

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra technologie staveb**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Odolnost a ochrana betonů před průnikem Chloridů**

**Michal Himmel**

**2018**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.**

**Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.**

**V Praze 7.1.2018**

.....

**Jméno a příjmení**

### *Poděkování*

*Tato práce vznikla za přispění grantů SGS16/198/OHK1/3T/11, SGS16/135/OHK1/2T/11. Práce vznikla také za přispění projektu GA ČR (17-05360S).*

*Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za konzultace, odborné rady a pomoc při vypracování diplomové práce.*

*Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Jiří Němečkovi, Ph.D. za propůjčení prostor a vybavení laboratoře a Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za poskytnutí prostor a vybavení laboratoře Experimentálního centra Fakulty stavební na Českém vysokém učení technickém v Praze při výrobě betonových vzorků.*

*Nakonec a ze všeho nejvíce bych chtěl poděkovat mé matce a celé rodině za morální podporu v průběhu celého studia.*



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Himmel</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>412672</u>
Zadávací katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Odolnost a ochrana betonů před průnikem Chloridů</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Concrete Chloride Resistance and Protection</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) Rešerše o vlivu působení korozí betonů vlivem CHRL, zejména s ohledem na solné roztoky	
2) Možnosti ochrany betonů proti působení CHRL (solí)	
3) Návrh experimentu k provedení uchylených zkoušek pronikání solí do betonu.	
4) Návrh možností ochrany povrchu a struktury betonu pomocí migrace iontů v elektrickém poli.	
5) Provedení experimentů s přírodní penetrací solí a urychlenou metodou pomocí elektrického pole.	
6) Provedení migrace nanočástic do struktury betonu pomocí elektrického pole.	
7) Vyhodnocení experimentu vzhledem k různým metodám ochrany betonu.	
Seznam doporučené literatury:	
[1] J. van der Geer, J.A.J. Hanraads, R.A. Lupton, The art of writing a scientific article, J. Sci. Commun. 163 (2000) 51-59.	
[2] W. Strunk Jr., E.B. White, The Elements of Style, third ed., Macmillan, New York, 1979.	
[3] G.R. Mettam, L.B. Adams, How to prepare an electronic version of your article, in: B.S. Jones, R.Z. Smith (Eds.), Introduction to the Electronic Age, E-Publishing Inc., New York, 1999, pp. 281-304.	
[4] R.J. Ong, J.T. Dawley and P.G. Clem: submitted to Journal of Materials Research (2003)	
[5] Němeček, J.; Hlaváček, P.; Kouřil, M; Jamborová T. - ELECTROCHEMICAL INJECTION OF NANOPARTICLES INTO CONCRETE	
[6] Hlaváček, P.; Němeček, J. - ACCELERATED CHLORIDE MIGRATION TESTS IN CONCRETE	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>5.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>7.1.2018</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
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“.*

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Abstrakt**

V práci jsou popsány poškození betonu vlivem koroze, s důrazem na chloridy. Dále jsou zde uvedeny možnosti ochrany betonu před chloridy. Hlavní náplní této práce je návrh a provedení experimentu na ochranu betonu před průnikem chloridů, pomocí nanočástic. A to v podobě přírodní difuze a urychlené zkoušky v elektromigrační komoře. Dále jsou zde prezentovány výsledky těchto pokusů.

**Klíčová slova:** Chloridová odolnost, Nanočástice, Nano-silika; Odolnost betonu, Urychlený test elektromigrace, Přírodní difuze.

## **Annotation**

The work describes the damage of concrete from corrosion, with the aim on chlorides. Next are here presented possibilities of protection of concrete from these effects. The main goal of this thesis is design of experiment of concrete protection from chloride penetration. For this will be used Nano-particles. This experiment contains Chloride accelerated test and Natural diffusion.

**Keywords:** Chloride resistance, Nano-particle, Nano-silica, Concrete resistance, Chloride accelerated test, Natural diffusion

## Obsah

Obsah .....	7
Úvod.....	9
Cíle.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1.1 Odolnost betonu .....	11
1.1.1 Střídavé působení mrazu a rozmrazování .....	12
1.1.2 Chemická koroze betonu.....	14
1.1.3 Koroze vlivem karbonatace.....	20
1.2 Možnosti ochrany .....	22
1.2.1 Primární ochrana .....	22
1.2.2 Sekundární ochrana.....	23
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	25
2.1 Idea práce .....	25
2.2 Návrh experimentu .....	26
2.3 Popis použitých metod .....	28
2.3.1 Pracovní postup 1 – Ošetření Nanosilikou.....	28
2.3.2 Pracovní postup 2 – Ošetření SMS .....	29
2.3.3 Pracovní postup 3 – Urychlená penetrace Chloridů.....	29
2.3.4 Pracovní postup 4 – Přírodní difuze.....	29
2.3.5 Pracovní postup 5 – Odběr vzorků.....	30
2.3.6 Pracovní postup 5 – Sběr výsledků .....	30
2.4 Popis použitých pomůcek.....	31
2.4.1 Elektromigrační komora.....	31



2.4.2	Elektrický zdroj .....	31
2.4.3	Iontově selektivní elektroda .....	31
2.5	Popis použitých surovin .....	32
2.5.1	Cement .....	32
2.5.2	Voda .....	32
2.5.3	Kamenivo .....	32
2.5.4	Roztoky .....	33
3	VÝSLEDKY A DISKUZE .....	34
3.1	Elektrický proud .....	34
3.2	Chloridové profily .....	46
3.3	Diskuse .....	65
4	ZÁVĚR .....	66
5	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	67
6	SEZNAM GRAFŮ .....	68
7	SEZNAM TABULEK .....	70
8	ZDROJE .....	71



## Úvod

Beton pro své jedinečné vlastnosti patří mezi nejstarší stavební materiály. Je známo, že má porézní strukturu. Jednou ze závažných problematik stavebnictví je trvanlivost železobetonových staveb a jejich degradace vlivem agresivního prostředí, obě spojené především s fenoménem transportu vody a dalších látek do konstrukce. Trvanlivost konstrukce je též zásadně ovlivněna vývojem mikrostruktury betonu díky probíhajícím fyzikálně-chemickým dějům na mikroúrovni jako je hydratace, karbonatace, případná degradace vlivem reakce cementového tmelu s kamenivem (Alkalicko-křemičitá reakce, ASR) či reakce s přísadami, apod.

Odolnost vůči pronikání chloridů je jednou z kritických vlastností železobetonu. Chloridy indukovaná koroze ocelových výztuží do značné míry ovlivňuje životnost betonu ve slaném prostředí, jako jsou pobřežní stavby, struktury přílivové zóny nebo při údržbě v zimním období. Kritická koncentrace chloridů, modelování korozivzdorné oceli a různé metody impregnace betonu jsou ve vědeckém zájmu více než 30 let (např. Blankenhorn, 1978, Tuutti, 1982, Cabrera 1996, Šmilauer a kol., 2013, Němeček a Xi, 2015).

V této práci je studována penetrace chloridů betonem za použití jak přirozené difúze, tak i elektromigrace v elektromigrační komoře. Motivací tohoto experimentu je ověřit možnosti použití nanočástic k uzavření porézní betonové struktury. Pevné částice roztoku plní a ucpávají otevřené póry, kterými se do betonu dostávají molekuly solí pomocí rozdílu parciálních tlaků. Takto uzavřená struktura by měla lépe odolávat agresivní slané vodě, a tím zvýšit odolnost betonu proti působení chloridů rozpuštěných ve vodě. Výsledkem tohoto experimentu je poskytnout informace o množství chloridů pronikajících do hloubky betonové vrstvy a omezit možnost vstupu velkého množství chloridů do betonu uzavřením mikrostruktury betonu.



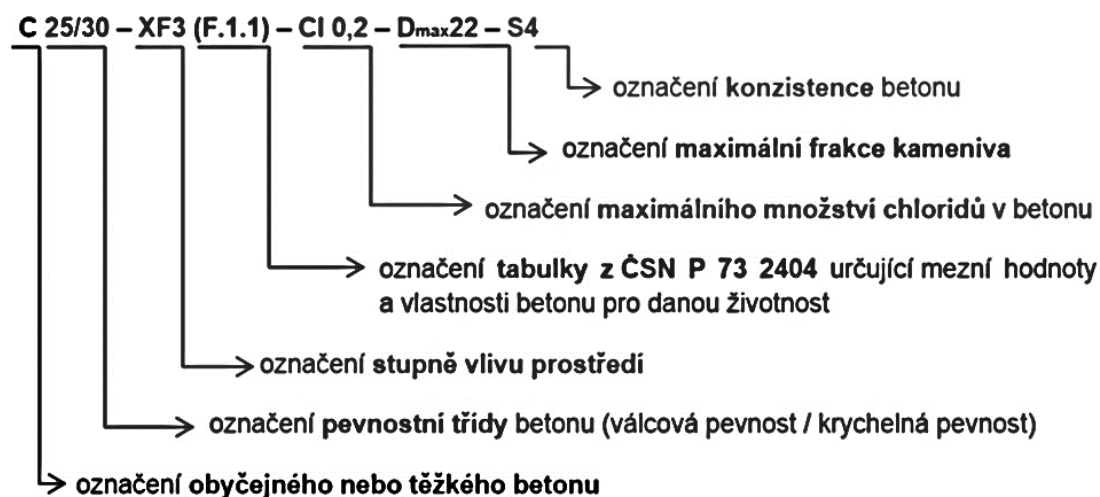
## Cíle

- Rešerše o vlivu působení koroze betonu vlivem chloridů, zejména s ohledem na solné roztoky
- Možnosti ochrany betonů proti působení CHRL (solí)
- Návrh experimentu k provedení zkoušek pronikání solí do betonu.
- Návrh možností ochrany povrchu a struktury betonu pomocí migrace iontů v elektrickém poli.
- Provedení experimentů s přírodní penetrací solí a urychlenou metodou pomocí elektrického pole.
- Provedení migrace nanočástic do struktury betonu pomocí elektrického pole.
- Vyhodnocení experimentu vzhledem k různým metodám ochrany betonu.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Odolnost betonu

Když se podíváme na popis neboli specifikaci betonu, zjistíme, že ji tvoří 6 základních technických údajů.



Obrázek 1: Specifikace Betonu (<http://www.frischbeton.cz/specifikace-betonu.php>)

a ty v pořadí jsou:

- Značení obyčejného nebo těžkého betonu
- **Pevnostní třída betonu** – Ta určuje zaručenou pevnost betonu v tlaku, měřenou na válcích/krychlích. V České republice se pevnost historicky zkouší prioritně na krychlích o hraně 150 mm. Z tohoto důvodu byla dříve uváděna pevnost pouze krychelná. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že z hlediska pevnosti platí následující převod: B30 = C25/30.
- Jednou z nejdůležitějších částí specifikace je **stupeň vlivu prostředí**. Stupňů vlivu prostředí může být pro jeden beton specifikováno více. Správná specifikace stupňů vlivu prostředí zásadně ovlivňuje návrh složení betonu. Stejně tak je ovšem důležité specifikovat tabulku mezních hodnot pro složení betonu dle životnosti nebo namáhání konstrukce. V normě ČSN EN 206 jsou uvedeny tabulky. „Tabulka 1“ (Stupeň vlivu prostředí), „tabulka 2“ (Mezní hodnoty pro stupně chemického prostředí zeminy a podzemní vody) a „tabulka F1“ (Doporučené hodnoty pro mezní složení a vlastnosti betonu) a



podle těchto tabulek se následně upravují různé hodnoty betonu jakou je například vodní součinitel.

- **Maximální obsah chloridů** je dán způsobem vyztužení konstrukce. Hodnota znamená maximální obsah chloridů v procentech ve vztahu k obsahu cementu. Hodnota 0,20 je pro předpjaté konstrukce, hodnota 0,40 pro konstrukce s ocelovou výztuží a hodnota 1,0 pro prostý beton. Tento obsah chloridů v betonu nesmí být překročen.
- **Maximální zrno kameniva  $D_{max}$  a stupeň konzistence** by měly respektovat stupeň vyztužení a tvar konstrukce. Tyto parametry musí být při objednání specifikovány, ale nemají zásadní vliv na kvalitativní parametry zatvrdlého betonu.

Co které písmeno u stupně vlivu prostředí znamená, nám říká norma ČSN EN 206+A1. Ve zkratce existují tyto základní stupně:

- XC – koroze vlivem karbonatace
- XD – koroze způsobená chloridy, kromě mořské vody
- XS – koroze způsobená chloridy z mořské vody
- XF – střídavé působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemicky agresivní prostředí
- XM – namáhání pohyblivým mechanickým zatížením (obrusem)

[1][23]

### 1.1.1 Střídavé působení mrazu a rozmrazování

Mrazuvzdorností se rozumí schopnost betonu ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování. Mrazuvzdornost betonu závisí na několika činitelích. První z nich je Stáří betonu. Beton postupně získává stále vyšší mrazuvzdornost tím, jak se v čase zvyšuje jeho pevnost. [14]

Pokud je beton vyschlý, nemůže dojít k jeho porušení mrazem, protože toto porušení je způsobeno zvětšením objemu vody při změně z kapalného do pevného skupenství. K porušení tedy dojde, až pokud je stupeň nasycení vyšší než prahová hodnota zvaná kritické nasycení. Kritické nasycení při uvažovaném objemovém

přírůstku vody 9 % má hodnotu 91,7 % (odvozeno v Moderní beton, Colleparđi [10]). Pokud je tedy v určitém místě konstrukce stupeň nasycení (lokální stupeň 21/47 nasycení) vyšší než 91,7 %, vyvolá objemový přírůstek vody tahové napětí ve ztvrdlé cementové pastě, a pokud je toto napětí vyšší než pevnost v tahu ztvrdlé cementové pasty, dojde k porušení struktury betonu. [4] [13]

Dalším činitelem mrazuvzdornosti betonu je kontakt s vodním prostředím. Není-li beton nasáklý vodou, pak se snižování teploty pod bod mrazu projeví pouze tepelnými dilatácemi. Ale pokud na beton působí vodní prostředí a beton nasákne vodou. Zmraznutí se poté projeví nejen tepelnými dilatácemi betonu, ale i objemovými změnami skupenství vody v led, a působením hydraulického tlaku.

Dále zde podstatnou roli hraje pórovitá struktura cementového kamene. Ta je rozhodujícím kritériem mrazuvzdornosti, zejména distribuce pórů zaplněných vodou. Voda zamrzá snižováním teploty postupně od největších kapilár k nejmenším.

Pevnost betonu je také výrazná vlastnost z pohledu mrazuvzdornosti. Beton musí odolávat napětí, které vznikne zvětšováním objemu vody přecházející v led (objemová změna o 9 %). MacInnis stanovil minimální pevnost betonu odpovídající této kritické objemové změně hodnotou  $RB \geq 33,5$  MPa. [5]

Provzdušnění betonu je záměrné vytvoření mikroskopických vzduchových bublinek v čerstvém betonu během míchání obvykle s použitím provzdušňujících přísad. Typická velikost bublinek je o průměru 10  $\mu\text{m}$  až 300  $\mu\text{m}$  kulovitého nebo podobného tvaru s definovaným rozložením v cementovém kameni. Póry vzniklé provzdušněním, nejsou vodou zaplněny, slouží jako kompenzační prostor pro zvětšování objemu ledu. [4]

Zkoušku mrazuvzdornosti stanovuje norma ČSN 731322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Postup zkoušky podle ČSN 731322:

Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazícího prostředí v rozmezí  $-15^{\circ}\text{C}$  až  $-23^{\circ}\text{C}$ . Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody  $+20^{\circ}\text{C}$  teplé. V mimopracovní době jsou zkušební tělesa uložena v mrazícím prostoru požadované

teploty. Vzorky se přeměřují (destruktivní zkouškou v tahu za ohybu nebo nedestruktivní zkouškou) a váží po etapách, přičemž každá etapa má 25 cyklů. [13]

Jako výsledek zkoušky se uvádějí hodnoty pro každou ukončenou etapu a pro celou zkoušku zmrazování:

- a) Zjištěné úbytky hmotnosti zkoušených zmrazovaných trámčů v % hmotnosti
- b) Pevnosti betonu v tahu za ohybu a zpravidla i pevnost konců trámčů v tlaku, a to jak zmrazovaných tak i porovnávaných
- c) Součinitel mrazuvzdornosti betonu po jednotlivých etapách a po ukončení zkoušky [12]

„Součinitel mrazuvzdornosti je poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámčů v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávacích trámčů v tahu za ohybu. Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75%.“ [13] [14]

### 1.1.2 Chemická koroze betonu

Beton je chemicky napadán kyselými činidly podle jejich koncentrace a skupenství. Podle stupně agresivity prostředí se musí navrhovat i složení betonu, tak jak je stanoveno v ČSN EN 206-1.

Beton je chemicky napadán řadou látek, které působí na jeho strukturu a vlastnosti. Tyto látky jsou v plynné formě, jako jsou agresivní látky v ovzduší, nebo v kapalně formě jako jsou roztoky kyselin, zásad, solí případně i organických látek. Hlavní příčina degradace betonu je vnikání těchto škodlivých plynů a kapalin do jeho struktury. Rychlost koroze je definovaná průběhem chemických reakcí agresivních látek se složkami cementového tmelu a rychlosti výměny kapalného prostředí u povrchu betonu. Rychlost chemické koroze odpovídá difuzi agresivních látek povrchovou vrstvou, kterou vytváří málo rozpustné látky a která brání vnikání dalších agresivních látek do betonu. Všechny procesy koroze betonu související se snížením obsahu hydroxidu vápenatého v cementovém tmelu mají vliv na korozi ocelové výztuže. [9] [10]

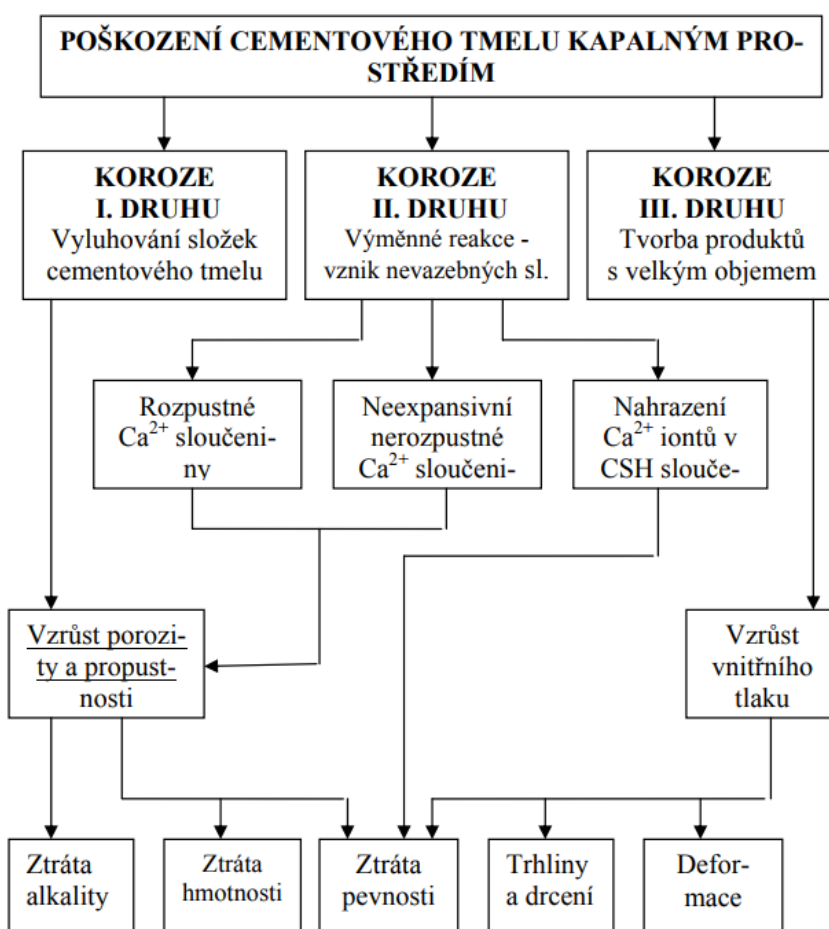
Chemickou korozi se rozumí rozrušování a změna vlastností materiálu v důsledku působení agresivních látek kapalného nebo plynného skupenství. Korozi způsobenou kapalnými látkami lze dále dělit na korozi I., II. a III. druhu. [7]

Druhy chemické koroze betonu s kapalným agresivním prostředím

I. druhu – Koroze betonu vyluhováním pojiva

II. druhu – Koroze kyselinami

III. druhu – Síranová koroze



Obrázek 2 : Schéma poškození betonu v kapalném agresivním prostředí

### 1.1.2.1 Koroze I. druhu

Koroze I. druhu spočívá ve vyluhování hydroxidu vápenatého  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z cementového tmele, což vede k postupnému snižování pevnosti. Snižování koncentrace hydroxidových iontů také způsobuje snížení pH cementového tmele a tím pádem postupné snižování ochrany ocelové výztuže před korozi. Při výrazném

poklesu pH může dojít i k postupnému rozkladu slínekových minerálů na oxidy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Slínekové minerály jsou totiž vysoce zásadité sloučeniny a jsou tedy stabilní pouze v zásaditém prostředí. Tímto druhem koroze jsou ohroženy konstrukce, které přicházejí do styku s tzv. hladovou vodou, tedy vodou, která obsahuje velmi málo vápenatých a hořečnatých iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . Jedná se především o vodu dešťovou a dále o povrchové vody (říční, rybníční). Na povrchu konstrukce zasažené tímto typem koroze jsou často pozorovatelné bílé výkvěty tvořené uhličitanem vápenatým  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ . [7] [9]

Tento druh koroze se vyznačuje vylouhováním a rozpouštěním hydroxidu vápenatého  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , vzniklého hydratací cementu. Rychlost tohoto vylouhování je přímo úměrná množství kapilárních pórů v cementovém tmelu a na hydrostatickém tlaku působící vody na konstrukci. Jestliže je počet kapilárních pórů nízký a tyto póry mají malý průměr, dochází k vylouhování pouze na povrchu betonu, naopak při vyšší pórovitosti s většími průměry vznikají vysoké rychlosti filtrace a dochází k rozpouštění a výluhu velkého množství  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . [10] [11]

Chceme zjistit poškození přímo na konstrukci, nanese se roztok acidobazického indikátoru – fenolftaleinu v etanolu. Tento indikátor mění svoje zbarvení v rozmezí pH 8 až 9,8 v závislosti na teplotě, obsahu solí v roztoku a dalších faktorech, které u betonu nejsou uvažovány. Roztok fenolftaleinu je v prostředí o pH  $<8,0$  bezbarvý, v prostředí betonu dochází ke změně barvy na červenofialovou při pH 9,5. Touto zkouškou zjistíme, zda koncentrace  $\text{OH}^-$  iontů, odpovídající danému pH je pod nebo nad touto hodnotou. Pro přesnější hodnoty se použijí směsné indikátory, kterými se určí hodnota pH s přesností na jednotky pH. Důležitou hodnotou je hodnota pH při změně zbarvení fenolftaleinu z hlediska možné koroze výztuže. Pro přesné stanovení pH lze provést potenciometrickou metodou v laboratoři. Protože pH je koncentrační hodnota, výsledek stanovení závisí na poměru množství vzorku a množství vody, ze kterých se připraví vodní výluh z betonu. Zjištěná hodnota pH neodpovídá přesně pH pórového roztoku. Pro stanovení pH tímto způsobem je nutné zvolit vhodnou metodiku a brát výslednou hodnotu pouze jako orientační. [9] [10] [11]



