



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

PROGRESIVNÍ BEDNÍCÍ SYSTÉM S PROTIKOROZNÍ OCHRANNOU FUNKCÍ

PROGRESSIVE CLADDING SYSTEM WITH CORROSION PROTECTION FUNCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA, dr.h.c.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Marek
Název	Progresivní bednicí systém s protikorozi ochrannou funkcí
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Podklady a literatura:

1. P. Agarwal, D. Landolt, Corrosion Science, 260 (1998), 673-691
2. H-H Huang, "Electrochemical impedance spectroscopy study of strained titanium in fluoride media", Electrochimica Acta 47 (2002) 2311-2318
3. C. Gabrielli and M. Keddam, "Review of Applications of impedance and noise analysis to uniform and localized corrosion", Corrosion, Vol 40 N. 10 (1992) 794 – 811
4. M.E Orazem and B. Tribollet "Electrochemical Impedance Spectroscopy", Wiley 2008. Pp. 155-162.
5. ASTM G59, ASTM G106

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Koroze ocelové výztuže je aktuální problém, odhaduje se, že roční náklady na sanaci koroze odpovídají cca 3% HDP celosvětově. Z tohoto důvodu se v současnosti vyvíjí nové elektrochemické metody, které by byly schopny precizně identifikovat rozsah koroze. Dalším způsobem je rovněž zvýšení životnosti výztuže pomocí použití inhibitorů koroze. Předložená diplomová práce se zabývá právě problematikou inhibitorů koroze, které budou inovativně zakomponovány do různých bednicích dílců.

V rámci teoretické části diplomové práce bude provedena podrobná rešeršní analýza metod, kterými lze detekovat korozi výztuže. Pozornost bude zaměřena na metody laboratorní i při využití v praxi. Budou podrobně popsány postupy pro měření polarizačního odporu a elektrochemické impedance a závěry prací, u kterých byly dosaženy kvantitativní parametry popisující proces koroze výztuže.

V praktické části bude přistoupeno k samotnému hodnocení účinnosti vybraných migrujících inhibitorů na korozi zabudované výztuže. Za inhibitory budou vybrány migrující inhibitory na různé bázi, jejich aplikace bude v betonových, dřevocementových prefabrikovaných dílcích, resp. v hybridním bednicím dílcí tvořeném překližovanou deskou a geotextilií ve všech případech kombinovaných s vrstvou železobetonu.

Experimentální práce budou obsahovat 3 etapy:

1. Ověření migrace inhibitorů vrstvou různých druhů betonů při různých vlhkostních stavech betonové vrstvy, důkaz bude proveden několika metodami.
2. Ověření inhibičních vlastností migrujících inhibitorů koroze pomocí polarizačního měření (dvoelektrodové či tříelektrodové zapojení) a výsledné porovnání účinnosti pomocí dosažených hodnot polarizačního odporu.
3. Sledování vlivu účinnosti inhibitoru u sestav dílců (bednicí dílec/železobeton) pomocí elektrochemických či fyzikálních metod, např. měřením změny elektrického odporu, EIS či měřením poločlánkových potenciálů. Bude sledován i vliv rozdílné pevnostní třídy betonu na kinetiku korozního procesu ocelové výztuže.
4. Závěrem navrhněte vhodné bednicí dílce na různé materiálové bázi, technicky a ekonomicky vyhodnoťte a porovnejte

Předpokládaný rozsah diplomové práce je 80-100 stran vč. všech příloh.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Koroze ocelové výztuže v železobetonu je v dnešní době velký problém. Koroze výztuže má velký vliv na životnost železobetonových konstrukcí. Předmětem této práce je ověření inhibičních vlastností a účinnosti inhibitorů koroze pomocí fyzikálních a elektrochemických metod. Cílem práce je návrh bednicích dílců s protikorozní ochranou. Bednicí dílce jsou na různé materiálové bázi. Protikorozní ochrana je zajištěna použitím migrujících inhibitorů koroze.

KLÍČOVÁ SLOVA

Koroze výztuže, detekce koroze, protikorozní ochrana, inhibitor koroze, bednicí dílce.

ABSTRACT

Corrosion of reinforcement in reinforced concrete is a huge problem. Corrosion of reinforcement has a great effect on the service life of reinforced concrete structures. The subject of this work is to verify the inhibitors properties and their efficiency using physical and electrochemical methods. The aim of this work is the design of formwork panels with corrosion protection. The formwork panels are on different material basis. Corrosion protection is ensured by the use of migration corrosion inhibitors.

KEYWORDS

Reinforcement corrosion, corrosion detection, corrosion protection, corrosion inhibitor, formwork panels.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Marek *Progresivní bednicí systém s protikorozií ochrannou funkcí*. Brno, 2019. 82 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Progresivní bednicí systém s protikorozní ochrannou funkcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 30. 10. 2019

Bc. Martin Marek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Progresivní bednicí systém s protikorozní ochrannou funkcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 10. 2019

Bc. Martin Marek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu prof. Ing. Rostislavovi Drochytкови, CSc., MBA, dr.h.c. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a ochotu při zpracování diplomové práce. Zároveň bych rád poděkoval panu doc. Ing. Janovi Vaněrkovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc při zpracování tohoto tématu a v neposlední řadě patří mé poděkování panu Ing. Jaromírovi Tulkovi, CSc. za odbornou asistenci při ověřování inhibičních vlastností migrujících inhibitorů koroze.

Předložená práce byla zpracována v rámci řešení projektu MPO TRIO FV20530 „Unikátní bednicí systém s protikorozní ochrannou funkcí“.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	11
1. ÚVOD	12
2. KOROZE KOVŮ	12
2.1. Faktory ovlivňující rychlost a průběh koroze	13
2.1.1. Vnitřní faktory	13
2.1.2. Vnější faktory	14
2.2. Rozdělení koroze ocelové výztuže podle průběhu koroze	16
2.2.1. Chemická koroze	16
2.2.2. Elektrochemická koroze	16
2.2.3. Interkrystalická koroze	17
2.3. Rozdělení koroze ocelové výztuže podle charakteristických projevů	18
2.3.1. Rovnoměrná koroze	18
2.3.2. Nerovnoměrná koroze	19
3. KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V ŽELEZOBETONU	22
3.1. Koroze výztuže vlivem degradace betonu	22
3.2. Pronikání chloridů do struktury železobetonu	23
3.3. Koroze výztuže bludnými proudy	24
3.4. Koroze prvků se zabetonovanými ocelovými segmenty	25
3.5. Galvanická koroze	25
4. METODY DETEKCE KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE	26
4.1. Nedestruktivní metody	26
4.1.1. Lokalizace zabetonované výztuže	26
4.1.2. Měření poločlánkových potenciálů	26
4.1.3. Měření změny elektrického odporu výztuže	26
4.1.4. Potenciodynamická metoda	27
4.1.5. Galvanodynamická metoda	27
4.1.6. Galvanostatická metoda	27
4.1.7. Potenciostatická metoda	27
4.1.8. Stanovení polarizačního odporu	27
4.1.9. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)	28
4.1.10. Měření elektrochemického šumu	28
4.1.11. Galvanická metoda	28
4.2. Destruktivní metody	28
4.2.1. Korozní vzorky	28
5. PROTIKOROZNÍ OCHRANA OCELOVÉ VÝZTUŽE	29
5.1. Alkalická pasivace výztuže betonem	29

5.2. Katodická ochrana	29
5.3. Inhibitory koroze	29
5.3.1. Migrující inhibitory koroze (MCI)	30
5.3.2. Způsoby migrace	30
6. CÍL PRÁCE	32
7. METODIKA PRÁCE	33
8. SOUHRN JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK.....	38
8.1. ETAPA 1 – MĚŘENÍ MIGRACE INHIBITORŮ KOROZE	38
8.1.1. Výroba zkušebních dílců	38
8.1.2. Způsob zajištění vlhkostních stavů vzorků	38
8.1.3. Aplikace inhibitoru koroze	39
8.1.4. Princip metody měření migrace inhibitoru koroze	40
8.2. ETAPA 2 – OVĚŘENÍ INHIBIČNÍCH VLASTNOSTÍ MIGRUJÍCÍCH INHIBITORŮ KOROZE.....	40
8.2.1. Polarizační měření	40
8.2.2. Ponorová zkouška	41
8.3. ETAPA 3 – NÁVRH BEDNICÍCH DÍLCŮ S PROTIKOROZNÍ OCHRANOU	43
8.3.1. Formy na výrobu zkušebních dílců	43
8.3.2. Návrh sestav bednicích dílců s protikorozní ochranou.....	44
8.3.3. Aplikace migrujícího inhibitoru koroze.....	47
8.3.4. Cyklus zrychleného korozního testu	49
8.3.5. Měření elektrického odporu výztuže	49
8.4. ETAPA 4 – DLOUHODOBÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI PROTIKOROZNÍ OCHRANY NA REFERENČNÍ STAVBĚ	50
8.4.1. Návrh zkušebních stěn	50
9. VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE	55
9.1. ETAPA 1 – MĚŘENÍ MIGRACE INHIBITORŮ KOROZE	55
9.1.1. Migrace inhibitoru koroze	55
9.2. ETAPA 2 – OVĚŘENÍ INHIBIČNÍCH VLASTNOSTÍ MIGRUJÍCÍCH INHIBITORŮ KOROZE.....	57
9.2.1. Polarizační měření	57
9.2.2. Ponorová zkouška	59
9.3. ETAPA 3 – NÁVRH BEDNICÍCH DÍLCŮ S PROTIKOROZNÍ OCHRANOU	61
9.4. ETAPA 4 – DLOUHODOBÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI PROTIKOROZNÍ OCHRANY NA REFERENČNÍ STAVBĚ	70
10. CELKOVÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE	71
11. ZÁVĚR	74

12. SEZNAM LITERATURY	75
SEZNAM TABULEK	78
SEZNAM OBRÁZKŮ	80
SEZNAM GRAFŮ	82

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
MCI	Migrující inhibitor koroze
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
Δm_{kor}	Hmotnostní úbytek koroze
m_0	Hmotnost vzorku před korozní expozicí
m_e	Hmotnost vzorku po korozní expozici a odstranění korozních zplodin
S	Plocha vzorku
$\Delta m_{kor(i)}$	Korozní hmotnostní úbytek koroze po expozici v přítomnosti inhibitoru
J	Inhibiční účinnost
φ_{kor}	Korozní potenciál
j_{kor}	Korozní proudová hustota
R	Elektrický odpor

1. ÚVOD

Koroze ocelové výztuže v železobetonu je v dnešní době velký problém. Životnost železobetonových konstrukcí je závislá nejen na životnosti betonu, ale velkou roli hraje i ocelová výztuž, která tvoří kostru konstrukce a zabezpečuje veškerá tahová napětí.

Korozi ocelové výztuže je potřeba předcházet, a to už při výrobě stavebních dílců. Je nezbytné vyvíjet stavební materiály a dílce, které mají schopnost zvyšovat protikorozi ochranu.

Jedním z těchto inovativních způsobů je využití migrujících inhibitorů koroze, které jsou schopné zpomalit nebo úplně zastavit průběh koroze.

Společně s předcházením vzniku koroze je však i důležité korozi identifikovat. Z tohoto důvodu je v současnosti nutný i vývoj nových metod, kterými lze přesně identifikovat korozi a její rozsah.

2. KOROZE KOVŮ

Koroze kovů je samovolný fyzikálně-chemický proces, při němž dochází ke vzájemné interakci mezi kovovým povrchem a okolním prostředím. Koroze významně ovlivňuje vlastnosti kovu, což má za následek zhoršení funkce kovu, prostředí nebo technického systému, jehož jsou kov a prostředí složkami. Při korozi dochází k postupné deformaci kovového materiálu, která může vést až k úplnému znehodnocení materiálu.

Postupnou deformaci kovového materiálu zejména ovlivňuje druh materiálu, složení a struktura materiálu a okolní prostředí (např. tlak, teplota, záření).

Deformace se projevují vizuálními změnami (např. změna barvy, ztráta lesku), hmotnostními a rozměrovými změnami (úbytek materiálu způsobený tvorbou korozních produktů) a změnami mechanických vlastností (např. snížení pevnosti).

[1]

2.1. Faktory ovlivňující rychlost a průběh koroze

2.1.1. Vnitřní faktory

2.1.1.1. Chemická povaha a chemické složení kovů a slitin

Chemická povaha kovu je určena postavením kovu v periodickém systému. Chemické vlastnosti kovů jsou závislé na jejich atomové a molekulární struktuře a charakteru vazebných sil. Kovy se v různých prostředích chovají jinak. [2]

2.1.1.2. Vliv legur na korozní chování slitin

Výhodnější jsou homogenní struktury slitin, heterogenní struktury tvoří nežádoucí články při elektrochemické odlišnosti fází. Slitinové fáze se rozdělují na v aktivní a pasivní stav. V aktivním stavu mají legury vliv na termodynamické vlastnosti slitiny a v pasivním stavu mají legury vliv na vlastnosti pasivní vrstvy.

Při nízkém obsahu ušlechtlejší složky ve slitině může docházet k urychlení koroze (zinek s nečistotami těžkých kovů např. Cu, Pb, Hg).

Při legování jednoduše pasivovatelnými prvky (Cr, Al) dochází ke zlepšení pasivovatelnosti slitin. Legury jsou schopné měnit vlastnosti vrstev korozních produktů a pasivních vrstev, ovlivněním kinetiky růstu vrstev, rozpustnosti pasivních vrstev a kinetiky depolarizační reakce na kovu či v pasivní vrstvě. [2]

2.1.1.3. Vliv stavu povrchu kovů a slitin na jejich korozní odolnost

Slitiny s elektrochemicky heterogenními fázemi jsou méně odolné než slitiny jednofázové nebo slitiny s fázemi s podobným elektrochemickým chováním. Vliv heterogenity snižují vrstvy korozních produktů. Pokud je rozdílná hranice zrn chemicky a elektrochemicky od vnitřku zrn, dochází k růstu napadání hranic zrn s růstem velikosti zrna. Jemnozrnná struktura kovů a slitin je výhodnější.

Obecně má povrch kovů a slitin různý profil, který je daný způsobem a kvalitou zpracování. Povrchovou vrstvu je možné různou měrou deformovat.

Hladký povrch obsahuje vrstvy chemicky a strukturně rovnoměrnější a ve většině případech má vyšší odolnost proti korozi. Hladší povrch lépe odpuzuje kapaliny. Odolnost povrchu kovů a slitin se zvyšuje na základě oxidické vrstvy. Zoxidovaný povrch má vyšší odolnost proti korozi. V agresivním prostředí dochází k rychlému rozrušení povrchové vrstvy, stav povrchu ztrácí vliv. Naopak při korozi v pasivním stavu a atmosférické korozi má stav povrchu velký vliv. [2]

2.1.1.4. Vliv mechanických napětí a deformace

Vnitřní a vnější napětí zvyšují energetický obsah materiálu. V případě, že je koroze řízena chemicky, rychlost napadení roste. Napětí v některých případech způsobuje změnu charakteru korozního napadení. Povrch, který je deformovaný, se stává aktivnější než vnitřní hmota kovu. [2]

2.1.2. Vnější faktory

2.1.2.1. Chemické složení prostředí

2.1.2.1.1. Vliv koncentrace vodíkových iontů (pH)

Koncentrace vodíkových iontů ovlivňuje průběh katodické i anodické reakce a mění vlastnosti korozních zplodin, nejvíce jejich rozpustnost. Vliv vodíkových iontů může být zakryt specifickými účinky aniontů, kterými jsou komplexotvorné účinky, tvorba nerozpustných solí a pasivace kovu oxidačním účinkem aniontu. Hodnota 1 stupně pH zvyšuje potenciál vodíkové elektrody a zjednodušuje katodickou reakci vodíku i katodickou redukci kyslíku. [2]

2.1.2.1.2. Vliv přítomnosti aniontů a kationtů

Těžko rozpustné sloučeniny vytvářejí anionty SO_4^{2-} , Cl^- pro Pb, Cl^- pro Ag, F^- pro Mg, SiO_4^{2-} pro Al, OH^- , PO_4^{3-} pro Fe. Tyto nepříznivé anionty tvorbou koloidních roztoků F^- , Cl^- , Br^- , J^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3^{2-} , RCOO^- zvyšují rozpustnost korozních produktů (tzv. peptizace).

Kationty, které tvoří nerozpustné hydroxidy (např. Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) v neutrálních prostředích při kyslíkové depolarizaci podporují tvorbu nerozpustných produktů. Rychlost katodické reakce zvyšují kationty oxidačního charakteru (např. Fe^{3+}). Bodové napadení hliníku způsobují ionty těžkých kovů (např. Cu^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+}). [2]

2.1.2.1.3. Vliv koncentrace solí

Vyšší množství soli ve vodě má za následek zvýšení chemické aktivity a elektrické vodivosti roztoku a snížení přepětí anodické a katodické reakce na fázových rozhraních. Z důvodu přítomnosti aniontů se zvyšuje rozpustnost korozních produktů. Zvyšující se koncentrace solí způsobuje snížení rozpustnosti kyslíku. Pokud soli nemají oxidační vlastnosti a rychlost koroze je řízena kyslíkovou depolarizací, dochází ke snížení korozní rychlosti, i když se koncentrace solí zvyšuje. [2]

2.1.2.1.4. Vliv koncentrace kyslíku v roztoku

Při nárůstu koncentrace kyslíku dochází ke zvyšování korozní rychlosti všech technických kovů v neutrálním prostředí, za podmínky smíšené depolarizace u Fe, Al, Mg a Zn a pH 2 až 5. Na koncentraci kyslíku v kyselých prostředích závisí koroze mědi, niklu a jejich slitin, olova a cínu. Rychlost koroze u nepasivovatelných kovů lineárně roste s obsahem kyslíku v roztoku. Vliv koncentrace kyslíku je podobný vlivu obsahu oxidujících látek. [2]

2.1.2.2. Vliv teploty na korozní rychlost

Při změně teploty může docházet ke změně řídících dějů a rozpustností produktů. Například v případě, že teplota roste, obsah kyslíku se snižuje a děj je řízen kyslíkovou depolarizací, dochází ke snížení korozní rychlosti. Dalším příkladem je nárůst korozní rychlosti železa uloženého ve vodě. Při vzrůstající teplotě vody vzrůstá korozní rychlost a dosahuje maxima při teplotě okolo 70 °C a následně zase klesá. [2]

2.1.2.3. Vliv tlaku na korozní rychlost

Tlak kapalného korozního prostředí se může projevit svým mechanickým účinkem a ve spojení s korozním účinkem prostředí může urychlit některé formy strukturního napadení kovu. Významné je působení nad elektrolytem, který ovlivňuje rozpustnost plynných složek a zejména u procesů probíhajících s kyslíkovou depolarizací vede ke zvýšení koroze. [2]

2.1.2.4. Vliv pohybu prostředí

Pohyb kapalného tak plynného prostředí je velmi častým činitelem, který se při korozi uplatňuje. Urychlení transportních pochodů, jež je s ním spojeno, vede obvykle ke zvýšení koroze. Pozitivně může působit pohyb elektrolytu, jestliže je v systému nebezpečí vzniku bodového napadení, ať je to dáno charakterem materiálu nebo tím, že za klidu dochází k tvorbě usazenin na povrchu, pod nimiž může dojít k lokálnímu napadení. [2] [3]

2.2. Rozdělení koroze ocelové výztuže podle průběhu koroze

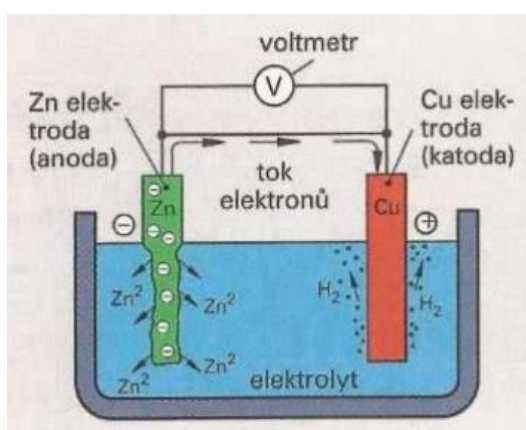
2.2.1. Chemická koroze

Chemická koroze vzniká na kovových materiálech působením chemických látek. Kov může být napaden látkami ve vodných i nevodných roztocích a plyny. Kovové materiály především podléhají působení plyných prostředí (plynné látky oxidačního nebo redukčního charakteru), zejména vzdušnému kyslíku za zvýšené teploty. Principem tohoto druhu koroze je chemická reakce plyného prostředí s kovovými i nekovovými složkami materiálu. V místě styku vzdušného kyslíku a kovového povrchu vzniká vrstva oxidů železa, které ve většině případů difundují do kovu, kde reagují s nekovovými složkami. [4] [5] [6]

2.2.2. Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze probíhá skrze elektrolyt (elektricky vodivý roztok), nedochází tedy k přímému styku kovu a korozního prostředí. Elektrolyt ve většině případů tvoří roztoky solí, kyselin a zásad ve vodném prostředí.

