

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA KONSTRUKCÍ POZEMNÍCH STAVEB



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zvýšení odolnosti betonové konstrukce budov proti průniku chloridových iontů

2024

Bc. Veronika Blovká

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Pazderka, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Blovská Jméno: Veronika Osobní číslo: 484493
Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb (K124)
Studijní program: N3607 - Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: 3608T008 - Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zvýšení odolnosti betonové konstrukce budov proti průniku chloridových iontů
Název diplomové práce anglicky: Improvement of concrete building structures protection against chloride ingress
Pokyny pro vypracování:
- studím platných předpisů a norem
- rešerše dosavadních přístupů pro omezení průniku chloridových iontů do betonové konstrukce
- experimentální analýza hypotéz získaných z rešerše
Seznam doporučené literatury:
- A. M. Neville: Properties of Concrete, Trans-Atlantic Publications, Inc., 2012
- Reiterman P., Keppert M.: Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete, Roads and Bridges, 19/1, 2020, DOI: 10.7409/rabdim.020.003
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pazderka, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 25.9.2023 Termín odevzdání DP 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 diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.

25.9.2023
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Veronika Blovká

Název diplomové práce: Zvýšení odolnosti betonové konstrukce budov proti průniku chloridových iontů

Základní část: KPS podíl: 80 %

Formulace úkolů: - studium platných předpisů a norem

- rešerše dosavadních přístupů pro omezení průniku chloridových iontů do betonové konstrukce

- experimentální analýza hypotéz získaných z rešerše

Podpis vedoucího DP: 

Datum: 25.9.2023

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Experimentální část - K210 (Experimentální centrum) podíl: 20 %

Konzultant (jméno, katedra): doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

Formulace úkolů: - výroba a odběr vzorků

- experimentální měření

Podpis konzultanta: 

Datum: 26.9.23

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Poděkování patří mému vedoucímu panu Jiřímu Pazderkovi a konzultantovi panu Pavlu Reitermanovi za cenné vedení, podporu a neustálou ochotu pomoci během celého procesu psaní této práce. Vaše odborné rady, vstřícnost a připomínky pro mě byly neocenitelné.

Anotace:

Tato diplomová práce se věnuje možnostem ochrany betonových konstrukcí proti působení chloridových iontů. Zaměřuje se na znění aktuálně platných předpisů a norem pro danou problematiku, mechanismus pronikání chloridů a shrnuje sanační a preventivní opatření. Před navrženým experimentálním programem proběhla výroba zkušebních krychlí pro aplikaci preventivního opatření. Vzorky jsou v rámci experimentu podrobeny zkouškám tlakové pevnosti a vodotěsnosti, nicméně hlavní náplní je následné stanovování obsahu chloridů po expozici v roztoku chloridu sodného. Následuje porovnání výsledků a kritická diskuze.

Klíčová slova:

Beton, průnik chloridů, ochrana betonových konstrukcí, rozmrazovací látky na bázi chloridů, krystalizační nátěr.

Annotation:

This thesis deals with the possibilities of protection of concrete structures against the action of chloride ions. It focuses on the wording of the currently valid regulations and standards for this issue, the mechanism of chloride penetration and summarizes the remediation and preventive measures. Prior to the designed experimental program, the production of test cubes for the application of the preventive measure was carried out. The samples are tested for compressive strength and watertightness as part of the experiment, but the main focus is the subsequent determination of chloride content after exposure to sodium chloride solution. A comparison of the results and a critical discussion follow.

Keywords:

Concrete, chloride ingress, protection of concrete structures, chloride-based de-icers, crystalline waterproofing coating.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
Úvod	10
1. Teoretická část	12
1.1. Přítomnost chloridů v dílčích komponentách betonové směsi	12
1.1.1. Celkový obsah chloridů v betonu	14
1.2. Hydratace, cementový kámen	15
1.2.1. Beton odolný proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL)	17
1.3. Klasifikace podle stupně vlivu prostředí	18
1.4. Mechanismus pronikání chloridů a důsledky	19
1.4.1. Matematický model působení chloridů	21
1.5. Sanační opatření	23
1.6. Výztuž	25
1.7. Preventivní opatření	26
1.7.1. Omezení koroze betonu	26
1.7.2. Omezení koroze oceli	28
1.7.2.1. Kovové povlaky	29
2. Experimentální část	31
2.1. Materiály	31
2.1.1. Krystalizační nátěry	31
2.2. Zkušební tělesa a složení zkušebních směsí	32
2.2.1. Příprava zkušebních těles	32
2.2.2. Souhrn použitých receptur	33
2.3. Použité zkušební metody	33
2.3.1. Stanovení stupně konzistence	33
2.3.2. Stanovení pevnosti v tlaku	34
2.3.3. Stanovení hloubky průsaku	37
2.3.4. Stanovení obsahu chloridových iontů	37
2.3.4.1. Výpočet koeficientu průniku chloridových iontů	40
3. Výsledky a diskuse	43
Závěr	50
Literatura	52
Seznam obrázků	55

Seznam tabulek	56
Přílohy.....	57
Příloha 1: Osvědčení o stálosti vlastností – Portlandský cement	57
Příloha 2: Prohlášení o vlastnostech – Pamětník 4/8	58
Příloha 3: Prohlášení o vlastnostech – Pamětník 8/16	59
Příloha 4: Prohlášení o vlastnostech – Dobříň 0/2.....	60
Příloha 5: Prohlášení o vlastnostech – Xypex Concentrate.....	61

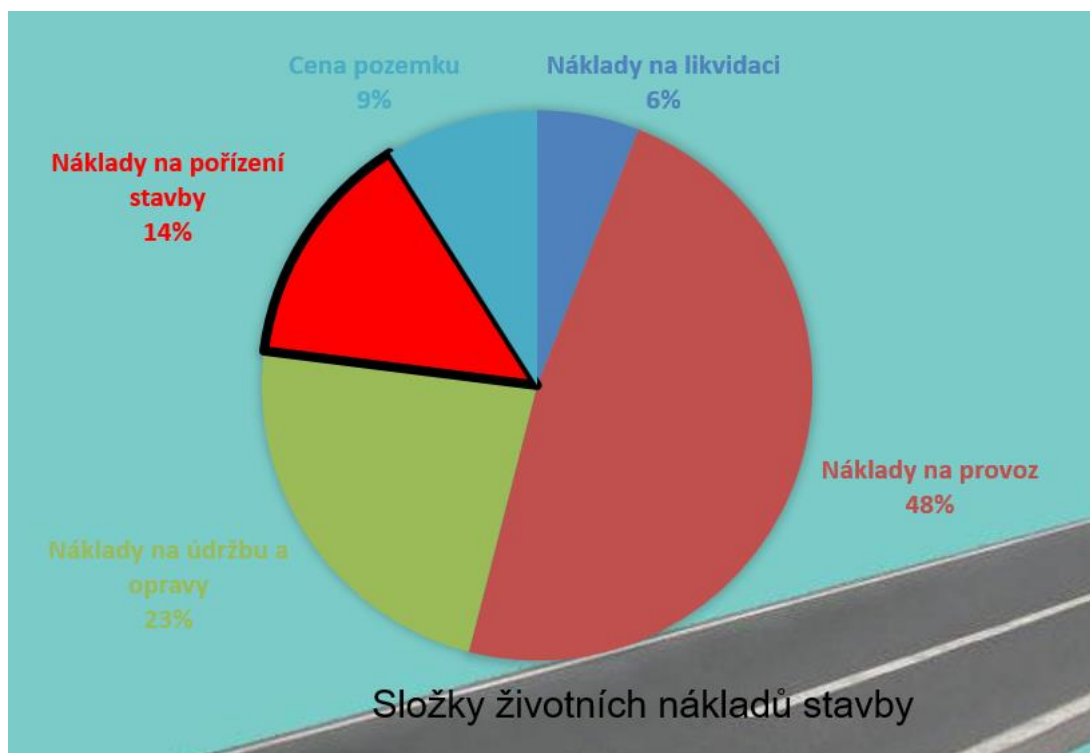
Seznam použitých symbolů a zkratek

ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
CEM	značení cementů podle složení
Cl, Cl ⁻	chlor, záporně nabitý iont chloru
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
MD ČR	Ministerstvo dopravy České republiky
pH	vodíkový exponent, vyjadřuje kyselost/zásaditost

Úvod

Stavební konstrukce jsou vystaveny vlivům prostředí, které mohou snížit jejich trvanlivost a odolnost. Jedním z těchto faktorů je působení chloridů, které mohou být přítomny například v městském prostředí z důvodu znečištění či probíhající zimní údržby anebo v pobřežních oblastech vystavených slanému vzduchu. Chloridy pronikají do betonu a postupem času způsobují korozivní poškození ocelové výztuže. Důsledky tohoto poškození mohou být mimořádně problematické a mohou ohrozit bezpečnost a spolehlivost celé stavby.

Při prostudování složek životních nákladů našich dopravních staveb (obr. 1) je zřejmé, že náklady na údržbu a opravy komunikací dosahují 23 % celkových nákladů. Ředitelství silnic a dálnic pracuje s ročními rozpočty v řádech desítek miliard korun, jedná se proto o velmi vysoké částky, které jsou každoročně vynakládány. Z tohoto a dalších důvodů je důležité porozumět vlivu chloridů na betonové konstrukce a implementovat opatření, která pomohou minimalizovat jejich škodlivost. Provádění analýz a testů, které zkoumají vliv chloridů na konstrukce, může být klíčové pro zajištění dlouhodobé trvanlivosti a bezpečnosti stavebních projektů.



Obrázek 1: Složky životních nákladů stavby, zdroj: ŘSD

První část práce je rešerší platných předpisů a norem a vlivu působení chloridů na beton. Věnuje se také mechanismu pronikání chloridových iontů a sanačním a preventivním opatřením pro betonové konstrukce. Použity byly české i zahraniční odborné publikace.

Druhá část práce se zabývá návrhem a provedením experimentu, který zkoumá vliv vybraného preventivního opatření. V rámci experimentu byly vyrobeny zkušební krychle pro aplikaci preventivního opatření i jako referenční vzorky, krychle byly zkoušeny na pevnost v tlaku a průsak. Výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů a vzájemně porovnány, následně bylo provedeno vyhodnocení a závěr.

Cílem práce je vyhodnocení vhodnosti vybraného preventivního opatření a srovnání experimentálně zjištěných výsledků s výsledky výzkumu jiných týmů. Hodnotí se zejména obsah chloridů v závislosti na hloubce s přihlédnutím k provedeným preventivním opatřením.

1. Teoretická část

1.1. Přítomnost chloridů v dílčích komponentách betonové směsi

Během své životnosti je železobetonová konstrukce vystavena různým přírodním procesům, které mohou způsobit její postupnou degradaci. Jedním z nejběžnějších je pronikání chloridů do betonu používáním rozmrazovacích prostředků obsahujících chloridy nebo z vystavení konstrukce mořské vodě. Chloridové ionty postupují betonem směrem k výztuži a ve chvíli, kdy koncentrace chloridů na povrchu výztuže dosáhne kritické hodnoty, způsobují její korozi. Korozi provází tvorba oxidů a hydroxidů, které mají větší objem než samotná ocel, což vede k vysokému tlaku, praskání betonu a následnému odlupování povrchové vrstvy. Obsah chloridů v pórovém roztoku také způsobuje tvorbu chloroaluminátu $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, tzv. Friedlových solí. Schopnost betonu odolávat pronikání chloridů je proto jednou z klíčových vlastností pro železobetonové konstrukce [1], [2], [3].

Otázka přítomnosti chloridů a jejich vliv na beton se stává důležitou už na úrovni samotných složek betonu, jako jsou cement, voda a kamenivo. Každá z těchto složek může přispět k celkovému obsahu chloridů v betonu.

Norma ČSN EN 197-1 stanoví požadavky na chemické vlastnosti cementů. V této normě jsou v Tabulce 4 uvedeny charakteristické hodnoty chemických vlastností. Pro všechny druhy cementů a pevnostní třídy je stanoveno, že obsah chloridů nesmí překročit 0,10 % celkové hmotnosti cementu. Cementy typu CEM III mohou obsahovat více než 0,10 % chloridů, ale v takovém případě musí být maximální povolený obsah chloridů uveden na obalech a/nebo v průvodní dokumentaci. Pro cementy určené pro předpínané prvky může být stanovena nižší maximální hodnota chloridů. V takovém případě musí být hodnota 0,10 % nahrazena touto nižší hodnotou a tato hodnota musí být uvedena v průvodní dokumentaci [4].

Obsah chloridů v záměsové vodě, změřený podle normových zkušebních postupů a vyjádřený jako Cl^- , by neměl překročit určené limity, jak je uvedeno v

Tabulce 2 normy ČSN EN 1008. Maximální povolený obsah chloridů závisí na konkrétním použití. Pro předpjatý beton nebo injektážní maltu je maximální povolený obsah chloridů 500 mg na litr, pro beton s výztuží nebo se zabudovanými kovy 1000 mg litr a pro beton bez výztuže nebo bez zabudovaných kovů 4500 mg na litr [5].

Norma ČSN EN 12620+A1 neuvádí požadavek na obsah ve vodě rozpustných chloridů v kamenivu do betonu. Většina vnitrozemských zdrojů obvykle obsahuje velmi nízké množství rozpustných chloridů v kamenivu [6].

Aktuálně platné předpisy stanovují technologické požadavky na kamenivo určené pro beton, které se týkají obsahu chloridů, dusičnanů a dalších halogenidů, s výjimkou fluoru. Pro kamenivo určené pro železobeton stanovuje maximální povolený obsah chloridů na 0,04 % Cl⁻, pro kamenivo používané při výrobě předpjatého betonu je limit stanoven na 0,02 % Cl⁻ a pokud jde o betony bez výztuže, dovoluje se obsah chloridů až do 0,1 % Cl⁻ [7].

Pro použití recyklovaného kameniva do betonu je nutné splnit řadu zkoušek a rozborů dle norem a resortních předpisů, např. ČSN EN 12620+A1. Posledně zmíněná norma rozlišuje několik složek recyklovaného kameniva, mezi nimi beton a maltu (označení Rc), směs stmelého nebo nestmelého kameniva (Ru) či cihelnou složka (Rb) a mnoho dalších. Podle norem lze nahradit až 50 % z celkového obsahu kameniva betonovým recyklátem, ve kterém je podíl betonové složky větší než 50 %, v normách jsou pak dva typy recyklovaného kameniva označeny typ A a B. Použití recyklátu je dovoleno pouze v betonech nižších pevnostních tříd a stupňů vlivů prostředí [8], [9]. V současné době není podrobněji řešeno složení recyklátu ani požadavky na chemické vlastnosti. Mnoho podniků si proto určuje své vlastní vnitřní požadavky pro recyklované kamenivo, v některých případech nahrazují až 100 % přírodního kameniva pro různé stupně vlivu prostředí [10]. Jiné technologické příručky uvádí výčet stupňů vlivu prostředí, pro které již nelze recyklované kamenivo použít, taktéž se nesmí jednat o předpjaté konstrukce, konstrukce s vysokými požadavky na vodotěsnost, o pohledové betony a betony ve styku s pitnou vodou a

potraviny [7]. Stejně jako jiná témata má i recyklované kamenivo z různých důvodů své odpůrce i zastánce, nicméně obě skupiny se shodují, že postrádají dostatečnou normativní oporu [11], [12].

K prověření vlastností přísad a jejich účinnosti se často využívají standardizované složky, malty a betony. Obsah chloridů v přísadách nemá překračovat 0,1% hmotnosti. Přísady, které mají být použity ve vyztuženém betonu, nesmí způsobovat korozi výztuže [7].

Požadavky na obsah chloridů formulují normy i pro příměsi. Popílek nesmí mít dle ČSN EN 450-1 obsah Cl^- vyšší než 0,1 % hmotnosti. ČSN EN 13263-1+A1 uvádí požadavek pro obsah chloridů pro křemičitý úlet do betonu – obsah Cl^- nesmí překročit 0,3 % hmotnosti. Pokud obsah chloridů přesáhne 0,10 % hmotnosti, výrobce je povinen stanovit maximální povolenou hodnotu této charakteristické vlastnosti. Požadavek na přítomnost chloridů v mleté granulované vysokopecní strusce pro použití do betonu specifikuje ČSN EN 15167-1. Obsah chloridů větší než 0,1% hmotnosti může mletá vysokopecní struska obsahovat jen v případě, že je maximální množství uvedeno na obalu a/nebo v průvodní dokumentaci [13], [14], [15].

1.1.1. Celkový obsah chloridů v betonu

Maximální obsah chloridů v betonu je jeden z šesti technických údajů tvořících specifikaci betonu. Hodnotu určující je způsob vyztužení konstrukce: 0,20 pro předpjaté konstrukce, 0,40 pro konstrukce s ocelovou výztuží a 1,0 pro prostý beton. Číslo udává maximální obsah chloridů v procentech ve vztahu k obsahu cementu v betonu [2].

