



FAKULTA STAVEBNÍ

**ZHODNOCENÍ VLIVU HYDROXIDU LITHNÉHO NA
TRVANLIVOST BETONU**

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF LITHIUM
HYDROXIDE ON THE DURABILITY OF CONCRETE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Bc. Klára VAŠÍŘOVÁ

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Vašířová Jméno: Klára Osobní číslo: 459083

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Zhodnocení vlivu hydroxidu lithného na trvanlivost betonu

Název bakalářské práce anglicky: Evaluation of the influence of lithium hydroxide on the durability of concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši na téma prodloužení trvanlivosti betonu pomocí povrchové impregnace se zaměřením na následující body:

- Typy povrchové impregnace dostupné na trhu a jejich efektivita.
- Způsoby ověřování prodloužené trvanlivosti betonových vzorků.
- Uveďte vybrané příklady průmyslové realizace.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:

- Porovnejte účinnost povrchové impregnace pro zkoušky nasákavosti.
- Porovnejte účinnost povrchové impregnace pro zkoušky CHRL.
- Ověřte vliv impregnace na povrchovou pórovitost.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000

Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Šauman, Z.: Maltoviny I, VUT v Brně, 1993

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 14.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

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 15.5.2022

.....

Bc. Klára Vašířová

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za odborné rady a nápady a také za asistenci při výrobě betonových zkušebních těles a provádění zkoušek.

Dále bych ráda poděkovala příteli Ing. Vojtěchu Jansovi za podporu a rady během psaní práce.

Závěrem bych chtěla poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu a pochopení během mého dosavadního studia.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Bc. Klára Vašířová
Název práce: Zhodnocení vlivu hydroxidu lithného na trvanlivost betonu
Anglický název: Evaluation of the influence of lithium hydroxide on the durability of concrete
Akademický rok: 2021/2021
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, hydrofobní impregnace, nasákavost, trvanlivost
Keywords: Concrete, hydrophobic impregnation, water absorption, durability

Anotace: Práce se věnuje ověření vlivu hydrofobního impregnačního prostředku z hydroxidu lithného na prodloužení trvanlivosti a snížení nasákavosti betonu. Teoretická část práce se zaměřuje na pórovou strukturu betonu a její vliv na trvanlivost, na druhy degradačních procesů a následně na možnosti povrchové ochrany betonových konstrukcí a jejich zkoušení. Hlavní část práce tvoří třetí kapitola, která se zabývá experimentálním ověřením účinků hydroxidu lithného na trvanlivost betonu. Zde je popsáno složení receptury, postup výroby a postup zkoušení včetně vyhodnocení výsledků zkoušek.

Abstract: This thesis is focused on evaluation of hydrophobic impregnation made from lithium hydroxide influence on longer durability and lower water absorption of concrete. The theoretical part is focused on porous structure and it's influence on the durability, degradation processes and possibilities of the surface protection of concrete constructions and their testing. The main part of this thesis is formed by experimental evaluation of the influence of lithium hydroxide on durability of concrete. It describes the recipe composition, the production process and the testing procedure including the evaluation of the test results.

OBSAH

1	Úvod	1
2	Teoretická část	2
2.1	Trvanlivost betonových konstrukcí	2
2.1.1	Pórovitost betonu a její vliv na trvanlivost.....	2
2.1.2	Porušení betonu	4
2.1.2.1	Koroze ocelové výztuže způsobená karbonatací	5
2.1.2.2	Koroze ocelové výztuže způsobená vlivem chloridů	6
2.1.2.3	Koroze betonu.....	7
2.1.2.4	Alkalicko-křemičitá reakce	10
2.2	Typy povrchové impregnace dostupné na trhu a jejich efektivita	12
2.2.1	Hydrofóbní impregnace.....	12
2.2.2	Impregnace.....	15
2.2.3	Nátěry	16
2.3	Způsoby ověřování prodloužené trvanlivosti betonových vzorků.....	17
2.3.1	Hydrofobní impregnace.....	18
2.3.2	Impregnace a nátěry	23
2.4	Příklady provedených výzkumů	24
2.4.1	Coatings for Concrete Protection against Agressive Environments	24
2.4.2	Hydrofobní impregnace betonu – prostředek pro zvýšení odolnosti betonu proti účinkům CH.R.L.....	26
2.5	Příklady použití impregnačních prostředků v praxi	28
3	Experimentální část.....	29
3.1	Impregnace	29
3.1.1	Impregnační roztok	29
3.1.2	Zkušební tělesa	30
3.1.3	Postup impregnace.....	33
3.2	Zkouška nasákavosti.....	34
3.2.1	Postup.....	34
3.2.2	Výsledky.....	34

3.3	Zkouška odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování	40
3.3.1	Postup.....	40
3.3.2	Výsledky.....	42
3.4	Vliv impregnace na povrchovou pórovitost.....	44
3.4.1	Měřicí přístroje	44
3.4.2	Postup.....	47
3.4.3	Výsledky.....	50
3.5	Diskuze	52
4	Závěr.....	53
5	Použité zdroje.....	54
6	Seznam obrázků	56
7	Seznam tabulek.....	57
8	Seznam grafů.....	58

1 Úvod

V dnešní době, kdy se mění přístup k ochraně životního prostředí a kdy je stále více dbáno na omezené zásoby nerostných surovin, dochází ke změnám i v oboru stavebnictví. Stále se zvyšují požadavky na životnost a dlouhou trvanlivost konstrukcí. U velkých mostů se uvažuje, že by měly bezpečně odolávat účinkům zatížení až po dobu 200 let [1]. Tomu je potřeba i přizpůsobit stavební materiály.

Beton je velmi odolný a trvanlivý stavební materiál. Jeho trvanlivost se však vlivem okolního prostředí může značně snížit. Povrch betonu vystavený účinkům mrazu a rozmrazovacích látek, mořské vodě nebo agresivním chemickým látkám velmi rychle degraduje. Tyto degradační procesy mají za následek vznik trhlin, odlupování krycí vrstvy, korozi výztuže a v extrémních případech až celkový kolaps konstrukce.

Pro zvýšení životnosti betonové konstrukce vystavené degradačním procesům je třeba omezit vsakování vody do pórové struktury betonu. Množství vsáknuté vody se dá ovlivnit složením samotné betonové směsi nebo opatřením konstrukce impregnační vrstvou. Aplikace impregnačního prostředku na betonovou konstrukci je jednoduchá, dá se použít i pro již stojící stavby, které vyžadují dodatečnou ochranu. Při jeho použití se výrazně prodlouží trvanlivost betonové konstrukce.

Na trhu je celá řada impregnačních prostředků určených k aplikaci na betonový povrch. Všechny mají své výhody i nevýhody a výzkum v této oblasti se posouvá neustále dopředu. Proto je potřeba objevovat a zkoumat nové směsi a odstraňovat nedostatky těch stávajících.

2 Teoretická část

2.1 Trvanlivost betonových konstrukcí

2.1.1 Pórovitost betonu a její vliv na trvanlivost

Beton je pórovitý materiál. Množství a druh pórů v betonu má zásadní vliv na jeho trvanlivost, permeabilitu, pevnost a modul pružnosti. Obecně lze říct, že čím menší množství vody a agresivních látek pronikne skrze póry do betonu, tím delší je jeho trvanlivost. Zmenšováním objemu a velikosti pórů v betonu tedy dochází ke zvyšování jeho trvanlivosti.

Póry vznikají jak v čerstvém betonu vlivem složení směsi a způsobu zhutnění tak při následné hydrataci cementu. Dělíme je do pěti skupin:

- **Technologické póry** – vznikají v důsledku nedokonalého zhutnění betonové směsi, kdy se zachycený vzduch při hutnění nedostane na povrch nebo při nedostatku cementového tmele mezi kamenivem. Výsledkem jsou makrodutiny (kaverny).
- **Póry v zrnech kameniva** – vyskytují se v lehkém kamenivu. Zlepšují tepelně izolační vlastnosti betonu, ale mají negativní vliv na jeho mechanické vlastnosti.
- **Provzdušňovací póry** – vznikají při použití provzdušňovací přísady. Výsledkem jsou sférické uzavřené póry (bubliny) o velikosti 100–300 μm . Tyto póry zlepšují mrazuvzdornost cementové pasty.
- **Kapilární póry** – jsou malé póry s nepravidelným tvarem o velikosti 0,1-10 μm . Vznikají mezi zrny hydratujícího cementu vlivem nadměrného množství vody. Jejich výskyt je závislý na vodním součiniteli a na způsobu ošetřování betonu.
- **Gelové póry** – jedná se o nanopóry o velikosti 1-10 nm, které nejsou pozorovatelné ani elektronovým mikroskopem. Vyskytují se uvnitř pevných hydrátů a jsou zaplněny vodou odpařitelnou při 105 °C. Při běžných podmínkách je tato voda neodpařitelná. Jejich množství je zjišťováno nepřímo pomocí adsorpce plynů dusíku, hélia nebo vodní páry.

[2,3]

Hlavní vliv na trvanlivost má vzájemná propojenost a velikost pórů. Při nespojitě pórovitosti a zároveň nízké kapilární pórovitosti může mít beton výrazně omezenou či úplně zredukovanou nasákavost. Naopak jsou-li póry spojitě, beton je dobře nasákavý a výrazně se tak urychluje jeho degradace.

Nespojitě pórovitosti lze dosáhnout kombinací více faktorů. Hlavním z nich je množství a velikost kapilárních a technologických pórů. Kapilární póry jsou závislé na

vodním součiniteli v/c a stupni hydratace α . Správným složením betonu, jeho prováděním a ošetřováním můžeme množství kapilárních pórů výrazně redukovat. [2]

Vodní součinitel $w = v/c$ (water/cement ratio) vyjadřuje poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu.

Jeho obvyklé hodnoty jsou 0,4 – 0,6. U vysokopevnostních betonů se může jeho hodnota snížit až na 0,25. Při nižším vodním součiniteli vykazuje beton lepší mechanické vlastnosti, je odolnější vůči agresivnímu prostředí a trvanlivější. [25]

„Stupeň hydratace $\alpha(t)$ [-] popisuje, jaká část hydratačního tepla $H(t)$ [J/m³] se v daném okamžiku uvolnila v poměru k celkovému hydratačnímu teplu H_t [J/m³]. Jinými slovy, jaká část cementu již zhydratovala.“ [25]

Závislost objemu kapilárních pórů na vodním součiniteli a stupni hydratace lze popsat následující rovnicí:

$$V_p = 100 v/c - 36,15 \alpha$$

Z uvedené rovnice vyplývá, že pro redukci kapilárních pórů je třeba snížit vodní součinitel v/c nebo zvýšit stupeň hydratace α . Zároveň je možné výskyt kapilárních pórů redukovat úplně, pokud například $v/c = 0,3615$ a $\alpha = 1$. V takovém případě se v betonu vyskytují pouze gelové póry, jejichž objem a velikost není možné nijak ovlivnit.

Stupeň hydratace α lze ovlivnit pouze dobou ošetřování betonu. Obecně platí, že při zvyšování vodního součinitele v/c se prodlužuje doba ošetřování betonu ve vlhku potřebná k tomu, aby bylo dosaženo jeho vodotěsnosti. Například povrch betonu s vodním součinitelem 0,4 je třeba ošetřovat po dobu 3 dnů, ale pro beton s vodním součinitelem 0,55 se potřebná doba ošetřování prodlužuje až na 28 dnů. U betonů s vysokým vodním součinitelem (nad 0,7) již není vůbec možné nepropustnosti dosáhnout.

Vodotěsnost betonu se stanovuje pomocí zkoušky definované v ČSN EN 12390-8, při které je beton po dobu 3 dnů vystaven vodě o tlaku 5 barů. Za tuto dobu nesmí voda do betonu proniknout do hloubky větší než 20 mm.

Teorie závislosti objemu kapilárních pórů na vodním součiniteli a hydratačním teple platí pouze za předpokladu dokonalého zhutnění (nevyskytují se technologické póry). Při snižování vodního součinitele v/c dochází ke zhoršení zhutnitelnosti betonu, a tím ke zvýšení výskytu technologických pórů. Jejich vzniku lze předcházet použitím superplastifikátorů.

Póry v zrnech kameniva mají vliv na mechanické a tepelně technické vlastnosti, ale z hlediska trvanlivosti, v případě, že není použito mrazuvzdorné kamenivo, je jejich vliv nulový.

Naopak provzdušňovací póry vzniklé použitím provzdušňovací přísady výrazně přispívají k vyšší odolnosti betonu proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům. Jelikož póry nejsou vzájemně propojeny, jejich výskyt neovlivňuje pronikání vody a agresivních látek z okolního prostředí do betonu. Při zmrazování je voda vyskytující se v kapilárních pórech vznikem prvních krystalků ledu vytlačována do provzdušňovacích pórů. Tím se snižuje tlak na beton vzniklý v důsledku zvětšení objemu vody při zmrznutí. Aby tento efekt mohl fungovat, musí být maximální vzdálenost provzdušňovacích pórů 300-400 μm . [2]

2.1.2 Porušení betonu

Vlivem okolního prostředí a vlastního složení betonové směsi může docházet k několika procesům postupné degradace betonové konstrukce. Tyto degradační procesy velmi úzce souvisí s pórovitostí betonu. Dlouhodobým působením vody a agresivních látek z okolního prostředí dochází ke vzniku a rozšiřování mikrotrhlin, které mají za následek postupné snižování vodotěsnosti betonu. Rozšiřováním mikrotrhlin a jejich propojením s kapilárními póry dochází k vytvoření spojitě pórovitosti. Ta umožňuje penetraci vody a agresivních látek do struktury betonu, čímž dochází k dalšímu rozšiřování porušení. S rostoucí permeabilitou roste i rychlost porušování betonu.

Dlouhodobou trvanlivost betonu ovlivňují tři zásadní faktory:

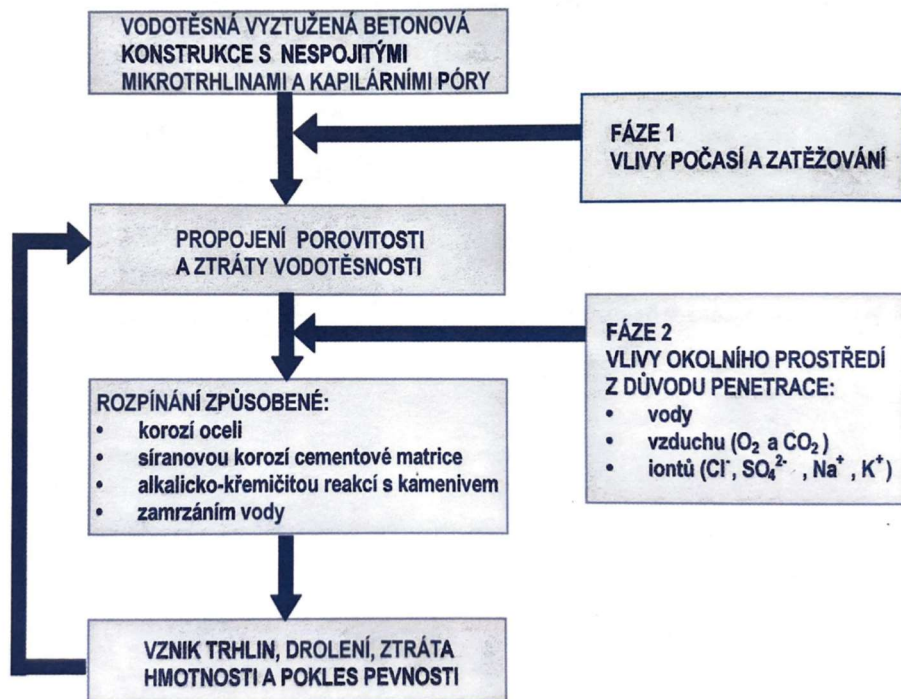
- **Spojité pórovitost** – nastává v důsledku vzniku a rozšiřování mikrotrhlin, jejich propojením s kapilární pórovitostí a také nedostatečným zhutněním, kvůli kterému vznikají kaverny.
- **Působení agresivních činidel** – největší vliv na trvanlivost betonových konstrukcí má koroze výztuže v důsledku působení CO_2 nebo Cl^- , síranová koroze a alkalicko-křemičitá reakce.
- **Přítomnost vody** – voda nasáklá v pórech betonu způsobuje při průběhu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů jeho degradaci. Pokud jsou ve vodě rozpuštěny agresivní látky, jejím vsakováním proniknou do struktury betonu a dochází k rozvoji dalších degradačních procesů.

Působí-li pouze jeden ze tří faktorů, je velmi nepravděpodobné, že by došlo k porušení betonové konstrukce. Při jejich současném působení však riziko porušení výrazně stoupá. Například pokud je beton bez spojitě pórovitosti ve vlhkém prostředí za přítomnosti agresivních činidel, nemohou se tyto látky dostat do struktury betonu a nedojde k jeho porušení. Pokud by však v takovém prostředí v betonu došlo k propojení pórů a agresivní látky by se dostaly do struktury betonu, došlo by k jeho porušení.

Mezi postupné degradační procesy se řadí:

- Koroze výztuže,
- koroze betonu (fyzikální, chemická a biologická),
- vývoj trhlin jako následek vlhkostních a teplotních změn a zatížení,
- alkalicko-křemičitá reakce.

[2]



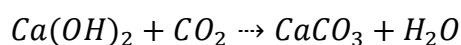
Obr. 1 - Průběh degradace betonových konstrukcí [2]

2.1.2.1 Koroze ocelové výztuže způsobená karbonatací

Korozi lze definovat jako nezáměrné rozrušování materiálů. Při korozi ocelové výztuže dochází k přeměně oceli v porézni a nesourodou rez tvořenou oxidy a hydroxidy železa. U tohoto procesu ocel 6–7krát zvětší svůj objem. Pokud dojde ke korozi výztuže uvnitř betonové konstrukce, vlivem zvětšování objemu oceli vzniknou trhliny v betonu a dochází k odlupování jeho krycí vrstvy. Důsledkem je snížení průřezu dané konstrukce a možnost pronikání agresivních látek hlouběji do betonové struktury.

Na povrchu ocelové výztuže se nachází velmi tenká ochranná vrstva, která zabraňuje kontaktu kyslíku a vody s ocelí. Tato vrstva však funguje pouze v zásaditém prostředí. V průběhu hydratace cementové pasty vzniká hydroxid vápenatý. Díky jeho přítomnosti je beton obklopující ocel dostatečně zásaditý, čímž chrání výztuž před korozi. Tento proces se označuje jako pasivace.