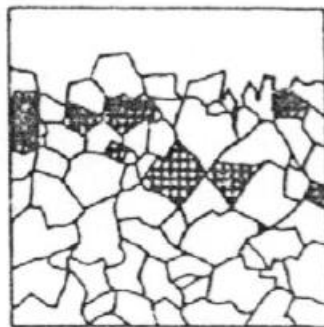
Při elektrochemické korozi dochází ke katodické a anodické reakce současně. Na anodě dochází k oxidaci kovu (ionty kovu z anody jsou převedeny do elektrolytu a elektrony setrvávají v kovu) a na katodě dochází k redukci kyslíku (vodík se vylučuje do elektrolytu a elektrony se spotřebovávají). Příkladem elektrochemické koroze je galvanický článek. [7] [8] [9] [10]



Obrázek 1: Elektrochemická koroze [7]

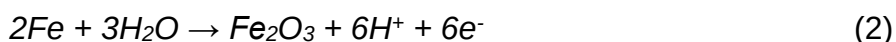
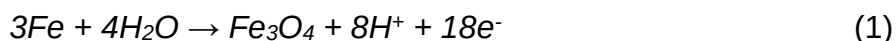
2.2.3. Interkrystalická koroze

Interkrystalická koroze neboli koroze pod napětím postupuje po hranicích krystalických zrn napjaté oceli. Rozlišujeme anodovou a katodovou interkrystalickou korozi. Anodová koroze je charakteristická oxidací železa, přičemž se na katodě může vyvíjet vodík uvolněný při oxidaci a to znamená, že může zároveň probíhat i katodová koroze. Při katodové korozi se neoxiduje železo, koroze je způsobena ionty vodíku, které se na katodě soustředí. Ionty působením velkého tlaku pronikají mezi krystaly oceli, v níž vznikají trhliny, které způsobí její náhlé porušení. Katodová koroze je podporována křehkostí, zakalením a mechanickým napětím oceli, vadami na povrchu oceli, vnitřním pnutím, vruby od koroze a místními trhlinkami. Za tepla válcovaná ocel je poměrně odolná vůči korozi tohoto typu, jelikož její povrch je chráněn povlakem oxidů, které vznikly při válcování. [5]



Obrázek 2: Interkrystalická koroze [5]

Anodickou reakci pro ocel v betonu lze vyjádřit:



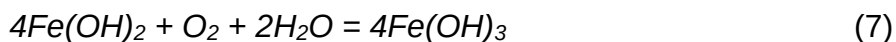
Katodickou reakci, jež je závislá na dostupnosti O_2 a na pH v blízkosti kovového povrchu lze vyjádřit:



Celý oxidačně redukční proces lze pak vyjádřit:



Přítomnost kyslíku následně způsobuje oxidaci železa z oxidačního stavu Fe^{2+} na oxidační stav Fe^{3+} , přičemž vzniká rez, která má 2,5 až 7x větší objem:



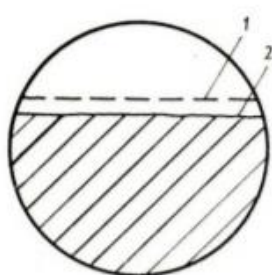
2.3. Rozdělení koroze ocelové výztuže podle charakteristických projevů

Pasivita ocelím dává velmi dobrou odolnost vůči rovnoměrné i nerovnoměrné korozi v nejrůznějších prostředích. Pasivita může být při nepříznivých podmínkách narušena projevy plošné či lokální koroze (důlková, bodová, laminární, mezikrystalová, selektivní). Všechny tyto typy koroze probíhají často za specifických podmínek a projevují se svou vlastní povahou. [11]

2.3.1. Rovnoměrná koroze

Rovnoměrná neboli plošná koroze je nejrozšířenějším druhem koroze. Tento druh koroze je charakteristický rovnoměrným úbytkem kovu po celém povrchu části kovové konstrukce, která je vystavena rovnoměrnému působení korozního prostředí. Úbytek kovu z povrchu konstrukce může být způsoben chemickou i elektrochemickou korozí. Koroze způsobená elektrochemickou reakcí probíhá na úrovni mikročlánků, které jsou rovnoměrně rozmístěny na povrchu a pozice anod a katod se průběžně mění.

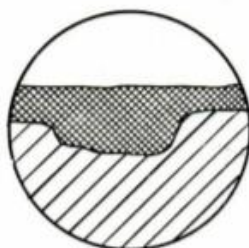
Rychlost rovnoměrné koroze může být v některých případech velmi vysoká, i přesto se jedná o méně nebezpečný druh koroze, jelikož míru korozního poškození lze předvídat právě po celém povrchu kovu. Rychlost šíření tohoto typu koroze lze snadno vypočítat, a tedy je možné jednoduše určit životnost materiálu. Rovnoměrná koroze se projevuje především u kovů, jejichž povrch se nachází v pasivním stavu. [11] [12] [13] [14]



Obrázek 3: Rovnoměrná koroze (1 – původní povrch, 2 – úbytek povrchu po působení koroze) [13]

2.3.2. Nerovnoměrná koroze

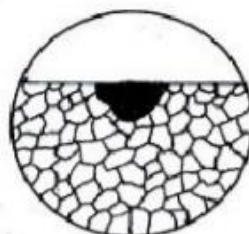
Nerovnoměrná neboli místní koroze je charakteristická tím, že korozní napadení kovového povrchu má různou šířku, hloubku a umístění. Obecně je tato koroze obtížně předvídatelná a vzniká na místech, které jsou mnohem více vystaveny vlivu korozivních prostředí. Jedná se o různé kouty konstrukcí, spoje materiálu, místa s větším výskytem par a změn vlhkostí, změn vlhkosti apod. V těchto místech může dojít zcela k degradaci materiálu od snížení jeho pevnosti až po jeho úplnou ztrátu. Na takto napadeném povrchu lze však najít i místa, které koroze nezasáhla a jsou zcela neporušená. [11] [15]



Obrázek 4: Nerovnoměrná koroze [13]

2.3.2.1. Důlková koroze

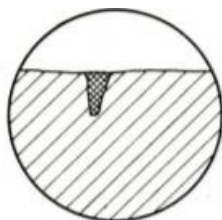
Důlková koroze je forma koroze, která lokálně napadá malé části povrchu kovu a následně proniká do značné hloubky kovové struktury. Na povrchu kovu vznikají menší nebo větší důlky. S důlkovou korozí se setkáváme pod korozními produkty na uhlíkové oceli a u většiny ocelových konstrukcí a zařízení, jejichž ochranný či pasivační nátěr je různým způsobem narušený. [6] [15] [16]



Obrázek 5: Důlková koroze [17]

2.3.2.2. Bodová koroze

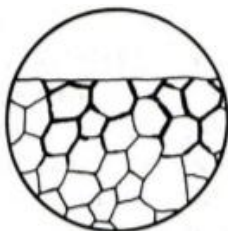
Bodová koroze napadá kovovou konstrukci z povrchu, korozní napadení proniká do hloubky kovové struktury, okolní povrch však zůstává bez pozorovatelného napadení. Vzniká v prostředí s dostatečným obsahem oxidačních činidel a agresivních iontů. Převážně bodovou korozi způsobují roztoky s obsahem fluóru, chlóru, brómu a jódu. Tyto ionty pronikají pasivační vrstvou korozivzdorných ocelí snadněji než jiné ionty. Pro vznik bodové koroze je také důležitý charakter povrchu, vady povrchu materiálů a obsah nekovových vměstků. V případě rozpouštění nekovových vměstků dochází mikrošterbin. Riziko výskytu bodové koroze lze snížit přítomností určitých iontů, které mají inhibiční účinek, jedná se např. o NO_3^- nebo SO_4^{2-} , snížit oxidační schopnost prostředí, popřípadě zvýšit pH. Nejčastěji napadené materiály jsou nerezová ocel a hliník. [11] [14] [15]



Obrázek 6: Bodová koroze [13]

2.3.2.3. Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová koroze je způsobena strukturní a chemickou nehomogenitou kovu na hranicích jeho zrn. Koroze probíhá podél rozhraní zrn a proniká do hloubky struktury materiálu, což má za následek porušení soudržnosti a ztrátu pevnosti a houževnatosti. Projevuje se hlavně u korozivzdorné oceli, která byla špatně tepelně zpracována. Ocel nejprve začne praskat a následně se rozpadne.

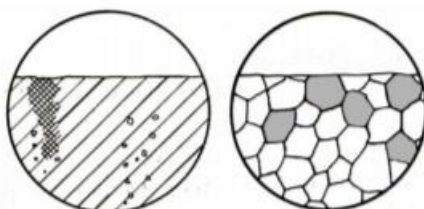


Obrázek 7: Mezikrystalová koroze [13]

Nejkritičtější místa na ocelové konstrukci jsou části základního materiálu, které přiléhají ke svaru. Mezi hlavní příčiny vzniku mezikrystalové koroze v korozivzdorné oceli je snížení obsahu chrómu pod 12 %, ke kterému dochází precipitací karbidů s vysokým obsahem chrómu na hranicích zrn při ohřevu v kritické teplotní oblasti. K tomuto jevu dochází při svařování. V agresivním prostředí přednostně korodují oblasti ochuzené o chróm. [11] [15]

2.3.2.4. Selektivní koroze

Selektivní koroze se vytváří u slitin, které mají dvoufázovou nebo vícefázovou strukturu. Korozními procesy dochází k odstranění jedné složky slitiny. Typickým příkladem selektivní koroze je odzinkování mosazi, kdy se část původního materiálu slitiny mědi a zinku přemění na houbovitou měď. Houbovitá měď může vznikat buď lokálně nebo v celé vrstvě u povrchu, nemá žádnou pevnost a postupně může dojít až k perforaci materiálu. Proces odzinkování se uskutečňuje ve vodách a podléhá mu hlavně mosazi s obsahem zinku vyšším než 15 %. Slabě kyselé vody s nízkou solností v kombinaci s pokojovou teplotou způsobují rovnoměrné odzinkování. Naopak lokální odzinkování způsobují slabě alkalické a neutrální vody s vysokou solností v kombinaci se zvýšenou teplotou. [14] [15]



Obrázek 8: Selektivní koroze [13]

2.3.2.5. Laminární koroze

Laminární koroze nastává především u kovů, které mají nižší odolnost než jejich oxidy. Charakteristický je postup koroze, který nejčastěji probíhá po jednotlivých vrstvách materiálu a připomíná šupiny. Tento děj se nazývá slupkovité odleptávání kovu. K tomuto jevu dochází při zpracování mědi, kde může dojít k zaválcování oxidů. Tyto oxidy jsou odolnější než vlastní kov a následná koroze probíhá ve směru válcování a podobá se právě slupkovitému odleptávání. [18] [19]



Obrázek 9: Laminární koroze [20]

3. KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V ŽELEZOBETONU

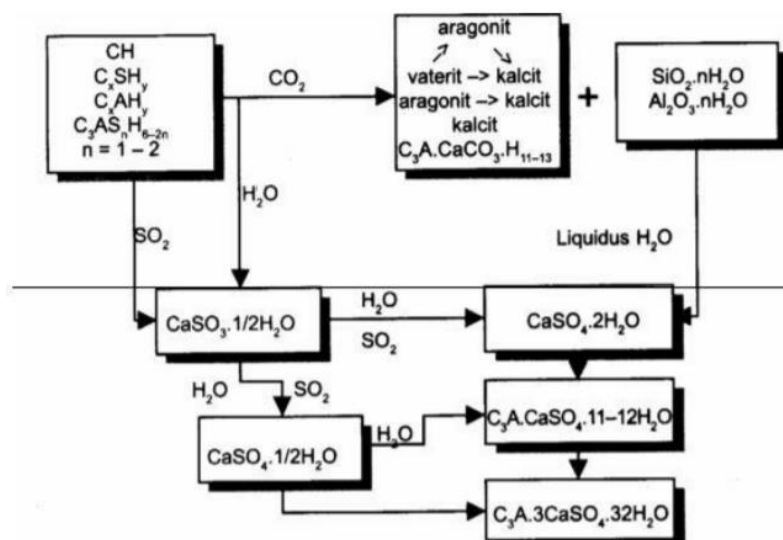
Životnost železobetonu je také určována životností ocelové výztuže, která může podléhat působení agresivních látek. Vzniklé korozní produkty železa mají až 2,5× vyšší objem než původní kov a v okolí výztuže způsobují namáhání betonu, jehož následkem je vznik trhlin a odlupování krycí vrstvy betonu. Působení koroze zmenšuje průřez železobetonové konstrukce, což má za následek snížení mechanických vlastností železobetonové konstrukce.

Existuje několik činitelů, které způsobují snižování trvanlivosti železobetonových konstrukcí. Základní opatření, které by měly předcházet zvýšení degradace železobetonových konstrukcí, jsou dobře provedený návrh železobetonové konstrukce, vhodně zvolené suroviny a jejich kvalita a dodržování technologických postupů při provádění.

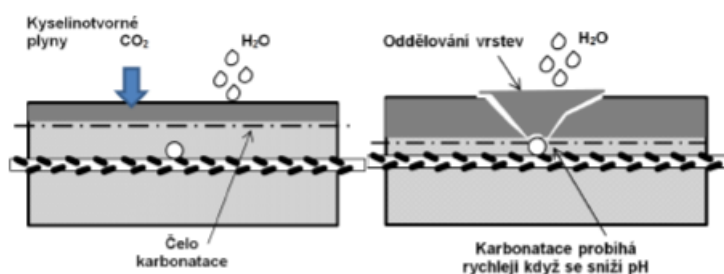
Konstrukce musí být navržena tak, aby byly brány v úvahu všechny možné druhy namáhání, které mohou v budoucnu konstrukci ovlivnit. Při návrhu je nutné zohlednit nejen statické namáhání, ale i namáhání působením agresivních látek. Na působení agresivních látek má vliv zejména tvar konstrukce (špatný tvar konstrukce může způsobit nahromadění agresivních látek) a správně zvolené suroviny na výrobu. [5] [12] [21]

3.1. Koroze výztuže vlivem degradace betonu

Vlivem degradace betonu, která je způsobena karbonatací nebo sulfatací, se snižuje pH betonu a dochází ke ztrátě schopnosti alkalické pasivace výztuže. Dochází k poklesu pH betonu pod 10 (hodnota pH rzi je 9,6) a tenká vrstva oxidů (stabilní korozní zplodiny) na povrchu výztuže se stává pórovitější a začne se rozpouštět. Následně se na povrch nezkorodované výztuže dostává vlhkost a kyslík. Korozní zplodiny začnou zvětšovat (až 2,5x) svůj objem a dochází k postupnému vzniku trhlin a odlupování krycí vrstvy. [5]



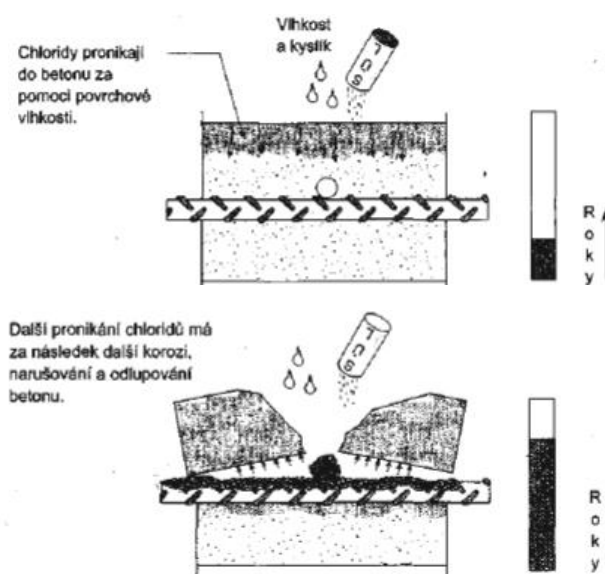
Obrázek 10: Průběh karbonatace a sulfatace [5]



Obrázek 11: Průběh karbonatace železobetonu [22]

3.2. Pronikání chloridů do struktury železobetonu

Chloridy pronikají do betonu z prostředí, v němž jsou chloridy obsaženy. Nejčastěji napadají beton chloridy z mořských vod a rozmrazovacích solí. Pronikání chloridů strukturou betonu závisí na koncentraci chloridů v prostředí, množství přítomné vlhkosti a propustnosti betonu. [5]



Obrázek 12: Koroze ocelové výztuže způsobená pronikáním chloridů a narušení betonu [5]

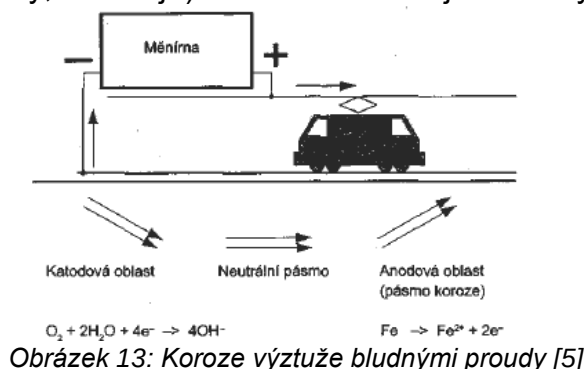
Chloridy za přítomnosti kyslíku a vlhkosti na povrchu oceli vytváří rez, která vyvolává tahová napětí rozpínáním oxidů a dochází tak ke vzniku trhlin a odlupování krycí vrstvy betonu. Postupným narušováním betonu dochází ke zrychlené korozi. Hlavní příčinou je snadnější dalších přístup korozivních solí společně s vlhkostí a kyslíkem. Koroze způsobená působením chloridů je také závislá na hodnotě pH. Vyšší hodnota pH znamená vyšší koncentraci chloridů.

Chloridy se k zabetonované výztuži dostávají i přes trhliny a konstrukční spáry, nejčastěji se jedná o rozmrazovací posypové soli.

Chloridy se do železobetonu dostávají nejen z posypových solí, jedná se zejména o chloridy jako urychlovače, chloridy obsažené v kamenivech (mořský písek) nebo chloridy v záměsové vodě (mořská voda). [5]

3.3. Koroze výztuže bludnými proudy

Koroze výztuže bludnými proudy je na povrchu kovu vyvolána vnějším zdrojem stejnosměrného proudu a vzniká anodickým i katodickým procesem. K tomuto typu koroze dochází u kovových konstrukcí, které nejsou odizolovány nebo jsou nedostatečně odizolovány od půdního prostředí a nachází se blízko zdrojů stejnosměrného proudu (bludné proudy). Mezi zdroje bludných proudů patří hlavně kolejová doprava (vlaky, tramvaje) elektrizovaná stejnosměrným proudem. [6] [23]



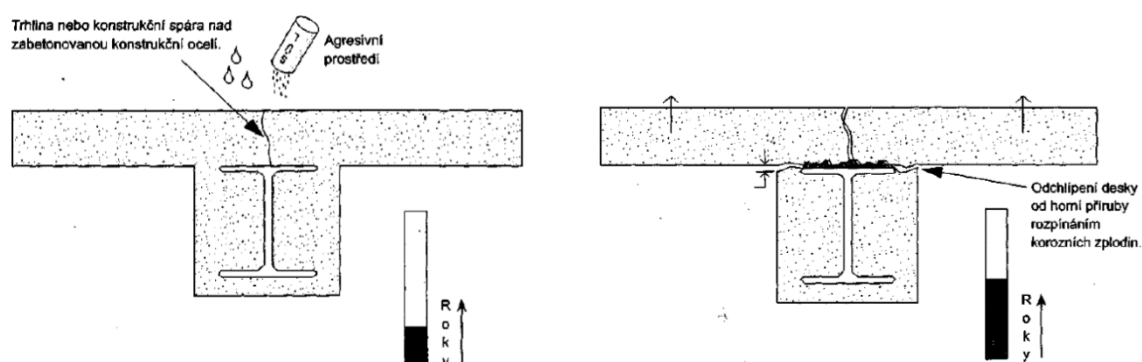
Obrázek 13: Koroze výztuže bludnými proudy [5]

U většiny elektrizovaných tratí je kladný pól napájecího zdroje připojen k troleji a záporný ke kolejnici. Kolejnice obecně neplní funkci zpětného vodiče trakčního proudu a nikdy nejsou úplně odizolovány od půdního prostředí, díky tomu se část trakčního proudu (bludný proud) dostává do země a v blízkosti trakční měnárny teče zpět ke zdroji elektrického proudu.

Bludné proudy se negativně projevují zejména v místech, kde vystupují z kovových konstrukcí do země (např. úložná potrubí, nádrže, železobetonové konstrukce, metalické kabelové pláště). [6] [23]

3.4. Koroze prvků se zabetonovanými ocelovými segmenty

Koroze zabetonovaných kovových segmentů zahrnuje konstrukční prvky jako jsou zabetonované ocelové nosníky, spřažené konstrukce nebo konstrukce pro zajištění požární ochrany. Horní příruba nosníku je náchylná ke korozi, když k přírubě proniká trhlina nebo konstrukční spára. Vlhkost a korozivní soli se zachytí na přírubě a vytvářejí ideální prostředí pro korozní aktivitu. Koroze na horní přírubě působí silou, která zvedá beton nad přírubou. Když je síla dostatečně velká, dochází k oddělení vrstev. Zespolu pak lze pozorovat oddělení desky od žebra. [5]

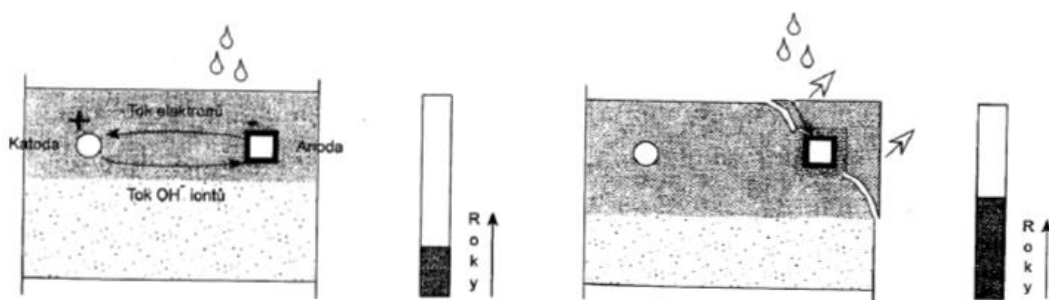


Obrázek 14: Koroze prvků se zabetonovanými ocelovými segmenty [5]

3.5. Galvanická koroze

Jsou-li v betonové konstrukci zabudované dva různé kovy a beton tvoří vhodný elektrolyt (vlhká betonová směs), může docházet ke galvanické korozi kovů. V případě, že jsou dva kovy v kontaktu přes aktivní elektrolyt, dochází ke korozi u méně aktivního kovu.

