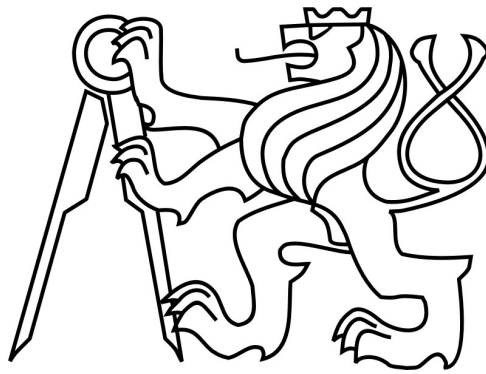


# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Bakalářská práce

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího prof. Ing. Zbyška Pavlíka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu panu prof. Ing. Zbyškovi Pavlíkovi, Ph.D. za vstřícnou spolupráci, cenné odborné rady, poskytnuté odborné materiály, a především za trpělivost. Dále panu Ing. Adamovi Pivákovi za pomoc a užitečné rady a připomínky během experimentálního měření a panu Ing. Pavlovi Košatovi, Ph.D. za vstřícnou pomoc při provádění experimentálního měření. Také bych chtěla poděkovat paní prof. Mileně Pavlíkové, Ph.D. a Ing. Martině Záleské, Ph.D. za cenné rady a poskytnuté materiály, které jsem využila při zpracovávání bakalářské práce.

Tato práce byla řešena v rámci 2. etapy projektu:

- FW03010256 – „Vývoj a výzkum pokročilých materiálů pro ochranu a opravu betonových konstrukcí“

Vývoj a výzkum pokročilých materiálů pro  
ochranu a opravu betonových konstrukcí

Development and research of advanced  
materials for the protection and repair of  
concrete structures

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Randová Jméno: Eva Osobní číslo: 484413

Zadávací katedra: K123 - Katedra materiálového inženýrství a chemie

Studijní program: B3651 - Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: 3608R008 - Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vývoj a výzkum pokročilých materiálů pro ochranu a opravu betonových konstrukcí

Název bakalářské práce anglicky: Development and research of advanced materials for the protection and repair of concrete structures

Pokyny pro vypracování:

U připravených vzorků stanovte základní materiálové parametry, porovnejte působení nátěru pomocí zkoušek mrazuvzdornosti, mechanické odolnosti a odolnosti vůči pronikání vody. Posudte účinnost impregnace betonu ve srovnání s referenčními neošetřenými vzorky.

Seznam doporučené literatury:

Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.C., Li, N., A review on concrete surface treatment Part I: types and mechanisms, *Construction and Building Materials*, vol. 132, pp. 578-590, 2017.

Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.C., Li, L., A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance, *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 81-90, 2017.

Z. Pavlík, A. Pivák, M. Pavlíková, Advanced materials for the protection and repair of concrete structures - experimental assessment, *Green Building Technologies and Materials*, SGEM 2023.

Gagg, C.R., Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, *Engineering Failure Analysis*, vol. 40, pp. 114-140, 2014.

Pigino, B., Leemann, A., Franzoni, E., Lura, P., Ethyl silicate for surface treatment of concrete - Part II: characteristics and performance, *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 313-321, 2012.


Szymańska, A., Dutkiewicz, M., Maciejewski, H., Palacz, M., Simple and effective hydrophobic impregnation of concrete with functionalized polybutadienes, *Construction and Building Materials*, vol. 315, 125624, 2022.


Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 26.9.2023

Termín odevzdání BP v IS KOS: 8.1. 2024

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“.*

27.9.2023

Datum převzetí zadání

 Podpis studenta(ky)

## **Anotace:**

Cílem této bakalářské práce je shrnutí poznatků ohledně vlivu aplikace plošné povrchové úpravy a hloubkové impregnace na bázi epoxidových pryskyřic a jejich účinnost z hlediska ochrany a obnovy betonových prvků.

V teoretické části byl kladen důraz převážně na popis degradačních vlivů působících na beton a možné způsoby ochrany a obnovy betonu, a dále epoxidových pryskyřic, ze kterých vycházejí použité modifikační receptury.

V experimentální části jsem se zabývala vyhodnocením vlivu použitých receptur na zkušební betonová tělesa a jejich účinnost z pohledu provedených zkoušek. Závěrem bylo provedeno srovnání jednotlivých typů povrchových úprav betonu na základě provedených zkoušek.

**Klíčová slova:** *Oprava a ochrana betonu, Epoxidová pryskyřice, Mrazuvzdornost a odolnost vůči CHRL, Nasákavost*

## **Abstract:**

The purpose of this bachelor's thesis is to summarize the findings regarding the effect of the application of surface treatment and deep impregnation based on epoxy resins and their effectiveness in terms of protection and repair of concrete elements.

In the theoretical part, emphasis was placed mainly on the description of degradation effects acting on concrete and possible methods of protection and repair of concrete, as well as epoxy resins, from which the used modification recipes are based on.

In the experimental part, I dealt with the evaluation of the effect of the used recipes on test concrete bodies and their effectiveness from the point of view of the tests performed. In conclusion, a comparison of individual types of concrete surface treatments was made on the basis of the performed tests.

**Keywords:** *Concrete repair and protection, Epoxy resin, Freeze and CHDS resistance, Water absorption*

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Cíl práce .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Teoretická část.....</b>	<b>12</b>
3.1 Suroviny pro výrobu betonu.....	12
3.1.1 Kamenivo .....	12
3.1.2 Cement .....	13
3.1.3 Voda .....	14
3.1.4 Přísady .....	15
3.1.5 Příměsi.....	16
3.2 Trvanlivost betonu.....	16
3.2.1 Degradáční procesy betonu .....	17
3.2.1.1 Fyzikální degradace betonu.....	17
3.2.1.2 Chemická degradace betonu.....	18
3.2.2 Degradace povrchu betonu vlivem vody, mrazu a rozmrazovacích látek....	19
3.3 Ochrana betonu .....	20
3.3.1 Modifikace povrchové úpravy betonu.....	20
3.3.2 Tradiční ochranné povlaky na bázi polymerů .....	23
3.4 Sanace betonu.....	24
3.5 Epoxidová pryskyřice.....	25
<b>4 Představení zkoušených vzorků .....</b>	<b>26</b>
<b>5 Použité experimentální metody .....</b>	<b>29</b>
5.1 Základní materiálové charakteristiky .....	29
5.1.1 Hustota matrice .....	29
5.1.2 Objemová hmotnost .....	29
5.1.3 Pórovitost .....	30
5.2 Mechanické vlastnosti .....	30
5.2.1 Pevnost v tlaku .....	30
5.2.2 Dynamický modul pružnosti .....	31
5.3 Vlhkostní vlastnosti.....	32
5.3.1 Transport vodní páry .....	32
5.3.2 Transport kapalné vlhkosti .....	33
5.4 Stanovení mrazuvzdornosti .....	35
5.5 Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám .....	36
<b>6 Výsledky řešení a diskuse .....</b>	<b>38</b>
6.1 Základní materiálové charakteristiky .....	38

6.2	Mechanické vlastnosti .....	38
6.3	Transport vodní páry .....	39
6.4	Transport kapalné vlhkosti .....	40
6.5	Mrazuvzdornost.....	41
6.6	Odolnost vůči CHRL.....	43
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>46</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>53</b>



## Seznam použitých symbolů

$\rho_v$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnost
$\rho_{\text{mat}}$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota matrice
$m$	[kg]	hmotnost
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$T$	[°C, °K]	teplota
$\psi$	[-]	pórovitost
$f_c$	[MPa]	pevnost v tlaku
$F$	[N]	síla zatížení
$A$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$E_d$	[MPa]	dynamický modul pružnosti
$v_i$	[m·s <sup>-1</sup> ]	impulzní rychlost
$t$	[s]	čas
$L$	[m]	délka
$\delta$	[s]	součinitel propustnosti pro vodní páru
$\Delta p$	[Pa]	rozdíl parciálních tlaků
$D$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	součinitel difuze vodní páry
$R$	[J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	univerzální plynová konstanta
$M$	[kg·mol <sup>-1</sup> ]	molární hmotnost
$\mu$	[-]	faktor difuzního odporu
$w_{24}$	[% , kg·m <sup>-2</sup> ]	nasákavost
$\rho_a$	[g·m <sup>-2</sup> ]	odolnost vůči CHRL
$A_w$	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1/2</sup> ]	absorpční koeficient
$k$	[%]	koeficient mrazuvzdornosti

# 1 Úvod

Beton je jedním z nejčastěji využívaných stavebních materiálů na světě. Jeho popularita je dána především jeho silnými vlastnostmi, jako je odolnost, pevnost a dlouhá životnost. Díky svým vynikajícím vlastnostem a minimálním nárokům na údržbu se beton vyznačuje širokým využitím nejen v oblasti stavebnictví.

S rostoucím rozvojem výstavby betonových konstrukcí dochází ke stoupání požadavků na udržitelnost výstavby a snížení provozních nákladů. Častým důvodem poruch betonových konstrukcí je prioritizace zaměření na návrh konstrukce s ohledem na mezní stav únosnosti, nikoliv na vlivy prostředí, které ovlivňují konstrukci po celou dobu její životnosti a jsou při návrhu opomíjeny. Dalším klíčovým prvkem je ekonomický aspekt, jelikož v současné době směřuje větší finanční investice k obnově betonových staveb než k výstavbě nových. Z tohoto důvodu se stále větší pozornost odborníků soustřeďuje na vývoj nových možností pro opravu a obnovu betonových konstrukcí s cílem prodloužit jejich životnost [1].

I za předpokladu odborného zpracování a správných poměrů použitých surovin dochází k degradaci betonových prvků, zejména vlivem přítomnosti vody. Voda působí jako prostředník destruktivních procesů, které přispívají k degradaci betonových prvků, je tedy klíčové zabránit vniknutí vody do konstrukce. Proto se v současnosti stále častěji přistupuje k úpravě povrchu betonu pomocí ochranných nátěrů, či impregnačních prostředků.

V rámci této práce byla zkoumána účinnost zlepšení parametrů betonových vzorků, které prošly modifikací povrchové úpravy.

## 2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo shrnutí poznatků ohledně vlivu aplikace plošné povrchové úpravy a hloubkové impregnace na bázi epoxidových pryskyřic a jejich účinnost z hlediska ochrany a obnovy betonových prvků.

V teoretické části jsem se převážně zabývala popisem degradačních vlivů působících na beton, možnými způsoby ochrany a obnovy betonu. Na závěr teoretické části jsem doplnila stručný popis epoxidových pryskyřic, ze kterých vychází použité modifikační receptury povrchu betonu.