Vlivem pronikání oxidu uhličitého a vody přes krycí vrstvu dochází k chemické reakci, při níž se hydroxid vápenatý přeměňuje na uhličitán vápenatý a dochází tak ke snížení pH v krycí vrstvě. Tato reakce se nazývá karbonatace.



Když hodnota pH v krycí vrstvě klesne pod 8,4, dojde k porušení katodické ochrany ocelové výztuže. Tento proces je označován jako depasivace ochranné vrstvy výztuže. Voda a kyslík se mohou dostat do kontaktu s ocelovou výztuží a dochází k její korozi.

Rychlost karbonatace lze vyjádřit následující rovnicí:

$$x = k * \sqrt{t}$$

t – čas [dny]

k – 0,2-0,4, závisí na množství a druhu cementu

x – mocnost zkarbonatované vrstvy

Mocnost zkarbonatované vrstvy je možné změřit kolorimetrickou metodou za využití roztoku fenolftaleinu. V prostředí s pH > 9,6, kde ještě karbonatace neproběhla, se roztok zbarví do fialova. Zkarbonatovaná vrstva zůstane bez zbarvení. [2, 4]



Obr. 2 - Měření mocnosti zkarbonatované vrstvy [21]

2.1.2.2 Koroze ocelové výztuže způsobená vlivem chloridů

K depasivaci povrchové ochrany ocelové výztuže může dojít také působením chloridových iontů Cl⁻. Ty se obvykle do struktury betonu dostávají buď působením mořské vody nebo vlivem rozmrazovacích solí používaných v zimě na pozemních komunikacích. Hlavním rozdílem mezi korozí způsobenou oxidem uhličitým a chloridovými ionty je hloubka zkorodované vrstvy. V případě působení chloridových iontů je hloubka koroze značně nepravidelná a mohou se vyskytovat velmi hluboké defekty. Oproti tomu při působení oxidu uhličitého bývá hloubka zkorodované vrstvy pravidelná.

Koroze probíhá stejně jako v případě působení oxidu uhličitého. Vlivem chloridových iontů dochází k depasivaci povrchové ochranné vrstvy ocelové výztuže a následná koroze probíhá díky umožnění kontaktu oceli s kyslíkem a vodou.

Voda, ve které jsou rozpuštěné chloridy, se vsakuje do kapilárních pórů a chloridy se dostávají do struktury betonu. Pokud jsou kapilární póry nasyceny vodou, může probíhat difuze chloridových iontů z okolního prostředí. V tomto případě voda zůstává v kapilárních pórech a pohybují se pouze chloridové ionty.

Hloubku průniku chloridových iontů lze měřit podobně jako v případě karbonatice pomocí kolorimetrické zkoušky za využití fluoresceinu a dusičnanu stříbrného. Oblast s proniklými chloridy se zbarví růžově. [2]

2.1.2.3 Koroze betonu

Korozi může podléhat jak cementový tmel, tak i některé druhy kameniva obsahující reaktivní složky, jako například amorfni oxid křemičitý, vápenec, dolomit a pyrit. Korozi betonu mohou způsobovat fyzikální, chemické a biologické procesy. Obvykle tyto procesy probíhají současně. [5]

Fyzikální koroze

Mezi fyzikální vlivy, které způsobují degradaci betonu, se řadí mechanická namáhání jako jsou tření, nárazy, proudící voda nebo abraze jemnými částicemi. Působením těchto dějů dochází k postupnému porušování a odstraňování cementového tmelu a následně k obnažení a uvolňování kameniva obsaženého v betonu.

Důležitým fyzikálním faktorem způsobujícím degradaci betonu je také vliv vysokých a nízkých teplot a jejich střídání. Při teplotách nad 100 °C dochází k rozkladu hydratované sloučeniny, uvolňování vody a jejímu následnému vypařování. Naopak při nízkých teplotách pod 0 °C voda obsažená v kapilárních pórech zmrzne na krystaly ledu a tím zvětší svůj objem.

Cyklické zmrazování a rozmrazování

Působením opakovaného zmrazování a rozmrazování může docházet k zásadnímu poškození betonové konstrukce. Pokud je beton suchý, nemají na jeho trvanlivost tyto cykly žádný vliv. Příčinou degradačního procesu je voda obsažená v pórovém systému betonu. Při poklesu teploty pod bod mrazu dojde k zamrznutí vody, které je provázeno nárůstem jejího objemu o 9 %. Pokud jsou póry zaplněny vodou z více než 91,7 %, po zamrznutí vody se její objem zvětší na více než 100 % objemu pórů. Tím vzniká tlakové napětí působící na stěny pórů. Cyklickým opakováním zmrazování a rozmrazování dochází ke vzniku trhlin, jejich dalšímu rozvoji a postupné degradaci betonové konstrukce.

V praxi není podstatné, jestli je průměrný stupeň nasycení betonu větší než 91,7 %. U exponovaných konstrukcí vystavených například dlouhým deštům dochází k úplnému nasycení povrchové vrstvy betonu, a přestože vnitřní část konstrukce není nasycena vodou vůbec, může vlivem zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů docházet k porušování povrchové vrstvy betonu. Důležitý je lokální stupeň nasycení.

V zimním období jsou na pozemních komunikacích používány posypy z rozmrazovacích solí, nejčastěji chlorid sodný a chlorid vápenatý. Během rozmrazovacích a zmrazovacích cyklů se sůl rozpuštěná ve vodě dostává do struktury betonu. Následně při vysychání vody obsahující rozpuštěné soli dochází ke krystalizaci solí, které zvětšují svůj objem, a tím působí další tlak na stěny pórů. Zároveň se tak do betonu dostávají anionty chlóru způsobující depasivaci ochranné vrstvy výztuže a její následnou korozi (viz kapitola 2.1.2.2). [5, 2]

Chemická koroze

Chemickou korozi lze rozdělit na dvě skupiny – působení plynů z atmosféry a působení látek v kapalném prostředí. Jejich vlivem dochází ke změnám v cementovém tmelu. Všechny mají za následek snížení obsahu hydroxidu vápenatého. Tím dojde ke snížení pH krycí vrstvy a k následné korozi ocelové výztuže.

Atmosférická koroze

Příčinou vzniku atmosférické koroze je proces karbonatace. Jeho průběh je popsán v kapitole 2.1.2.1.

Atmosferickou korozi lze rozdělit do čtyř fází.

V první fázi vzniká v důsledku karbonatace jemnozrnný uhličitán vápenatý, který částečně zaplňuje póry, a tím zlepšuje mechanické vlastnosti betonu a dočasně zvyšuje jeho odolnost vůči agresivním látkám.

V druhé fázi při reakci oxidu uhličitého s hydratovanými slínkovými materiály dochází ke vzniku modifikací uhličitánu vápenatého. Tyto reakce nemají vliv na mechanické vlastnosti betonu.

Ve třetí fázi za působení oxidu uhličitého a vlhkosti dochází k rekrystalizaci uhličitánu vápenatého. Vznikají velké krystaly kalcitu a aragonitu. Důsledkem takového zvětšení je porušování struktury betonu a vznik trhlin.

Čtvrtá fáze je postupné prorůstání krystalů kalcitu a aragonitu skrze cementový tmel a tím způsobené zhoršování mechanických vlastností betonu až do jeho úplného rozpadu. V této fázi může dojít až k úplné absenci hydroxidu vápenatého. Snížení pH pod hodnotu 8,4 pak způsobuje výše zmíněnou korozi ocelové výztuže. [5]

Koroze kapalným agresivním prostředím

Vsakováním vody do kapilárních pórů se na povrch i do struktury betonu dostávají ve vodě rozpuštěné agresivní látky, které způsobují postupnou degradaci betonu. Jejich působení je možné rozdělit na tři druhy.

- Koroze I. druhu

Působením tzv. hladové vody dochází k vyluhování hydroxidu vápenatého obsaženého v cementovém tmele. Ten následně na povrchu karbonatuje a tvoří bílé výkvěty nebo krápníky. Vyluhováním hydroxidu vápenatého z cementového tmele dochází ke snižování pH krycí vrstvy.

- Koroze II. druhu

Jedná se o výměnnou reakci mezi vápenatými ionty a agresivními látkami působícími na beton. Jejím výsledkem jsou rozpustné a nerozpustné sloučeniny, které se dále neváží a nejsou expanzivní. Při reakci dochází k úbytku hydroxidu vápenatého z cementového tmele. Úbytek cementu ve struktuře betonu způsobuje ztrátu pevnosti a zhoršení mechanických vlastností. Rozpustné látky jsou vyplavovány na povrch betonu a umožňují napadání další části cementového tmele. Naopak nerozpustné látky zůstávají uvnitř betonové struktury a částečně brání dalšímu rozvoji reakce. Tento druh koroze není způsoben vodou, ale agresivními chemickými látkami produkovány například v potravinářském prostředí.

- Koroze III. druhu

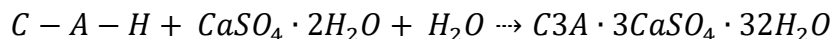
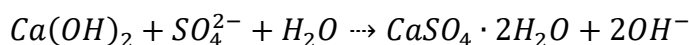
Bývá nazývána jako síranová koroze. Reakcí síranů obsažených v betonu, nebo síranů, které do betonu pronikly z okolního prostředí, s cementovým tmelem dochází ke vzniku expanzivních novotvarů nazývaných ettringit.

Ettringit může vznikat již v samotném čerstvém betonu nebo při jeho tvrdnutí v době, kdy je beton ještě plastický. V takovém případě nedochází ke zhoršení vlastností ztvrdlého betonu. Tento proces je označován jako raná tvorba ettringitu (Early Ettringite Formation – EEF).

Při pozdějším vzniku ettringitu v průběhu měsíců a roků dochází k lokální expanzi v místě jeho vzniku a následnému porušování struktury betonu. Jedná se o dodatečnou tvorbu ettringitu (Delayed Ettringite Formation – DEA), která je označována jako síranová koroze.

Vnější síranová koroze zapříčiněná síranovými ionty z okolního prostředí způsobuje přeměnu hydroxidu vápenatého na sádrovec, který má větší objem. Dochází tak vlivem expanze k narušení struktury betonu. Následně probíhá

reakce C-A-H (zhydratovaných hlinitanů) se sádrovcem za působení vody. Jejím produktem je velmi expanzivní ettringit. Ve vnějším prostředí se běžně vyskytují síran vápenatý, hořečnatý a sodný.



K vnitřní síranové korozi dochází působením síranů obsažených v betonu, které se mohou časem uvolňovat. Zdrojem je například kamenivo obsahující sádrovec nebo síran obsažený v cementu. Druhou možností je dosažení teplot vyšších než 70 °C při tuhnutí betonu. V tom případě dochází k rozkladu primárního ettringitu a následnému vzniku sekundárního ettringitu (DEF). [2]

2.1.2.4 Alkalicko-křemičitá reakce

Alkalicko-křemičitá reakce probíhá za přítomnosti alkálií a oxidu křemičitého rozpuštěného ve vodě. Jejím produktem jsou alkalicko-silikátové gely, které při své hydrataci zvětšují objem. Tím dochází ke vzniku trhlin a odlupování krycí vrstvy betonu.

Alkálie ve formě sodných, draselných a vápenatých iontů mohou být obsaženy přímo v cementové pastě nebo se do konstrukce dostávají z okolního prostředí, nejčastěji při použití rozmrazovacích solí, které se rozpustí ve vodě a vsáknou se do betonových pórů. Při vyšších teplotách se jejich rozpustnost násobně zvyšuje, čímž dochází k urychlování reakce. Dále se alkálie vyskytují v některých urychlovačích tuhnutí.

Množství rozpuštěného oxidu křemičitého závisí na více faktorech. Především na typu použitého kameniva a obsahu určitých modifikací křemene. Jednotlivé modifikace křemene se zásadně liší svou rozpustností ve vodě.

Dále má na rozpustnost křemene vliv pH okolního prostředí. Nejméně rozpustný je křemen při pH 2. Zvyšováním pH se zvyšuje i jeho rozpustnost. Jelikož je cementová pasta je zásaditá, betonové prostředí s přirozeně vysokým pH rozpouštění křemene napomáhá.

Pokud je kamenivo tvořeno jemnou frakcí, povrch křemene, který je vystaven vlivu vlhkosti a u kterého může docházet k rozpouštění, je násobně větší než v případě větších zrn kameniva.

Důležitou roli hraje přítomnost dalších látek ovlivňujících průběh reakce. Je experimentálně dokázáno, že přítomnost hlinitých iontů (např. ve formě hydroxidu hlinitého), železitých, zinečnatých, měďnatých, beryllnatých a galnatých iontů alkalicko-křemičitou reakci zpomaluje. Naopak jiné, např. plagioklasy, reakci urychlují. Nejreaktivnější jsou amorfnní hmoty obsahující oxid křemičitý jak v čisté formě (opál), tak jako sloučeniny s proměnným obsahem této složky (vulkanická skla).

Rozpouštění křemene i alkálií je možné pouze za přítomnosti vody vsáklé v pórovém systému betonu. Pokud by byl beton suchý, nemohly by se látky rozpouštět a alkalicko-silikátové gely by neměly možnost hydratovat. [6, 2]

2.2 Typy povrchové impregnace dostupné na trhu a jejich efektivita

Všechny výše zmíněné degradační procesy úzce souvisí s přítomností vody v betonové konstrukci. Vliv vsakování vody na trvanlivost betonu je popsán v kapitole 2.1.2. Množství vody vsáknuté do konstrukce se dá omezit změnou složení betonové směsi. Další velmi účinnou variantou, jak omezit průnik vody do betonové konstrukce a tím prodloužit trvanlivost betonové konstrukce, je aplikace povrchové ochrany na povrch betonu.

Na trhu je dostupná celá řada výrobků určená k povrchové ochraně betonu. Liší se cenou, složením, fyzikálními i chemickými vlastnostmi, způsobem aplikace, působením a také množstvím vlivů, proti kterým je betonový povrch chráněn. Při samotném návrhu nebo při následné sanaci betonového povrchu je důležité správně zvolit takovou povrchovou úpravu, která je vhodná pro daný typ betonové konstrukce s ohledem na způsob mechanického namáhání, na vlivy okolního prostředí a na její stav.

Povrchové úpravy lze rozdělit do tří skupin definovaných normou ČSN EN 1504-2:

- **Hydrofobní impregnace** – povrch betonu je ošetřen hydrofobním prostředkem, který má vliv na velikost smáčecího úhlu. Nedochozí však ke zmenšení průměru pórů a kapilár. Betonová konstrukce zůstává paropropustná. Nedochozí ke změně vzhledu povrchu.
 - **Impregnace** – beton je opatřen úpravou snižující jeho povrchovou porozitu a zpevňující povrch. Dochází k částečnému nebo úplnému zaplnění pórů a kapilár.
 - **Nátěr** – po aplikaci nátěru vzniká na povrchu betonu souvislá ochranná vrstva.
- [7]



Obr. 3 - Hydrofobní impregnace, impregnace, nátěr (zleva) [7]

2.2.1 Hydrofóbní impregnace

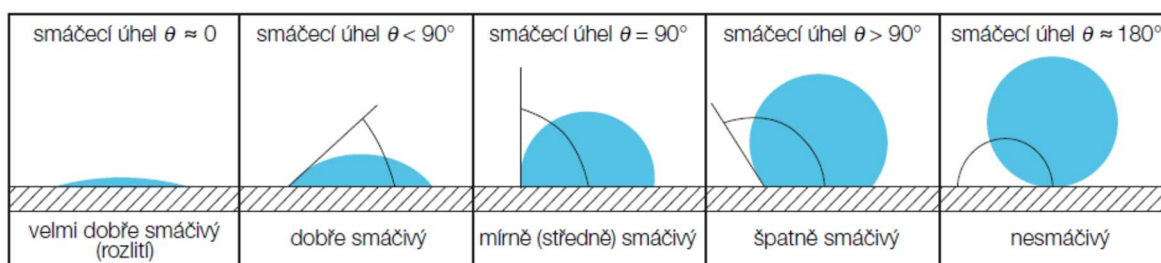
Beton se řadí mezi porézní stavební materiály, u kterých při styku s vodou či jinou kapalinou dochází v důsledku působení kapilárních sil k nasátí této kapaliny do pórů stavebního materiálu. Takto působící kapilární sílu F_{kap} lze při předpokladu rovné válcové kapiláry definovat následujícím vztahem:

$$F_{kap} = 2\pi\gamma r \cos \theta,$$

kde γ je povrchové napětí kapaliny, r je poloměr pórů a θ je smáčecí úhel kapaliny na povrchu pevné látky. Z uvedené rovnice vyplývá, že čím je smáčecí úhel θ větší, tím je kapilární síla menší. [8]

Na betonovém povrchu bez povrchové úpravy se voda kvůli malému smáčecímu úhlu snadno vsákne do struktury betonu. To se při dopadu kapky vody na betonový povrch projevuje jejím rozlitím do stran.

Při aplikaci hydrofobní impregnace dochází k vytvoření tenké vrstvy na povrchu betonové konstrukce, která způsobuje zvětšení smáčecího úhlu θ a tím dochází ke zmenšení kapilární síly F_{kap} . V praxi to znamená, že při dopadu kapky vody na takto ošetřený betonový povrch zůstane kapka zabalena do kuličky a po povrchu steče. Její kontakt s povrchem betonu je minimální a díky tomu dochází k zásadnímu snížení nasákavosti. [9]



Obr. 4 - Velikost smáčecího úhlu [9]

Dle normy ČSN EN 1504-2 je možné hydrofobní impregnace použít za účelem ochrany proti vnikání, regulace vlhkosti a zvýšení odporu.

Od impregnací a nátěrů se odlišují tím, že v důsledku jejich aplikace nedochází ke zmenšení pórů a kapilár v povrchové vrstvě betonu a beton tak zůstává paropropustný. Jejich hlavní funkcí je odpuzování vody, která se dostane do kontaktu s betonovým povrchem za pomoci zvýšení smáčecího úhlu. Díky výraznému omezení možnosti vsakování vody do struktury betonu dochází ke zpomalení vlivu degračních procesů.

Hydrofobní impregnace je obvykle tvořena směsí hydrofobizujících látek a pomocných materiálů. Jedná se o nepolární sloučeniny, které obsahují uhlíkaté řetězce. Existují v různých variantách v závislosti na použitém rozpouštědle.