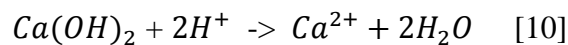


### 1.1.2.2 Koroze II. druhu

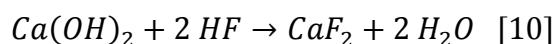
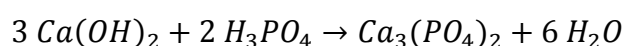
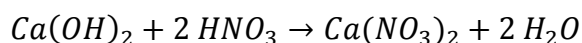
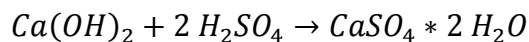
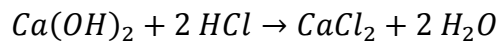
Korozí II. druhu se označují výměnné reakce působících látek s hydroxidem vápenatým  $\text{Ca(OH)}_2$ . Častým případem tohoto druhu je působení kyselin, při kterém dochází k přeměně hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$  a hydratovaných silikátů a aluminátů vápenatých na vápenaté soli kyselin. Z organických kyselin se jeví nejagresivněji kyselina chlorovodíková  $\text{HCl}$  a dusičná  $\text{HNO}_3$ , dále se vyskytuje působení kyseliny sírové  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , fosforečné  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a kyseliny fluorovodíkové  $\text{HF}$ . Z organických kyselin jsou potom příčinou koroze například kyselina octová, mravenčí, máselná, mléčná a huminové kyseliny, přičemž nejvíce destruktivní efekt mají kyseliny mléčná a octová. S kyselinovou korozí se nejčastěji setkáváme v chemických a potravinářských provozech, v zemědělských zařízeních (například silážní jámy) a také u konstrukcí, které přicházejí do styku s odpadními vodami. [7] [10] [11]

Vůči působení alkalických roztoků je beton poměrně odolný, pouze při kontaktu s koncentrovanými roztoky může dojít k rozpouštění silikátových a aluminátových složek z cementového tmele. Pro beton jsou také nebezpečné hořečnaté soli, které reagují výměnnými reakcemi s hydroxidem vápenatým za vzniku rozpustných vápenatých solí. [9]

Kyseliny reagují s hydroxidem vápenatým, hydratovanými silikáty a alumináty vápenatými z cementového tmelu za vzniku příslušných vápenatých solí. Obecně lze reakci  $\text{Ca(OH)}_2$  s kyselinou zapsat rovnicí:



Reakce konkrétních kyselin s  $\text{Ca(OH)}_2$  vyjadřují rovnice:





Kyselina fluorovodíková, je-li v nadbytku, reaguje se silikátovými a aluminátovými složkami cementu za tvorby komplexních silikátů a aluminátů, obsahujících anionty  $\text{SiF}_6^{2-}$  a  $\text{AlF}_6^{3-}$ . Při  $\text{pH} < 4$  dochází již k reakci ostatních silných anorganických kyselin se silikátovými a aluminátovými složkami cementového tmelu za vzniku gelu a hlinité a železité soli dané kyseliny. [10] [11]

Také organické kyseliny neutralizují  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  za tvorby vápenatých solí. Jedná se zejména o kyselinu octovou a máselnou v zemědělství a potravinářském průmyslu a celou řadu organických kyselin v chemickém průmyslu. Stupeň agresivity kyselin se posuzuje nejen podle jejich síly a koncentrace, ale také podle druhu reakčních produktů. Rozpustné produkty jsou odplavovány a jsou napadány další podíly cementového tmelu, nerozpustné sloučeniny částečně brání styku s agresivním prostředím, a dokonce dochází i částečnému zpevnění povrchu betonu. [9]

Vody obsahující kyselinu uhličitou (minerální a bažinaté vody) vedou nejdříve ke tvorbě  $\text{CaCO}_3$  (karbonatáci betonu), který je málo rozpustný a částečně utěsňuje póry v cementovém kameni. Tento uhličitán je však další kyselinou uhličitou převáděn do rozpustné formy na kyselý uhličitán  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , který je dobře rozpustný. Mezi karbonátovou tvrdostí a agresivitou vody existuje nepřímá závislost. Korozi betonu způsobují »měkké« vody s nízkou karbonátovou (přechodnou) tvrdostí do  $6^\circ \text{dH}$  ( $1^\circ \text{dH} = 10 \text{ mg CaO/l}$ ). Čím je vyšší karbonátová tvrdost vody, tím více může být přítomno  $\text{CO}_3^{2-}$ , aniž by korozivně ohrožovalo beton. Ve stojatých vodách rychlost koroze »hladovou vodou« postupně klesá.

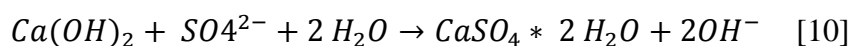
Beton koroduje mořská voda (obsahuje ionty  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), splaškové vody (obsahují sloučeniny síry  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  a sloučeniny amoniaku). Agresivní sloučeniny  $\text{NH}_4^+$  jsou také přítomny v močůvce a kejdě vedle obsahu organických kyselin. Škodlivé jsou většinou i průmyslové odpadní vody. [10] [11]

### 1.1.2.3 Koroze III. druhu

Koroze III. druhu se vyznačuje tvorbou produktů velkého objemu, které se tvoří v pórovém systému materiálu a působí na stěny pórů velkými tlaky. V případě tohoto typu degradace dochází nejprve k postupnému zaplňování pórů a zhutňování jeho struktury, což se projevuje jako přechodné zlepšení mechanických vlastností. Po

zaplnění pórů a dalším růstu krystalů v pórech je však vyvíjen tlak na stěny pórů a po vyčerpání lokální tahové pevnosti materiálu dochází k jeho trhání. Příkladem je solná koroze, při které dochází k nasávání roztoku solí do struktury materiálu a zároveň k odpařování vody, čímž se zvyšuje koncentrace obsažené soli a dochází ke krystalizaci. Při opětovném zvýšení vlhkosti v materiálu se soli rozpouštějí a následně rekrystalizují. Dochází tak k cyklické krystalizaci v pórovém systému a k postupnému porušování struktury materiálu. Některé soli vytváří hydráty, při jejichž krystalizaci vznikají ještě větší tlaky. [9] [10] [11]

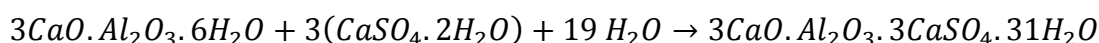
Tento typ koroze je způsobován zejména sírany. Ty reagují s  $\text{Ca(OH)}_2$  a vytvářejí málo rozpustný síran a způsobují sádrovcovou korozi.



Vznik sádrovce je spojen s nárůstem objemu o 17 %, čímž dochází k zaplnění pórů cementového tmelu a za vhodných vlhkostních podmínek může dojít i k rekrystalizaci za vzniku objemnějších krystalů, působících na stěny pórů tlakem, který je řádově v desítkách MPa. Kation vázaný na síranový anion, jako např.  $\text{Mg}^{2+}$ , pak může způsobovat další korozní reakce.

Sírany se běžně vyskytují v podzemních vodách a jsou také obsaženy v některých druzích průmyslových odpadních vod. Nejagresivnější jsou rozpustné sírany, neboť nerozpustné sírany ( $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ) neuvolňují síranové ionty, a proto síranovou korozi nezpůsobují.

Sádrovec reaguje s hydratovanými i nehydratovanými alumináty a způsobuje tzv. sulfoaluminátovou korozi. Následně může docházet k reakcím sádrovce s alumináty za vzniku ettringitu který je někdy nazýván také jako Candlotova sůl nebo jako cementový bacil. Ettringit tvoří jehlicovité krystaly, které jsou málo rozpustné. Růst krystalů ettringitu způsobuje výrazné pothánění struktury materiálu. Uplatňuje se zde komplex reakcí, které lze při zjednodušení popsat rovnicí:



Při kombinovaném působení síranů a oxidu uhličitého může docházet ke vzniku thaumasitu  $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ , který má podobné vlastnosti jako ettringit a také způsobuje velké tahové síly ve struktuře betonu. Stejným způsobem



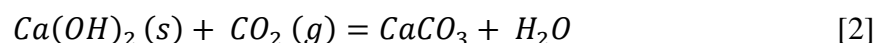
poškozuje beton vznik chloroaluminátu  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , který je také označován jako Friedlova sůl. Příčinou vzniku krystalů této sloučeniny je obsah chloridů v pórovém roztoku. [7] [9] [10] [11]

### 1.1.3 Koroze vlivem karbonatace

Karbonatace betonu je projevem tzv. stárnutí betonu. Tento beton je soustavně napadán oxidem uhličitým z ovzduší. Obvykle je obsah  $\text{CO}_2$  ve vzduchu 0,03 % objemu ( $60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Rychlost, kterou beton karbonatuje, je v rozmezí 0,1 - 1 mm/rok. Nižší hodnota platí pro velmi hutné betony vyšší pevnostní třídy, které mají nízkou pórovitost, vyšší hodnota pro betony horší kvality. [4]

Karbonatace betonu je komplexní chemický proces, který vzniká reakcí oxidu uhličitého se složkami cementového tmelu v betonu. Touto reakcí dochází k postupnému snižování pH až na hodnotu, kdy se betonová vrstva naruší. Postoupí-li takto poškozená imaginární linie ve vrstvě betonu až k výztuži (tj. zasáhne celou krycí vrstvu), dojde k narušení ochranné vrstvy výztuže, která pak může začít v přítomnosti vzdušného kyslíku a vlhkosti korodovat. Ochranná vrstva se na povrchu výztuže vytváří vzhledem ke skutečnosti, že pórový roztok v čerstvém, nepoškozeném betonu má vysokou koncentraci hydroxidových iontů odpovídající hodnotě  $\text{pH} > 12$ . [2] [23]

Z chemického hlediska proces karbonatace způsobuje oxid uhličitý, který reaguje se zásaditými křemičitany a hlinitany vápenatými, ale především s hydroxidem vápenatým, sodným a draselným. Hydroxidy sodný NaOH a draselný KOH jsou přítomny v cementovém tmelu v nízké koncentraci, dominantní roli hraje především hydroxid vápenatý  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Reakce mezi hydroxidem vápenatým a oxidem uhličitým lze popsat rovnicí:



Celá reakce je komplexního charakteru s mnoha elementárními částmi. Souhrnně lze konstatovat, že proces karbonatace zahrnuje difúzi oxidu uhličitého pórovou strukturou betonu, jeho rozpuštění v pórovém roztoku přítomném na

povrchu jednotlivých pórů, rozpuštění pevného hydroxidu vápenatého v pórovém roztoku, jeho následný přesun strukturou a konečně reakce s rozpuštěným Ca. [3]

#### Mechanické namáhání – obrus

Pokud je beton vystaven pohyblivému mechanickému zatížení, musí být vliv prostředí odstupňován následovně:

Označení stupně	popis prostředí	příklady výskytu
XM1	mírné nebo střední namáhání obrusem	nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojízdné vozidly s pneumatikami
XM2	silné namáhání obrusem	nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojízdné vozidly s pneumatikami nebo celogumovými koly vysokozdvížných vozíků
XM3	velmi silné namáhání obrusem	nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojízdné vozidly ocelovými nebo umělohmotnými koly vysokozdvížných vozíků; plochy pojízdné pásovými vozidly; vodní stavby vystavené intenzivnímu proudění vody, např. vývařiště

Tabulka 1 : Stupně namáhání obrusem

Rychlost obrusu je závislá především na vlastnostech kameniva a je významná zejména u cementobetonových krytů vozovek nebo u betonové dlažby. Pro obrusné vrstvy je nutná znalost obrusu kameniva v cm<sup>3</sup> na 50 cm<sup>2</sup> plochy (cementový kámen 17–25, křemen 9–10, korund 1–3 cm<sup>3</sup> na 50 cm<sup>2</sup>).

## 1.2 Možnosti ochrany

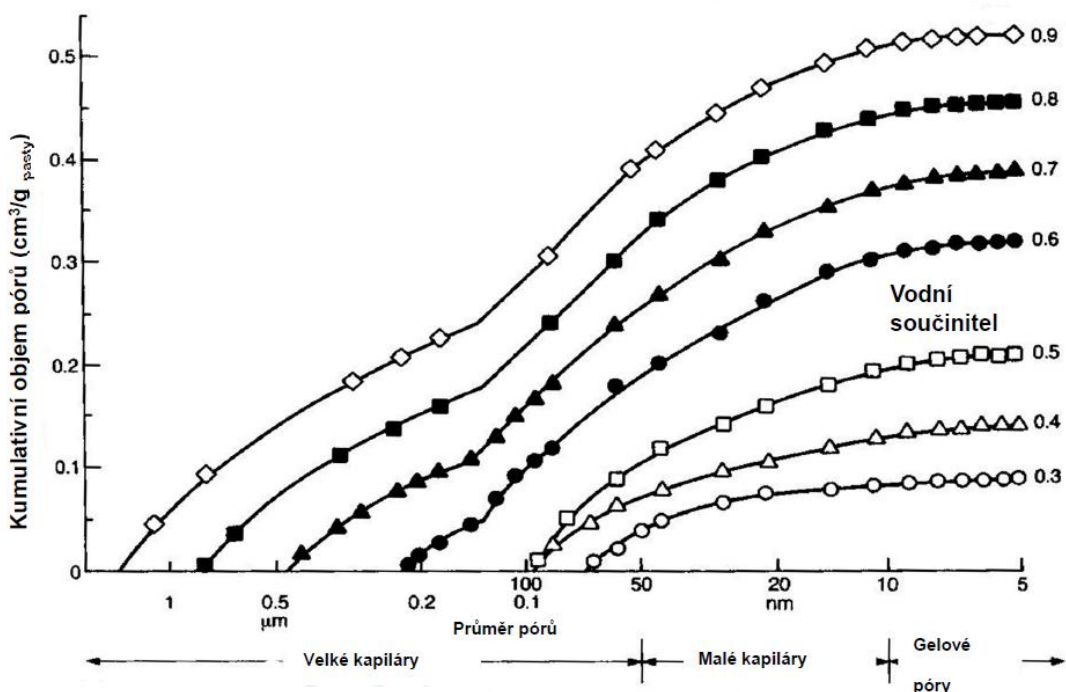
Vzhledem k tomu, že většina procesů poškozujících beton se odehrává v porézni struktuře betonu, musíme tuto strukturu nějakým způsobem změnit/zkvalitnit anebo ochránit. Každou z těchto úprav popisují níže.

### 1.2.1 Primární ochrana

Primární ochranou myslím úpravu složení betonu. Ať už přidáním nějaké přísady nebo příměsi nebo změnou poměru složek.

#### 1.2.1.1 Vodní součinitel

Jak je vidět z níže uvedeného grafu, je vliv vodního součinitele na pórovitost betonu značný. Samozřejmě je že nižší vodní součinitel znamená horší zpracovatelnost betonu. Tento problém však lze vyřešit plastifikátory a superplastifikátory.



Obrázek 3 : Vliv vodního součinitele na velikost pórů [23]



### 1.2.1.2 Pro vzdušňovací přísady

Dle ČSN EN 206-1 je nutné provádět provzdušnění čerstvé betonové směsi pro stupně agresivity XF2, XF3 a XF4. Intenzita provzdušnění je v závislosti na  $D_{max}$  (maximální zrno kameniva). Velikost pórů do 300  $\mu$  se považuje za takzvaný účinný vzduch. Poměr pro různá prostředí je: min. 1,0 % (XF2 a XF3) a 1,8 % (XF4) objemu celkového obsahu. Pro XF1 není obsah vzduchu předepsán, ale odolnost ano.

Provzdušnění betonu pomáhá proti průniku polutantů, protože obsah vzduchu v betonu je v tzv. uzavřených pórech, do kterých se polutanty nedostanu.

## 1.2.2 Sekundární ochrana

Sekundární ochranou myslím použití prostředků, na již zatvrdlý beton. Tyto prostředky budou ochranou povrchu betonu.

### 1.2.2.1 Nátěry, Impregnace

Nátěry na beton definuje norma ČSN EN 1504-2. Tato norma dělí nátěry do skupin, a to na hydrofobní impregnace, impregnace a nátěry (ve smyslu povlaky, v originále coatings). Také dále hodnotí jednotlivé předepsané parametry nátěrů ve vztahu k požadavkům obvyklých konstrukcí a uvádí vhodná použití jednotlivých nátěrů.

Tenkovrstvý nátěr má tloušťku 0,1 až 0,3 mm. Nátěr může být barevný i bezbarvý. Uzavírá povrch konstrukce a omezuje jak průnik kapalných, tak i plyných médií. Povrch může být jak hladký (snadná čistitelnost), tak drsný (protismykové vlastnosti). Hydrofobní impregnace vytváří povrch odpuzující vodu. Póry a kapiláry jsou vnitřně potaženy, avšak nejsou zaplněny. Na povrchu betonu se nevytváří film a dochází jen k malé nebo vůbec žádné změně vzhledu. Při impregnaci se snižuje porozita povrchu betonu a dochází k jeho zpevnění. Póry a kapiláry jsou částečně, nebo úplně, zaplněny. Nátěr pak vytváří na povrchu konstrukce souvislý film. Nejčastějšími materiály jsou silikony, epoxidy, polyuretany a disperze.

### 1.2.2.2 Izolace

Další možností sekundární ochrany betonu je izolace. Vložením ochranné vrstvy mezi beton a prostředí zamezíme reakci úplně. Možností druhů izolace je mnoho, zcela však záleží na místních možnostech, zda lze izolace nasadit. V tomto kontextu izolací mluvíme zejména o hydroizolacích, které chrání beton před působením vody. Mezi nejčastější typy patří asfaltové pásy a PVC fólie. Dále jako možnosti jsou štětovnicové stěny, které jsou svou konstrukcí vodě nepropustné.

### 1.2.2.3 Nanočástice

Při použití běžné penetrace na materiály dochází k vytvoření souvislého ochranného filmu, který slouží k ochraně prosakování kapalin. Tato preventivní ochranná vrstva je bohužel málo odolná proti mechanickému poškození, otěru a postupně tak ztrácí svoje účelové kladné vlastnosti. Navíc je díky jednotnému chránicímu povrchu snižována odolnost proti mrazu a často dochází k praskání vrchní vrstvy betonu. Impregnace betonu pomocí nanočástic je velmi účinnou metodou k ošetření před nežádoucím zašpiněním a povětrnostními vlivy. Nanotechnologie je způsob, jak se za použití povrchového napětí nanočástice v rovnoměrné vrstvě vsakují hluboko do materiálu, avšak netvoří souvislý film.



## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce popisuje návrh experimentu a metody. Dále jsou zde uvedeny použité materiály a pomůcky.

### 2.1 Idea práce

V této práci se pokusím volně navázat na projekty doc. Ing. Jiřího Němečka, Ph.D. a jeho kolegů [15] [16] [17] [18]. Cílem je ochránit beton pomocí nanočástic před průnikem chloridů. Provedu dva různé testy, a to přírodní difuzi a akcelerovanou penetraci chloridů. Přírodní difuze spočívá v ponoření betonového vzorku do roztoku soli a ponechání penetrace chloridů do struktury betonu na rozdíl difuzních tlaků. Urychlená zkouška pracuje na principu elektromagnetického pole, kde nabité částice na jedné straně vzorku budou přitahovány na opačně nabitou elektrodu na druhé straně vzorku.

K zlepšení odolnosti betonu použiji roztoky s nanočásticemi které, zaplní pórovou strukturu a zabrání reakci chloridů s cementovým tmelem. V předchozích projektech byl používán koloidní roztok nanosiliky CB8 a roztok SMS (2.5.4). Dále také použiji dva různé druhy betonu, více a méně kvalitní tj. méně a více porézní. Předpokládám, že pokud ochrana nanočásticemi bude fungovat, tak dojde k většímu zlepšení u poréznějšího betonu. [15] [16] [17] [18]

## 2.2 Návrh experimentu

Experiment v této práci byl navržen ve smyslu metody do severského Nordtest NT BUILD 492 a americké normy AASHTO T 277-15. V těchto metodách se používají válcové vzorky o průměru 100 mm a výšce 50 mm pro vývrty. Betonové vzorky byly vyrobeny z portlandského cementu, písku a přírodního drceného kameniva z lomu Zbraslav. Dále nebyly použity žádné další příměsi ani přísady.

kg	Pojivo	Plnivo			Voda	vodní souč.	SUM (kg/m <sup>3</sup> )
	CEMI-42.5R	0-4mm	4-8mm	8-16mm	Voda		
NO2a	436,4	872,7	290,9	581,8	186,0	0,43	2367,80
LO2	327,3	1009,7	290,9	581,8	158	0,48	2367,82

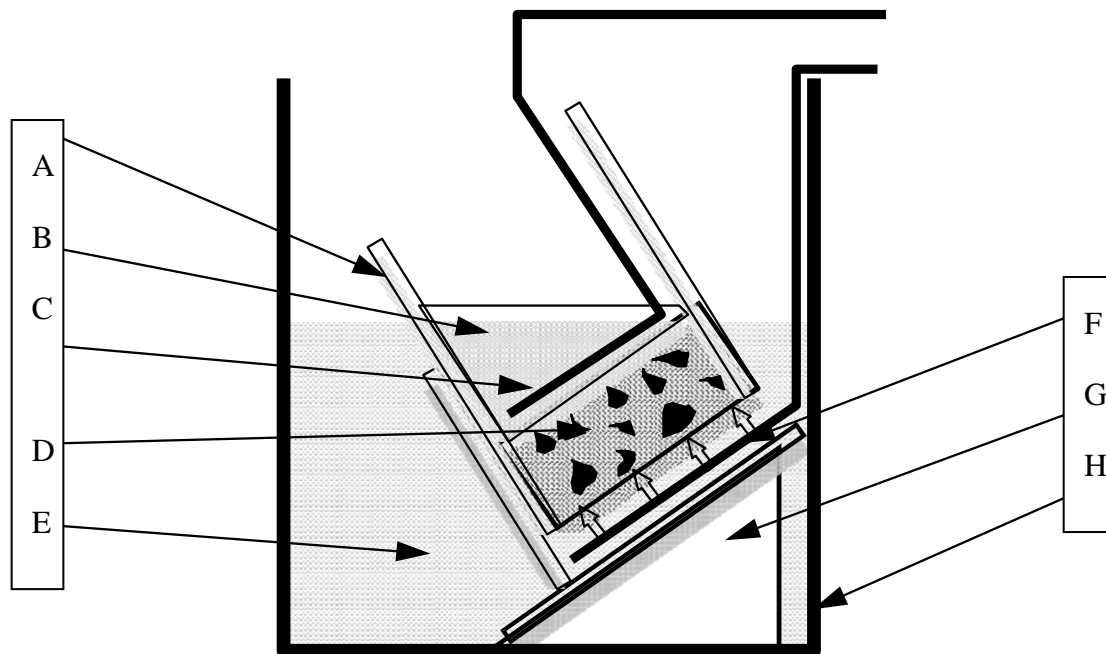
Tabulka 2 : Složení betonu

V tabulce výše je uvedeno složení směsi na 1 m<sup>3</sup>. Pro tento experiment byly připraveny 2 směsi Betonu, kvalitní beton (NO2a) s předpokladem pevnosti v tlaku nad 40 MPa a směsí méně kvalitního betonu (LO2) jehož předpokládaná pevnost v tlaku činí 20 MPa. Beton se mísí po dobu 5 minut v laboratorním mixéru na beton, následně se směs odlije do válcových a krychlových forem a vibruje. Vzorky byly odbedněny a ponořeny do vodní lázně po 48 hodinách od míchání. Pro zkoušení pevnosti v tlaku byly použity zkušební kostky o rozměrech 150x150x150 mm a pro zkoušky chloridů byly z válců o průměru 100 mm a výšce 200 mm nařezány vzorky o výšce vyhovující metodě.