V experimentální části jsem se zabývala vyhodnocením vlivu použitých receptur na zkušební betonová tělesa a jejich účinnost z hlediska základních materiálových vlastností, mechanických vlastností (pevnost v tlaku, dynamický modul pružnosti), vlhkostních vlastností (transport vodní páry, transport kapalné vlhkosti), stanovení mrazuvzdornosti a odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Závěrem bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých typů povrchových úprav betonu na základě provedených zkoušek.

## 3 Teoretická část

### 3.1 Suroviny pro výrobu betonu

Beton je kompozitní materiál, který se skládá ze tří základních složek: cementu, vody, kameniva a dvou doplňkových složek: přísad, příměsí [2].

Pro správný návrh betonové směsi je nejdůležitější návrh poměrů jednotlivých složek. Objemová koncentrace kameniva se pohybuje kolem 75 %, cementu kolem 13 %, voda zaujímá přibližně 8 %, příměsí tvoří 3 % a přísady 0,1 % z celkového objemu betonu [3].

#### 3.1.1 Kamenivo

Kamenivo můžeme definovat jako anorganický, zrnitý materiál s maximálními rozměry zrn dosahujícími 63 mm. Kamenivo funguje jako plnivo v betonové směsi, kde tvoří 70–80 % celkového objemu betonu. Hlavní funkcí kameniva je, že propůjčuje betonu svou objemovou stabilitu a lepší trvanlivost [4].

Vlastnosti použitého kameniva mají zásadní vliv na trvanlivost betonu a další mechanicko-fyzikální vlastnosti. Pro dosažení kvalitního výrobku je nutné dodržet dostatečně různorodé petrografické složení kameniva [3].

Při použití nevhodného kameniva může dojít k porušení betonu, a to i bez působení agresivních látek z prostředí. Proto nesmí použité kamenivo obsahovat škodlivé látky, které by snižovaly trvanlivost betonu. Mezi tyto látky patří chloridy, sírany, jíly nebo organické látky. Výskyt nežádoucích látek v kamenivu se ověřuje pomocí zkoušek, které je nutno provést vždy před prvním použitím daného kameniva [4].

Stanovení přítomnosti chloridových solí popisuje norma ČSN EN 1744-5 – Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 5: Stanovení chloridových solí rozpustných v kyselině. [5] Podstatou zkoušky je zjištění celkového obsahu halogenidů, kromě fluoridů a vyjádření obsahu iontů chloridu. Maximální povolený obsah chloridů je 0,02 % z hmotnosti kameniva. Chloridy obsažené v kamenivu mají za následek korozi výztuže, a to zejména v předpjatých a železobetonových konstrukcích [5].

Stanovení přítomnosti síranových solí popisuje norma ČSN EN 1744-1+A1 – Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 1: Chemický rozbor [6]. Obsah nežádoucích síranů v kamenivu má za následek pozvolnou tvorbu krystalů a následný vznik trhlin [6].

Zvýšená koncentrace jílovitých látek v kamenivu má negativní dopad na pevnost betonu. Tento efekt je způsoben adhezí jílu na povrchu kameniva, což má za následek nedokonalé spolupůsobení kameniva a cementu, resp. porušení vlastností přechodové zóny (ITZ). Naopak malé množství jílovitých látek, do 1,5% hmotnosti kameniva, pozitivně ovlivňuje vazkost betonové směsi [3].

Stanovení přítomnosti organických látek popisuje norma ČSN EN 1744-5 – Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 1: Chemický rozbor [5]. Obsah organických látek je v kamenivu zjišťován pomocí hydroxidu sodného, kdy v případě přítomnosti organických látek dochází po jeho nanesení k zabarvení kameniva [5].

### **3.1.2 Cement**

Cement je práškovitá látka s hydraulickými charakteristikami a v betonu plní roli pojiva, které spojuje ostatní složky do pevné, odolné a trvanlivé hmoty. Po smíchání cementu s vodou dochází vlivem hydratace k jeho tvrdnutí. Tento proces funguje na základě chemických reakcí a jejich vlivem se z plastické, snadno zpracovatelné hmoty stává pevný a mechanicky odolný materiál [4].

Cement se vyrábí z několika základních surovin, které jsou klíčové pro jeho kvalitu a vlastnosti. Z chemického hlediska se cement skládá ze sloučenin oxidu vápenatého s oxidy křemičitými, hlinitými a železitými.

Hlavní surovinou pro výrobu cementu jsou vápence, optimální jsou středně až silně znečištěné jílovými částicemi. Další zásadní surovinu tvoří jíly, které slouží jako zdroj oxidu hlinitého a oxidu křemičitého. Dalšími surovinami mohou být železná ruda a železité konkrerce pro dodání oxidu železného, a případně další příměsi jako jsou písek, bauxit, popílek, škvára nebo sádra. Tyto suroviny působí převážně jako usměrňovací složky, které upravují chemické složení vsázky do cementářské pece a tím i následně složení a vlastnosti slínku.

Dále se do směsi přidávají látky, které příznivě ovlivňují proces výroby a podporují hydratační reakci. Mezi tyto složky patří tzv. mineralizátory, či intenzifikátory, řadíme zde sádrovec a kazivec (fluorit). Tyto suroviny se v určitých poměrech smíchají a následně se v peci za vysoké teploty vypalují, čímž vzniká slínek, základ pro výrobu cementu [7].

Dle normy ČSN EN 197-1 – Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití [8] klasifikujeme cementy pro obecné použití do těchto kategorií.

- CEM I – portlandský cement
- CEM II – portlandský cement směsný
- CEM III – vysokopecní cement
- CEM IV – pucolánový cement
- CEM V – směsný cement

Cementy lze dále rozdělit podle třídy pevnosti (32,5; 42,5; 52,5 MPa) a rychlosti náběhu pevnosti (N, R). Pevnosti cementu označují minimální tlakovou pevnost cementové malty. Zkouška pevnosti se provádí na normových trámcích (40 mm × 40 mm × 160 mm) ve stáří 28 dní [8].

V této práci jsem se zabývala pouze betony obsahující cement kategorie CEM I.

### **3.1.3 Voda**

Voda má v betonu dvě základní funkce, konkrétně hydratační a reologickou. Voda je v procesu výroby betonu zcela nezbytná, protože se podílí na jeho hydrataci, což je soubor chemických a fyzikálních procesů, během nichž beton tuhne a dosahuje své pevnosti. Pro efektivní hydrataci cementu je nezbytné, aby voda tvořila alespoň 23 až 25 % celkové hmotnosti cementu.

Svou reologickou funkci voda plní při vytváření formovatelného čerstvého betonu, popsaného stupněm konzistence.

Z hlediska technologie se voda dělí na záměsovou, která se přidává při výrobě čerstvého betonu a ošetřovací, která se obvykle aplikuje formou kropení nebo mlžení po ztuhnutí betonu po určitou dobu, aby se beton udržel vlhký. Záměsová voda musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu [9].

Také užitková voda, přírodní podzemní a povrchová voda může být vhodná pro výrobu betonu. Tuto vodu lze použít, pokud není přítomné nepříjemné množství solí, případně není prokázán výskyt organických látek (cukry, huminové látky, rašelina, částice uhlí), které by mohly negativně ovlivnit hydrataci cementu. Voda také nesmí být kontaminovaná tuky a oleji.

Je třeba pravidelně testovat obsah výše uvedených škodlivin ve vodě, která není označena jako pitná a chystáme je jí použít k výrobě betonu [3].

### 3.1.4 Přísady

Přísady se do betonové směsi přidávají za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Zpravidla se jedná o látky v kapalném, popřípadě práškovitém stavu.

Přísady podléhají normě ČSN EN 934-2 + A1 – Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označení a značení štítkem [10] a jsou děleny na jednotlivé typy, které charakterizují jejich použití, např.: plastifikační a superplastifikační (redukce vody), provzdušňující, stabilizační (zadržují vodu), zpomalující tuhnutí, urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu, těsnící (odpuzují vodu) [3].

Přísady přidávané do betonu zvyšují trvanlivost, zpracovatelnost, či pevnostní charakteristiky betonu. Jejich hlavním účelem je pomoc pro překonání složitých podmínek během realizace betonových prvků, jako je např. betonování za horkého nebo chladného počasí, požadavky na zpracovatelnost, či zpracovatelnost betonu se sníženým vodním součinitelem [11].

Plastifikační a superplastifikační přísady se v současné době používají u téměř všech betonových směsí. Mezi jejich základní cíle v betonu patří: zlepšení zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi a možnost snížení obsahu vody v betonu, což umožňuje výrobu směsi o vyšší pevnostní třídě. Při použití plastifikátoru lze zvýšit pevnost betonu po 28 dnech v rozmezí 10 % až 25 % [12]. Rozdíl mezi plastifikačními a superplastifikačními přísadami spočívá v kvantitě vodní složky, kterou jsou schopny redukovat. Plastifikační přísady jsou schopny snížit vodní složku minimálně o 10 %, zatímco superplastifikační přísady se vyznačují rozptylem redukce vodní složky v rozmezí 12 až 30 % [11].

Provzdušňující přísady se do betonu přidávají za účelem zlepšení jeho trvanlivosti, a to zejména jako ochrana proti cyklickému zmrazování a rozmazování, či ochrana vůči chemickým rozmrazovacím solím [11]. Provzdušňovací přísady také často ovlivňují zpracovatelnost betonu.

Dalším typem betonové přísady jsou zpomalovače tuhnutí. Čerstvá betonová směs při teplotě 30 °C podléhá zvýšené rychlosti tvrdnutí, což ztěžuje jeho zpracovatelnost. Přidání retardéru prodlužuje dobu tuhnutí a tím zpracovatelnost betonové směsi. Retardéry hydratace se běžně používají v období letních měsíců [11].

Použití urychlovače způsobuje zkrácení počáteční doby tuhnutí betonu a zajišťuje vyšší počáteční pevnost. Ačkoli se některé urychlovače vyznačují mrazuvzdornými či protikorozními vlastnostmi, většina z nich má negativní vliv na dlouhodobou trvanlivost prvku, vysoké dávky urychlovačů jsou zvláště škodlivé [13].

### **3.1.5 Příměsi**

Do betonu se za účelem zlepšení jeho charakteristik nebo splnění konkrétních požadavků přidávají jemné anorganické nebo organické složky, známé jako příměsi. Je důležité je zahrnout do betonu při výpočtu množství jednotlivých komponentů. Podle normy ČSN EN 206 + A2 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [14] se tyto příměsi klasifikují do dvou kategorií.