Ve stavebnictví je nejčastější případ galvanické koroze použití hliníkových prvků, které jsou uloženy v železobetonu. Hliník z důvodu nižší aktivity než ocel, koroduje. Aktivnější ocel se vlastně čistí a na povrchu hliníku se vytváří vrstva bílých oxidů hliníku. Vrstva oxidů způsobuje tahová napětí, která postupně vedou až k trhlinám v okolním betonu. [5] [7]



Obrázek 15: Galvanická koroze [7]

4. METODY DETEKCE KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE

4.1. Nedestruktivní metody

Pomocí nedestruktivních metod lze stanovit hledané vlastnosti bez rozsáhlejšího poškození stavebního materiálu nebo konstrukčního prvku. Nedestruktivní metody umožňují několikanásobné měření na stejném místě, registraci změn v čase a statistické vyhodnocení. Nedostatek těchto metod spočívá v tom, že se měří pouze pomocná charakteristika, která je s požadovanou charakteristikou v určité závislosti. V současné době moderní nedestruktivní metody založené na počítačové technologii výrazně zjednodušují vykonávání zkoušek. [24]

4.1.1. Lokalizace zabetonované výztuže

K lokalizaci zabetonované výztuže se používá metoda založená na principu měření změn velikosti magnetického toku způsobených přítomností feromagnetického materiálu v elektromagnetickém poli. Elektromagnetické zařízení pro stanovení polohy výztuže se nazývá covermetr. Pomocí této metody je možné určit polohu a směr výztuže, množství a osově vzdálenosti výztuže, tloušťku betonové krycí vrstvy (pokud je znám průměr výztuže) a průměr výztuže (pokud je známá tloušťka krycí vrstvy). [5] [24]

4.1.2. Měření poločlánekových potenciálů

Měřením poločlánekových potenciálů se určuje relativní pravděpodobnost korozní aktivity a jedná se o metodu pouze kvalitativní. Tato metoda se používá pro ocelovou tyčovou výztuž bez ohledu na její velikost a profil a je možné ji použít i při větších tloušťkách krycí vrstvy. [25]

4.1.3. Měření změny elektrického odporu výztuže

Metoda je založena na sledování změn elektrického odporu výztuže v betonu. Elektrický odpor výztuže je závislý na průměru ocelové výztuže, v případě výskytu rovnoměrné koroze snižující průřez výztuže se tento jev projeví na zvýšení hodnoty elektrického odporu výztuže. Elektrický odpor lze měřit použitím přímého či nepřímého měření. Metoda přímého měření odporu se provádí za použití přesného digitálního ohmmetru, který pracuje na principu Thomsonova můstku s odděleným snímáním proudu a napětí. Metoda nepřímého měření odporu lze použít v případě, že je možné měření souběžné proudu a napětí u zkoumané výztuže a ze kterých se následně elektrický odpor vypočte. [25]

4.1.4. Potenciodynamická metoda

Potenciodynamická zkouška se využívá v případě vzorků bez povrchových úprav a elektrolytu s dobrou elektrickou vodivostí. Pomocí této zkoušky je měřena závislost proudové hustoty na potenciálu zkušební vzorku proti referenční metodě, která se znázorňuje pomocí potenciodynamických polarizačních křivek. Postupně dochází ke změně elektrodového potenciálu anodickým nebo katodickým směrem, což má za následek anodické nebo katodické chování vzorku. [26] [27] [28]

4.1.5. Galvanodynamická metoda

Galvanodynamická metoda je elektrochemická zkouška jejíž podstata spočívá v měření změn potenciálu v závislosti na změnách hustoty elektrického proudu, který prochází vzorkem. [28]

4.1.6. Galvanostatická metoda

Galvanostatická zkouška při konstantní proudové hustotě určuje závislost proudové hustoty na elektrodovém potenciálu. Elektrodový potenciál se s polarizací mění, výsledkem je tedy časová závislost elektrodového potenciálu. Hodnota ustálení potenciálu vzorku odpovídá polarizaci vzorku. [26] [28]

4.1.7. Potenciostatická metoda

Principem potenciostatických metod je sledování proudové odezvy (proud nebo proudová hustota) studovaného systému na vložený potenciál v určitém čase. Potenciostatické metody, které se v dnešní době využívají pro elektroanalýzu jsou chronoamperometrie, coulometrie či voltametrie. [29] [28] [30]

4.1.8. Stanovení polarizačního odporu

Stanovení polarizačního odporu spočívá v tom, že spád polarizační křivky je přibližně lineární a protíná osu nulové proudové hustoty pod určitým úhlem při potenciálech blízkých koroznímu potenciálu (± 10 mV). Měření polarizačního odporu je metoda nevhodná do prostředí s nízkou iontovou vodivostí. Za pomoci čidel, která jsou zkonstruována ze dvou nebo tří elektrod, je hodnoceno korozní poškození sledováním polarizačního odporu. Při měření je zkušební vzorek, který je zapojen jako jedna elektroda, polarizován skokovou změnou proudu nebo potenciálu. Informace o okamžité korozní odolnosti jsou následně získány z proudové nebo potenciálové odezvy. [11] [26] [31]

4.1.9. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

Elektrochemická impedanční spektroskopie sleduje proudovou odezvu systému. Systém zkoumá tak, že do systému při konstantním stejnosměrném napětí vkládají malé napěťového pulsy, které mají harmonický průběh. [32] [33] [34]

4.1.10. Měření elektrochemického šumu

Elektrochemický šum jsou fluktuace signálu elektrochemického potenciálu a korozního proudu generovaného korodujícím kovem. Elektrochemický potenciál má vztah k řídicím termodynamickým silám reakce. Korozní proud odráží přímo rychlost reakcí – jejich kinetiku. Každý typ koroze je doprovázen elektrochemickým šumem, který má specifické znaky. [35] [36]

4.1.11. Galvanická metoda

Principem galvanické metody je sledování korozního proudu tekoucího mezi dvěma elektrodami, které jsou ze stejného nebo různého kovu. Metoda zajišťuje spolehlivé výsledky v systémech, ve kterých nedochází ke změnám chemického složení a hydrodynamických podmínek. Používá se pro sledování galvanických korozních dějů, sledování elektrického šumu a ve vodném prostředí pro stanovení nízkých koncentrací kyslíku. [35]

4.2. Destruktivní metody

Destruktivní metody se používají v případě, že nelze použít nedestruktivní metody nebo je vyžadováno přesnější stanovení vyšetřovaných charakteristik. V mnoha případech dochází ke kombinaci destruktivních i nedestruktivních metod. Pomocí destruktivní metody lze zpřesnit všeobecné kalibrační vztahy nedestruktivních metod. [24]

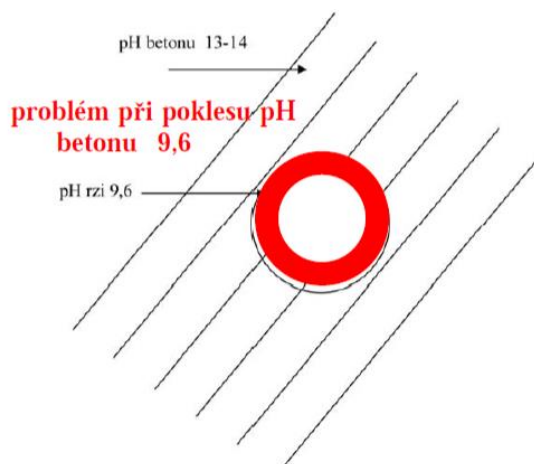
4.2.1. Korozní vzorky

Rychlost koroze lze sledovat na materiálech hodnocením hmotnostních změn. Vzorky materiálů se váží před a po expozici v korozním prostředí. V korozním prostředí dochází ke korozi materiálu, a tedy úbytku hmotnosti. Podle rozdílu hmotností se stanoví rychlost koroze. [5]

5. PROTIKOROZNÍ OCHRANA OCELOVÉ VÝZTUŽE

5.1. Alkalická pasivace výztuže betonem

Beton je vysoce alkalický materiál, jenž má hodnotu pH 12,4. Při této hodnotě alkality je zabetonovaná výztuž chráněná před korozí pasivačním filmem vázaným na povrch výztuže. V případě poklesu alkality betonu (pH pod 9,6 = pH rzi), vzrůstá nebezpečí porušení pasivačního filmu na povrchu výztuže a následně vzniku koroze výztuže. Snižující se alkalitou betonu dochází ke snižování hutnosti a stálosti struktury betonu. [5]



Obrázek 16: Alkalická pasivace výztuže betonem [5]

5.2. Katodická ochrana

Katodická ochrana snižuje rychlost koroze ocelové výztuže v železobetonu. Jedná se o elektrický proces, který zabraňuje korozi přívodem elektrického proudu do ocelové výztuže.

Stejnoseměrný proud je ze zdroje přiváděn mezi ocelovou výztuž a anodový systém, který rozděluje elektrický proud do okolního betonu. Skrz vlhký beton (beton musí být vlhký, aby mohl plnit funkci elektrolytu), který tvoří elektrolyt, teče elektrický proud k ocelové výztuži. [5] [28]

5.3. Inhibitory koroze

Inhibitory koroze jsou chemická látka, jejíž přítomnost v korozním systému ve vhodné koncentraci snižuje korozní rychlost. Inhibitory koroze se používají k ochraně kovů proti korozi. Podle účinku korozního inhibitoru můžeme dělit inhibitory na katodické, anodické a adsorpční. Anodické inhibitory zpomalují anodickou reakci, katodické inhibitory zpomalují katodickou reakci a adsorpční inhibitory zpomalují jak anodickou, tak katodickou reakci. [37]

5.3.1. Migrující inhibitory koroze (MCI)

Železobetonové konstrukce, u kterých dochází k degradaci ocelové výztuže vlivem působení agresivních látek, je možné aplikovat migrující inhibitor koroze. Migrující inhibitory koroze jsou látky, které jsou schopny se pohybovat k ocelové výztuži skrz strukturu betonu. Na povrchu ocelové výztuže tvoří ochranou chemickou bariéru. Chemická bariéra zamezuje katodické i anodické reakce, která způsobuje korozi výztuže.

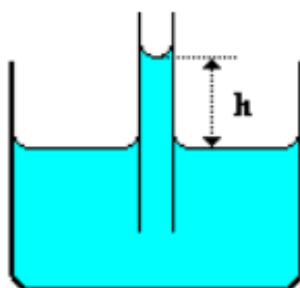
MCI migrují způsobem kapilární elevace, difúze a adsorpce. Schopnost migrace je závislá na pH, pórovitosti, krycí vrstvě výztuže, obsahu vody, koncentraci rozpustnosti a těkavosti inhibitoru, koncentraci agresivních látek a teplotě prostředí. [38] [39]

5.3.2. Způsoby migrace

5.3.2.1. Kapilární elevace

Kapilární elevace neboli vztlínavost je kapilární jev, který lze popsat jako rozdíl výšky hladiny kapaliny v kapiláře oproti úrovni hladiny v okolí. Principem je zakřivení povrchu kapaliny (kapalina smáčí stěny stavební hmoty) a vznik kapilárního tlaku.

K tomuto jevu dochází u velké části stavebních materiálů. Rychlost kapilární elevace závisí na velikosti a tvaru pórů. Jemně pórovité materiály nasávají vodu pomaleji, ale do velkých výšek. Naopak materiály s velkými póry nasávají vodu rychleji, ale výška vzlinutí není tak velká. [40] [41]

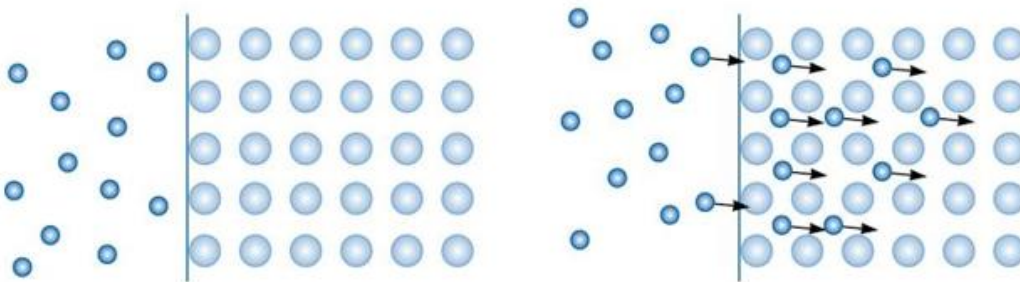


Obrázek 17: Kapilární elevace [40]

5.3.2.2. Difúze

Difúze je charakteristická samovolným pronikáním částic jedné látky mezi částice druhé látky. Difúze se projevuje neustálým a neuspořádaným pohybem částic a probíhá ve všech skupenstvích (kapalné, plynné, pevné). Látka se rozptyluje neustálými nárazy pohybujících se částic (atomy, molekuly) plynu nebo kapaliny.

Rychlost šíření částic nejvíce ovlivňuje velikost částic, vlastnosti a teplota prostředí. Vyšší teplota prostředí zvyšuje rychlost pohybu částic. [42]



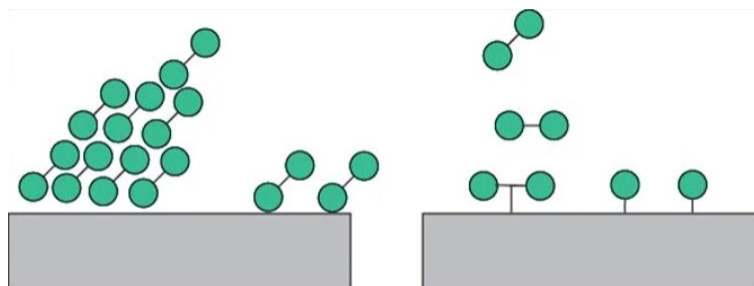
Obrázek 18: Difúze kapaliny [43]

5.3.2.3. Adsorpce

Na základě charakteru sil, které způsobují adsorpční jev rozlišujeme dva základní druhy adsorpce. Fyzikální adsorpci a chemickou adsorpci.

Fyzikální adsorpci způsobují slabé Van der Waalsovy síly. Tento druh adsorpce je velmi rychlý při nízkých a jeho rovnováha se ustaluje okamžitě. Fyzikální vazba je vratná a může docházet k opačnému jevu desorpci.

Při chemické adsorpci (chemisorpci) není celý povrch póru stejně aktivní. Desorbovaná látka je většinou odlišná od adsorbované a tento proces tedy funguje na principu chemických sil. [44] [45]



Obrázek 19: Fyzikální a chemická adsorpce [46]

6. CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je návrh bednicího dílce na různé materiálové bázi (bednění betonové, dřevocementové a z překližované desky s geotextílií) se zvýšenou protikorozní ochranou (použití inhibitorů koroze výztuže) proti korozi ocelové výztuže v železobetonu. Bude sledován vliv materiálu bednění na migraci inhibitoru koroze, účinnost různých druhů inhibitorů koroze (MCI), vliv množství MCI na jejich účinnost a vliv pevnostní třídy betonu na migraci inhibitoru.

Na základě poznatků, které budou zjištěny, bude možné určit důležitost jednotlivých vlivů, které mění účinnost migrujících inhibitorů koroze.

7. METODIKA PRÁCE

Praktická část diplomové práce je rozdělena do čtyř etap. Řešení diplomové práce částečně navazuje na výstupy z bakalářské práce.

ETAPA 1 – MĚŘENÍ MIGRACE INHIBITORŮ KOROZE

V první etapě diplomové práce byl ověřen vliv vlhkosti betonu na míru migrace inhibitoru koroze. Migrace inhibitoru koroze byla měřena neanalytickou metodou pomocí činidla dansylchlorid.

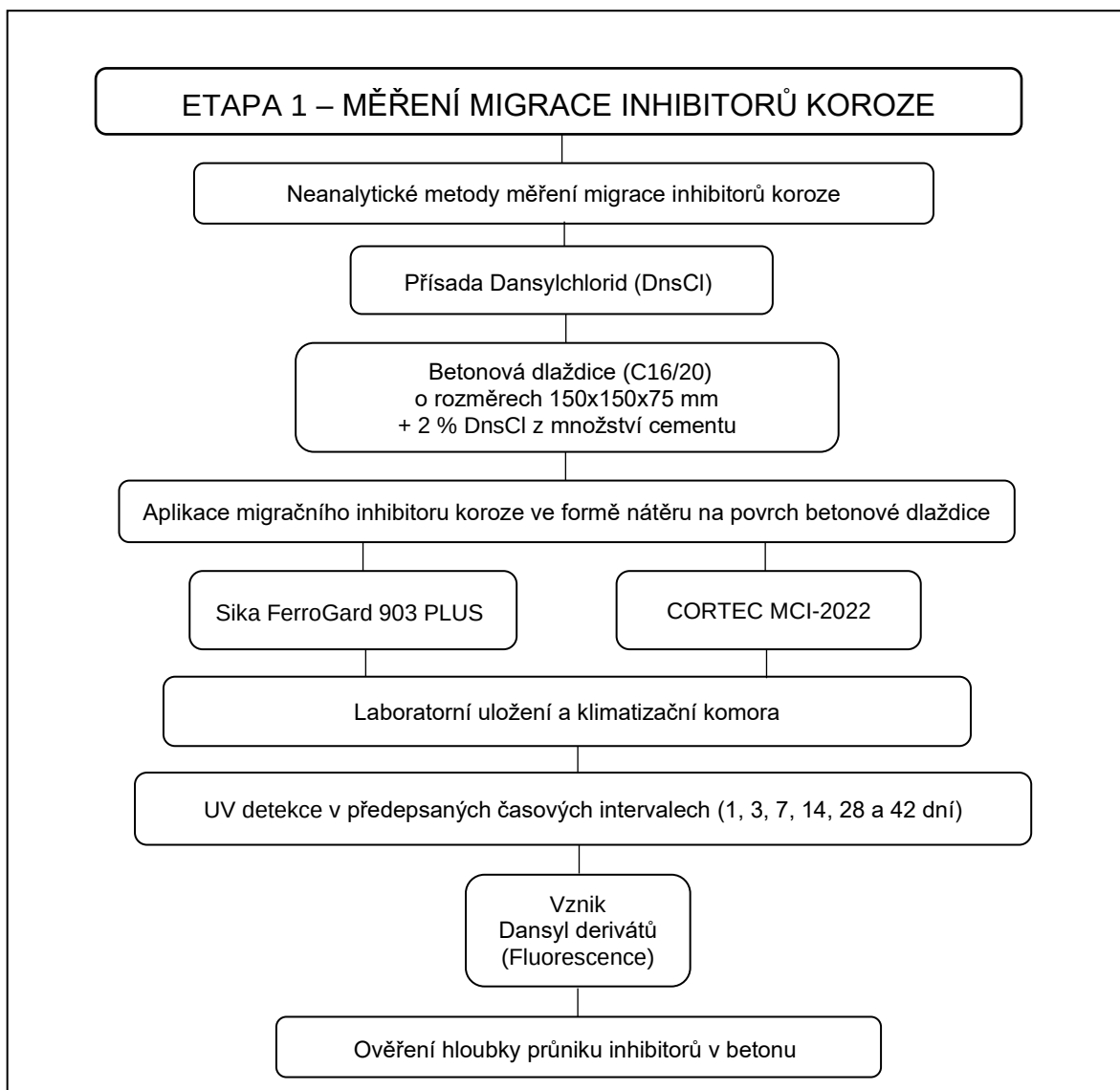
Byl vyroben zkušební betonový dílec o rozměrech 150×150×75 mm, do kterého při výrobě byla přidána 2 % z hm. cementu přísada dansylchlorid.

Po uplynutí doby zrání byl zkušební dílec mechanicky rozdělen na čtyři menší dílce o rozměrech 75×75×75 mm, které byly uloženy do laboratorních podmínek a do klimatizační komory, aby dosáhly různé míry saturace vlhkosti dílců.

Následně byl povrch dílců opatřen nátěrem migrujícího inhibitoru koroze SIKAFERROGARD 903 PLUS a CORTEC MCI-2022, přičemž se stále udržovala míra saturace vlhkosti dílců.

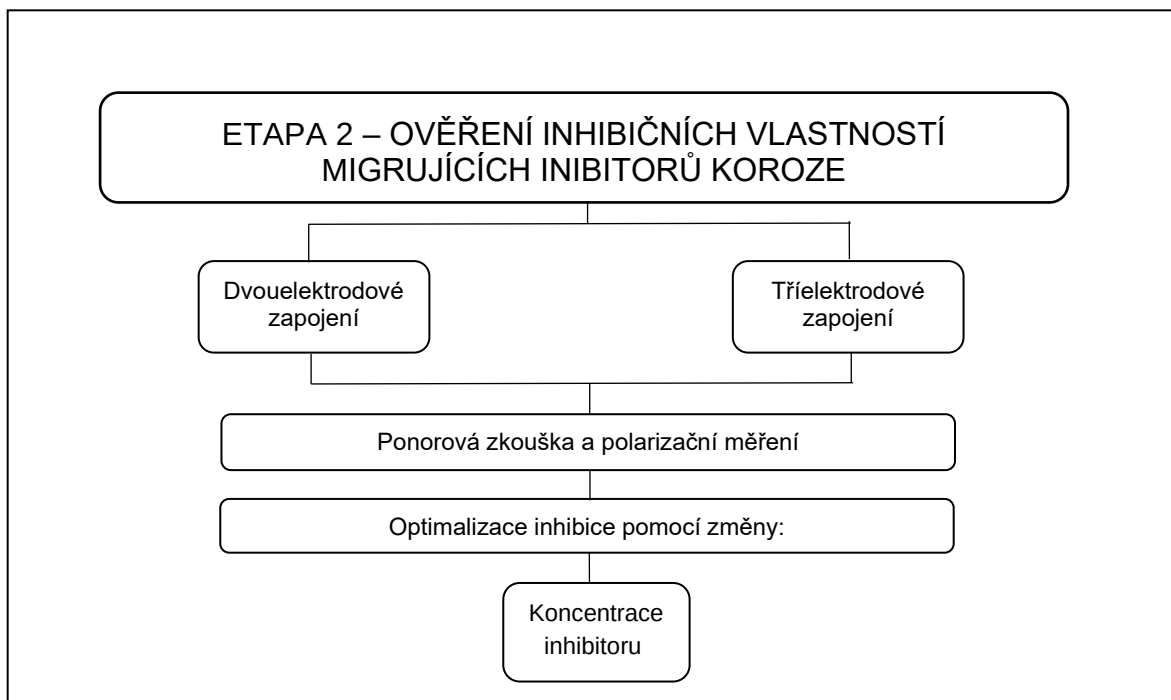
V přesných časových intervalech bylo prováděno měření hloubky průniku inhibitoru do struktury betonu pod UV lampou, kdy inhibitor po reakci s přísadou dansylchlorid za vzniku dansyl derivátů vyvolává fluorescenci.