Naměřená pevnost v tlaku při zkoušení vzorků betonu NO2a činila 48,9 MPa. Tato hodnota byla stanovena jako průměr tří zkušebních vzorků. Průměrná objemová hmotnost betonu činila 2351 kg \* m<sup>-3</sup>. Tato hodnota byla také určena jako průměr tří zkušebních vzorků.

U vzorků LO2 byla naměřená pevnost v tlaku rovna 20,5 MPa. A objemová hmotnost činila 2254 kg \* m<sup>-3</sup>.

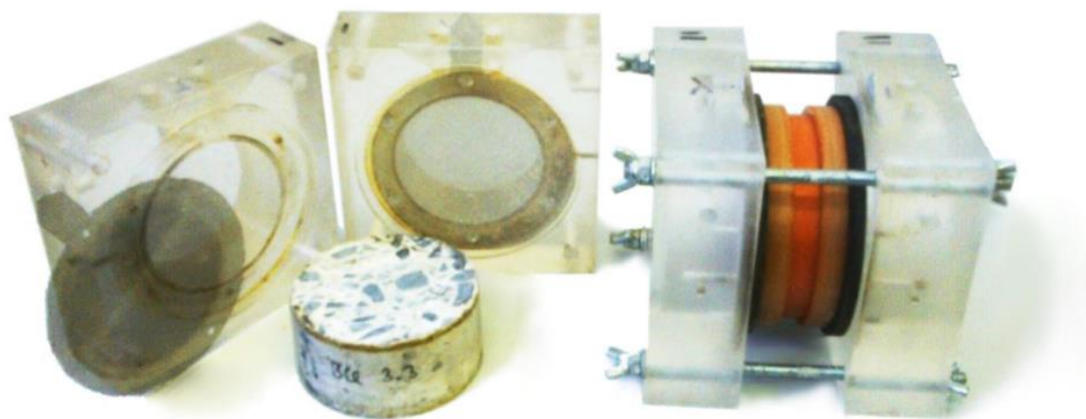
Dále je v metodě Nordtest NT BUILD 492 použita elektromigrační komora viz. obr.



- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| a . Rubber sleeve | e . Catholyte       |
| b . Anolyte       | f . Cathode         |
| c . Anode         | g . Plastic support |
| d . Specimen      | h . Plastic box     |

Obrázek 4 : Elektromigrační komora [22]

Já pro svůj experiment použil postup a komoru z americké normy AASHTO T277. Kde je použitá komora je dvou nádržková viz. níže. Tato komora je standart pro test urychlené penetrace chloridů tzv. RCPT (rapid chloride permeability test). Z této normy také použiji metodu měření chloridového profilu. V metodě NORDTEST je tato část velmi zjednodušená, a to tak že zkoumaný vzorek bude v polovině rozlomen. Na lomovou oblast bude nastříkán roztok  $\text{AgNO}_3$ . Tato kyselina reaguje s chloridy na lomové zóně za změny barvy. Tato reakce je podmíněna minimálním množstvím chlóru, a proto se na vzorku vykreslí tzv. reakční linie. V závislosti na „výšce“ této linie pak norma NORDTEST určuje migrační koeficient.



Obrázek 5 : Elektromigrační komora RCPT (AA)

Metoda určení koncentrace chloridů je analytická. Koncentrace se určuje z betonového prachu naloženého v kyselině dichromanu draselnému. V této kyselině se chloridové ionty z prachu uvolní. A jejich koncentrace lze následně změřit iontově selektivní elektrodou. Viz 2.4.3. [21] [22]

## 2.3 Popis použitých metod

Na vyzrálých vzorcích bylo provedeno 6 druhů testů. Každý z těchto testů lze rozdělit až do 3 pracovních postupů. Před každým z těchto postupů byl vzorek vakuován ve vývěvě po minimální dobu 2 hodin a následně v podtlaku nasycen destilovanou vodou po stejnou dobu.

### 2.3.1 Pracovní postup 1 – Ošetření Nanosilikou

Vzorek byl vyndán z vývěvy, urychleně povrchově vysušen a následně vložen a zatmelen butadienovým tmelem v prostředním prstenci elektrické komory. Následně byla komora složena a do nádržky na stranu záporné elektrody byl nalit neředěný roztok NS. Na stranu kladné elektrody byl nalit 3 % roztok NaOH. Následně byla komora připojena přes nerezové mřížky, které byly potopeny v elektrolytech, na zdroj s konstantním napětím 20 V a proudem 1 A po dobu 48 hodin. Po ukončení penetrace byl vzorek ponechán v sušárně, o teplotě 55 °C, minimálně 7 dní. Takto byla ošetřena třetina vzorků. 20 V bylo zvoleno za optimální napětí, při kterém nedochází k zahřívání vzorku a elektrolytů.

### 2.3.2 Pracovní postup 2 – Ošetření SMS

Vzorek byl vyndán z vývěvy, urychleně povrchově vysušen a následně vložen a zatmelen butadienovým tmelem v prostředním prstenci elektrické komory. Následně byla komora složena a na stranu záporné elektrody byl nalit naředěný roztok SMS. Do nádržky na stranu kladné elektrody byl nalit 3 % roztok NaCl. Následně byla komora připojena přes nerezové mřížky, které byly potopeny v elektrolytech, na zdroj s konstantním napětím 20 V a proudem 1 A po dobu 48 hodin. Po ukončení penetrace byl vzorek ponechán v sušárně, o teplotě 55 °C, minimálně 7 dní. Takto byla ošetřena druhá třetina vzorků.

### 2.3.3 Pracovní postup 3 – Urychlená penetrace Chloridů

Test probíhá identicky až po část, kdy se lijí roztoky do komor. Zde bude, na stejnou stranu, kde byl dříve, opět nalit roztok NaOH. A na stranu vzorku, která je ošetřena roztokem NS (SMS), bude nalit 3 % roztok NaCl. Podobě jako v postupu 1 bude „+“ připojeno k mřížce ponořené v NaOH a „-“ k roztoku NaCl. Zdroj napětí byl nastaven stejně tj. 20 V, 1 A. Tento postup byl použit na polovinu vzorků ošetřených nanosilikou, polovinu ošetřených SMS a polovinu nových vzorků.

### 2.3.4 Pracovní postup 4 – Přírodní difuze

Druhá polovina vzorků, která nebyla použita při urychlené penetraci, byla použita na přírodní difuzi. Za prvé, zde byly plášť a neošetřená podstava válce (vzorku) neprodyšně zatmeleny epoxidem. Následně byl vzorek zalit do formy a epoxidu byl ponechán čas na vytvrdnutí. Poté byl celý vzorek vakuován a penetrován destilovanou vodou. Dále byl vzorek vložen do objímky po obvodě zatmelen trvale plastickým tmelem, aby nedošlo k obtečení vzorku, a následně zalit roztokem 3 % NaCl. Takto byl vzorek uchován a chráněn proti odpařování v laboratoři po dobu ~150 dní. Následně byl vzorek vysušen za stejných podmínek jako v předchozích postupech.

Ošetření SMS	Akcelerovaná penetrace
	Přírodní difuze
Ošetření NS	Akcelerovaná penetrace
	Přírodní difuze
Referenční vzorky (Neošetřené)	Akcelerovaná penetrace
	Přírodní difuze

Tabulka 3 : postup práce se vzorky a jejich rozdělení

### 2.3.5 Pracovní postup 5 – Odběr vzorků

Sběr Chloridů z betonových vzorků byl prováděn po 5 mm tlustých vrstvách (hloubkách). Betonový vzorek byl uchycen do stojanové vrtačky s možností měření hloubky vrtu. Pro měření byl použit prach z několika vrtů, pro dosažení optimálních výsledků, z důvodu heterogenosti betonu. Po vyvrtání do díry do správné hloubky byl betonový prach vyklepán na čistý papír, nasypán do ampule a zalit 10 ml kyseliny dichromanu draselného ( $K_2Cr_2O_7$ ). Potom byly vždy vrták a díry ve vzorku vysáty, aby nedocházelo míchání prachu z vyšších vrstev a tím zkreslování výsledků. Takto bylo z každého vzorku odebráno 9 vzorků z různých vrstev tj. hloubky 0-45 mm.

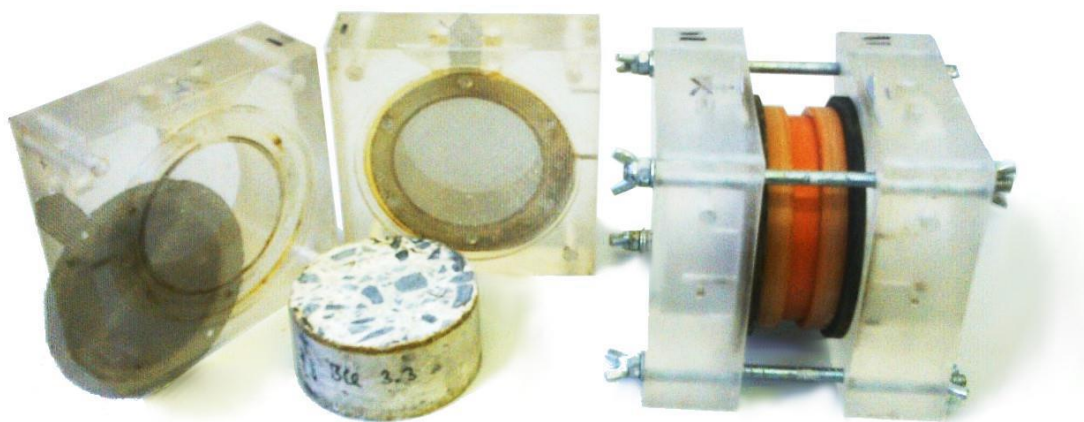
### 2.3.6 Pracovní postup 5 – Sběr výsledků

V každé ampuli byl prach s roztokem dichromanu draselného ponechán cca týden, kdy byl obsah občasně promíchán, aby došlo k uvolnění chloridů z prachu do roztoku. Při měření byla použita iontově selektivní elektroda, která změří nominální množství chloridů v roztoku. Zjednodušeně čím více iontů v roztoku, tím větší potenciál napětí. Toto napětí (mV) spolu s hmotností navážky betonového prachu (g) udává množství chloridů v dané zkoumané vrstvě (mg/g)

## 2.4 Popis použitých pomůcek

### 2.4.1 Elektromigrační komora

Tato komora se skládá z dvou hlavních kusů s nádržkami na roztoky. V těchto nádržkách jsou přichyceny nerezové mřížky. Dále je součástí komory sestava na betonový vzorek, která je ze tří částí. Nakonec jsou součástí komory dvě kruhová těsnění pro utěsnění spoje nádržka – vzorek.



Obrázek 6. Elektromigrační komora (AA)

### 2.4.2 Elektrický zdroj

Jako zdroj napětí byl použit elektrický zdroj v laboratoři. Tento zdroj má rozhraní připojitelné k PC, odkud lze jeho nastavení programovat. V tomto PC také probíhal sběr dat o proudu a napětí po celou dobu zkoušky.

### 2.4.3 Iontově selektivní elektroda

Tato elektroda byla použita pro měření chloridů v roztoku. Jde o elektrodu s pevnou membránou ("solid-state"), tj. membránou tvořenou pevnými, málo rozpustnými solemi, které mohou být založeny na monokrystalech, ztuhlých taveninách nebo polykrystalických tabletách lisovaných z práškových solí. Vnitřní elektrolyt se u tohoto typu elektrod obvykle nahrazuje kovovým kontaktem ("all-

solid-state"). Membrány mohou být zhotoveny také z heterogenních směsí sraženin zabudovaných do polymerní matrice.



Obrázek 7 : Iontově selektivní elektroda [20]

Je zde použita metoda přímé potenciometrie, při nichž se ze změřené hodnoty napětí elektrochemického článku zjišťuje koncentrace (nebo aktivita) iontu v roztoku. Kalibrace je lineární v rozsahu 5 jednotek pX ( $pX = -\log a_i$ , kde  $a_i$  je aktivita primární i-té složky, zjednodušeně je aktivita nahrazena koncentrací  $c_i$ ,  $pX = -\log c_i$ ). [19] [20]

## 2.5 Popis použitých surovin

Níže jsou uvedeny popisy surovin, které byly použity při pokusech v této práci.

### 2.5.1 Cement

CEM I 42,5 R - Pro zkoušení popílkových směsí byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá, který vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 197-1.

### 2.5.2 Voda

Jako záměsová voda do betonu byla použita pitná voda z vodovodního řadu v laboratoři. Pro roztoky byla použita destilovaná voda připravená v laboratoři.

### 2.5.3 Kamenivo

Kamenivo v betonu je trojfrakční a to 0-4, 4-8, 8-16.





Frakce 0-4 (písek) – je z pískovny Dobříň. Písek splňuje požadavky normy ČSN EN 12620+A1: kamenivo do betonu. V grafu níže je křivka zrnitosti.

Frakce 4-8, 8-16 (štěrk) – jsou dvě frakce přírodního drceného kameniva z lomu Zbraslav. Tyto frakce opět splňují požadavky normy EN 12620 + A1:2008 Kamenivo do betonu.

#### 2.5.4 Roztoky

- **Chlorid sodný**

Při pokusech byl použit 3 % roztok. Získaný smícháním průmyslového krystalického chloridu sodného a destilované vody.

- **Hydroxid sodný**

Dále byl použit 0.3 Molární roztok, připravený z destilované vody a hydroxidu sodného ve formě perliček. Jejich poměr v roztoku byl 12 g NaOH na 1 litr destilované vody.

- **Metyl-silikonát sodný**

Zkráceně SMS, je produkt reakce kapalného hydroxidu sodného s pryskyřičným sodným silikonem. Použití a aplikace SMS zahrnuje: odpuzovač vody; čistič pro vápence, beton a zdiva; přísada nebo povrchově aktivní látka pro nátěry. V tomto experimentu byl použit 10 % roztok. [24]

- **Nanosilika**

Zkráceně NS. V tomto experimentu byl použit koloidní roztok Levasil CB8. Levasil CB8 je alkalická vodní disperze s přibližně 50 hmotnostními procenty pevné části. Tato disperze je stabilizována sodíkem a její amorfni pevné částice oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$  nesou záporný náboj. Částice oxidu křemičitého mají hladký sférický tvar a v roztoku jsou přítomny v širokém spektru rozměrů. Roztok této disperze CB8 má podobu bílé tekutiny, o trochu viskóznější než voda. [25]

Silica	50 wt%
pH	9.5
Viscosity	8 cP
Density	4,4 g/cm <sup>3</sup>

Tabulka 4 : typické vlastnosti roztoku NS [25]

- **Kyselina Dichroman Draselný**

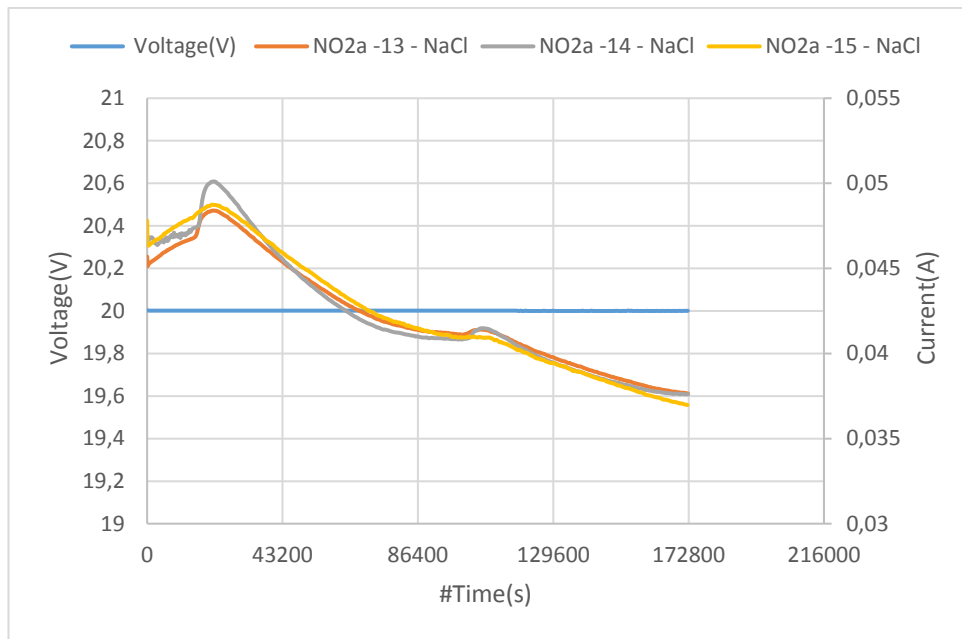
V tomto experimentu byla použita tato kyselina jako extrakční činidlo pro extrakci chloridů z betonového prachu. Přestože je tato substance karcinogenní tak je uvedena v normě AASHTO T277.

### 3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato kapitola prezentuje a srovnává výsledky prováděných zkoušek, a to měřené proudy při urychlené zkoušce a chloridové profily.

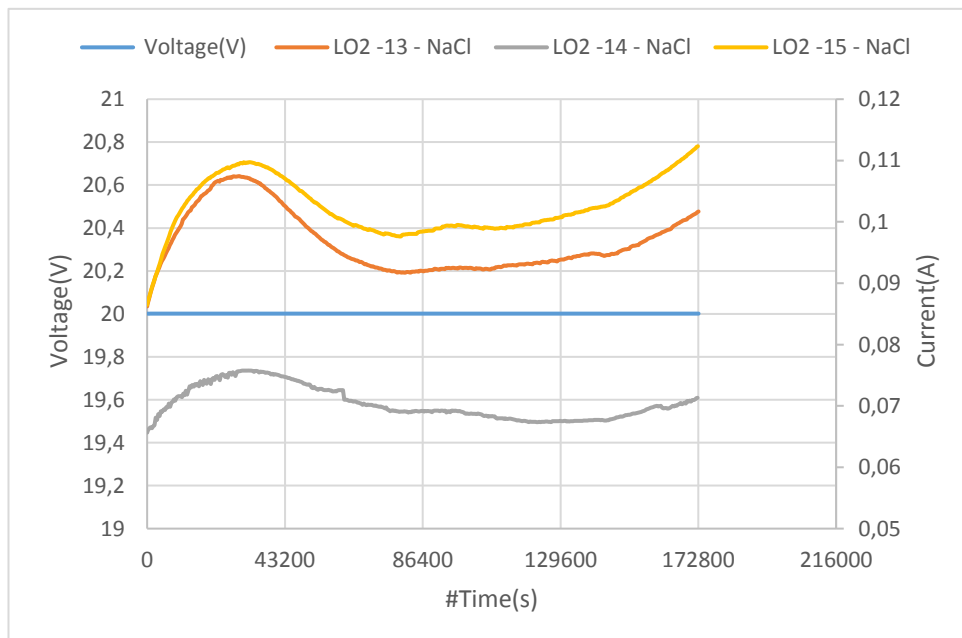
#### 3.1 Elektrický proud

Na levé ose je značeno napětí, ke kterému se váže modrá křivka. Až na minimální výchylky v rámci desetin procenta je toto napětí po celou dobu všech zkoušek konstantní a to 20 V. Na pravé ose je značen proud.



Graf 1 – El. Proud, beton-NO2a, referenční vzorky

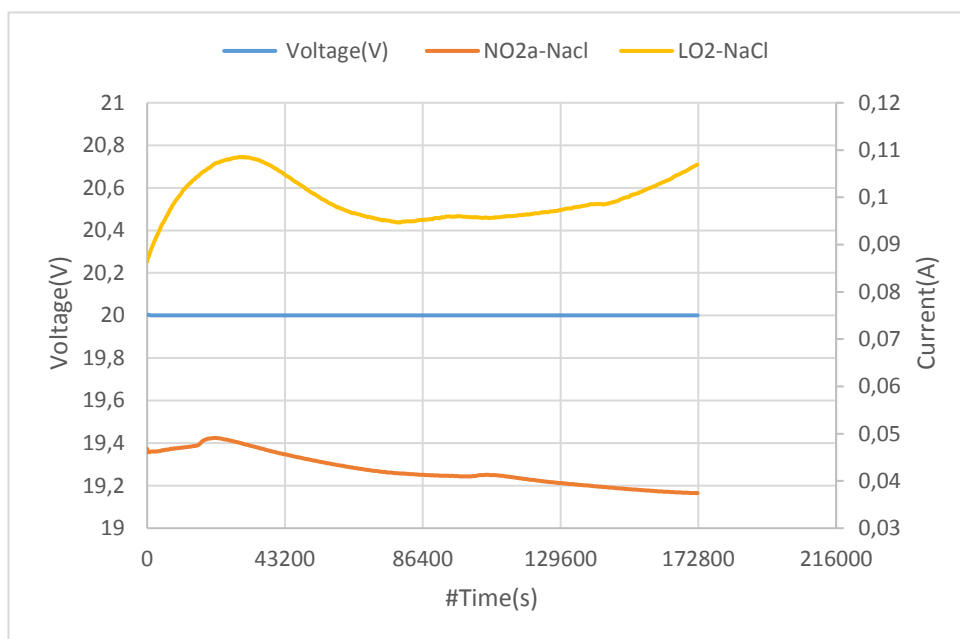
Tato zkouška proběhla v pořádku, průběhy proudů jsou takřka identické, proto také očekávám identické chloridové profily. U těchto vzorků dochází ke snižování proudu. Předpokládám, že k tomu dochází z důvodu zaplnění pórů u povrchu, které následně brání další migraci.



Graf 2 - El. Proud, beton-LO2, referenční vzorky

V tomto případě má jeden vzorek přibližně o 30 % nižší hodnoty. K tomu mohlo dojít z mnoha různých důvodů. Závady, kterých jsem si průběžně při

měřeních všiml, jsou: únik kapaliny z komory z důvodu špatného utěsnění, a velký přechodový odpor na svorce kontaktu elektrody. Z toho očekávám u vzorku LO2-14 nižší koncentrace chloridů. Ale tato presumpce není směřodátná, odvrtý jsem mohl provést z části, která zůstala ponořená v roztoku. Na rozdíl od betonu NO2 zde ke konci testu, v posledních 11-ti hodinách, zde dochází ke zvýšení proudu. Toto přikládám tomu, že pórová struktura tohoto horšího betonu nápor elektrickým proudem již nevydržela, byla poškozena a pro chloridové ionty zprůchodněna.