Norma ČSN EN 206+A2 uvádí maximální obsah Cl^- , vyjádřený procentním podílem chloridových iontů k hmotnosti cementu, podle použití betonu následovně: 0,20 nebo 0,10 pro beton s předpjatou výztuží, 0,40 nebo 0,20 pro beton s ocelovou výztuží nebo jinými kovovými vložkami a 1,0 pro prostý beton. Do betonu, který obsahuje ocelovou výztuž, předpjatou ocelovou výztuž nebo

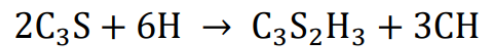
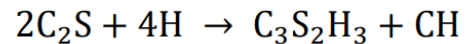
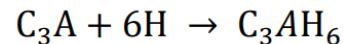
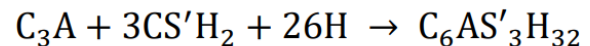
jiné kovové vložky, nesmí být přidáván chlorid vápenatý ani přísady obsahující chloridy [16].

1.2. Hydratace, cementový kámen

Pro hlubší porozumění působení chloridů a průniku chloridových iontů do betonových konstrukcí je vhodné se zaměřit na strukturu cementového kamene a hydrataci, která předchází jeho vzniku.

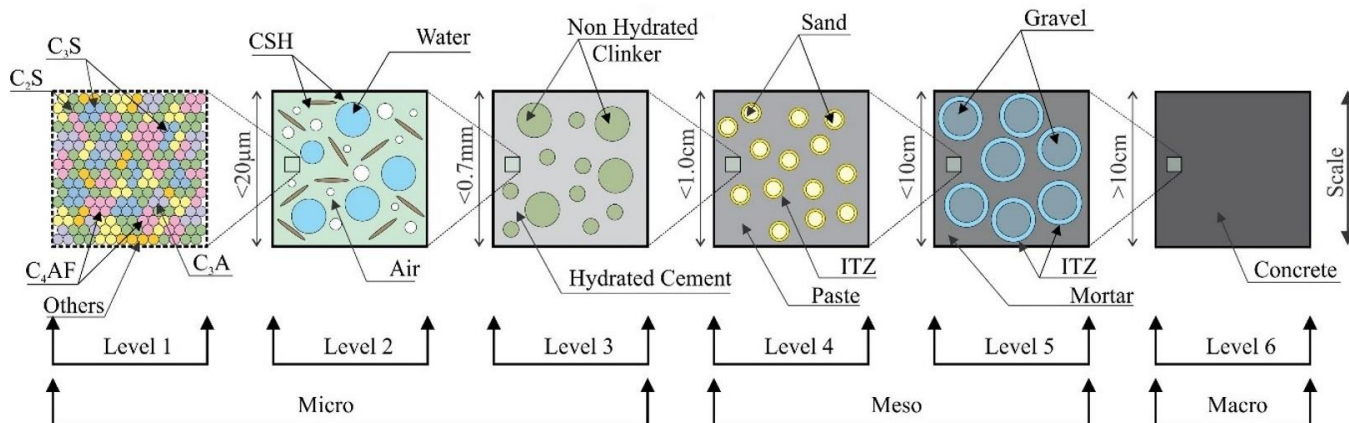
Beton je komplexní stavební materiál, skládající se z několika klíčových složek, včetně kameniva, pojiva a vody. Nejběžnějším pojivem je portlandský cement. Vyrábí se výpalem surovinové směsi skládající se ze čtyř hlavních oxidů: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . V procesu výroby vznikají slínkové minerály, které zapříčiňují pojivové vlastnosti cementu. Mezi slínkové minerály patří trikalciumpilikát (C_3S , alit), dikalciumpilikát (C_2S , belit), trikalciumaluminát (C_3A) a tetraalkaliumaluminát ferit (C_4AF , celit). Hydratace cementu začíná, když jsou slínkové minerály smíchány s vodou. Proces je chemickou exotermickou reakcí, která vede ke vzniku jemných krystalů a pevných vazeb v betonové směsi. Výsledkem hydratace slínkových minerálů jsou produkty, které se liší v závislosti na složení cementové směsi a vodním součiniteli. Ideální množství vody je takové, aby se co nejvíce slínkových minerálů hydratovalo a současně minimalizovalo množství přebytečné vody a jejího odparu v cementovém kameni. Níže na obrázku (obr. 2) jsou obvykle uváděné chemické rovnice hydratace, H je ve výrazech značena voda [17], [18], [19].

Během hydratace křemičitanových slínkových minerálů dochází ke vzniku hydratovaných vápenato-křemičitanových produktů, mezi něž patří například hydrosilikátový gel (CSH) a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Gel CSH má jehlicovou strukturu a je klíčovým pro dosažení konečné pevnosti betonu. Portlandit nepřispívá k rozvoji pevnosti, ale hraje roli v ochraně ocelové výztuže před korozí. Reakce je spojena s uvolněním hydratačního tepla, což vede k autogennímu smršťování betonu během tvrdnutí [18], [19].

Hydratace C₃S:**Hydratace C₂S:****Hydratace C₃A (bez sádrovce):****Hydratace C₃A (za přítomnosti sádrovce):****Obrázek 2: Chemické rovnice hydratace cementu [19]**

Hydratací celitu a trikalciualuminát feritu vznikají hydroalumináty výrazně krystalického charakteru. Produktem velmi rychlé chemické reakce je nepřilíš pevný CAH (kalcium-alumino-hydrát) a značné množství tepla. Pro udržení zpracovatelnosti čerstvé kaše je do cementové směsi přidáván mletý sádrovec ve formě sádry nebo anhydritu. Sádrovec reaguje s alumináty, vzniká primární ettringit. Vzniklé ochranné osmotické membrány z ettringitu na površích aluminátů zabraňují kontaktu aluminátů a vody a tím zpomalují tuhnutí směsi. Po ukončení tvorby ettringitu vyčerpáním sádrovce opět nastává reakce vody a aluminátů a tuhnutí. Dále začne vznikat hydrogarnet (C₃AH₆), který s ettringitem rekrytalizací vytvoří monosulfát [18], [19].

Na následujícím obrázku (obr. 3) je dobře patrné měnící se měřítko při pohledu na výřez betonového prvku. Na úrovni 4 a 5 označuje popis *interfacial transition zone* (ITZ) vrstvu s odlišnou mikrostrukturou okolo kameniva, tranzitní zónu. První dvě úrovně schematicky zobrazují slínkové minerály a hydrosilikátový gel.



Obrázek 3: Schéma zobrazující fáze a rozměry betonu od mikroměřítko po makroměřítko, upraveno [20]

1.2.1. Beton odolný proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL)

V literatuře lze nalézt zmínky o betonu odolném proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. V současné době se nejedná o specifickou recepturu nebo sadu normových požadavků na zkušební těleso, nýbrž o obecné označení betonu, který by měl být vhodný pro použití v prostředí mrazových cyklů, popřípadě s chemickými rozmrazovacími látkami. Rozmrazovací prostředky rozpouštějící led při teplotách pod bodem mrazu v kombinaci s mrazem samotným vyvozují značné namáhání na materiál a/nebo konstrukci. Pro betonové směsi proto bývá doporučováno dodržení minimální dávky cementu a daného vodního součinitele, dále vhodné provzdušnění betonu a v neposlední řadě použití vhodných příměsí a plniv s vybranými přísadami [7], [21].

Zkoušení míry narušení povrchu betonu, a tedy stanovení odolnosti proti působení CHRL se zabývá ČSN 73 1326. Podstatou zkoušky je cyklické ochlazování na zápornou teplotu a zahřívání vzorku na kladnou teplotu po předepsanou dobu. Zkouška metodou ruční manipulace zahrnuje dávkování

chemické rozmrazovací látky na vrstvu ledu určité tloušťky na povrchu zkušebního tělesa. Při zkoušení se používá roztok chloridu sodného. Výsledkem zkoušky je číslo rozdělné pomlčkou, kde první část udává množství odpadu v $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ a druhá počet cyklů. V Čechách je nejčastěji využívána metoda automatického cyklování II (metoda C) a na Moravě se, pravděpodobně kvůli požadavkům ŘSD, častěji zkouší metodou automatického cyklování I (metoda A). Metodika zkoušení není bezproblémová, jednotlivé zkušební postupy by však měly být vzájemně porovnatelné, přestože se liší například v tvaru zkušebních těles, režimu mrazových cyklů anebo mírou účinnosti cyklování [7], [21], [22].

1.3. Klasifikace podle stupně vlivu prostředí

Klasifikace betonu podle stupně vlivu prostředí je klíčovým krokem při navrhování betonových konstrukcí a určování jejich odolnosti vůči agresivním faktorům. ČSN EN 206+A2 uvádí popisy prostředí a informativní příklady jejich výskytu v Tabulce 1 normy. Stupně vlivu prostředí zohledňují různé faktory, jako je expozice mrazu, chemickému působení, karbonataci, chloridům a dalším. V platných normách již není zahrnut stupeň vlivu prostředí způsobený pohyblivým mechanickým zatížením XM, dále resortní předpis MD ČR uvádí označení pro nebezpečí vzniku alkalicko-křemičité reakce jako XW. Každé prostředí má specifické požadavky na odolnost betonu, v důsledku i na složení betonu, včetně vodního součinitele, dávky cementu, použití vhodných příměsí a plniv a vhodné provzdušnění betonu. V rámci této práce jsou relevantní stupně vlivu prostředí XD, XS a XF [16].

Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody, označení XD, má tři stupně a týká se betonu s výztuží nebo s jinými zabudovanými kovovými vložkami. Beton je vystaven působení chloridů, typicky z rozmrazovacích solí. Mezi příklady prostředí patří dopravní plochy a garáže (XD1), plavecké bazény nebo mosty (XD2) a betonová parkoviště nebo mosty a inženýrské stavby (XD3). Koroze vlivem chloridů z mořské vody, uváděná jako XS, není pro vnitrozemí obvyklá. Je třeba mít na paměti, že se nejedná pouze o stavby u moře a v moři (XS2, XS3), ale i konstrukce vystavené slanámu vzduchu blízko pobřeží (XS1).

Posledním z vlivů, který se dotýká tématu práce, je působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich, zkratka XF. Norma rozlišuje čtyři stupně, kde první dva zahrnují svislé povrchy (XF1, XF2) a druhé dva vodorovné povrchy, nejčastěji vozovky a mostovky (XF3, XF4). První a třetí stupeň je bez rozmrazovacích prostředků, druhý a čtvrtý je zahrnuje [16].

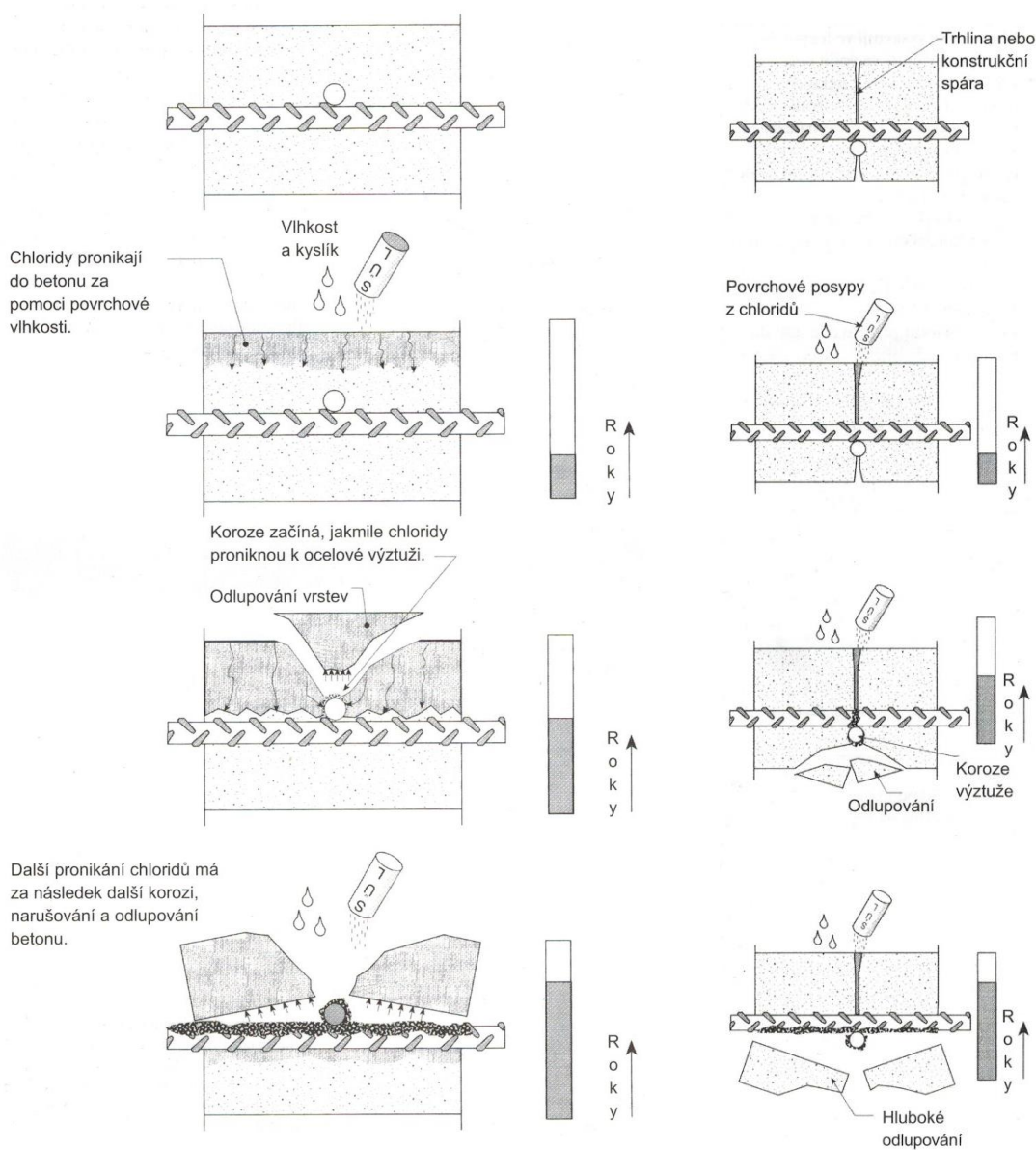
1.4. Mechanismus pronikání chloridů a důsledky

Hlavními zdroji chloridů, které ovlivňují betonové konstrukce a mohou negativně ovlivnit jejich trvanlivost, jsou různé faktory vlivu prostředí. Moře je přirozeným zdrojem chloridů, vystavení konstrukce vlivu mořské vody anebo vlivu slaného vzduchu pobřežních oblastí má za následek pronikání chloridů do betonu. Mořská voda obsahuje různé druhy solí, nejčastěji chloridy, jako je chlorid sodný, ale také sírany, uhličitany, vápník, hořčík a další minerální sloučeniny. Přítomnost solí je způsobena zejména zvětráváním a následným vyplavováním hornin na souši řekami. Erupce podmořských sopek patří mezi další zdroje, vždy se jedná o geologické a chemické procesy, které se odehrávají v průběhu dlouhého časového období. Dalším významným zdrojem chloridů ohrožujícím betonové konstrukce jsou chloridy obsažené v rozmrazovacích solích, které se používají k zajištění sjízdnosti silničních komunikací během zimního období. Nejpoužívanější posypová sůl v České republice je NaCl (chlorid sodný), v minimálním množství v případě předpovědi větších mrazů CaCl₂ (chlorid vápenatý, nižší teplota tání, ve formě solanky). Chloridy mohou také pocházet z průmyslových emisí a odpadů, které obsahují chloridové sloučeniny [23], [3].

Mechanismus pronikání chloridů je s ohledem na nové materiály pořád aktuálním tématem. Pokud je betonová konstrukce vystavena prostředí obsahující chloridy, průnik začíná na povrchu a postupuje dovnitř konstrukce. Rychlost pronikání závisí především na styčném množství chloridů, propustnosti betonu a množství přítomné vlhkosti. Významný vliv na iniciaci koroze, která je důsledkem působení chloridů, vizte dále, má pH betonu. Bylo experimentálně zjištěno, že při pH 13,2 vyžadovalo započítání koroze 0,8 % koncentrace chloridových iontů, snížením pH na 11,6 stačilo 0,0071 %

chloridových iontů. Na obrázku níže (obr. 4) je schematicky ukázán celý proces i s důsledky [24].

Poměrně dramaticky mohou pronikání korozivních chemikálií uspišit trhliny a nevhodně navržené konstrukční spáry. Normy obvykle předpokládají, že stanovit šířku trhlin podle jednoduchých vztahů není možné, samotná šířka pak ani není důležitá. Uvádí, že konstrukce by měla vyhovět meznímu stavu šířky trhlin; cílem je, aby trhliny nezhoršovaly použitelnost a nesnižovaly životnost konstrukce. V mnohých publikacích lze dohledat přípustné šířky trhlin pro různé podmínky působení. Obrázek níže (obr. 5) ilustruje betonovou konstrukci s trhlinou vystavenou chloridům [24].