Hlavním cílem této etapy bylo zjistit hloubku migrace různých inhibitorů koroze do struktury betonu v čase, a to při různé míře saturace vlhkosti betonu.



ETAPA 2 – OVĚŘENÍ INHIBIČNÍCH VLASTNOSTÍ MIGRUJÍCÍCH INIBITORŮ KOROZE

Ve druhé etapě byla ověřena účinnost různých druhů migrujících inhibitorů koroze. Účinnost byla zjištěna ponorovou zkouškou a polarizačním měřením korozního potenciálu a proudové hustoty pomocí dvoelektrodového a tříelektrodového zapojení. Na základě výsledných hodnot bylo možné optimalizovat inhibiční účinky jednotlivých inhibitorů na základě jejich složení a koncentrace.



ETAPA 3 – NÁVRH BEDNÍCÍCH DÍLCŮ S PROTİKOROZNÍ OCHRANOU

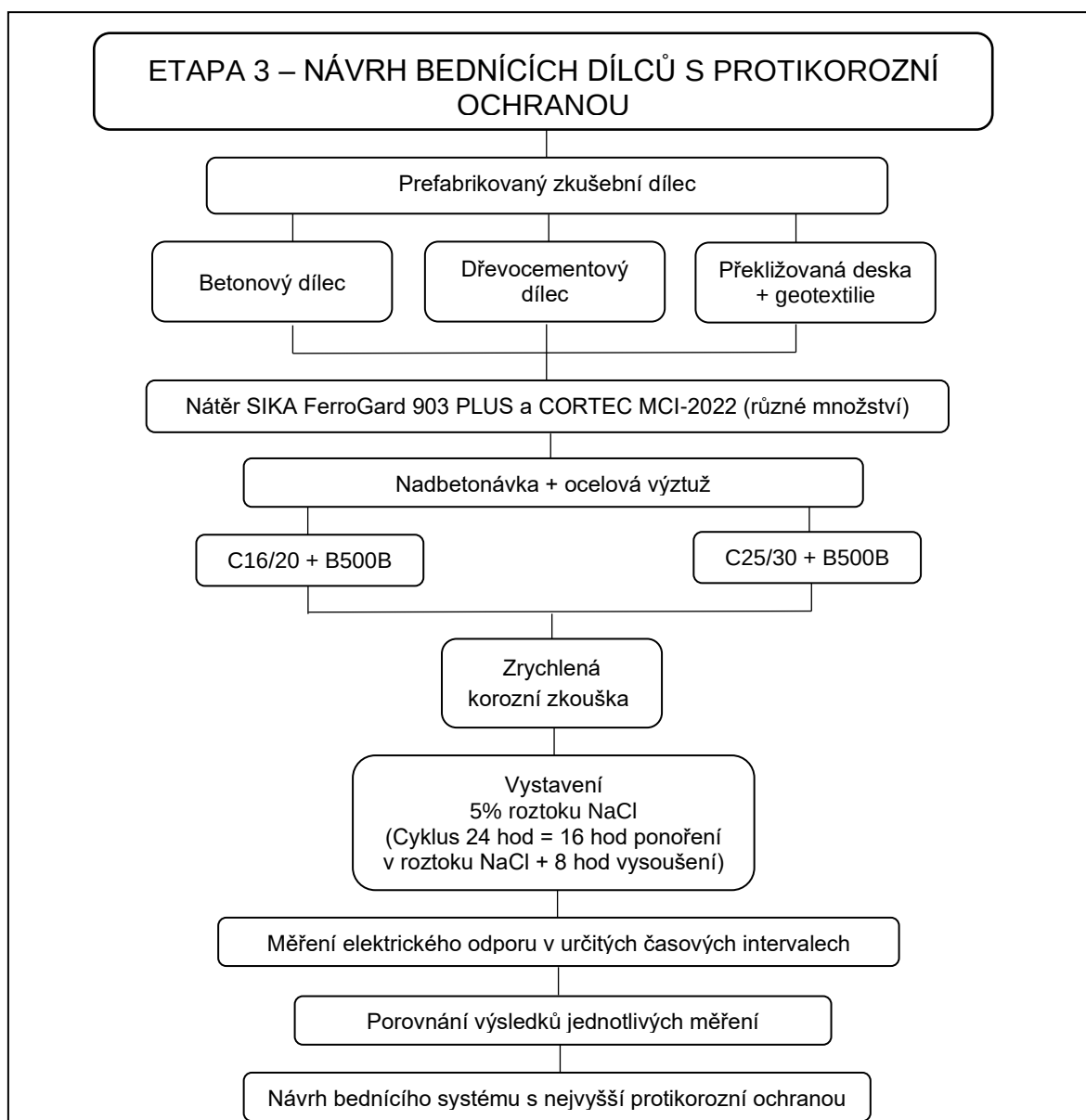
Náplní třetí etapy bylo navrhnout bednicí dílce s nejúčinnější protikorozní ochranou. Byly navrženy a vyrobeny sestavy bednicích dílců s využitím deskových materiálů (překližka + geotextilie) a prefabrikovaného betonového a dřevocementového bednění.

Jednotlivé sestavy se skládaly z bednění s obsahem migračního inhibitoru koroze a z nadbetonávky se zabudovanou ocelovou výztuží (viz obr. 24).

Kombinace jednotlivých sestav bednicích dílců se tedy lišily materiálem bednění viz. obr. 25 (překližka s dvěma různými druhy geotextilie, prefabrikované betonové a dřevocementového bednění), třídou betonu nadbetonávky (C16/20, C25/30) a druhem a množstvím spotřebovaného inhibitoru koroze (Sika FerroGard 903 PLUS a CORTEC MCI-2022).

Tyto vzorky bednicích dílců byly vystaveny několika cyklům zrychlených korozních zkoušek. Po každém cyklu byla provedena měření a na jejich základě byly vybrány dílce s nejúčinnější protikorozní ochranou.

Výsledkem této etapy bude ověřený účinný návrh bednicích dílců s prokázanou protikorozní ochranou výztuže.



ETAPA 4 – DLOUHODOBÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI PROTİKOROZNÍ OCHRANY NA REFERENČNÍ STAVBĚ

V závěrečné etapě byly inhibiční vlastnosti migračních inhibitorů koroze ověřeny na referenční stavbě.

Referenční stavbou byly speciálně vybudované stěny využitím inovativních bednicích dílců. Jednotlivé stěny byly vyrobeny z betonových tvárnic, dřevocementových tvárnic, překližovaných desek s geotextílií a referenční z železobetonu, přičemž všechny stěny kromě referenční byly opatřeny migračním inhibitorem koroze (viz. obr. 32).

Výsledkem této etapy je ověření účinnosti migračních inhibitorů koroze v reálném venkovním prostředí.

8. SOUHRN JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

8.1. ETAPA 1 – MĚŘENÍ MIGRACE INHIBITORŮ KOROZE

8.1.1. Výroba zkušebních dílců

Pro první etapu byl navržen zkušební dílec o rozměrech 150×150×75 mm. Použitý beton byl pevnostní třídy C16/20. Při výrobě zkušebních dílců bylo do čerstvé směsi přidáno 2,0 hm. % z hmotnosti cementu přísady Dansylchlorid. Postup výroby a ošetření betonových zkušebních dílců proběhl podle normy ČSN EN 206 + A1:2016.

8.1.2. Způsob zajištění vlhkostních stavů vzorků

Migrace inhibitoru koroze byla měřena na zkušebních dílcích ve dvou vlhkostních stavech. A to při vlhkostním stavu dílce při vystavení laboratorním podmínkám a prostředí 70% vzdušné vlhkosti v klimatizační komoře ERICHSEN (viz. obr. 20).

Betonový dílec po 28 dnech zrání byl mechanicky rozčleněn na čtyři dílce o rozměrech 75×75×75 mm. Všechny dílce byly uloženy do sušárny až do ustálení hmotnosti z důvodu zjištění hmotnosti ve vysušeném stavu. Následně byly dílce uloženy až do ustálení hmotnosti ve výše uvedených prostředích (dva dílce v každém prostředí). Po ustálení jejich hmotnosti byla zjištěna vlhkost dílců, které jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 20: Uložení zkušebních dílců v prostředí 70% vlhkosti v klimatizační komoře ERICHSEN

Tabulka 1: Míra saturace vody zkušebních dílců

Expozice	Míra saturace [%]
Laboratorní podmínky (45 %)	2,0
Zvýšená vzdušná vlhkost (70 %)	8,4

8.1.3. Aplikace inhibitoru koroze

Zvoleny byly dva migrující inhibitory koroze, které byly na dílce aplikovány nátěrem, a to:

- Sika FerroGard 903 PLUS – použita předepsaná spotřeba dle technického listu 500 g/m²,
- CORTEC MCI-2022 – použita stejná hodnota spotřeby 500 g/m² (předepsaná spotřeba 285 g/m²), aby byly podmínky pro migraci u obou inhibitorů stejné a výsledky byly komparativní.

Množství inhibitoru spotřebované na nátěr obou inhibitorů bylo pro všechny dílce stejné. Nátěr byl aplikován na povrch zkušebních dílců.

Sika FerroGard 903 PLUS

Sika FerroGard 903 Plus je povrchově aplikovaný inhibitor koroze na bázi organických sloučenin. Chrání jak katodickou, tak i anodickou oblast. [47]

Tabulka 2: Technická data migrujícího inhibitoru koroze Sika FerroGard 903 Plus [47]

Vzhled	Transparentní kapalina, bezbarvá až mírně nažloutlá
Chemická báze	Vodný roztok aminoalkoholů a solí aminoalkoholů (2-aminoethanol 2.5-10.0 %)
Skladovatelnost	24 měsíců
Objemová hmotnost	1,05 kg/l
pH	10
Migrace	25-40 mm za 1 až 2 měsíce

CORTEC MCI-2022

CORTEC MCI-2022 je směs emulzí silano-siloxanův a migračních inhibitorů koroze. Jedná se o nátěr na bázi vody. Zabraňuje korozi vlivem karbonatace, působení vlhkosti a chloridů a chrání jak anodickou, tak katodickou oblast. [48]

Tabulka 3: Technická data migrujícího inhibitoru koroze CORTEC MCI-2022 [48]

Vzhled	Mléčně bílá kapalina
Chemická báze	Vodný roztok silano-siloxanů
Skladovatelnost	12 měsíců
Objemová hmotnost	0,99-1,01 kg/l
pH	9,5-10,5
Migrace	Neuvedeno

8.1.4. Princip metody měření migrace inhibitoru koroze

Metoda měření migrace inhibitoru koroze byla zvolena za využití principu detekce reagentů při reakci aminových skupin (obsaženy ve zvolených inhibitorech) s činidlem dansylchlorid v alkalickém prostředí. Chemickou reakcí mezi aminovými skupinami a dansylchloridem dochází k fluorescenci. Reakce dansylchloridu s primárními tak i sekundárními aminokyselinami dává vznik sulfonamidů s absorpčním maximem při 298 nm, dansylderiváty fluoreskují při hodnotě vlnové délky $\lambda = 470$ do 530 nm s excitačním zářením od $\lambda = 340$ do 380 nm. Po nasvícení ultrafialovým světlem bylo jednoznačně možné určit průnik inhibitoru do struktury betonu.

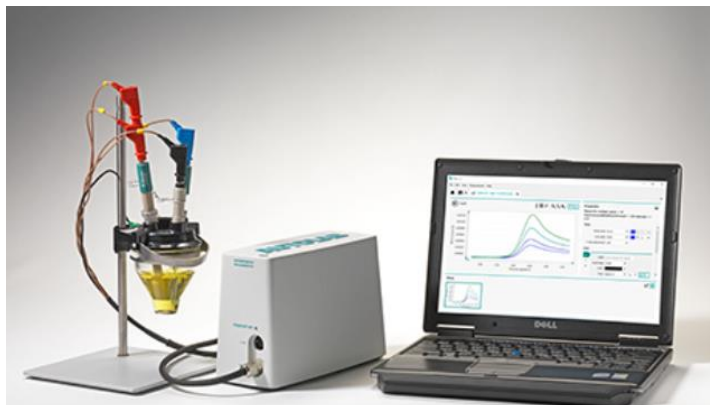
Měření bylo prováděno ve stanovených intervalech po **1, 3, 7, 14, 28 a 42 dnech**.

8.2. ETAPA 2 – OVĚŘENÍ INHIBIČNÍCH VLASTNOSTÍ MIGRUJÍCÍCH INIBITORŮ KOROZE

8.2.1. Polarizační měření

8.2.1.1. Metodika měření

Měření polarizačních křivek probíhalo při tříelektrodevém zapojení na přístroji Metrohm Autolab a softwaru NOVA. Rozsah potenciálu činil ± 200 mV a posun potenciálu (scan rate) činil 1 mV/s.



Obrázek 21: Přístroj Metrohm Labstat pro polarizační měření s tříelektrodevou korozní celou (elektrochemický článek)

Zkoušená ocel (B 500B a 11 370) tvořila pracovní elektrodu. Měřilo se vůči srovnávací argentchloridové (kalomelové) elektrodě a za pomocnou elektrodu byla použita platinová elektroda.



Obrázek 22: Pracovní kovová elektroda

Zkušební vzorky byly ponořeny v kádince s obsahem roztoku MCI (Sika nebo CORTEC) v elektrolytu (vodné prostředí – roztok bez a s obsahem NaCl). V případě požadavku měření polarizačních křivek v prostředí s výskytem Cl^- iontů se jednalo o koncentraci 0,05 mol NaCl (tj. cca 2,9 % NaCl). Polarizační měření probíhalo ve skleněné měřící cele (elektrochemický článek) o kapacitě 200 ml v intervalech 1 hod od ponoření v kádince.

Po uplynutí stanovené doby ponoru v kádince s inhibitorem byl vzorek z roztoku vyndán a upevněn do elektrody. Pracovní plocha byla 0,785 cm². Pro validitu výsledků byla polarizační měření prováděna opakovaně na několika vzorcích oceli vždy ve stejném roztoku. Jeho složení se mohlo po pár opakováních nepatrně změnit. Před použitím roztoku jiného složení byly elektrody i korozní cela opláchnuty destilovanou vodou. Po ukončeném měření a vyjmutí ocelových vzorků z držáku pracovní elektrody a z korozní cely byl provedeno vyhodnocení dosažených výsledků (grafická část) a údajů o korozním potenciálu a korozní rychlosti (resp. inhibiční účinnosti).

8.2.2. Ponorová zkouška

8.2.2.1. Zkušební vzorky

Jednalo se o ocel třídy 11 370 o rozměrech 50x50 mm), povrch vzorků byl jemně otryskán korundovou drtí a očištěn etanolem. Vzorky byly po klimatizaci zváženy s přesností na 10⁻⁴ g a ponořeny do zkušebního prostředí. Po korozní expozici byly odstraněny u vzorků korozní zplodiny a stanoveny hmotnostní úbytky koroze. Ve vztahu ke standardu bez přítomnosti migračního inhibitoru koroze byla následně stanovena inhibiční účinnost inhibitoru.

8.2.2.2. Zkušební prostředí

Koncentrace NaCl ve vodě byla 0,05 mol (roztok 2,9 % hm. NaCl) při laboratorní teplotě 23 °C.

8.2.2.3. Doba zkoušení

Ponorová zkouška trvala 60 dnů při nepřetržitém ponoru.

8.2.2.4. Použité inhibitory

CORTEC MCI-2022, koncentrace 3 % hm. a 8 % hm.

Sika FerroGard 903 PLUS koncentrace 0,6 % hm. a 1,6 % hm.

8.2.2.5. Použitý filmotvorný materiál

Jako filmotvorný materiál byla použita vodná nanodisperze polysiloxanů Bayprotect Nano-Pollen (Inotex Dvůr Králové). Polovina vzorků byla bez přísady a polovina vzorků s přísadou v koncentraci 0,5 % hm. Tento prostředek byl zvolen, i když je primárně určen k jiným účelům, jako filmotvorná látka, která je publikována k zesilování účinku inhibitorů koroze především na hrubě opracovaných površích, kde řada inhibitorů má kolísavou úroveň inhibice.

8.2.2.6. Zvolená kritéria

- Faktor C – druh MCI
- Faktor B – koncentrace MCI
- Faktor A – koncentrace polysiloxanu

Tabulka 4: Kombinace jednotlivých faktorů při ponorové zkoušce

C1 Cortec MCI-2022				C2 MCI Sika Guard 1B1A1			
B1 (3 % hm.)		B2 (8 % hm.)		B1 (0,6 % hm.)		B2 (1,6 % hm.)	
A1 (0 %)	A2 (0,5 %)	A1 (0 %)	A2 (0,5 %)	A1 (0 %)	A2 (0,5 %)	A1 (0 %)	A2 (0,5 %)

8.2.2.7. Stanovení hmotnostních úbytků koroze

Výpočet hmotnostních úbytků koroze Δm_{kor} ($g \cdot dm^{-2}$) byl proveden pomocí standardního vzorce v korozním zkušebnictví:

$$\Delta m_{kor} = \frac{(m_0 - m_e)}{S} \quad (8)$$

kde Δm_{kor} je hmotnostní úbytek koroze, m_0 hmotnost vzorku před korozní expozicí (g), m_e hmotnost vzorku po korozní expozici a odstranění korozních zplodin (g) a S plocha vzorku (dm^2).

8.2.2.8. Stanovení inhibiční účinnosti

Výpočet inhibiční účinnosti J (%) byl proveden s použitím vzorce

$$J = \frac{\Delta m_{kor} - \Delta m_{kor(i)}}{\Delta m_{kor}} \times 100 \quad (9)$$

kde Δm_{kor} je hmotnostní úbytek koroze standardu v nepřítomnosti inhibitoru (g), $\Delta m_{kor(i)}$ korozní hmotnostní úbytek koroze po expozici v přítomnosti inhibitoru (g).

8.3. ETAPA 3 – NÁVRH BEDNÍCÍCH DÍLCŮ S PROTIKOROZNÍ OCHRANOU

8.3.1. Formy na výrobu zkušebních dílců

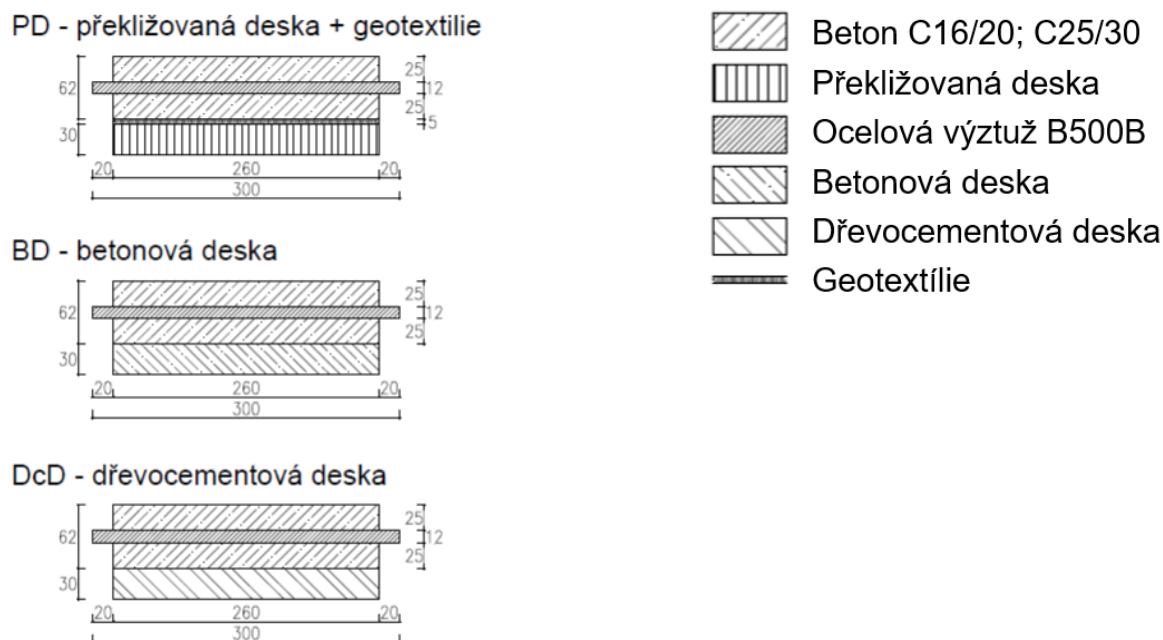
Pro výrobu vzorků bednicích dílců bylo nutné vyrobit speciální formy, které zajistí vzorky pro stanovení migrace inhibitoru koroze. Formy, umožňující uložení výztuže ve středu dílce pro dodržení výšky krycí vrstvy byly vyrobeny z voděodolné překližované desky, aby byly snadno demontovatelné a vydržely několik cyklů výroby.



Obrázek 23: Speciální formy na výrobu vzorků bednicích dílců

8.3.2. Návrh sestav bednicích dílců s protikorozní ochranou

Jednotlivé sestavy vzorků bednicích dílců se skládaly ze dvou částí. První část uvnitř formy byla tvořena bedněním a druhá část nadbetonávkou s vloženou ocelovou výztuží. Schéma vzorků je uvedeno na následujícím obrázku č. 24.