Kategorie I: Inertní příměsi, které působí v procesu hydratace téměř inertně. Lze zde zahrnout kamennou moučku či jemně mletý vápenec.

Kategorie II: Příměsi charakterizované pucolánovými vlastnostmi nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. Do této kategorie se řadí popílek, křemičitý úlet, či vysokopecní struska [15].

## **3.2 Trvanlivost betonu**

Trvanlivost betonu je jedním z klíčových aspektů, které ovlivňují životnost a funkčnost staveb a konstrukcí. Je ovlivněna řadou faktorů, mezi nejvýznamnější patří kvalita použitých materiálů, správný poměr složek betonu, řádné smíchání a správná technologie zpracování. Důležitou roli hraje i následná údržba a ochrana proti nepříznivým vlivům prostředí, jako je například vlhkost, nízké teploty, mechanické namáhání a chemické vlivy. Kvalitní beton by měl vydržet desítky až stovky let, ale jeho skutečná trvanlivost je vždy ovlivněna konkrétními podmínkami použití a péče o něj. Proto je důležité dbát na všechny aspekty procesu výroby a použití betonu, aby jeho trvanlivost byla co nejvyšší.

Norma ČSN EN 206+A2 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [14] stanovuje základní opatření pro ochranu stavebních konstrukcí před určitými degradačními faktory. Tato norma popisuje prostředí, ve kterých se betonový prvek bude vyskytovat a rozděluje jej do 6 kategorií. Tyto kategorie jsou následně rozděleny do dalších podkategorií, které více specifikují jednotlivá prostředí. Základní rozdělení je uvedeno v Tabulce 1.



Tab. 1: Stupně vlivu prostředí [14]

Č. stupně prostředí	Označení stupně	Popis prostředí
1	X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení
2	XC1 až XC4	Koroze vlivem karbonatace
3	XD1 až XD3	Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské soli
4	XS1 až XS3	Koroze vlivem chloridů z mořské soli
5	XF1 až XF4	Působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
6	XA1 až XA3	Chemické působení

### 3.2.1 Degradální procesy betonu

Degradální procesy betonu jsou fenomény, které postupně narušují jeho strukturu a snižují jeho pevnost či jiné užitečné vlastnosti. Tyto procesy jsou způsobeny různými faktory, včetně chemických reakcí, mechanického namáhání, působení vody, teplotních výkyvů a dalších. Mezi běžné degradační procesy patří např. karbonatace [16], korozní procesy [17], vliv mrazu a solí [18], nebo eroze způsobená působením vody [19]. Tyto procesy mohou vést k významným škodám na betonových konstrukcích, a proto je důležité je včas detekovat a řádně se jim věnovat. Pravidelná údržba a monitoring stavu betonu může pomoci včas odhalit příznaky degradace a předejít tak vážným škodám. Degradální procesy betonu lze rozdělit do dvou základních skupin, konkrétně na fyzikální a chemické [7].

#### 3.2.1.1 Fyzikální degradace betonu

Fyzikální degradace betonu je proces, při němž dochází k poškození jeho struktury v důsledku působení různých fyzikálních faktorů. Jedním z nich je například změna teploty, která může způsobit roztažení či smrštění materiálu a tím i vznik trhlin [7]. Dalším faktorem je degradace způsobená nízkými teplotami, kdy voda v betonu zamrzá a rozpíná se, což může vést k odštípnutí částí materiálu. V neposlední řadě je to také opotřebení způsobené mechanickým namáháním, jako je tření nebo nárazy. Všechny tyto jevy vedou k postupnému oslabení betonu, snižují jeho pevnost a životnost a mohou ohrozit stabilitu konstrukcí, ve kterých je beton použit [21].

### 3.2.1.2 Chemická degradace betonu

Chemická degradace betonu je proces, při kterém dochází k poškození a rozpadu betonové struktury vlivem chemických reakcí. Tento fenomén může mít různé příčiny, mezi které patří například vliv kyselých dešťů, solí používaných na rozmrazování silnic nebo chemických látek uvolňovaných při průmyslových procesech. Chemické látky mohou proniknout do betonu a reagovat s jeho složkami, což vede k jeho oslabení, a nakonec k rozpadu betonu [7].

Chemickou degradaci rozdělujeme do 4 skupin:

1. koroze prvního druhu: rozpouštění a vyluhování složek cementového tmele,
2. koroze druhého druhu: reakce cementového tmele se složkami obsaženými v působícím prostředí, to má za následek vznik produktů bez vazebných účinků (např. kyselinová koroze, karbonatace betonu),
3. koroze třetího druhu: vznik reakčních produktů, které se rozpínají a způsobují destrukci struktury betonu,
4. koroze ocelové výztuže [7].

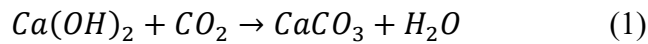
#### Kyselinová koroze

Jedná se o nejvýznamnější korozi druhého druhu dle výše uvedeného rozdělení. Tento proces začíná, když kyseliny z prostředí reagují s hydroxidem vápenatým v betonu a vytvářejí soli, které jsou rozpustné ve vodě. Tím dochází k postupnému rozkladu betonu a jeho struktury. Mezi nejčastější kyseliny, které způsobují korozi betonu, patří sírová, dusičná a chlorovodíková. Kyselinová koroze betonu je obzvláště nebezpečná v průmyslových oblastech, kde jsou tyto kyseliny často přítomny, ale mohou ji způsobit také přírodní procesy, jako je například kyselý déšť [7].

#### Karbonatace betonu

Negativně působí na nosnost, spolehlivost a dlouhověkost vyztužených betonových prvků, což představuje základní riziko karbonatace betonu.

Termín karbonatace betonu popisuje další významnou chemickou korozi druhého druhu a označuje chemickou reakci mezi oxidem uhličitým ( $\text{CO}_2$ ) obsaženým ve vzduchu a hydroxidem vápenatým ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) přítomným v hydratované cementové pastě, která je součástí betonu. Tato reakce, popsaná vztahem (1) vede k tvorbě uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ) za uvolnění vody.



Proces karbonatace má za následek snížení alkality cementového tmele v betonu. Pokud alkalita klesne pod hodnotu 9, již není v betonu zajištěna ochrana nosné výztuže proti korozi a výztuž může začít korodovat. Rychlost karbonatace závisí na mnoha faktorech, včetně vlhkosti betonu, teploty a koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší. [7] Příklad analýzy karbonatace betonu pomocí fenolftaleinu je zobrazen na Obr.1.



Obr. 1: Karbonatace betonu [20]

### 3.2.2 Degradace povrchu betonu vlivem vody, mrazu a rozmrazovacích látek

Degradace povrchu betonu je fenomén, který může mít katastrofální důsledky pro stavební konstrukce. Specifickým problémem je působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Voda sama o sobě může způsobit erozi betonového povrchu, přičemž proráží mikroskopické póry a trhliny v materiálu. Když se teplota sníží a voda zamrzne, její objem se zvětší, což může způsobit praskání a další poškození betonu.

Rozmrazovací látky, jako je sůl, mohou také urychlit degradaci betonu. Sůl snižuje teplotu, při které voda zamrzá, což umožňuje vodě pronikat hlouběji do betonu při nižších teplotách, což zvyšuje škody způsobené mrazem. Kromě toho mohou rozmrazovací látky chemicky reagovat s betonem, a tím způsobovat jeho další rozklad. Proto je důležité chránit betonové konstrukce před těmito vlivy, aby byla zajištěna jejich dlouhodobá trvanlivost [15].

### 3.3 Ochrana betonu

Komplikace týkající se odolnosti betonových konstrukcí mají běžně svůj původ v degradaci materiálů. Počáteční deteriorace těchto materiálů sice nepředstavuje okamžité bezpečnostní riziko, nicméně kumulativně generuje potenciální hrozbu pro integritu celkové struktury.

Vzhledem k ekonomické důležitosti problému trvanlivosti byly během předchozích čtyř desetiletí provedeny rozsáhlé studie. Bylo vyvinuto několik způsobů, jak zajistit lepší a odolnější betonové nebo železobetonové konstrukce. Nejrozšířenější technikou je oddálení degradace betonových prvků snížením pórovitosti, snížením vodního součinitele či přidáním nanočástic. Tato strategie má však několik nevýhod. Metody tohoto druhu často vedou k naddimenzování celého objektu a tím dochází k prodražení stavby. Dalším problémem bývá špatná účinnost tohoto druhu ochrany ve vysoce agresivních podmínkách. V důsledku toho se používá řada levnějších způsobů, jak zajistit ochranu materiálů proti degradaci. Mezi ně patří následující: a) kovové, epoxidové a polymerní povlaky na ocelovou výztuž, b) inhibitory koroze, c) elektrochemická metoda realkalizace betonu, d) povrchová úprava betonu. Dále se budu zabývat pouze posledním uvedeným způsobem ochrany betonu, konkrétně využitím úpravy povrchové vrstvy betonu [22].

#### 3.3.1 Modifikace povrchové úpravy betonu

Použití modifikace povrchové úpravy betonu jako prvek ochrany betonových prvků si získalo v posledních letech značnou oblibu, a to zvláště pro svou účinnost pro snížení infiltrace agresivních látek z prostředí.

Povrchový nátěr tvoří souvislý polymerní film, který působí jako fyzická bariéra zabraňující pronikání korozivních látek do cementového podkladu. Existuje několik typů povrchových povlaků, včetně tradičních polymerních povlaků, polymerních/jílových nanokompozitních povlaků a cementových povlaků. Tradiční polymerní povlak a polymerní/jílové nanokompozitní povlaky vytvářejí na povrchu betonu hustý polymerní film o tloušťce asi 0,1–1 mm, zatímco cementový povlak působí vytvořením vrstvy s nízkou propustností o tloušťce asi 2–10 mm [22].

Dle normy ČSN EN 1504-2 – Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 2: Systémy ochrany povrchu betonu [23], lze povrchové úpravy klasifikovat do tří kategorií:

- hydrofobní impregnace
- impregnace
- nátěry

#### 1. Hydrofobní impregnace:

Hydrofobní impregnace je speciální typ povrchové úpravy materiálů, který má za cíl zvýšit jejich odolnost vůči vlhkosti a vodě. Tento proces spočívá v aplikaci impregnačního prostředku na povrch materiálu, který se následně vstřebává do jeho struktury a vytváří na něm vodoodpudivou vrstvu. Póry a kapiláry jsou vnitřně potaženy, avšak nejsou zaplněny. Po aplikaci hydrofobní impregnace se na povrchu betonu nevytváří film a dochází pouze ke zcela minimální změně vzhledu povrchu. Tato vrstva zabraňuje pronikání vody do materiálu, čímž pomáhá předcházet jeho poškození [23]. Uspořádání hydrofobní impregnace aplikované na povrch betonu je zobrazeno na Obr. 2.



