air permeability and sorptivity of concrete made with the use of air entraining agent and citric acid as setting retardant, 12/2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121703>

- [46] S. Bonnet, J. P. Balayssac: Combination of the Wenner resistivimeter and Torrent permeameter methods for assessing carbonation depth and saturation level of concrete, 09/2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.151>
- [47] D. Zhang, K. Li: Concrete gas permeability from different methods: Correlation analysis, 07/2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103379>
- [48] M. Romer: Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement. *Materials and Structures* 38, 541-547, 06/2005.
- [49] E. L. S. Borrero, V. Farhangi, K. Jadidi, M. Karakouzian: An Experimental Study on Concrete's Durability and Mechanical Characteristics Subjected to Different Curing Regimes. *Civil Engineering Journal*, Vol. 7, No. 04, 04/2021.
- [50] Návod k obsluze přístroje Resipod
- [51] Návod k obsluze přístroje Torrent
- [52] ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 12/1984.
- [53] ČSN 73 1326 Změna Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Český normalizační institut, 11/2003.
- [54] ČSN EN 12390-10 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 10: Stanovení odolnosti betonu proti karbonataci při atmosférické koncentraci oxidu uhličitého. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 04/2019.
- [55] ČSN EN 14630 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenoltaleinové metody. Český normalizační institut, 06/2008.
- [56] ČSN EN 13295 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení odolnosti proti karbonataci. Český normalizační institut, 01/2005.
- [57] ČSN EN 12390-12 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 12: Stanovení odolnosti betonu proti karbonataci – Metoda zrychlené karbonatace. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 05/2020.
- [58] Pevnost betonu v tlaku – zkouška, E-beton (online). Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska/>
- [59] Pevnost betonu v příčném tahu – zkouška, E-beton (online). Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-pricnem-tahu-zkouska/>
- [60] Impregnace na beton bez rozpouštědel, SmartSeal (online). Dostupné z: <https://smartseal.cz/produkt/impregnace-na-beton-interier/#>
- [61] Sanace železobetonu v chemicky náročném prostředí – metody a možnosti, Stavebnictví 3000 (online). Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sanace-zelezobetonu-v-chemicky-narocnem-prostredi-metody-a-moznosti>
- [62] Rekonstrukce mostu ev. č.22535-2, Zálužice, Silnice-železnice, (online). Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/rekonstrukce-mostu-ev-c-22535-2-zaluzice/>
- [63] P. Hudec, R. Drochytka: Zpevňování povrchu betonu silikátovými nátěry. *Beton, technologie, konstrukce, sanace*, 03/2001. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2001-3-24.pdf>
- [64] Tekuté křemičitany, AV Ekocolor (online). Dostupné z: <https://av-ekocolor.cz/tekute-kremicitany/>

## 6 Seznam obrázků

Obr. 1 - Zleva nátěr, impregnace, hydrofobní impregnace [39] .....	3
Obr. 2 - Reakce křemičitanu lithného s cementem [20] .....	6
Obr. 3 - Molekulární struktura silanu a siloxau, zleva [8] .....	7
Obr. 4 - Chemická vazba hydrofobní impregnace s cementem na betonovém povrchu [9] .....	8
Obr. 5 - Chemická reakce hydrofobního impregnačního prostředku se ztvrdlým cementem [2] .....	8
Obr. 6 - Chemická reakce TEOS se ztvrdlým cementem [2] .....	10
Obr. 7 - Návod pro výběr vhodného prostředku povrchové ochrany [12] .....	11
Obr. 8 - Výsledky měření pórovitosti a hloubky penetrace prostředku [22] .....	13
Obr. 9 - Rozdíl ve velikosti smáčecího úhlu [8] .....	15
Obr. 10 - Rozdíl ve velikosti smáčecího úhlu [9] .....	15
Obr. 11 - Vliv povrchové drsnosti dle Wenzelova smáčecího režimu [24] .....	16
Obr. 12 - Rozdíl mezi Wenzelovým a Cassie-Baxterovým smáčecím režimem [25] .....	17
Obr. 13 - Rozdíl mezi povrchem ošetřeným impregnačním prostředkem a neošetřeným povrchem .....	18
Obr. 14 - Výsledky měření paropropustnosti a porozity [4] .....	19
Obr. 15 - Popraskání povrchu betonové desky působením mrazu za přítomnosti vody .....	21
Obr. 16 - Úbytek hmotnosti zkušebních vzorků během jednotlivých cyklů [21] .....	21
Obr. 17 - Úbytek hmotnosti při působení cyklů mrazu a rozmrazování [5] .....	23
Obr. 19 - Poškození povrchu vzorků v průběhu cyklů mrazu a rozmrazování [5] .....	24
Obr. 18 - Nasákavost vody před a po působení mrazem [5] .....	24
Obr. 20 - Složení impregnačních prostředků [20] .....	25
Obr. 21 - Degradace betonu při působení síranové koroze [61] .....	27
Obr. 22 - Změna hmotnosti zkušebních vzorků a koeficient pevnosti v tlaku a odolnosti proti korozi v průběhu namáhání sírany [20] .....	27
Obr. 23 - Hloubka zkarbonatované vrstvy v místě spáry [19] .....	29
Obr. 24 - Konstrukce zasažená karbonatací. Hloubka zkarbonatované vrstvy zvýrazněna pomocí roztoku fenolftaleinu. [61] .....	30
Obr. 25 - Vliv přidání křemičitanu lithného na pevnost betonu po 7 a po 28 dnech [21] .....	31
Obr. 26 - Výroba betonové směsi v míchačce .....	33
Obr. 27 - Jednotlivé pevné složky betonu .....	33
Obr. 28 - Vzorky umístěné ve vodní nádrži .....	34
Obr. 29 - Odformování zkušebních vzorků .....	34
Obr. 30 - Schéma uspořádání při zkoušce pevnosti v tlaku [58] .....	35
Obr. 31 - Schéma uspořádání při zkoušce pevnosti v příčném tahu [59] .....	36
Obr. 32 - Kapka na betonovém povrchu ošetřeném přípravkem Repesil BKH .....	37
Obr. 33 - Ošetření povrchu zkušebních vzorků impregnačním roztokem z lithného vodního skla .....	38
Obr. 34 - Měření velikosti smáčecího úhlu .....	40
Obr. 35 - Kapky na betonovém povrchu, zleva neošetřený povrch, povrch ošetřený impregnací z lithného vodního skla, povrch ošetřený hydrofobní impregnací Repesil BKH .....	41
Obr. 36 - Hloubka penetrace přípravků. Zleva roztok lithného vodního skla, přípravek Repesil BKH. ....	43
Obr. 37 - Ošetření zkušebních vzorků impregnací z lithného vodního skla s přidaným barvivem .....	43
Obr. 38 - Měření nasákavosti ošetřených a referenčních zkušebních vzorků .....	46
Obr. 39 - Funkční schéma přístroje na měření měrného elektrického odporu [49] .....	50
Obr. 40 - Schéma umístění přístroje Resipod ve vztahu k poloze betonové výztuže [50] .....	51
Obr. 41 - Funkční schéma přístroje Torrent [47] .....	52
Obr. 42 - Měření pomocí přístroje Resipod .....	54