Obrázek 4: Pronikání chloridů [24]

Obrázek 5: Trhliny a chloridy [24]

Mezi důsledky působení chloridů na betonové konstrukce patří na prvním místě koroze oceli, soli ale mohou zanechávat skvrny na povrchu a měnit zbarvení nebo způsobovat drolení, lámavost a praskání povrchových vrstev – jako důsledek koroze výztuže, ale i nezávisle, např. u prvků z prostého betonu. Při hodnocení působení chloridů je třeba brát v potaz časovou proměnlivost, v souvislosti zimní údržby i četnost, intenzitu a složení posypů, roční období, teplotu a četnost srážek. Obrázek (obr. 6) znázorňuje další možné poškození betonové konstrukce.



Obrázek 6: Degradace výztuže vystavené povětrnostním vlivům a agresivním látkám, Strahovský stadion

1.4.1. Matematický model působení chloridů

Obecný matematický model pro popis hmotnostních bilancí chloridových iontů je poměrně složitý, a tak lze za předpokladu, že cement dokonale zhydratoval a objem vody v pórech je neměnný a rovnoměrný, rovnice zjednodušit. S pomocí zjednodušených vztahů v ustáleném stavu lze experimentálně určit molární koncentraci chloridových iontů pro pevnou fázi na mezi nasycení a rovnovážnou konstantu pro adsorpci chloridů při známé

pórovitosti betonu a podílu pórů vyplněných vodou. Bylo experimentálně ověřeno, že výsledky zjednodušeného modelu jsou srovnatelné s použitím úplného modelu. Řešení soustav diferenciálních rovnic s sebou přesto nese řadu problémů, mezi které patří i stanovení okrajových podmínek a zjednodušování dimenzí problému [25].

Z těchto a dalších důvodů lze, v případě, že se jedná o nezkarbonatovaný beton vystavený působení mořské vody nebo rozmrazovacím prostředkům, použít poměrně přesné analytické řešení. Hodnota koncentrace chloridů způsobující depasivaci výztuže je v takovém prostředí poměrně blízká hodnotě koncentrace chloridů na povrchu betonové konstrukce, a proto je použití lineární aproximace spolehlivé. V jednorozměrné okrajové úloze klesá koncentrace chloridů téměř lineárně se vzdáleností od povrchu. Tato závislost přestává platit, když se koncentrace blíží nule. S předpokládaným průběhem koncentrace lze výpočtem určit dobu vystavení povrchu betonové konstrukce vlivu chloridů potřebnou pro dosažení koncentrace chloridů, která způsobí depasivaci výztuže [25].

V praxi se upřednostňuje použití jednorozměrných analytických modelů pro popis koncentrace chloridů v různých hloubkách v závislosti na čase. Modely vycházejí z řešení druhého Fickova zákona s chybovou funkcí *erf*. Koncentrace chloridů je vyjádřena v procentech hmotnosti na množství cementu vztahem

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right], \quad (1)$$

kde C_s je koncentrace chloridů působících na povrchu betonu v procentech hmotnosti na množství cementu, D_c je difuzní součinitel průniku chloridů betonem v metrech čtverečních za sekundu, x je hloubka v milimetrech a t je čas v letech. Uvažuje se homogenní materiál plně nasycený vodou, hodnoty C_s a D_c konstantní v čase a počáteční koncentrace chloridů v betonu rovna nule [26].

Kombinací mechanických, enviromentálních, chemických i dalších účinků dochází k proměně betonové konstrukce v čase, mění se proto i vliv škodlivin, jakými jsou i chloridové ionty. Pokročilé matematické modely tak zahrnují vliv mechanického zatížení nebo vliv střídání ročních období při zimní údržbě [26].

Používání matematických modelů bývá přes své výhody kritizováno kvůli vysoké variabilitě výsledků, v současné době proto probíhá snaha o nalezení alternativních a spolehlivějších metod. Další otázky matematických modelů se týkají volby vhodného chloridového profilu z několika naměřených, stanovení konce životnosti anebo limitní hodnoty spolehlivosti. Také se diskutuje o tom, zda by různé části konstrukce měly být hodnoceny stejně a jak vzít v úvahu ekonomické faktory. Řešení zmíněných nedostatků by mělo být posléze součástí předpisů a revizí norem [26].

1.5. Sanační opatření

Zejména u starších železobetonových konstrukcí se lze setkat s nízkým krytím navrženým podle dříve platných norem. V kombinaci s průnikem chloridů je pro konstrukci nedostatečná tloušťka krycí vrstvy z dlouhodobého hlediska likvidační, přičemž typicky se jedná o mosty, tunely a opěrné zdi. Jedním z možných sanačních opatření je zvýšení krycí vrstvy přidáním opravné malty. Takové opatření je považováno za velice nákladné a pracné, velkou nevýhodou je dodatečné přetížení nosné konstrukce nezanedbatelnou vahou [27].

Alternativou opravných malt je nanesení ochranného systému s vysokým odporem vůči průniku oxidu uhličitého, například pružné cementoakrylátové membrány. Na konstrukci se nanáší v jedné nebo dvou vrstvách, přičemž není třeba aplikovat sjednocující nátěr. Tenká vrstva membrány je ekvivalentní ochranou proti karbonataci rovnou desítkám centimetrů krycí vrstvy [27].

V případě vysokého obsahu chloridů v železobetonu a hrozící nebo probíhající korozi výztuže existuje několik možných sanačních opatření. Uváděným, ale v praxi prakticky nevyužívaným opatřením je elektrochemické odstranění chloridů z betonu. Další možností je odstranění poškozeného betonu

nebo betonu s nadlimitním obsahem chloridů a následné nahrazení opravnou maltou, variantně novým betonem. Stejně jako v případě použití opravné malty na doplnění krycí vrstvy se jedná o drahý způsob opravy. Hloubka výskytu chloridů, které jsou často přítomny i pod výztuží, významně určuje nákladnost sanace – odbourání pouze vrchních vrstev ušetří finance, ale může přispět k opětovnému rychlému rozvoji koroze. Naopak snaha o odstranění veškerého betonu s vysokým obsahem chloridů včetně toho pod výztuží, nemluvě o ceně opravy, s velkou pravděpodobností naruší statiku konstrukce [27].

Dalším způsobem je aplikace migrujících inhibitorů koroze. Ošetří se jimi povrch betonové konstrukce, inhibitory pak prostupují do hloubky až k výztuží, na které vytvoří elektrochemickou pasivační vrstvu. Mezi nejčastěji používané inhibitory patří ty na bázi amino-alkoholů. Jejich použití pro dopravní stavby je ale diskutabilní, neboť je třeba inhibitory převrstvit parotěsným nátěrem, který neumožňuje ani odpaření vlhkosti z betonu a dochází tak ke snižování mrazuvzdornosti konstrukce. Parotěsný nátěr je vhodný kvůli jinak rychlému odparu (v řádu měsíců) inhibitorů a opětovné depasivaci oceli. Druhým typem inhibitorů jsou silanové inhibitory. Mezi jejich velké přednosti ve srovnání s dříve jmenovanými patří funkčnost i při vyšším obsahu chloridů, reaktivita s výztuží i betonem, vysoká životnost a trvanlivost (použití bez parotěsné vrstvy pro zamezení vymývání a odparu). Silany působí jako hydrofobizace, a tak dodatečně chrání betonovou konstrukci před průnikem vody nebo chloridů. Ve srovnání s amino-alkoholovými inhibitory jsou dražší. Postřík vodného roztoku inhibitoru by měl prodloužit provozuschopnost konstrukce o pět let [27], [28].

1.6. Výztuž

Koroze je elektrochemický proces a má obecně dvě stádia. První stádium končí depasivací výztuže, je nazýváno iniciační. Následuje propagační stádium, ve kterém již koroze probíhá. Průběh koroze významně ovlivňuje hodnotu indexu spolehlivosti a celkově životnost výztuže, je proto vztažen k mezním stavům použitelnosti a únosnosti. Platí obecná podmínka

$$P_f(t) = P\{B(t) - A(t) \leq 0\} \leq P_d(t), \quad (2)$$

kde P_f je pravděpodobnost poruchy, která se porovnává s P_d , mezní návrhovou pravděpodobností. B je bariéra, také únosnost nebo odpor konstrukce, v případě hodnocení působení chloridů jde o kritickou hodnotu C_{cr} . A značí akci vyvolanou působením zatížení nebo prostředím, například koncentraci chloridů [26].

Po hydrataci cementu se na povrchu výztuže vložené do betonu vytváří pasivní vrstva bránící přímému kontaktu kyslíku, vody a jiných agresivních látek, sestává zejména z $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Rychlost koroze v iniciačním stádiu je menší než $0,1 \mu\text{m}$ za rok [28]. Nastane-li dosažení kritické hodnoty koncentrace chloridů C_{cr} , ochranná vrstva oxidů železa se poruší a dojde k depasivaci výztuže [26].

Rychlost koroze je závislá na přítomnosti kyslíku a vlhkosti, respektive na difuzi krycí vrstvou betonu. Vlhkostí se rozumí jak vlhkost betonu, tak atmosférická vlhkost, která pórovou strukturou prostupuje k výztuži. Nejvyšší průměrná korozní rychlost byla zjištěna při relativních vlhkostech 70 až 90 %. Při vyšších vlhkostech jsou póry zaplněny vodou a tím dochází ke snížení difuzní rychlosti kyslíku, naopak nízké relativní vlhkosti se vyznačují vysokou hodnotou měrného odporu betonu [28]. Významný vliv má rovněž obsah hydroxidových iontů, tedy hodnota pH pórového roztoku, a elektrodový potenciál. Karbonatace betonu snižuje pH a v důsledku zrychluje korozi [26]. Chloridové ionty vstupují do procesu koroze oceli jako významné katalyzátory reakce, jejich kritická koncentrace se obvykle uvádí 0,4 – 0,7 % objemu [3].

Kritická koncentrace chloridů závisí kromě vlivu prostředí a typu pojiva také na vodním součiniteli. V tabulce níže (tab. 1) jsou uvedené hodnoty kritických koncentrací chloridů pro různá prostředí a různé vodní součinitele jako charakteristické hodnoty vztažené k obsahu pojiva v procentech. Pojivem je ve všech případech běžný portlandský cement, prostředí jsou odstupňována podle míry přítomnosti chloridů (vždy se jedná o mořská prostředí) na *zcela ponořený, přílivová zóna, supralitorální zóna a břeh, mimo dosah vln*. Konstrukce vystavené rozmrazovacím solím, obvykle se jedná o dopravní a inženýrské stavby, je možné řadit do prostředí *supralitorální zóny* – v mořském prostředí se jedná o oblast nad linií jarního přílivu, která je mořskou vodou ostřikována, ale kromě bouří s vysokým přílivem není ponořena [29].

Vodní součinitel v/c	Prostředí	Charakteristická hodnota kritické koncentrace [%] relativně k pojivu
0,5	<i>zcela ponořený</i>	1,6
0,4	<i>zcela ponořený</i>	2,1
0,3	<i>zcela ponořený</i>	2,3
0,5	<i>supralitorální zóna</i>	0,50
0,4	<i>supralitorální zóna</i>	0,80
0,3	<i>supralitorální zóna</i>	0,90

Tabulka 1: Charakteristické hodnoty kritické koncentrace chloridů [29]

1.7. Preventivní opatření

1.7.1. Omezení koroze betonu

Rozlišují se dva způsoby ochrany betonu proti korozi, primární a sekundární. Normy určují druh ochrany dle stupně agresivity prostředí, jedná se o primární ochranu anebo kombinaci obou druhů ochrany. Primární ochrana tkví v navýšení odolnosti betonu výběrem surovin při jeho návrhu, úpravou složení směsi anebo jejím zpracováním, uložením či ošetřováním. Typicky se také jedná o dosažení určitého vodního součinitele, jelikož překročením hodnoty 0,7 nedojde k přerušení spojitosti pórů v mikrostrukturu hydratujícího cementu. Pro tyto účely existují plastifikátory způsobující vyšší smáčivost zrn, k vylepšení křivky zrnitosti a zvýšení hutnosti směsi lze použít křemičitý úlet.

Způsobem primární ochrany je také výběr druhu cementu vzhledem k očekávanému prostředí. Cementy mají různá mineralogická složení a díky tomu lze vybrat produkt, sestávající z minerálů, které hůře reagují s korozními látkami v daném prostředí. Alternativně je možné nahradit část cementu minerálními příměsemi. Nejčastěji se používají zejména příměsi s pucolánovými vlastnostmi. Nežádoucí je takové uložení betonu, které vede ke vzniku kavern a následně korozi výztuže, při ošetřování mladého betonu je nutné dodržet optimální teplotu okolí – opačné vede ke vzniku trhlin, což má za následek zrychlené pronikání škodlivých látek, i uložení a ošetřování je proto považováno za primární ochranu [28].

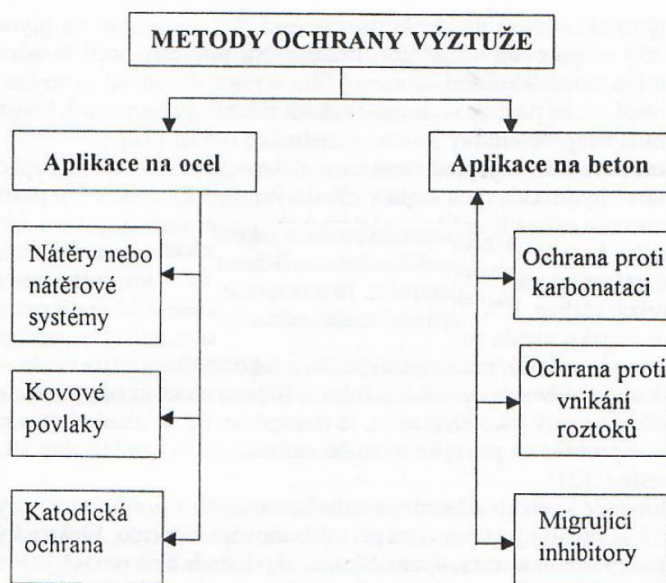
Za sekundární ochranu betonu je považována jakákoliv pozdější modifikace. Proti korozi betonu se obvykle používají povrchové nátěry, stěrky, obklady nebo fólie a krystalizující soli. Všechny typy povrchových úprav musí vyhovět požadavkům fyzikálním, mezi něž patří zejména difuze, a chemickým – povrchová úprava musí být vůči betonu a výztuži inertní. Samozřejmostí je dostatečná přídržnost k povrchu betonové konstrukce, která má být chráněna. Dle chemického složení se povrchové úpravy člení na silikátové, polymerové s uhlíkovým řetězcem a organokřemičité. První zmíněné sestávají z portlandského cementu a jemně mletého nebo speciálně upraveného křemene, aplikují se v několika milimetrové tloušťce. Nesmí být použity na konstrukce s obsahem agresivních iontů ani na takové, které jsou trvale vystaveny agresivní vodě. Také omítky z jemnozrného betonu jsou považovány za povrchovou ochranu na bázi silikátů. Druhým typem povrchové ochrany jsou polymery s uhlíkovým řetězcem, například epoxidy, polyuretany, akryláty nebo polyestery, doplněné o anorganická plniva. Zpravidla se jedná o odolné nátěry, někdy i vodonepropustné, jejich velkým mínusem je jejich nízká rezistence vůči UV záření. Podle chemické podstaty jsou posledním uvedeným typem organokřemičité sloučeniny, jedná se o nejvíce používané ochranné impregnace, které pronikají do pórového systému betonové konstrukce a podobně jako silany působí hydrofobně. Výhodné jsou pro svou tepelnou a chemickou stabilitu. Speciálním případem jsou krystalizující soli. Tyto silikátové stěrky s aktivními přísadami se používají pro zvýšení vodonepropustnosti

betonu. Ve vodném prostředí vytváří aktivní přísady nerozpustné vláknité krystaly, jimiž zaplňují pórový systém betonu. Beton i výztuž jsou chráněny proti spodní i tlakové vodě, agresivním látkám a dalším. Krystaly vznikají opakovaně při kontaktu s další tlakovou nebo vzlínající vodou, rychlost jejich tvoření závisí na objemu přítomné vody na teplotě [28].

1.7.2. Omezení koroze oceli

Ocel na prvním místě nejlépe ochrání hutný beton prostý kapilárních pórů obklopující pruty v dostatečném objemu, nicméně existují metody ochrany samotné výztuže. Obdobně jako v případě betonu se i u oceli rozlišuje primární a sekundární ochrana. Primární ochrana tkví v úpravě složení a způsobu zpracování oceli. Přidání chromu, niklu nebo jiného zušlechťujícího prvku zvyšuje korozní odolnost, v závislosti na složení mohou být tyto oceli nazývány nerezové. Jejich uplatnění je široké napříč obory, ve stavebnictví se u nás používá nerezová výztuž spíše výjimečně pro ISO nosníky nebo v prefabrikaci. V zahraničí bývá nerezová ocel navrhována a používána pro výztuž do železobetonu u strategických staveb [28].

Dodatečně aplikované nátěry, povlaky a další níže uvedená opatření sekundární ochrany jsou souhrnně nazývána metodami ochrany výztuže, na obrázku (obr. 7) níže. Bez výjimky se jedná o opatření sloužící k ochraně a zlepšení vlastností výztuže, různí se jejich aplikace.