- Vodní emulze,
- mikroemulze,
- roztok v organických rozpouštědlech,
- pasta nebo krém.

Obvykle jsou hydrofobní impregnace nanášeny nátěrem ve formě emulzí nebo roztoků. Při použití pasty nebo krému se jejich efektivita zvyšuje. Na rozdíl od roztoků a emulzí schnou pasty a krémy výrazně pomaleji. Prodloužením času schnutí má hydrofobní

impregnace možnost vsáknout se hlouběji do pórového systému, což vede ke zvýšení její účinnosti. [10]

U většiny dostupných hydrofobních impregnací jsou používány následující chemické látky:

- Silany,
- siloxany,
- vysokomolekulární polysiloxany,
- nízkomolekulární oligomerní alkylalkoxysiloxany,
- silikonové mikroemulze,
- silikonáty.

[9]

Silany

Při aplikaci silanů dochází k jejich reakci se vzdušnou vlhkostí za vzniku gelu kyseliny křemičité. Na povrchu křemenných zrn vytváří chemickou vazbu, díky které není možné je z povrchu odstranit.

Jako rozpouštědla silanů je možné použít bezvodé alkoholy a alifatická rozpouštědla. Používají se také jako vodní emulze.

Siloxany

Jedná se o nejčastěji používané přípravky. Siloxanový impregnační nátěr je rozpustný, takže je odstranitelný z povrchu za pomoci odstraňovačů starých nátěrů. Starší nátěry je možné obnovovat.

Vzhledem k tomu, že jsou siloxanové pryskyřice rozpouštěné v lakovém benzínu, lze jimi impregnovat pouze suché povrchy. Kvůli použití lakového benzínu jsou tyto hydrofobní impregnace hořlavé a ohrožují životní prostředí.

Vysokomolekulární polysiloxany

Roztoky polysiloxanových pryskyřic jsou obvykle dostupné v podobě vodní emulze. Hydrofobní impregnace začne fungovat po odpaření vody z emulze. Pro jejich výrobu se používají emulgátory, které se postupně vyplavují, takže se hydrofobní efekt projeví až po určitém čase.

Tyto přípravky jsou ředitelné vodou, takže se dají nanášet na mokré povrchy.

Nízkomolekulární oligomerní alkylalkoxysiloxany

Obvykle jsou nízkomolekulární oligomerní alkylalkoxysiloxany dostupné jako jednosložkové. Při styku se vzdušnou vlhkostí samovolně polymerizují. Stejně jako siloxany se chemicky váží na povrch křemenných zrn a není možné je z povrchu odstranit.

Tyto přípravky mohou mít formu pasty nebo krému. Při jejich použití je možné dosáhnout větší hloubky penetrace impregnačního prostředku.

Silikonové mikroemulze

Silikonové sloučeniny se mísí s vodou a vytvářejí vodní emulze, které umožňují nanášení na mokré povrchy.

Silikonáty

Při styku silikonátů s oxidem uhličitým dochází k chemické reakci a vzniku gelu kyseliny křemičité, který je nerozpustný a nátěr je neodstranitelný. Během reakce je uvolňován hydroxid sodný nebo draselný, který se následně mění na uhličitán sodný nebo draselný. Ty pak mohou být příčinou tvorby výkvětů při aplikaci přípravku za nízkých teplot.

Při použití silikonátových přípravků může docházet k zúžení kapilár. To má za následek snížení paropropustnosti impregnovaného materiálu a snížení jeho mrazuvzdornosti. Je tedy důležité zvážit vhodnost použití silikonátových přípravků pro danou konstrukci.

[10]

2.2.2 Impregnace

Na rozdíl od hydrofobních impregnací při použití impregnačních prostředků dochází ke zúžení pórů a kapilár vedoucím k omezení vysychání betonové konstrukce. Je tedy potřeba zajistit, aby před nanášením impregnačního prostředku nebyla v konstrukci zabudovaná voda, která již následně nemůže vysychat a zároveň aby nedocházelo ke vztlínání vody do betonové konstrukce například skrze základy.

Dle normy ČSN EN 1504-2 slouží impregnace jako ochrana proti vnikání a zároveň zlepšuje fyzikální odolnost povrchu betonové konstrukce. Například odolnost proti oděru, protismykové vlastnosti atd.

Impregnace se obvykle nanáší jednovrstvým nástřikem nebo nátěrem rozpouštědlovým nebo nerozpouštědlovým lakem. Vzhledem k tomu, že jsou rozpouštědlové laky extrémně hořlavé a velmi nebezpečné pro životní prostředí, dochází k jejich nahrazování impregnačními prostředky na vodní bázi.

Impregnační laky bývají nejčastěji tvořeny polymerními roztoky nebo polymerními disperzemi. [7, 11]

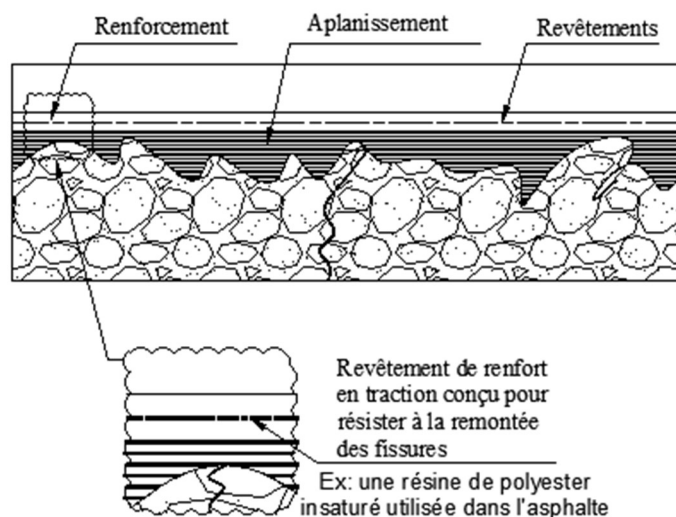
2.2.3 Nátěry

Poslední skupinu výrobků pro ochranu povrchu betonových konstrukcí tvoří nátěry. Ty na povrchu betonové konstrukce vytváří hladký film, který kompletně uzavře celý betonový povrch, jeho póry a kapiláry.

Nátěry plní dle normy ČSN EN 1504-2 funkci ochrany proti vnikání, regulaci vlhkosti, zvýšení odporu a zlepšují fyzikální a chemickou odolnost.

Stejně jako u impregnací je třeba brát v potaz, že nátěry nejsou paropropustné a voda obsažená v betonové konstrukci po jejich aplikaci již nemůže vysychat. Je tedy třeba opět zabránit vztlínání vody do betonové konstrukce a dbát na její obsah v konstrukci v době aplikace nátěru.

Nátěry jsou často využívány při sanaci poškozených betonových konstrukcí. Vzhledem k jejich fyzikálním vlastnostem jsou některé nátěry s filmem o tloušťce alespoň 3 mm schopné přemostovat trhliny. Tyto systémy nátěrů je možné využít například u podlah garáží. [7, 11]



Obr. 5 - Příklad provedení nátěru [22]

Nátěry je možné rozdělit do tří skupin:

- Akrylátové laky,
- polyuretanové elastomery,
- epoxidové laky.

Akrylátové laky

Jedná se o plastické látky, které jsou vyráběny jako homopolymery nebo jako kopolymery. Jejich vlastnosti jsou závislé na druhu monomeru nebo komonomeru a na způsobu přípravy.

Jsou využívány především pro svou odolnost vůči povětrnosti, transparentnost a stálost na světle. Obvykle jsou dostupné ve formě nátěru, který je aplikován na betonový povrch. Používají se vodní a akrylátové disperze ředitelné vodou.

Polyuretanové elastomery

Polyuretanové elastomery se vyrábí adiční polymerací polyizokyanátů a vícemocných alkoholů. Využívají se pro svou dobrou adhezi, pěkný lesk, dobrou odolnost proti vodě a malou hořlavost.

Tyto nátěry se aplikují válcováním, litím nebo vstřikováním. Lití vždy probíhá ve dvou vrstvách. Po aplikaci nátěru na betonový povrch a po jeho zaschnutí se používá buď ultrafialové nebo infračervené záření, které vytvoří krásný lesklý povrch odolný proti opotřebení.

Epoxidové laky

Epoxidové laky jsou tvořeny směsí epoxidových pryskyřic a rozpouštědel. Jedná se o dvousložkové systémy na bázi epoxidových pryskyřic. Ty jsou dobře rozpustné v ketonech, esterech, chlorovaných uhlovodících nebo v lakařských rozpouštědlech.

Jsou charakteristické jednoduchou údržbou, odolností a zároveň estetickým vzhledem. Ve směsi s některými fenolickými a aminovými pryskyřicemi je možné epoxidové laky vytvrzovat za zvýšených teplot. Produktem takto vytvrzeného laku je velmi tvrdý a zároveň pružný a chemicky odolný film, který má dobrou soudržnost s podkladem.

Stále častěji jsou využívány vodou ředitelné epoxidové nátěry, které jsou charakteristické výbornou přilnavostí k podkladu a vysokou chemickou korozní odolností.

[9]

2.3 Způsoby ověřování prodloužené trvanlivosti betonových vzorků

Dle normy ČSN EN 1504-2 jsou pro jednotlivé typy povrchové ochrany betonových konstrukcí definovány možné účely jejich použití, jednotlivé funkční vlastnosti, které lze pro daný typ použití vyžadovat a k nim odpovídající zkoušky.

Použití, která lze u jednotlivých typů povrchové ochrany vyžadovat, jsou:

- Ochrana proti vnikání,
- regulace vlhkosti,
- fyzikální odolnost,
- chemická odolnost,
- zvýšení odporu.

[12]

2.3.1 Hydrofobní impregnace

Určená použití hydrofobních impregnací jsou ochrana proti vnikání, regulace vlhkosti a zvýšení odporu. Jednotlivé funkční vlastnosti jsou pak děleny na ty, které jsou pro určená použití povinné a na ty, které jsou pouze pro „určitá určená použití“. Ve zmíněné normě není bohužel definován význam slovního spojení „určité určené použití“. Tento nepovinný parametr by měl určit autor projektu podle konkrétních podmínek. Například podmínku odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazovacích solí má smysl vyžadovat pouze u konstrukcí, které jsou tomuto vlivu vystaveny. [7]

Mezi funkční vlastnosti, vždy vyžadované při použití hydrofobních impregnací, se řadí:

- Hloubka průniku,
- absorpce vody a odolnost proti alkáliím,
- rychlost sušení hydrofobní impregnace.

Funkčními vlastnostmi, které je potřeba splnit pouze v určitých případech, jsou:

- Úbytek hmotnosti po střídavém působení mrazu a rozmrazovacích solí,
- difúze chloridových iontů (pouze pro účel ochrany proti vnikání).

[7, 12]

Hloubka průniku

Hloubka průniku se měří na betonových zkušebních krychlích o hraně 100 mm, jejichž vodní součinitel je 0,7. Vzorky musí zrát 28 dní a musí být uloženy v suchém prostředí. Úprava hydrofobní impregnací musí odpovídat EN 13579. Po rozlomení krychle se její lomová plocha postříká vodou. Za hloubku hydrofobní impregnace se považuje hloubka suchého pásma měřená s přesností na 0,5 mm. Hydrofobní impregnace se dělí na dvě třídy podle hloubky průniku, kdy rozhodující mez je 10 mm. [12]

Absorpce vody a odolnost proti alkáliím

Zkouška absorpce vody a odolnosti proti alkáliím je stanovena v normě EN 13580. Jejím cílem je stanovení absorpčního poměru impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních krychlí a sledování vlivu dlouhodobého vystavení impregnovaných krychlí alkáliím. Pro její provedení je třeba zhotovit devět krychlí o hraně 100 mm s vodním součinitelem 0,45. Vnitřní povrchy forem nesmí být opatřeny olejem nebo odformovacím prostředkem.

Šest zkušebních krychlí je ošetřováno po dobu 7 dnů v laboratorním prostředí a zbylé tři krychle jsou umístěny do sušárny s teplotou 105 ± 5 °C po dobu 7 dnů. Dalším krokem je impregnace tří krychlí uložených v laboratorním prostředí. Je potřeba zvážit hmotnost každé krychle, ponořit ji jednou stranou do impregnačního prostředku na 120 s, po vyjmutí nechat přebytečný roztok okapat a následně opět zvážit. Takto je možné získat spotřebu impregnačního prostředku. Postup se zopakuje pro všechny zbývající strany krychlí a vypočte se střední hodnota spotřeby roztoku. Následně jsou krychle podloženy tak, aby bylo umožněno proudění vzduchu kolem všech jejich stran a uloží se do digestoře s vypnutým ventilátorem po dobu 48 h. Poté jsou impregnované i neimpregnované krychle přemístěny do oddělených, vzduchotěsně uzavřených schránek nad nasyceným roztokem síranu draselného.

Zkoušku absorpce vody je možné provádět 14 dnů po provedení impregnace. Tři impregnované a tři neimpregnované krychle je potřeba zvážit (i_1). Poté jsou ponořeny do destilované vody tak, aby hladina vody byla nad krychlemi 25 ± 5 mm. Krychle je třeba uložit na vhodné podložky, aby bylo umožněno nasákání vody ze všech jejich stran. Neimpregnované krychle jsou vytaženy z vody po $1,0 \pm 0,02$ h, jejich povrch je osušen utěrkou a následně jsou zváženy (i_2). U impregnovaných krychlí je proveden stejný postup, s tím rozdílem, že vytažení z vody je třeba provést po $24 \pm 0,1$ h.

Pro jednotlivé impregnované krychle se přírůstek hmotnosti vypočte ze vztahu:

$$I_t = \frac{i_2 - i_1}{\sqrt{24} \times 0,06} \quad [g/(m^2 \cdot h^{0,5})]$$

Obdobně se přírůstek hmotnosti vypočte pro neimpregnované krychle:

$$I_u = \frac{i_2 - i_1}{\sqrt{24} \times 0,06} \quad [g/(m^2 \cdot h^{0,5})]$$

Následně je z vypočítaných hodnot možné určit absorpční poměr:

$$AR = \frac{I_{tm}}{I_{um}} * 100 \quad [\%]$$

Kde I_{tm} a I_{um} jsou střední hodnoty rychlosti přírůstku hmotností.

Po vytažení z vody a zvážení hmotnosti se impregnované krychle vloží do nádoby s roztokem hydroxidu draselného (5,6g/l) tak, aby byly celé ponořené a bylo umožněno nasákání ze všech stran. Nádoby se přikryjí folií, aby nedocházelo k odpařování roztoku a impregnované vzorky se nechají v roztoku po dobu 21 dnů. Po vyjmutí se krychle nechají vysychat v laboratorním prostředí, dokud jejich hmotnost není shodná s hmotností před zahájením zkoušky ponořením ($i_1 \pm 2$ g). Následuje opakování zkoušky ponořením a výpočet rychlosti přírůstku hmotnosti jednotlivých krychlí po alkalickém testu. Na závěr se vypočte absorpční poměr:

$$AR_{alk} = \frac{I_{tm(alk)}}{I_{um}} \cdot 100 \quad [\%]$$

[13]

Zkouška hydrofobní impregnace sušením

Zkouška hydrofobní impregnace sušením je popsána v normě EN 13579. Cílem zkoušky je stanovit koeficient rychlosti sušení porovnáním rychlostí sušení impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních krychlí.

Příprava zkušebních těles probíhá stejně jako v případě zkoušky absorpce vody a odolnosti proti alkáliím. Proběhne výroba devíti zkušebních krychlí o hraně 100 mm z nichž tři budou impregnovány hydrofobní impregnací. Způsob a délka ošetřování, nanášení impregnace a následné sušení po dobu 48 ± 1 h jsou shodné s předchozí zkouškou.

Zkouška je prováděna na třech impregnovaných a třech neimpregnovaných zkušebních krychlích. U neimpregnovaných zkušebních krychlí je potřeba zahájit zkoušku ihned po ukončení ošetřování. S impregnovanými zkušebními krychlemi lze zkoušku provádět 48 h po impregnaci.

Neimpregnované zkušební krychle je třeba před zahájením zkoušky zvážit (d_0). Následně jsou umístěny do komory s řízeným prostředím s teplotou 30 ± 2 °C a relativní vlhkostí 40 ± 5 %. Další vážení probíhá po $6 \pm 0,1$ h (d_1) a poslední po uplynutí $18 \pm 0,1$ h (d_2). Na základě těchto údajů se stanoví rychlost sušení jednotlivých krychlí:

$$D_u = \frac{d_1 - d_2}{18 \times 0,06} \quad [g/(m^2h)]$$

U impregnovaných krychlí je postup obdobný. Tři krychle jsou zváženy (d_0) a umístěny do komory s řízeným prostředím se stejnými parametry, jako u neimpregnovaných. Po $24 \pm 0,1$ h proběhne další vážení (d_1). Pokud je hmotnost (d_1) menší než hmotnosti krychlí před provedením impregnace (W_t), ponechají se v komoře dalších $24 \pm 0,1$ h a opět se zváží (d_2). V případě, že $d_1 > W_t$, zkušební krychle zůstávají v komoře a váží se, dokud se hmotnost d_1 nesníží na nižší hodnotu než je W_t . Poté zkouška pokračuje stejně, jako

v předchozím případě, ponecháním krychlí v komoře dalších $24 \pm 0,1$ h a zvážení hmotnosti d_2 . Rychlost sušení impregnovaných krychlí se stanoví ze vztahu:

$$D_t = \frac{d_1 - d_2}{24 \times 0,06} \text{ [g/(m}^2\text{h)]}$$

Na závěr je třeba stanovit koeficient rychlosti sušení:

$$DRC = \frac{D_{tm}}{D_{um}} * 100 \text{ [%]}$$

Kde D_{tm} a D_{um} jsou střední hodnoty rychlosti sušení. [14]

Stanovení úbytku hmotnosti hydrofobizovaného betonu po střídavém působení mrazu a rozmrazovacích solí

Tato zkouška je vyžadována pouze v případě, kdy lze předpokládat budoucí vystavení impregnovaných konstrukcí rozmrazovacím solím.

Zkouška je prováděná za účelem porovnání ztrát hmotností a poškození impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních krychlí. Účinnost hydrofobního impregnačního roztoku je dána rozdílem mezi počtem cyklů u impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních krychlí potřebných ke stejné hmotnostní ztrátě.