Graf 3 – El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2a, referenční vzorky

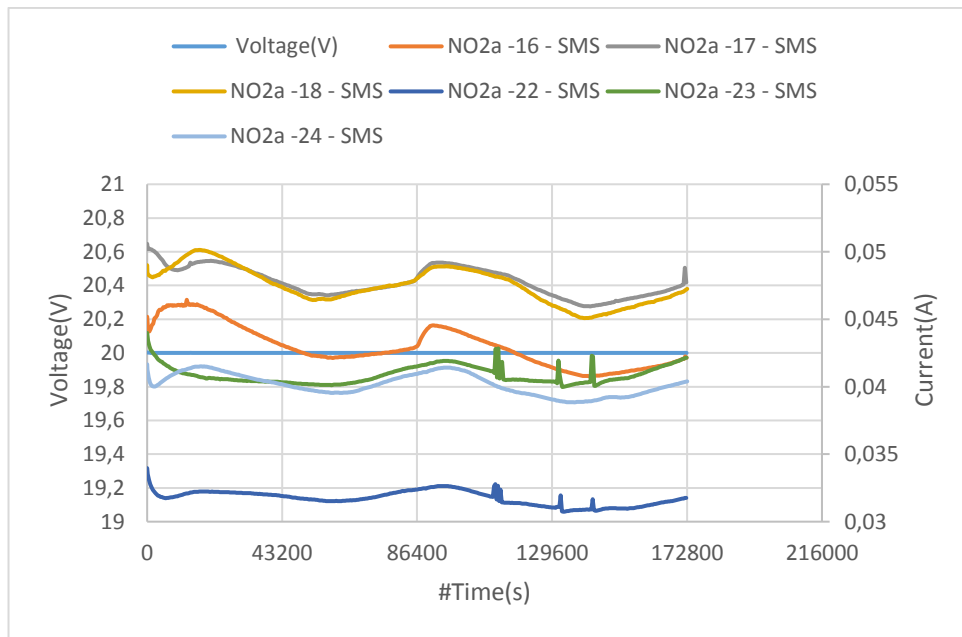
Zde jsem vzal pro porovnání průměrné hodnoty obou předchozích grafů. Beton NO2 má méně než poloviční průchozí proud. Když tyto křivky elektrického proudu integrujeme podle času. Dostaneme celkový přenesený náboj.

$$Q = \int_0^t I dt [C]$$

Z této rovnice dostaneme výsledky  $Q_{NO2} = 7305 C$ ;  $Q_{LO2} = 17179 C$ ;

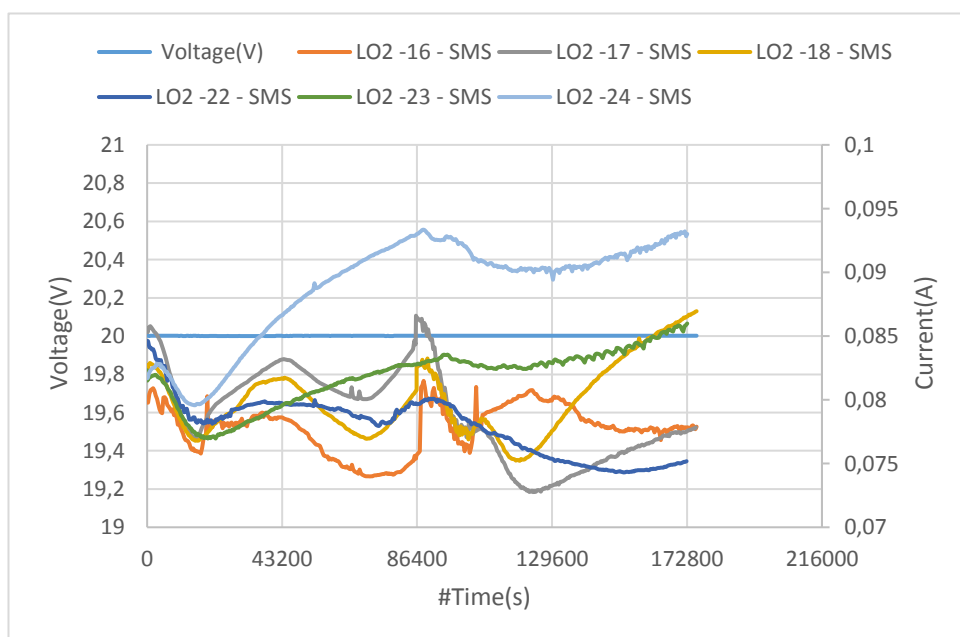
$$Q_{NO2} \approx 42 \% Q_{LO2}$$

Tento fakt potvrzuje předpoklad, že beton NO2 bude před průnikem chloridů rezistentnější.



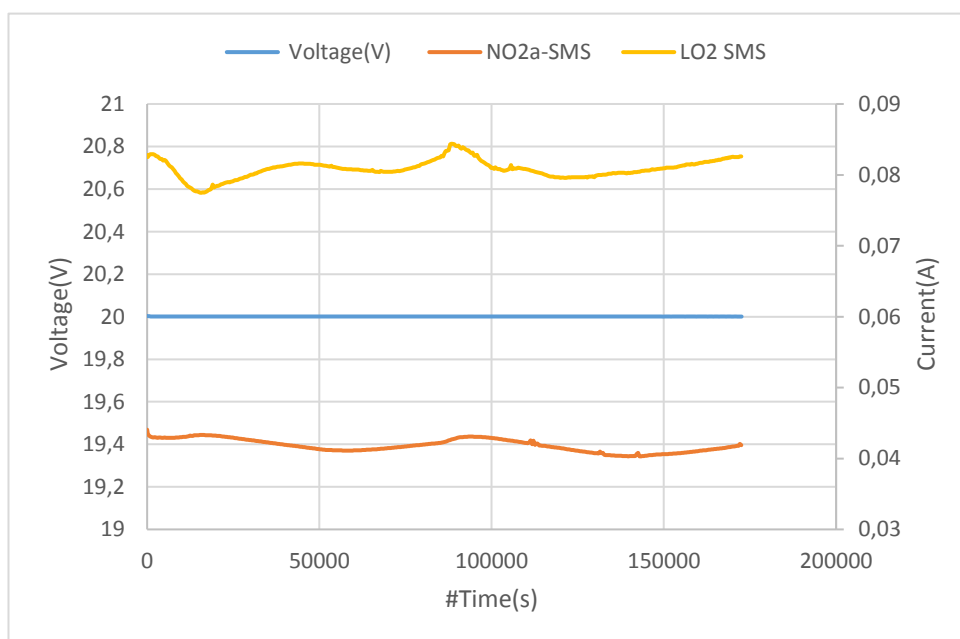
Graf 4 - El. Proud, beton-NO<sub>2</sub>a, roztok SMS

Vzhledem k faktu, že vzorky 16,17,18 (22,23,24) byly v přístroji zapojeny najednou a vždy jeden průběh proudu je výrazně nižší, předpokládám, že na jedné komoře (kanálu el. zdroje) byl systematický defekt. Ale i když tyto dvě křivky odfiltruji jako vadná data, tak mi zůstávají dvě sady křivek s hodnotami rozdílnými o  $\approx 12\%$ . Také zde není vidět předpoklad ucpávání pórů, který by vedl ke snižování el. proudu.



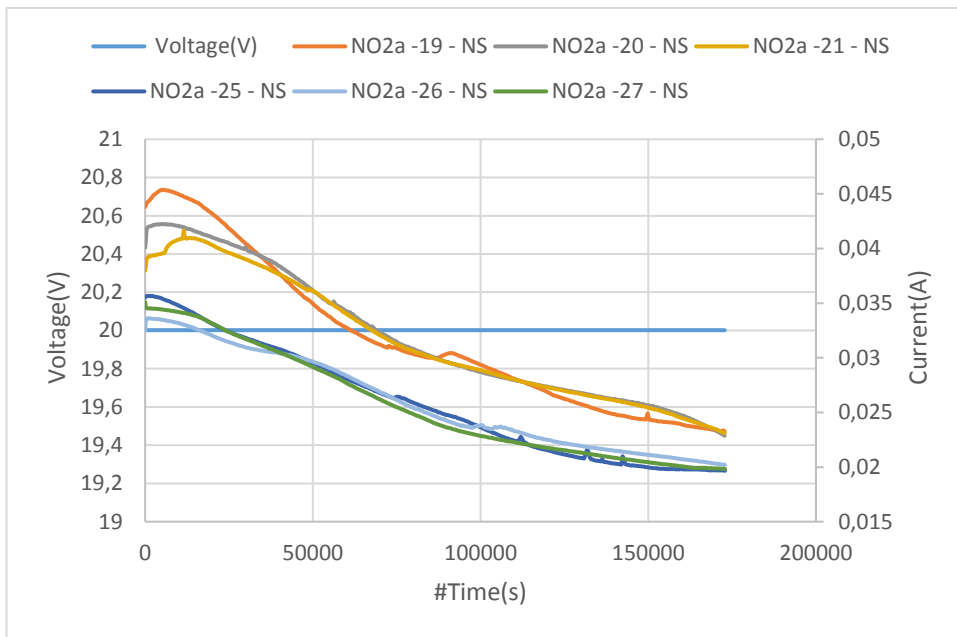
Graf 5 - El. Proud, beton-LO2, roztok SMS

Zde dostáváme vcelku konstantní data až na vzorky 23,24. U všech těchto zkušebních těles si myslím, že jde o materiálovou vadu. Jelikož vzorky nebyly vždy jednoznačně číslovány podle válce z výroby. Je možné, že tyto 2 vzorky pochází z jednoho hůře zhutněného válce. Dále je zde pozoruhodná situace, kde vzorky 16,17,18 mají 3 cykly výkyvů proudu, zatímco vzorky 22,23,24 jen 2.



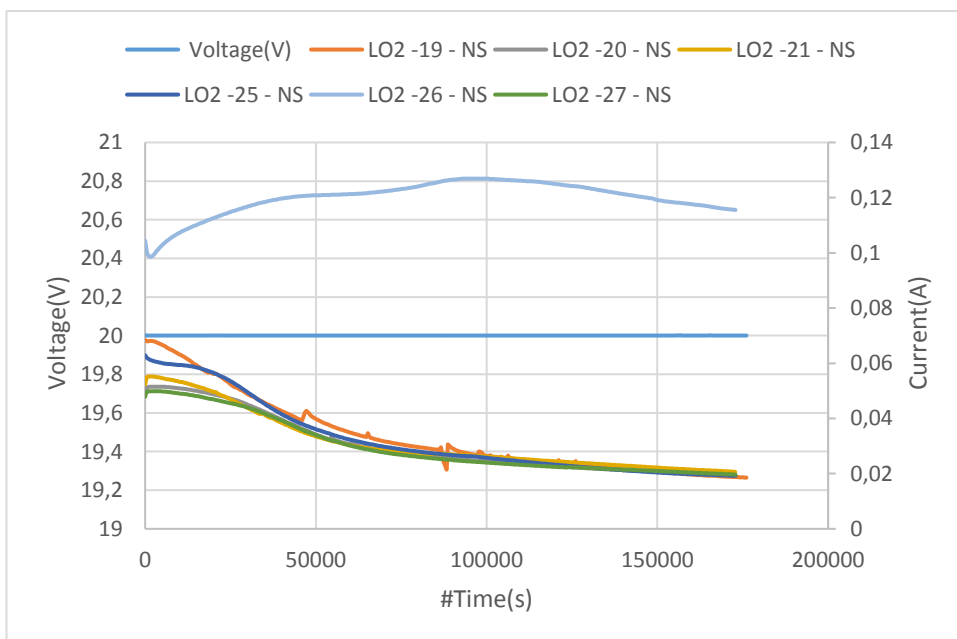
Graf 6 - El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2a, roztok SMS

Zde je opět porovnání obou druhů betonu v průměrných hodnotách. Opět se prokazuje, že beton NO2a je proti průniku iontů elektromigrací odolnější, z důvodu jeho menší porozity.



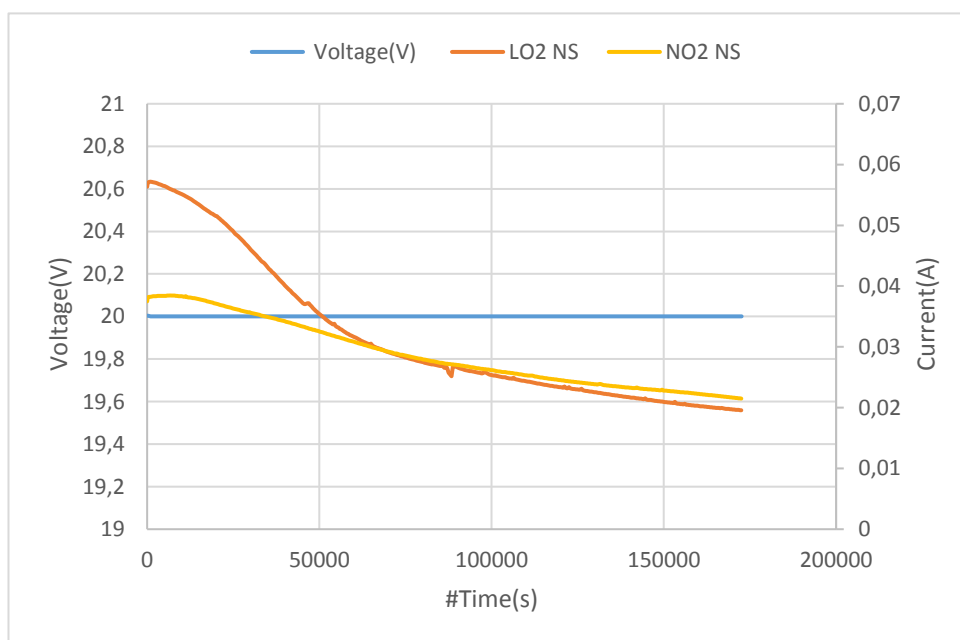
Graf 7 - El. proud, beton NO2a, roztok NS

V tomto grafu se opět objevuje sestupná tendence jako u vzorků penetrovaných roztokem soli, zde opět předpokládám ,že dochází k ucpávání pórů. Také jsou zde dvě sady křivek rozdílné přibližně o 15 %. Zde vidím dvě možné příčiny: Rozdílné zhutnění betonových vzorků nebo rozdílné vlastnosti roztoků NS.



Graf 8 - El. proud, beton LO2, roztok NS

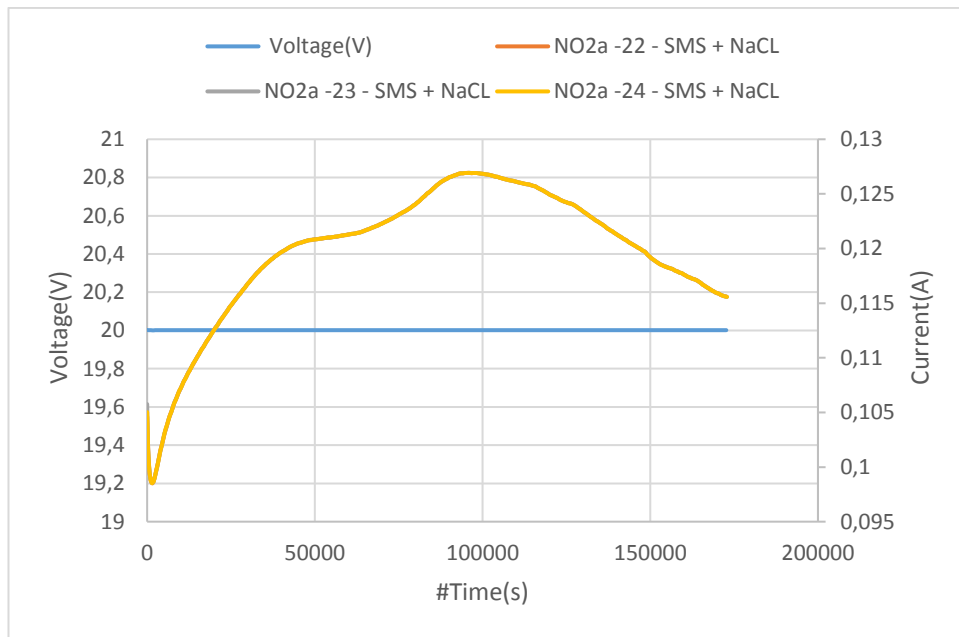
U tohoto grafu je problém s vzorkem 26. Zde předpokládám ,že došlo k netěsnosti v komoře a spojení elektrického proudu přes elektrolyty tzv. nakrátko. Tomu by odpovídal i vzestupný trend ze začátku zkoušky, kde se netěsnost průtokem kapalin zvětšuje. A pokles na konci zkoušky, když už roztoky přenesly většinu svého náboje. Zbytek vzorů potvrzuje teorii o ucpávání pórů nanočásticemi a tím následným zvýšením elektrického odporu vzorku.



Graf 9 - El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2a, roztok NS

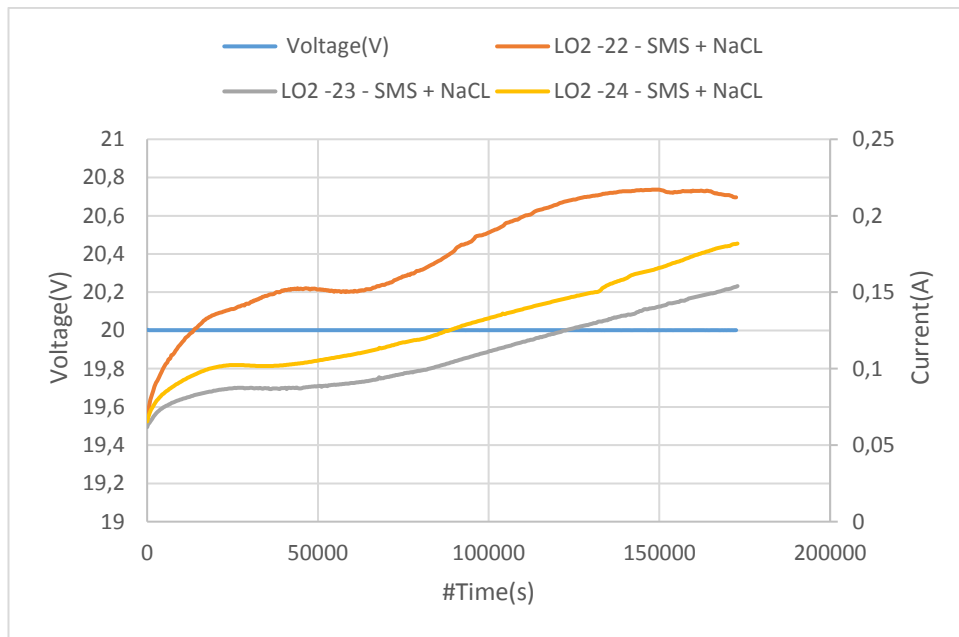
Další porovnání obou druhů betonu. Nyní vycházejí mnohem zajímavější výsledky. Počáteční proud betonu L je o 50 % vyšší, avšak v polovině testu dochází k potkání obou křivek. Jako vysvětlení se jeví ,že póry v betonu L byly dostatečně ucpány a pro zbytek testu (24 h) se jeho vlastnosti podobají betonu N.





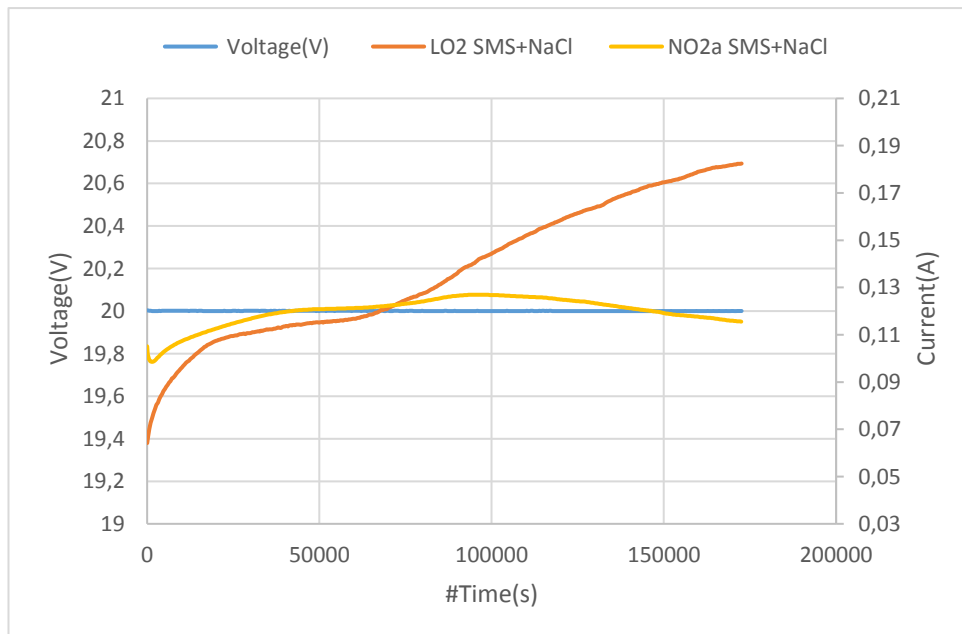
Graf 10 - El. proud, beton NO2a, roztok NaCl po ošetření SMS

Zde bohužel došlo k propsání jednoho měření do všech souborů, chybou v software počítače. Poprvé se zde objevuje vzestupný proud po většinu zkoušky. Dále má průběh proudu podobnou křivku, ve smyslu tvaru, jako u vzorků LO2 při ošetření SMS. Dále je zde procházející proud cca 3x větší než při pokusu bez ošetření. Z toho si myslím, že nabití částice roztoku SMS, které se uchytily v pórové struktuře, se dalším průchodem proudu posouvali hlouběji do betonu a tím blíže ke kladné elektrodě.



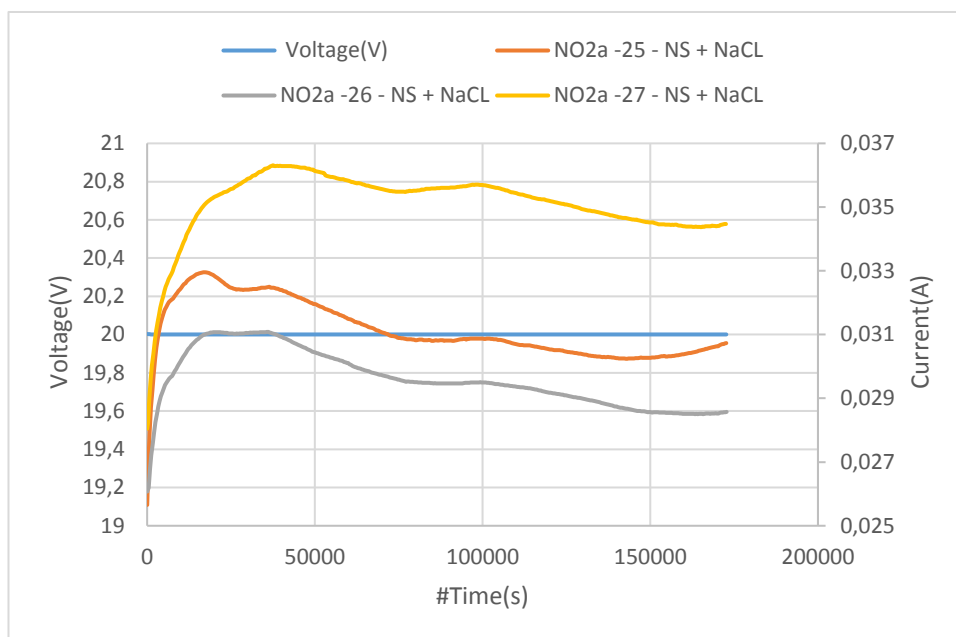
Graf 11 - El. proud, beton LO2, roztok NaCl po ošetření SMS

Zde již vychází konstantní data s rozptylem cca 15 %. Opět stoupající tendence jako u vzorků NO2a. Vzorek 22 měl při penetraci roztokem SMS nejmenší měřený proud z toho vyplývá nejméně roztoku se dostalo do struktury, a proto je nyní proud největší.