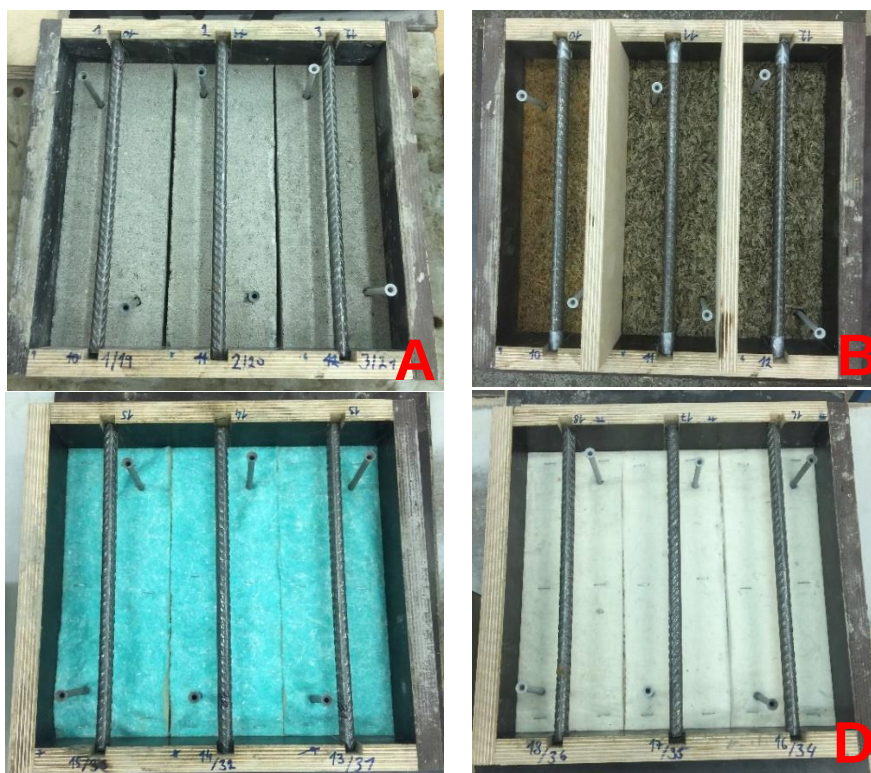
Obrázek 24: Návrh sestav bednicích systémů

Bednění bylo tvořeno (viz obr. 24):

- překližovanou deskou s geotextilií (překližovaná deska nemá svou schopnost, proto na ni byla mechanicky pomocí ruční sponkovačky připevněna geotextílie 200 g/m² a 800 g/m²),
- betonovými prefabrikáty,
- dřevocementovými prefabrikáty.

Bednění byla ze spodní strany a ze všech bočních stran opatřena epoxidovým nátěrem, aby nedošlo k vyplavení migračního inhibitoru koroze. Z horní strany byly do bednění navrtány hmoždinky, aby došlo k soudržnosti nadbetonávky s bedněním při manipulaci s dílci. Poté byla provedena aplikace migrujícího inhibitoru koroze.

Na takto nachystané bednění se položily formy, do kterých se vložily ocelové výztuže B 500B. Ocelová výztuž na obou koncích vyčnívala cca 10 mm, v přesahu byl v čele výztuže vyřezán vnitřní závit, aby bylo následně možné provádět měření elektrického odporu výztuže. Při výrobě byly konce ocelové výztuže zalepené vodotěsnou lepicí páskou, aby nedošlo k ucpání vnitřního závitu.



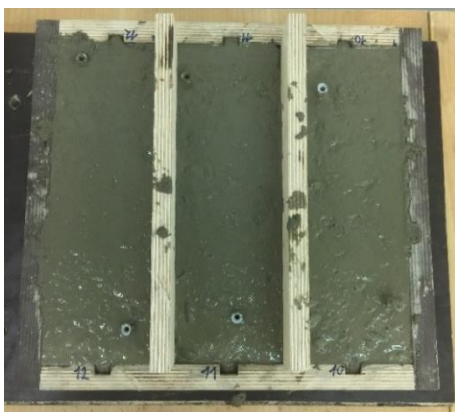
Obrázek 25: Jednotlivé sestavy bednicích dílců připravené na betonáž nadbetonávky;
 A – Bednicí dílec z betonového bednění,
 B – Bednicí dílec z dřevocementové bednění,
 C – Bednicí dílec z překližované desky a geotextílie s nižší gramáží,
 D – Bednicí dílec z překližované desky s geotextílií s vyšší gramáží

Nachystané formy se vybetonovaly betonem třídy C16/20 a C25/30. Složení betonu v tabulce 5.

Tabulka 5: Složení betonových směsí na výrobu nadbetonávky

Třída betonu	C16/20 X0, XC1-2 D _{max} 16 - S3	C25/30 X0, XC1-3, XD1, XA1, XF1 - D _{max} 16 - S3
CEM I 42,5 R	210	235
Popílek	70	70
Struska	80	70
0-4 Žabčice	880	850
4-8 Olbramovice	210	195
8-16 Olbramovice	645	655
VODA	175	185
Stacheplast BV	2,1	2,85

Následující den se odbednily a dílce byly uloženy **na 56 dní** (doba zrání betonu a doba pro umožnění migrace MCI k výztuži) do vlhkého prostředí. Postup výroby a ošetření nadbetonávky proběhl podle normy ČSN EN 206 + A1:2016. Během tohoto času zrání betonové směsi se předpokládala i migrace MCI k výztuži.



Obrázek 26: Betonáž nadbetonávky vzorků bednicích dílců a vzorky bednicích dílců po odbednění

U každého vzorku bednicího dílce musela být ochráněna vystupující ocelová výztuž z nadbetonávky před korozí působením agresivních látek při cyklování. Na každou výztuž byl našroubován šroub s O-kroužkem a následně byla výztuž zapouzdřena PVC zátkou a silikonem.



Obrázek 27: Uložení sestav bednicích dílců ve vlhkém prostředí po dobu 56 dnů zrání betonu



Obrázek 28: Zapouzdření výztuže PVC zátkou a silikonem



Obrázek 29: Uložení vzorků bednicích dílců v cyklovacím zařízení

8.3.3. Aplikace migrujícího inhibitoru koroze

Všechny sestavy bednicích dílců (bednění betonové, dřevocementové a z překližované desky s geotextílií) byly před betonáží uvnitř ošetřeny nátěrem migrujícího inhibitoru koroze. Jednalo se o inhibitory Sika FerroGard 903 PLUS a CORTEC MCI-2022. Ošetřena byla vždy část tvořena bedněním. U betonového a dřevocementového bednění byla natřena horní část dílce a u překližované desky s geotextílií byl inhibitor napuštěn do geotextílie.

Spotřebované natřené množství migrujícího inhibitoru na betonové a dřevocementové bednění bylo zvoleno jako doporučená hodnota dle technických listů výrobce a maximální možné, které bednění dokázalo pojmout. Kdežto u překližky, která není nasáková a kde byla s ohledem na vyšší nasákavost vložena geotextilie, byla spotřeba migrujícího inhibitoru koroze zvoleno maximální možné množství, které dokázala pojmout geotextilie.

Pro každou sestavu bednicích dílců z různých materiálů byly připraveny i referenční dílce bez obsahu migrujícího inhibitoru koroze, aby bylo možné porovnat vliv množství inhibitoru na korozní proces u výztuže. Spotřebovaná množství MCI pro jednotlivé vzorky bednicích dílců jsou uvedeno v tabulkách 6, 7 a 8.

Betonové bednicí dílce

Tabulka 6: Spotřeba MCI na betonové bednicí dílce

Označení dílce	Množství inhibitoru [kg/m²]	Inhibitor koroze	Nadbetonávka
1	0,000	Sika FerroGard 903 PLUS	C16/20
2	0,000		
3	0,500		
4	0,500		
5	2,100		
6	2,100		
19	0,000	Sika FerroGard 903 PLUS	C25/30
20	0,000		
21	0,500		
22	0,500		
23	2,100		
24	2,100		
37	0,000	CORTEC MCI-2022	C16/20
38	0,000		
39	0,285		
40	0,285		
41	0,570		
42	0,570		

Dřevocementové bednicí dílce

Tabulka 7: Spotřeba MCI na dřevocementové bednicí dílce

Označení dílce	Množství inhibitoru [kg/m ²]	Inhibitor koroze	Nadbetonávka
7	0,000	Sika FerroGard 903 PLUS	C16/20
8	0,000		
9	1,500		
10	1,500		
11	8,820		
12	8,820		
25	0,000	Sika FerroGard 903 PLUS	C25/30
26	0,000		
27	1,500		
28	1,500		
29	8,820		
30	8,820		
43	0,000	CORTEC MCI-2022	C16/20
44	0,000		
45	1,500		
46	1,500		
47	8,820		
48	8,820		

Bednicí dílec z překližované desky s geotextílie

Tabulka 8: Spotřeba MCI na bednicí dílce z překližované desky a geotextílie

Označení dílce	Množství inhibitoru [kg/m ²]	Betonová směs	Inhibitor koroze
13	0,000	C16/20	Sika FerroGard 903 PLUS
14	1,240		
15	1,300		
16	0,000		
17	7,330		
18	6,800		
31	0,000	C25/30	Sika FerroGard 903 PLUS
32	1,240		
33	1,300		
34	0,000		
35	7,330		
36	6,800		
49	0,000	C16/20	CORTEC MCI-2022
50	1,240		
51	1,300		
52	0,000		
53	7,330		
54	6,800		

8.3.4. Cyklus zrychleného korozního testu

Po 56 dnech normálního zrání nadbetonávky byly všechny sestavy bednicích dílců vloženy do cyklovacího zařízení. Za médium pro proces koroze výztuže byl zvolen 5% roztok NaCl. Cyklus (24 hod) se skládal ze 16 hodin ponoru v roztoku NaCl a 8 hodin vysoušení. Cyklování bylo vždy po 30 dnech ukončeno za účelem měření míry koroze výztuže metodou měření elektrického odporu výztuže.



Obrázek 30: Zařízení pro zrychlené korozní zkoušky [22]

8.3.5. Měření elektrického odporu výztuže

Princip této metody je založen na sledování změn elektrického odporu výztuže v betonu (závislost průřezu výztuže a jeho změn v důsledku koroze na hodnotách protékajícího elektrického proudu). Celkem proběhla 4 měření po každém z ukončených cyklů na ohmmetru GOM-805. Výsledný stejnosměrný odpor je stanoven jako průměr ze 100 dílčích měření odporů výztuže.



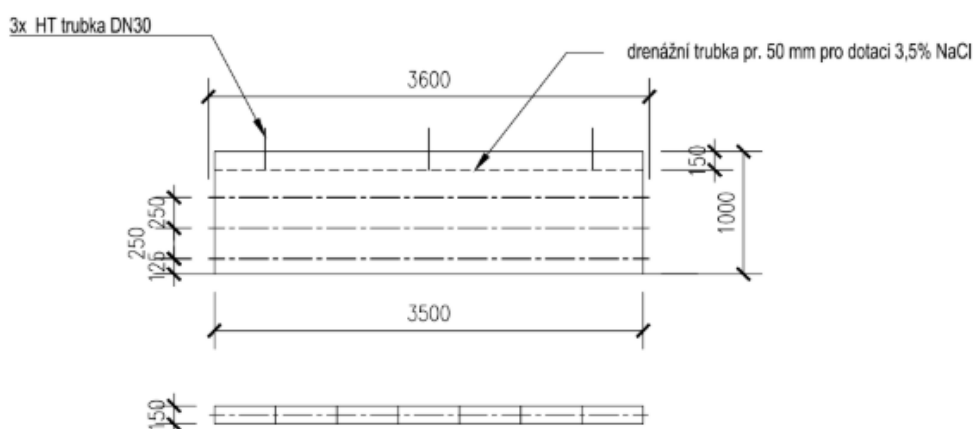
Obrázek 31: Měření elektrického odporu přístrojem GOM-805

8.4. ETAPA 4 – DLOUHODOBÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI PROTIKOROZNÍ OCHRANY NA REFERENČNÍ STAVBĚ

8.4.1. Návrh zkušebních stěn

V prostorách výzkumného centra AdMaS Fakulty stavební VUT v Brně byly vystavěny zkušební stěny o délce 3500 mm a výšce 1000 mm. Jednalo se o tyto typy stěn:

- stěna z betonového ztraceného bednění (28x betonová tvárnice o rozměru 500x150x250 mm),
- stěna z dřevocementových bednicích dílců (12x dřevocementová tvárnice o rozměru 1050x150x250 mm),
- stěna s bedněním z OSB desky a geotextílie,
- referenční železobetonová stěna.



Obrázek 32: Návrh zkušební stěny

Po vystavění všech bednění byl do všech stěn kromě referenční stěny aplikován migrující inhibitor koroze Sika FerroGard 903 PLUS. Na betonové a dřevocementové bednění byl z vnitřní strany aplikován nástřikem a z vnější strany nátěrem pomocí válečku. Na bednění z OSB desky a geotextílie byl inhibitor aplikován na geotextílii pomocí válečku.

Tabulka 9: Spotřeba MCI na zkušebních stěnách

Typ stěny	Spotřeba MCI [kg/m ²]	
	Vnitřní stěna	Vnější stěna
Betonové bednění	1,33	0,67
Dřevocementové bednění	1,33	0,58
Bednění z OSB a geotextílie	2,30	0,00
Referenční stěna	0,00	0,00

Do každé stěny byly po aplikaci MCI vloženy 3 ks ocelové výztuže B 500B o průměru 12 mm a délce 3250 mm (referenční železobetonová stěna) a 3600 mm (stěna z betonového ztraceného bednění, stěna z dřevocementových bednicích dílců, stěna s bedněním z OSB desky a geotextílie). Jednotlivé výztuže byly po výšce v rozmezí 250 mm. Výztuže byly vloženy tak, aby na každé straně vyčnívaly 50 mm. V čele každé výztuže byl proveden vnitřní závit M6 pro osazení šroubů. Závity umožňují průběžné měření elektrického odporu. Před uložením výztuží byly zjištěny jejich hmotnosti.

Tabulka 10: Hmotnosti výztuží

Označení výztuže	Hmotnost [kg]
1	3,32
2	3,27
3	2,78
4	3,28
5	3,29
6	3,26
7	2,78
8	3,58
9	2,77
10	3,21
11	3,30
12	3,19

Umístění výztuží:

- A. stěna z betonového ztraceného bednění – výztuže (zespodu) č. 8, 10, 12
- B. stěna z dřevocementových bednicích dílců – výztuže (zespodu) č. 7, 9, 3
- C. stěna s bedněním z OSB desky a geotextílie – výztuže (zespodu) č. 6, 4, 2
- D. referenční železobetonová stěna – výztuže (zespodu) č. 11, 1, 5

Všechny stěny se vybetonovaly betonem třídy C16/20. Beton byl zhutněn ponorným vibrátorem.

Do každé stěny z důvodu urychlení korozivního procesu výztuže byla u horní hrany stěny vložena perforovaná trubka o průměru 50 mm. Po 28 dnech zrání betonu byl přes trubku do všech stěn aplikován 4% roztoku NaCl, který se gravitačně prosytil celou konstrukcí stěn.

Na jednotlivých stěnách budou v průběhu řešení prováděny příslušná elektrochemická měření pro monitorování procesu koroze výztuže.

A. Stěna z betonového ztraceného bednění



Obrázek 33: Betonáž betonového ztraceného bednění



Obrázek 34: Betonové bednění po aplikaci MCI s uloženými výztužemi připravené na betonáž



Obrázek 35: Vybetonované ztracené bednění

B. Stěna z dřevocementových bednicích dílců



Obrázek 36: Aplikace MCI na vnější stěnu dřevocementového bednění



Obrázek 37: Vybetonované dřevocementové bednění

C. Stěna s bedněním z OSB desky a geotextílie



Obrázek 38: Připravené bednění z OSB desek a geotextílie na aplikaci MCI



Obrázek 39: Aplikace MCI na geotextílii

D. Referenční železobetonová stěna



Obrázek 40: Připravené systémové bednění na betonáž referenční železobetonové stěny



Obrázek 41: Betonáž a hutnění železobetonové stěny

9. VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

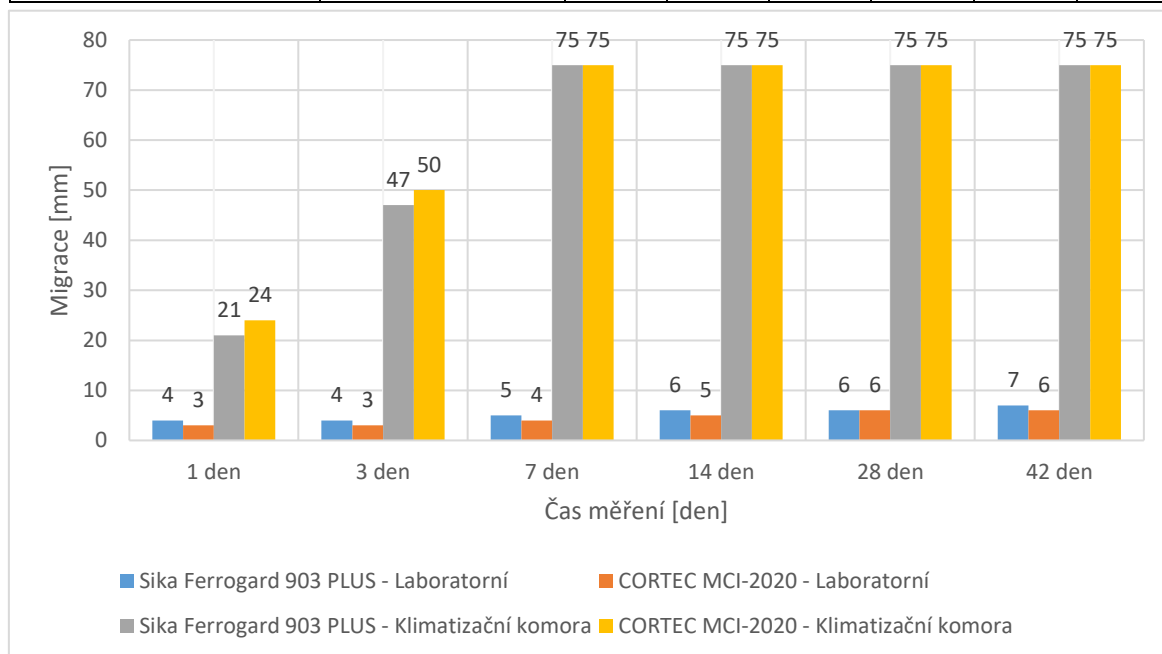
9.1. ETAPA 1 – MĚŘENÍ MIGRACE INHIBITORŮ KOROZE

9.1.1. Migrace inhibitoru koroze

Měření migrace inhibitoru koroze probíhalo na zkušebních dílcích při dvou vlhkostních stavech v přesně stanovených časových intervalech. Jednotlivé výsledky zjištěné za využití fluoreskujících reagentů aminů s dansylchloridem byly odměřovány a výsledky jsou uvedeny v následující tabulce 7.

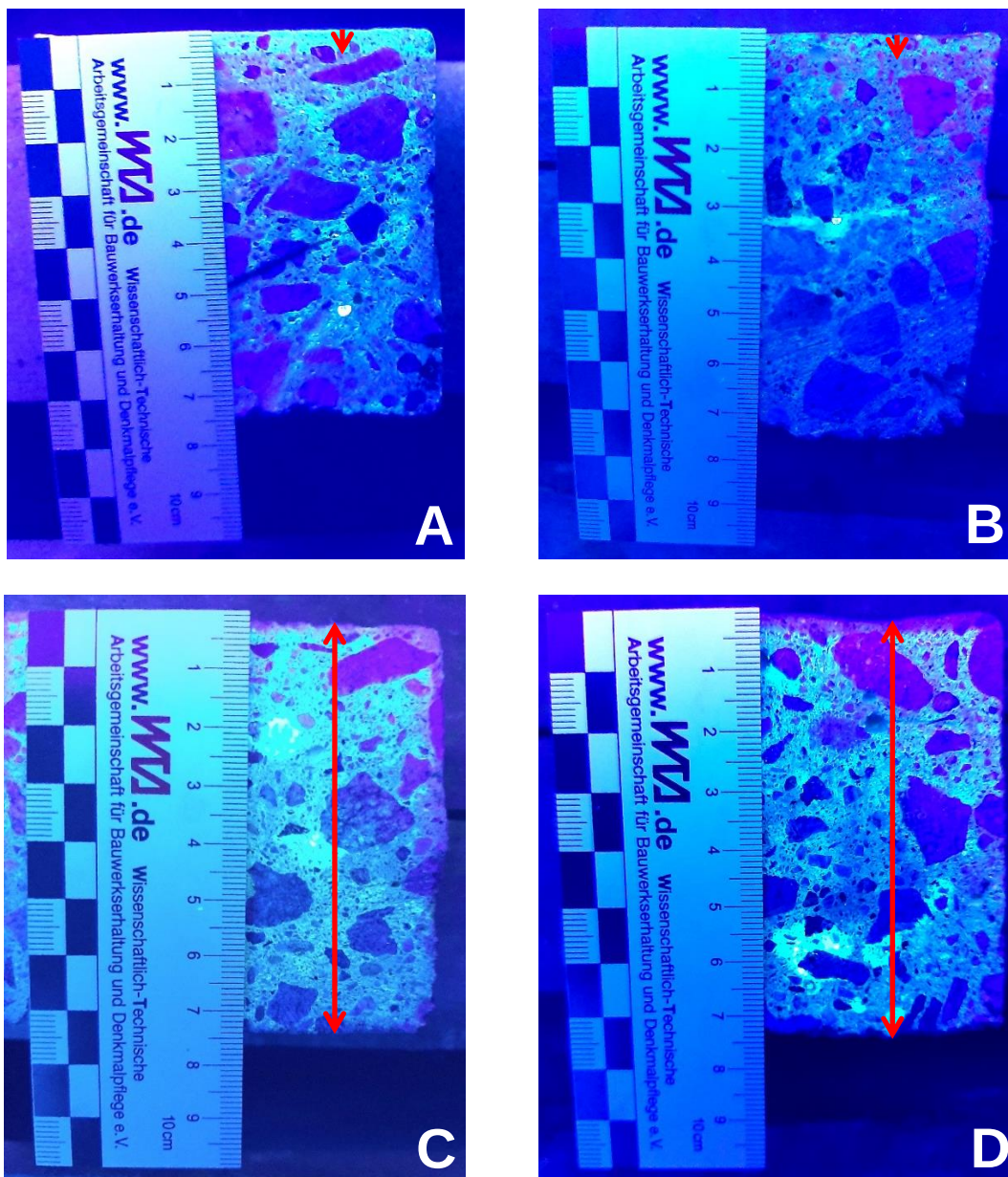
Tabulka 11: Naměřené hodnoty migrace inhibitoru koroze v čase

Uložení	Migrační inhibitor koroze	Migrace [mm]					
		1 den	3 den	7 den	14 den	28 den	42 den
Laboratorní (vlhkost dílce 2,0 %)	Sika FerroGard 903 PLUS	4	4	5	6	6	7
	CORTEC MCI-2020	3	3	4	5	6	6
Klimatizační komora (vlhkost dílce 8,4 %)	Sika FerroGard 903 PLUS	21	47	75	75	75	75
	CORTEC MCI-2020	24	50	75	75	75	75



Graf 1: Hloubka migrace inhibitoru koroze v čase při různých vlhkostních stavech

Migrace inhibitoru koroze na bázi aminoalkoholů, tak i silano-siloxanů byla vyšší u dílců s vyšší mírou saturace vlhkosti. Již po 7 dnech oba inhibitory dosáhly plné penetrace dílcem, tj. 75 mm. Na základě vyššího obsahu vlhkosti v dílci dochází ve větší míře ke kapilárním jevům, na jejichž principu převážně fungují použité migrující inhibitory koroze. Inhibitor společně s vlhkostí tak migruje skrze pórovou strukturu betonového dílce. Dílce uložené v laboratorních podmínka z důvodu nízké vlhkosti dosáhly migrace kolem 7 mm za 42 dní.