*Obr. 2: Schématický náčrt typické hydrofobní impregnace [24]*

#### 2. Impregnace:

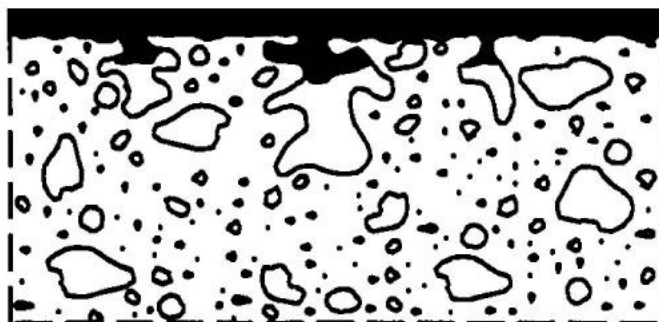
Impregnace je speciální typ povrchové úpravy materiálů, který má za cíl snížit povrchovou porozitu materiálu a zpevnění jeho povrchu. Tento proces spočívá v aplikaci impregnačního prostředku na povrch materiálu, který se následně vstřebává do jeho struktury a vytvoří na jeho povrchu tenký, přerušovaný film. Póry a kapiláry jsou částečně nebo úplně zaplněny [23]. Schématické znázornění impregnace aplikované na povrch betonu je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3: Schématický nákres typické impregnace [25]

### 3. Nátěr:

Nátěr je speciální typ povrchové úpravy materiálů, který má za cíl vytvářet souvislou ochrannou vrstvu na povrchu betonu [23]. Schématické znázornění nátěru aplikovaného na povrch betonu je zobrazeno na Obr.4.



Obr. 4: Schématický nákres typické nátěru [26]

Norma dále definuje pět základních záměrů, které lze získat úpravou povrchové vrstvy betonu.

#### 1. Ochrana proti vnikání:

Hlavním úkolem povrchové vrstvy je minimalizace infiltrace cizích substancí, primárně vody. Během realizace byl měl být kladen velký důraz na technologickou kázeň, jelikož se bude povrchová úprava snažit odolávat vypařování vodní páry z betonu. Špatné provedení by mělo za následek hromadění vodní páry v materiálu, což by mělo negativní vliv na beton. Jako ochranu proti vnikání nežádoucích substancí lze využít hydrofobní impregnace, impregnace i nátěru [23].

## 2. Regulace vlhkosti:

Povrchová vrstva má za cíl redukcii vlhkosti v betonu, jelikož voda působí jako korozní činitel. Pro regulaci vlhkosti v betonu lze využít hydrofobní impregnace a nátěru [23].

## 3. Fyzikální odolnost/zlepšení povrchu:

Hlavní funkcí povrchové vrstvy ochrana proti fyzikálním vnějším vlivům, jako jsou tlak, tah, ohyb, teplota nebo změny vlhkosti. Lze toho docílit pomocí nátěru a impregnace [23].

## 4. Chemická odolnost:

Ochranná vrstva pomáhá vzdorovat negativním vlivům různých chemických látek. Dochází k oddělení agresivního prostředí od betonové konstrukce. Pro tuto ochranu se využívá nátěrů [23].

## 5. Zvýšení odporu omezením obsahu vlhkosti:

V tomto případě má povrchová vrstva za cíl snížit vlhkost betonu a omezit tím riziko koroze výztuže. Suchý beton má větší elektrický odpor než beton vlhký.

Lze toho dosáhnout pomocí hydrofobní impregnace nebo nátěru [23].

### 3.3.2 Tradiční ochranné povlaky na bázi polymerů

Mezi tradiční ochranné povlaky na bázi polymerů patří: epoxidové pryskyřice, akrylát a polyuretan.

- Epoxidová pryskyřice

Epoxidové nátěry jsou dvousložkové systémy skládající se z pryskyřice a tvrdidla. Po smíchání vytvoří pevný, chemicky odolný nátěr, který dobře přilne k betonovým povrchům. Běžně se používá v průmyslových zařízeních, garážích, skladech a oblastech, kde je vyžadován trvanlivý a chemicky odolný povrch [22].

- Akrylát

Akrylátové nátěry jsou na vodní bázi a vytvářejí na povrchu betonu ochranný film. Vyznačují se svou odolností vůči UV záření, povětrnostním vlivům a schopností zlepšit vzhled betonu. Obvykle se používá na vnější betonové povrchy, jako jsou příjezdové cesty, terasy a chodníky [22].

- Polyuretan

Polyuretanové nátěry jsou známé svou pružností, odolností proti oděru a vynikající chemickou odolností. Poskytují lesklou povrchovou úpravu a odolávají silnému

zvětrávání. Vhodné pro vnitřní i vnější betonové povrchy, včetně podlah, pracovních desek a dekorativních aplikací [22].

### 3.4 Sanace betonu

Opravy a sanace stávajících poškozených betonových konstrukcí patří mezi jedny z nejdůležitějších stavebních činností na celém světě. Finance použité na opravy poškozených staveb mnohdy převyšují finance použité na stavbu nových [27].

Sanace betonu je technický postup, který se využívá pro obnovu a zlepšení stavu betonových konstrukcí poškozených z různých důvodů, jako jsou např. mechanické zatížení, chemické vlivy nebo vlivy prostředí. Cílem sanace je nejen obnova původních vlastností betonu a jeho nosné kapacity, ale také prodloužení jeho životnosti. Sanace může zahrnovat různé techniky, jako je například výměna poškozených částí, impregnace, hydroizolace nebo aplikace ochranných nátěrů. Výběr konkrétního postupu závisí na typu a rozsahu poškození, typu konstrukce a požadavcích na finální vzhled a funkci konstrukce [28].

Mezi běžné používané metody a techniky sanace betonu patří:

- Opravy povrchu: Povrchová poškození, jako jsou praskliny, odlupování nebo delaminace, lze opravit vyčištěním postižené oblasti a aplikací vhodných opravných materiálů, jako jsou epoxidové nebo polymerem modifikované malty [29].
- Konstrukční zpevnění: V případech, kdy je třeba zlepšit nosnost konstrukce, lze ke zlepšení strukturální integrity přidat další materiály, jako jsou polymery vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP) nebo ocelové desky [30].
- Ochrana proti korozi: U konstrukcí s problémy s korozí výztužné oceli může sanace zahrnovat odstranění poškozeného betonu, čištění a ošetření oceli a aplikaci inhibitorů koroze nebo ochranných nátěrů [31].
- Překrytí betonem: Aplikace nové vrstvy betonu (překrytí) na stávající povrch může poskytnout dodatečnou pevnost a trvanlivost. Tato technika se často používá, pokud je stávající beton stále strukturálně pevný, ale vyžaduje zlepšení povrchu [32].
- Těsnění a hydroizolace: Aplikace tmelů nebo hydroizolačních prostředků na povrch betonu jej může chránit před pronikáním vody a vystavením chemikáliím. Lze tak zamezit další deterioraci stavu [33].
- Injektáž: Injektážní techniky lze použít k vyplnění dutin, zlepšení stability půdy pod konstrukcemi nebo k nápravě problémů se sedáním [34].



### 3.5 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice je polymerní syntetický materiál, který patří do skupiny tzv. reaktoplastů. Reaktoplasty jsou polymery, které vznikají chemickou reakcí, konkrétně polymerací, při které dochází k vytvoření pevné trojrozměrné sítě. Tento proces je nevratný, což znamená, že jednou vytvořený reaktoplast nelze tavit ani rozpouštět. Výsledkem je materiál s vysokou mechanickou a chemickou odolností, ale s omezenou zpracovatelností.

Epoxidová pryskyřice se obvykle skládá ze dvou složek – pryskyřice a tvrdidla (také známého jako vytvrzovací činidlo nebo katalyzátor). Tyto dvě složky musí být smíchány ve správném poměru, aby se zahájil proces vytvrzování. Základem většiny vyráběných epoxidových pryskyřic jsou diglycidylové polymery [35].

Diglycidylové polymery jsou specifickou skupinou polymerů, které se vyznačují přítomností dvou epoxidových skupin v jejich struktuře. Tyto skupiny jsou schopny reagovat s různými druhy funkčních skupin, což umožňuje vytvoření širokého spektra polymerů s různými vlastnostmi. Diglycidylové polymery jsou obecně známé pro svou vysokou chemickou odolnost, vysokou teplotní stabilitu a dobré mechanické vlastnosti [36].

Materiály na bázi epoxidu se projevují mnoha pozitivními charakteristikami, včetně dobrých mechanických, tepelných a elektrických vlastností či vysokou chemickou a korozní odolností. Tyto vlastnosti je činí vhodnými pro použití v řadě aplikací, včetně kompozitů, nátěrů, lepidel či pro zapouzdření elektronických zařízení [37]:

- epoxidová lepidla jsou široce využívána pro lepení různých materiálů díky svým silným adhezním vlastnostem,
- epoxidové nátěry poskytují ochranu proti korozi, chemikáliím a vlivům prostředí,
- epoxidové kompozity se používají v leteckém a automobilovém průmyslu pro svůj vysoký poměr pevnosti k hmotnosti,
- epoxidové pryskyřice se používají k zapouzdření elektronických součástí a poskytují ochranu proti vlhkosti a dalším faktorům prostředí [37].

Důležitým aspektem při práci s těmito polymery je jejich správná příprava a zpracování, aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Je nutné zmínit také fakt, že materiály na bázi epoxidu se vyznačují svým vysokým stupněm adheze k různým povrchům [38].

## 4 Představení zkoušených vzorků

V rámci řešení této práce byly zkoušeny tři tvarové typy vzorků, jmenovitě krychle o rozměru strany 150 mm, standartní trámce o rozměrech 40 mm × 40 mm × 160 mm a vzorky kruhového tvaru o průměru 120 mm a tloušťce 25 mm. Testované vzorky jsou zobrazeny na Obr. 5 a 6.

Předmětem měření bylo ověření účinnosti modifikace povrchové úpravy betonu, a to jak v rámci ochrany betonových prvků, tak jako sanačních prostředků, pro již poškozené prvky. Na zkušebních tělesech bylo provedeno několik zkoušek, které jasně prokázaly účinnost aplikovaných prostředků. Měření bylo zaměřeno na určení základních materiálových charakteristik, mechanických vlastností, vlhkostních vlastností, mrazuvzdornosti a odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Použité experimentální metody a provedení jednotlivých zkoušek popisují detailně následující kapitoly.