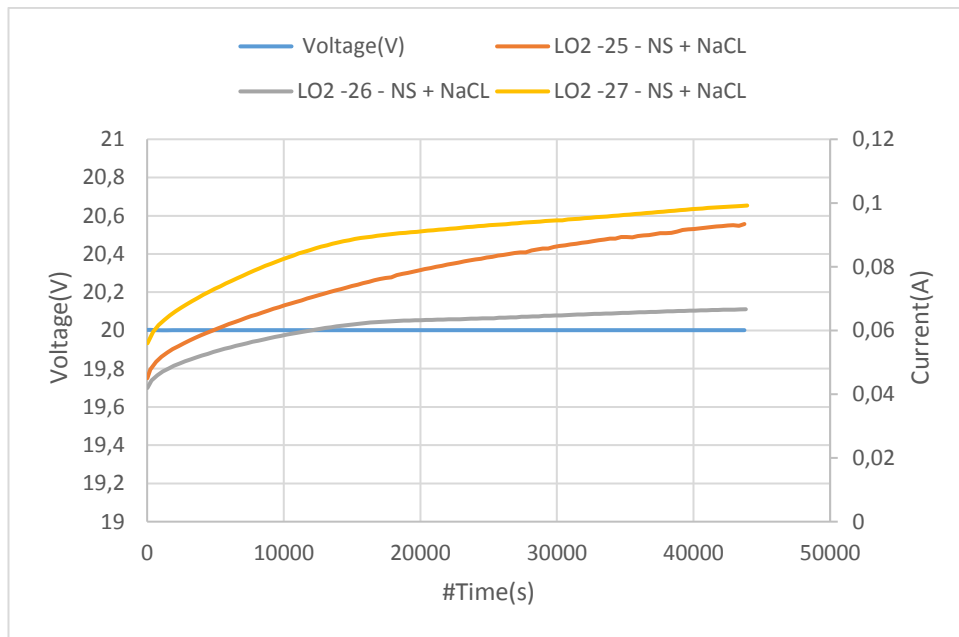
Graf 12 - El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2a, roztok NaCl po ošetření SMS

Zpočátku tohoto porovnání, beton LO2 začíná na nižších hodnotách el. proudu. Tomu přiřkládám možnost ,že se do pórů betonu LO2 zachytilo více molekul SMS, a proto se zpočátku jevil rezistentnější. Do betonu NO2a se molekuly SMS dostat nemusely z důvodu jejich složitosti a tím závislým rozměrem.



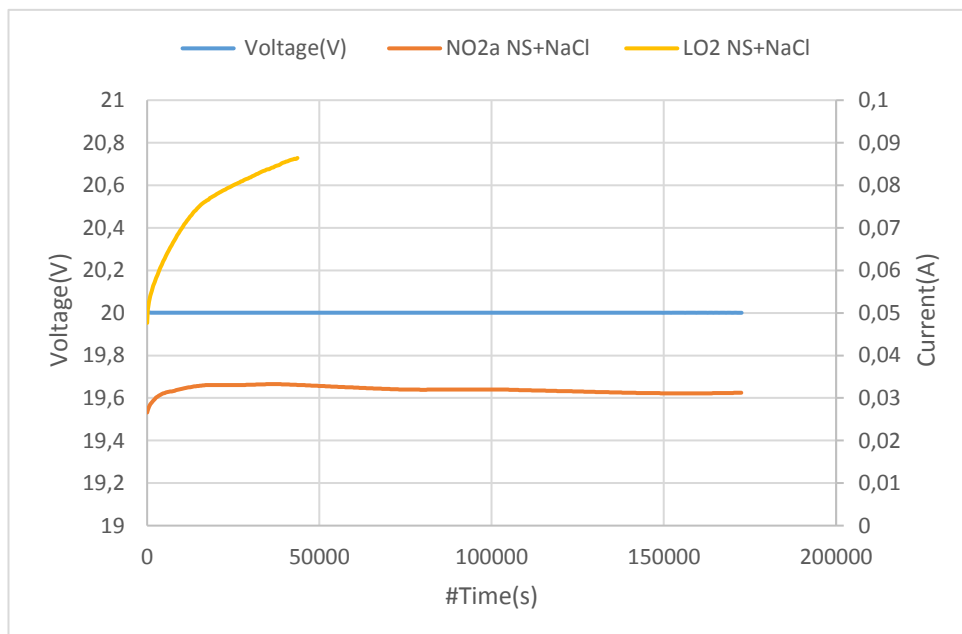
Graf 13 - El. proud, beton NO2a, roztok NaCl po ošetření NS

U těchto výsledků se opět setkáváme s vcelku konstantními daty. Jejich rozptyl je do 12 %. Po celkem krátké době asi 6-ti hodinách dochází k maximu průchozího proudu. Kdy dle mého mínění docházelo k masivnímu zaplnění zbývajících pórů ionty chlóru. A později už dochází k úpadku, když pórová struktura je plná a chloridy musejí delšími cestami do hloubky vzorku. Nicméně rozdíl maxima a minima pozdějšího proudu u jednotlivých vzorků je tak minimální, cca 3 mA ,že se dá spíše nazvat konstantním.



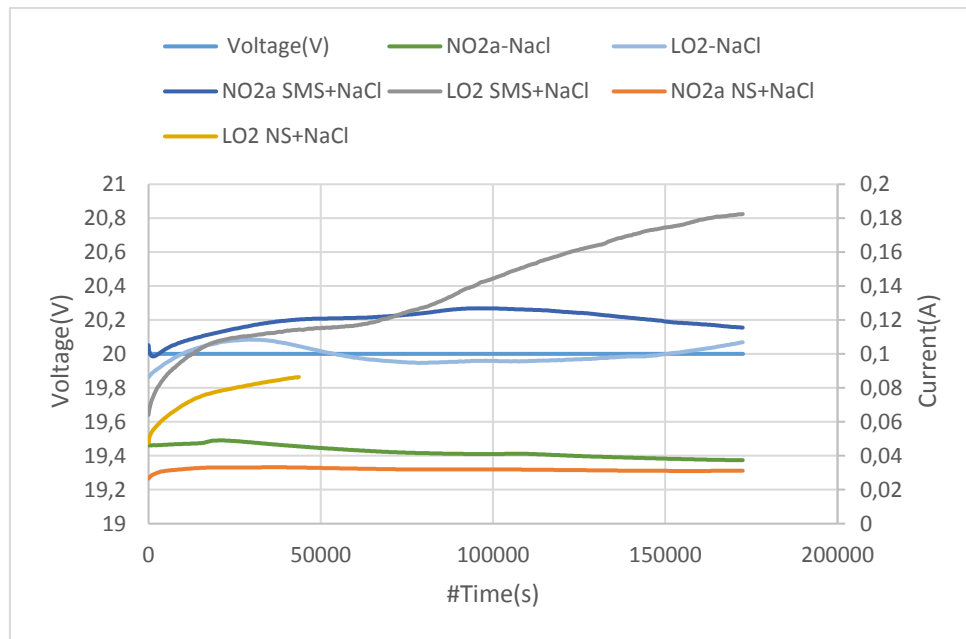
Graf 14 - El. proud, beton LO2, roztok NaCl po ošetření NS

U tohoto pokusu bohužel došlo k poškození počítače, na který byla zaznamenávána data. Bohužel z grafu nelze zjistit, zda pokus proběhl v celé době nebo jestli se zastavil při defektu počítače.



Graf 15 - El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2a, roztok NaCl po ošetření NS

Bohužel pro defekt u pokusu se vzorky LO2, zde není mnoho k porovnání. Proud u betonu NO2a je třetinový oproti betonu LO2.



Graf 16 - El. proud, porovnání betonů LO2 a NO2

Zde je kompletní rekapitulace elektrického proudu při použití roztoku chloridu sodného. U betonu NO<sub>2</sub>a došlo ke snížení proudu při ošetření roztokem NS oproti referenčním vzorkům, a proto předpokládám že NS snížila penetraci chloridů. Na druhou stranu proud po ošetření roztokem SMS ztrojnásobil oproti referenčním vzorkům. U betonu LO<sub>2</sub> opět ošetření nanosilikou snížilo průchozí proud a ošetření roztokem SMS proud zvýšilo, a to hlavně ke konci. Je tu možnost, že struktura betonu LO<sub>2</sub> nevydržela „dvojnásobný“ test a v polovině druhého testu byla zničena a kompletně penetrována chloridy.

Když opět provedu integrální výpočet jako u grafu 3, získám hodnoty:

vzorek	náboj
LO2 NaCl	17178,8
LO2 SMS NaCl	23645,3
LO2 NS NaCl	3321,144
NO2a NaCl	7304,996
NO2a SMS NaCl	20676
NO2a NS NaCl	5513,948

Tabulka 5 : Celkový přenesený náboj při elektromigraci

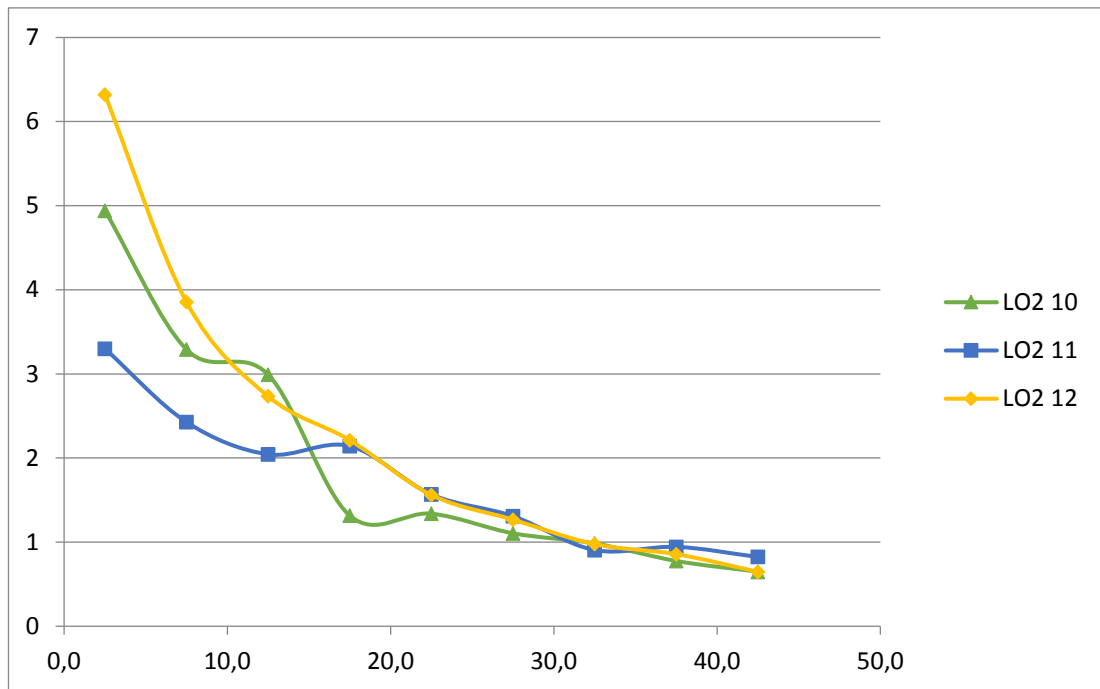


Každý iont chlóru nese přesně daný náboj, podle volných valenčních elektronů. Pro beton LO2 z toho vyplývá, že po ošetření roztokem SMS bylo přeneseno 3x více chloridů než bez ošetření. Zde docházím k závěru, že doopravdy struktura betonu dobu testu nevydržela a byla zničena. U ošetření roztokem NS se přenesený náboj zmenšil, a proto předpokládám menší koncentraci iontů chlóru v betonu. U betonu NO2a vychází výsledky podobně. Důvody, proč dochází ke zvýšení přeneseného náboje u testů s roztokem SMS, mě napadají dva. Buď je roztok SMS tak silným elektrolytem, že porézní strukturu stihl rozrušit, anebo dochází v důsledku dalšího testu (penetrace chloridu sodného) k vyplavení molekul SMS na druhé straně vzorku.

A nyní všechny moje predikce ohledně průchozích proudů a vlivu na penetraci chloridů ověříme v chloridových profilech.

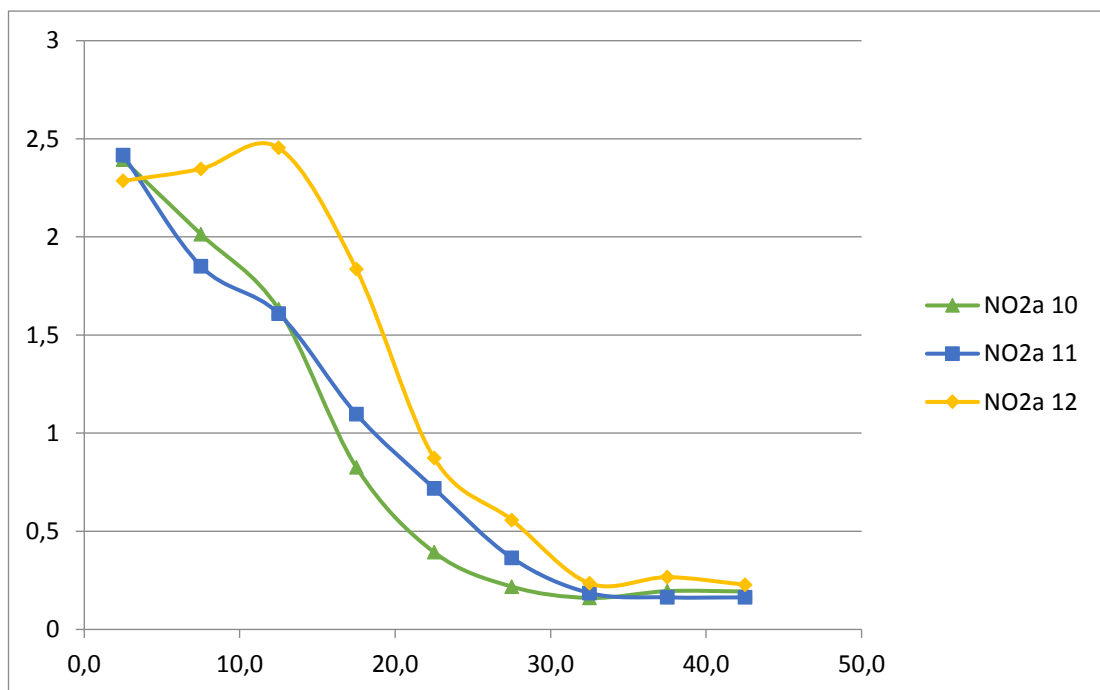
### 3.2 Chloridové profily

K níže uvedeným grafům. Na vodorovné ose je značena hloubka vzorku kde 0 mm je povrch který, byl ve styku s roztokem chloridu sodného. A 50 mm je povrch druhý. Na svislé ose je značena koncentrace iontů chloridu, a to v miligramech chloridu na gram betonu [mg/g]. Vzorky vždy obsahují materiál z 5 mm hloubek. A proto výsledky jsou v „průměrné“ hloubce 2,5; 7,5; ... ; 42,5 mm.



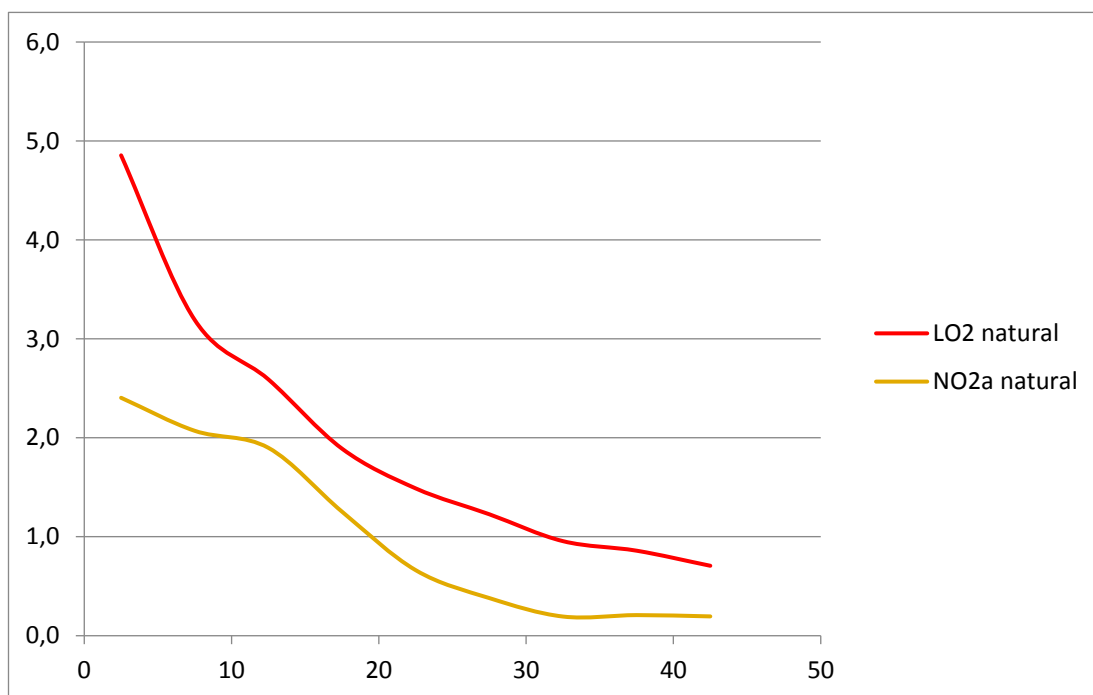
Graf 17 – Chloridové profily, Beton LO2, Přírodní difuze

Přírodní difuze bude vždy s vysokou pravděpodobností mít za křivku parabolu. Difuzní tlak při přírodní difuzi není tak veliký a v čase a hloubce se snižuje. Když vynechám první hodnoty od povrchu tak dostáváme velmi konzistentní informace, které začínají na 4mg/g a končí na 0,8 mg/g v poslední vrstvě.



Graf 18 – Chloridové profily, Beton NO2a, Přírodní difuze

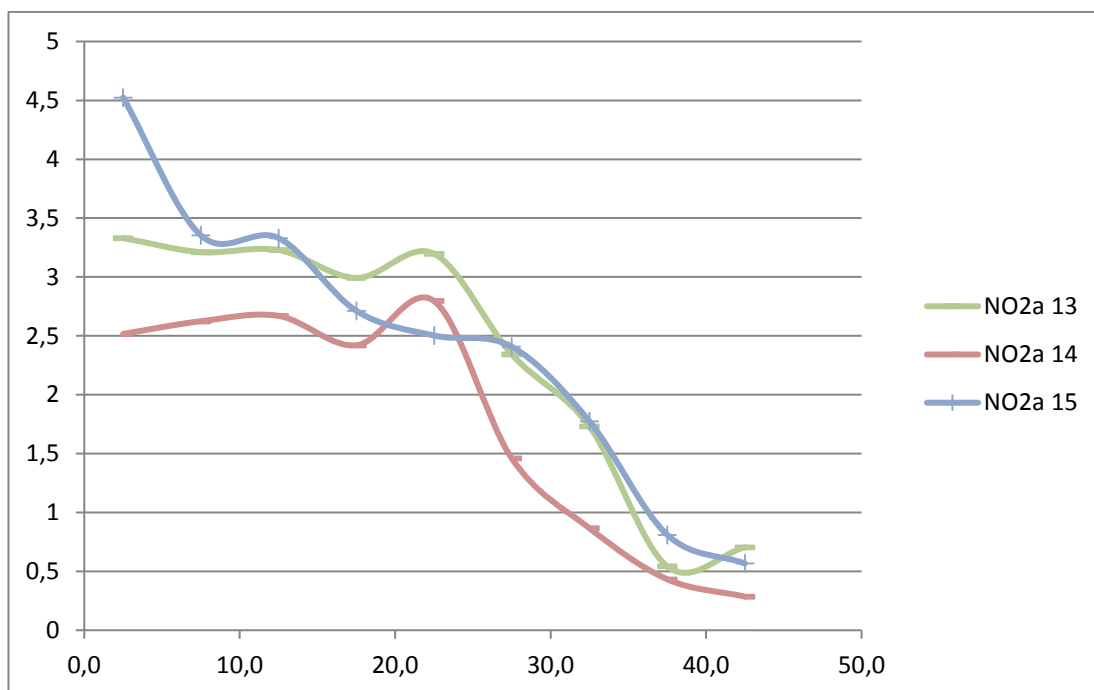
Zde u betonu NO2a vychází opět konzistentní data. Vzorek 12 má v hloubce vrtu 10-15 mm hodnoty koncentrací vyšší. K čemu tento jev přiřadit je nejednoznačné. Pravděpodobně se jedná o chybu měření která, by se větším počtem vzorků ztratila.



Graf 19 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, Přírodní difuze

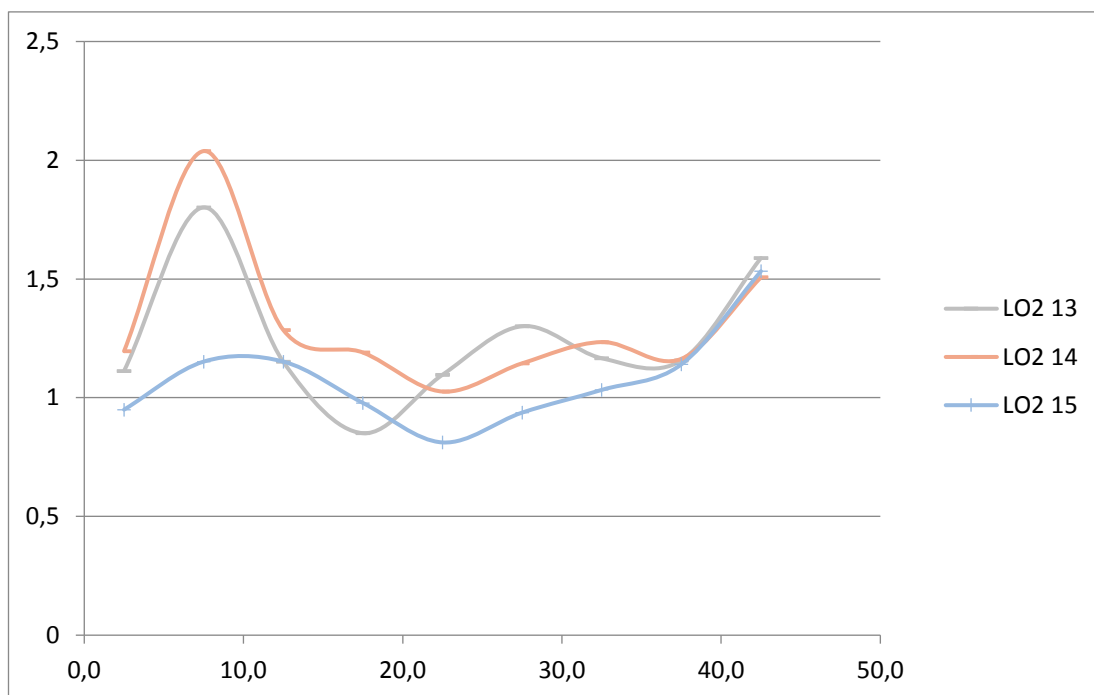
U tohoto porovnání vychází koncentrace chloridů v betonu NO2a přibližně poloviční. A jelikož oba druhy betonu byly vyrobeny ze stejných materiálů, tak by konečná koncentrace, tj. „vmíchaná“ koncentrace chloridů do čerstvé směsi z vody a kameniva, měla být stejná. Hodnota u betonu NO2a 0,2 mg/g je nejnižší ze všech měření, u nejméně drastické metody, takže se dá předpokládat, že tato koncentrace bude blízko koncentraci počáteční. Když tuto ideu rozvedeme dále a vzorek LO2 prodloužíme tak podobné „nulové“ koncentrace dostaneme okolo hloubky 70-80 mm. To by mohlo vést k závěru, že beton NO2a má 2x větší difuzní odpor než beton LO2.