Obrázek 7: Metody ochrany výztuže, upraveno [28]

Nátěry a nátěrové systémy jsou typickým typem ochrany aplikovaným přímo na výztuž. Často používané, a to i při sanacích, jsou epoxidové nátěry, pro prostředí s vysokými koncentracemi chloridů jsou dokonce účinnější než galvanizace. Nátěr ale může být snadno poškozen v ohybech při zpracování výztuže do potřebných tvarů. Problematicke kovových povlaků je věnována samostatná podkapitola níže. Poslední na výztuž aplikovanou ochranou ze schématu je katodická ochrana. Při tomto opatření je na povrch konstrukce připevněna anoda, zapojením se stejnosměrným proudem začne výztuž plnit funkce katody. Materiálové provedení anody je korodující, obětované, například železo či zinek, anebo odolné. Doporučovaným provedením odolné anody je titanová síť s povrchovou úpravou kovových oxidů, výhodou jsou nízké prostorové nároky a velmi malé dodatečné přitížení konstrukce [28].

Metody ochrany výztuže aplikované na beton jsou dle schématu tří druhů. První dvě uvedené, ochrana betonu proti karbonataci a ochrana proti vnikání roztoků jsou řešeny primární a sekundární ochranou betonu, obojí popsáno výše. Migrující inhibitory lze použít jako přísadu do betonové směsi, také mohou být aplikovány na povrch betonové konstrukce, z toho důvodu jsou zmíněny v kapitole sanačních opatření.

1.7.2.1. Kovové povlaky

Kovové povlaky jako metodu ochrany výztuže popisuje dnes již neplatná norma ČSN 73 1214, vrstva zinku nebo hliníku má být 0,05 až 0,2 mm silná. Zmiňovány jsou také impregnace organickými látkami pro zvýšení účinnosti povlaků. Důležitá je poslední věta odstavce normy, která říká, že použití kovových povlaků nesmí snížit spolehlivost konstrukce [30]. Množství odborných článků přitom upozorňuje na to, že použití žárově zinkované výztuže je přinejmenším problematické. Při hydrataci cementu vznikají hydroxidy, které zapříčiňují vysoce zásadité prostředí, v němž reaguje zinek. Vznik komplexního anionu a plynného vodíku vede k tvorbě porézní struktury cementového tmelu v okolí výztuže. Další experimenty zjistily prodloužení počátku a doby tuhnutí cementu u vzorků s oxidem zinečnatým, s vyššími koncentracemi dochází k výraznému poklesu tlakových pevností [31]. Kanadský výzkum srovnávající

pozinkovanou výztuž a výztuž bez kovového povlaku naopak uvádí asi pětkrát až desetkrát (v závislosti na prostředí) nižší rychlost koroze pozinkované výztuže. Žárově zinkovaná ocel je pro výztuž do betonu široce využívána v Severní Americe, společnosti působí i v Číně nebo Spojených arabských emirátech [32]. Metodikou žárového zinkování ocelové výztuže a jejím použitím se zabývá například ASTM A1094. V České republice se v současnosti používají kovové povlaky jako metoda ochrany velice zřídka, obvykle se však v takovém případě jedná o samostatné prvky, například poklopy, zábradlí nebo plechy.

2. Experimentální část

2.1. Materiály

Pro výrobu zkušebních krychlí byl použit certifikovaný cement CEM I 42,5 R ze závodu Mokrý – Horákov od firmy Českomoravský cement. Označení výrobku, které je v souladu s evropskou normou, říká, že se jedná o portlandský cement s obsahem slínku nejméně 95 %, minimální tlakovou pevností 20 MPa po dvou dnech a 42,5 MPa po osmadvaceti dnech. Osvědčení o stálosti vlastností je součástí příloh.

Jako záměsová a posléze i jako ošetřující voda byla použita voda pitná z vodovodního řadu. Pitnou vodu je možno podle norem použít bez zkoušení.

V souladu se všemi požadavky na přítomnost chemických látek, mrazuvzdornost a mechanické vlastnosti bylo použito certifikované přírodní hrubé těžené kamenivo do betonu od firmy BEST a.s. z provozovny Pamětník u Chlumce nad Cidlinou Písek byl dodán z pískovny Dobříň u Roudnice nad Labem, pískovnu, která ukončuje těžbu frakcí 0/2 a 0/4, v současné době provozuje CEMEX Czech Republic, s.r.o. Prohlášení o vlastnostech jsou součástí příloh.

Po dobu vystavení zkušebních krychlí působení chloridů byl použit 3 % vodný roztok NaCl – při výrobě roztoku byl použit poměr 3 g NaCl a 97 g vody. Stejný roztok byl použit pro povrchově ošetřené i pro referenční vzorky. Obsah chloridových iontů byl v roztoku průběžně kontrolován na základě externích měření ve spolupráci s VŠCHT v Praze.

2.1.1. Krystalizační nátěry

Krystalizační nátěry jsou typem betonových nátěrů zvyšujících odolnost betonu proti vodě a agresivním látkám krystalizací. Jedná se o stejný technologický princip jako u ostatních forem s rozdílem v aplikaci – nátěry jsou na rozdíl od přísad vhodné i pro sanace. Směsi obvykle sestávají z portlandského cementu, jemně mletého vápence a chemické báze.

Nátěr při kontaktu s vodou spustí v pórovém systému betonu chemickou reakci sekundární krystalizace, která zapříčiní růst krystalů. Krystaly v průběhu chemické reakce spotřebují vodu obsaženou v pórech, čímž kapilární systém v místě průniku vody zcela zaplní a z toho důvodu je použití krystalizací obzvláště vhodné pro konstrukce s dostatečným přísunem vody. V důsledku je znemožněn další transport vody a agresivních látek kapilárním systémem konstrukce. Tento jev dobře dokumentuje i řada experimentálních zkušeností, a sice betony s krystalizační přísadou vykazují při následném kontaktu s vodou vyšší nasákavost ve srovnání s referenční směsí, nicméně nechají-li se zkušební tělesa vyschnout, při opakování testu je trend zcela opačný. Krystaly se mimo póry tvoří také v mikrotrhlinách. Proces známý jako samohojení betonu pomáhá mikrotrhliny zacelit a zabraňuje pronikání vody, což posiluje integritu a odolnost betonové konstrukce. Výrobci obvykle uvádějí zacelování trhlinek až do velikosti 0,4 mm, nezávislé výzkumy obvykle hovoří o hodnotách kolem 0,1 mm šířky trhlinek. Podstatným aspektem účinnosti tohoto řešení je i dlouhodobá stabilita zacelované trhliny. V případě dynamicky namáhaných konstrukcí je dané řešení neúčinné. Známými obchodními názvy a výrobci hydrofilních krystalických aditiv jsou například Xypex, Kryton International, Penetron nebo BASF. Každá značka nebo výrobce může mít své vlastní patentované složení a proces výroby, který se může v určitých detailech lišit.

V rámci experimentu byla použita bezchloridová kompozitní směs Xypex Concentrate smíchaná s pitnou vodou v poměru 5:2 objemově. Nátěr byl proveden v tloušťce jednoho milimetru na připravený podklad. Prohlášení o vlastnostech je součástí příloh.

2.2. Zkušební tělesa a složení zkušebních směsí

2.2.1. Příprava zkušebních těles

Dle receptury uvedené v následující kapitole byl připraven čerstvý beton. Jedná se konvenční beton bez přísad či příměsí, použit byl pytlovaný cement, pitná voda a několik frakcí kameniva – písek a přírodní těžené kamenivo. Z připraveného množství směsi, celkem asi sto padesáti kilogramů, byly

vyrobeny zkušební krychle. Některé ze vzorků byly určeny pro zkoušky pevností v tlaku, trojice zkušebních krychlí byla zkoušena na hloubku průsaku. Zbýlé zkušební krychle byly zkoušeny na obsah chloridů – s později aplikovaným ochranným nátěrem anebo jako referenční vzorky bez povrchové úpravy. Čerstvý beton byl podle receptury připraven obvyklým způsobem a uložen do vymazaných forem ve dvou vrstvách, hutnění probíhalo za pomoci vibračního stolu. Den po betonáži byly zkušební krychle odbedněny a uloženy do vodního prostředí při stálé teplotě.

2.2.2. Souhrn použitých receptur

Tabulka níže (tab. 2) uvádí recepturu použitou pro výrobu betonové směsi.

materiál	specifikace	množství [kg/m ³]	potřebné množství [kg]
cement	42,5 R	340	18,7
voda	pitná	175	9,6
<u>kamenivo</u>			
písek	0 - 4 mm	950	52,2
těžené	4 - 8 mm	300	16,5
těžené	8 - 16 mm	967	53,1
		2 732 kg	150,0 kg
vodní součinitel		0,51	

Tabulka 2: Receptura – zkušební krychle

Solný roztok, kterému byly ošetřené i referenční zkušební krychle po dobu experimentu vystaveny byl vyroben jako 3% solný roztok NaCl – na 100 dílů roztoku byly použity tři díly NaCl a 97 dílů pitné vody.

2.3. Použité zkušební metody

2.3.1. Stanovení stupně konzistence

Zpracovatelnost je vlastností betonové směsi označující její pohyblivost. Normovou metodou nazývanou zkouška sednutí kužele se běžně určuje stupeň konzistence betonové směsi. Abramsův kužel výšky 300 mm se ve třech vrstvách naplní čerstvou směsí, každá z vrstev je zhutněna dvaceti pěti vpichy.

Následně je forma odejmuta a výsledkem zkoušky je změna výšky vzorku betonu. Norma ČSN EN 12350-2 mimo popisu metody uvádí tabulku výsledných sednutí [mm] s odpovídajícími stupni konzistencí od S1 do S5 [33].

Stupeň konzistence použité betonové směsi byl určen jako S3.

2.3.2. Stanovení pevnosti v tlaku

Metody pro stanovování pevností jsou pro opakovatelnost a srovnatelnost popsány v normách na národní i evropské úrovni, postup zkoušky je pro vzorek destruktivní. Nedestruktivní zkoušení se přípouští pouze pro odhad pevnosti za určitých podmínek. V první fázi zkušebního procesu jsou dle s ČSN EN 12390-2 vyrobená a ošetřována zkušební tělesa. Poté jsou v souladu s normou ČSN EN 12390-1 stanoveny rozměry a mezní odchylky zkušebních těles, normou doporučeny jsou především krychle s délkou hrany $d = 150$ mm. Druhá fáze, popsaná v ČSN EN 12390-3, sestává z postupného umístění těles do zkušební lisu, který vzorky zatěžuje plynule s předem určenou rychlostí, a rozlomení vzorků. Pevnost v tlaku je následně vypočtena poměrem síly na lisu odečtené při zlomu k tlačné ploše vzorku.

Pro určení pevnosti v tlaku bylo zkoušeno šest vzorků. Směs byla v nejkratší době uložena do vodotěsných forem z nenasákavého materiálu. Beton byl do forem uložen postupně ve dvou vrstvách a zhutněn pomocí vibračního stolu. Druhý den po uložení betonu do forem byly vzorky odbedněny a umístěny do vody při požadované teplotě prostředí $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Zkušební krychle byly zkoušeny po sedmi dnech, použity byly tři vzorky, den před zkouškou byly vyjmuty z vodního prostředí. Vzorky byly po změření a zvážení umístěny do lisu a zkoušeny na tlakovou pevnost. Na obrázku (obr. 8) je patrný správný tvar zlomu. Následuje tabulka (tab. 3) s naměřenými rozměry a váhou vzorků, čísla v prvním sloupci označují čísla vzorků, v posledních sloupcích je tlaková síla a vypočtená pevnost v tlaku.



Obrázek 8: Krychle ve zkušebním lisu

	zatěžovaná plocha		výška	hmotnost [g]	tlaková síla [kN]	pevnost v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	c [mm]			
1	149,3	149,3	151,4	7815	590	26,5
2	149,2	149,2	148,3	7655	445	20,0
3	149,3	149,1	148,9	7800	600	27,0

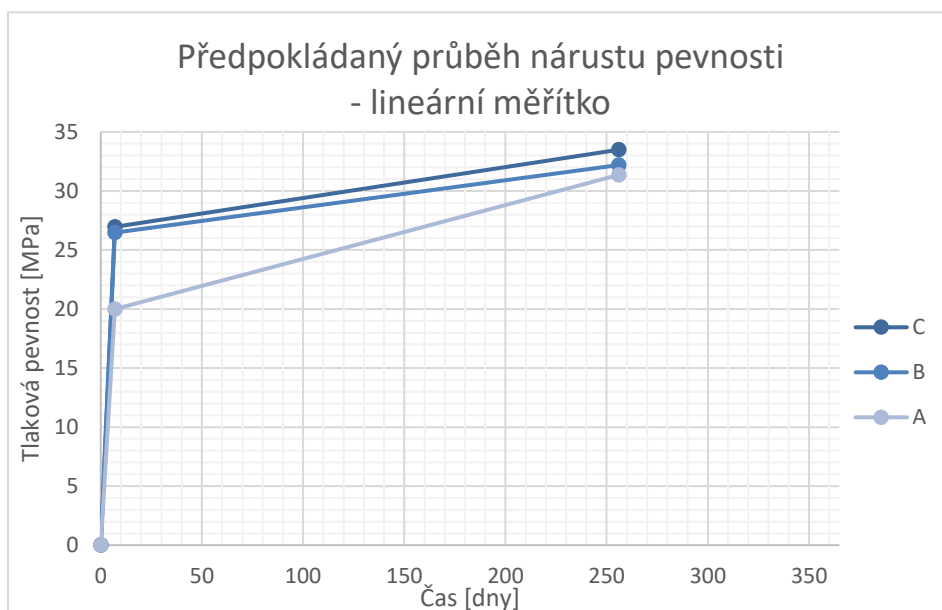
Tabulka 3: Tlakové pevnosti – sedm dní

Pevnosti v tlaku byly opětovně stanoveny pro vyztužený beton zkoušením druhé trojice zkušebních krychlí, zkouška proběhla po 286 dnech. V tabulce (tab. 4) jsou uvedeny změřené veličiny pro trojici zkušebních krychlí, v posledních sloupcích je tlaková síla a vypočtená pevnost v tlaku.

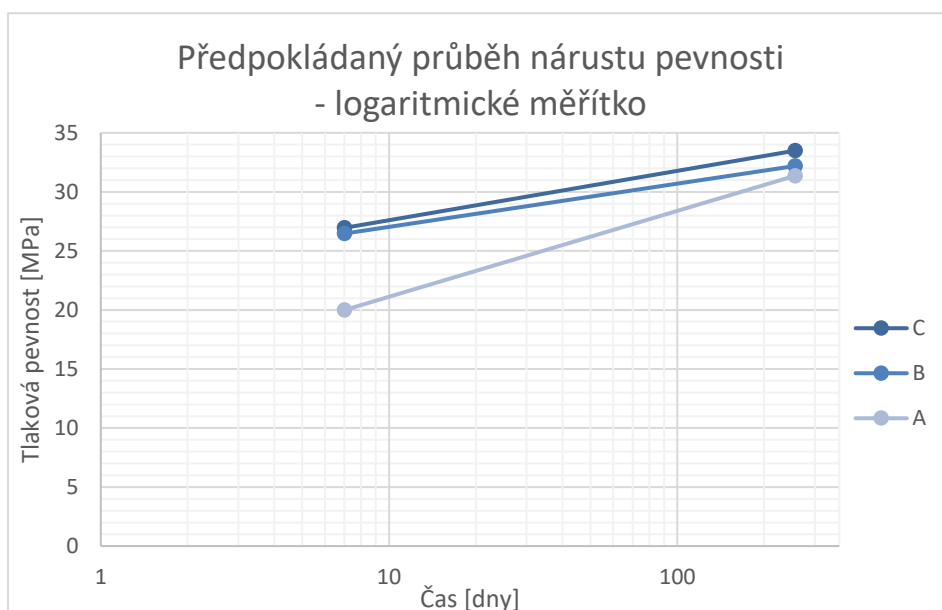
	zatěžovaná plocha		výška	hmotnost [g]	tlaková síla [kN]	pevnost v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	c [mm]			
7	149,4	149,7	149,2	7530	720	32,2
8	149,2	150,1	149,6	7715	750	33,5
9	149,3	149,5	151,1	7615	700	31,4

Tabulka 4: Tlakové pevnosti – vyztužený beton

Naměřené hodnoty tlakových pevností byly vyneseny do grafů závislosti pevností na čase, s lineárním (obr. 9) a logaritmickým měřítkem času (obr. 10). V každé trojici tlakových pevností byl vybrán vzorek s nejnižší, střední a nejvyšší pevností, spojeny jednou křivkou tak byly vzorky s číslem 2 a 9 (označeny řadou „A“), 1 a 7 (označeny řadou „B“) a 3 a 8 (označeny řadou „C“). Z grafů je možné odečíst předpokládané osmadvaceti denní tlakové pevnosti pro zkušební krychle vyrobené betonové směsi, jedná se o hodnoty 24,4 („A“), 28,7 („B“) a 29,4 MPa („C“).