*Obr. 5: Zkoušené vzorky – krychle a trámce*



*Obr. 6: Kruhové vzorky pro zkoušku propustnosti pro vodní páru*

Značení vzorků je podrobně shrnuto v Tab. 2. Reprezentuje tvar, kvalitu betonu a druh aplikované povrchové úpravy.

Tab. 2: Specifikace testovaných vzorků

Označení vzorku	Tvar vzorku	Kvalita betonu	Povrchová úprava
KNB	krychle	"nový"	bez úpravy
KNA	krychle	"nový"	TYP I
KNN	krychle	"nový"	TYP II
KN	krychle	"nový"	TYP III
KDB	krychle	"degradovaný"	bez úpravy
KD50	krychle	"degradovaný"	TYP 1
KD90	krychle	"degradovaný"	TYP 2
TNB	trámec	"nový"	bez úpravy
TNA	trámec	"nový"	TYP I
TNN	trámec	"nový"	TYP II
TN	trámec	"nový"	TYP III
TDB	trámec	"degradovaný"	bez úpravy
TD50	trámec	"degradovaný"	TYP 1
TD90	trámec	"degradovaný"	TYP 2
PARNB	kruhový	"nový"	bez úpravy
PARNA	kruhový	"nový"	TYP I
PARNN	kruhový	"nový"	TYP II
PARN	kruhový	"nový"	TYP III
PARDB	kruhový	"degradovaný"	bez úpravy
PARD50	kruhový	"degradovaný"	TYP 1
PARD90	kruhový	"degradovaný"	TYP 2

Pro výrobu vzorků byly použity dvě úrovně kvality betonu. První, vyšší úroveň, byl beton běžné kvality, srovnatelný s betonem třídy C30/37. V práci bude dále označen písmenem „N“, které reprezentuje označení nový beton. Tato skupina vzorků byla primárně zkoumána jako reference pro ochranu betonu. Druhou, nižší úroveň, byl beton, který v měřeních reprezentuje degradovaný beton. V práci bude dále označen písmenem „D“, které reprezentuje označení degradovaný beton. Druhá skupina vzorků byla primárně zkoumána jako reference pro sanaci

betonu. V obou úrovních kvality betonu byl zařazen do měření jeden vzorek, který byl bez úprav povrchové vrstvy a sloužil pouze jako referenční pro daný materiál. Tyto prvky byly označeny KNB, TNB, PARNB pro beton vyšší kvality a KDB, TDB, PARDB pro beton nižší kvality.

Na vzorky bylo aplikováno celkem pět druhů povrchových úprav betonu, z toho tři typy na beton vyšší kvality, kde se jedná o plošnou povrchovou úpravu a dva typy na beton nižší kvality, kde se jedná o hloubkovou impregnaci.

„Typ I“ je epoxidová pryskyřice s nereaktivními rozpouštědly, která byla použita pro tenkovrstvou zesíťovanou povrchovou úpravu u vzorků se značením KNA, TNA, PARNA. Vlivem této aplikované receptury došlo k vytvoření vysoce zesíťovaného a uzavřeného povrchu. „Typ II“ je pryskyřice s nízkoviskózními vlastnostmi na bázi alifatických polyisokyanátů typu HDI (hexametyl diisokyanát). Tato receptura byla aplikována na vzorky s označením KNN, TNN, PARNN. „Typ III“ je optimalizovaný dvouvrstvý systém, kde první, penetrační vrstvu tvoří epoxidová modifikovaná nízkoviskózní pryskyřice typu BPA (Bisfenol A) a druhou, uzavírací vrstvu, tvoří pryskyřice na bázi alifatických polyisokyanátů typu HDI (hexametyl diisokyanát). Tato receptura byla aplikována na vzorky s označením KN, TN, PARN.

„Typ 1“ je modifikovaná nízkoviskózní epoxidová pryskyřice typu BPA (Bisfenol A) s obsahem reaktivních i nereaktivních rozpouštědel. Tato hloubková impregnace byla aplikována na vzorky s označením KD50, TD50, PARD50. „Typ 2“ je modifikovaná nízkoviskózní pryskyřice typu BPA (Bisfenol A) s obsahem reaktivních i nereaktivních rozpouštědel, přičemž vyšší zastoupení spadá na nereaktivní rozpouštědla. Tato hloubková impregnace byla aplikována na vzorky s označením KD90, TD90, PARD90.

Pro zajištění 1D vlhkostního toku byly vzorky po obvodu zaizolovány pomocí epoxidové pryskyřice, a to pomocí směsi pryskyřice Lepox Metal složka A a jejího tvrdidla Lepox Metal složka B v poměru 1:2.



Obr. 7: Vzorky po nanesení epoxidové pryskyřice pro zajištění 1D vlhkostního toku

## 5 Použité experimentální metody

### 5.1 Základní materiálové charakteristiky

#### 5.1.1 Hustota matrice

Hustota matrice,  $\rho_{\text{mat}}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], byla změřena experimentální metodou pomocí heliového pyknometru Pycnomatic ATC (Thermo Asientific). Měřené vzorky o ustálené hmotnosti byly zváženy na digitální váze s přesností na pět desetinných míst a následně umístěny do přístroje. Rozšířená kombinovaná nejistota měření hustoty héliovou pykometrií je 1,2 %.



Obr. 8: Heliový pyknometr

#### 5.1.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla změřena pomocí gravimetrické metody, a to už všech tří tvarových typů vzorků. Hmotnost vzorků byla změřena při jejich ustálené hmotnosti.

Nejprve byly vzorky změřeny pomocí digitálního posuvného měřítka a následně zváženy na digitální váze na dvě desetinná místa. Měření jednotlivých rozměrů vzorků bylo provedeno třikrát, z hodnot byl proveden aritmetický průměr a tyto hodnoty byly následně použity jako podklad pro výpočet objemové hmotnosti dle níže uvedeného vzorce (2).

Objemová hmotnost,  $\rho_v$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], byla dopočítána dle vzorce (2)

$$\rho_v = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnost vysušeného vzorku [ $\text{kg}$ ] a  $V$  [ $\text{m}^3$ ] je objem vysušeného vzorku získaný výpočtem z měření rozměrů.

Rozšířená kombinovaná nejistota měření objemové hmotnosti je 1,4 %.

### 5.1.3 Pórovitost

Pórovitost materiálu,  $\psi$  [-], charakterizuje objem pórů v materiálu. Pórovitost byla dopočítána dle vztahu (3)

$$\psi = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{mat}}, \quad (3)$$

kde  $\rho_v$  je objemová hmotnost vzorku [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a  $\rho_{mat}$  je hustota matrice vzorku [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Rozšířená kombinovaná nejistota stanovení pórovitosti je 2,0 %.

## 5.2 Mechanické vlastnosti

### 5.2.1 Pevnost v tlaku

Měření pevnosti v tlaku  $f_c$  [MPa] bylo realizováno dle normy ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [39]. Tlaková pevnost byla změřena na hydraulickém lisu značky VEB. Vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí na boční stranu, která je kolmá na směr plnění při výrobním procesu. Výslednou hodnotou zkoušky byla síla,  $F$  [kN], která odpovídá síle zatížení hydraulickým lisem při porušení. Uložení zkušebního tělesa do hydraulického lisu je znázorněno na Obr. 9.

Pevnost v tlaku,  $f_c$  [MPa], byla dopočítána dle vzorce (4)

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad (4)$$

kde  $F$  je maximální síla při porušení zkušebního tělesa [N] a  $A$  je plocha vzorku, na kterou působí zatížení [ $\text{mm}^2$ ].

Rozšířená kombinovaná nejistota měření pevnosti v tlaku je 1,4 %.



Obr. 9: Zkušební těleso během tlakové zkoušky

## 5.2.2 Dynamický modul pružnosti

Metoda pro stanovení dynamického modulu pružnosti spadá do skupiny tzv. nedestruktivního zkoušení a byla provedena podle normy ČSN 73 1371 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu [40].

Ultrazvuková zkouška se používá ke zjištění vnitřní nehomogenity ve vzorcích. Výsledkem této zkoušky je čas průchodu vlnění z jeho generátoru a detekcí na konci měřeného vzorku. Sondy jsou umístěny na opačných koncích vzorku. Před každým měřením je nutné sondy potřítkompaktní vrstvou sonogelu, který zlepšuje přenos zvukové vlny ze sondy do povrchu betonu. Pro měření byl použit přístroj Vikasonic pro měření ultrazvukových vln.

Dynamický modul pružnosti,  $E_d$  [MPa], byl dopočítán dle rovnic (5-6)

$$E_d = \frac{\rho_v \cdot v_l^2}{k^2} \quad (5)$$

$$v_l = \frac{L}{t}, \quad (6)$$

kde  $L$  je délka vzorku [mm],  $\rho_v$  objemová hmotnost vzorku [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $t$  čas průchodu ultrazvukové vlny [ $\mu\text{s}$ ],  $v_l$  rychlost šíření ultrazvukové vlny [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ], a  $k$  součinitel rozměrnosti ( $k = 1$ ) [-]. Rozšířená kombinovaná nejistota měření dynamického modulu pružnosti je 2,3 %.

## 5.3 Vlhkostní vlastnosti

### 5.3.1 Transport vodní páry

Pro popis transportu vodní páry byly měřeny tyto veličiny: součinitel propustnosti pro vodní páru  $D$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ], součinitel difúzní vodivosti  $\delta$  [s] a faktor difúzního odporu  $\mu$  [-]. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 12572 – Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků [41].

Pro zjištění výše uvedených veličin bylo využito tzv. Miskové metody, v uspořádání WET-cup. Zkouška byla provedena u kruhových vzorků o průměru 125 mm a tloušťce 25 mm, označení PAR.

Do misky byl umístěn přesycený vodní roztok, přesněji roztok  $\text{KNO}_3$ , který zajišťuje relativní vlhkost 93 %. Do téže misky byl následně vložen vzorek, ošetřenou stranou k vodnímu roztoku. Zkoušený vzorek byl po stranách zaizolován, pro zajištění 1D vlhkostního toku a následně byla celá miska se vzorkem vzduchotěsně uzavřena. Takto zajištěný vzorek byl vložen do klimatické komory (Obr. 10) o ustálené teplotě 21 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 %.

Měření probíhalo systémem pravidelného vážení úbytků hmotnosti pomocí digitální váhy s přesností na dvě desetinná místa.