Obrázek 42: Měření migrace inhibitoru koroze pomocí ultrafialového záření po 7 dnech;
A – Sika FerroGard 903 PLUS (Laboratorní),
B – CORTEC MCI-2022 (Laboratorní),
C – Sika FerroGard 903 PLUS (Klimatizační komora),
D – CORTEC MCI-2022 (Klimatizační komora)

9.2. ETAPA 2 – OVĚŘENÍ INHIBIČNÍCH VLASTNOSTÍ MIGRUJÍCÍCH INIBITORŮ KOROZE

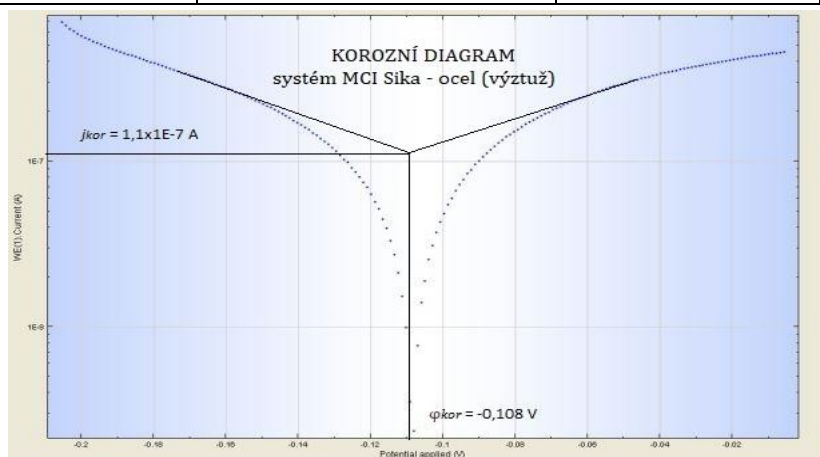
9.2.1. Polarizační měření

Vodný roztok

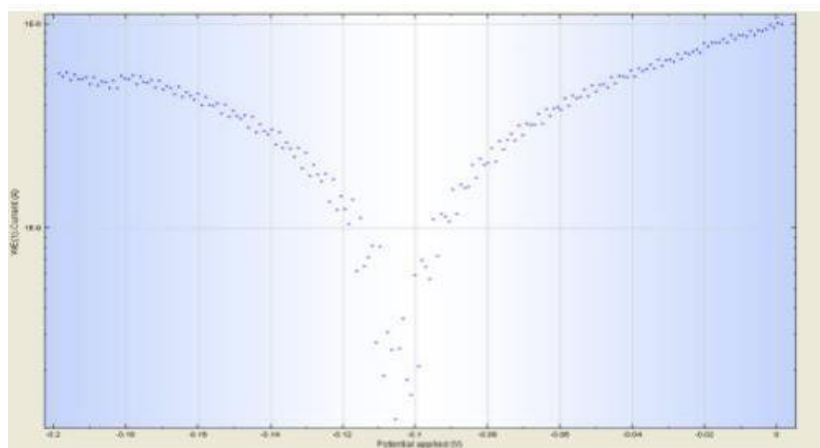
Měření polarizačních křivek probíhalo na zkušebních vzorcích z oceli B 500B a oceli 11 370 ve vodném roztoku. Měřeny byly korozní potenciály, na základě nichž bylo možné určit inhibiční účinnost vybraných migrujících korozních inhibitorů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12 a zobrazeny v grafech 2 a 3.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty korozních potenciálů po 60 dnech při nepřetržitém ponoru

MCI	Korozní potenciál ϕ_{kor} [V]	Korozní proudová hustota j_{kor} [A]	Použitý materiál
Ocel primárním přechodu Fe $\rightarrow$ Fe ²⁺	-0,440		
Sika FerroGard 903 PLUS	-0,108	1,1.E-7	B500B
Sika FerroGard 903 PLUS	-0,106	1,1.E-9	11 370 (rez)
CORTEC MCI-2022	-0,208	4,9.E-7	B500B



Graf 2: Korozní diagram systému Sika FerroGard 903 PLUS – ocel B500B, povrch upraven

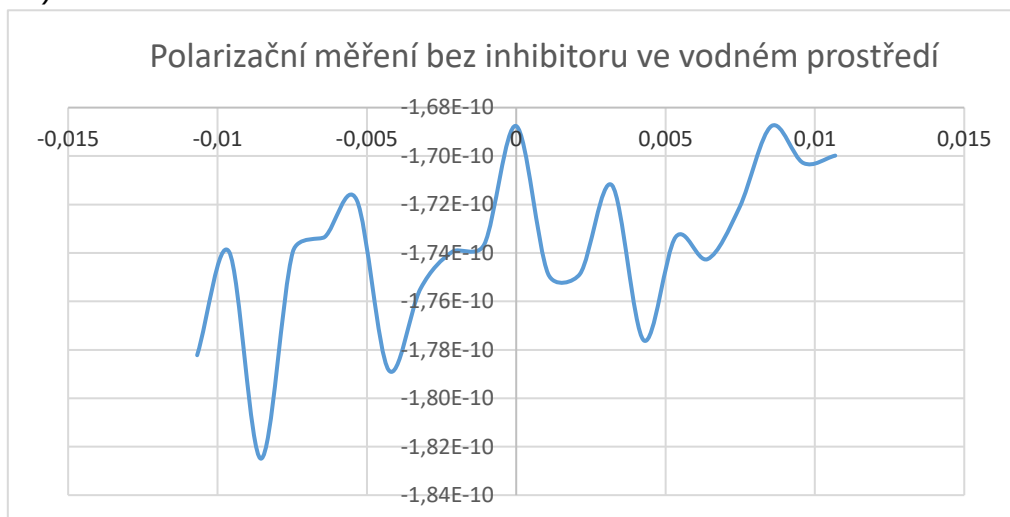


Graf 3: Korozní diagram systému Sika FerroGard 903 PLUS – ocel 11 370, povrch částečně zkorodovaný

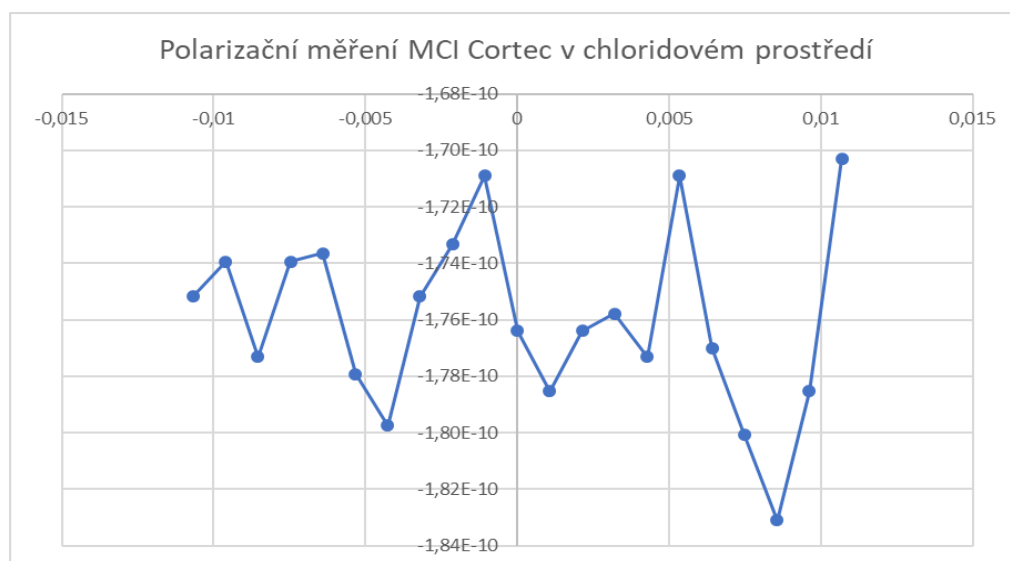
Vyhodnocení polarizačních křivek pomocí Tafelových přímků naznačuje, že oba typy MCI se vyznačují vysokou inhibiční účinností i na zkorodovaném povrchu. Korozní potenciál φ_{kor} je opět, jako v případě čistých povrchů, posunut z potenciálu železa při primárním přechodu $Fe \rightarrow Fe^{2+}$ z hodnoty -0,440 V k pozitivním hodnotám. Korozní proudová hustota j_{kor} je v obou případech též velmi nízká.

Vliv chloridového prostředí

Hodnocení inhibiční účinnosti vybraných typů MCI v chloridovém prostředí (0,05 mol NaCl) bylo provedeno na dvou měřeních za použití metody polarizačního odporu. První polarizační měření probíhalo ve vodném prostředí bez obsahu MCI (graf 4) a druhé měření ve vodném prostředí s obsahem CORTEC MCI-2022 (graf 5).



Graf 4: První měření – průběh polarizační křivky, chování oceli ve vodném prostředí bez obsahu MCI v blízkém okolí korozního potenciálu



Graf 5: Druhé měření – průběh polarizační křivky, chování oceli ve vodném prostředí s obsahem 0,05 mol NaCl a inhibitoru CORTEC MCI-2022 v blízkém okolí korozního potenciálu

Polarizační chování oceli v blízkém okolí korozního potenciálu neodpovídá předpokládanému lineárnímu průběhu. U vzorků sice charakter průběhu lze označit za známý jev kolísání vlivem pittingové koroze, ale hodnoty potenciálů i hodnoty proudových hustot neodpovídají ani řádově hodnotám měřených u systémů vodného prostředí s obsahem korozních stimulátorů bez i za přítomnosti inhibitoru. Lze uvažovat, že vliv pittingové koroze je příčinou nevhodnosti této metody, a že je nezbytná kalibrace vlastní polarizační soustavy a upřesnění metodiky hodnocení. Z tohoto důvodu bylo měření pozastaveno a pozornost byla věnována hodnocení inhibiční účinnosti MCI inhibitorů v rámci ponorových a polo-ponorových zkoušek.

9.2.2. Ponorová zkouška

Vliv koncentrace MCI na inhibiční účinnost v prostředí s Cl⁻

Účinnost MCI byla zjištěna pomocí ponorové zkoušky a faktorového pokusu. Cílem faktorového pokusu bylo experimentálně stanovit a vypočítat statistickou významnost jednotlivých faktorů. Při faktorovém pokusu byla porovnávána koncentrace migrujícího inhibitoru koroze, vliv obsahu vodné nanodisperze polysiloxanu a druh MCI.

Aby bylo možné porovnat vliv koncentrace migrujícího inhibitoru, byly použity rozdílné koncentrace inhibitoru SIKA a CORTEC.

Tabulka 13: Měření inhibiční účinnosti MCI ponorovou zkouškou (60 dnů při nepřetržitém ponoru)

Kombinace faktorů				Inhibiční účinnost J [%]
Typ MCI	Varianta	Koncentrace MCI [% hm.]	Koncentrace polysiloxan [% hm.]	
CORTEC MCI-2022	C1B1A1	3	0	39,4
	C1B1A2	3	0,5	41,3
	C1B2A1	8	0	41,2
	C1B2A2	8	0,5	82,8
Sika FerroGard 903 PLUS	C2B1A1	0,6	0	Stimulace koroze
	C2B1A2	0,6	0,5	Stimulace koroze
	C2B2A1	1,6	0	Stimulace koroze
	C2B2A2	1,6	0,5	42,1



Obrázek 43: Vliv zvýšení koncentrace inhibitoru CORTEC MCI-2022 z 3 % hm. na 8 % hm. ve vodném prostředí s obsahem chloridů



Obrázek 44: Vliv zvýšení koncentrace inhibitoru Sika FerroGard 903 PLUS z 0,6 % hm. na 1,6 % hm. ve vodném prostředí s obsahem chloridů

Vliv obsahu vodné nanodisperze polysiloxanu na inhibiční účinnost je méně významný, nicméně je mírně pozitivní. Příznivě se projevuje zejména u vyšších koncentrací obou MCI.

Vliv koncentrace migrujícího inhibitoru koroze je v systému celkově vysoce pozitivní. Je zřejmé, že zvolené nižší koncentrace MCI v chloridovém prostředí lze považovat za podkritické, může docházet dokonce ke stimulaci koroze. Inhibice je při uvedené koncentraci na povrchu nerovnoměrná, korozní proces probíhá pouze v určitých lokalitách povrchu a vyznačuje se místní hloubkovou korozí.

9.3. ETAPA 3 – NÁVRH BEDNICÍCH DÍLCŮ S PROTIKOROZNÍ OCHRANOU

Inhibitor Sika FerroGard 903 PLUS

Betonové bednicí dílce

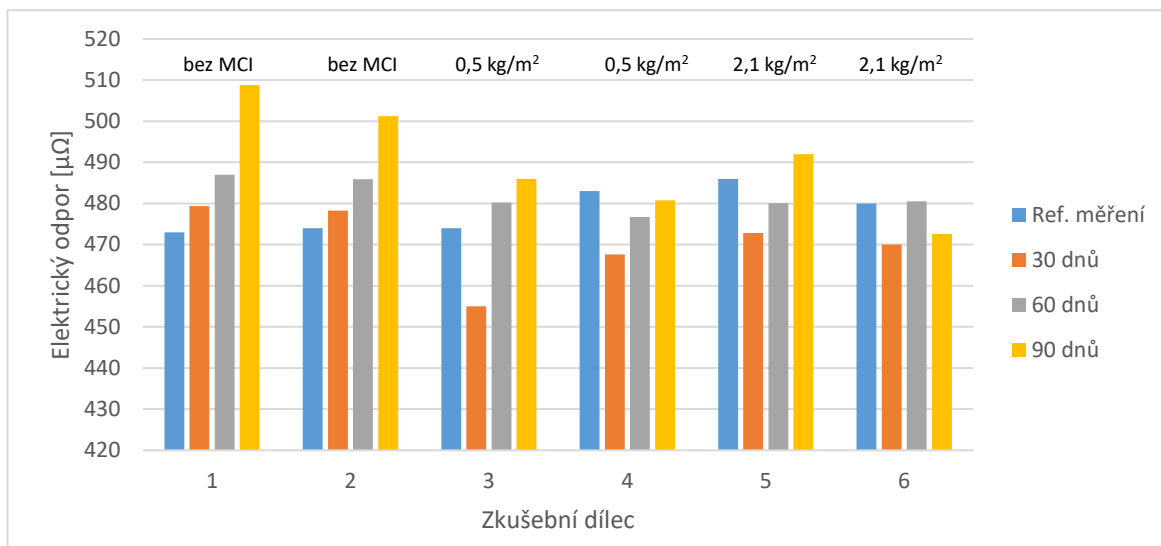
V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích betonových bednicích dílců s nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a C25/30, kde spodní část tvořena bedněním sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze Sika FerroGard 903 PLUS. Hodnoty elektrického odporu výztuže změřeného po jednotlivých časových intervalech cyklování 5% prostředí NaCl jsou uvedeny v následujících tabulkách 14 a 15 a v grafech 6 a 7.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

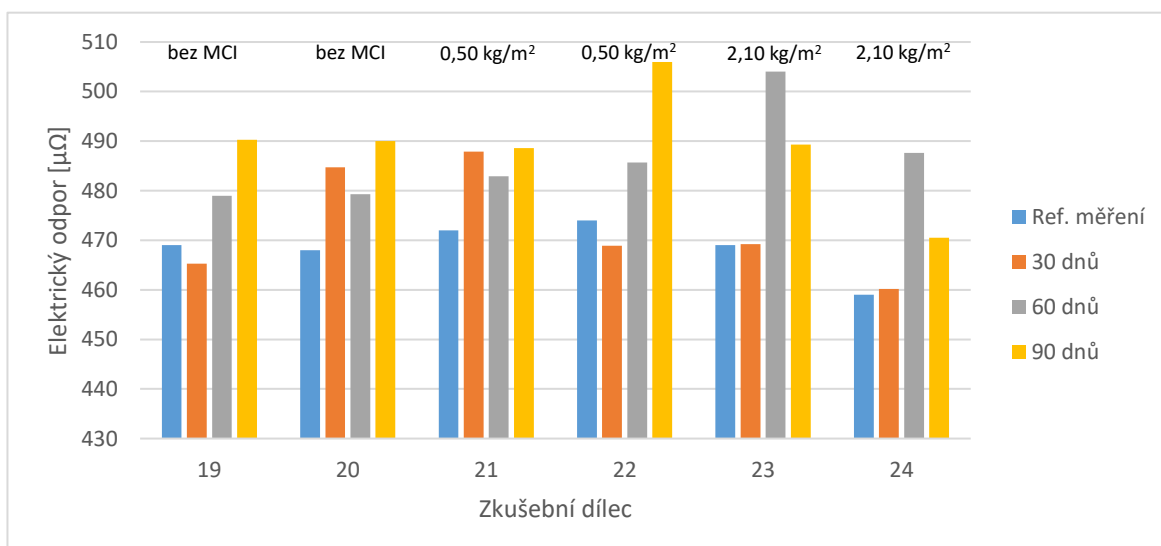
Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
1	C16/20	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	473	479	487	509
2			0,000	474	478	486	501
3			0,500	474	455	480	486
4			0,500	483	468	477	481
5			2,100	486	473	480	492
6			2,100	480	470	481	473

Tabulka 15: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
19	C25/30	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	469	465	479	490
20			0,000	468	485	479	490
21			0,500	472	488	483	489
22			0,500	474	469	486	506
23			2,100	469	469	504	489
24			2,100	459	460	488	471



Graf 6: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibítorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B



Graf 7: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibítorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

Z naměřených hodnot je patrný pozitivní vliv inhibitoru na korozi ocelové výztuže. Vzorky s obsahem MCI (vz. č. 3, 4, 5, 6) dosahují nižších nárůstů hodnot elektrického odporu výztuže než referenční vzorky bez obsahu MCI (vz. č. 1, 2). Nárůst el. odporu u dílců s obsahem MCI 1,2-2,5 % a u referenčních bez MCI 5,7-7,6 %. Lze tedy předpokládat zpomalení procesu koroze ocelové výztuže působením MCI.

U vzorků s nadbetonávkou z betonu vyšší pevnostní třídy má obsah MCI relativně pozitivní vliv. U dílců s obsahem MCI (vz. č. 21, 23, 24) dochází k nárůstu el. odporu o 2,5-4,3 %, pouze u dílce č. 22 došlo k nárůstu el. odporu o 6,8 %, což je více než 4,5-4,7 % jako u referenčních dílců bez obsahu MCI. U všech předchozích dílců s obsahem MCI (3, 4, 5, 6, 21, 23, 24) byl vliv na korozi pozitivní. Je tedy možné, že dílec č. 22 byl nějak porušen nebo došlo k chybě při měření.

Vliv zvýšeného množství inhibitoru se nepotvrdil, výsledky jsou téměř stejné u dílců s předepsaným množstvím MCI, tak i se zvýšeným množstvím MCI.

Dřevocementový bednicí dílce

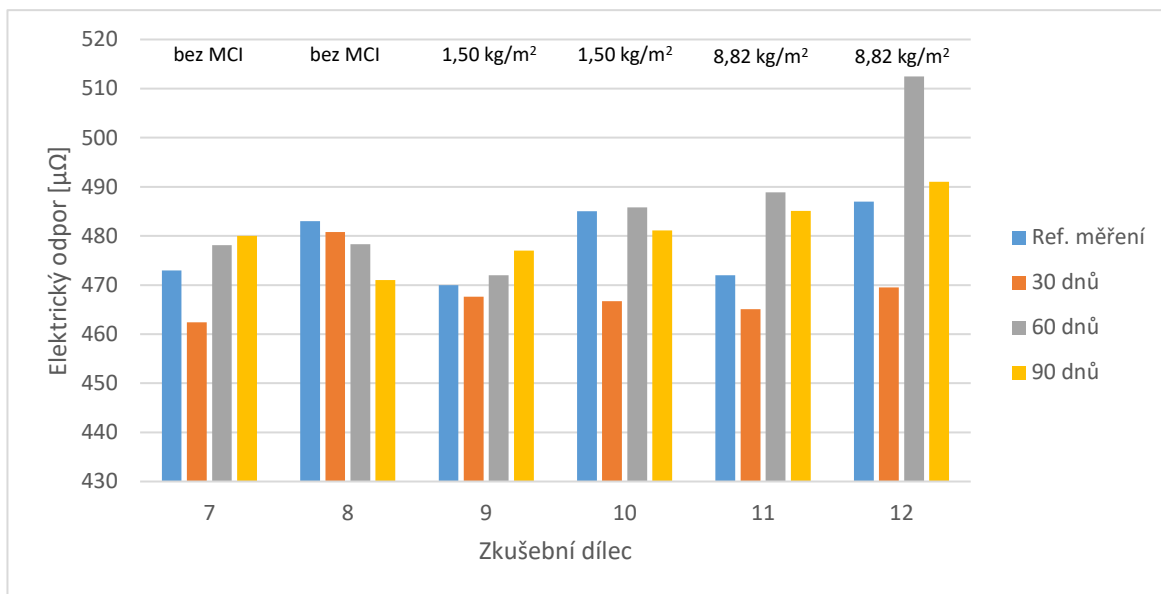
V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích dřevocementových bednicích dílců s nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a C25/30, kde část tvořena bedněním sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze Sika FerroGard 903 PLUS. Hodnoty elektrického odporu výztuže změřeného po jednotlivých časových intervalech u všech vzorků jsou uvedeny v následujících tabulkách 16 a 17 a v grafech 8 a 9.