Vyrobí se osm betonových krychlí o hraně 100 mm s vodním součinitelem 0,7, které jsou ošetřovány po dobu 28 dní. Na jejich výrobu nesmí být použit olej ani odformovací prostředek. Po uplynutí této doby jsou krychle vyjmuty z nádrže, omyty pitnou vodou a očištěny jemným kartáčem. Následně se zkušební krychle musí klimatizovat po dobu minimálně 60 dnů v prostředí s teplotou 21 ± 2 °C a relativní vlhkostí 60 ± 10 %.

Po ošetřování jsou čtyři zkušební krychle impregnovány. Postup impregnace je stejný, jako u předchozích zkoušek. Po jednotlivých stranách jsou krychle namáčeny do impregnačního roztoku. Schnutí probíhá po dobu 14 dnů v prostředí s teplotou 21 ± 2 °C a relativní vlhkostí 60 ± 10 %. Musí být umožněn přísun vzduchu ke všem stranám krychlí.

Den před zahájením zkoušky je třeba zvážit hmotnost všech osmi zkušebních vzorků (W_0). Následně se krychle umístí do čtyř schránek stranou, která nebyla ve styku s bedněním, kolmo ke dnu. Schránky se naplní 3% roztokem chloridu sodného tak, aby jeho hladina byla 20–30 mm nad horní hranou krychle. Po uplynutí 24 h proběhne další vážení hmotnosti vzorků (W_e), na jejímž základě se vypočítá množství absorbované kapaliny:

$$C_{abs} = \frac{W_e - W_0}{W_e} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Následně se určí pro impregnované a neimpregnované krychle jeho střední hodnota

$C_{abs,m}$.

Po stanovení W_e se schránky se zkušebními vzorky naplněné roztokem s uzavřenými víky umístí do mrazicí komory. Poté probíhá cyklus zmrazování a rozmrazování. Cyklus je zahájen fází chlazení/mrazení trvající 16 h, při které nesmí teplota vzduchu klesnout pod $-25\text{ }^\circ\text{C}$. V další fázi se komora zaplaví vodou o teplotě $21 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ do výšky $25 \pm 5\text{ mm}$ pod okraj schránek. Tato fáze trvá 8 hodin. Z toho posledních 15 minut probíhá odčerpání vody z komory. V průběhu procesu rozmrazování musí voda v komoře cirkulovat a udržovat stálou teplotu. Takto proběhne 50 cyklů.

Po každých 5 cyklech proběhne vizuální posouzení míry degradace krychlí, jejich očištění jemným tlakem kartáče a následné osušení papírovou utěrkou. Proběhne zvážení hmotností jednotlivých krychlí (W_n , $n = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$ – dle počtu cyklů). Roztok chloridu sodného ve schránce se vždy vymění za nový o teplotě $21 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, krychle se umístí zpět do schránek do mrazicí komory a následuje dalších 5 cyklů.

Podle naměřených hodnot se stanoví změna úbytku hmotnosti (ΔW_n):

$$W_n = \frac{W_n - W_0}{W_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Stanoví se střední hodnoty ($\Delta W_{n,m}$) impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních vzorků. Je možné zanedbat jednu hodnotu s velkou odchylkou. Ty se pak vynesou do grafu pro jednotlivé počty cyklů. Na závěr se podle grafu vypočítá rozdíl (ΔC) mezi dosaženým počtem cyklů u impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních krychlí. Hodnota je vzdálenost průsečíků křivek s vodorovnou osou znázorňující nulový úbytek hmotnosti oproti počátečnímu stavu. [15]

Difúze chloridových iontů

Pokud je kapilární absorpce vody menší než $0,01\text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$, nelze předpokládat difúzi chloridových iontů. V opačném případě, pokud je tato funkční vlastnost vyžadována, probíhá zkouška podle národních norem a národních předpisů.

2.3.2 Impregnace a nátěry

U impregnací a nátěrů se dělí požadavky na jednotlivé funkční vlastnosti podle účelu jejich použití. Impregnace mohou zajišťovat ochranu proti vnikání a fyzikální odolnost betonových konstrukcí. Účely použití nátěrů jsou ochrana proti vnikání, regulace vlhkosti, zvýšení odporu, fyzikální odolnost a chemická odolnost.

Způsoby provádění zkoušek funkčních vlastností jednotlivých účelů jsou popsány v normách. Jelikož se tato bakalářská práce zaměřuje na ověřování zvýšené trvanlivosti betonových konstrukcí po aplikaci hydrofobních impregnací, provádění zkoušek funkčních vlastností impregnací a nátěrů nebude podrobně popsáno. [7, 12]

2.4 Příklady provedených výzkumů

Na téma povrchové ochrany betonových konstrukcí již byla provedena spousta výzkumů. Jeden ze dvou níže zmíněných výzkumů se věnuje porovnání vlivu akrylátových a epoxidových nátěrů. Druhý porovnává vliv oligomerních siloxanů a silanů. Nebyly však provedeny téměř žádné výzkumy impregnačních směsí obsahujících lithium.

2.4.1 Coatings for Concrete Protection against Agressive Environments

Výzkum byl prováděn na třech odlišných betonových směsích, které se lišily vodním součinitelem a typem cementu.

Table 3 Composition of the concretes.

Materials	Concrete I-A	Concrete I-B	Concrete IV
Cement CEM I (kg/m ³)	320	500	-
Cement CEM IV (kg/m ³)	-	-	320
Gravel 5 – 10 (kg/m ³)	796	888	814
Sand 0 – 5 (kg/m ³)	940	690	898
Water (kg/m ³)	181	184	180
Superplasticizer (kg/m ³)	-	5	-
w/c	0.60	0.40	0.60

Obr. 6 - Složení betonových zkušebních těles [16]

Zkušební tělesa z betonu I-A a I-B byla opatřena dvěma typy impregnačních nátěrů – akrylátových a epoxidových. Dále byla vyrobena referenční zkušební tělesa ze všech tří betonových směsí, která zůstala bez povrchové ochrany.

Byla provedena zkouška hloubky průniku chloridů a zkouška odolnosti proti působení síranů.

U první provedené zkoušky se hloubka průniku chloridů stanovuje kolorimetrickou metodou využívající dusičnan stříbrný. Je změřena průměrná hloubka penetrace a na základě naměřených hodnot je vypočítán difuzní koeficient.

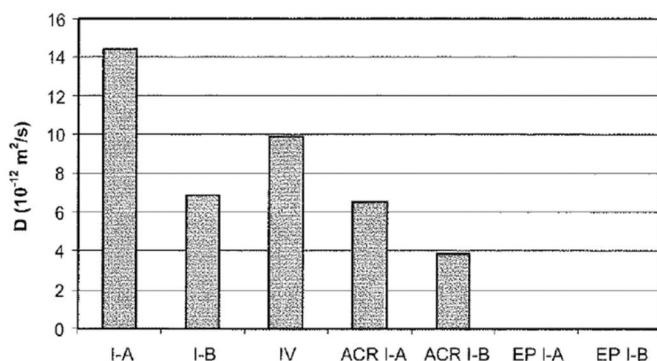


Fig. 3 Coefficients of diffusion in a non-steady regime for different concretes and different paintings.

Obr. 7 - Výsledky zkoušky hloubky průniku chloridových iontů [16]

Chloridy nepronikly skrz epoxidový nátěr ani u jedné z betonových směsí. Akrylátové nátěry měly výrazný vliv na snížení hloubky penetrace chloridů. U betonů bez povrchové úpravy se velmi projevilo snížení vodního součinitele. Druh použitého cementu má také zásadní vliv na porozitu a nasákavost.

Při zkoušce odolnosti proti působení síranů jsou zkušební tělesa ponořena do roztoku síranu sodného po dobu 16-18 h, následně jsou vysušena při teplotě 50 °C do ustálení jejich váhy. Takto je provedeno 8 cyklů. Vliv síranů je hodnocen na základě úbytku váhy jednotlivých zkušebních těles.

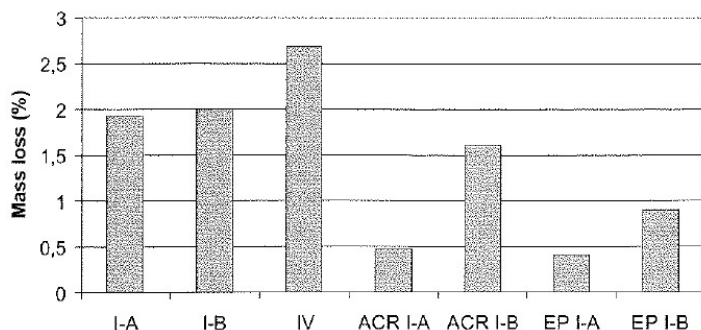


Fig. 4 Mass losses for different concretes and different coatings.

Obr. 8 – Výsledky zkoušky odolnosti proti síranům [16]

Nejlepších výsledků opět dosahují tělesa s epoxidovými nátěry. Akrylátové nátěry mají na odolnost také nezanedbatelný vliv. Změna vodního součinitele u betonových těles bez povrchové úpravy se na úbytku hmotnosti neprojevila. Naopak při použití povrchové úpravy tělesa s nižším vodním součinitelem dosahují horších výsledků.

Zkušební tělesa s povrchovou ochranou v obou případech dosahovala lepších výsledků než zkušební tělesa bez povrchové ochrany. [16]

2.4.2 Hydrofobní impregnace betonu – prostředek pro zvýšení odolnosti betonu proti účinkům CH.R.L.

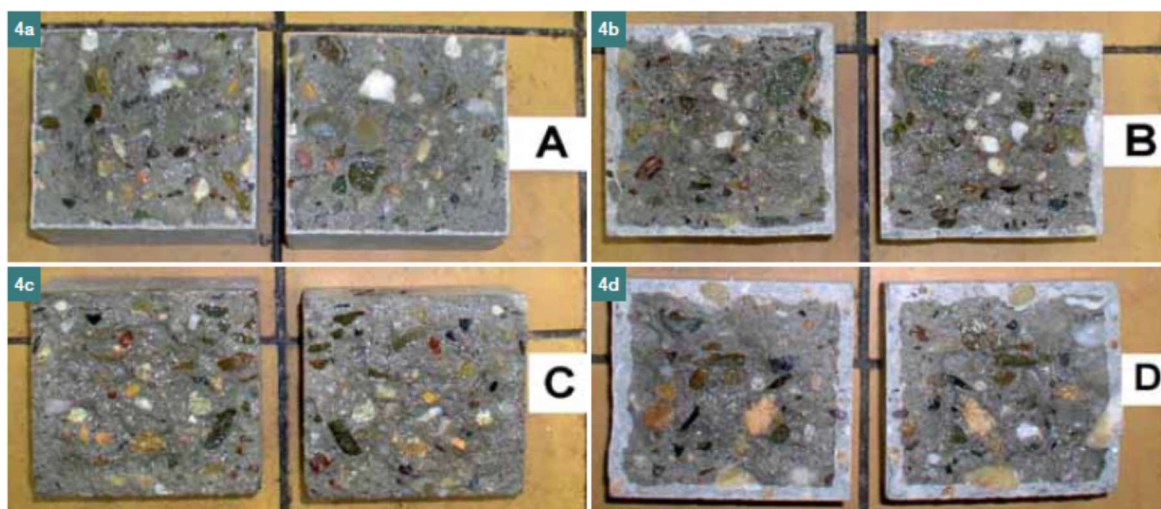
Byly provedeny čtyři zkoušky – zkouška rychlosti sušení, zkouška absorpce vody, zkouška odolnosti impregnovaného povrchu proti účinkům alkálií a stanovení hloubky průniku hydrofobní impregnace do betonu. Zkoušky probíhaly dle platných norem. Jednotlivé zkoušky jsou popsány v části 2.3.1. Zkušební tělesa byla opatřena čtyřmi druhy hydrofobních impregnací, z toho dvě byly na bázi oligomerních siloxanů a dvě na bázi silanů.

Pro zkoušku rychlosti sušení, zkoušku absorpce vody a zkoušku odolnosti proti alkáliím byla použita zkušební tělesa ve tvaru krychle o hraně 100 mm s vodním součinitelem 0,45. Pro měření hloubky průniku impregnace byla vyrobena zkušební tělesa stejného tvaru s vodním součinitelem 0,7.

Tab. 1 Výsledky zkoušek ■ Tab. 1 Test results

Parametr	Hydrofobizační prostředek			
	A	B	C	D
Báze prostředku	oligomerní siloxany	silany	oligomerní siloxany	silany
Spotřeba nátěrů na zkuš. vzorky [g/m ²]	450	420	400	320
Součinitel rychlosti sušení [%]	Naměřeno	48,3	56,2	25,0
	Požadavek normy	třída I: > 30 %; třída II: > 10 %		
Absorpční poměr [%]	Naměřeno	5,9	5	18,6
	Požadavek normy	< 7,5 %		
Absorpční poměr po vystavení vlivu alkálií [%]	Naměřeno	12,4	9,1	36,3
	Požadavek normy	< 10 %		
Hloubka průniku [mm]	Naměřeno	1 až 1,5	4 až 6,5	0
	Požadavek normy	třída I: < 10 mm; třída II: ≥ 10 mm		

Obr. 10 - Výsledky zkoušek [8]



Obr. 9 - Hloubka průniku impregnačního prostředku [8]

Požadavkům normy na hloubku průniku vyhověly pouze hydrofobní impregnace na bázi silanů. Hydrofobizační prostředek C nevyhověl žádnému z požadovaných parametrů a nebyla u něj zaznamenána ani žádná hloubka průniku. Hydrofobizační prostředek A vyhověl

požadavkům na součinitel rychlosti sušení a absorpci vody. Hydrofobizační prostředky B a D, oba na bázi silanů, vyhověly všem požadovaným parametrům.

Následně byla provedena zkouška odolnosti betonu proti cyklickému působení mrazu a rozmrazovacích látek s hydrofobní impregnací v předchozích zkouškách označenou A. Byla vytvořena tři referenční zkušební tělesa bez povrchové úpravy a tři zkušební tělesa, na které byla aplikována hydrofobní impregnace. Po provedení 125 cyklů je účinek hydrofobní impregnace velmi znatelný.

Tab. 4 Výsledek zkoušky Ch.R.L. ■ Tab. 4 The test result resistance against de-icing salts with freeze-thaw cycles

Označení vzorku	Povrchová nasák. 15 min. [g/m ²]	Odpad po počtu cyklech [g/m ²]				
		25	50	75	100	125
1-A	164	300	874	1 594	2 069	2 266
2-A	98	344	1 207	1 763	2 282	2 588
3-A	82	0	0	795	2 007	2 347
Průměr	115	215	693	1 384	2 120	2 400
1-B	55	0	0	0	16	33
2-B	28	0	0	0	39	189
3-B	28	0	0	0	33	156
Průměr	37	0	0	0	30	126

Obr. 11 - Výsledky zkoušky CH.R.L. [8]

Na základě výsledků provedených zkoušek lze říct, že hydrofobní impregnace mají zásadní vliv na trvanlivost betonu. Je však důležité vybrat správný typ impregnace pro dané použití a dodržet všechny zásady pro její aplikaci. [8]

2.5 Příklady použití impregnačních prostředků v praxi

Hydrofobní impregnace se ve stavitelství využívají již delší dobu. Se stavbami, kde byly použity, se setkáváme téměř denně. Nejčastěji jsou aplikovány na povrch betonových mostů, kde výrazně prodlužují jejich životnost a odolnost proti účinkům CH.R.L. Dále je možné se s hydrofobními impregnacemi setkat například na betonových podlahách ve vytížených prostorech atd.



Obr. 12 - Provádění impregnace mostu ve Vchynici [17]

Prvním mostem v české republice, kde byla použita silanová hydrofobní impregnace Sikagard-705L, je dálniční most Vchynice na dálnici D8. Aplikace impregnačního prostředku probíhala v srpnu roku 2011 za pomoci vysokozdvížných plošin nástřikem 4 vrstev. [17]

Dalšími, novodobějšími, realizacemi v České republice jsou například podlahy v nákupním centru OC Stromovka, v obchodě Carollinum a v administrativní budově Pankrác Prime Office Building. Na ochranu betonového povrchu podlah byla použita hydrofobní impregnace HTC Stain Protection obsahující silany a siloxany. [18]



Obr. 13 - Impregnovaná betonová podlaha v OC Stromovka [18]

3 Experimentální část

Cílem experimentální část bakalářské práce je zhodnocení vlivu hydroxidu lithného na trvanlivost betonu. Za tímto účelem bude provedena zkouška nasákavosti, odolnost proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování a bude ověřen vliv impregnace na povrchovou pórovitost.

3.1 Impregnace

Roztoky alkalických silikátů se řadí mezi hydrofobní impregnace. Po jejich aplikaci na betonový povrch roztok proniká do betonových pórů a dochází k chemické reakci s vápenatými ionty obsaženými ve ztuhlé cementové pastě za vzniku hydrátu křemičitanu vápenatého (C-S-H). Ten postupně hydratuje a vytváří krystalickou strukturu, díky které dochází ke snížení nasákavosti povrchu betonu.

Při aplikaci hydrofobních impregnací nedochází k zaplnění pórů a není ovlivněna permeabilita betonu.