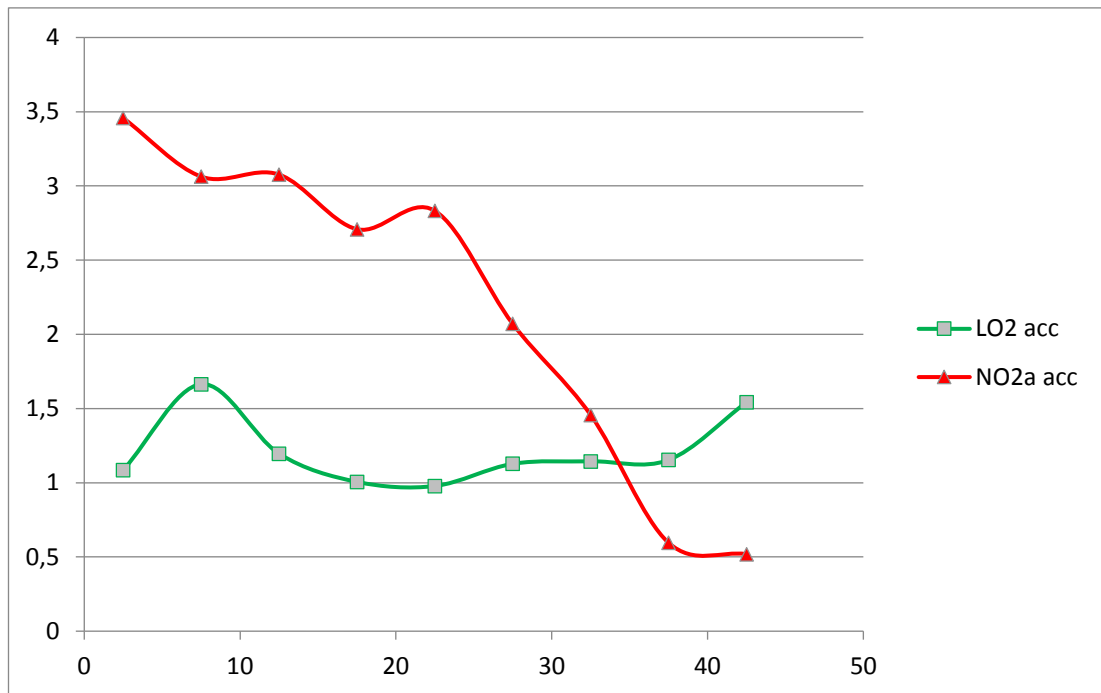
Graf 20 – Chloridové profily, Beton NO2a, Akcelerovaná zkouška

Graf z této zkoušky poukazuje na fakt, že zkouška probíhala na tento beton dlouho a celých prvních 25 mm vzorku je kompletně penetrováno chloridy. Poté již zkouška proběhla podobně jako zkouška přírodní penetrace tj. parabolou. Také to zde vypadá, že do struktury betonu NO2a se navenetruje maximálně 3,2mg/g chloridů.



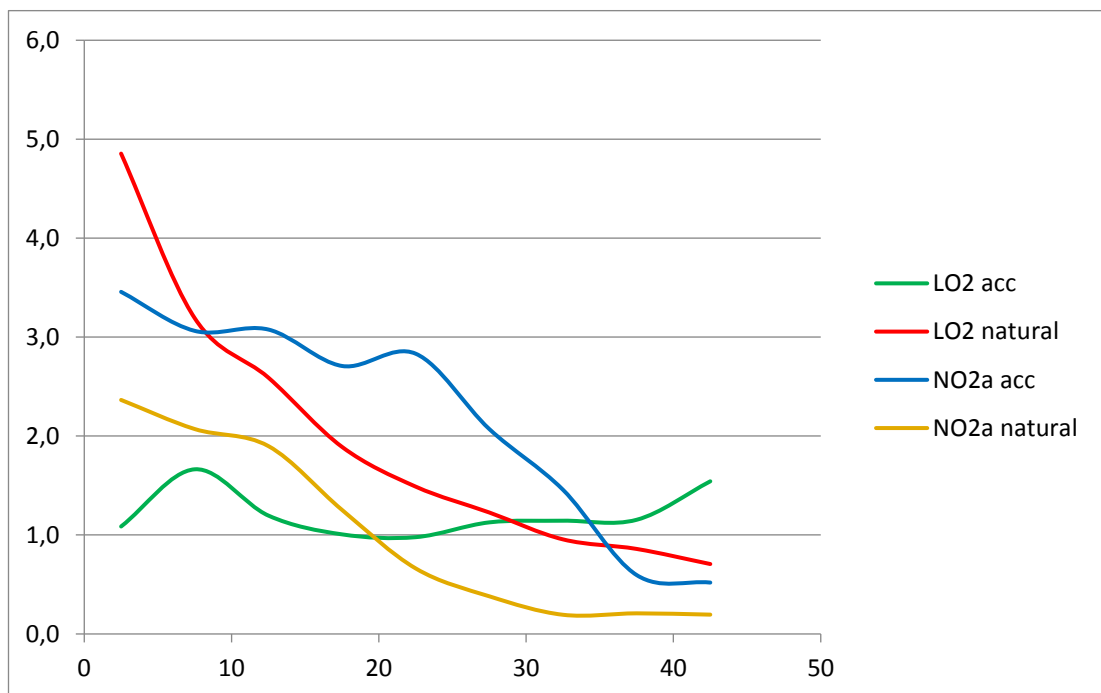
Graf 21 – Chloridové profily, Beton LO2, Akcelerovaná zkouška

Když doba zkoušky byla pro kvalitnější beton dlouhá a zaplnila jeho strukturu do poloviny, tak tato zkouška byla extrémně dlouhá pro beton LO2. Poréznější struktura by měla unést více chloridů, jak ukazuje přírodní difuze. Zde došlo k tomu, že chloridy byly protaženy celým vzorkem a vyplaveny až do druhé komory. Kdyby tomu nedošlo tak bychom měli najít koncentrace chloridů okolo 5mg/g.



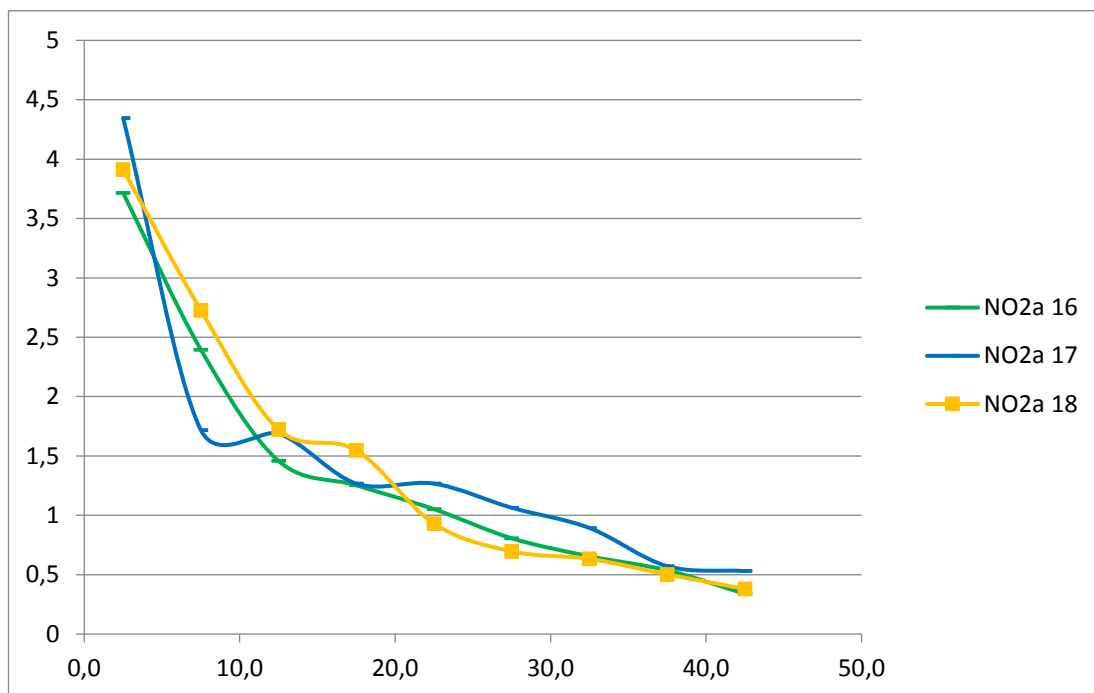
Graf 22 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, Akcelerovaná zkouška

Z tohoto grafu žádné rozumné porovnání nedostaneme ,protože beton LO2 byl kompletně chloridy naplněn. A dalším průchodem proudem vyplaven.



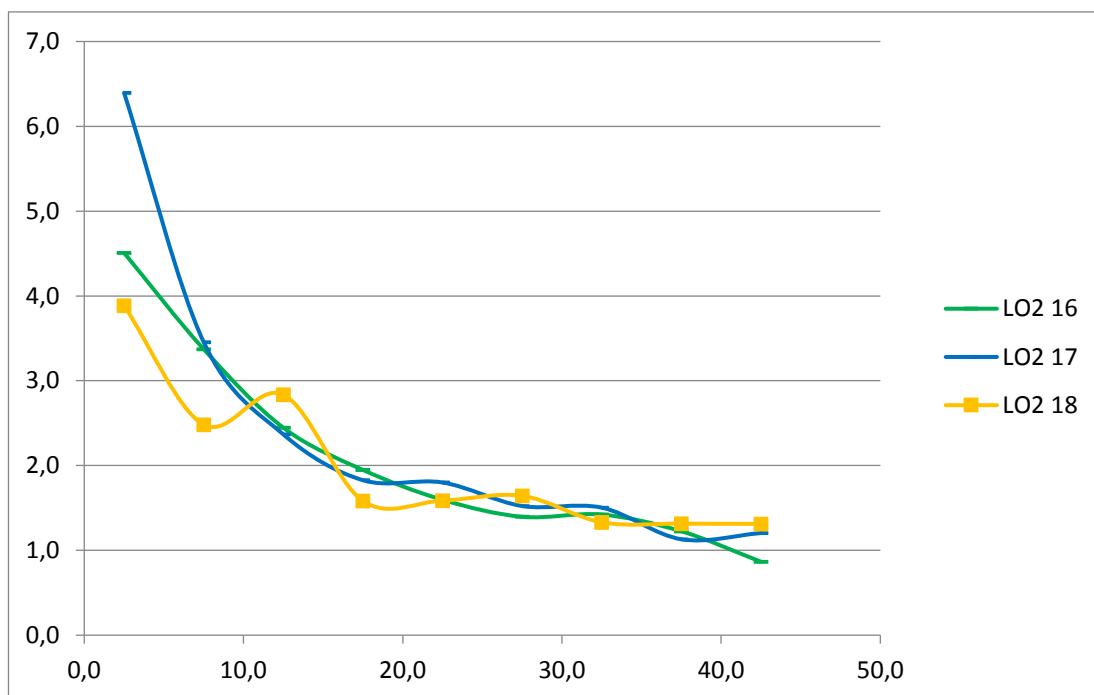
Graf 23 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, Akcelerovaná zkouška a Přírodní difuze

Původním záměrem bylo též nastavit obě zkoušky na stejnou kvalitu, tím myšleno, aby obě zkoušky přenesly stejné množství chloridů do struktury betonu. Bohužel zde vychází ,že urychlený test přenáší více chloridů než test přírodní difuze.



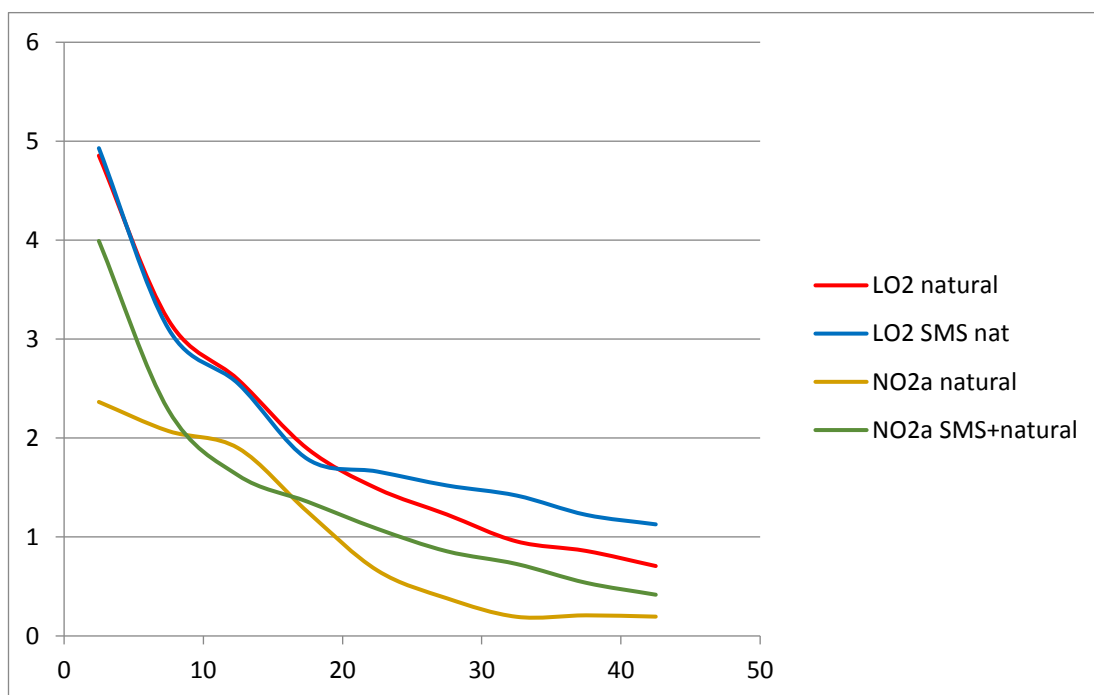
Graf 24 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok SMS, přírodní difuze

Konzistentní data bez žádných výchylek, opět je grafem parabola jak se předpokládalo.



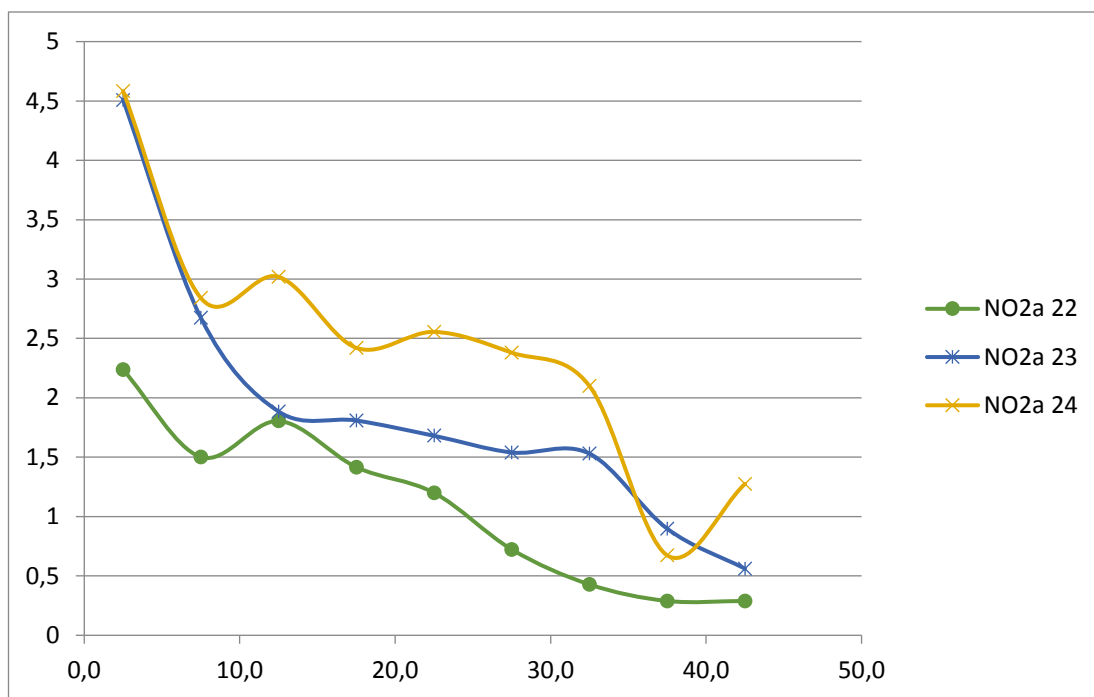
Graf 25 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok SMS, přírodní difuze

Opět konzistentní data, pouze křivka 18 je trošku rozkolísaná, pravděpodobně jsem při vrtání narazil více či méně kameniva.



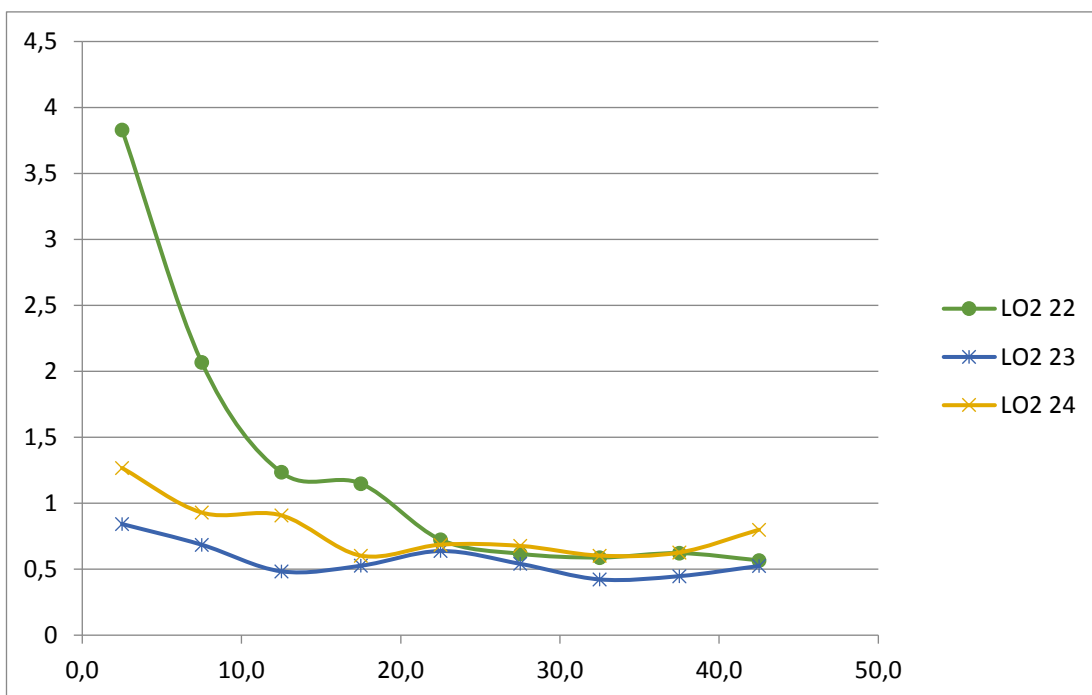
Graf 26 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS Přírodní difuze

Zde docházím k závěru ,že roztok SMS společně s působením elektrického proudu, porézni strukturu betonu více narušil, než uzavřel, potom při styku s roztokem NaCl bylo SMS vyplaveno, a proto se chloridy dostaly hlouběji do struktury.



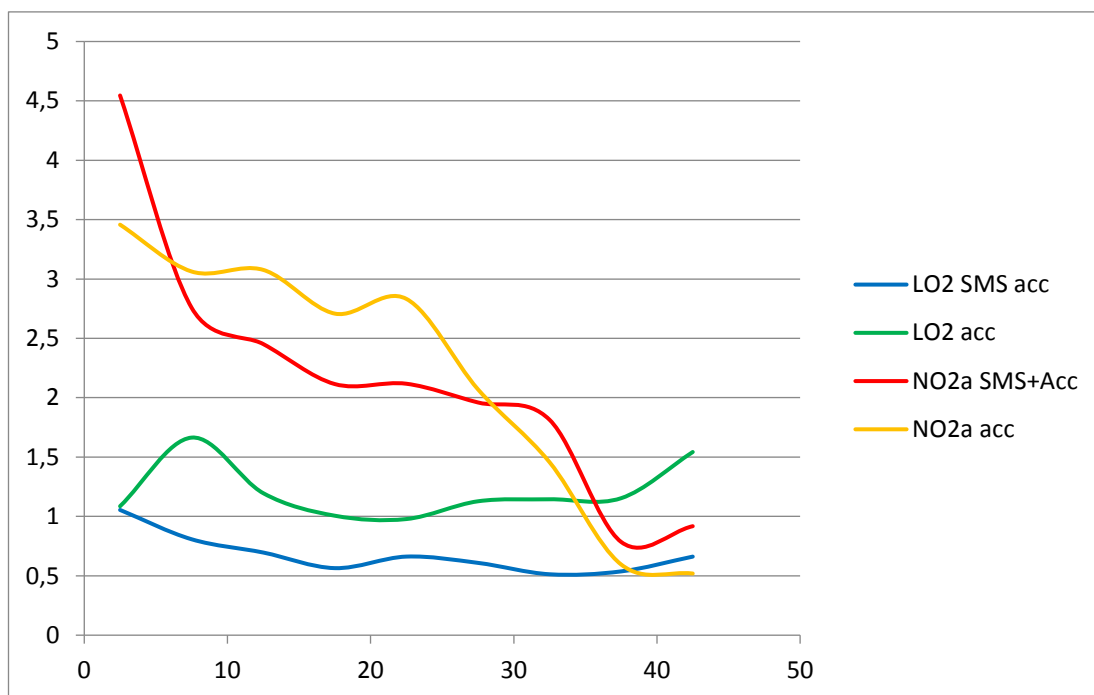
Graf 27 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok SMS, akcelerovaná zkouška

Tento graf je podobný grafu NO2a akcelerovaná zkouška, tím že opět dochází k maximálnímu zaplnění pórů do nyní až k 35 mm a dále k poklesu. Zde si myslím že první test (penetrace SMS) částečně zaplnil a částečně poškodil/zprůchodnil. A druhý test (penetrace NaCl) měl poté snazší průchod do hloubky vzorku.