Obr. 10: Měření transportu vodní páry cup metodou, umístění v klimatické komoře

Součinitel propustnosti pro vodní páru,  $\delta$  [s], byl dopočítán dle vzorce (7)

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p}, \quad (7)$$



kde  $\Delta m$  je množství vodní páry prošlé vzorkem [g],  $d$  je tloušťka vzorku [mm],  $S$  je plocha vzorku [m<sup>2</sup>],  $\tau$  je časový interval korespondující s  $\Delta m$  a  $\Delta p_p$  je rozdíl parciálních tlaků vodní páry změřený ve vzduchu nad a pod povrchem vzorku [Pa].

Součinitel difúze vodní páry,  $D$  [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>], byl dopočítán dle vzorce (8)

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M}, \quad (8)$$

kde  $\delta$  je součinitel propustnosti pro vodní páru [s],  $R$  je univerzální plynová konstanta (8,314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),  $T$  je teplota prostředí při měření [K] a  $M$  je molární hmotnost vody (0,018 kg·mol<sup>-1</sup>). Rozšířená kombinovaná nejistota měření pro součinitel difúze vodní páry je 2,3 %.

Faktor difúzního odporu,  $\mu$  [-], byl dopočítán dle vzorce (9)

$$\mu = \frac{D_{\text{vzduch}}}{D}, \quad (9)$$

kde  $D_{\text{vzduch}}$  je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu ( $2,3 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>),  $D$  je součinitel difúze vodní páry [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>]. Rozšířená kombinovaná nejistota měření pro difúzní odpor je 2,8 %.

### 5.3.2 Transport kapalně vlhkosti

Měření bylo provedeno dle ČSN EN 1015-18 – Zkušební metody malt pro zdivo – Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě [42] a dle ČSN EN 772-11 – Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdicích prvků z umělého a přírodního kamene vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti pálených zdicích prvků [43].

Zkouška byla provedena na trámčových vzorcích o rozměrech 40 × 40 × 160 [mm]. Pro zajištění 1D transportu vlhkosti byly vzorky po bočních stranách zaizolovány pomocí epoxidové pryskyřice.

Zkouška dle normy ČSN EN 1015-18:

Principem zkoušky je ponoření zkušební tělesa do vody do hloubky 5 až 10 mm na určenou dobu a sledování nárůstu jeho hmotnosti. Jejím výsledkem je stanovení koeficientu kapilární absorpce vody. Pro každý měřený vzorek byl sestaven graf, tzv. křivka sorptivity, vyjadřující závislost kumulativního nárůstu vlhkosti na odmocnině času. Z grafické závislosti

počátečního stupně absorpce vlhkosti byl určen vlhkostní absorpční koeficient  $A$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{1/2}$ ]. Průběh měření je znázorněn na Obr. 11.

Zkouška dle normy ČSN EN 772-11:

Principem zkoušky je ponoření vysušeného vzorku do vody na stanovenou dobu, v tomto případě na 24 h, a následné stanovení přírůstku hmotnosti. Výsledkem zkoušky je stanovení 24 h nasákavosti.

24 h nasákavost,  $w_{24}$  [%], byla dopočítána dle vzorce (10)

$$w_{24} = \frac{m_{24} - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (10)$$

kde  $m_{24}$  je hmotnost vzorku po 24 h od ponoření do vody [g],  $m_0$  je hmotnost suchého vzorku před umístěním do vody [g].

24 h nasákavost,  $w_{24}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ] byla dopočítána dle vzorce (11)

$$w_{24} = \frac{m_{24} - m_0}{S}, \quad (11)$$

kde  $m_{24}$  je hmotnost vzorku po 24 h od ponoření do vody [g],  $m_0$  je hmotnost suchého vzorku před umístěním do vody [g],  $S$  je plocha ponořené části vzorku [ $\text{mm}^2$ ].

Kombinovaná nejistota měření pro absorpční koeficient vody  $A_w$  je 2,3 % a 24 h nasákavosti  $w_{24}$  je 3,5 %.



Obr. 11: Provedení zkoušky transportu kapalné vlhkosti

## 5.4 Stanovení mrazuvzdornosti

Stanovení mrazuvzdornosti betonu bylo realizováno v souladu s normou ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu [44]. Zkouška byla provedena na vzorcích tvaru krychle o hraně 150 mm.

Účelem zkoušky je stanovení schopnosti betonu nasyceného vodou odolávat účinkům střídavého zmrazování a rozmrazování.

Zkušební tělesa byla ponořena pod hladinu vody po dobu 72 hodin a následně byla povrchově osušena a zvážena. Dále byla tělesa vložena do zmrazovací skříně a byla podrobena požadovanému počtu zmrazovacích cyklů (Obr. 12).

Jeden zmrazovací cyklus probíhá celkem 6 hodin, z toho 4 hodiny probíhá proces zmrazování a 2 hodiny rozmrazování. Při zmrazování se mrazicí teplota musí pohybovat v rozmezí  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při následném rozmrazování se teplota pohybuje v rozmezí  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro zmrazovací teplotu byla zmrazovací skříň nastavena teplotu  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pro rozmrazovací teplotu  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po uplynutí každé etapy, v tomto případě 25 cyklů, došlo k vyjmutí jedné sady vzorků, na kterých byla provedena tlaková zkouška.

Výsledkem zkoušky je koeficient mrazuvzdornosti, který byl vyjádřen jako poměr pevnosti v tlaku vzorků po zmrazování a vzorků uložených volně v laboratoři.

Rozšířená kombinovaná nejistota měření pro stanovení mrazuvzdornosti je 4,2 %.



Obr. 12: Uložení vzorků do zmrazovací skříně pro zkoušku mrazuvzdornosti

## 5.5 Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám

Stanovení odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám bylo provedeno v souladu s normou ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek [45]. Zkouška byla provedena na 40 mm krychlích.

Principem zkoušky je namáhání zkušebních těles cyklickým střídáním kladných a záporných hodnot za současného působení vody a CHRL.

Zkušební tělesa byla umístěna do misek z korozivzdorného materiálu, do kterých byla nalita vrstva 3% roztoku NaCl. Vzorky byly uloženy do misek tak, aby byla zkušební plocha, tedy plocha ošetřená impregnačním prostředkem, ponořena v roztoku NaCl. Míra ponoření vzorků je dle normy 5 mm s možnou odchylkou  $\pm 1$  mm.

Dále byly misky se zkušebními tělesy umístěny do automatické zmrazovací skříně, skrze kterou lze kontrolovaně ovládat teplotu vzorků (Obr. 13). Minimální teplota, která se v zmrazovací skříně vytvoří, je  $-15$  °C a maximální dosahuje  $+20$  °C. Ochlazování na minimální teplotu, a i ohřev na maximální teplotu probíhá v průběhu 45 min. Extrémní minimum i maximum je udržováno po dobu 15 min, z čehož vyplývá, že celková doba jednoho cyklu činí 120 min.

Po ukončení každého 25. cyklu se zkouška přerušila a došlo ke shromáždění uvolněných částic ze zkušební plochy. Tyto odpadlé částice se vysušily při teplotě  $105$  °C a následně byly zváženy na digitální váze s přesností na jedno desetinné místo. Roztok 3 % NaCl byl vyměněn a uvedený postup proběhl znovu.

Odolnost betonu proti CHLR,  $\rho_a$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ], je dána vztahem (12)

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A}, \quad (12)$$

kde  $\Sigma m$  je součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu [g] a  $A$  je velikost zkušební povrchu včetně smáčené plochy po obvodu tělesa [ $\text{m}^2$ ]. Rozšířená kombinovaná nejistota měření pro stanovení odolnosti vůči CHRL je 4,2 %.



Obr. 13: Uložení vzorků v automatické zmrazovací skříni

Po výpočtu odolnosti betonu proti CHLR dle výše uvedeného vzorce (12) byla zkušební tělesa zatříděna na základě hodnot  $\rho_a$ . Systém zatřídění je uveden v Tab. 3 [43].

Tab. 3: Zatřídění povrchů zkušebních ploch [45]

Stupeň porušení	$\rho_a$ [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Charakter odpadu
1 – nenarušený	do 50	Velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 – slabě narušený	do 500	Jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50% hmotnosti odpadu
3 – narušený	do 1000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
4 – silně narušený	do 3000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
5 – rozpadlý	přes 3000	Jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

## 6 Výsledky řešení a diskuse

### 6.1 Základní materiálové charakteristiky

Informace o základních strukturních vlastnostech betonů upravených povrchovými či hloubkovými impregnacemi jsou shrnuty v Tab. 4. Aplikace těchto úprav na betonové vzorky vyvolala výrazné snížení jejich otevřené pórovitosti, což indikuje proniknutí použitých látek do pórů betonu, a to jak při hloubkové penetraci, tak při povrchové úpravě. Z hlediska inženýrské praxe bude redukce pórovitosti přispívat k lepší odolnosti betonu a limitaci transportu potenciálně škodlivých substancí, které by mohly být vodou přenášeny do jeho struktury. Typickým případem jsou rozpustné anorganické soli, jež mají negativní dopad na trvanlivost betonu.

Tab. 4: Základní materiálové charakteristiky trámcových zkušebních vzorků

Označení vzorku	Objemová hmotnost $\rho_v$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Hustota matrice $\rho_{\text{mat}}$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Pórovitost $\Psi$ [%]
KNB	2173	2613	16,8
KNA	2213	2588	14,5
KNN	2223	2608	14,8
KN	2227	2575	13,5
KDB	1833	2585	29,1
KD50	1972	2443	19,3
KD90	2083	2358	11,7

### 6.2 Mechanické vlastnosti

Jak je patrné z Tab. 5, modifikace povrchové úpravy u betonu vyšší třídy („nový“ beton) neměla velký vliv na pevnost betonu. Naopak u vzorků z „degradovaného“ betonu hloubková impregnace vedla k značnému nárůstu pevnosti v tlaku. Jako nejúčinnější typ impregnace v případě degradovaného betonu se osvědčila hloubková impregnace Typu 2 (KD90), pevnost v tlaku se zvýšila o 65 %. Hodnoty dynamického modulu pružnosti odpovídají v porovnání s referenčními hodnotami obdobnému charakteru jako pevnost v tlaku.

Tab. 5: Mechanické vlastnosti zkoušených vzorků

Označení vzorku	Pevnost v tlaku $f_c$ [MPa]	Dynamický modul pružnosti $E_d$ [GPa]
KNB	34,4	26,4
KNA	32,4	29,6
KNN	29,1	33,0
KN	31,5	32,5
KDB	14,8	12,4
KD50	22,4	24,0
KD90	34,5	29,6

### 6.3 Transport vodní páry

V Tab. 6 jsou uvedena vyhodnocená data, která popisují difuzní vlastnosti zkoušených vzorků, přesněji transport plynné vlhkosti.