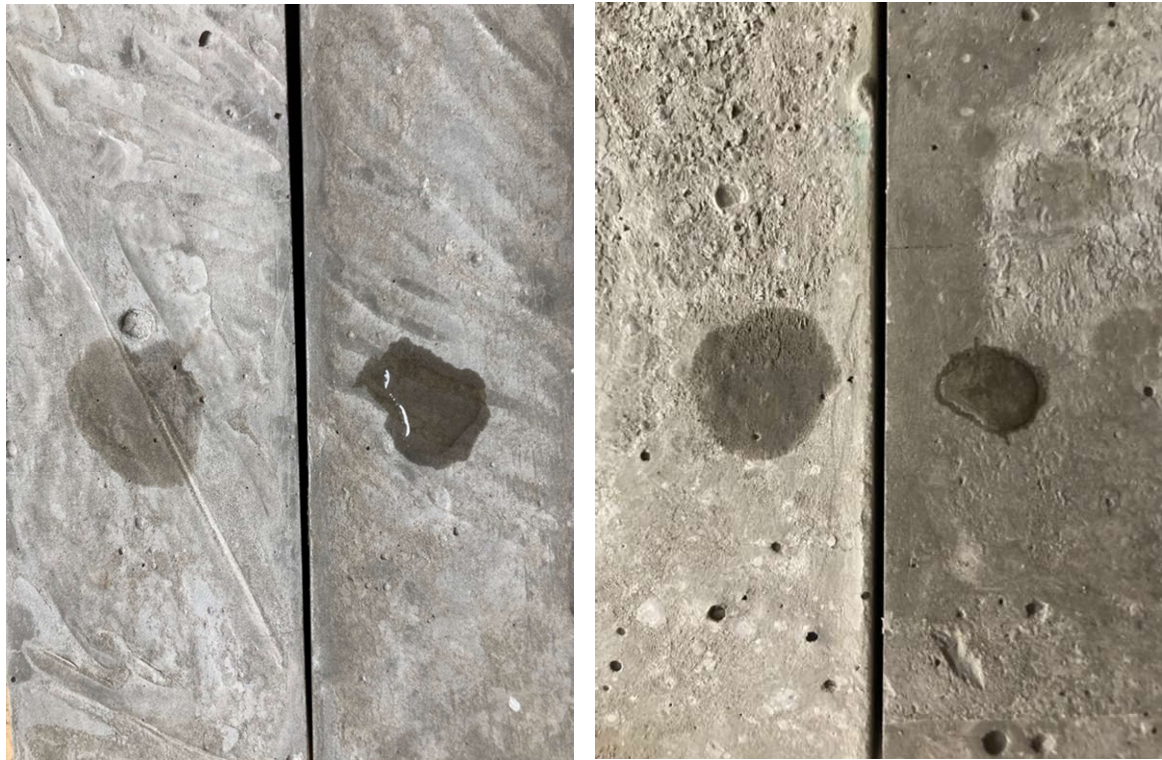
Mezi alkalické silikáty, využitelné za účelem impregnace, patří sloučeniny na bázi sodíku, draslíku a lithia. Alkalickou složku většiny na trhu dostupných sloučenin tvoří sodík. Jsou také nejvíce prozkoumané a je možné o nich dohledat velké množství materiálů. Neznamena to však, že by alkalické silikáty na bázi sodíku měly z výše zmíněných impregnací nejlepší vlastnosti. Například jejich vliv na propustnost chloridů je velmi nízký. Dokonce společně s ionty draslíku mohou přispívat v rozvoji alkalicko-křemičité reakce.

Lithné silikáty naopak představují ochranu před rozvojem alkalicko-křemičité reakce. Spolu s vhodným organickým rozpouštědlem vykazují jejich roztoky v porovnání se sodnými silikáty lepší vlastnosti. Například mají menší povrchové napětí zajišťující větší hloubku průniku roztoku do pórové struktury betonu, po jejich aplikaci je beton více hydrofobní a impregnovaný povrch je odolnější. Ve výzkumech jim však dosud nebylo věnováno mnoho pozornosti.

3.1.1 Impregnační roztok

Jako hydrofobní impregnace je použit roztok hydroxidu lithného. Předpokládá se, že po jeho aplikaci na povrch zkušebních těles dojde ke zvýšení smáčecího úhlu povrchu a povrchových pórů a tím se zásadně sníží nasákavost vody. Zároveň by nemělo dojít ke zmenšení, případně k úplnému vyplnění kapilárních pórů.

Jeho aplikace bude probíhat podle postupu popsaného v části 3.1.3. Výše zmíněné účinky by se měly projevit 24 h po ponoření zkušebních těles do roztoku.



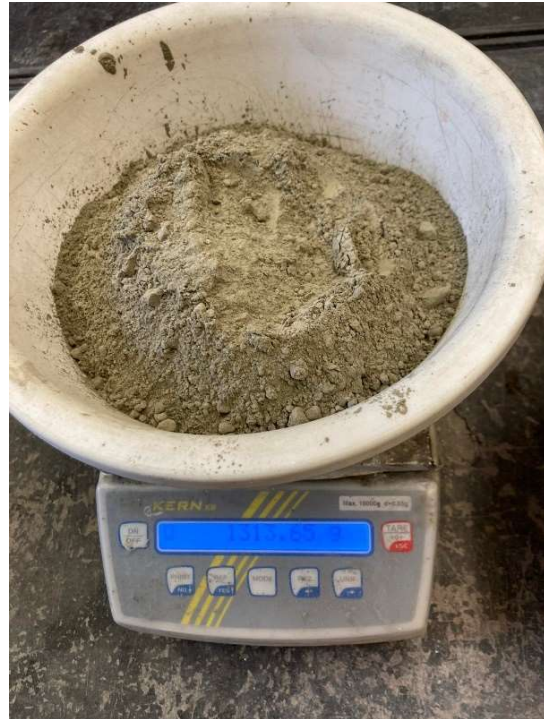
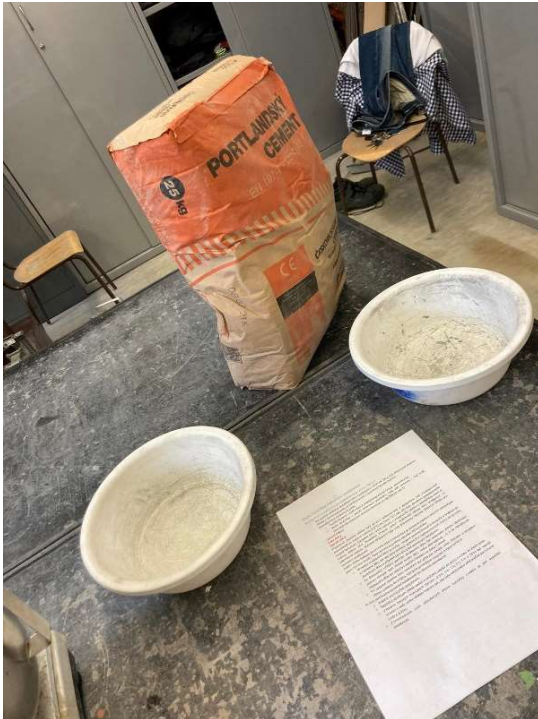
Obr. 14 - Vliv impregnace na velikost smáčecího úhlu – vlevo neimpregnované těleso, vpravo impregnované těleso

Vlevo na obrázku jsou neimpregnovaná zkušební tělesa a vpravo impregnovaná. Na povrch obou zkušebních těles byla ve stejný čas aplikována kapka vody. Vliv impregnace na velikost smáčecího úhlu povrchu je zde patrný. U neimpregnovaných zkušebních těles se kapka okamžitě rozlije po povrchu a vsákne. Kdežto z povrchu impregnovaných zkušebních těles se kapka nerozlévá do stran a vsakuje se výrazně pomaleji. Při naklonění tělesa po jeho povrchu steče.

3.1.2 Zkušební tělesa

Zkoušky probíhají na zkušebních tělesech ve formě kvádrů o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Pro přípravu vzorků je použit cement CEM I 42,5 R (Heidelberg Cement Group, závod Mokrý) a výsledná směs má vodní součinitel 0,28. Na přípravu směsi pro 12 zkušebních těles je potřeba 2656 g cementu a 744 g vody.

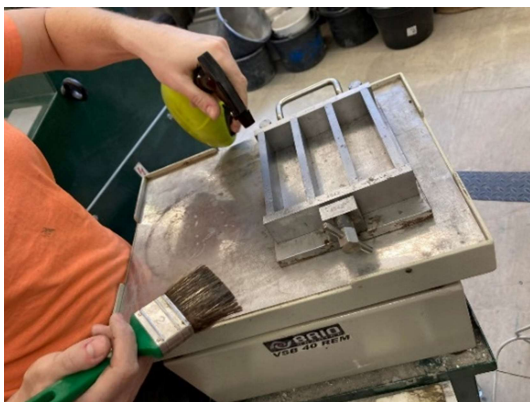
Zkušební tělesa vyrobená pro zkoušku permeability mají rozměry cca 100 x 100 x 50 mm. Pro jejich výrobu z důvodu špatné mísitelnosti směsi ve větším množství byl vodní součinitel zvětšen na 0,3.



Obr. 15 - Vážení jednotlivých složek směsi

Povrch připravených forem je třeba opatřit odbedňovacím prostředkem. Po smíchání cementu a vody v míchačce je vzniklá směs přemístěna do forem. Vždy je třeba naplnit polovinu formy, zavibrovat na vibračním stole, doplnit druhou polovinu, opět zavibrovat a na závěr povrch uhladit hladítkem.

Formy takto naplněné cementovou pastou jsou zabaleny do folie, aby se zabránilo přístupu kyslíku a jsou ponechány 24 h v laboratorních podmínkách. Po uplynutí této doby je ztvrdlá zkušební tělesa potřeba opatrně odbednit tak, aby nedošlo k jejich poškození. Následně jsou zkušební tělesa opět zabalena do folie a vložena do pece s prostředím o teplotě 50 °C. Po uplynutí 72 h je třeba kvádry rozbalit a ponechat v peci volně po dobu dalších 24 h.



Obr. 16 - Plnění forem připravenou směsí



Obr. 19 - Zabalení forem do folie a umístění do pece



Obr. 18 - Odbedňování

Takto byly vytvořeny pro účely této bakalářské práce v průběhu jejího provádění tři sady trámčů, z nichž v každé bylo 12 zkušebních těles, a jedna sada zkušebních těles větších rozměrů, vhodných pro provedení zkoušky permeability, obsahující 12 zkušebních těles.



Obr. 17 - Zkušební tělesa ve formách

3.1.3 Postup impregnace

Před samotným ošetřením povrchu impregnačním prostředkem je třeba obrousit povrchovou vrstvu a následně tělesa očistit. Broušení probíhá ve dvou krocích. Nejprve pomocí brusného papíru o hrubosti 60 a poté 240. Tímto postupem dojde k odstranění zkarbonatované vrstvy na povrchu zkušebních těles. Po broušení je nezbytné tělesa očistit od vzniklého prachu. Takto očištěná zkušební tělesa jsou rozdělena na dvě skupiny – určená k impregnaci a neimpregnovaná, označena příslušnými čísly a zvážena.



Obr. 20 - Broušení zkušebních těles

Následuje proces ošetřování. Zkušební tělesa jsou ponořena do roztoku hydroxidu lithného na vhodné podložky tak, aby byla roztokem obklopena ze všech stran. Zůstanou ponořena po dobu 5 minut, aby se impregnační prostředek vsáknul do pórů do dostatečné hloubky. Po vytažení je třeba pomocí štětce odstranit přebytečnou tekutinu z povrchu. Následně jsou impregnovaná zkušební tělesa zvážena a umístěna na vhodné podložky tak, aby mohl vzduch volně proudit kolem všech jejich stran. Takto uložená zkušební tělesa vysychají v laboratorním prostředí po dobu 24 h.



Obr. 21 - Impregnace zkušebních těles

3.2 Zkouška nasákavosti

Cílem zkoušky nasákavosti je ověřit rychlost nasákání vody u impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních těles na základě rozdílů jejich hmotností před namočením a po uplynutí určité doby a následně výsledky porovnat. Předpokladem je pomalejší nasákání vody u impregnovaných zkušebních těles, zejména v prvních minutách.

3.2.1 Postup

Před namočením je třeba zvážit hmotnost všech zkušebních těles. Následně jsou tělesa vložena do nádoby s vodou na vhodné podložky tak, aby je voda obklopovala ze všech stran a aby hladina vody byla vyšší než horní hrana zkušebních těles.



Obr. 22 - Zkušební tělesa namočená ve vodě

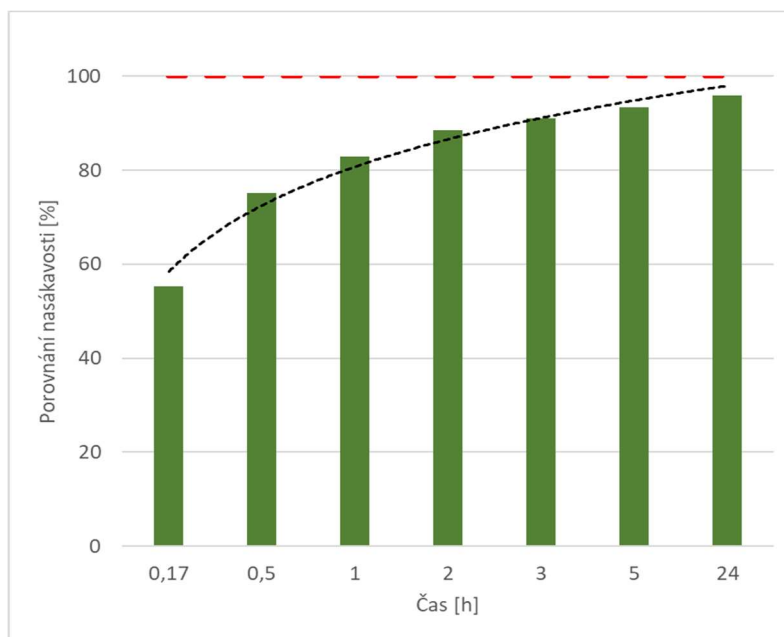
Hmotnosti jednotlivých zkušebních těles jsou měřeny po 10 min, 0,5 h, 1 h, 2 h, 3 h, 5 h a 24 h od chvíle jejich ponoření do vody. Zkušební tělesa jsou v daných časových intervalech vyjmuta z vody, jejich povrch je otřen vlhkým hadrem tak, aby z něj byla odstraněna přebytečná voda, je zvážena a zaznamenána jejich hmotnost a okamžitě poté jsou tělesa opět vložena do vody. Tento postup se opakuje vždy po uplynutí daného časového intervalu od začátku zkoušky.

3.2.2 Výsledky

Pro každý časový interval je stanoven rozdíl hmotnosti zkušebního tělesa oproti jeho počáteční hmotnosti před provedením zkoušky. Z průměru rozdílů hmotností impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních těles oproti jejich hmotnosti před namočením se stanoví jejich procentuální podíl. Následně je možné z výsledků vytvořit graf znázorňující porovnání nasákavosti impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních těles v jednotlivých časových intervalech.

Tato zkouška byla provedena na první sérii zkušebních těles dvakrát. U druhé série byla provedena zkouška nasákavosti. Následně byla tělesa vložena do mrazáku, kde proběhla zkouška odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování a poté opět proběhla zkouška nasákavosti. Třetí série zkušebních těles byla nejprve vložena do mrazáku, kde proběhla zkouška odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování a následně byla provedena zkouška nasákavosti.

Následující grafy znázorňující výsledky jednotlivých zkoušek vyjadřují poměr množství nasáklé vody v impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních těles.

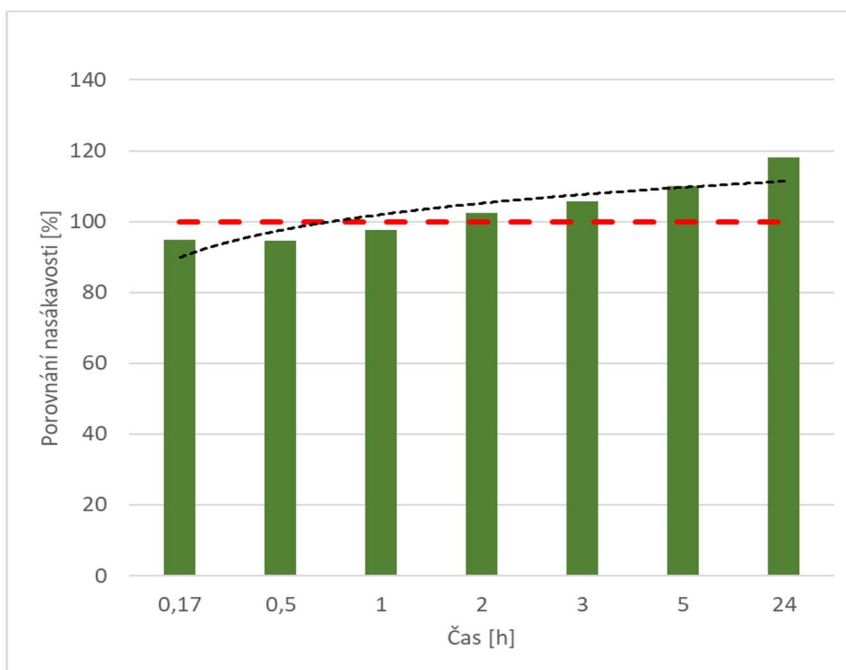


Tab. 1 - Výsledné hodnoty

čas [h]	porovnání nasákavosti [%]
0,17	55,34
0,5	75,13
1	82,84
2	88,45
3	91,10
5	93,43
24	95,85

Graf 1 - Porovnání nasákavosti, první série vzorků, první zkouška

Z grafu je patrné, že impregnovaná zkušební tělesa v první fázi zkoušky nasákávají pouze 55 % množství vody v porovnání s neimpregnovanými zkušebními tělesy. V průběhu času se množství nasáklé vody postupně vyrovnává. Impregnace má tedy největší vliv v prvních hodinách zkoušky.



Tab. 2 - Výsledné hodnoty

čas [h]	porovnání nasákavosti [%]
0,17	94,87
0,5	94,53
1	97,55
2	102,56
3	105,69
5	110,03
24	118,22

Graf 2 – Porovnání nasákavosti, první série, druhá zkouška

Při opakování zkoušky se stejnými zkušebními tělesy o tři týdny později je vliv impregnace již menší, ale v počátcích zkoušky stále patrný. Odlišné výsledky v porovnání s první zkouškou vyplývají z rozdílné vlhkosti zkušebních těles při zahájení zkoušky.

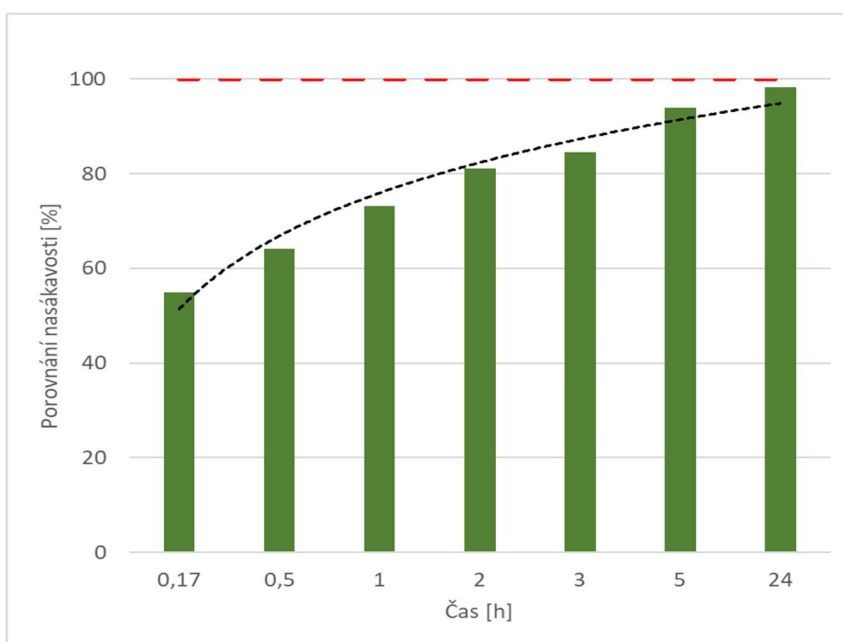
Množství vody, které tělesa dokážou pojmout, je přímo úměrné objemu jejich pórů. Pokud je část objemu pórů již zaplněna vodou, je možné při namočení zaplnit pouze jejich zbývající objem.