Obrázek 9: Graf nárůstu pevnosti – lineární



Obrázek 10: Graf nárůstu pevnosti – logaritmický

Norma ČSN EN 206+A2 stanovuje metodiku pro určení pevnostní třídy. Ze tří po sobě jdoucích výsledků zkoušek se vypočítá průměrná pevnost, která musí vyhovovat vztahu

$$f_{cm} \geq (f_{ck} + 4), \quad (3)$$

kde f_{cm} je průměrná pevnost tří vzorků a f_{ck} charakteristická pevnost betonu v tlaku, obě veličiny vyjádřené v N/mm^2 . Předpokládaná průměrná tlaková pevnost z hodnot odečtených z grafu je 27,5 MPa, podle uvedeného vzorce odpovídá zkoušený beton pevnostní třídě C16/20 ($f_{ck} = 20$ MPa).

2.3.3. Stanovení hloubky průsaku

Norma ČSN EN 12390-8 popisuje metodiku stanovování hloubky průsaku pro zkušební tělesa. V rámci této práce probíhalo zkoušení vzorků v souladu s normovým postupem následovně. Krychle byly po odbednění uskladněny ve vodním prostředí, ze kterého byly vyjmuty den před zkouškou kvůli oschnutí. Poté byly umístěny na normové zkušební zařízení, vodotlačnou stolicí. Zatížení vodním sloupcem působí na plochu o průměru 75 mm po dobu 72 hodin tlakem 500 kPa, po ukončení zkoušky byly vzorky změřeny a zváženy, rozlomeny a posuvným měřítkem byla odečtena hloubka průsaku [34]. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 5) níže.

	zatěžovaná plocha		výška	hmotnost [g]	síla na rozlomení [kN]	maximální průsak \varnothing , [mm]
	a [mm]	b [mm]	c [mm]			
4	149,2	149,5	151,5	7700	51	104
5	149,2	149,3	149,2	7573	47	103
6	149,3	149,2	152,3	7714	44	112

Tabulka 5: Hloubky průsaku

2.3.4. Stanovení obsahu chloridových iontů

Po odbednění zkušebních krychlí bylo čtrnáct vzorků určeno pro aplikaci krystalizačního nátěru. Povrch krychlí, které byly určeny pro ošetření ochranným nátěrem byl po dosažení pevnosti nejprve očištěn a navlhčen, poté byl proveden nátěr v tloušťce minimálně jednoho milimetru (obr. 11). Vzorky byly následně zakryty, aby nedocházelo k přeschnutí nátěru.



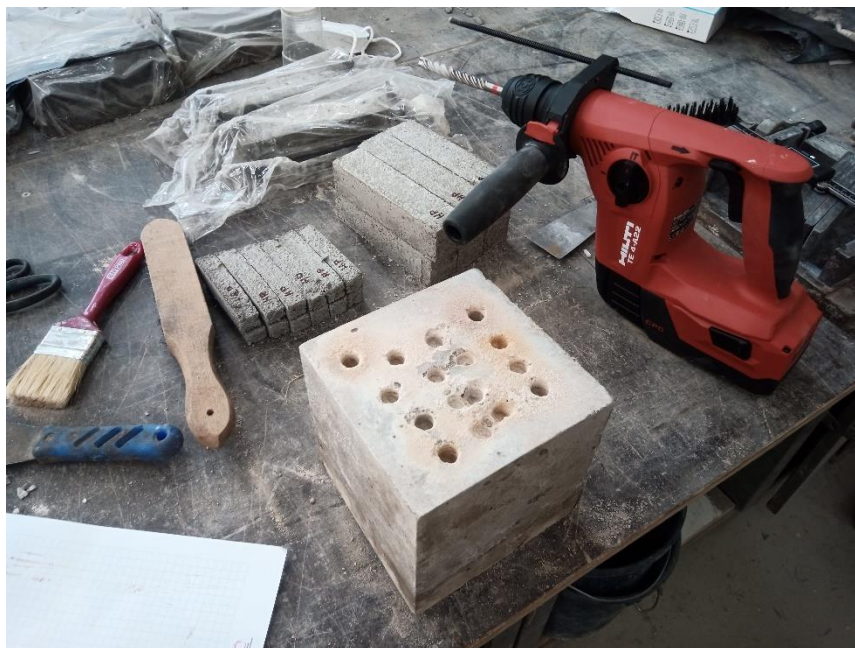
Obrázek 11: Zkušební krychle s aplikovaným zkušebním nátěrem

Po vytvrdnutí nátěru byly ošetřené vzorky společně se stejným počtem referenčních vzorků umístěny do 3 % vodného roztoku NaCl. Působení roztoku byly vystaveny v běžných podmínkách teploty a tlaku do odběru vzorků, který proběhl v rámci experimentu celkem třikrát, jak je uvedeno v přehledné tabulce (tab. 6) níže.

	datum	celkem dní
1. odběr	12.06.2023	32
2. odběr	23.10.2023	165
3. odběr	30.11.2023	203

Tabulka 6: Přehled jednotlivých měření s daty

Den před odběrem vzorků ze zkušebních krychlí za účelem stanovení obsahu chloridů byly krychle vyjmuty z roztoku. Odběr probíhal odvrátáním pětimilimetrových vrstev z boční strany krychlí, v každém odběru byla použita jedna krychle s ochranným nátěrem a jedna z referenční sady. Byly odebrány tři vrstvy (0–5, 5–10 a 10–15 mm) v prvním měření, v dalších měřeních už shodně šest vrstev, vždy tloušťky pět milimetrů. Každá odvrтанá vrstva byla vložena do samostatného sáčku. Níže na obrázku (obr. 12) je odběr prvních vzorků, následuje obrázek (obr. 13) se vzorky druhého měření.



Obrázek 12: První odběr, zkušební krychle



Obrázek 13: Druhý odběr, odebrané vzorky

Odebrané vzorky byly odeslány do externí chemické laboratoře. Zde byly prachové vzorky nejprve vysušeny v sušárně při teplotě $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ až do dosažení konstantní hmotnosti. Z vysušených prachových vzorků byly připraveny vodné výluhy v deionizované vodě v poměru 1:10 (10 g vzorku na 100 ml vody). Následně byly lahvičky se vzorky vloženy na třepačku. Doba vyluhování na třepačce byla 24 hodin. Před analýzou byly vzorky filtrovány přes

stříkačkový filtr 0,2 μm . Ve vodných vyluzích se stanovoval obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů (Cl^-) pomocí kapilární elektroforézy CAPEL 205. Obsah chloridových iontů v procentech hmotnosti suchého vzorku v jednotlivých vrstvách byl zpracován do tabulek a z laboratoře zaslán zpět

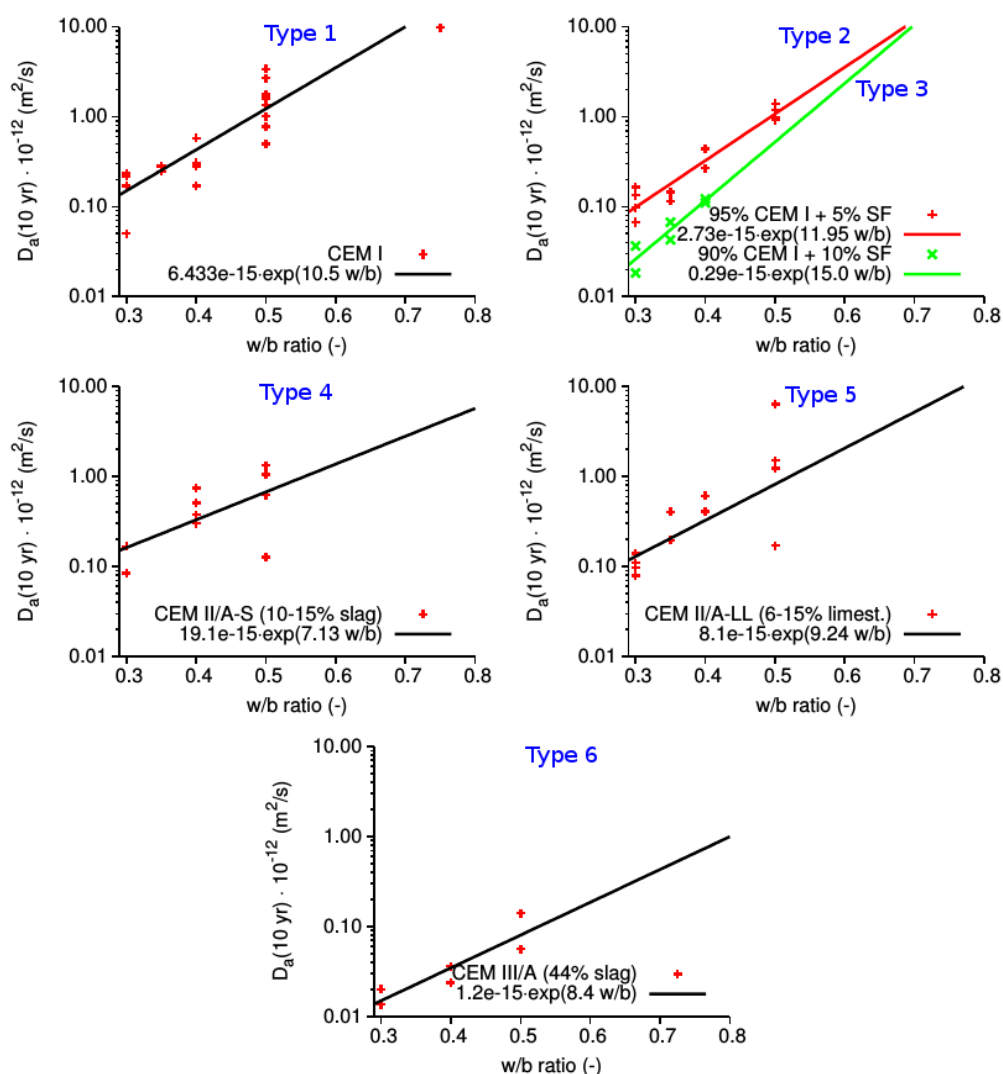
2.3.4.1. Výpočet koeficientu průniku chloridových iontů

Koeficient průniku chloridových iontů, také difuzní koeficient, je parametr, který se používá k popisu rychlosti průniku chloridových iontů do betonu. Vztahuje se k difuzním procesům probíhajícím při pronikání iontů skrze póry nebo kapiláry, výpočet proto závisí mimo jiné na typu použitého cementu, vodním součiniteli nebo koncentraci chloridů, které je beton vystaven. Pro výpočet difuzního koeficientu jsou běžně využívány výpočetní nástroje, ať už se jedná o tabulkové procesory, numerická výpočetní prostředí nebo softwary vyvíjené přímo za účelem algoritmizace výpočtu. Výsledné hodnoty je možné mezi sebou dobře porovnat pro různá výpočetní řešení nebo pro srovnání betonů či konstrukcí. Vyšší hodnoty koeficientu průniku chloridových iontů značí rychlejší pronikání chloridů do betonu, což může způsobit urychlení koroze ocelové výztuže. Pro výpočet v rámci této práce byl použit autorizovaný software pro karbonataci betonu a chloridy CarboChlorCon. Na následujícím obrázku (obr. 14) je ukázka výpočtu karbonatace a průniku chloridů.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	CarboChlorCon 1.0 - software for concrete carbonation and chloride ingress												
2													
3	Authors	Doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., Ing. Karel Pohl, Ph.D.											
4	Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics, Thákurova 7, 166 29, Prague 6, 2014												
5	Questions, comments to vit.smilauer@fsv.cvut.cz, November 2014												
6	Acompanying manual describes references, used equations and default values												
7													
8	The support from Competence Centres of the Technology Agency of the Czech Republic (TACR) under the project "Centre for Effective and Sustainable Transport Infra:												
9													
10	Concrete carbonation - induction time												
11	C_p	400	Portland cement content (=mass of CEM I, only clinker portion for CEM II and higher) [kg/m ³]										
12	P_s	50	SCM amount (GGFBS, fly ash, silica fume) [kg/m ³]										
13	W	202,5	Water in fresh concrete [kg/m ³]										
14	k_s	0,5	Efficiency factor (k-value) for carbonation. GGBFS=0,6, fly ash class C=0,7, fly ash class F=0,5, silica fume=0,3										
15	RH	0,6	Relative humidity of air [0,5-1]										
16	ρ_c	3150	Cement density [kg/m ³]										
17	CO_2	3,90E-04	Volumetric fraction of CO_2 in surrounding environment (3,9e-4 for outdoor air) [-]										
18	c_c	45	Concrete cover above reinforcement [mm]										
19	w_c	0,2	Crack width [mm]										
20													
21	ρ_w	1000	Water density [kg/m ³]										
22	D_{CO_2}	1,49239E-08	Effective diffusivity for CO_2 [m ² /s]										
23	A_i	3,54459E-07	Help parameter										
24	t_c	100,1	Induction time for reinforcement corrosion on a cracked concrete [year]										
25													
26													
27	Chloride ingress												
28	Time units	2	[Day=1, year=2] (year = 365,24219 days)										
29	Cement type (0-5)	1	2	1	See right figures for cement type, type 0 requires manual entry of D_{ref} a t_{ref}								
30	w/b	0,38	0,38	0,55	Water-binder mass ratio, i.e. W/(C+P) [-]								
31	D_{ref} (only for type 0)	1,40E-12	Reference diffusion coefficient (only type 0) [m ² /s]										

Obrázek 14: Autorizovaný software pro karbonataci betonu a chloridy CarboChlorCon

V rámci výpočtu difuzního koeficientu bylo v tabulkovém procesoru uvažováno několik parametrů. Dle složení cementu byl vybrán příslušný průběh difuzivity a následně typ cementu, byl uveden vodní součinitel a podle tabulek určeny charakteristické hodnoty rychlosti degradace. Koncentrace chloridů byla uvažována pro prostředí *zcela ponořený* a vliv trhlin byl zanedbán. Dále byla dopočítána doba vystavení zkušebních krychlí roztoku chloridů, nakonec výsledný difuzní koeficient. Na obrázku (obr. 15) jsou uvedeny typy cementů, dle složení byl pro výpočet první typ, CEM I bez dalších příměsí.



Obrázek 15: Předpokládaná difuzivita po 10 letech pro různé druhy cementu, zdroj: CarboChlorCon

V následující tabulce (tab. 7) jsou uvedeny vypočtené hodnoty difuzních koeficientů [cm^2/s] pro doby expozice, které odpovídají jednotlivým odběrům

vzorků. V posledním sloupci tabulky jsou vypočtené koncentrace chloridů [%] v hloubce $d = 30$ mm pro příslušné odběry.

	Průměrný difuzní koeficient v čase t [cm^2/s]	Koncentrace v hloubce d v čase t [%]
1. odběr	7,858E-08	5,496E-05
2. odběr	4,283E-08	6,831E-02
3. odběr	3,967E-08	1,131E-01

Tabulka 7: Průměrné difuzní koeficienty a koncentrace

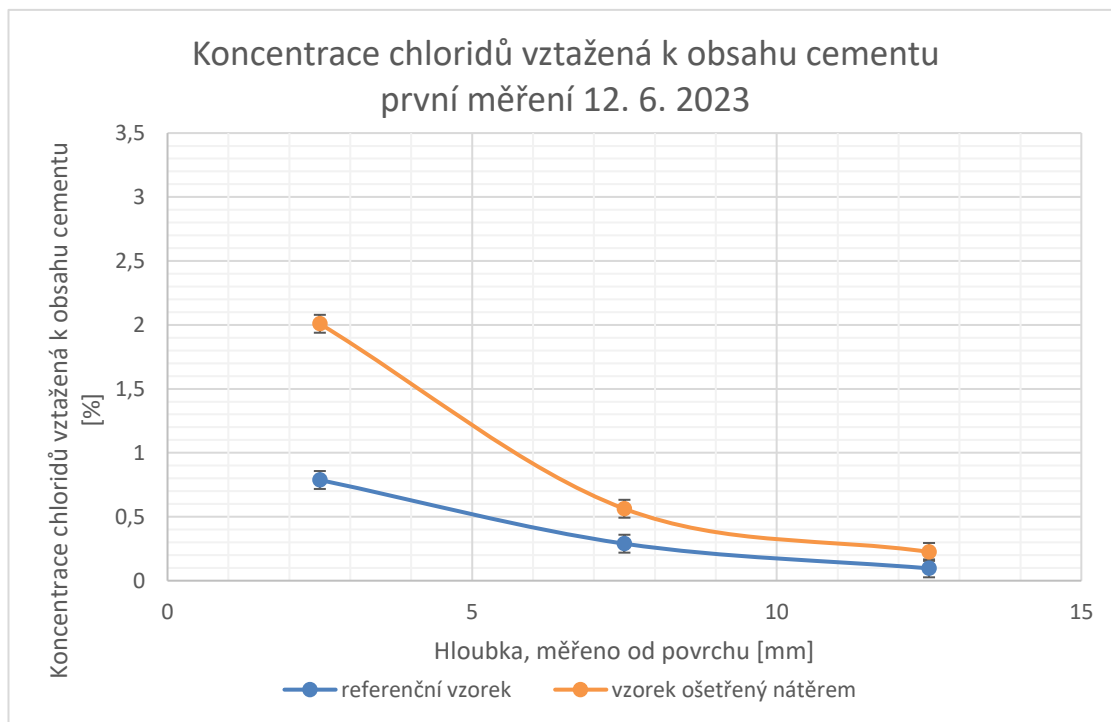
3. Výsledky a diskuse

Výsledky zkoušek pevností v tlaku vycházely pro danou směs dle očekávání, jedná se o konvenční prostý beton bez použití příměsí nebo přísad, hodnoty se pohybovaly kolem 25 MPa v sedmi denních pevnostech. Třída betonu byla s ohledem na pevnost zkušebních krychlí určena C16/20 ($f_{ck} = 20$ MPa). Pro prováděný experiment se však jedná o výsledky kontrolního charakteru, a tak jim nebude věnováno více prostoru.