Graf 28 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok SMS, akcelerovaná zkouška

Zde došlo k jednoznačnému snížení výsledků, oproti neošetřeným vzorkům. Na rozdíl oproti neošetřeným vzorkům byl vzorek 22 schopen u povrchu zachytit koncentrace podobné betonu NO2a.

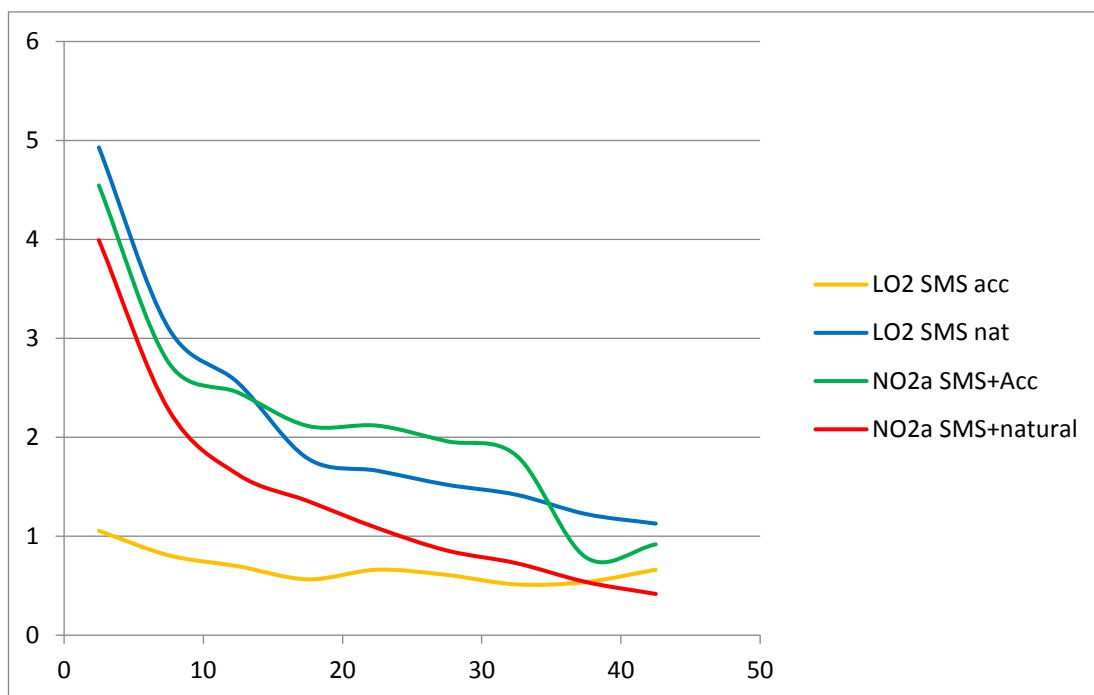


Graf 29 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS akcelerovaná zkouška

Roztok SMS rozhodně snížil koncentrace chloridů penetrovaných do betonu. U betonu NO2a bohužel plně penetrovanou zónu rozšířil. A povrchovou vrstvu u tohoto betonu proud rozrušil natolik že se objevuje koncentrace chloridů o 20 % vyšší.

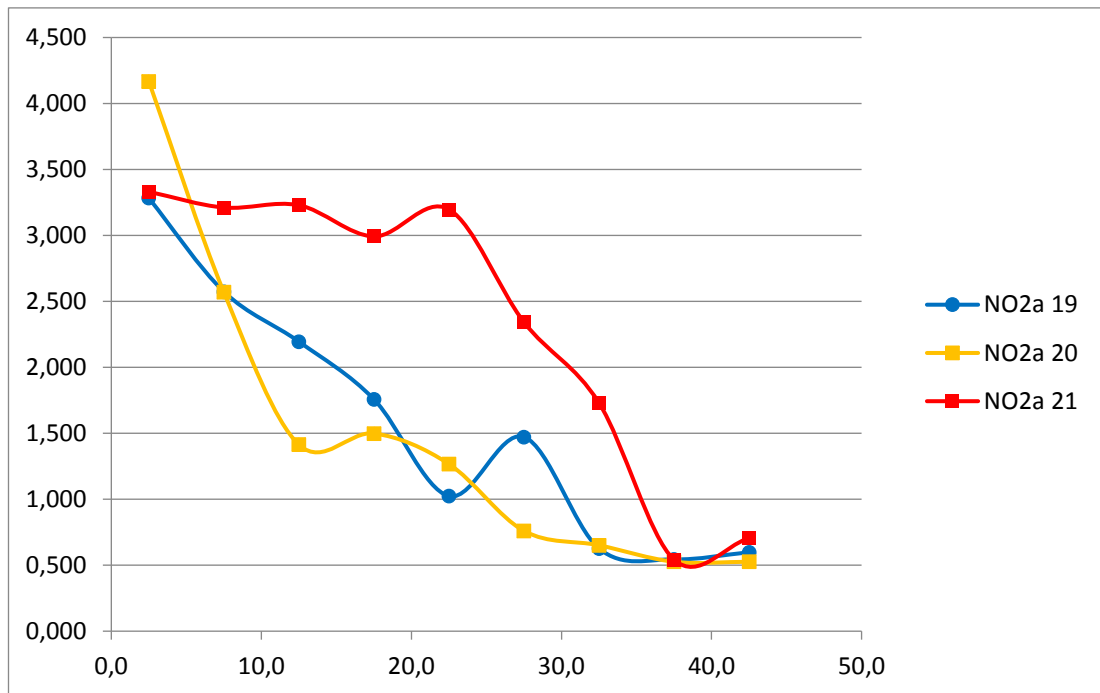
U betonu LO2 také dochází k poklesu koncentrací. Není jednoznačné zda, jsou póry po celém profilu utěsněny částicemi SMS, nebo zda celková doba zkoušky 48 h nepoškodila beton natolik, že chloridy protekly skrz vzorek až na kladnou elektrodu.





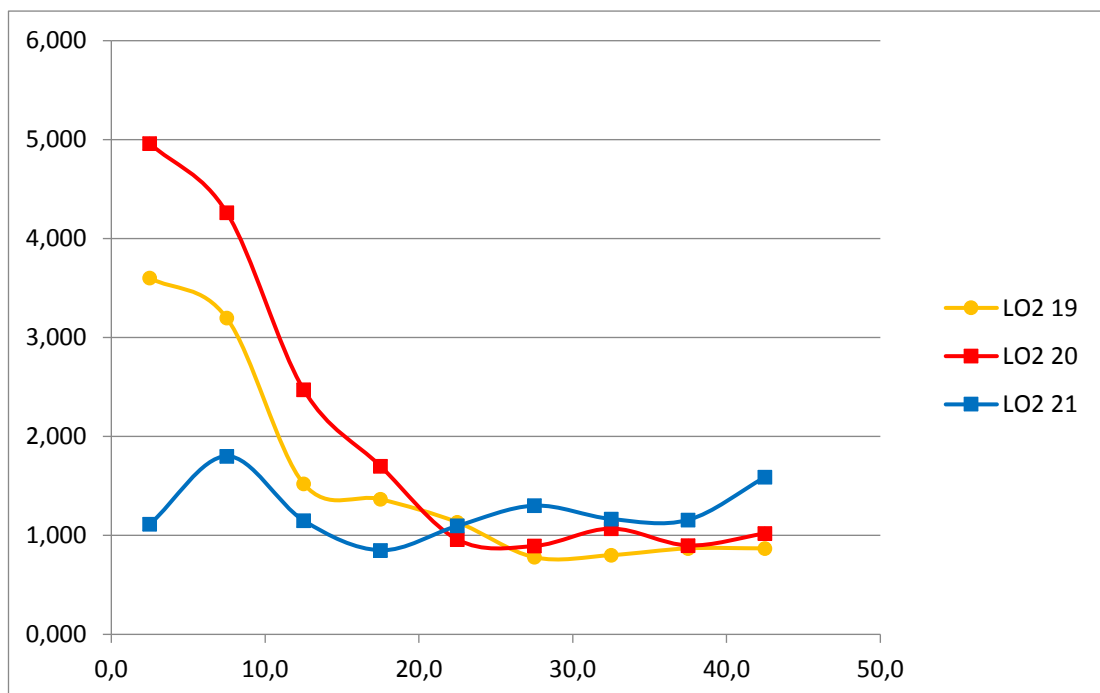
*Graf 30 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS akcelerovaná zkouška a přírodní difuze*

U betonu NO2a opět vychází, že akcelerovaná zkouška je delší/náročnější. Nicméně koncentrace chloridů už jsou si blíže než u referenčních vzorků. Vzhledem k tomu, že u těchto akcelerovaných zkoušek betonu LO2 vycházely vysoké hodnoty, tak si myslím, že doopravdy došlo k zprůchodnění pórové struktury betonu a ionty chlórů prošli vzorkem skrz.



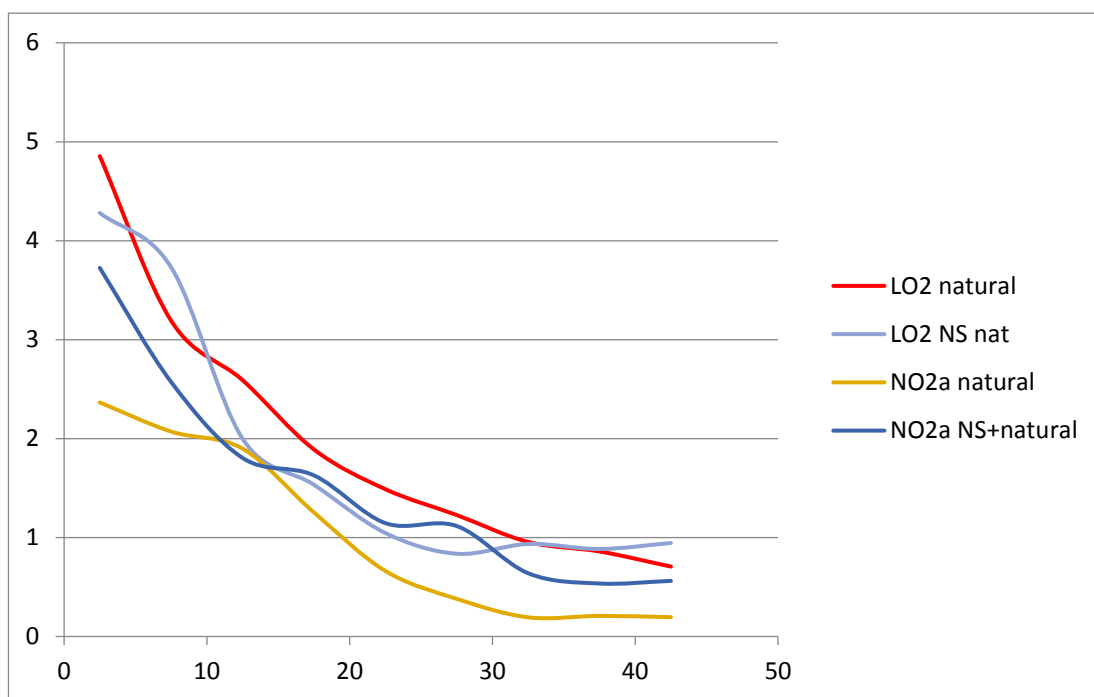
Graf 31 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok NS, přírodní difuze

Graf přírodní difuze má opět tvar paraboly až na vzorek 21. Vzhledem k tomu, že jde o přírodní difuzi, mohlo dojít k obtečení vzorku a tím pádem více směrné difuzi. A stejně jako jsou rohy budov nejchladnějšími body tak roh vzorku mohl být nejexponovanější difuzi.



Graf 32 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok NS, přírodní difuze

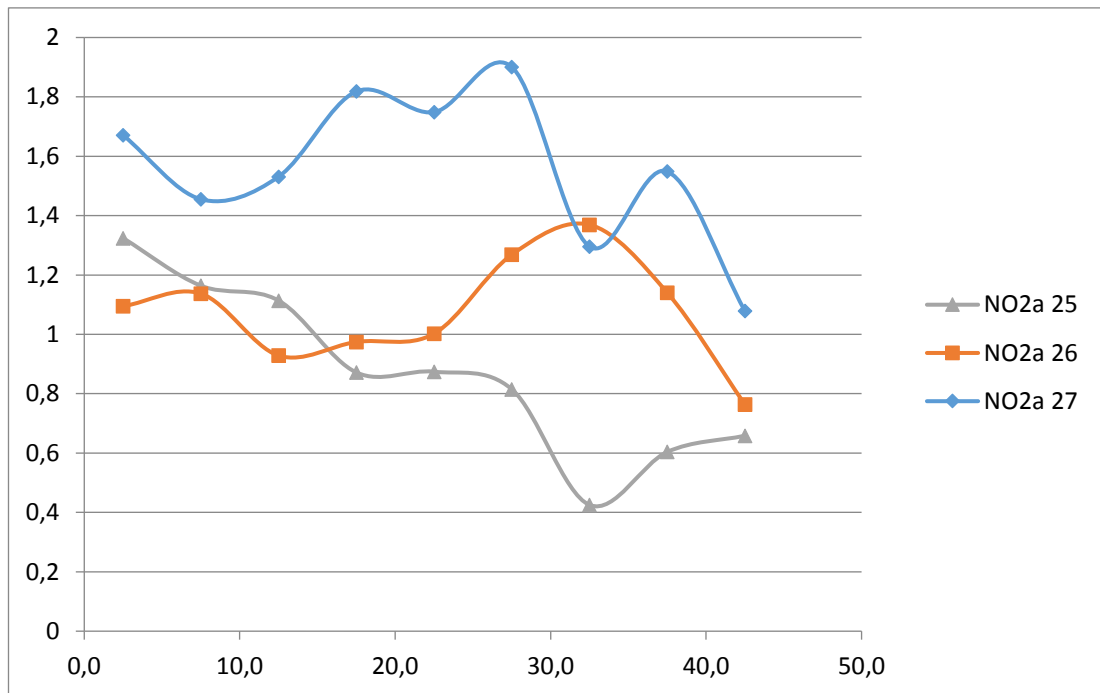
Zde je chyba u vzorku 21 v prvních dvou vrstvách. Předpokládám, že jsem odvrstal rozměrný kámen, ve kterém se žádné chloridy neuchytí. Jinak jsou grafy v jednotě s předpokladem tvaru.



Graf 33 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS přírodní difuze

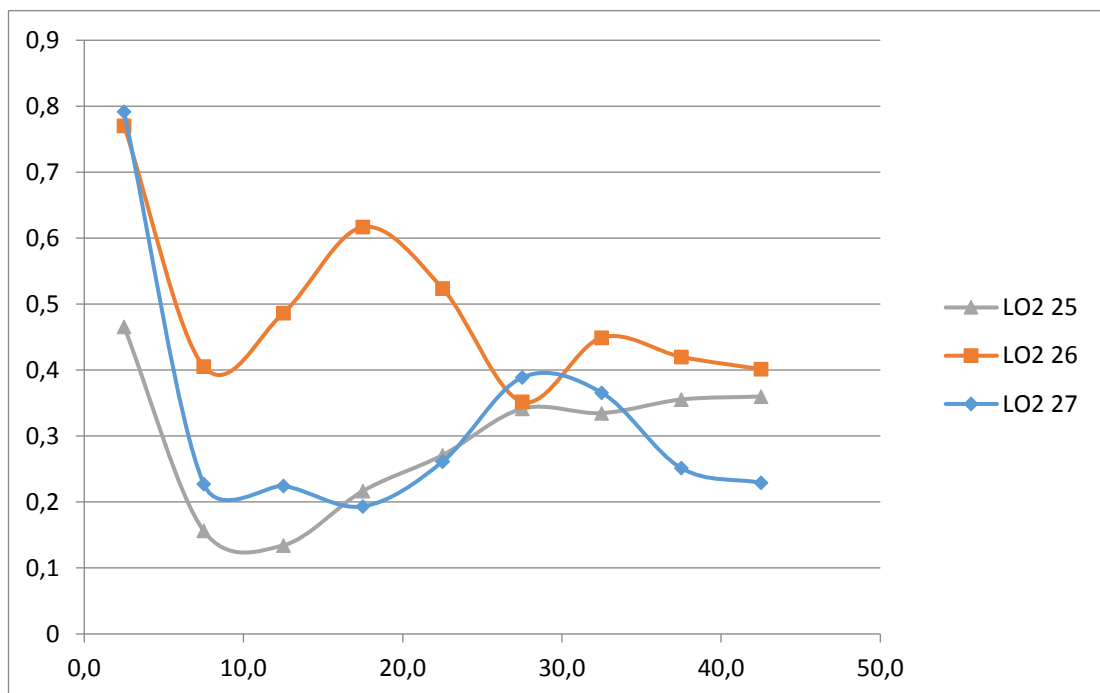
U těchto výsledků je zřejmé že roztok NS pomohl před průnikem chloridů ve střední zóně betonu LO2. U povrchu byla ochranná penetrace pravděpodobně vyplavena a v koncové zóně betonu se zase nedostaly chloridy ve značné koncentraci, aby vytvořily změnu.

Beton NO2a vykazuje zhoršení oproti referenčním vzorkům. Pravděpodobně za to mohl elektrický proud a dlouhodobé působení solného roztoku.



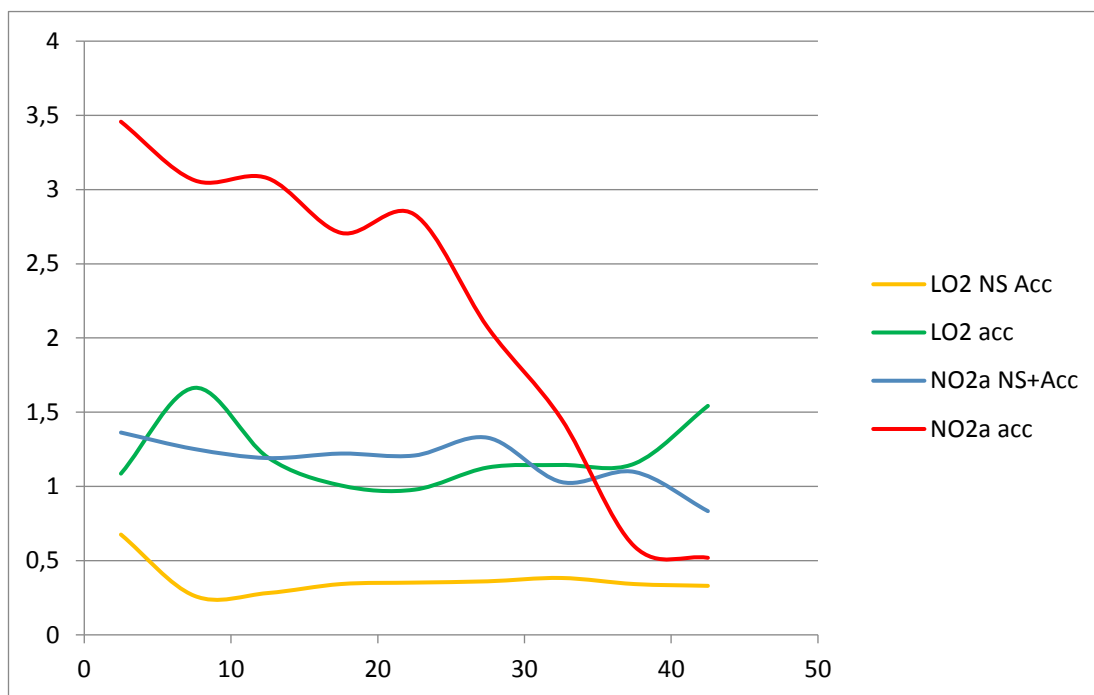
Graf 34 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok NS, akcelerovaná zkouška

Přestože tyto křivky vypadají dramaticky, tak rozmezí koncentrací leží mezi 0,6 – 1,8 mg/g a to je jednoznačné zlepšení oproti neošetřeným vzorkům.



Graf 35 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok NS, akcelerovaná zkouška

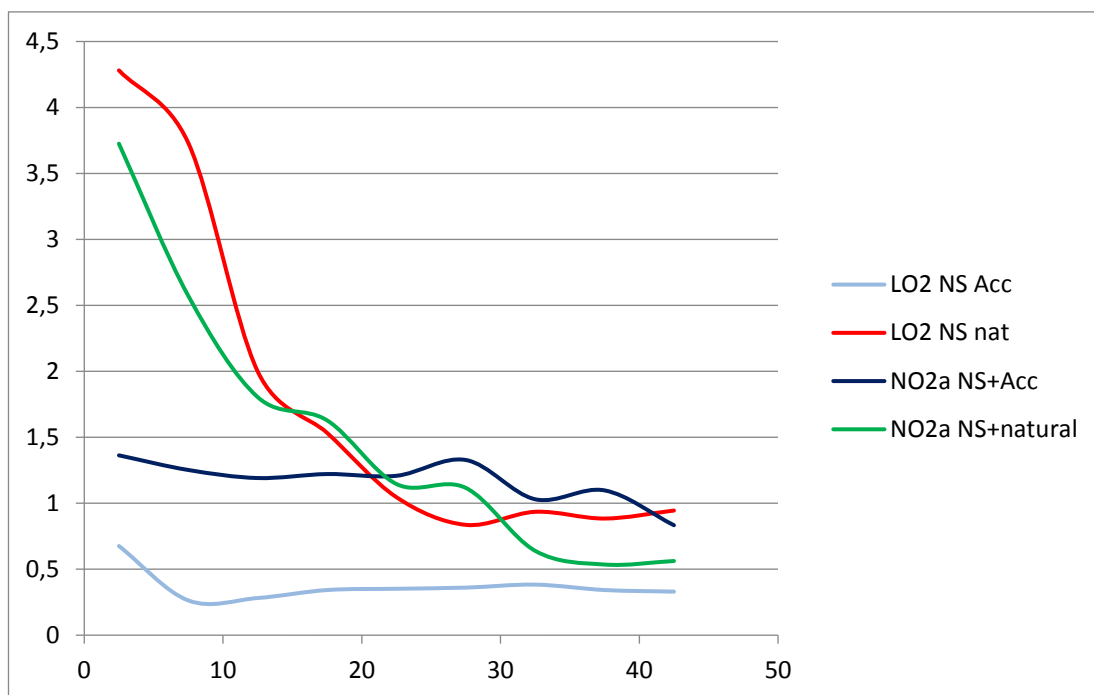
Tento opět vypadá velmi dramaticky, avšak koncentrace chloridů jsou zde opět velmi nízké.



Graf 36 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS akcelerovaná zkouška

Beton NO2a vykazuje jednoznačné zlepšení odolnosti před průnikem chloridů, a to v zóně od povrchu do středu vzorku na hodnoty 40-ti % oproti referenční křivce.