Hloubková impregnace betonových prvků vedla ke snížení pórovitosti jejího povrchu, a to mělo za následek snížení součinitele propustnosti pro vodní páru a zároveň zvýšení faktoru difuzního odporu. Z této skutečnosti, lze odvodit, že modifikace povrchové vrstvy zvýšila schopnost betonu odolávat průniku vodních par do materiálu.

U vzorků vyšší kvality neměla impregnace takový účinek jako u vzorků z degradovaného betonu. Jedinou viditelnou účinnost u toho typu betonu prokázala dvousložková vrstva nátěru u vzorků PARN. Na tomto místě lze zmínit skutečnost, že v případě zavlhlého betonu je vhodné, aby materiál povrchové úpravy umožnil samovolné vysychání betonu, bez poškození jeho povrchu. To je možné očekávat především u vzorků typu PARD50, PARD90, částečně u vzorků typu PARN. Na druhou stranu vzorky typu PARN a PARNN je možné považovat za parotěsně ošetřené, resp. transport vodní páry jejich povrchem a porézni strukturou bude probíhat velmi omezeně.

Tab. 6: Difuzní vlastnosti zkoušených vzorků

Označení vzorku	Součinitel propustnosti pro vodní páru $\delta$ [s]	Součinitel difúze $D$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Faktor difúzního odporu $\mu$ [-]
PARNB	$2,1 \cdot 10^{-12}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	95,7
PARNA	$5,4 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	48,9
PARNN	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	74,9
PARN	$1,8 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	111,4
PARDB	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	10,8
PARD50	$7,9 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	25,4
PARD90	$6,3 \cdot 10^{-12}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$	34,4

#### 6.4 Transport kapalné vlhkosti

V Tab. 7 jsou uvedeny materiálové parametry charakterizující transport a akumulaci kapalné vlhkosti. Přínos modifikace povrchové úpravy impregnačních přípravků na bázi epoxidových pryskyřic ke snížení průniku kapalné vlhkosti do zkoušených betonových prvků byl prokázán. A to jak v případě betonu běžné kvality („nový“ beton) tak i v případě betonu snížené kvality („degradovaný“ beton). Hodnoty absorpčního koeficientu  $A_w$  se snížily ve srovnání s referenčním vzorkem (TNB) o 90 % v případě vzorků TNN, o 83 % v případě vzorků TNA a o 93 % v případě vzorků TN. Pokles absorpčního koeficientu  $A_w$  byl u „degradovaného“ betonu ještě zásadnější než u betonu běžné kvality („nový“ beton), přesněji u vzorků TD50 došlo k poklesu o 99,96 % a u vzorků TD90 o 99,95 %. Z výsledků je patrné, že za nejúčinnější recepturu v kategorii pro „nový“ beton se prokázala úprava Typu III a v kategorii pro „degradovaný“ beton vykazovaly obě metody srovnatelnou účinnost.

U hodnot objemové nasákavosti lze také pozorovat výrazný pokles vlivem ošetření povrchové vrstvy, popř. jeho impregnace. Snížení nasákavosti materiálu v porovnání s jeho referenčními vzorky odpovídá poklesu o 84,5 % u vzorků TNN, o 60,4 % u vzorků TNA, o 91,98 % u vzorků TN, o 99,2 % u vzorků TD50 a o 99,7 % z vzorků TD90. Charakter výsledků je obdobný jako u hodnot absorpčního koeficientu  $A_w$ .



Tab. 7: Sorpční vlastnosti zkoušených vzorků

Označení vzorku	Absorpční koeficient pro vodu $A_w$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ]	24 h nasákavost $w_{24}$ [%]	24 h nasákavost $w_{24}$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
TNB	0,0208	3,479	3,638
TNA	0,0035	1,378	1,418
TNN	0,0021	0,539	0,545
TN	0,0014	0,279	0,264
TDB	3,3269	7,710	7,045
TD50	0,0013	0,063	0,060
TD90	0,0015	0,025	0,027

## 6.5 Mrazuvzdornost

V Tab. 8 jsou uvedena vyhodnocená data, která popisují schopnost odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazování a výsledný koeficient mrazuvzdornosti zkoušených vzorků. Dle normy ČSN 73 1322 se považuje za mrazuvzdorný beton takový, kdy koeficient mrazuvzdornosti není nižší než 75 %.

Tab. 8: Koeficient mrazuvzdornosti zkoušených vzorků

Označení vzorku	Koeficient mrazuvzdornosti $k$ [%]			
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
KNB	85,6	76,2	82,6	92,6
KNA	87,3	82,5	93,9	54,8
KNN	103,3	107,1	103,9	98,0
KN	81,51	85,45	101,3	109,1
KDB	vzorek poškozen po 1-3 cyklu			
KD50	95,7	88,3	100,6	102,0
KD90	94,0	98,5	105,2	94,3

Referenční vzorky degradovaného betonu KDB byly poškozeny již po 1 resp. 3 zmrazovacích cyklech a dále již nebyly zmrazováním a rozmrazováním zatěžovány, zobrazeno na Obr. 14



*Obr. 14: Poškození referenčního vzorku KDB po 1 zmrazovacím cyklu*

Nejlepší mrazuvzdornost z kategorie vyšší kvality betonu vykazovaly vzorky typu KN ošetřené dvouvrstvou optimalizovanou recepturou. Z hlediska mrazuvzdornosti tedy optimalizovaná směs ukázala velmi nadějně a perspektivní výsledky pro skutečné použití v praxi. Pro správnou funkčnost povrchové úpravy je nutné dodržet dostatečnou technologickou kázeň během její aplikace. V případě nesprávného provedení úpravy povrchu může dojít k jejímu znehodnocení, což by mělo za následek retenci vody a následný rozpad betonového prvku. Tím by se jakákoliv snaha o úpravu povrchu stala zbytečnou. Během provedení tlakové zkoušky u vzorků TN měl jeden vzorek výrazně nižší pevnost než ostatní, zobrazeno na Obr. 15. Je patrné, že technologická kázeň má velký vliv na konečný výsledek.



*Obr. 15: Srovnání TN vzorků po 100 zmrazovacích cyklech*

Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti u vzorků z betonu nižší kvality jsou řádově obdobného charakteru. Hloubková impregnace Typu 1, která se aplikovala na zkušební tělesa KD50 vykazovala vyšší účinnost než hloubková impregnace Typu 2 u vzorcích KD90. Koeficient mrazuvzdornosti u vzorků KD50 vykazoval po 100 cyklech cyklického zmrazování a rozmrazování vyšší hodnotu o 8,5 % oproti vzorkům KD90. U referenčních vzorků pro „degradovaný“ beton nebylo možné určit koeficient mrazuvzdornosti, vlivem jejich poškození po 1. resp. 3. cyklu. Lze z toho tedy vyvodit, že hloubková impregnace Typu 1 i Typu 2 měla velmi vysoký vliv na výsledné hodnoty koeficientu mrazuvzdornosti.

## 6.6 Odolnost vůči CHRL

Vyhodnocená data odolnosti betonu vůči CHRL jsou uvedena v Tab. 9. Referenční vzorky byly poškozeny vlivem CHRL již po 25. cyklu (TDB) resp. 50. cyklu (TNB) a dále u nich už neprobíhalo měření. Podle vizuálního zhodnocení povrchu a charakteru odpadu vzorků došlo k jejich zařazení dle Tabulky 3.

Tab. 9: Odolnost zkoušených vzorků betonu vůči CHRL

Označení vzorku	Odolnost betonu vůči CHRL $\rho_a$ [g·m <sup>-2</sup> ]	Počet cyklů	Stupeň porušení	Zápis výsledku
TNB	-	50	5	Rozpad vzorku
TNA	8,7	50	1	8,7 - 50
TNN	4,4	50	1	4,4 - 50
TN	14,2	125	1	14,2 - 125
TDB	-	25	5	Rozpad vzorku
TD90	16,0	125	1	16,0 - 125
TD50	25,1	125	1	25,1 - 125

Viditelné rozpady referenčních vzorků jsou znázorněny na Obr. 16.



*Obr. 16: Rozpad referenčních vzorků TDB (vlevo) a TNB (vpravo)*

Přínos aplikovaných přípravků na bázi epoxidových pryskyřic pro zvýšení odolnosti betonu vůči CHRL byl jasně prokázán. A to jak v případě hloubkové impregnace, tak i povrchové impregnace povrchu. U zkoušených vzorků typu TNA a TNN došlo k rozdílným výsledkům mezi jednotlivými tělesy ze stejné skupiny vzorků. Tyto rozdíly byly způsobeny nedokonalou aplikací povrchové úpravy, a to mělo za následek průnik roztoku NaCl pod tuto vrstvu.

Tato skutečnost vedla k porušení struktury betonu vlivem krystalizace NaCl, což je uvedeno na Obr. 17. Při dodržení technologické kázně během aplikace impregnace lze předpokládat obdobnou odolnost vůči CHRL jako u vzorků typu TN.



*Obr. 17: Stav vzorků TNA (vlevo) a TNN (vpravo) po 50. cyklu působení CHRL*



*Obr. 18: Stav vzorků TD50 (vlevo), TD90 (uprostřed) a TN (vpravo) po 125. cyklu*

## 7 Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabývala účinností plošné povrchové úpravy a hloubkové impregnace z hlediska ochrany a obnovy betonových prvků. Na zkušebních vzorcích byly stanoveny základní materiálové charakteristiky, mechanické a vlhkostní vlastnosti, mrazuvzdornost a odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Po vyhodnocení dat jsem dospěla k následujícím závěrům.

Na vzorky z betonu s označením „nový“ beton, které reprezentují běžnou kvalitu betonu, byly aplikovány tři různé receptury plošné povrchové úpravy. Všechny tři typy povrchové úpravy se prokázaly jako účinné a ukázaly značné zlepšení materiálových charakteristik ve srovnání s referenčním vzorkem, který byl bez úpravy povrchu. Při srovnání jednotlivých typů plošných povrchových úprav jasně vyniká Typ III (dvouvrstvý optimalizovaný systém). Mechanické vlastnosti nebyly vlivem úpravy povrchu výrazným způsobem ovlivněny. Z hlediska difúzních vlastností se prokázala jako účinná pouze jedna povrchová úprava, a to právě receptura Typu III, u ostatních nebyl zaregistrován dopad na změnu v pronikání plynné vlhkosti. Zbývající provedené zkoušky (stanovení nasákavosti a vlhkostního absorpčního koeficientu, mrazuvzdornosti a odolnosti CHRL) prokázaly zcela evidentně účinnost i ostatních typů povrchových úprav (Typ I a II), přičemž vždy excelovala dvouvrstvá optimalizovaná receptura Typu III.