Výsledné hmotnosti vzorků 24 h ponořených ve vodě jsou téměř totožné jako jejich hmotnosti po stejné době při první provedené zkoušce. Jelikož zkušební tělesa byla vysušena v laboratorním prostředí a jejich hmotnost před zahájením zkoušky byla vyšší než před první provedenou zkouškou, je zřejmé, že při zahájení druhé zkoušky nebyla zkušební tělesa dokonale suchá a nemohla nasáknout tolik vody jako při první zkoušce. To se projevilo na výsledcích.

Při snaze o vysušení zkušebních těles v peci v prostředí s teplotou 50 °C došlo ke vzniku trhlin. Tělesa byla značně poškozena a nebylo možné zkoušku již opakovat. Byla tedy vyrobena nová sada vzorků.



Obr. 23 - Vzniklé trhliny

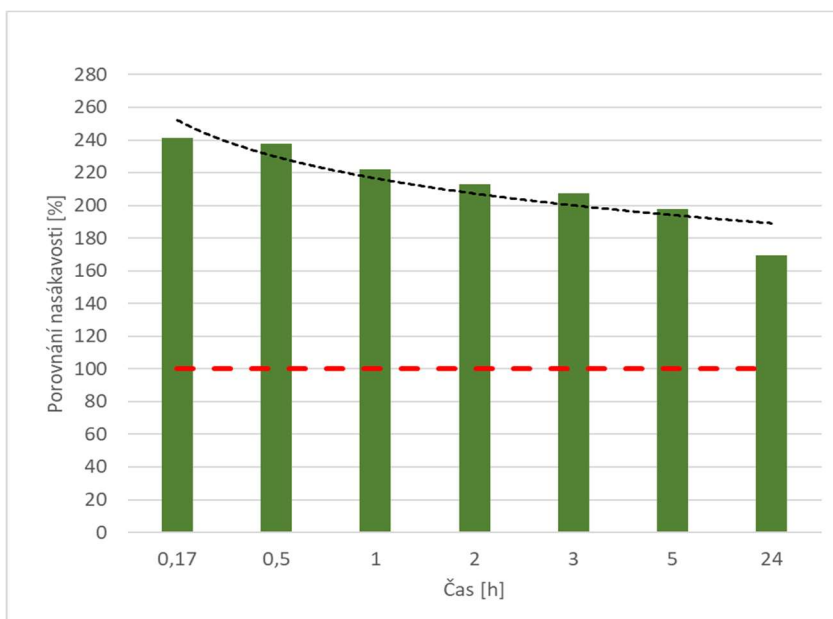


Graf 3 - Porovnání nasákavosti, druhá série, první zkouška

Tab. 3 - Výsledné hodnoty

čas [h]	porovnání nasákavosti [%]
0,17	55,00
0,5	64,15
1	73,13
2	81,16
3	84,56
5	93,93
24	98,30

U první zkoušky druhé série zkušebních těles se opět prokazuje zásadní vliv impregnace na omezení jejich nasákavosti. Po 24 h ponoření ve vodě nasáknou impregnovaná i neimpregnovaná zkušební tělesa téměř stejné množství vody.



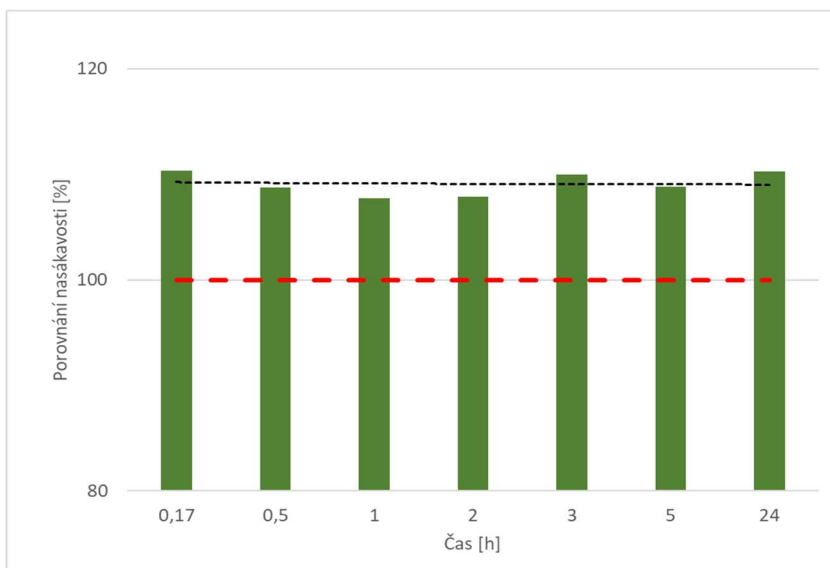
Tab. 4 - Výsledné hodnoty

čas [h]	porovnání nasákavosti [%]
0,17	241,27
0,5	237,98
1	222,06
2	212,95
3	207,55
5	197,87
24	169,29

Graf 4 - Porovnání nasákavosti, druhá série, druhá zkouška

Mezi první a druhou zkouškou nasákavosti druhé série zkušebních těles byla tělesa umístěna do mrazícího boxu, kde proběhla zkouška odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování. Při té došlo ke značnému poškození povrchu impregnovaných zkušebních těles, což mělo zásadní vliv na průběh druhé zkoušky nasákavosti. V počátcích zkoušky nasákávala méně tělesa neimpregnovaná, jejichž povrch poškozen téměř nebyl.

Hmotnosti zkušebních těles před zahájením druhé zkoušky byly v průměru o 16,7 g vyšší než před provedením první zkoušky nasákavosti. Jejich hmotnosti na konci zkoušky však byly, až na jednu výjimku, téměř stejné. Na rozdílný průběh zkoušky měla tedy opět vliv i počáteční vlhkost zkušebních těles.



Tab. 5 - Výsledné hodnoty

čas [h]	porovnání nasákavosti [%]
0,17	110,37
0,5	108,77
1	107,74
2	107,89
3	110,01
5	108,84
24	110,30

Graf 5 - Porovnání nasákavosti, třetí série, první zkouška

Třetí série zkušebních vzorků byla po jejich impregnaci a vysušení umístěna do mrazícího boxu, kde proběhla zkouška cyklického působení mrazu a rozmrazování. Při této zkoušce nedošlo ke značnému poškození povrchu impregnovaných těles, jak tomu bylo u předchozí série. Před zahájením zkoušky nasákavosti však neuplynula dostatečně dlouhá doba od vytažení těles z mrazícího boxu a v jejich pórech zůstalo značné množství vody. To se projevuje i na výsledcích zkoušky, kdy vliv impregnace není žádný a tělesa nasákla mnohem méně vody v porovnání s ostatními zkouškami.

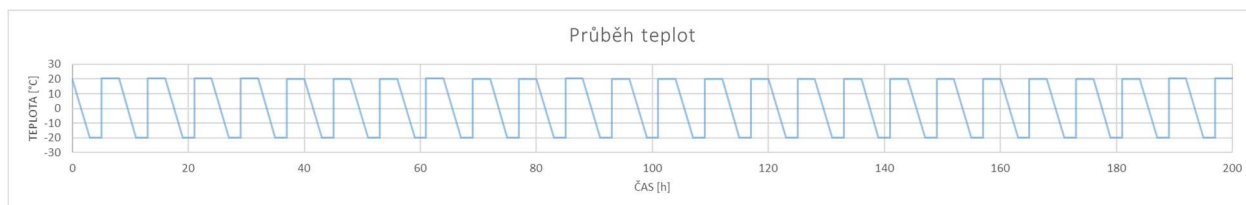
3.3 Zkouška odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování

Touto zkouškou je možné sledovat míru degradace povrchu zkušebních těles po jejich vystavení určitému počtu cyklů mrazu a rozmrazování. Předpokládá se, že povrch impregnovaných zkušebních těles bude po ukončení všech cyklů méně poškozený než povrch neimpregnovaných zkušebních těles.

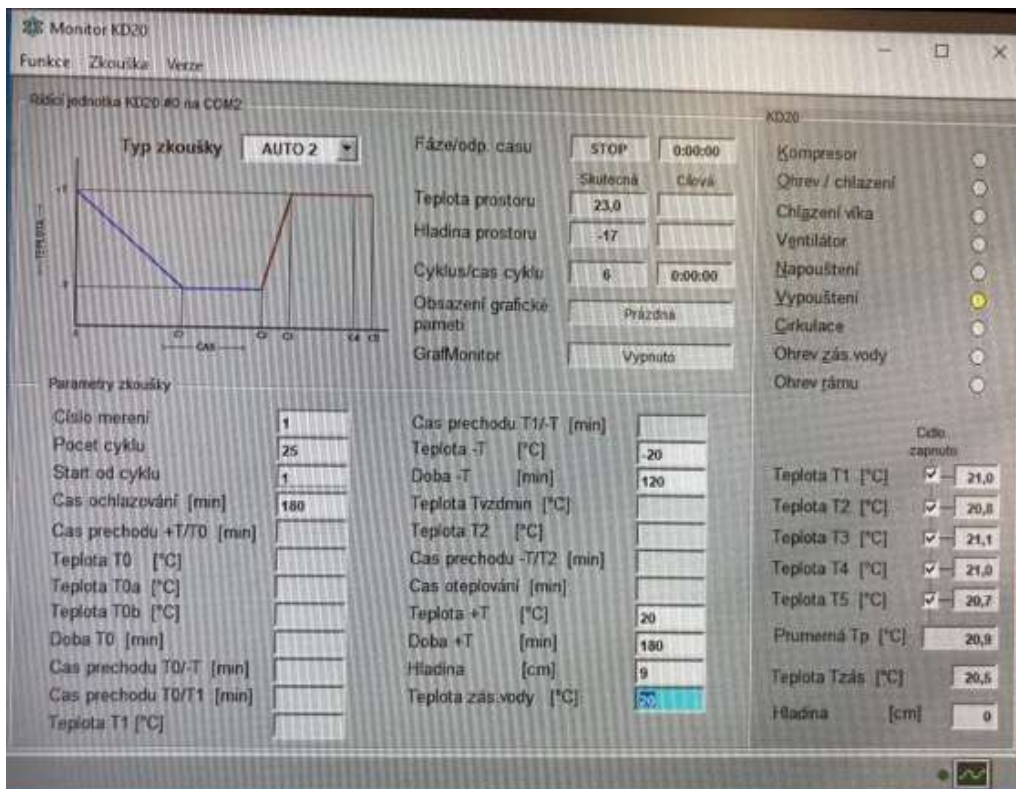
V průběhu zkoušky jsou póry zkušebních těles nasyceny vodou. Při poklesu teploty pod bod mrazu se voda v pórech mění na krystaly ledu a zvětšuje svůj objem až devítinásobně. V důsledku zvětšení objemu vody obsažené v pórech vzniká tlak, který může způsobovat vznik a následný rozvoj trhlin. Tento proces je popsán v kapitole 2.1.2.3.

3.3.1 Postup

Zkušební tělesa se vloží do mrazícího boxu spolu s teplotními čidly. Následně je spuštěno 25 cyklů, při kterých je prostředí mrazícího boxu ochlazováno studeným vzduchem po dobu 180 min, aby bylo dosaženo teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato teplota je udržována po dobu 120 min. Následuje ohřev prostředí napuštěním vody o teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takto napuštěná voda s výškou hladiny 9 cm je v mrazícím boxu udržována po dobu 180 min. Aby bylo možné udržet konstantní teplotu napuštěné vody, po celou dobu fáze ohřevu voda v mrazícím boxu cirkuluje. Na závěr dojde k odčerpání vody a celý cyklus se od začátku opakuje.



Graf 6 - Průběh teplot při zkoušce odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování



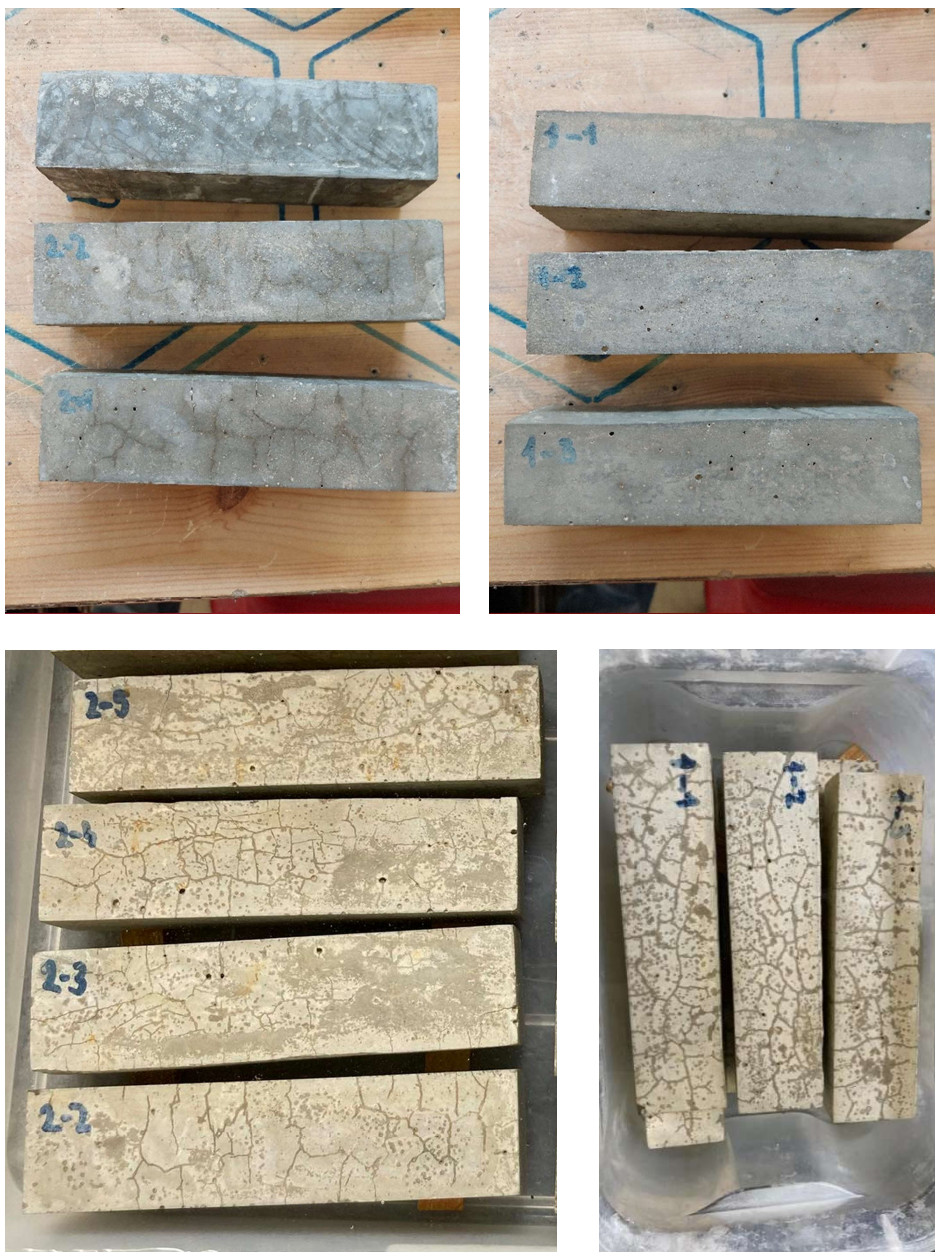
Obr. 25 - Nastavení průběhu cyklů mrazu a rozmrazování



Obr. 24 - Zkušební tělesa umístěna do mrazícího boxu

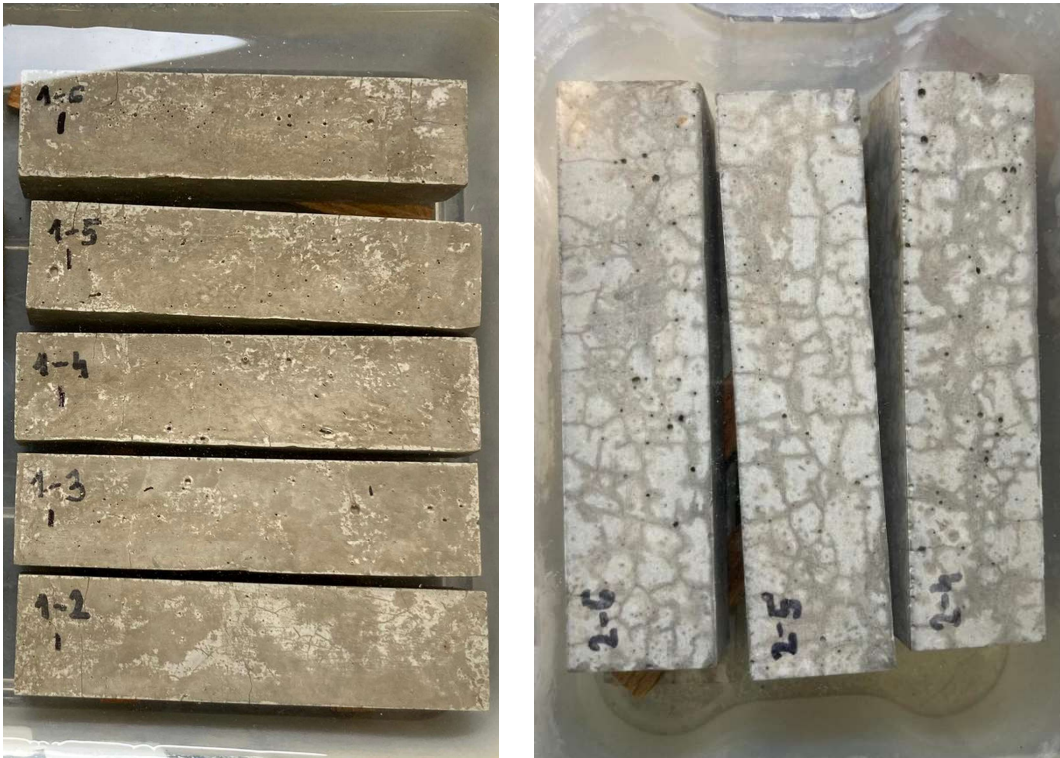
3.3.2 Výsledky

U zkušebních těles, která již jednou prošla zkouškou nasákavosti, se projevil jiný výsledek než u zkušebních těles, která před vložením do mrazícího boxu neprošla žádnou zkouškou. V prvním případě, kdy tělesa již jednou byla namočena, došlo k výrazně většímu poškození povrchu impregnovaných zkušebních těles, zatím co neimpregnovaná zkušební tělesa zůstala téměř bez poškození. Při jejich následném ponoření do vody je však viditelné, že i neimpregnovaná zkušební tělesa byla během zkoušky poškozena.