Obdobně stanovování hloubek průsaku bylo provedeno za účelem kontroly vlastností vyrobených zkušebních krychlí. Škála naměřených výsledků je přiměřená, hodnoty jsou v souladu s očekávaným výsledkem zkoušky s ohledem na použitou recepturu. Směs by nevyhověla normovému požadavku na vodotěsnost na hloubku maximálního průsaku do 20 mm.

Obsah chloridových iontů byl stanoven v externí chemické laboratoři, vztažen k procentům hmotnosti vzorku. Získané hodnoty proto byly přepočteny na hmotnostní procenta cementu použitého ve směsi. Stanoven byl také obsah chloridových iontů ve směsi, „nulový“ obsah, o který byly poníženy všechny další naměřené hodnoty obsahu chloridových iontů. Tento výchozí obsah chloridů je dán především jejich přítomností v použitém cementu. Vzorky byly odebírány ve vrstvách, každá o tloušťce pěti milimetrů, v grafech je tak výsledná hodnota každé vrstvy vynesena ve střední hodnotě hloubky vrstvy – například první vrstva 0 až 5 milimetrů je v grafech vynesena v hloubce 2,5 milimetru.

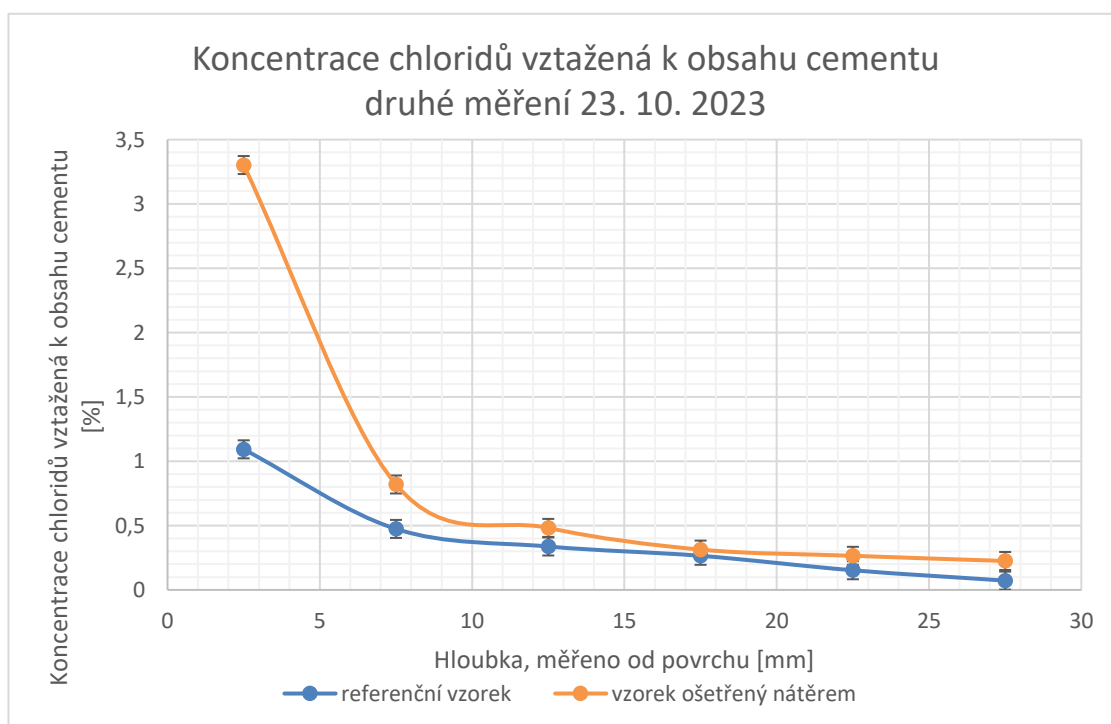
Na obrázku (obr. 16) pod textem jsou výsledky prvního měření, graf koncentrace chloridových iontů v závislosti na hloubce. Pro první odběr vzorků, uskutečněný již po 32 dnech expozice, byly z důvodu krátkého časového úseku, během kterého byly zkušební krychle vystaveny působení chloridů, odebrány jen tři vrstvy, pro pozdější odběry již shodně šest vrstev. Modře je v grafu znázorněna křivka výsledků referenčních vzorků, oranžovou barvou vzorek ošetřený ochranným nátěrem. Dle grafu vykazuje vzorek ošetřený ochranným



Obrázek 16: Graf koncentrace chloridů, první měření

nátěrem vyšší obsah chloridových iontů ve všech vrstvách v porovnání se vzorkem referenčním.

V rámci druhého měření bylo stejně jako v dalších měřeních odebráno šest vrstev, každá o tloušťce pět milimetrů. Na obrázku (obr. 17) jsou formou grafu

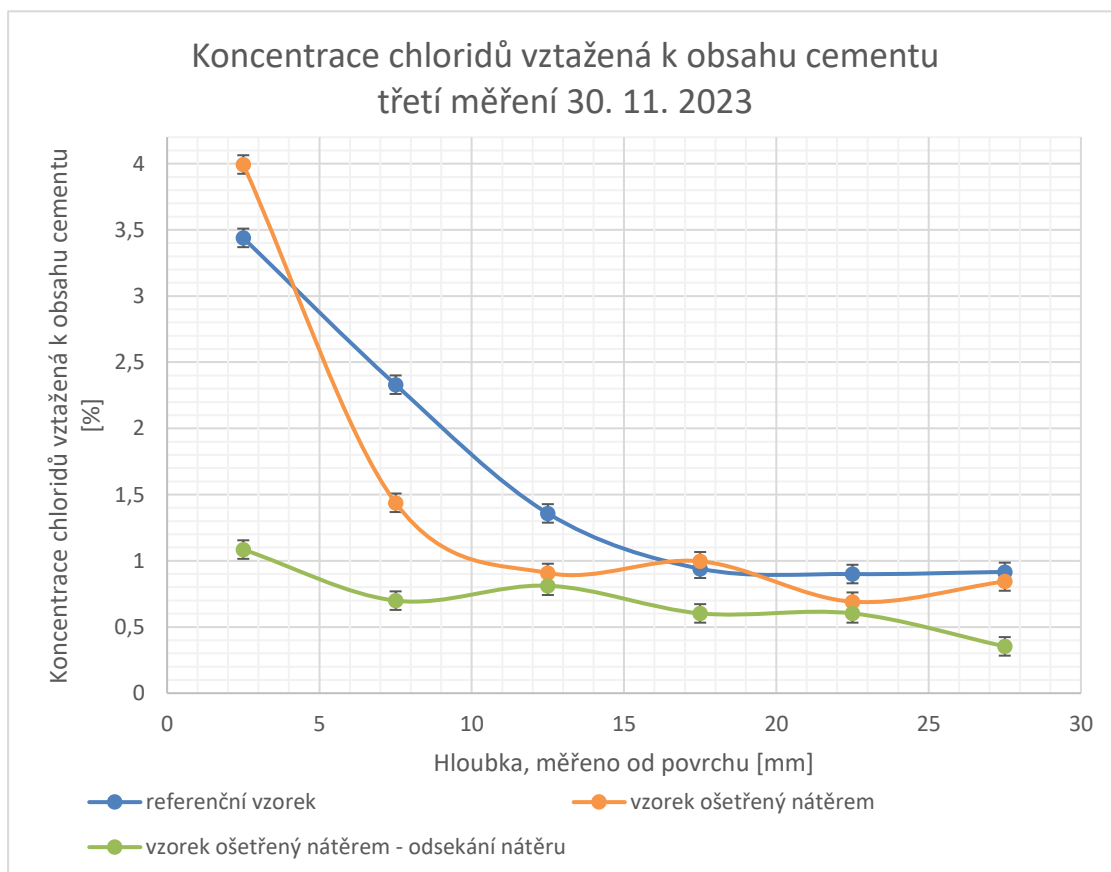


Obrázek 17: Graf koncentrace chloridů, druhé měření

prezentovány výsledky druhého odběru. Stejně jako v předchozím případě, modrá barva značí výsledky referenční, oranžovou jsou označeny výsledky vzorku ošetřené ochranným nátěrem.

Podobně jako v případě prvního měření i zde byl obsah chloridových iontů vyšší u vzorků odebraných z krychle ošetřené ochranným nátěrem v porovnání se zkušební krychlí bez povrchové úpravy. Opakováním odběru byla vyloučena podezření na některé možné chyby v metodice odběru a vyhodnocení výsledků, trend výsledných hodnot je však v druhém měření shodný jako v měření prvním.

Výsledné obsahy chloridových iontů ze třetího měření jsou vyznačené v grafu na následujícím obrázku (obr. 18). Modrá barva opět znázorňuje referenční vzorek, oranžová výsledky vzorku ošetřené ochranným nátěrem. Dle grafu byl v první vrstvě naměřen vyšší obsah chloridů pro krychli s ochranným nátěrem, téměř 4 % hm. cementu, v dalších vrstvách je vyšší obsah chloridů pro zkušební krychli bez povrchové úpravy. Hodnota pro vrstvu 15 až 20



Obrázek 18: Graf koncentrace chloridů, třetí měření

milimetrů u ošetřené krychle pravděpodobně vznikla nepřesností měření. V obou případech, pro zkušební krychle ošetřené i bez povrchové úpravy, byla ve vrstvě 25 až 30 milimetrů překročena obvykle uváděná kritická koncentrace chloridů 0,4 – 0,7 % a sice 0,92 % pro referenční a 0,84 % pro krychli ošetřenou. V případě železobetonové konstrukce s krycí vrstvou 25 milimetrů by se v této vrstvě nacházela výztuž. V rámci třetího měření bylo odebráno několik dalších vzorků ve snaze vyloučit chyby měření a vysvětlit trend výsledků, který odporoval předpokladům. Byly odebrány kontrolní vzorky roztoků i dalších zkušebních krychlí z různých stran. Dále byl odsekán nátěr zkušební krychle, ze které byly vzorky odebrány, a odebrána druhá sada vzorků bez nátěru, výsledky jsou v grafu vyznačeny zelenou barvou. Nátěr je dle výrobce bezchloridová kompozitní směs. I přes zvlnění zelené křivky je evidentní, že po odsekání nátěru byly naměřeny významně nižší koncentrace chloridových iontů ve všech vrstvách. Ve vrstvě 25 až 30 milimetrů dosahuje hodnota jen 0,35 % hm. cementu. S ohledem na dosavadní výsledky a provedená kontrolní měření je pravděpodobné, že chemická podstata nátěru je schopná navázat velké množství chloridů z roztoku, jedná se o typickou vlastnost pojiv s obsahem aluminátových složek. Při odvtávání hlubších částí zkušební krychle se pak nelze vyhnout smíšení odebíraného vzorku s několika zrníčky nátěru z ošetřeného povrchu. Po odstranění nátěru a tím i vlivu povrchové úpravy na odběr dalších vzorků byly naměřené koncentrace chloridových iontů výrazně nižší.

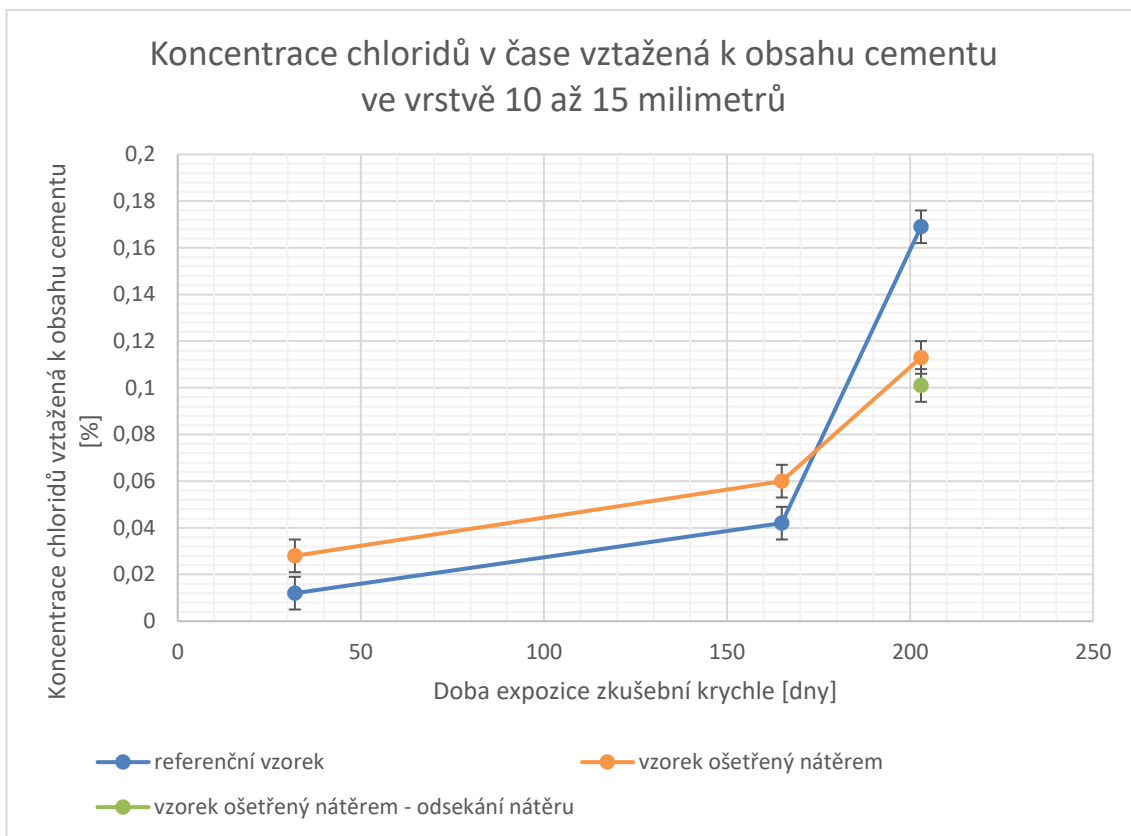
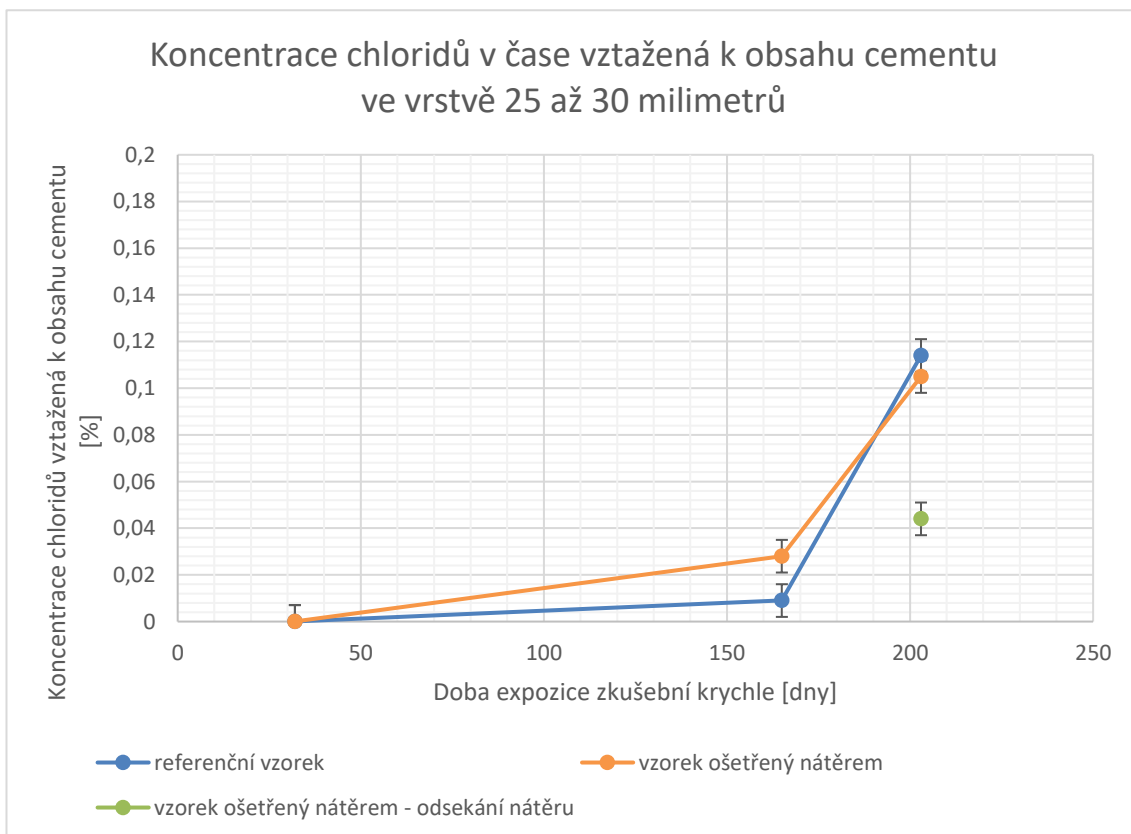
Z analýzy výsledků měření lze usuzovat, že povrchový nátěr chloridy akumuluje, a pro zpřesnění měření je proto vhodné jej před odběrem vzorků z povrchu zkušebních krychlí odstranit. V dlouhodobém horizontu, v rámci měření se jednalo o období o délce půl roku, se pak ukazuje trend nárůstu chloridů v referenčních vzorcích, přičemž u vzorků ošetřených povrchovou úpravou naopak začne převládat bariérová funkce nátěru a v důsledku pouze mírný nárůst koncentrací chloridů ve srovnání s referenčními vzorky. Lze tak předpokládat, že produkty sekundární hydratace mají schopnost chemicky vázat pronikající chloridy za vzniku komplexních solí, čímž dochází ke snížení jejich transportu.