Tabulka 16: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

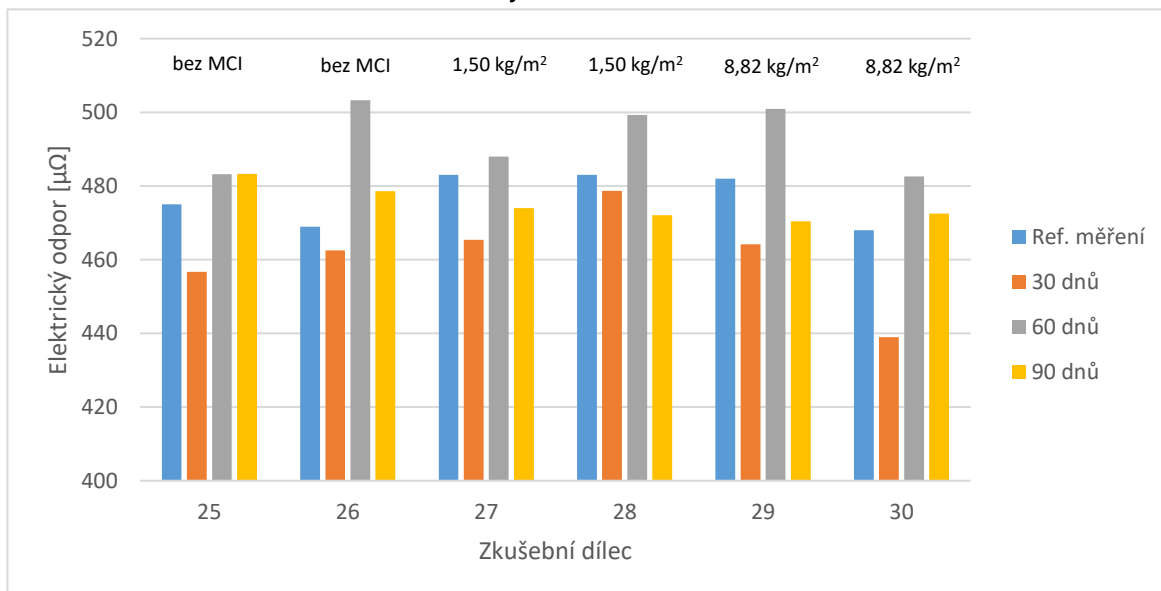
Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
7	C16/20	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	473	462	478	480
8			0,000	483	481	478	471
9			1,500	470	468	472	477
10			1,500	485	467	486	481
11			8,820	472	465	489	485
12			8,820	487	470	513	491

Tabulka 17: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
25	C25/30	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	475	457	483	483
26			0,000	469	463	503	479
27			1,500	483	465	488	474
28			1,500	483	479	499	472
29			8,820	482	464	501	470
30			8,820	468	439	483	473



Graf 8: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B



Graf 9: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

U dřevocementových dílců s obsahem MCI (vz. č. 9, 10, 11, 12, 27, 28, 29, 30) nebyl po 3 cyklech zrychleného korozního testu prokázán pozitivní vliv MCI na korozi ocelové výztuže. Migrace MCI k výztuži nebyla možná s největší pravděpodobností z důvodu obsahu příliš velkých pórů ve struktuře dřevocementového dílce, a tedy fixaci MCI v dřevocementové struktuře.

Bednicí dílce z překližované desky a geotextílie

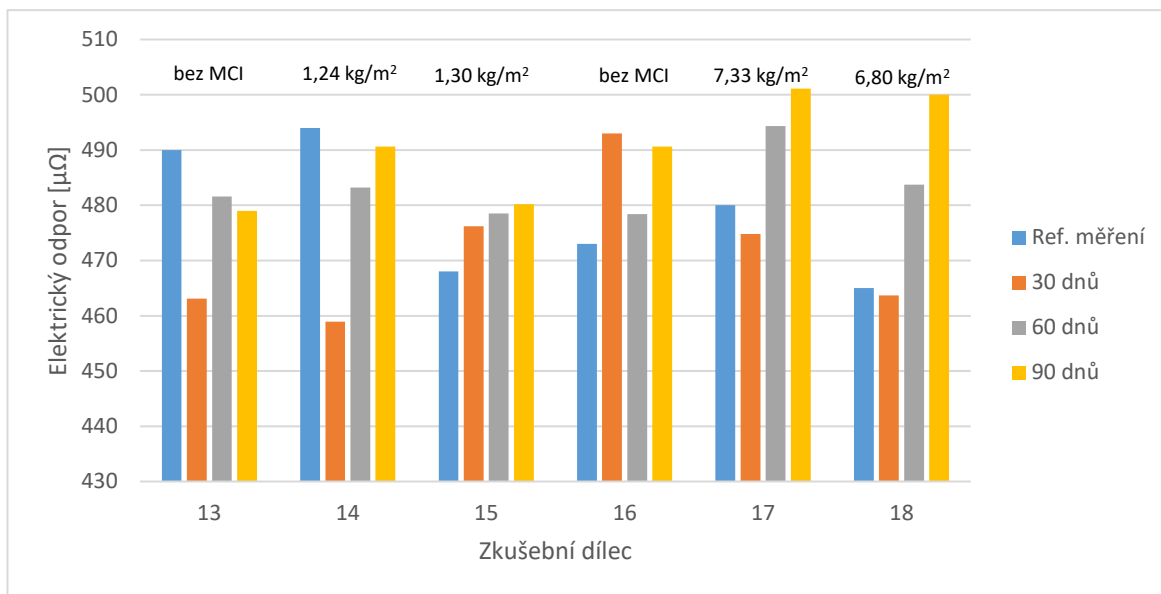
V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích bednicích dílců z překližované desky a geotextílie s nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a C25/30, kde část tvořená bedněním sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze Sika FerroGard 903 PLUS. Hodnoty elektrického odporu výztuže změřeného po jednotlivých časových intervalech jsou uvedeny v následujících tabulkách 18 a 19 a grafech 10 a 11.

Tabulka 18: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

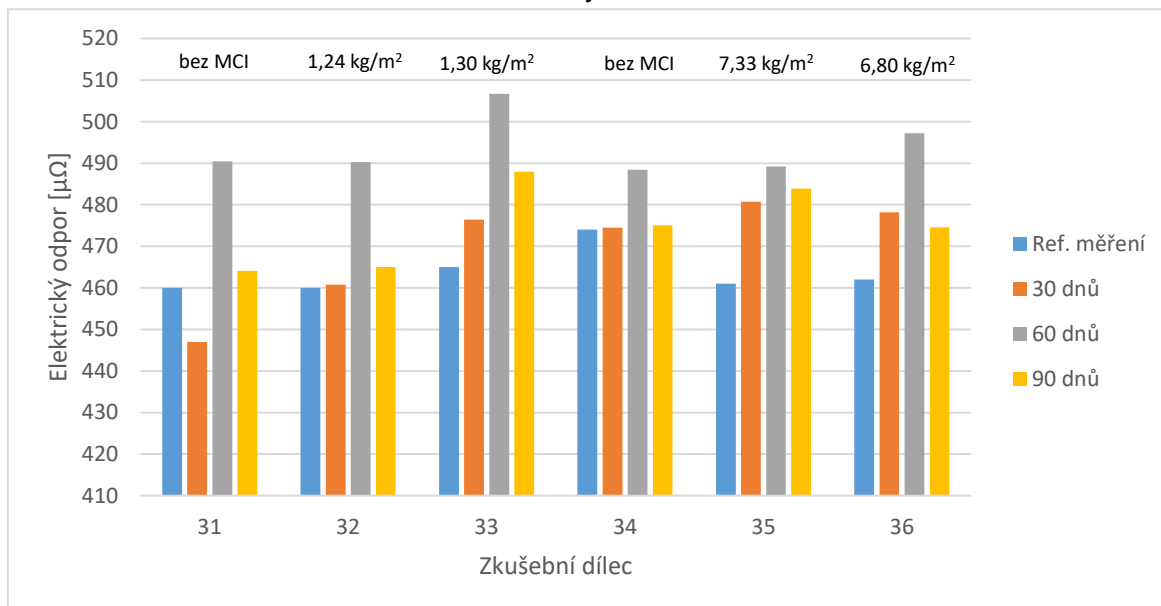
Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
13	C16/20	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	490	463	482	479
14			1,240	494	459	483	491
15			1,300	468	476	479	480
16			0,000	473	493	478	491
17			7,330	480	475	494	501
18			6,800	465	464	484	500

Tabulka 19: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
31	C25/30	Sika FerroGard 903 PLUS	0,000	460	447	490	464
32			1,240	460	461	490	465
33			1,300	465	476	507	488
34			0,000	474	475	488	475
35			7,330	461	481	489	484
36			6,800	462	478	497	475



Graf 10: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextilie s inhibítorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B



Graf 11: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextilie s inhibítorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B

Bednicí dílce tvořené překližovanou deskou s geotextilií a obsahem MCI (vz. č. 14, 15, 17, 18, 32, 33, 35, 36) nevykazují zlepšení protikorozní ochrany. Tyto dílce dosahují nárůstu el. odporu o 1,1-7,5 %, což je ve většině případů více než u referenčních dílců bez obsahu MCI (vz. č. 13, 16, 31, 34) 0,2-3,7 %.

Je možné, že se u dílců s obsahem MCI protikorozní ochrana projeví při dalších měřeních, doposud však ke zlepšení nedošlo.

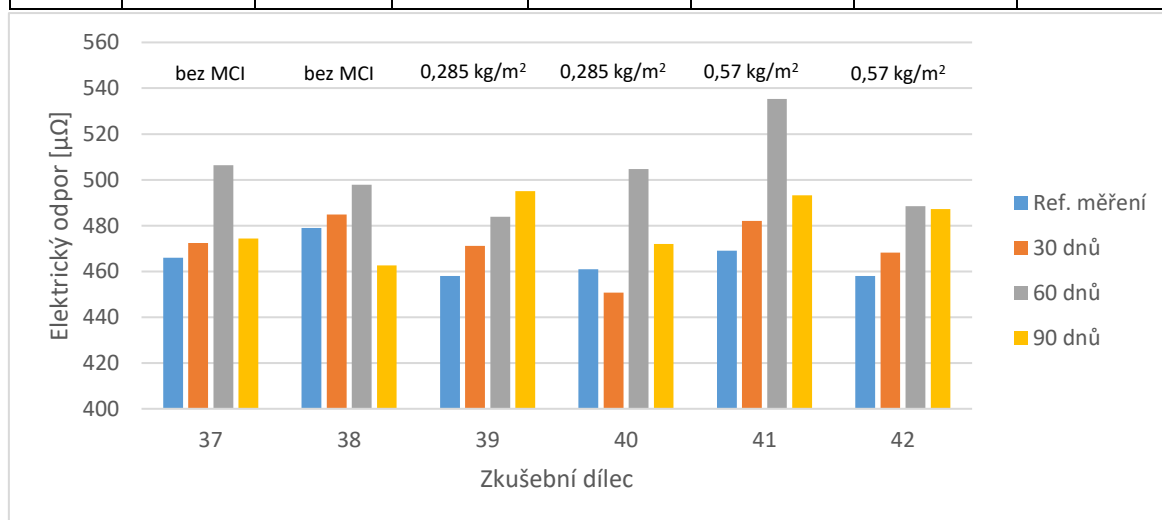
Inhibitor CORTEC MCI-2022

Betonové bednicí dílce

V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích betonových bednicích dílců s nadbetonávkou z betonu třídy C16/20, kde spodní část tvořena bedněním sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze CORTEC MCI-2022. Hodnoty elektrického odporu výztuže změřeného po jednotlivých časových intervalech cyklování 5% prostředí NaCl jsou uvedeny v následujících následující tabulce 20 a grafu 12.

Tabulka 20: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El .odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
37	C16/20	CORTEC MCI-2022	0,000	466	472	506	474
38			0,000	479	485	498	463
39			0,285	458	471	484	495
40			0,285	461	451	505	472
41			0,570	469	482	535	493
42			0,570	458	468	489	487



Graf 12: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

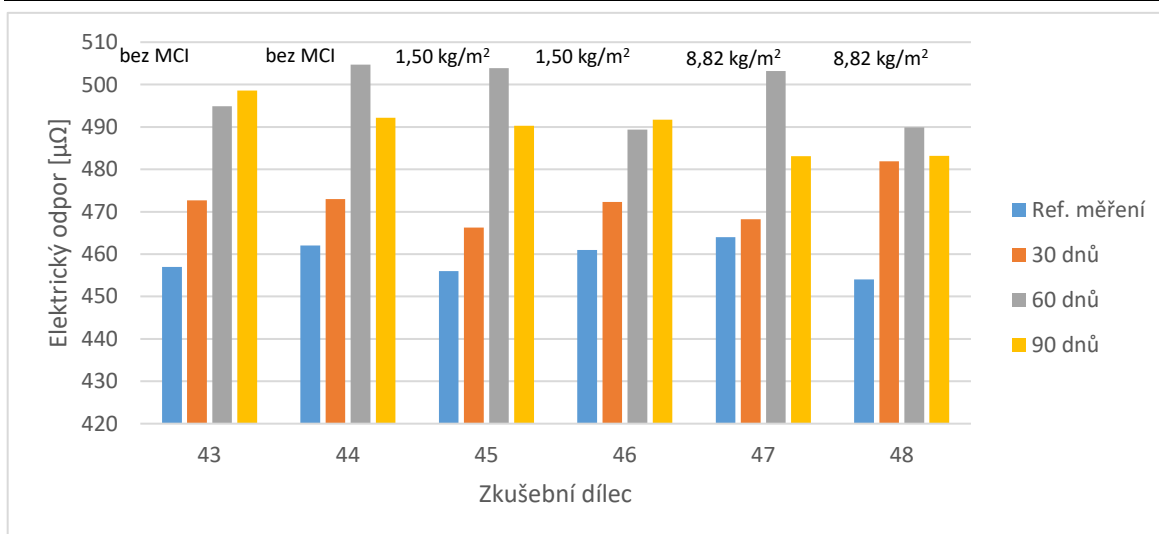
Oproti referenčním dílcům (vz. č. 37, 38) je z naměřených hodnot patrné, že se protikorozní ochrana u dílců s obsahem MCI (vz. č. 39, 40, 41, 42) nezlepšila. Nárůst el. odporu u dílců s MCI je 2,4-8,1 %, u referenčních dílců bez MCI je nárůst el. odporu kolem 1,8 %.

Dřevocementové bednicí dílce

V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích dřevocementových bednicích dílců s nadbetónávkou z betonu třídy C16/20, kde část bednění sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze CORTEC MCI-2022. Hodnoty elektrického odporu změřeného po jednotlivých časových intervalech jsou uvedeny v následující tabulce 21 a grafu 13.

Tabulka 21: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetónávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
43	C16/20	CORTEC MCI-2022	0,000	457	473	495	499
44			0,000	462	473	505	492
45			1,500	456	466	504	490
46			1,500	461	472	489	492
47			8,820	464	468	503	483
48			8,820	454	482	490	483



Graf 13: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetónávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

Dílce s dřevocementovým bedněním s obsahem MCI (vz. č. 45, 46, 47, 48) vykazují nárůst el. odporu o 4,1-6,7 % oproti referenčním dílcům bez obsahu MCI (vz. č. 43, 44), u kterých byl naměřen nárůst el. odporu 6,5-9,1 %.

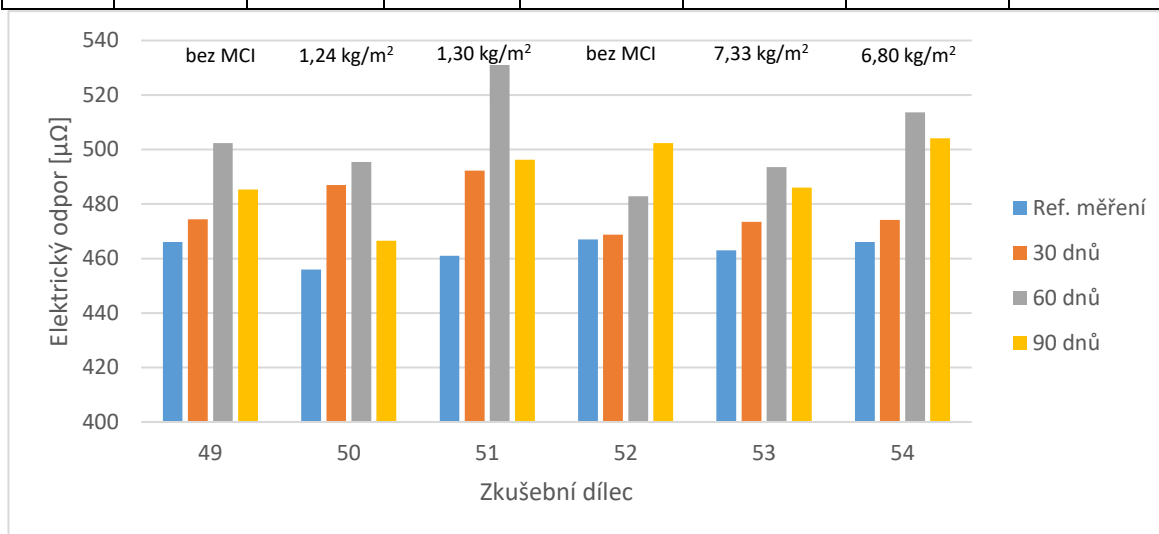
V tuto chvíli není možné určit vliv MCI na korozi ocelové výztuže.

Bednicí dílce z překližované desky a geotextílie

V této části probíhalo měření el. odporu na vzorcích bednicích dílců z překližované desky a geotextílie s nadbetonávkou z betonu třídy C16/20, kde část bednění sloužila jako základ pro aplikaci migrujícího inhibitoru koroze CORTEC MCI-2022. Hodnoty elektrického odporu změřeného po jednotlivých časových intervalech jsou uvedeny v následující tabulce 22 a grafu 14.

Tabulka 22: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

Ozn.	Betonová směs	Inhibitor koroze	Množství inhibitoru [kg/m ²]	El. odpor R [μΩ]			
				Ref. měření	30 dnů	60 dnů	90 dnů
49	C16/20	CORTEC MCI-2022	0,000	466	474	502	485
50			1,240	456	487	495	467
51			1,300	461	492	531	496
52			0,000	467	469	483	502
53			7,330	463	474	494	486
54			6,800	466	474	514	504



Graf 14: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B

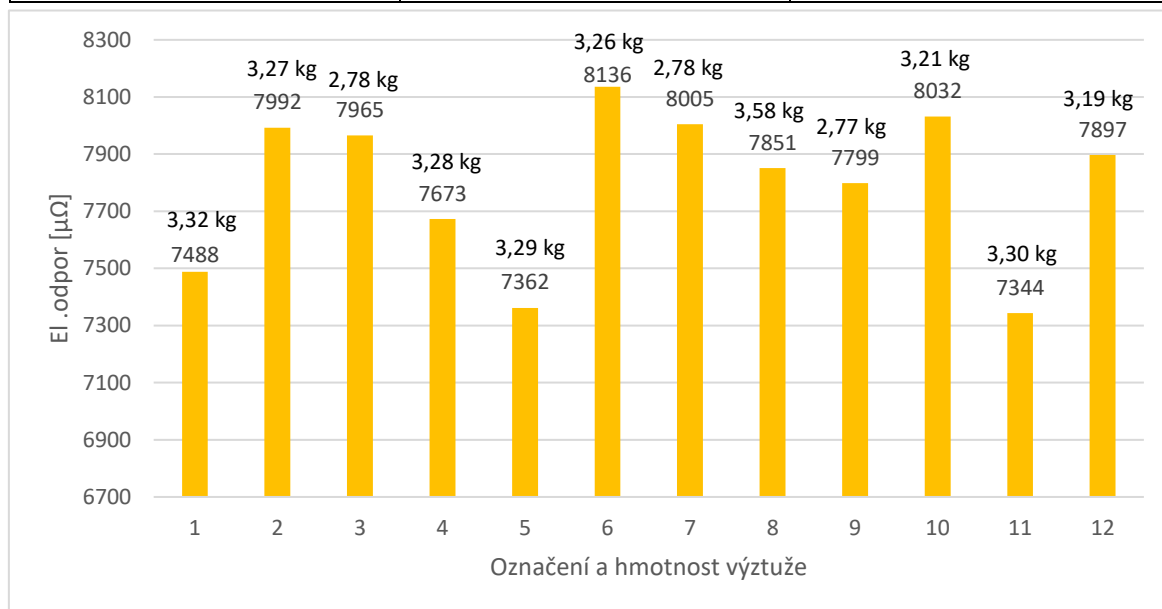
U všech dílců s bedněním z překližované desky a geotextílie (vz. č. 50, 51, 53, 54) nedochází ke snížení korozní rychlosti oproti referenčním dílcům bez obsahu MCI (vz. č. 49, 52) a nelze určit vliv na korozi ocelové výztuže. Na základě měření dochází u dílců s obsahem MCI k nárůstu el. odporu o 2,3-8,2 % a u referenčních bez MCI k nárůstu o 4,1-7,6 %

9.4. ETAPA 4 – DLOUHODOBÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI PROTIKOROZNÍ OCHRANY NA REFERENČNÍ STAVBĚ

Po vybudování zkušebních stěn a uplynutí předepsané doby tvrdnutí betonu, bylo započato v 12/2019 k měření vstupních hodnot elektrického odporu zabudované ocelové výztuže ve stěnách. Nadále se bude v měření pokračovat v přesně ve stanovených časových intervalech.