Pro opravu (ošetření) již poškozeného betonu byla použita hloubková impregnace, konkrétně ve dvou typech (Typ 1 a Typ 2). Oba typy použitých receptur ukázaly pozitivní účinky na beton a prokázaly se jako účinné sanační prostředky pro degradovaný beton. Modifikace povrchu betonu umožnila snížení pórovitosti a nasákavosti materiálu. Tato skutečnost vedla k nižšímu průniku škodlivých látek, které by ohrozily vnitřní strukturu prvku a následný rozvoj degradačních procesů. Dále došlo ke zlepšení mechanických vlastností a výraznému zvýšení odolnosti proti cyklickému zmrazování a rozmrazování a proti chemickým rozmrazovacím látkám.

Ve srovnání mezi plošnou povrchovou úpravou a hloubkovou impregnací dosáhla vyšším účinkům hloubková impregnace. Zde lze podotknout, že na vzorcích z již poškozeného betonu byl větší prostor pro zlepšení betonu.

Na základě vyhodnocení jsem dospěla k závěru, že plošná povrchová úprava i hloubková impregnace jsou vhodné pro ochranu i obnovu betonu, a představují z praktického hlediska opodstatněný výdaj umožňující prodloužit životnost a funkčnost betonových konstrukcí.

## Literatura

- [1] HÁJEK, Petr. Udržitelná výstavba betonových staveb – od principů k normám: Sustainable construction of concrete structures – from principles towards standards. (Journal Article). DOI: <https://go.exlibris.link/V6Jf5tHW>.
- [2] Příručka technologa BETON: SUROVINY – VÝROBA – VLASTNOSTI. Českomoravský beton, a.s., 2013.
- [3] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 8080760578.
- [4] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 9788087093757.
- [5] ČSN EN 1744-5, Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 5: Stanovení chloridových solí rozpustných v kyselině. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [6] ČSN EN 1744-1+A1, Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 1: Chemický rozbor. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [7] PAVLÍKOVÁ, Milena. a KEPPERT, Martin. Chemie: chemie stavebních materiálů. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 8001042375.
- [8] ČSN EN 197-1, Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsová voda do betonu. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [10] ČSN EN 934-2 +A1 – Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označení a značení štítkem. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [11] GANDAGE, Abhijeet. Admixtures in Concrete – A Review. 2023/03/09.

- [12] RAMACHANDRAN, V.S. a V. M. MALHOTRA. 7 - Superplasticizers. In: Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1996, s. 410-517. ISBN 978-0-8155-1373-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-081551373-5.50011-8>.
- [13] WANG, Yifei, L. LEI, J. LIU, Y. MA, Y. LIU, Z. XIAO a C. SHI. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*. 2022, 134, 104762. ISSN 0958-9465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104762>.
- [14] ČSN EN 206+A2 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [15] GONÇALVES, M. Clara a F. MARGARIDO. *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design: Science, Processing, and Design*. 1;2015. Cham: Springer International Publishing, 2015; 2014; DOI: 10.1007/978-3-319-08236-3
- [16] HUO, Z., WANG, L. a HUANG, Y. Predicting carbonation depth of concrete using a hybrid ensemble model. *Journal of Building Engineering*. 2023, 76, 107320. ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107320>.
- [17] SU, X., MA, Y., WANG, L., GUO, Z. a ZHANG, J. Fatigue life prediction for prestressed concrete beams under corrosion deterioration process. *Structures*. 2022, 43, 1704-1715. ISSN 2352-0124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.043>.
- [18] GAO, Z., WANG, L., WANG, Z. a FANG, J. Surface features of frost damaged concrete: A study using multi-point micro displacement laser ranging method: A study using multi-point micro displacement laser ranging method. *Journal of Building Engineering*. 2023, 76, 107051. ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107051>.
- [19] FENG, K., PAN, J., XING, W., LI, M., GENG, J. a HE, C. Experimental study on the high water pressure erosion mechanism and its influence on the submarine shield tunnel concrete segments. *Construction and Building Materials*. 2023, 408, 133577. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133577>.
- [20] Obr. 1: Karbonatace betonu. Dostupné z: <https://www.ircen.gov.in/LAB/res/html/Test-34.html>.



- [21] WANG, Ruijun, Z. HU, Y. LI, K. WANG a H. ZHANG. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment. *Construction and Building Materials*. 2022, 321, 126371. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126371>.
- [22] PAN, X., SHI, Z., SHI, C., LING, T.-C., a LI, N. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms: Types and mechanisms. *Construction and Building Materials*. 2017, 132, 578-590. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>.
- [23] ČSN EN 1504-2 – Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 2: Systémy ochrany povrchu betonu. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [24] Obr.2: Schématický náčrt typické hydrofobní impregnace, dostupné z normy ČSN EN 1504-2, 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [25] Obr. 3: Schématický náčrt typické impregnace, dostupné z normy ČSN EN 1504-2, 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [26] Obr. 4: Schématický náčrt typického nátěru, dostupné z normy ČSN EN 1504-2, 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [27] MA, C.-K., APANDI, N. M., SOFRIE, C. S. Y., NG, J. H., LO, W. H., AWANG, A. Z. a OMAR, W. Repair and rehabilitation of concrete structures using confinement: A review: A review. *Construction and Building Materials*. 2017, 133, 502-515. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.100>.
- [28] DROCHYTKA, Rostislav. Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III. [Brno]: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, [2012]. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [29] SONG, X., SONG, X., LIU, H., HUANG, H., ANVAROVNA, K. G., UGLI, N. A. D., HUANG, Y., HU, J., WEI, J. a YU, Q. Cement-Based Repair Materials and the Interface with Concrete Substrates: Characterization, Evaluation and Improvement: Characterization, Evaluation and Improvement. *Polymers* [online]. 2022, 14(7). ISSN 2073-4360. DOI:10.3390/polym14071485.

- [30] CHOLE, A, A TEMBHURNE, A BAWANTHADE, H BHADADE, H ALI KHAN a S. KUMAR SHAW. Strengthening of reinforced concrete beams by using FRPs-An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2023. ISSN 2214-7853. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.149>.
- [31] GOYAL, A., H. S. POUYA, E. GANJIAN a P. CLAISSE. A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. 2018, 43(10), 5035-5055. ISSN 2193567X. DOI: 10.1007/s13369-018-3303-2.
- [32] DANESHVAR, D., A. BEHNOOD a A. ROBISSON. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review: A review. *Construction and Building Materials*. 2022, 359, 129195. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129195>.
- [33] CAI, D., CHEN, P., SHI, Y., YAO, J., YAN, H., PENG, P. (2022). Analytical calculation method for passive tensile damage of asphalt concrete waterproof sealing structure of ballastless track subgrade. *Construction and Building Materials*, 320, 126158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126158>.
- [34] SÁNCHEZ, M., FARIA, P., FERRARA, L., HORSZCZARUK, E., JONKERS, H. M., KWIECIEŃ, A., MOSA, J., PELED, A., PEREIRA, A. S., SNOECK, D., STEFANIDOU, M., STRYSZEWSKA, T., ZAJĄC, B. (2018). External treatments for the preventive repair of existing constructions: A review. *Construction and Building Materials*, 193, 435–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.173>.
- [35] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [36] MCMURRY, John. *Organická chemie*. V Brně: VUTIUM, 2007. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 8070806370.
- [37] Využití epoxidových pryskyřic [online], dostupné z: <https://epoxy-europe.eu/applications/>.
- [38] KROSCSWITZ, Jacqueline I. *High Performance Polymers and Composites*; Editor: Jacqueline I. Kroschwitz. Hong Kong: John Wiley, 1991. ISBN 0471543667.
- [39] ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [40] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [41] ČSN EN ISO 12572 – Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [42] ČSN EN 1015-18 – Zkušební metody malt pro zdivo – Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [43] ČSN EN 772-11 – Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdicích prvků z umělého a přírodního kamene vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti pálených zdicích prvků. 1. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [44] ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1. Praha. Úřad pro normalizaci a měření, 1969.
- [45] ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. 1. Praha. Úřad pro normalizaci a měření, 1984.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Karbonatace betonu [20] .....	19
Obr. 2: Schématický nákres typické hydrofobní impregnace [24] .....	21
Obr. 3: Schématický nákres typické impregnace [25] .....	22
Obr. 4: Schématický nákres typické nátěru [26] .....	22
Obr. 5: Zkoušené vzorky – krychle a trámce .....	26
Obr. 6: Kruhové vzorky pro zkoušku propustnosti pro vodní páru .....	26
Obr. 7: Vzorky po nanesení epoxidové pryskyřice pro zajištění 1D vlhkostního toku .....	28
Obr. 8: Heliový pyknometr .....	29
Obr. 9: Zkušební těleso během tlakové zkoušky .....	31
Obr. 10: Měření transportu vodní páry cup metodou, umístění v klimatické komoře .....	32
Obr. 11: Provedení zkoušky transportu kapalné vlhkosti .....	34
Obr. 12: Uložení vzorků do zmrazovací skříně pro zkoušku mrazuvzdornosti .....	35
Obr. 13: Uložení vzorků v automatické zmrazovací skříně .....	37
Obr. 14: Poškození referenčního vzorku KDB po 1 zmrazovacím cyklu .....	42
Obr. 15: Srovnání TN vzorků po 100 zmrazovacích cyklech .....	42
Obr. 16: Rozpad referenčních vzorků TDB (vlevo) a TNB (vpravo) .....	44
Obr. 17: Stav vzorků TNA (vlevo) a TNN (vpravo) po 50. cyklu působení CHRL .....	44
Obr. 18: Stav vzorků TD50 (vlevo), TD90 (uprostřed) a TN (vpravo) po 125. cyklu .....	45

## Seznam tabulek

Tab. 1: Stupně vlivu prostředí [14].....	17
Tab. 2: Specifikace testovaných vzorků.....	27
Tab. 3: Zatřídění povrchů zkušebních ploch [45].....	37
Tab. 4: Základní materiálové charakteristiky trámcových zkušebních vzorků.....	38
Tab. 5: Mechanické vlastnosti zkoušených vzorků.....	39
Tab. 6: Difuzní vlastnosti zkoušených vzorků.....	40
Tab. 7: Sorpční vlastnosti zkoušených vzorků.....	41
Tab. 8: Koeficient mrazuvzdornosti zkoušených vzorků.....	41
Tab. 9: Odolnost zkoušených vzorků betonů vůči CHRL.....	43