Naměřené výsledky je následně možno srovnat s výslednými koncentracemi získanými výpočtem. V tabulce níže (tab. 8) jsou pro porovnání naměřené a vypočtené hodnoty pro každý odběr, čas t odpovídá době expozice každého odběru. Hloubka d je pro první odběr rovna 15 mm, pro zbylé dva odběry $d = 30$ mm. Výsledné hodnoty se s časem přibližují, koncentrace chloridových iontů pro třetí odběr je již v obou sloupcích téměř identická. Vypočtené hodnoty dobře odpovídají naměřeným skutečnostem.

	Koncentrace v hloubce d v čase t [%]	
	naměřená	vypočtená
1. odběr, $d = 15$ mm	0,0120	0,2356
2. odběr, $d = 30$ mm	0,0090	0,0683
3. odběr, $d = 30$ mm	0,1140	0,1131

Tabulka 8: Porovnání naměřených a vypočtených koncentrací chloridových iontů

Jedním z hlavních důvodů sledování vlivu chloridů a jejich případného prostupu do železobetonových konstrukcí je riziko korozního poškození ocelové výztuže. Koroze výztuže může v konečném důsledku ohrozit únosnost a snížit životnost celé konstrukce. Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy závislosti koncentrace chloridů na čase pro dvě vybrané vrstvy. V případě, že by se jednalo o prefabrikovanou konstrukci třídy S1 v prostředí XC2 nebo XC3, výsledná vypočtená nominální tloušťka krycí vrstvy by mohla odpovídat uložení výztuže ve vrstvě 10 až 15 mm pod povrchem. Druhý případ odpovídá konstrukci třídy S2 v prostředí XC3 pro monolit. Nominální tloušťka krycí vrstvy je pro takovou konstrukci rovna 25 mm, ve vrstvě 25 až 30 mm by se nacházela výztuž. Na následujících obrázcích jsou v čase zobrazeny postupně naměřené koncentrace chloridových iontů ve dvou zmíněných vrstvách, v tloušťce 10 až 15 mm (obr. 19) a 25 až 30 mm (obr. 20). Hodnota pro vrstvu 25 až 30 mm nebyla během prvního odběru vzorků změřena, v grafu je proto pro referenční i ošetřený vzorek shodně použita hodnota vypočtená v rámci této práce v softwaru CarboChlorCon (více v kapitole 2.3.4.1 výše). Modrou barvou je stejně jako u předchozích grafů označen referenční vzorek a oranžově vzorek ošetřený ochranným nátěrem. Šedá barva zobrazuje vzorek, který byl ošetřen nátěrem taktéž, ale ze kterého byl nátěr před odebráním vzorku odsekán.

**Obrázek 19: Graf koncentrace chloridů v čase, 10 až 15 mm hloubky****Obrázek 20: Graf koncentrace chloridů v čase, 25 až 30 mm hloubky**

Z obou grafů je dobře patrný nárůst koncentrací chloridových iontů v čase, vyšší koncentrace jsou během prvních dvou měření u těles s povrchovou úpravou, později pro referenční vzorek. S ohledem na metodiku odběru vzorků je však důležité brát v potaz význam naměřených hodnot právě pro vzorky s odsekaným nátěrem.

Důležitým výstupem práce jsou také výsledné hodnoty průměrného difuzního koeficientu. Pro jednotlivé odběry jsou uvedeny v Tabulce 7 výše, výpočet byl proveden pomocí softwaru CarboChlorCon. Rozsah vypočtených hodnot koeficientu průniku chloridových iontů se pohyboval od $7,858 \times 10^{-8}$ do $3,967 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ v závislosti na době expozice. Při studiu zahraniční literatury se výpočet s ohledem na vliv prostředí jeví správně, výsledky jsou srovnatelné.

Studie zabývající se stanovením difuzního koeficientu betonu měřením potenciálu naprázdno uvádí rozsah výsledných hodnot od $6,4 \times 10^{-8}$ do $12,4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$. Měření probíhala v 3 % vodném roztoku NaCl, který je vhodný pro simulaci betonové konstrukce vystavené rozmrazovacím solím, a v umělé mořské vodě. Hodnota průměrného koeficientu odpovídala vystavení vzorku působení umělé mořské vody po dobu 142 dní [35].

Jiný výzkum, který se zabýval stanovením koeficientu průniku chloridových iontů a propustností betonu došel k závěru, že difuzní koeficient betonu je srovnatelný s hodnotami difuzního koeficientu naměřenými pro lehký beton se stejným vodním součinitelem. Zrychlenou elektrickou metodou s elektrickým potenciálem 15 V byly naměřeny hodnoty od 10×10^{-9} do $25 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ [36].

Závěr

V práci byla zpracována rešerše věnující se aktuálně platným předpisům a normám v oblasti ochrany betonových konstrukcí proti působení chloridů, mechanismu pronikání chloridů a v neposlední řadě sanačním a preventivním opatřením. Obsahem druhé části bylo provedení navrženého experimentálního programu zaměřeného na stanovování obsahu chloridových iontů u zkušebních těles vystavených působení roztoku chloridu sodného. Na zkušební krychle bylo aplikováno preventivní opatření, referenční tělesa nebyla ošetřena. V rámci experimentu také byly provedeny zkoušky tlakových pevností a vodotěsnosti. Naměřená data byla zpracována a následně vyhodnocena.

Výsledky zkoušek pevností v tlaku a průsaků potvrdily vlastnosti navržené směsi, hodnoty odpovídají předpokladům, naměřené hodnoty odpovídají dané pevnostní třídě C16/20. Vyhodnocování výsledků obsahu chloridových iontů přineslo zjištění, že aplikované preventivní opatření, povrchový nátěr, chloridy značně akumuluje a s ohledem na použitou metodiku odběru vzorků je případné nátěr před odběrem odstranit. Přičemž nátěr samotný je dle technického listu výrobce bezchloridový. Z dlouhodobého hlediska data ukazují, že koncentrace chloridů u zkušebních krychlí opatřených nátěrem narůstají v porovnání s referenčními tělesy pouze mírně. U povrchové úpravy začne v čase převládat bariérová funkce nátěru, neošetřené vzorky však chloridy akumuluji dál. U vzorku s odsekaným nátěrem byla ve vrstvě 25 až 30 milimetrů hloubky naměřena po zhruba půl roce třetinová koncentrace chloridových iontů ve srovnání s referenčním vzorkem.

V rámci práce byly pomocí autorizovaného softwaru vypočteny průměrné difuzní koeficienty pro každý odběr a vybrané koncentrace v hloubce v čase. Hodnoty vypočtených koncentrací odpovídaly těm experimentálně zjištěným, u třetího odběru se číselné výsledky téměř nelišily. Také výsledné hodnoty průměrného difuzního koeficientu dobře odpovídají výsledkům zahraničních týmů.

Po celkovém zhodnocení lze jednoznačně říci, že vybrané preventivní opatření je v dlouhodobém horizontu vhodné pro betonové konstrukce vystavené působení chloridových iontů, typicky přímořské oblasti anebo konstrukce zatížené zimní údržbou. Pro konstrukci s aplikovaným nátěrem a se shodnou recepturou s krycí vrstvou tloušťky 25 milimetrů by byla výztuž po půl roce expozice vystavena třetinové koncentraci chloridových iontů ve srovnání s neošetřenou konstrukcí.

Množství vzorků odebrané a vyhodnocené v rámci práce je zcela dostačující pro posouzení výsledků a učinění závěrů. Navržený experimentální program je však ve své podstatě, dlouhodobé stanovování obsahu chloridových iontů v čase, časově náročný, dále s ohledem na součinnost více subjektů, a tak nebylo možné odebrat vzorků více. V navazujícím výzkumu by však bylo možné pokračovat ve stanovování koncentrací chloridů v rámci delší expozice anebo použít zkušební tělesa vystavená zrychlené karbonataci či mrazovým cyklům. S odhlédnutím na další možné pokračování práce však byl vytyčený cíl dosažen.

Literatura

Normy

- [4] ČSN EN 197-1 ED.2 – Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [5] 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
- [6] ČSN EN 12620+A1 – Kamenivo do betonu
- [13] ČSN EN 450-1 – Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody
- [14] ČSN EN 13263-1+A1 – Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody
- [15] ČSN EN 15167-1 – Mletá granulovaná vysokopeční struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody
- [16] ČSN EN 206+A2 – Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [22] ČSN 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek
- [30] ČSN 73 1214 – Betonové konstrukce. Základní ustanovení pro navrhování ochrany proti korozi

Publikace, články

- [1] ZACHARDA, Vojtěch a Jiří NĚMEČEK. EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATED CHLORIDE TRANSPORT IN CONCRETE. Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2019, SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2018(22), 139. ISSN 2336-5382.
- [2] HIMMEL, Michal. Odolnost a ochrana betonů před průnikem Chloridů. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Rostislav Šulc
- [3] REITERMAN, Pavel a Martin KEPPERT. Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. Roads and Bridges - Drogi i Mosty [online]. 2020, 19(1), 51 - 64 [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: doi:10.7409/rabdim.020.003
- [7] PŘÍRUČKA TECHNOLOGA - BETON - SUROVINY, VÝROBA, VLASTNOSTI [online]. 2. Beroun: ARTIS, 2005 [cit. 2023-10-11]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/TST/usatv-ax/cw15-lad-TP-beton.pdf>
- [8] HLAVSA, Zdeněk, Robert COUFAL a Jan L. VÍTEK. Použití recyklovaného kameniva do betonu. Beton [online]. 2022, 2022(1), 46–49 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_46_pouziti-recyklovaneho-kameniva-do-betonu/

- [9] HURTIG, Karel, Milan RYDVAL a Jiří KOLÍSKO. Opětovné využití stavebního a demoličního odpadu jako recyklovaného kameniva do betonu. *Beton* [online]. 2023, 2023(1), 14–19 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2023_1_14_opetovne-vyuziti-stavebniho-a-demolicniho-odpadu-jako-recyklovaneho-kameniva-do-betonu/
- [10] Beton s využitím recyklovaného kameniva. *Stavebnictví* [online]. 2020, 2020(4) [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-beton-s-vyuzitim-recyklovaneho-kameniva.html>
- [11] PAVLŮ, Tereza, Kristina FOŘTOVÁ, Jan PEŠTA, Jakub ŘEPKA a Tomáš VLACH. Možnosti náhrady přírodního drobného těžného kameniva v betonu recyklovaným kamenivem: experimentální a environmentální vyhodnocení. *Beton* [online]. 2023, 2023(1), 28–31 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2023_1_28_moznosti-nahrady-prirodniho-drobneho-tezeneho-kameniva-v-betonu-recyklovanym-kamenivem-experimentalni-a-environmentalni-vyhodnoceni/
- [12] HELA, Rudolf, Klára KŘÍŽOVÁ a Miroslav KÝVALA. Výroba betonu z recyklovaného kameniva v ČR v roce 2022. *Portál TZB-info* [online]. 2023, 2.1.2023 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/24793-vyroba-betonu-z-recyklovaneho-kameniva-v-cr-v-roce-2022>
- [17] NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. London: Unwin Brothers Limited, 1963.
- [18] BAMBUCHOVÁ, Markéta. *Vliv krystalizačních příměsí na strukturu mikrotrhlin a vodotěsnost betonu v čase*. Ostrava, 2016. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/84396604.pdf>. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jiří Šafrata.
- [19] VÍCH, Michal. *Vliv příměsí betonu na smršťování cementové matrice*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81019/F1-DP-2019-Vich-Michal-F1-DP-2019-VICH-MICHAL-KOS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Josef Fládr.
- [20] SARMENTO DA SILVA, Rodrigo Mero a Aline Da Silva RAMOS BARBOZA. Concrete modeling using micromechanical multiphase models and multiscale analysis [online]. In: . Maceió, AL, Brasil [cit. 2023-10-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000500001>
- [21] HOBZA, Jakub. *Odolnost betonu proti CHRL*. Praha, 2019. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81007/F1-DP-2019-Hobza-Jakub-Diplomova%20prace_Hobza.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jan L. Vítek.
- [23] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Why is the ocean salty? National Ocean Service [online]. [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/whysalty.html>

- [24] EMMONS, Peter H. a Brandon W. EMMONS. Sanace a údržba betonu v ilustracích. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-7204-106-1.
- [25] PAPANAKIS, Vagelis G., Michael N. FARDIS a Constantinos G. VAYENAS. Physicochemical processes and mathematical modeling of concrete chlorination. *Chemical Engineering Science* [online]. 1996, 51(4), 505 - 513 [cit. 2023-11-03]. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00318-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00318-5).
- [26] TEPLÝ, Břetislav. Působení chloridů na beton: souvislosti, důsledky, modelování, testování, současný stav poznání. *Beton* [online]. 2018, (6), 62 - 65 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2018-6-62.pdf>
- [27] MARTÍNEK, Petr. Sanace železobetonových konstrukcí s nízkou krycí vrstvou a nadlimitním obsahem chloridů – opěrná zeď na I/35 v Liberci. In: *Časopis SILNICE ŽELEZNICE* [online]. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/materialy-a-technologie/sanace-zelezobetonovych-konstrukci-s-nizkou-kryci-vrstvou-a-nadlimitnim-obsahem-chloridu-operna-zed-na-i-35-v-liberci-238>
- [28] ŠMERDA, Zdeněk a kol. Životnost betonových staveb. Praha: Nakladatelství ŠEL, 1999. ISBN 80-902697-8-8.
- [29] MUTHENA, Alisa a kolektiv. DuraCrete - Final Technical Report: General Guidelines for Durability Design and Redesign. 2000.
- [31] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Problémy spojené s použitím pozinkované výztuže do betonu. *Koroze a ochrana materiálů* [online]. 2002, 46, 104-107 [cit. 2023-12-06].
- [32] STROIA, Mike. Zinc-Coated Reinforcing Steel. *STRUCTURE* [online]. 2017, 13-15 [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.structuremag.org/?p=11305>
- [33] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [34] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [35] ERDOĞDU, Ş., I. L. KONDRATOVA a T. W. BREMNER. Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, 34(4), 603-609 [cit. 2023-12-28]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603003624>
- [36] SUGIYAMA, T., T. W. BREMNER a Y. TSUJI. Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship. *Cement and Concrete Research* [online]. 1996, 26(5), 781-790 [cit. 2023-12-28]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85015-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85015-0).

Seznam obrázků


Obrázek 1: Složky životních nákladů stavby, zdroj: ŘSD.....	10
Obrázek 2: Chemické rovnice hydratace cementu [19].....	16
Obrázek 3: Schéma zobrazující fáze a rozměry betonu od mikroměřítko po makroměřítko, upraveno [20].....	17
Obrázek 4: Pronikání chloridů [24].....	20
Obrázek 5: Trhliny a chloridy [24]	20
Obrázek 6: Degradace výztuže vystavené povětrnostním vlivům a agresivním látkám, Strahovský stadion	21
Obrázek 7: Metody ochrany výztuže, upraveno [28]	28
Obrázek 8: Krychle ve zkušebním lisu	35
Obrázek 9: Graf nárůstu pevnosti – lineární	36
Obrázek 10: Graf nárůstu pevnosti – logaritmický	36
Obrázek 11: Zkušební krychle s aplikovaným zkušebním nátěrem	38
Obrázek 12: První odběr, zkušební krychle	39
Obrázek 13: Druhý odběr, odebrané vzorky	39
Obrázek 14: Autorizovaný software pro karbonatci betonu a chloridy CarboChlorCon	40
Obrázek 15: Předpokládaná difuzivita po 10 letech pro různé druhy cementu, zdroj: CarboChlorCon	41
Obrázek 16: Graf koncentrace chloridů, první měření	44
Obrázek 17: Graf koncentrace chloridů, druhé měření	44
Obrázek 18: Graf koncentrace chloridů, třetí měření	45
Obrázek 19: Graf koncentrace chloridů v čase, 10 až 15 mm hloubky	48
Obrázek 20: Graf koncentrace chloridů v čase, 25 až 30 mm hloubky	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Charakteristické hodnoty kritické koncentrace chloridů [29].....	26
Tabulka 2: Receptura – zkušební krychle	33
Tabulka 3: Tlakové pevnosti – sedm dní.....	35
Tabulka 4: Tlakové pevnosti – vyzrálý beton	35
Tabulka 5: Hloubky průsaku	37
Tabulka 6: Přehled jednotlivých měření s daty	38
Tabulka 7: Průměrné difuzní koeficienty a koncentrace.....	42
Tabulka 8: Porovnání naměřených a vypočtených koncentrací chloridových iontů	47

Přílohy

Příloha 1: Osvědčení o stálosti vlastností – Portlandský cement

	TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.
	Technical and Test Institute for Construction Prague, SOE

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznamovaný subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán • Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body • Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

Oznamovaný subjekt 1020

OSVĚDČENÍ O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ

certificate of constancy of performance

č. 1020 – CPR – 040 018255

V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích nebo CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:

Portlandský cement EN 197-1 – CEM I 42,5 R

Výrobek je určen pro přípravu betonu, malt, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a výrobu stavebních výrobků.

uvedený na trh pod jménem nebo firmou nebo ochrannou známkou výrobce:

Českomoravský cement, a. s.

Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov
IČO: 26 20 95 78

a vyrobený ve výrobním závodě:

závod Mokrá
Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov

Toto osvědčení prokazuje, že všechna ustanovení týkající se posuzování a ověřování stálosti vlastností popsaná v příloze ZA normy


EN 197-1:2011


podle systému 1+ pro vlastnosti uvedené v tomto osvědčení byla uplatněna a že řízení výroby u výrobce zajišťuje

stálost vlastností stavebního výrobku

Toto osvědčení bylo poprvé vydáno 1. dubna 2004 jako certifikát podle CPD a zůstává v platnosti, dokud se harmonizovaná norma, stavební výrobek, postupy posuzování a ověřování stálosti vlastností ani výrobní podmínky v místě výroby výrazně nezmění nebo pokud oznamovaný subjekt pro osvědčení výrobku nepozastaví nebo nezruší platnost tohoto osvědčení.

Teplice, 4. prosince 2017

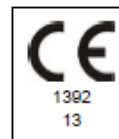



 Ing. Pavel Rubáš, Ph.D.
 zástupce vedoucího oznamovaného subjektu

Příloha 2: Prohlášení o vlastnostech – Pamětník 4/8



Prohlášení o vlastnostech č. 016/CPR/2019
podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: **PAMĚTNÍK** frakce 4/8
Přírodní hrubé těžené kamenivo, hornina štěrkopísek
- Zamýšlené/zamýšlená použití:
Kamenivo pro přípravu betonu pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby
- Výrobce: **BEST, a.s., Rybnice 148, 331 51 Kaznějov, IČ: 25 20 18 59, tel.: +420 373 720 111 e-mail: best@best.info**
- Zplnomocněný zástupce: -
- Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností: **Systém 2+**
- Harmonizovaná norma: EN 12620:2002+A1 Kamenivo do betonu
Oznámený subjekt: **Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o., oznámený subjekt č. 1392**
- Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost		
- Frakce kameniva	4/8	
- Zrnitost	G _{85/20}	
- Tolerance pro zrnitost HK s $D/d > 2$	NPD	
- Propad na středním síti HK s $D/d > 2$	NPD	
- Typická zrnitost DK	NPD	
- Tvar zm hrubého kameniva – tvarový index	S_{f0}	
- Tvar zm hrubého kameniva – index plochosti	NPD	
- Objemová hmotnost	2,577 Mg/m ³	
Čistota		
- Obsah schránek živočichů v HK	NPD	
- Obsah jemných částic	$f_{1,5}$	
Odolnost proti drcení		
- Odolnost proti drcení metodou LA	LA ₃₀	
- Odolnost proti drcení rázem	NPD	
Odolnost proti otěru/ohladitelnosti/obrusu		
- Odolnost proti otěru HK (mikro-Deval)	NPD	
- Odolnost proti ohladitelnosti	PSV _{18t}	
- Odolnost proti povrchovému obrusu	NPD	
- Odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty	NPD	
Složky/Obsah		
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	NPD	
- Chloridy	$\leq 0,01$ % hm.	
- Sírany rozpustné v kyselině	AS _{0,2}	
- Celková síra	Vyhovuje ≤ 1 % hm	
- Obsah vodou rozpustných síranů v recykl. kamenivu	NPD	
- Potenciální přítomnost humusu	NPD	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	$\leq 0,05$ % hm.	
- Vliv látek z RK na počáteční dobu tuhnutí cem. kaše	NPD	
- Obsah oxidu uhličitého v drobném kamenivu	NPD	
Objemová stálost		
- Objemová stálost-smršťování vysycháním	NPD	
- Rozpad křemičitanu vápenatého ve VCHVS	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	
Nasákavost		
- Nasákavost	WA ₂₄ $\leq 1,5$ % hm.	
Nebezpečné látky		
- Emise radioaktivity	Index $\leq 1,0$	
- Uvolňování těžkých kovů	NPD	
- Uvolňování polycyklických aromatických uhlovodíků	NPD	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	
Trvanlivost vůči zmrazování a rozmrazování		
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	F ₁	
- Zkouška síranem hořčnatým	NPD	
Trvanlivost proti alkalicko-křemičité reakci		
- Odolnost proti alkalicko-křemičité reakci	rozplnavost $< 0,07$ % D = 44, S = 44 mmol/l	

EN 12620
platí odkaz na:
EN 12620:2002+A1:2008

- Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

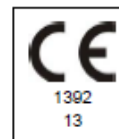
Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

V Rybnici, 25.7.2019	Jméno a funkce	Ing. Tomáš Březina statutární ředitel společnosti BEST, a.s.	Podpis	
----------------------	----------------	---	--------	--

Příloha 3: Prohlášení o vlastnostech – Pamětník 8/16



Prohlášení o vlastnostech č. 017/CPR/2019
podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: **PAMĚTNÍK** frakce 8/16
Přírodní hrubé těžené kamenivo, hornina štěrkopísek
- Zamýšlené/zamýšlená použití:
Kamenivo pro přípravu betonu pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby
- Výrobce: **BEST, a.s., Rybnice 148, 331 51 Kaznějov, IČ: 25 20 18 59, tel.: +420 373 720 111 e-mail: best@best.info**
- Zplnomocněný zástupce: -
- Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností: **Systém 2+**
- Harmonizovaná norma: EN 12620:2002+A1 Kamenivo do betonu
Oznámený subjekt: **Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o., oznámený subjekt č. 1392**
- Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost		
- Frakce kameniva	8/16	
- Zrnitost	G _{8,5} /20	
- Tolerance pro zrnitost HK s D/d > 2	NPD	
- Propad na středním síte HK s D/d > 2	NPD	
- Typická zrnitost DK	NPD	
- Tvar zm hrubého kameniva – tvarový index	S ₂₀	
- Tvar zm hrubého kameniva – index plochosti	NPD	
- Objemová hmotnost	2,573 Mg/m ³	
Čistota		
- Obsah schránek živočichů v HK	NPD	
- Obsah jemných částic	f _{1,5}	
Odolnost proti drocení		
- Odolnost proti drocení metodou LA	LA ₃₀	
- Odolnost proti drocení rázem	NPD	
Odolnost proti otěru/ohladitelnosti/obrusu		
- Odolnost proti otěru HK (mikro-Deval)	NPD	
- Odolnost proti ohladitelnosti	PSV ₁₀₀	
- Odolnost proti povrchovému obrusu	NPD	
- Odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty	NPD	
Složky/Obsah		
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	NPD	
- Chloridy	≤ 0,01 % hm.	
- Sírany rozpustné v kyselině	AS _{0,2}	
- Celková síra	Vyhovuje ≤ 1% hm	
- Obsah vodou rozpustných síranů v recykl. kamenivu	NPD	
- Potenciální přítomnost humusu	NPD	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	≤ 0,05 % hm.	
- Vliv látek z RK na počáteční dobu tuhnutí cem. kaše	NPD	
- Obsah oxidu uhličitého v drobném kamenivu	NPD	
Objemová stálost		
- Objemová stálost-smršťování vysycháním	NPD	
- Rozpad křemičitanu vápenatého ve VCHVS	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	
Nasákavost		
- Nasákavost	WA ₂₄ ≤ 1,5 % hm.	
Nebezpečné látky		
- Emise radioaktivity	Index ≤ 1,0	
- Uvolňování těžkých kovů	NPD	
- Uvolňování polycyklických aromatických uhlovodíků	NPD	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	
Trvanlivost vůči zmrazování a rozmrazování		
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	F ₁	
- Zkouška síranem hořečnatým	NPD	
Trvanlivost proti alkalicke-křemičité reakci		
- Odolnost proti alkalicke-křemičité reakci	rozplnavost < 0,07 % D = 44, S = 44 mmol/l	

EN 12620
platí odkaz na:
EN 12620:2002+A1:2008

8. Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

V Rybnici, 25.7.2019	Jméno a funkce	Ing. Tomáš Březina statutární ředitel společnosti BEST, a.s.	Podpis	
----------------------	----------------	---	--------	--

Příloha 4: Prohlášení o vlastnostech – Dobříň 0/2

Prohlášení o vlastnostech č.39/Dob./CPR/2020

podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: **Dobříň, frakce 0/2**
Přírodní těžené kamenivo, hornina štěrkopísek
- Zamýšlené/zamýšlená použití:
Kamenivo pro přípravu betonu pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby
Kamenivo pro malty pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby
Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace
- Výrobce: **CEMEX Sand, k.s., Masarykovo nám. 207, 763 61 Napajedla, IČ:479 06 201, tel.: +420 724 808 969, Provozovna DOBŘÍŇ 413 01 e-mail: zdenka.kocourova@cemex.com**
- Zplnomocněný zástupce: Karel Zuna, e-mail: Karel.Zuna@cemex.com, tel: 602475313
- Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností (AVCP): **Systém 2+**
- Harmonizovaná norma: EN 12620:2002+A1:2008 Kamenivo do betonu, EN 13139:2004 Kamenivo pro malty pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby EN 13242:2002+A1:2007 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace
Oznámený subjekt: Qualiform, a.s., Mlaty 672/8,642 00 Brno, CZ, oznámený subjekt č. 1544
- Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti (vztahující se na použití podle):			Harmonizované technické specifikace
	EN 12620	EN 13139	EN 13242	
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost				U základních charakteristik a vlastností uvedených ve sloupci: EN 12620 platí odkaz na: EN 12620:2002+A1:2008 EN 13139 platí odkaz na: EN 13139:2004 EN 13242 platí odkaz na: EN 13242:2002+A1:2007 Poznámka: Pokud se základní charakteristika nebo vlastnost nevztahuje k harmonizované technické specifikaci, řádek je v příslušném sloupci proškrtnut.
- Frakce kameniva	0/2	0/2	0/2	
- Zrnitost	G _F 85	G _F 85	G _F 85	
- Tolerance pro zrnitost DK a směsi	MP	MP	G _T 10	
- Propad na středním síti HK s D/d > 2	NPD	-	-	
- Propad na středním síti HK s D/d ≥ 2	-	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – tvarový index	NPD	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – index plochosti	NPD	NPD	NPD	
- Procentní podíl drcených a lámaných zrn v HK	-	NPD	NPD	
- Objemová hmotnost	2,614 Mg/m ³	2,614 Mg/m ³	2,614 Mg/m ³	
Čistota				
- Obsah schránek živočichů v HK	NPD	-	-	
- Obsah jemných částic	f ₃	Vyhovuje pro kgf	F ₃	
- Kvalita jemných částic	NPD	NPD	NPD	
Afnita mezi hr. kamenivem s asfaltovým pojivem				
- Průměrný stupeň obalení - asfalt 50/70, 70/100	-	NPD	-	
Odolnost proti drcení				
- Odolnost proti drcení metodou LA	NPD	NPD	NPD	
- Odolnost proti drcení rázem	NPD	NPD	NPD	
Odolnost proti otěru/ohladitelnosti/obrusu				
- Odolnost proti otěru HK (mikro-Deval)	NPD	NPD	NPD	
- Odolnost proti ohladitelnosti	NPD	NPD	-	
- Odolnost proti povrchovému obrusu	NPD	NPD	-	
- Odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty	NPD	NPD	-	
Odolnost vůči tepelným šokům				
-	-	NPD	-	
Složky/obsah				
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	NPD	-	NPD	
- Chloridy	≤ 0,01 % hm.	≤ 0,01 % hm.	-	
- Sirany rozpustné v kyselině	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	
- Celková síra	Vyhovuje	Vyhovuje ≤ 1% hm	S ₁	
- Obsah vodou rozpustných síranů v recykl. kamenivu	NPD	-	SS _{0,2}	
- Potenciální přítomnost humusu	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	≤ 0,25 % hm.	≤ 0,25 % hm.	-	
- Obsah oxidu uhličitého v drobném kamenivu	NPD	-	-	
Objemová stálost				
- Objemová stálost-smršťování vysycháním	NPD	-	-	
- Rozpad křemičitanu vápenatého ve VCHVS	NPD	NPD	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	NPD	NPD	
- Objemová stálost kameniva z ocelářské strusky	-	NPD	NPD	
Nasákavost	WA ₂₄ ≤ 0,9	WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 1	
Nebezpečné látky				
- Emise radioaktivity	Ra 226 ≤ 50 Bq/kg, Index ≤ 1,0			
- Úvolňování těžkých kovů a polyaromatic. uhlovodíků	NPD	NPD	NPD	
- Úvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	NPD	NPD	
Trvanlivost proti zmrazování a rozmrazování				
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	NPD	NPD	NPD	
- Zkouška síranem hořečnatým	NPD	NPD	NPD	
Odolnost proti rozpadavosti čediče				
-	-	NPD	NPD	
Trvanlivost proti alkalicko-křemičité reakci				
-	rozpínavost < 0,10 %	rozpínavost < 0,10 %	-	
- Odolnost proti alkalicko-křemičité reakci	D = 60,20, S = 26,62 mmol/l	D = 50,20, S = 26,62 mmol/l	-	

- Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podpísáno za výrobce a jeho jménem:

V Dobříni 20.7.2020	Jméno a funkce	Jiří Duda, Manažer kvality	Podpis	CEMEX Sand, k.s. těžba a zpracování štěrku Masarykovo nám. 207, 763 61 Napajedla IČ: 47906201, DIČ: CZ47906201
---------------------	----------------	----------------------------	--------	---

Příloha 5: Prohlášení o vlastnostech – Xypex Concentrate



PROHLÁŠENÍ O VLASTNOSTECH

Podle nařízení (EU) č. 305/2011

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku	Xypex Concentrate Kompozitní směs na bázi portlandského cementu a aditiva báze XYPEX®
2. Zamýšlená použití	EN 1504-2:2004 Malta pro ochranu a opravu železobetonových konstrukcí zatížených vlhkostí a tlakovou vodou Zásada 6 (RC)-chemická odolnost-metoda 6.1 nátěr (C)
3. Výrobce	Xypex CE s.r.o. Thákurova 7 160 00 Praha 6 Česká republika Vyrobeno v licenci Xypex Chemical Corporation 13731 Mayfield Place Richmond, British Columbia V6V 2G9 Kanada
4. Zplnomocněný zástupce	NEKAP s.r.o. Thákurova 7 160 00 Praha 6 Česká republika
5. Systémy POSV	2+
6. Harmonizovaná norma Oznámený subjekt	ČSN EN 1504-3 1020 TZUS, Česká republika
7. Deklarované vlastnosti	Viz tabulka (následující strana)

PROHLÁŠENÍ O VLASTNOSTECH

Podle nařízení (EU) č. 305/2011

Xypex Concentrate

Tabulka 1

Základní charakteristiky	Vlastnost	Harmonizovaná technická specifikace
Odolnost vůči silnému chemickému napadení Třída II: 28 dní bez tlaku Zkušební roztoky: pH 12 NaOH, pH 11 NaOH, pH 2 H ₂ SO ₄ , pH 3 H ₂ SO ₄ , 20% NaOH a 20% NaCl.	Výsledek: Vyhovující	EN 1504-2
Soudržnost - tuhé systémy (bez pohybu)	Průměrně $\geq 1,0$ N/mm ² , bez zatížení dopravou $< 0,7$ N/mm ²	
Obsah chloridových iontů	$\leq 0,05\%$ hmotnosti	
Nebezpečné látky	Ve shodě s čl. 5.3	

Tabulka 2

Doplňkové charakteristiky	Vlastnost	Testovací metoda
Průnik vody pod tlakem po 90 dnech	Zkušební vzorek < Kontrolní vzorek	EN 12390-8
Krystalizační aktivita	Prokázáno zacelení do šířky 0,4 mm	MP-L02/2015 LABBET č.1687

Vlastnosti výrobku, specifikovaného v bodech 1 a 2, jsou ve shodě s vlastnostmi uvedenými v bodě 7. Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 3.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem v Praze dne 3. 1. 2022



Jan Mandelík, jednatel společnosti

Xypex CE s.r.o.
 Thákurova 7
 160 00 Praha
 Česká republika