Tabulka 23: Naměřené hmotnosti hodnoty elektrického odporu ocelových výztuží

Označení výztuže	Hmotnost [kg]	El. odpor R [$\mu\Omega$]
1	3,32	7488
2	3,27	7992
3	2,78	7965
4	3,28	7673
5	3,29	7362
6	3,26	8136
7	2,78	8005
8	3,58	7851
9	2,77	7799
10	3,21	8032
11	3,30	7344
12	3,19	7897



Graf 15: Naměřené hmotnosti a hodnoty elektrických odporů ocelové výztuže

10. CELKOVÉ SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE

V první etapě praktické části diplomové práce byla po dobu 42 dní sledována migrace inhibitorů koroze (Sika FerroGard 903 PLUS na bázi aminoalkoholů a CORTEC MCI-2022 na bázi silano-siloxanů) ve struktuře betonu při různých vlhkostních stavech (míra saturace vlhkosti dílce 2,0 % a 8,4 %). Migrace inhibitoru koroze byla měřena na vyrobených betonových dílcích s využitím reakce aminových skupin s činidlem dansylchlorid v alkalickém prostředí.

Již po 7 dnech měření oba MCI penetrovali skrze celý dílec tj. 75 mm. Zde se potvrdil vliv kapilárních jevů na migraci MCI. Při vyšší vlhkosti dílce docházelo ve větší míře ke kapilárním jevům a MCI se rychleji dostal skrze pórovou strukturu betonu. Dílce s nižší vlhkostí dosáhly migrace pouze kolem 7 mm za 42 dní. Tento výsledek je způsobený právě nedostatečným působením kapilárních jevů.

Druhá etapa se zabírala ověřením inhibičních vlastností migrujících inhibitorů koroze (Sika FerroGard 903 PLUS a CORTEC MCI-2022). Pro toto ověření bylo zvoleno polarizační měření a ponorová zkouška.

Polarizačním měřením ve vodném roztoku bylo zjištěno, že oba typy MCI (různé chemické báze) se vyznačují vysokou inhibiční účinností, a to i na zkorodovaném povrchu.

Polarizační měření bylo provedeno i v chloridovém prostředí (0,05 mol NaCl). Polarizační chování oceli v blízkém okolí korozního potenciálu však neodpovídalo předpokladu. Hodnoty potenciálů ani proudových hustot se neshodovaly s předchozím měřením ve vodném roztoku. K tomuto jevu pravděpodobně došlo vlivem pittingové koroze, která je charakteristická kolísáním jednotlivých hodnot. Na základě tohoto bylo měření pozastaveno a dále se pokračovalo ponorovými zkouškami.

Ponorovou zkouškou bylo zjištěno, že množství MCI má vysoký vliv na inhibiční účinnost. Vyšší množství MCI mělo velmi pozitivní vliv na korozi ocelové výztuže. Naopak u nižšího množství MCI v chloridovém prostředí docházelo až ke stimulaci koroze.

Náplní třetí etapy bylo sledování vlivu účinnosti inhibitoru koroze na korozi zabudované ocelové výztuže. Účinnost inhibitoru v této etapě mohl ovlivnit druh bednění, chemické složení MCI, spotřeba MCI a pevnostní třída betonu nadbetonávky. Účinnost MCI byla sledována na jednotlivých sestavách bednicích dílců pomocí měření elektrického odporu ocelové výztuže.

Vliv druhu bednění na účinnost MCI se potvrdil. Pozitivní vliv na účinnost MCI byla nejvíce znatelná u betonového bednění, kde až na pár výjimek došlo ke snížení procesu koroze.

Naopak u dřevocementového bednění nedošlo ke zlepšení protikorozní ochrany a výsledné měření el. odporů byly naměřeny stejně jako u referenčních dílců bez obsahu MCI. Je pravděpodobné že další měření by prokázala zvýšení protikorozní ochrany, nicméně z důvodu příliš velkých pórů dřevocementových dílců by spíše došlo k fixaci MCI v jejich struktuře.

U bednicích dílců tvořených překližovanou deskou a geotextilií byly naměřené hodnoty el. odporů s obsahem i bez obsahu MCI téměř totožné, proto nebylo možné prokázat vliv těchto dílců na účinnost MCI.

Vliv chemického složení MCI na jejich účinnost nebyl zcela potvrzen. V předchozích etapách bylo zjištěno, že oba typy inhibitorů fungují téměř stejně, lze tedy předpokládat, že dlouhodobějším měřením by bylo dosaženo podobných výsledků u obou MCI. V této etapě však MCI na bázi aminoalkoholů (Sika FerroGard 903 PLUS) celkově dosahoval vyšší účinnosti než MCI na bázi silano-siloxanů (CORTEC MCI-2022), a proto byl vybrán pro použití ve 4. etapě.

Vliv množství MCI se zde však nepotvrdil. Naměřené hodnoty byly téměř stejné jako při použití předepsaného množství inhibitoru dle technického listu, tak i maximálního možného, které dílec dokázal pojmout.

Vliv druhu pevnostní třídy betonu nadbetonávky na migrační či inhibiční vlastnosti také nebyl potvrzen. U těchto běžných betonů, pravděpodobně nedochází k tak velkým rozdílům v pórové struktuře, přes kterou MCI migruje k ocelové výztuži.

U betonového a dřevocementového bednění lze zmínit jeho výhodu. Výstavba je méně časově náročná, protože se jedná o dílce, které do sebe přesně zapadají, ale nevýhodou je, že se dílce používají pouze pro zdění svislých konstrukcí a nemohou být použity například pro betonáž stropů a jiných konstrukcí. Naopak u bednění z překližované/OSB desky a geotextílie je hlavní výhodou, že se nejedná o prefabrikované dílce, a tudíž je možné si bednění navrhnout a sestavit pro jakýkoliv druh konstrukce.

Závěrečná čtvrtá etapa zahrnovala návrh a výstavbu zkušebních stěn z bednicích dílců s obsahem MCI (použit Sika FerroGard 903 PLUS) v prostorách výzkumného centra AdMaS, na kterých budou v průběhu řešení prováděna příslušná elektrochemická měření pro monitorování procesu koroze výztuže.

11. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověření migrace inhibitoru koroze při různých vlhkostních stavech, ověření inhibiční účinnosti migrujících inhibitorů několika metodami a sledování vlivu účinnosti inhibitoru na navržených sestavách bednicích dílců.

V první etapě byla provedena měření migrace inhibitoru při dvou vlhkostních stavech. Na základě výsledků byl potvrzen pozitivní vliv vyšší vlhkosti ztvrdlého betonu na migraci inhibitoru koroze.

Náplní druhé etapy bylo ověření účinnosti migrujícího inhibitoru koroze. Ověření probíhalo dvěma způsoby, a to polarizačním měření a ponorovou zkouškou. Za pomoci těchto dvou metod bylo dosaženo výsledku, který prokázal, že použité migrující inhibitory koroze disponují vysokou inhibiční účinností, ale při správném množství.

Účinnost migrujících inhibitorů koroze byla sledována na bednicích dílcích na různé materiálové bázi. Na základě měření elektrického odporu výztuže je možné jednoznačně určit, že záleží na materiálu bednění, ze kterého se migrující inhibitor koroze dostává dále skrze strukturu výplňového betonu k výztuži. V tomto případě se nejvíce osvědčilo betonové bednění, které mělo nejvyšší vliv na účinnost inhibitoru.

V rámci této etapy nebyl potvrzen vliv druhu či kvality výplňového betonu (nadbetonávka) na účinnost inhibitoru. Nebylo také potvrzeno, že vyšší množství inhibitoru znamená vyšší protikorozi ochranu, protože při použití vyššího množství inhibitoru bylo dosaženo stejných výsledků jako při použití doporučeného množství dle technického listu.

Závěrečnou částí bylo vybudování zkušebních stěn pro dlouhodobé měření a ověření účinnosti migrujících inhibitorů koroze v praxi.

Cíl diplomové práce byl splněn. Byla ověřena migrace inhibitoru při různých vlhkostních stavech, účinnost migrujících inhibitorů koroze a vlivy, které ovlivňují účinnost inhibitorů koroze.

SEZNAM LITERATURY

- [1] KUDLÁČEK, Ivan. *Koroze* [online]. Praha, b.r. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~kudlacek/EKP/09_koroze.pdf. ČVUT.
- [2] NĚMCOVÁ, Aneta a Bohumil PACAL. *Korozní zkoušení kovových materiálů*. Brno: Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [3] NOSEK, Vladimír. *Koroze a technologie povrchových úprav: Faktory koroze kovů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, b.r. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_KPU_PR_03_CZE_Nosek_Factory%20koroze_kovu.pdf
- [4] ČERNÝ, Miroslav. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1984, 264 s.
- [5] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2007, 156 s.
- [6] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Pavel ROVNANÍK a Richard KŘÍSTEK. *Stavební chemie: Degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- [7] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu a praxi*. 1. vyd. Praha: Europa Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 8086706191.
- [8] PLUHAŘ, J. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 552 s.
- [9] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, b.r., 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [10] HRSTKA, J. a B. MÍŠEK. *Koroze a povrchová úprava kovů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1973, 208 s.
- [11] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. 1. vyd. Praha: Academia, 1999, 438 s. ISBN 80-20006-71-0.
- [12] PROŠEK, T., P. NOVÁK a J. BYSTRIANSKÝ. Influence of heat flux and surface temperature on the intergranular corrosion of stainless steel. *Materials and Corrosion* 56. 2006, s. 312-317.
- [13] BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozní ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966, 719 s.
- [14] NOVÁK, P., J. BYSTRIANSKÝ a M. KOUŘIL. *Koroze a degradace materiálů* [online]. Praha, b.r. [cit. 2020-01-04].
- [15] MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav*. Ostrava: VŠB, 1987.
- [16] ŠULC, Radek. *Dělení koroze podle druhu napadení* [online]. Praha: FS ČVUT, 2008 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/prednes/Ch_predn13-Ko.pdf
- [17] MICHNA, Š. *Koroze a ochrana materiálů* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, Fakulta strojního inženýrství, b.r. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/opory/koroze_a_ochrana_materialu.pdf

- [18] NOVÁK, P. Koroze kovů. BENEŠOVÁ, Jaroslava. *Konzervování a restaurování kovů: ochrana předmětů kulturního dědictví z kovů a jejich slitin*. 1. vyd. Brno: Technické muzeum v Brně, 2011, s. 136-198, 648 s. ISBN 978-80-86413-70-9.
- [19] KOLÁŘ, Karel a Pevl REITERMAN. Koroze kovů. ASB [online]. Praha: FSv ČVUT, 2009 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/aktualne/nazory-a-rozhovory/koroze-kovu>
- [20] *Koroze podle druhu napadení materiálu* [online]. b.r. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2892825/>
- [21] NOVÁK, P. a J. BYSTRIANSKÝ. *Koroze a degradace kovových materiálů*. Praha: FCHT VŠCHT, b.r.
- [22] TARANZA, Luboš. *Vývoj nových typů kompozitů pro sanace betonů se zvýšenou ochranou výztuže*. Brno, 2006, 140 s.. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [23] MATOUŠ, Jan. Koroze kovových úložných zařízení a působení bludných proudů. *Profielektrika.cz* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/koroze-kovovych-uloznych-zarizeni-a-pusobeni-bludnych-proudu>
- [24] BILČÍK, Juraj. Diagnostika betonových konstrukcí. ASB [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/diagnostika-betonovych-konstrukci>
- [25] VANĚREK, Jan a Rostislav DROCHYTKA. *Aplikace moderních metod pro stanovení koroze výztuže v železobetonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2003.
- [26] *Podklady pro výuku* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>
- [27] ČSN EN ISO 17475: *Koroze kovů a slitin - Elektrochemické zkušební metody - Návod pro provádění potenciostatických a potenciodynamických polarizačních měření*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 32 s.
- [28] ČSN EN ISO 8044: *Koroze kovů a slitin - Základní termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 2016, 72 s.
- [29] MARKUŠOVÁ, K. *Elektrochemické metody*. Košice: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2000, 150 s.
- [30] ČSN EN 480-14: *Příklady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 14: Měření náchylnosti na korozi vyztužené oceli v betonu - Potenciostatická elektrochemická zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [31] *Stanovení korozní rychlosti elektrochemickými polarizačními metodami* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Stanoven%C3%AD%20korozn%C3%AD%20rychlosti%20elektrochemick%C3%BDmi%20metodami.pdf?redirected>

- [32] ČSN EN ISO 16773-1: *Nátěrové hmoty - Elektrochemická impedanční spektroskopie pro vzorky s povlaky s vysokou impedancí - Část 1: Termíny a definic.* Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [33] M.E. Orazem a B. TRIBOLLET. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, Wiley 2008. Pp. 155-162.
- [34] HUANG, H-H. *Electrochemical impedance spectroscopy study of strained titanium in fluoride media.* *Electrochimica Acta* 47, 2002, s. 2311-2318.
- [35] ČSN EN 61290-3-2: *Optické zesilovače - Část 3-2: Zkušební metody parametrů šumového čísla - Metoda analyzátoru elektrického spektra.* Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [36] VARNER, Miroslav. *Sledování koroze kovů měřením elektrochemického šumu a měřením akustické emise* [online]. Blansko: ČKD Blansko Strojírny, b.r., 5 s. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18334507-Sledovani-koroze-kovu-merenim-elektrochemickeho-sumu-a-merenim-akusticke-emise.html>
- [37] AGARWAL, P. a D. LANDOLT. *Corrosion Science*. 260. 1998, s. 673-691.
- [38] MYRDAL, Roar. *Corrosion Inhibitors - State of the art*. Norway: SINTEF Building and Infrastructure, 2010.
- [39] MAGDALENA, OSIAL a Daniel WILIŃSKI. *Organic substances as corrosion inhibitors for steel in concrete - an overview*. Polsko: Journal of Building Chemistry, 2016.
- [40] REICHL, Jaroslav. Kapilarita. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/643-kapilarita>
- [41] BLÁHA, Martin a Ladislav BUKOVSKÝ. *Prevence a odstraňování vlhkosti: Izolace*. 2. vyd. ERA vydavatelství, 2006, 112 s. ISBN 80-7366-051-2.
- [42] HAMINGER, Milan. *Difúze*. Brno: Biskupské gymnázium Brno, 2018.
- [43] *Difuze* [online]. 2008 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/5FM/Prednasky/FM%2008.ppt>
- [44] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. 5. přeprac. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005, 244 s. ISBN 80-7080-579-X.
- [45] BULÁNEK, Roman. *Povrchové jevy na pevných látkách*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Katedra fyzikální chemie, 2014, 118 s.
- [46] What Is The Difference Between Physical and Chemical Adsorption?. *VIVADIFFERENCES* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://vivadifferences.com/physical-and-chemical-adsorption/>
- [47] *SIKA FerroGard 903 PLUS: technický list*. b.r.
- [48] *CORTEC MCI-2022: technický list*. b.r.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Míra saturace vody zkušebních dílců.....	38
Tabulka 2: Technická data migrujícího inhibitoru koroze Sika FerroGard 903 Plus [42]	39
Tabulka 3: Technická data migrujícího inhibitoru koroze CORTEC MCI-2022 [43]	39
Tabulka 4: Kombinace jednotlivých faktorů při ponorové zkoušce	42
Tabulka 5: Složení betonových směsí na výrobu nadbetonávky	45
Tabulka 6: Spotřeba MCI na betonové bednicí dílce.....	47
Tabulka 7: Spotřeba MCI na dřevocementové bednicí dílce	48
Tabulka 8: Spotřeba MCI na bednicí dílce z překližované desky a geotextílie	48
Tabulka 9: Spotřeba MCI na zkušebních stěnách	50
Tabulka 10: Hmotnosti výztuží	51
Tabulka 11: Naměřené hodnoty migrace inhibitoru koroze v čase	55
Tabulka 12: Naměřené hodnoty korozních potenciálů po 60 dnech při nepřetržitém ponoru	57
Tabulka 13: Měření inhibiční účinnosti MCI ponorovou zkouškou (60 dnů při nepřetržitém ponoru)	59
Tabulka 14: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	61
Tabulka 15: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	61
Tabulka 16: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	63
Tabulka 17: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	63
Tabulka 18: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	65
Tabulka 19: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	65
Tabulka 20: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B	67
Tabulka 21: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	68

Tabulka 22: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	69
Tabulka 23: Naměřené hmotnosti hodnoty elektrického odporu ocelových výztuží	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Elektrochemická koroze [7]	16
Obrázek 2: Interkrystalická koroze [5]	17
Obrázek 3: Rovnoměrná koroze (1 – původní povrch, 2 – úbytek povrchu po působení koroze) [13]	18
Obrázek 4: Nerovnoměrná koroze [13]	19
Obrázek 5: Důlková koroze [17]	19
Obrázek 6: Bodová koroze [13]	20
Obrázek 7: Mezikrystalová koroze [13]	20
Obrázek 8: Selektivní koroze [13]	21
Obrázek 9: Laminární koroze [20]	21
Obrázek 10: Průběh karbonatace a sulfatace [5]	23
Obrázek 11: Průběh karbonatace železobetonu [22]	23
Obrázek 12: Koroze ocelové výztuže způsobená pronikáním chloridů a narušení betonu [5]	23
Obrázek 13: Koroze výztuže bludnými proudy [5]	24
Obrázek 14: Koroze prvků se zabetonovanými ocelovými segmenty [5]	25
Obrázek 15: Galvanická koroze [7]	25
Obrázek 16: Alkalická pasivace výztuže betonem [5]	29
Obrázek 17: Kapilární elevace [35]	30
Obrázek 18: Difúze kapaliny [38]	31
Obrázek 19: Fyzikální a chemická adsorpce [41]	31
Obrázek 20: Uložení zkušebních dílců v prostředí 70% vlhkosti v klimatizační komoře ERICHSEN	38
Obrázek 21: Přístroj Metrohm Labstat pro polarizační měření s tříelektrodovou korozní celou (elektrochemický článek)	40
Obrázek 22: Pracovní kovová elektroda	41
Obrázek 23: Speciální formy na výrobu vzorků bednicích dílců	43
Obrázek 24: Návrh sestav bednicích systémů	44
Obrázek 25: Jednotlivé sestavy bednicích dílců připravené na betonáž nadbetonávky; A – Bednicí dílec z betonového bednění, B – Bednicí dílec z dřevocementové bednění, C – Bednicí dílec z překližované desky a geotextílie s nižší gramáží, D – Bednicí dílec z překližované desky s geotextílií s vyšší gramáží	45
Obrázek 26: Betonáž nadbetonávky vzorků bednicích dílců a vzorky bednicích dílců po odbednění	46
Obrázek 27: Uložení sestav bednicích dílců ve vlhkém prostředí po dobu 56 dnů zrání betonu	46
Obrázek 28: Zapouzdření výztuže PVC zátkou a silikonem	46
Obrázek 29: Uložení vzorků bednicích dílců v cyklovacím zařízení	46
Obrázek 30: Zařízení pro zrychlené korozní zkoušky [22]	49
Obrázek 31: Měření elektrického odporu přístrojem GOM-805	49

Obrázek 32: Návrh zkušební stěny	50
Obrázek 33: Betonáž betonového ztraceného bednění	52
Obrázek 34: Betonové bednění po aplikaci MCI s uloženými výztužemi připravené na betonáž.....	52
Obrázek 35: Vybetonované ztracené bednění	52
Obrázek 36: Aplikace MCI na vnější stěnu dřevocementového bednění	53
Obrázek 37: Vybetonované dřevocementové bednění.....	53
Obrázek 38: Připravené bednění z OSB desek a geotextílie na aplikaci MCI	54
Obrázek 39: Aplikace MCI na geotextílii.....	54
Obrázek 40: Připravené systémové bednění na betonáž referenční železobetonové stěny.....	54
Obrázek 41: Betonáž a hutnění železobetonové stěny	54
Obrázek 42: Měření migrace inhibitoru koroze pomocí ultrafialového záření po 7 dnech; A – Sika FerroGard 903 PLUS (Laboratorní), B – CORTEC MCI-2022 (Laboratorní), C – Sika FerroGard 903 PLUS (Klimatizační komora), D – CORTEC MCI-2022 (Klimatizační komora).....	56
Obrázek 43: Vliv zvýšení koncentrace inhibitoru CORTEC MCI-2022 z 3 % hm. na 8 % hm. ve vodném prostředí s obsahem chloridů.....	60
Obrázek 44: Vliv zvýšení koncentrace inhibitoru Sika FerroGard 903 PLUS z 0,6 % hm. na 1,6 % hm. ve vodném prostředí s obsahem chloridů.....	60

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Hloubka migrace inhibitoru koroze v čase při různých vlhkostních stavech	55
Graf 2: Korozní diagram systému Sika FerroGard 903 PLUS – ocel B500B, povrch upraven.....	57
Graf 3: Korozní diagram systému Sika FerroGard 903 PLUS – ocel 11 370, povrch částečně zkorodovaný	57
Graf 4: První měření – průběh polarizační křivky, chování oceli ve vodném prostředí bez obsahu MCI v blízkém okolí korozního potenciálu.....	58
Graf 5: Druhé měření – průběh polarizační křivky, chování oceli ve vodném prostředí s obsahem 0,05 mol NaCl a inhibitoru CORTEC MCI-2022 v blízkém okolí korozního potenciálu.....	58
Graf 6: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	62
Graf 7: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	62
Graf 8: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	64
Graf 9: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	64
Graf 10: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	66
Graf 11: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze Sika FerroGard 903 PLUS, nadbetonávkou z betonu třídy C25/30 a ocelovou výztuží B 500B.....	66
Graf 12: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro betonové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B	67
Graf 13: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro dřevocementové bednicí dílce s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B.....	68
Graf 14: Naměřené hodnoty elektrických odporů pro bednicí dílce z překližované desky a geotextílie s inhibitorem koroze CORTEC MCI-2022, nadbetonávkou z betonu třídy C16/20 a ocelovou výztuží B 500B	69
Graf 15: Naměřené hmotnosti a hodnoty elektrických odporů ocelové výztuže ...	70