Obr. 26 - Sada 1 po vytažení z mrazícího boxu a po namočení do vody, zleva impregnovaná a neimpregnovaná zkušební tělesa

Naopak u zkušebních těles, která před vložením do mrazícího boxu neprošla žádnou jinou zkouškou, došlo k poškození povrchu neimpregnovaných těles, zatímco impregnovaná zkušební tělesa zůstala bez viditelného poškození a na povrchu zůstala stále viditelná vrstva impregnačního prostředku. Před provedením druhé zkoušky byla tělesa suchá. Lze se tedy domnívat, že vlivem impregnace došlo k pomalejšímu nasákání vody u impregnovaných zkušebních těles a tím i k jejich výrazně menšímu poškození.



Obr. 27 - Sada 2 po vytažení z mrazícího boxu a ponoření do vody, zleva impregnovaná a neimpregnovaná zkušební tělesa

3.4 Vliv impregnace na povrchovou pórovitost

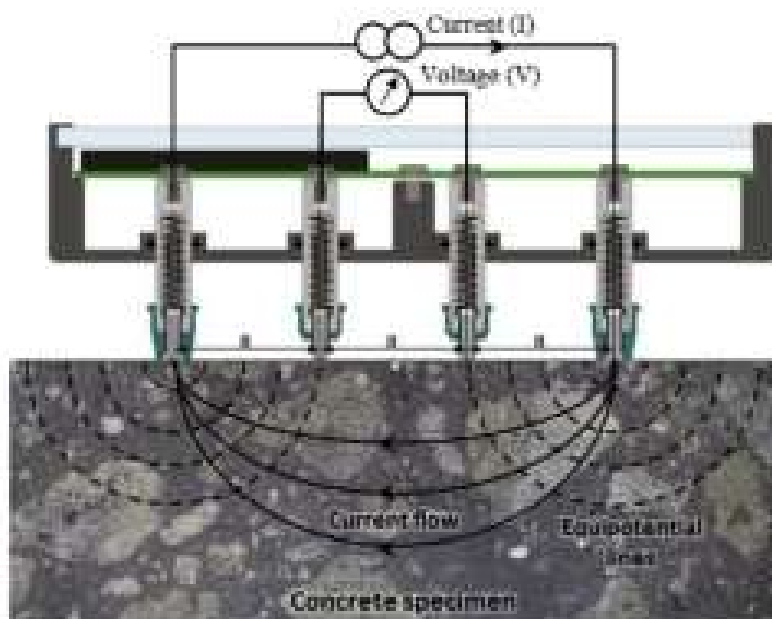
Při zkoušce permeability dochází k měření hloubky průniku vzduchu do pórů zkušebních těles. Po stanovení měrného elektrického odporu zkušebních těles spolu s hloubkou průniku lze určit kvalitu jejich povrchu. Hydrofobní impregnace by, na rozdíl od impregnací a nátěrů, neměla způsobit zmenšení či úplné zaplnění kapilárních pórů betonu. U impregnovaných zkušebních těles se tedy předpokládá zachování míry permeability za současného zvýšení měrného elektrického odporu. [12]

3.4.1 Měřicí přístroje

Přístroj na měření elektrického měrného odporu Resipod

Přístroj pracuje na principu Wennerovy metody. Skládá se ze čtyř sond umístěných vedle sebe ve vzdálenosti 38 mm. Do dvou vnějších sond je vpouštěn elektrický proud a mezi dvěma vnitřními sondami je měřen rozdíl v potenciálu. Proud je přenášen ionty v kapalině obsažené v pórech. Přístroj automaticky přepíná mezi rozpětím proudu 200 μA a 50 μA podle velikosti vnějšího odporu. Měrný odpor se vypočte ze vzorce:

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I} \text{ [k}\Omega\text{cm]}$$

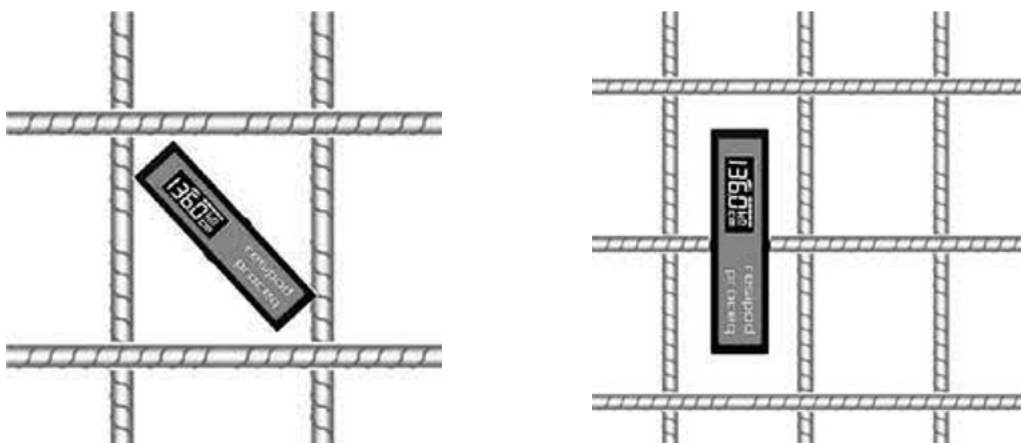


Obr. 28 - Princip měření přístroje Resipod [23]

Před provedením měření je možné ověřit funkčnost přístroje pomocí zkušební destičky. Na destičce jsou dvě zkušební řady. Horní je určena pro plný rozsah 200 μA a spodní řada je určena pro měření s omezeným rozsahem 50 μA .

Na výsledky měření má vliv spousta faktorů. Mezi nejdůležitější se řadí poloha výztuže, velikost kameniva, vliv teploty a vlhkosti a vliv karbonatace.

- Povrch měřeného betonu musí být čistý a případnou v něm obsaženou výztuž je třeba na povrchu vyznačit. Výztuž vede proud mnohem lépe, než okolní beton a může tak zásadně ovlivnit výsledky měření. Vhodná je orientace přístroje diagonálně vůči prutům výztuže. Pokud jsou pruty příliš blízko u sebe a nelze se jim vyhnout, vliv výztuže se minimalizuje tak, že přístroj bude umístěn kolmo na prut výztuže a ten se bude nacházet ve středu přístroje mezi sondami.



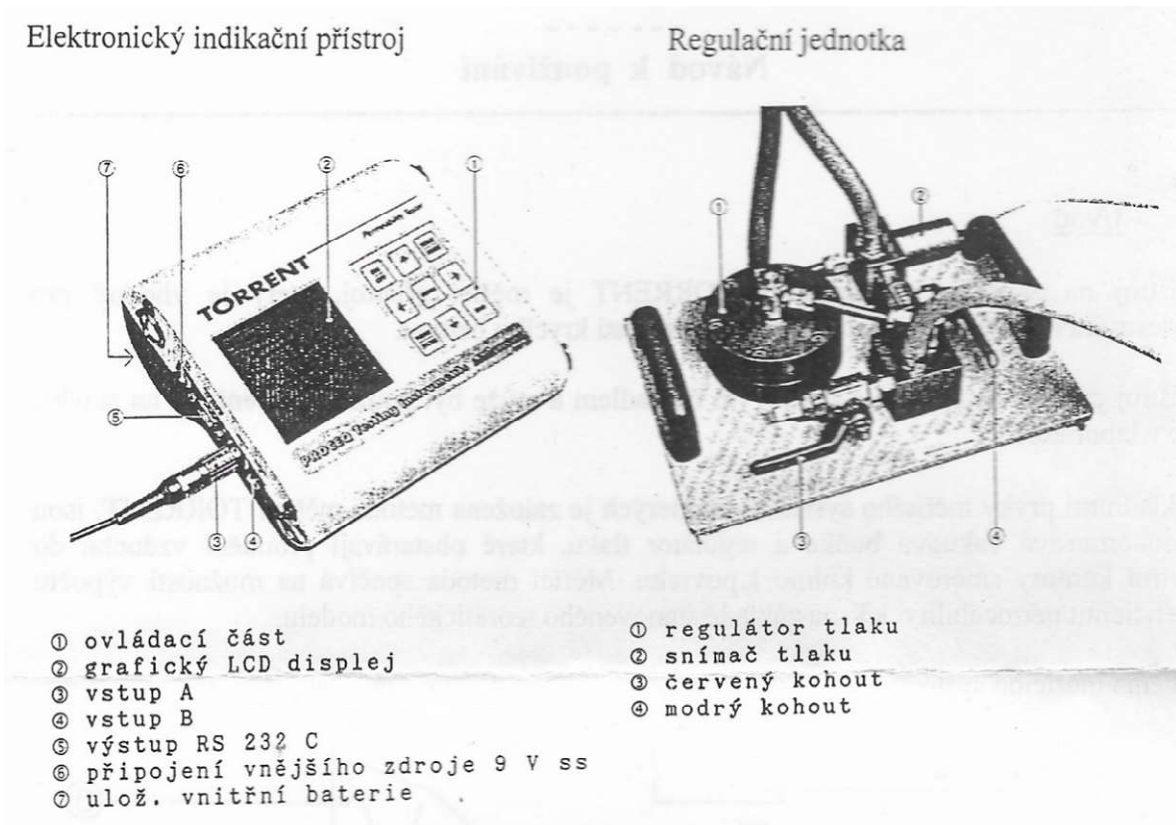
Obr. 29 - Způsob umístění přístroje Resipod ve vztahu k poloze výztuže [19]

- Maximální velikost zrn kameniva musí být menší než odstup sond na měřícím přístroji kvůli nevodivosti kameniva.
- Dále má na měření vliv teplota. Referenční hodnoty jsou obvykle udávány pro teplotu 20 °C. Pokud se teplota zvyšuje, měrný odpor se snižuje. Stejně tak i v případě zvyšující se vlhkosti dochází ke snižování měrného odporu.
- Po karbonataci povrchu betonu dochází ke zvýšení jeho měrného odporu. Pokud je však hloubka zkarbonatované vrstvy výrazně menší než odstup mezi sondami, její vliv je zanedbatelný.

Pokud je beton v celé konstrukci homogenní, je možné měřením měrného odporu stanovit relativní vlhkost různých oblastí. Stejně tak odlišný měrný odpor v jednom místě konstrukce může poukazovat na lokální kolísání poměru vody a cementu. Dále jsou hodnoty měrného odporu využívány při zkoušce permeability. Hodnoty měrného odporu jsou zadávány do přístroje Torrent před zahájením zkoušky permeability. Na jejich základě je možné stanovit součinitel kvality krycí vrstvy k_T . [19]

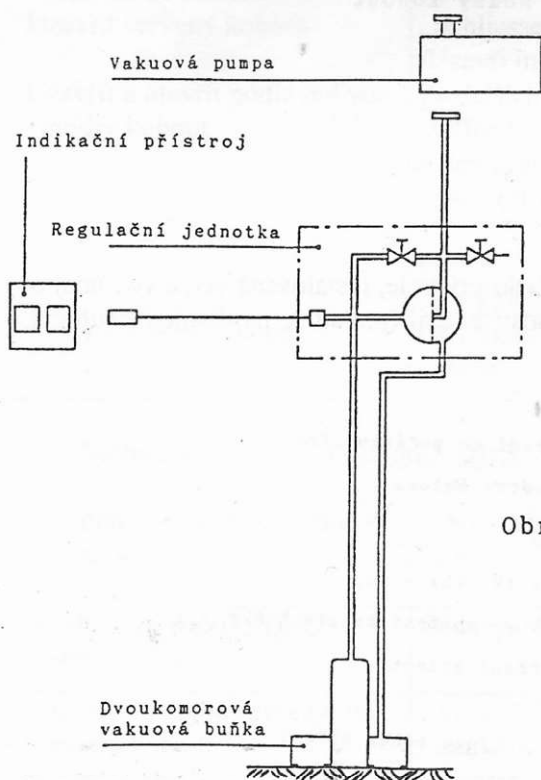
Přístroj na měření permeability Torrent

Přístroj je určený pro nedestruktivní stanovení vzduchové propustnosti krycí vrstvy betonu. Skládá se z dvoukomorové vakuové pumpy, regulátoru tlaku ovlivňující množství vzduchu ve vnitřní komoře vakuové pumpy a snímače tlaku, připojeného na vstupu A na indikační přístroj.

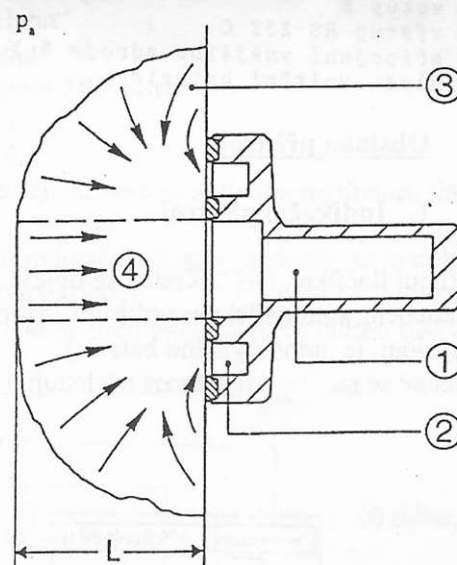


Obr. 30 - Součásti přístroje Torrent [20]

Schéma měřicího systému



Dvoukomorová vakuová buňka



Obr. 1

- ① vnitřní komora, tlak p_i
- ② vnější komora, tlak p_e
 $p_i = p_e$
- ③ proud vzduchu do vnější komory
- ④ proud vzduchu do vnitřní komory
- L = hloubka vniknutí vakua

Obr. 31 - Princip měření přístroje Torrent [20]

Před provedením měření je třeba do přístroje zadat hodnotu odporu betonu p naměřenou přístrojem Resipod. Zadáním hodnoty odporu betonu je kompenzováno množství vlhkosti, která má na míru permeability zásadní vliv.

Měření se provádí na vzorku se suchým povrchem bez trhlin s dostatečnou rovinností pro přilnutí těsnících kroužků obou komor. Vzdálenost mezi vnější hranou měřeného povrchu a vnějším průměrem buňky musí být minimálně 20 mm. Vnitřní komora by neměla být umístěna nad ocelovou výztuží.

Před opakováním měření na jednom zkušebním tělese je třeba vyčkat minimálně 0,5 h, než dojde k opětovnému vyrovnání tlaků prostředí. [20]

3.4.2 Postup

Měrný odpor a permeabilita byly měřeny na šesti zkušebních tělesech před i po jejich impregnaci, aby bylo možné porovnat hodnoty po aplikaci impregnace. Na zbylých šesti zkušebních tělesech byl měřen měrný odpor před a po broušení a následně byla změřena permeabilita.

V první fázi probíhá měření měrného odporu pomocí přístroje Resipod. Jeho sondy je potřeba před zahájením měření vždy namočit do vody a přimáčknout ke dnu nádoby, aby se voda dostala dovnitř sond. Přiložením přístroje na zkušební destičku je možné ověřit jeho správnou funkčnost.

Povrch zkušebních těles musí být hladký a zbavený nečistot. Po spuštění přístroje se sondy přiloží a dostatečně přitisknou na povrch betonu tak, aby se pryžová víčka krajních sond dotýkala povrchu betonu. Následně je třeba vyčkat, dokud se měřená hodnota neustálí. Takto jsou provedena tři měření na každém zkušebním tělese. Výsledná hodnota měrného odporu je stanovena jako průměr tří naměřených hodnot.



Obr. 32 - Měření s přístrojem Resipod

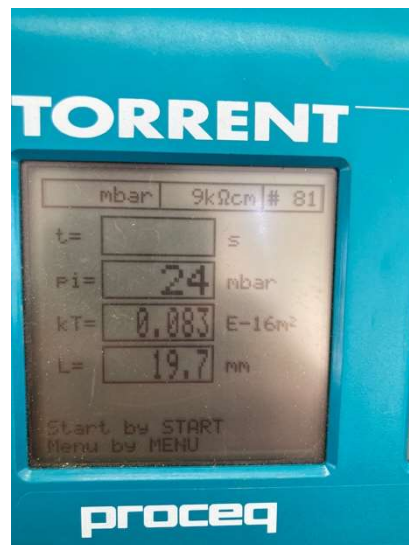
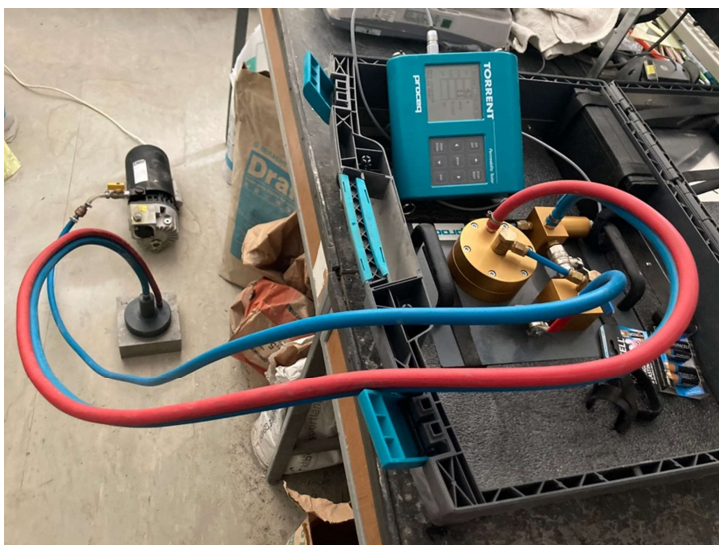
Před zahájením zkoušky permeability musí být regulační jednotka správně připojena k vakuové pumpě a k indikačnímu přístroji a vakuová pumpa musí být zapnuta. Oba kohouty regulační jednotky jsou otevřeny.