Obr. 43 - Měření paropropustnosti pomocí přístroje Torrent.....	54
Obr. 44 - Měření elektrického odporu u zkušebních vzorků ošetřených přípravkem Repesil BKH .....	57
Obr. 45 - Výroba zkušebních vzorků a impregnace roztokem lithného vodního skla .....	61
Obr. 46 - Zkušební vzorky umístěné v mrazicím boxu .....	62
Obr. 47 - Nerezové misky s odpadem umístěné ve vysoušecí peci .....	63
Obr. 48 - Beton pevnostní třídy C 30/37, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla .....	66
Obr. 49 - Beton pevnostní třídy C 30/37, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repesil BKH .....	66
Obr. 50 - Beton pevnostní třídy C 30/37, referenční zkušební vzorky.....	66
Obr. 51 - Beton pevnostní třídy C 45/55, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla .....	67
Obr. 52 - Beton pevnostní třídy C 45/55, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repesil BKH .....	67
Obr. 53 - Beton pevnostní třídy C 45/55, referenční vzorky .....	67
Obr. 54 - Klimatická komora .....	69
Obr. 55 - Měření hloubky zkarbonatované vrstvy .....	70
Obr. 56 - Zleva rozlomení vzorku v příčném tahu, rozříznutí vzorku kotoučovou pilou.....	71
Obr. 57 - Měření hloubky karbonatace po 7, 28 a 70 dnech. Zleva vždy referenční vzorky, vzorky ošetřené impregnací z lithného vodního skla, vzorky ošetřené hydrofobní impregnací Repesil BKH.....	73



## 7 Seznam tabulek

Tab. 1 - Výroba vzorků.....	32
Tab. 2 - Výsledky měření pevnosti v tlaku .....	35
Tab. 3 - Výsledky měření pevnosti v příčném tahu .....	36
Tab. 4 - Výsledky měření velikosti smáčecího úhlu .....	41
Tab. 5 - Výsledky měření nasákavosti – poměr množství vody nasáknuté ošetřenými a referenčními zkušebními vzorky .....	47
Tab. 6 - Výsledky měření paropropustnosti, beton pevnostní třídy C 30/37 .....	56
Tab. 7 - Výsledky měření paropropustnosti, beton pevnostní třídy C 45/55 .....	56
Tab. 8 - Stupeň porušení .....	59
Tab. 9 - Výsledné množství vzniklého odpadu.....	63
Tab. 10 - Výsledky měření hloubky zkarbonatované vrstvy .....	71

## 8 Seznam grafů

Graf 1 - Poměr množství vody nasáknuté ošetřenými a referenčními zkušebními vzorky v měřených časech.....	47
Graf 2 - Konečné množství odpadu, beton pevnostní třídy C 30/37.....	64
Graf 3 - Konečné množství odpadu, beton pevnostní třídy C 45/55.....	64
Graf 4 - Výsledky měření hloubky zkarbonatované vrstvy.....	71