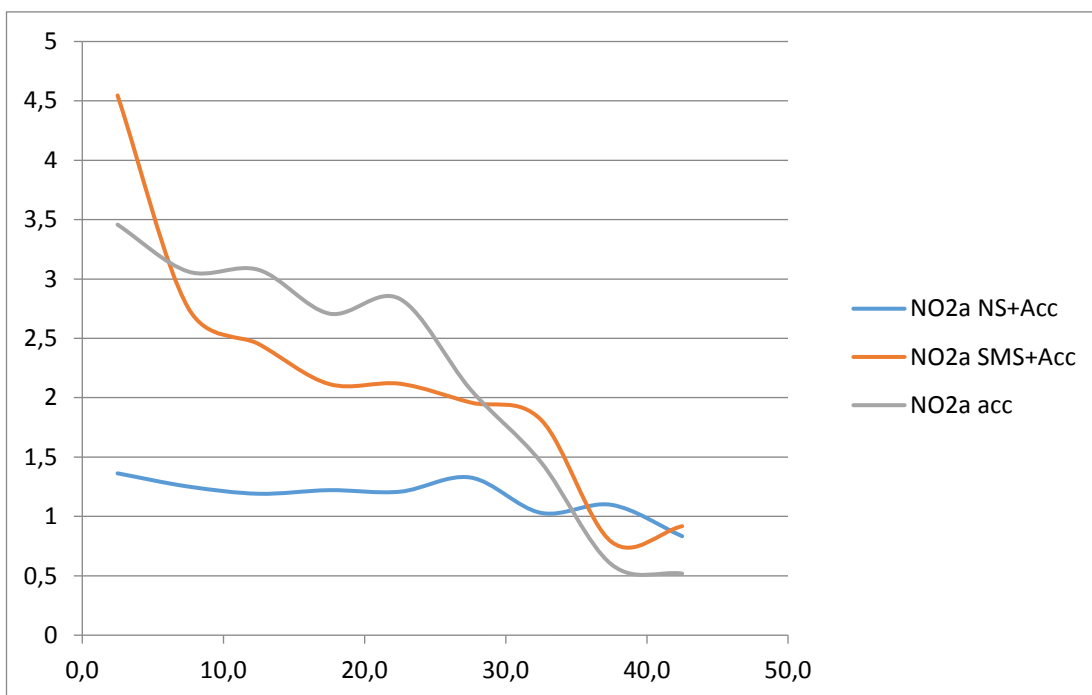
U betonu LO2 také dochází ke zlepšení, a to o více než 50 % v celém profilu. U této ochrany tvrdím že se jedná o zlepšení, protože po ukončení experimentu jsem neobjevil korozi, která by při reakci chloridů s ocelovou elektrodou nastala.



Graf 37 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS akcelerovaná zkouška a přírodní difuze

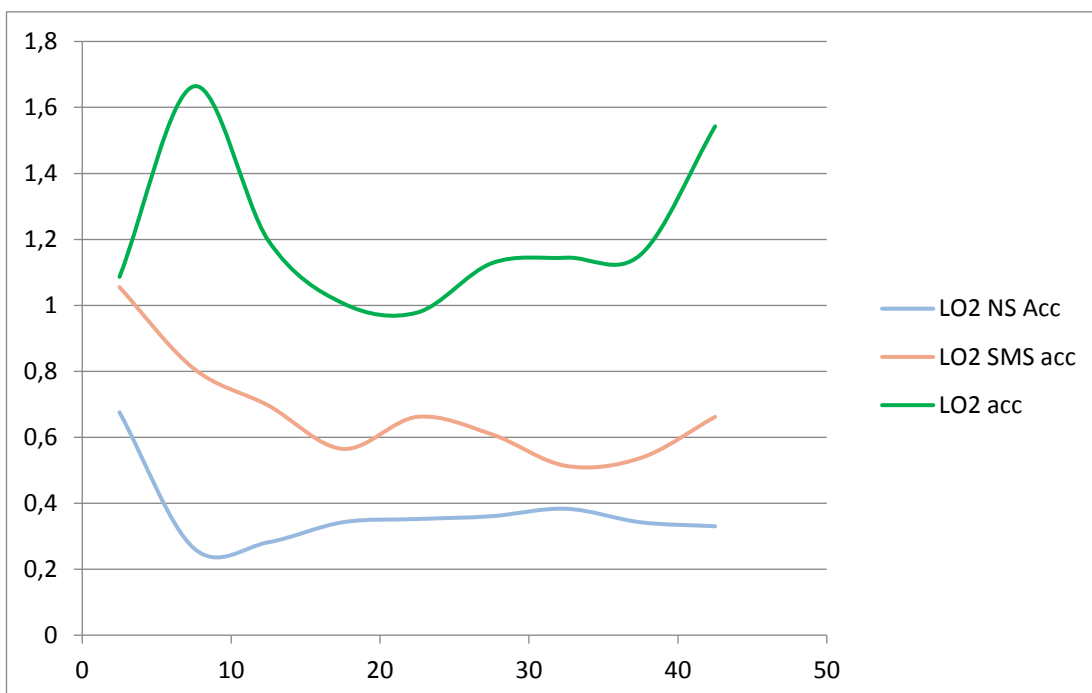
Po ošetření roztokem NS beton LO2 vykazuje, při přírodní difuzi, podobnou odolnost jako beton NO2a, hlavně ve střední hloubce. U akcelerovaných zkoušek má beton LO2 koncentrace nižší než beton druhý.

Za druhé lze tohoto grafu říci, že oba druhy zkoušek byly nastaveny moc rozdílně aby se zde dalo porovnávat.



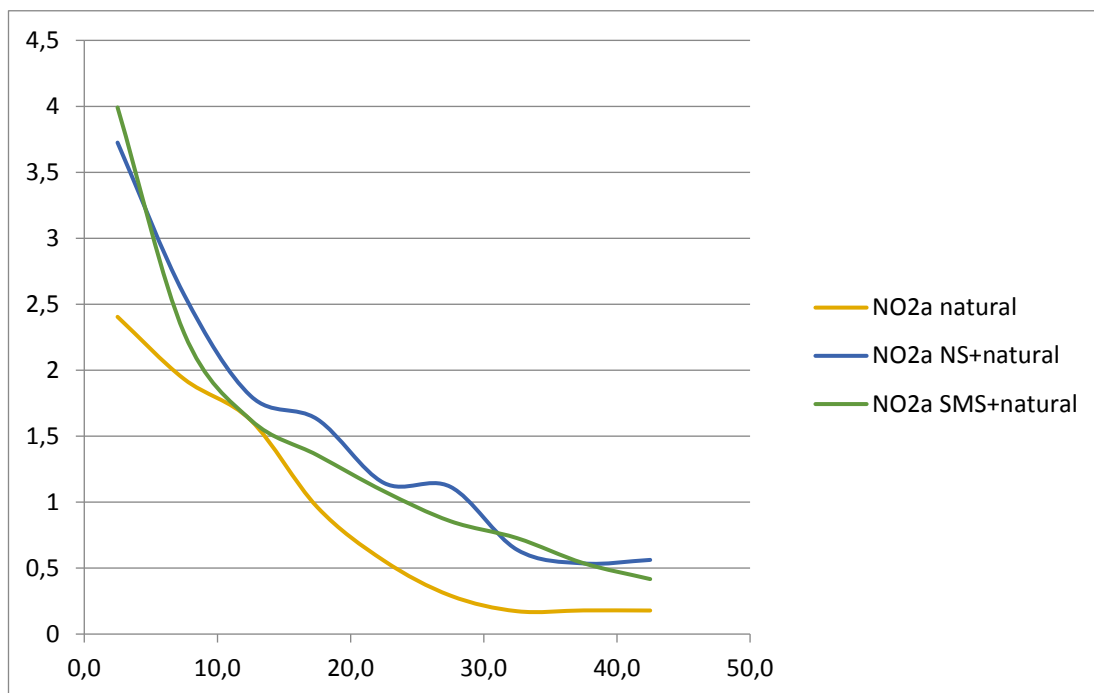
Graf 38 – Chloridové profily, porovnání Beton NO<sub>2a</sub>, akcelerovaná zkouška

Zde je konečné porovnání akcelerovaných testů. Nejhuře vychází referenční, neošetřený vzorek. Dále je ošetření SMS s hodnotami nižšími o 25 %. A nejlépe vychází ošetření roztokem NS, kde se nacházíme v 40 % hodnot přírodní difuze.



Graf 39 – Chloridové profily, porovnání Beton LO<sub>2</sub>, akcelerovaná zkouška

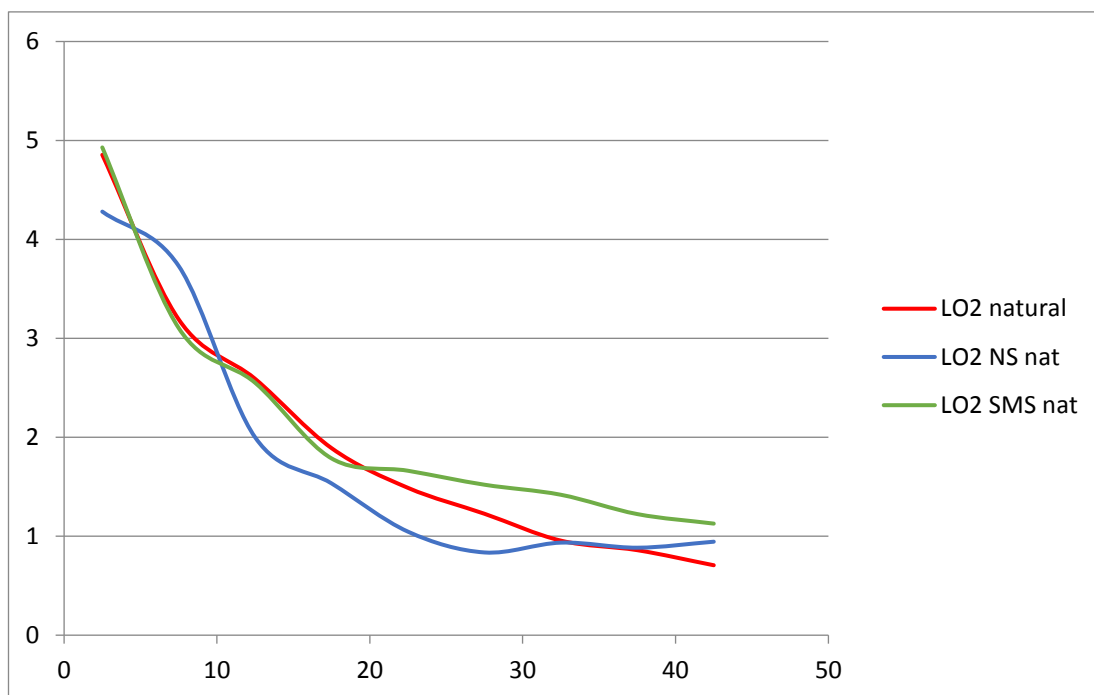
Zde se potvrzuje že akcelerovaná zkouška byla pro tento beton příliš nadhodnocená a beton chloridy nedokázal uvnitř udržet. Ale přesto jsou tu pozitivní výsledky, a to že obě možnosti ochrany snížily množství chloridu uvnitř struktury.



Graf 40 – Chloridové profily, porovnání Beton NO2a, přírodní difuze

U tohoto porovnání přírodních difuzí na betonu NO2a vychází, že ošetření nanočásticemi nefunguje.





Graf 41 – Chloridové profily, porovnání Beton LO2, přírodní difuze

U tohoto porovnání vychází že roztok NS zlepšil odolnost betonu. Zatímco roztok SMS odolnost rozhodně nezlepšil a spíše zhoršil.

### 3.3 Diskuse

Při druhém urychleném testu, se vzorky ošetřeny roztokem SMS, byl průchozí proud 2-3x vyšší oproti neošetřeným vzorkům. Pravděpodobným vysvětlením je, že částice SMS se nestaly nereaktivními tím myšleno, nevykrytalizovaly či jinak nezreagovaly. A v následném testu se opět dali elektrickým proudem do pohybu, a byly protaženy celým profilem vzorku až do další komory. Opakem tomu bude Nanosilika která „vytvrkla“ a póry zatmelila.

Nejlepších výsledků u akcelerovaných zkoušek betonu NO2a dosáhl roztok koloidní nanosiliky. Přesným opakem je to u zkoušek přírodní difuze. Předpokládám, že při krátké zkoušce (2 dny) elektromigrace, zůstaly nanočástice s pevné formě a póry efektivně ucpaly, to podporuje i mou teorii o odstavec výše. Ale u dlouhé zkoušky (150 dní) byly opět rozpuštěny do roztoku, a díky svému vlastnímu difúznímu tlaku tak vytaženy z betonu. Do této proudem poškozené struktury pak měli ionty chlóru jednodušší a „širší“ cestu. Podobně i u roztoku SMS.

## 4 ZÁVĚR

V této diplomové práci byly cíle v teoretické části: rešerše o vlivu působení koroze betonu vlivem chloridů, zejména s ohledem na solné roztoky, dále možnosti ochrany před těmito vlivy. Praktická část měla za cíl návrh experimentu ochrany betonu před průnikem chloridů, za pomoci ochrany povrchu a struktury betonu pomocí migrace iontů v elektrickém poli. A také provedení a vyhodnocení těchto testů. Tyto vytyčené cíle byly splněny.

Autor provedl rešerši degradačních vlivů betonu, zejména s ohledem na chemickou korozi. A také rešerši o ochraně beton před agresivním prostředím.

Na základě těchto informací a dostupnosti materiálu a dříve provedených projektů třetích stran, byl vytvořen experiment se dvěma druhy betonu, dvěma možnostmi ochrany a dvěma pracovními postupy. Z výsledků průchozích elektrických proudů vychází, že oba použité roztoky nanočástic lze penetrovat do betonu pomocí elektrického proudu. Dalším závěrem je, že větší přenesený náboj neznamená přímo větší koncentraci chloridů v betonu.

Z chloridových profilů jsem dospěl k závěru, že použité roztoky nanočástic mohou beton ochránit, záleží však velmi na určení okrajových podmínek zkoušek. V mém nastavení nanočástice při testu přírodní difuze odolnost betonu spíše zhoršily. Naopak u akcelerované zkoušky odolnost zlepšily.

V dalším výzkumu bude nutná optimalizace testu obzvláště pro méně kvalitní beton. Dále je v možnostech výzkumu extrakce chloridů ze struktury. Dále je pravděpodobně vhodné sledování kvalit a složení roztoků před a hlavně po zkouškách.

## 5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Specifikace Betonu ( <a href="http://www.frischbeton.cz/specifikace-betonu.php">http://www.frischbeton.cz/specifikace-betonu.php</a> ) .....	11
Obrázek 2 : Schéma poškození betonu v kapalném agresivním prostředí.....	15
Obrázek 3 : Vliv vodního součinitele na velikost pórů [23] .....	22
Obrázek 4 : Elektromigrační komora [22] .....	27
Obrázek 5 : Elektromigrační komora RCPT (AA) .....	28
Obrázek 6. Elektromigrační komora (AA).....	31
Obrázek 7 : Iontově selektivní elektroda [20].....	32

## 6 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – El. Proud, beton-NO <sub>2</sub> a, referenční vzorky .....	35
Graf 2 - El. Proud, beton-LO <sub>2</sub> , referenční vzorky .....	35
Graf 3 – El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, referenční vzorky .....	36
Graf 4 - El. Proud, beton-NO <sub>2</sub> a, roztok SMS .....	37
Graf 5 - El. Proud, beton-LO <sub>2</sub> , roztok SMS .....	38
Graf 6 - El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, roztok SMS .....	38
Graf 7 - El. proud, beton NO <sub>2</sub> a, roztok NS .....	39
Graf 8 - El. proud, beton LO <sub>2</sub> , roztok NS.....	39
Graf 9 - El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, roztok NS .....	40
Graf 10 - El. proud, beton NO <sub>2</sub> a, roztok NaCl po ošetření SMS .....	41
Graf 11 - El. proud, beton LO <sub>2</sub> , roztok NaCl po ošetření SMS.....	42
Graf 12 - El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, roztok NaCl po ošetření SMS	42
Graf 13 - El. proud, beton NO <sub>2</sub> a, roztok NaCl po ošetření NS .....	43
Graf 14 - El. proud, beton LO <sub>2</sub> , roztok NaCl po ošetření NS.....	44
Graf 15 - El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, roztok NaCl po ošetření NS ...	44
Graf 16 - El. proud, porovnání betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> .....	45
Graf 17 – Chloridové profily, Beton LO <sub>2</sub> , Přírodní difuze .....	47
Graf 18 – Chloridové profily, Beton NO <sub>2</sub> a, Přírodní difuze .....	48
Graf 19 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, Přírodní difuze.....	48
Graf 20 – Chloridové profily, Beton NO <sub>2</sub> a, Akcelerovaná zkouška .....	49
Graf 21 – Chloridové profily, Beton LO <sub>2</sub> , Akcelerovaná zkouška .....	50
Graf 22 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO <sub>2</sub> a NO <sub>2</sub> a, Akcelerovaná zkouška.....	51

Graf 23 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, Akcelerovaná zkouška a Přírodní difuze.....	51
Graf 24 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok SMS, přírodní difuze .....	52
Graf 25 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok SMS, přírodní difuze .....	53
Graf 26 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS Přírodní difuze.....	53
Graf 27 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok SMS, akcelerovaná zkouška.....	54
Graf 28 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok SMS, akcelerovaná zkouška .....	55
Graf 29 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS akcelerovaná zkouška.....	56
Graf 30 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok SMS akcelerovaná zkouška a přírodní difuze.....	57
Graf 31 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok NS, přírodní difuze .....	58
Graf 32 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok NS, přírodní difuze .....	59
Graf 33 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS přírodní difuze.....	59
Graf 34 – Chloridové profily, Beton NO2a, roztok NS, akcelerovaná zkouška.....	60
Graf 35 – Chloridové profily, Beton LO2, roztok NS, akcelerovaná zkouška .....	60
Graf 36 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS akcelerovaná zkouška.....	61
Graf 37 – Chloridové profily, Porovnání Betonů LO2 a NO2a, roztok NS akcelerovaná zkouška a přírodní difuze.....	62
Graf 38 – Chloridové profily, porovnání Beton NO2a, akcelerovaná zkouška.....	63
Graf 39 – Chloridové profily, porovnání Beton LO2, akcelerovaná zkouška .....	63
Graf 40 – Chloridové profily, porovnání Beton NO2a, přírodní difuze .....	64
Graf 41 – Chloridové profily, porovnání Beton LO2, přírodní difuze .....	65

## 7 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : Stupně namáhání obrusem .....	21
Tabulka 2 : Složení betonu.....	26
Tabulka 3 : postup práce se vzorky a jejich rozdělení .....	30
Tabulka 4 : typické vlastnosti roztoku NS [25] .....	34
Tabulka 5 : Celkový přenesený náboj při elektomigraci .....	45

## 8 ZDROJE

- [1] ČSN EN 206 +A1 (73 2403): Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2017. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [2] Alexander Steffens, Dieter Dinkler, Hermann Ahrens, Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures, In Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 6, 2002, Pages 935-941, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00728-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00728-7).  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602007287>)
- [3] Jiang, L., Lin, B., Cai, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. Cement and Concrete Research, 2000, Vol. 30, 699-702.
- [4] JANOUŠEK, Petr. VLIV OBSAHU VZDUCHU VE ZTVRDLÉM BETONU NA STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI PROVZDUŠNĚNÉHO BETONU A PEVNOST BETONU V TLAKU STANOVENOU NEDESTRUKTIVNĚ. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [5] Hudec, P.P., MacInnis, C. and Moukwa, J.M. The Effect of Microclimate on the Deterioration of Concrete Barrier Walls, Report ME-86-06, Ontario (1986)
- [6] ČSN EN 206 (73 2403): Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [7] HORÁKOVÁ, Anna. Hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje. Praha, 2017. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta stavební.
- [8] Linhua Jiang, Baoyu Lin, Yuebo Cai, A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete, In Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 5, 2000, Pages 699-702, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00227-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00227-1).  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600002271>)
- [9] WITZANY, Jiří. PDR - Poruchy, degradace a rekonstrukce. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.



- [10] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Stavební chemie : Modul 3 - Degradace stavebních materiálů a chemie kovů. 1. vyd. Brno: CERM, 2005. 48 s. ISBN 80-7204-410-9.
- [11] ŠMERDA, Zdeněk. Životnost betonových staveb. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. Technická knihnice autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902697-8-8.
- [12] COLLEPARDI, Mario. MODERNÍ BETON : THE NEW CONCRETE. 1. vydání. Praha : Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [13] ČSN 73 1322 (73 1322), *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 1969.
- [14] DOHNÁLEK, Jiří. *Vliv Mrazuvzdornosti na jeho povrchové úpravy: Beton Technologie- konstrukce - sanace*. 3. vyd. Praha: Česká betonářská společnost, 2012, 25-36 s. ISSN 12133116.
- [15] Němeček, J.; Hlaváček, P.; Kouřil, M; Jamborová, T  
ELECTROCHEMICAL INJECTION OF NANOPARTICLES INTO CONCRETE In: Proceedings of the RILEM Conference. Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016, Segment on Electrochemistry in Civil Engineering. Bagnaux: Rilem Publications s.a.r.l., 2016. pp. 81-87. Proceedings PRO 111. ISBN 978-2-35158-176-6.
- [16] Němeček, J.; Xi, Y. Electrochemical injection of nanoparticles into existing reinforced concrete structures In: Nanotechnology in Construction. New York: Springer, 2015, pp. 213-218. ISBN 978-3-319-17087-9.
- [17] Němeček, J.; Li, L.; Xi, Y. Electrokinetic nanoparticle injection for remediating leaks in oil well cement Construction and Building Materials. 2017, 156 63-72. ISSN 0950-0618.
- [18] Hlaváček, P.; Němeček, J. ACCELERATED CHLORIDE MIGRATION TESTS IN CONCRETE In: Engineering Mechanics 2016 - Book of full texts. Prague: Institute of Thermomechanics, AS CR, v.v.i., 2016. pp. 1-4. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-87012-59-8.





- [19] prof. RNDr. Ladislav Feltl, CSc., Mgr. Tomáš Feltl. *Chemie, souhrný přehled, Iontově selektivní elektrody (ISE)*, Dostupný z: [http://test.pasco.cz/sites/default/files/\\_pasco\\_elektrody-v01\\_r1-0\\_a4.pdf](http://test.pasco.cz/sites/default/files/_pasco_elektrody-v01_r1-0_a4.pdf)
- [20] J. Skopalová, M. Kotouček, P. Adamovský, *Multimediální učebnice "Výpočty z elektroanalytických metod"*, Dostupné z: <http://ach.upol.cz/ucebnice2/obsah.htm>
- [21] "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride", (T277-93), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1983
- [22] NTBUILD-492, NORDTEST METHOD: Concrete, Mortar And Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments. 1999.
- [23] DOC, ING. RUDOLF HELA, CSC, Technologie Betonu - modul 1. VUT v Brně. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ04-Technologie%20betonu%20I/technologie%20betonu%20I.pdf>
- [24] SODIUM METHYLSILICONATE, 30% in water, Safety Data Sheet, Gelest INC. dostupné z: [https://s3.amazonaws.com/gelest/sds/SIS6984.0\\_SODIUM+METHYLSILICONATE%2C+30%25+in+water\\_GHS+EU\\_English.pdf](https://s3.amazonaws.com/gelest/sds/SIS6984.0_SODIUM+METHYLSILICONATE%2C+30%25+in+water_GHS+EU_English.pdf)
- [25] LEVASIL CB8 colloidsilica, Data Sheet, AKZONOBEL N.V. dostupné z: <https://colloidsilica.akzonobel.com/construction/concrete/>