Po spuštění přístroje Torrent se do indikační jednotky zadá měrný elektrický odpor měřeného zkušebního tělesa. Vakuová pumpa se přiloží na povrch zkušebního tělesa tak, aby mezi jejím okrajem a okrajem tělesa byla mezera minimálně 20 mm.



Obr. 34 - Měření s přístrojem Torrent

Na začátku měření, při otevřené vakuové buňce, jsou tlaky prostředí p_0 a vnitřní komory buňky p_i vyrovnány. Po zahájení měření stisknutím tlačítka start je třeba uzavřít červený kohout dle pokynu na displeji indikační jednotky. Během následujících 30 s se začne hodnota p_i snižovat. Po uplynutí této doby vyzve přístroj k uzavření modrého kohoutu a po 5 s k jeho opětovnému otevření. Tento krok slouží k aktivaci regulátoru tlaku. V čase 60 s od začátku měření je třeba opět uzavřít modrý kohout. Od tohoto okamžiku bude měřen růst tlaku p_i . K ukončení měření dojde buď po uplynutí 720 s nebo v případě, že změřený nárůst tlaku dosáhne hodnoty 20 mbar. Po ukončení měření je třeba otevřít nejprve červený a následně modrý kohout. Tím dojde k zavzdušnění obou komor a k vyrovnání tlaků. Poté je možné sejmut vakuovou buňku ze zkušební tělesa. Na displeji indikačního přístroje se zobrazí naměřené hodnoty. Tento postup se zopakuje pro všechna zkušební tělesa.



Obr. 33 - Měření s přístrojem Torrent a zobrazení výsledků měření

3.4.3 Výsledky

Dvanáct zkušebních těles bylo rozděleno na dvě sady po šesti tělesech. U šesti neimpregnovaných těles byla zvážena jejich hmotnost, byl změřen měrný elektrický odpor a pomocí přístroje Torrent byl určen součinitel kvality krycí vrstvy kT a hloubka průniku L. Zkušební těleso 1-5 bylo z experimentu vyřazeno kvůli velké odchylce jeho výsledků v porovnání s ostatními tělesy.

Tab. 6 - Výsledky zkoušky permeability, referenční zkušební tělesa

	hmotnost před broušením [g]	odpor [kΩcm]				č. měření	kT	L [mm]
		I.	II.	III.	průměr			
1-1	2051,05	11,6	11,2	10,7	11,17	#80	0,112	22,6
1-2	2251,59	9,3	9,2	9,8	9,43	#81	0,083	19,7
1-3	2439,47	8,5	7,9	8,6	8,33	#82	0,114	22,9
1-4	2281,55	9,4	9,5	8,6	9,17	#83	0,198	30,1
1-5	2925,44	7,7	7,2	7,8	7,57	#84	2,098	63,2
1-6	2051,29	10,4	10,1	10,9	10,47	#85	0,052	15,4
průměr	2214,99				9,71		0,1118	22,14

Zkušební tělesa určená k impregnaci byla zvážena a byl změřen jejich měrný elektrický odpor. Následně byla zbrušena jejich povrchová vrstva dle postupu předepsaného v části 3.1.3 a opět byla tělesa zvážena a byl změřen jejich měrný elektrický odpor. U takto zbrušených těles byl změřen součinitel kvality krycí vrstvy kT a hloubka průniku L.

Po změření všech potřebných veličin byla zkušební tělesa 2-1 až 2-6 naimpregnována dle postupu uvedeného v části 3.1.3. a vysychala na podložkách po dobu 24 h. Následně bylo zopakováno měření hmotnosti, měrného elektrického odporu, součinitele kvality krycí vrstvy kT a hloubky průniku L.

Tab. 7 - Výsledky zkoušky permeability, zkušební tělesa před broušením

	před broušením				
	hmotnost [g]	odpor [kΩcm]			
		I.	II.	III.	průměr
2-1	2327,03	10	9,5	9,8	9,87
2-2	3052,39	6,6	6,4	6,3	6,43
2-3	1961,96	12	12	12	12,37
2-4	3022,68	6,3	6,9	7	6,73
2-5	2095,16	12	11	12	11,50
2-6	2751,69	6,7	7,4	7,1	7,07
průměr	2535,15				8,99

Tab. 8 - Výsledky zkoušky permeability, zkušební tělesa po broušení a po impregnaci

	po broušení								po impregnaci							
	hmotnost [g]	odpor [$k\Omega cm$]				č. měření	kT	L [mm]	hmotnost [g]	odpor [$k\Omega cm$]				č. měření	kT	L [mm]
		I.	II.	III.	průměr					I.	II.	III.	průměr			
2-1	2320,3	10	9,6	10	9,97	#86	0,058	16,3	2325,65	9,6	8,9	8,7	9,07	#94	0,127	24,1
2-2	3044,55	6,7	6,5	6,9	6,70	#87	0,086	19,8	3050,09	6,4	6,4	6,5	6,43	#95	0,213	31,1
2-3	1955,98	13	13	13	13,03	#88	0,15	26,1	1960,96	13	13	12	12,53	#96	0,19	29,3
2-4	3015,22	7	6,5	7,1	6,87	#91	0,198	30,1	3020,39	6,4	6,3	6,6	6,43	#93	0,356	40,1
2-5	2088,31	12	12	12	12,20	#89	0,181	28,7	2093,88	12	11	12	11,80	#97	0,23	32,2
2-6	2745	7,4	7,3	7,8	7,50	#90	0,108	22,2	2749,65	6,7	6,8	6,9	6,80	#92	0,253	33,8
průměr	2528,23				9,38		0,13	23,87	2533,44				8,84		0,23	31,77

Z naměřených hodnot je patrné, že po broušení došlo ke zvýšení měrného elektrického odporu. Naopak po aplikaci impregnačního prostředku se měrný elektrický odpor zkušebních těles snížil, přestože by hydrofobní impregnační prostředek měl způsobit zvýšení elektrického odporu. Je otázkou, jestli se elektrický odpor snížil v důsledku působení impregnačního prostředku nebo z důvodu vyšší vlhkosti způsobené vlivem nedostatečného vyschnutí zkušebních těles po ponoření do impregnačního prostředku.

Součinitel kvality krycí vrstvy kT, stejně jako hloubka průniku L se po aplikaci impregnačního prostředku zvýšily. Impregnační prostředek tedy nemá vliv na zmenšení kapilárních pórů. Součinitel kvality krycí vrstvy lze v obou případech zařadit do kategorie normální.

Table 1 : Classification of the quality of the 'covercrete' according to kT

Classification of the quality of the "covercrete"		kT measured at 28 days [$E-16 m^2$]
1	very good	kT < 0.01
2	good	0.01 < kT < 0.1
3	normal	0.1 < kT < 1.0
4	bad	1.0 < kT < 10
5	very bad	kT > 10

Obr. 35 - Tabulka klasifikace kvality krycí vrstvy podle koeficientu kT

3.5 Diskuze

Z výsledků zkoušek nasákavosti je patrné, že impregnační prostředek má zásadní vliv na nasákavost betonu. V prvních minutách snižuje nasákavost až na 55 % v porovnání s hodnotami neimpregnovaných zkušebních těles. Při opakování zkoušky na stejné sérii zkušebních těles je již vliv impregnace daleko menší.

To je způsobeno především rozdílnou vlhkostí zkušebních těles před zahájením zkoušky. Tělesa, která nejsou dokonale suchá a mají část objemu jejich pórů již zaplněnou vodou, nedokážou pojmout tolik vody, jako suchá tělesa. V důsledku tohoto jevu dochází ke značnému zmenšení poměru nasákavosti impregnovaných a neimpregnovaných zkušebních těles.

Další vliv má také provedení zkoušky cyklického působení mrazu a rozmrazování, při kterém došlo u druhé série zkušebních těles k poškození impregnovaného povrchu. Při opakování této zkoušky na třetí sérii zkušebních těles byl však vliv impregnace zanedbatelný.

U zkoušky permeability nedošlo k zásadnímu zlepšení ani zhoršení kvality povrchové vrstvy a velikosti pórů zkušebních těles. Hodnoty se změnily pouze minimálně a tento rozdíl je možné přisoudit změně vlhkosti po ponoření těles do impregnačního roztoku.

Nezanedbatelný vliv na průběh zkoušek má také směs, ze které jsou zkušební vzorky vyrobeny. Jedná se o ztvrdlou cementovou pastu, která neobsahuje žádné kamenivo a má velmi nízký vodní součinitel. To má nejen vliv na špatnou zpracovatelnost směsi, v jejímž důsledku vznikají v tělesech kaverny (makropóry), ale také na velikost a množství kapilárních pórů. Množství a umístění kavern může zásadně ovlivňovat jak zkoušku nasákavosti, tak chování zkušebních těles při působení mrazu. Při nízkém vodním součiniteli je objem kapilárních pórů minimální. To znamená, že samotná neimpregnovaná zkušební tělesa mají velmi nízkou nasákavost.

V důsledku nízkého vodního součinitele a absence kameniva také dochází ke smršťování a následnému praskání zkušebních těles při jejich vysoušení.

Pro další pokračování výzkumu vlivu hydroxidu lithného na trvanlivost betonu je nezbytné zkoušky opakovat se zkušebními tělesy z rozdílných směsí obsahujících kamenivo, které mají vyšší vodní součinitel.

4 Závěr

Je prokazatelné, že hydrofobní impregnace z roztoku hydroxidu lithného má pozitivní vliv na trvanlivost betonových konstrukcí. Pro jeho plnohodnotné využití v praxi je třeba ve výzkumu i nadále pokračovat, ověřit jeho účinky při různém složení betonových směsí a jeho účinnost v dlouhodobém horizontu.

Hydrofobní impregnace, impregnace a nátěry jsou nepochybně dobrou cestou při soudobém požadavku na dlouhou trvanlivost betonových konstrukcí a jistě se množství nabízených produktů a jejich využití na stavbách bude dále rozšiřovat.

5 Použité zdroje

- [1] Ing. Jana Margoldová, CSc.: Úvodník. Beton TKS, 2013/6 Trvanlivost a životnost betonových konstrukcí.
- [2] Mario Collepari, český překlad Vlastimil Bílek: Moderní beton. Praha, Informační centrum ČKAIT, 2009.
- [3] Pytlík Petr: Technologie betonu. Brno, VUTIUM, 2000.
- [4] Ing. Michala Hubertová, Ph.D., MBA: Trvanlivost lehkého konstrukčního betonu. Časopis Beton, 2013/6 Trvanlivost a životnost betonových konstrukcí.
- [5] prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.: Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. Beton TKS, 2/2017 Technologie.
- [6] prof. RNDr. Zdeněk Petrold, CSc., Mgr. Šárka Šachlová, Ph.D., Mgr. Aneta Šťastná, Ph.D., Ing. Vlastimil Bílek ml., Mgr. Kateřina Krutilová, Ing. Vlastimil Bílek st., Ph.D., Mgr. Libor Topolář, Ph.D.: Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. Beton TKS, 2/2014 Technologie – beton v extrémním prostředí.
- [7] Ing. Petr Tůma, Ph.D.: 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>
- [8] Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., Ing. Daniel Dobiáš, Ph.D., Ing. Petr Huňka: Hydrofobní impregnace betonu – prostředek pro zvýšení odolnosti betonu proti účinkům CH.R.L. Beton TKS, 1/2011 Pozemní stavby
- [9] Ing. Adam Hubáček, Ph.D.: Možnosti zvyšování trvanlivosti betonů a betonových výrobků pomocí uzavíracích nátěrů. Beton TKS, 2/2019 Technologie.
- [10] Ing. Jan Vetchý: Hydrofobní impregnace betonu. www.mtc.cz (online), 2015. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/hydrofobni-impregnace/>
- [11] Ing. Jan Vetchý: Impregnace betonu. www.mtc.cz (online), 2015. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/impregnace-betonu/>
- [12] ČSN EN 1504-2. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Část 2: Systémy pro povrchovou ochranu. Praha, Český normalizační institut, 2006.
- [13] ČSN EN 13580. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Absorpce vody a odolnost hydrofobních impregnací proti alkáliím. Praha, Český normalizační institut, 2003.
- [14] ČSN EN 13579. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Zkouška hydrofobní impregnace sušením. Praha, Český normalizační institut, 2003.
- [15] ČSN EN 13581. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení úbytku hmotnosti hydrofobizovaného betonu po střídavém působení mrazu a rozmrazovacích solí, Český normalizační institut, 2003.

- [16] *José B. Aguiar, Aires Camões, Pedro M. Moreira*: Coatings for Concrete Protection against Aggressive Environments, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol 6., No. 1, 243-250, Japan Concrete Institute, February 2008.
- [17] *Ing. Daniel Schönfelder*: Hydrofobizace v mostním stavitelství. old.silnice-zeleznice.cz (online), 2012. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/hydrofobizace-v-mostnim-stavitelstvi/>
- [18] Společnost Redimax, reference (online). Dostupné z: <https://www.redimax.cz/utesnujici-impregnace-betonu>
- [19] Návod k obsluze přístroje Resipod
- [20] Návod k obsluze přístroje Torrent
- [21] *Ing. Petr Šimůnek, Ph.D., doc. Ing. Ivana Laníková, Ph.D., Ing. Rostislav Jeneš*: Vybrané vady a poruchy zjištěné při projektování zásahů do panelových domů a při průzkumech. tzb-info (online), 4.11.2019. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/19804-vybrane-vady-a-poruchy-zjistene-pri-projektovani-zasahu-do-panelovych-domu-a-pri-pruzkumech>
- [22] *Joseph Abou Zeid*: Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé. Závěrečná práce (online), 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301731750_Methodes_de_reparation_et_de_protection_des_ouvrages_en_beton_arme
- [23] *Mohammed Fouad Alnhhal, U. Johnson Alengaram, Zamin Jumaat, Fuad Abutaha, Mamoun A Alquedra, Ramesh Nayaka*: Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. 2018. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-Fouad-Alnhhal/publication/327276574/figure/fig4/AS:668444366217232@1536380964990/Electrical-resistivity-test-configuration.png>
- [24] *Ing. Marek Vinkler, Ph.D.*: Voda v betonu. *Beton TKS*, 2/2018 Technologie.

6 Seznam obrázků

Obr. 1 - Průběh degradace betonových konstrukcí [2]	5
Obr. 2 - Měření mocnosti zkarbonatované vrstvy [21]	6
Obr. 3 - Hydrofobní impregnace, impregnace, nátěr (zleva) [7]	12
Obr. 4 - Velikost smáčecího úhlu [9].....	13
Obr. 5 - Příklad provedení nátěru [22]	16
Obr. 6 - Složení betonových zkušebních těles [16].....	24
Obr. 7 - Výsledky zkoušky hloubky průniku chloridových iontů [16]	25
Obr. 8 – Výsledky zkoušky odolnosti proti síranům [16].....	25
Obr. 9 - Hloubka průniku impregnačního prostředku [8].....	26
Obr. 10 - Výsledky zkoušek [8]	26
Obr. 11 - Výsledky zkoušky CH.R.L. [8]	27
Obr. 12 - Provádění impregnace mostu ve Vchynici [17].....	28
Obr. 13 - Impregnovaná betonová podlaha v OC Stromovka [18].....	28
Obr. 14 - Vliv impregnace na velikost smáčecího úhlu – vlevo neimpregnované těleso, vpravo impregnované těleso.....	30
Obr. 15 - Vážení jednotlivých složek směsi	31
Obr. 16 - Plnění forem připravenou směsí	31
Obr. 17 - Zkušební tělesa ve formách.....	32
Obr. 18 - Odbedňování	32
Obr. 19 - Zabalení forem do folie a umístění do pece.....	32
Obr. 20 - Broušení zkušebních těles	33
Obr. 21 - Impregnace zkušebních těles	33
Obr. 22 - Zkušební tělesa namočená ve vodě	34
Obr. 23 - Vzniklé trhliny	37
Obr. 25 - Zkušební tělesa umístěna do mrazícího boxu	41
Obr. 24 - Nastavení průběhu cyklů mrazu a rozmrazování	41
Obr. 26 - Sada 1 po vytažení z mrazícího boxu a po namočení do vody, zleva impregnovaná a neimpregnovaná zkušební tělesa	42
Obr. 27 - Sada 2 po vytažení z mrazícího boxu a ponoření do vody, zleva impregnovaná a neimpregnovaná zkušební tělesa	43
Obr. 28 - Princip měření přístroje Resipod [23]	44
Obr. 29 - Způsob umístění přístroje Resipod ve vztahu k poloze výztuže [19]	45
Obr. 31 - Součásti přístroje Torrent [20]	46
Obr. 30 - Princip měření přístroje Torrent [20]	47
Obr. 32 - Měření s přístrojem Resipod	48
Obr. 34 - Měření s přístrojem Torrent a zobrazení výsledků měření.....	49
Obr. 33 - Měření s přístrojem Torrent.....	49
Obr. 35 - Tabulka klasifikace kvality krycí vrstvy podle koeficientu kT	51

7 Seznam tabulek

Tab. 1 - Výsledné hodnoty	35
Tab. 2 - Výsledné hodnoty	36
Tab. 3 - Výsledné hodnoty	37
Tab. 4 - Výsledné hodnoty	38
Tab. 5 - Výsledné hodnoty	39
Tab. 6 - Výsledky zkoušky permeability, referenční zkušební tělesa	50
Tab. 8 - Výsledky zkoušky permeability, zkušební tělesa po broušení a po impregnaci.....	51
Tab. 7 - Výsledky zkoušky permeability, zkušební tělesa před broušením	50

8 Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání nasákavosti, první série vzorků, první zkouška	35
Graf 2 – Porovnání nasákavosti, první série, druhá zkouška.....	36
Graf 3 - Porovnání nasákavosti, druhá série, první zkouška	37
Graf 4 - Porovnání nasákavosti, druhá série, druhá zkouška	38
Graf 5 - Porovnání nasákavosti, třetí série, první zkouška	39
Graf 6 - Průběh teplot při zkoušce odolnosti proti cyklickému působení mrazu a rozmrazování	40